

- Abdul Haris Humaidi
- Maksum



FISIKA

SMA/MA Kelas XI

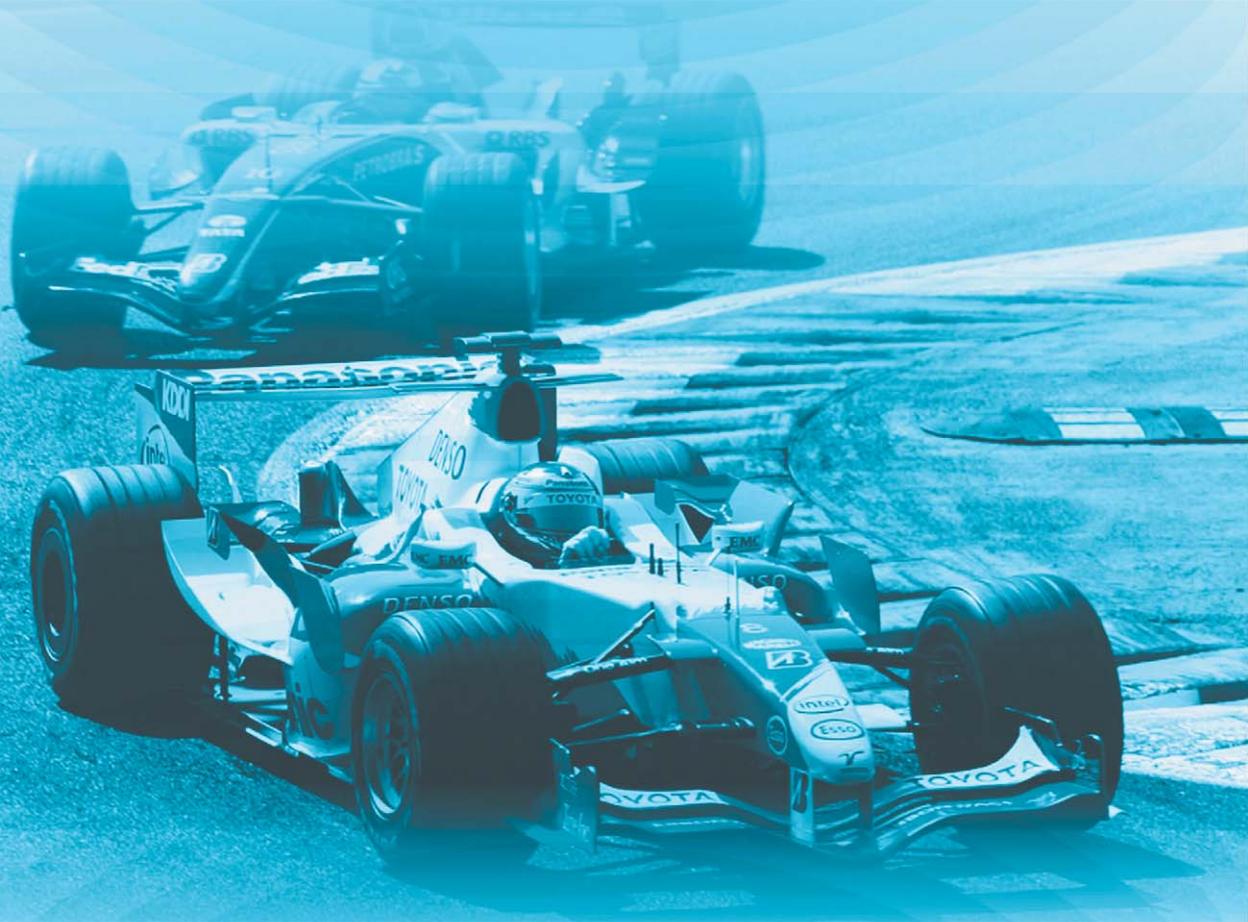


PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Abdul Haris Humaidi
Maksum

FISIKA

SMA/MA Kelas XI



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

Fisika SMA/MA Kelas XI

Penulis: Abdul Haris Humaidi, MaksuM

Editor: Riswandi

Pembaca ahli: Agus Mulyanto

Desainer sampul: Aji Galarso Andoko

Ilustrator: Fakhruddin Hadi, Mukti Ali

Penata letak: Miftah Arifin

Pengarah artistik: Sudaryanto

530.07

ABD

ABDUL Haris Humaidi

f

Fisika : untuk SMA/MA Kelas XI / penulis, Abdul Haris Humaidi. ; editor, Riswandi, ; ilustrator, Fakhruddin Hadi, Mukti Ali .-- Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.

vii, 314 hlm. : illus. ; 25 cm

Bibliografi : hlm. 311-312

Indeks

ISBN: 978-979-068-802-5 (no jilid lengkap)

ISBN: 978-979-068-806-3

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul II Riswandi
III. Fakhruddin Hadi IV Mukti Ali

Hak cipta buku ini telah dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional dari
Penerbit Pustaka Insan Madani

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2009

Diperbanyak oleh ...



Kata Sambutan

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

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 27 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007.

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

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

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

Jakarta, Juni 2009

Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar

Apakah kalian menganggap fisika sebagai mata pelajaran yang rumit? Tentu tidak, bukan? Walaupun fisika mempelajari tentang pelbagai senyawa fisika, reaksi fisika, dan perhitungan fisika, tapi semuanya bisa dipelajari dengan mudah. Apalagi jika didukung dengan penggunaan buku pelajaran yang tepat. Oleh karena itu, kami menghadirkan Seri Fisika SMA/MA ini. Penyajian materi yang lengkap, interaktif, dan dengan beragam contoh kasus menarik, kami harapkan dapat menjadi bekal agar fisika mudah dipahami.

Beragam elemen dan rubrikasi di dalam buku ini antara lain *Apersepsi*, berisi semacam pemanasan sebelum masuk ke materi pelajaran. *Peta Konsep*, yang memuat konsep-konsep inti yang akan diberikan pada setiap bab. *Tujuan Pembelajaran*, yakni uraian singkat memuat target yang ingin dicapai pada setiap bab. *Kata Kunci*, berisi kata-kata yang merupakan inti pembahasan materi dalam bab terkait. *Eksperimen*, yakni praktikum yang dilakukan siswa untuk membuktikan kebenaran materi yang sedang dipelajari. *Ekspedisi*, yaitu tugas individu yang bisa kalian lakukan untuk menambah pengetahuan. Kegiatan ini dapat berupa mencari materi tambahan di buku atau internet, percobaan sederhana, atau tugas proyek. *Mozaik*, berupa informasi tambahan yang terkait dengan materi yang sedang diulas. *Tips & Trik*, yaitu langkah sederhana untuk memudahkan kalian dalam memahami soal serta penjelasan materi. *Teropong*, berisi materi singkat untuk mengingatkan kalian tentang materi yang telah disampaikan sebelumnya. *Eureka*, yakni tugas yang harus dikerjakan secara berkelompok berupa kegiatan diskusi. *Inti Sari*, berisi ringkasan materi dalam satu bab. *Telaah Istilah*, yakni penjelasan kata-kata asing yang ada pada materi yang disampaikan. *Uji Kompetensi*, yang muncul di setiap akhir subbab dan berisi soal-soal untuk menguji kompetensi yang kalian kuasai. *Ulangan Harian*, adalah tes penguasaan materi di setiap akhir bab.

Selain rubrik-rubrik tersebut, masih ada ulangan blok yang meliputi *Latihan Ulangan Tengah Semester*, *Latihan Ulangan Akhir Semester*, dan *Latihan Ujian Kenaikan Kelas*. Ketiganya berfungsi menguji ketercapaian kompetensi.

Demikianlah, buku ini telah kami upayakan agar dapat tampil dengan kualitas maksimal. Untuk itu, kami segenap Tim Penulis Fisika SMA/MA mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, penerbit Pustaka Insan Madani, dan pelbagai pihak yang telah mendukung kami dalam wujud apa pun.

Tim Penulis

Daftar Isi

Kata Sambutan | iii

Kata Pengantar | iv

Daftar Isi | v

Bab I Kinematika Partikel

- A. Gerak Lurus | 2
 - 1. Vektor Posisi | 3
 - 2. Perpindahan dan Kecepatan | 5
 - 3. Percepatan | 10
 - 4. Analisis Gerak Lurus Beraturan (GLB) Berdasarkan Grafik | 16
 - 5. Analisis Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) Berdasarkan Grafik | 17
- B. Gerak Parabola | 22
- C. Gerak Melingkar | 30
 - 1. Posisi Sudut dan Perpindahan Sudut | 31
 - 2. Kecepatan Sudut | 32
 - 3. Percepatan Sudut | 34

Bab II Gravitasi dan Gaya Pegas

- A. Gravitasi | 44
 - 1. Hukum Gravitasi Newton | 45
 - 2. Medan Gravitasi | 47
- B. Penerapan Hukum Gravitasi Newton | 49
 - 1. Hukum Gravitasi Newton pada Sistem Tata Surya | 51
 - 2. Hukum Gravitasi pada Benda-benda di Bumi | 53
 - 3. Hukum Gravitasi pada Sistem Bumi-Satelit | 56
- C. Gaya Pegas | 58
 - 1. Elastisitas | 59
 - 2. Modulus Elastisitas | 59
 - 3. Hukum Hooke | 61
 - 4. Susunan Pegas | 64
- D. Pegas dan Gerak Harmonis Sederhana | 69
 - 1. Besaran-besaran pada Gerak Harmonis Sederhana | 70
 - 2. Bentuk Sinusoidal Gerak Harmonis Sederhana | 71
 - 3. Kecepatan dan Percepatan Getar | 72
 - 4. Periode Getar | 73
- E. Pendulum Sederhana | 75

Latihan Ulangan Tengah Semester I | 81

Bab III Usaha dan Energi

- A. Gaya dan Usaha | 86

- B. Usaha dan Energi | 89
 - 1. Sumber dan Bentuk Energi | 91
 - 2. Energi Kinetik dan Energi Potensial | 92
- C. Gaya Konservatif dan Gaya Disipatif (Pengayaan) | 101
 - 1. Gaya Konservatif dan Medan Konservatif | 101
 - 2. Gaya Disipatif | 104
- D. Hukum Kekekalan Energi | 105
 - 1. Hukum Kekekalan Energi pada Gerak Vertikal | 106
 - 2. Hukum Kekekalan Energi pada Gerak Parabola | 110
 - 3. Hukum Kekekalan Energi untuk Gerak Harmonis Sederhana | 113
 - 4. Hukum Kekekalan Energi untuk Gerak Benda di Bidang Miring | 115
 - 5. Hukum Kekekalan Energi pada Gerak Melingkar | 116
- E. Daya | 120

Bab IV Momentum dan Impuls

- A. Momentum dan Impuls | 128
 - 1. Momentum | 128
 - 2. Impuls dan Perubahan Momentum | 129
- B. Hukum Kekekalan Momentum | 132
- C. Tumbukan | 136
 - 1. Hukum Kekekalan Momentum pada Tumbukan | 136
 - 2. Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada Tumbukan | 136
 - 3. Jenis Tumbukan | 137

Latihan Ulangan Akhir Semester I | 151

Bab V Keseimbangan Benda Tegar

- A. Momen Gaya (Torsi) | 158
 - 1. Pengertian Momen Gaya | 159
 - 2. Momen Gaya Akibat Resultan Beberapa Gaya | 162
- B. Momen Inersia | 164
- C. Momentum Sudut dan Hukum Kekekalan Momentum Sudut | 168
- D. Hukum II Newton pada Gerak Rotasi | 172
 - 1. Momen Gaya pada Katrol | 172
 - 2. Gerak Menggelinding | 175
 - 3. Hukum Kekekalan Energi pada Gerak Rotasi | 177
- E. Keseimbangan Benda Tegar | 181
 - 1. Syarat Keseimbangan | 181
 - 2. Titik Berat | 183
 - 3. Jenis-jenis Keseimbangan | 186

Bab VI Fluida

- A. Fluida Statis | 194
 - 1. Massa Jenis Zat | 195
 - 2. Tekanan Hidrostatik | 196
 - 3. Alat Ukur Tekanan | 200
- B. Hukum-Hukum Dasar Fluida Statis dan Penerapannya | 201
 - 1. Hukum Pascal | 201
 - 2. Hukum Archimedes | 203
- C. Gejala Fluida Statis | 212
 - 1. Tegangan Permukaan | 212
 - 2. Kapilaritas | 214

- 3. Viskositas | 216
- D. Fluida Dinamis | 218
 - 1. Fluida Ideal dan Fluida Sejati | 218
 - 2. Pelbagai Jenis Aliran Fluida | 219
 - 3. Persamaan Kontinuitas | 219
 - 4. Prinsip Bernoulli | 221
 - 5. Penerapan Hukum Dasar Fluida Dinamis dalam Kehidupan Keseharian | 224
- Latihan Ulangan Tengah Semester II | 235

Bab VII Teori Kinetik Gas

- A. Gas Ideal | 240
 - 1. Pengertian Gas Ideal | 241
 - 2. Persamaan Umum Gas Ideal | 241
 - 3. Persamaan Gas Van Der Waals (Pengayaan) | 248
- B. Teori Kinetik Gas | 249
 - 1. Tekanan Gas | 249
 - 2. Energi Kinetik sebagai Fungsi Temperatur | 254
 - 3. Kelajuan rms | 256
- C. Teori Ekuipartisi dan Energi Dalam Gas | 259
 - 1. Teori Ekuipartisi | 259
 - 2. Energi dalam Gas | 261
- D. Penerapan Teori Kinetik Gas | 263
 - 1. Gerak Brown | 263
 - 2. Penguapan | 264
 - 3. Kelembaban | 264
 - 4. Difusi pada Organisme | 265

Bab VIII Termodinamika

- A. Kalor, Usaha, dan Hukum I Termodinamika | 270
 - 1. Hubungan Usaha dan Tekanan | 271
 - 2. Hukum I Termodinamika | 273
 - 3. Kapasitas Kalor dan Kalor Jenis | 275
 - 4. Proses-proses Termodinamika | 280
- B. Siklus Termodinamika | 285
- C. Penerapan Hukum I Termodinamika | 288
 - 1. Mesin Kalor/Mesin Bahang (*Heat Engine*) | 288
 - 2. Mesin Carnot (Siklus Carnot) | 289
 - 3. Mesin Uap | 291
 - 4. Metabolisme Manusia | 292
- D. Hukum II Termodinamika | 292
 - 1. Hukum II Termodinamika | 293
 - 2. Proses Reversibel dan Irreversibel | 294
 - 3. Perubahan Entropi dalam Proses Reversibel (Pengayaan) | 295
 - 4. Perubahan Entropi dalam Proses Irreversibel (Pengayaan) | 296
 - 5. Penerapan Hukum II Termodinamika | 297

- Latihan Ulangan Kenaikan Kelas | 303
- Kunci Jawaban | 307
- Indeks | 310
- Daftar Pustaka | 311
- Lampiran | 313

B a b I

Kinematika Partikel



Microsoft Encarta Premium 2006

Michael Schumaker, Fernando Alonso, Kimi Raikkonen, dan sederet nama lainnya mungkin bukanlah nama yang asing bagi penggemar arena balap F-1. Arena balap F-1 merupakan ajang adu kecepatan paling bergengsi di dunia. Di ajang balap ini, para pembalap bertanding untuk menjadi yang tercepat. Salah satu konsep fisika yang dapat dipelajari dari arena balap F-1 adalah Kinematika Partikel. Kalian ingin tahu lebih banyak mengenai konsep fisika yang mendasari arena balap F-1 ini? Untuk itu, pelajarilah materi di bab ini dengan sungguh-sungguh.

Kata Kunci

- Gerak
- Vektor posisi
- Perpindahan
- Kecepatan
- Percepatan
- Posisi sudut
- Kecepatan Sudut
- Percepatan Sudut

Di bab Kinematika Partikel ini, kalian akan dibimbing untuk menganalisis gerak benda menggunakan vektor. Di kelas X kalian telah mempelajari gerak lurus, baik GLB maupun GLBB, dan gerak melingkar. Nah, di bab ini kalian akan memperdalam materi tersebut melalui analisis vektor.

Dengan begitu, kalian diharapkan mampu menganalisis besaran perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada gerak lurus, serta besaran kecepatan dan percepatan pada gerak melingkar menggunakan analisis vektor. Selain itu, kalian juga di harapkan mampu menganalisis vektor percepatan tangensial dan percepatan sentripetal pada gerak melingkar. Satu hal lagi yang belum dibahas di kelas X adalah mengenai gerak parabola. Dengan percobaan sederhana, kalian akan mengetahui karakteristik gerak parabola dan hubungannya dengan GLB dan GLBB. Kemampuan untuk menganalisis besaran perpindahan dan kecepatan pada gerak parabola menggunakan vektor.

A Gerak Lurus

Dari arena balap F-1, kita dapat belajar banyak tentang konsep fisika. Salah satu konsep yang mendasari arena balap F-1 adalah gerak. Selain itu, juga terdapat beberapa konsep lainnya. Ketika mobil sedang melaju, kita dapat mempelajari besaran jarak, kecepatan, dan percepatan. Ketika meninjau gerak roda mobil, kita dapat mempelajari konsep gerak melingkar. Dalam gerak melingkar, kita dapat mempelajari besaran periode, frekuensi, kecepatan sudut, dan percepatan sudut. Besaran-besaran tersebut sebenarnya telah dipelajari di kelas X.

Untuk itu, kalian perlu mengingat kembali pengertian vektor, gerak lurus, dan gerak melingkar. Untuk membantu menyegarkan ingatan kalian mengenai konsep tersebut, coba diskusikan jawaban pertanyaan pada *Eureka* di bawah ini.

Eureka

Diskusikanlah dengan teman di sampingmu, jawaban dari pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Bilamanakah benda dikatakan bergerak?
2. Coba jelaskan perbedaan jarak dan perpindahan.
3. Bagaimanakah cara menyatakan sebuah vektor dalam vektor satuan? Gambarkan satu vektor pada koordinat kartesian, lengkap dengan vektor satuannya.
4. Tuliskan persamaan kedudukan, kelajuan, kecepatan, dan percepatan pada GLB, GLBB, serta gerak melingkar.

Bandingkan jawabannya dengan jawaban dari siswa lainnya. Kemudian konsultasikan dengan guru kalian.

Dari hasil diskusi pada eureka tersebut, kalian telah membedakan pengertian beberapa besaran, antara lain jarak, perpindahan, kelajuan, dan kecepatan. Secara awam, jarak dan perpindahan adalah sama. Namun, ditinjau dari sudut pandang fisika, keduanya merupakan dua hal yang berbeda. Jarak termasuk besaran skalar, sedangkan perpindahan termasuk besaran vektor. Demikian pula, perbedaan kelajuan dan kecepatan. Kelajuan merupakan besaran skalar, sedangkan kecepatan merupakan besaran vektor.

Di subbab ini, kita akan menganalisis gerak lurus. Dalam menganalisis gerak lurus menggunakan vektor, kita memerlukan beberapa besaran, antara lain vektor posisi, perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Untuk mengetahui keterkaitan antar besaran tersebut, pelajailah uraian berikut.

1. Vektor Posisi

Untuk memahami pengertian vektor posisi, coba perhatikan sebuah benda yang menempel di tembok, misalnya seekor cicak. Ditinjau dari sebuah sudut (kita ambil sudut kiri bawah), cicak tersebut berada pada jarak mendatar x meter, dan ketinggian y meter. Jika sudut tersebut kita anggap sebagai pusat koordinat, maka cicak tersebut berada pada koordinat (x,y) .

Vektor posisi menyatakan kedudukan sebuah partikel ditinjau dari pusat koordinat. Vektor posisi dinyatakan dalam vektor satuan. Misalnya, titik dimana cicak berada kita beri tanda P. Titik P berada pada koordinat (x,y) , maka vektor posisi titik P dapat kalian lihat pada Gambar 1.1.

Berdasarkan gambar tersebut, titik P dapat dinyatakan dalam vektor posisi sebagai berikut.

$$\vec{OP} = \vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j}$$

Keterangan:

$\vec{OP} = \vec{r}$ = vektor posisi

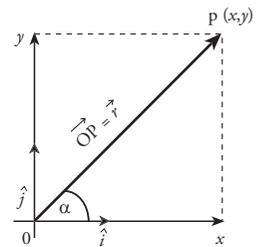
\hat{i} = vektor satuan searah sumbu x

\hat{j} = vektor satuan searah sumbu y

Besar/panjang \vec{r} menyatakan jarak titik P ke pusat koordinat yang dapat dicari dengan rumus besar vektor.

$$|\vec{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Untuk membantu kalian memahami pengertian vektor posisi, perhatikan contoh berikut.



Gambar 1.1 Titik P dinyatakan dengan vektor posisi \vec{r} atau \vec{OP}

Teropong

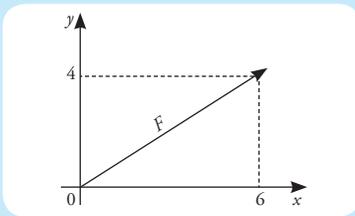
Di kelas X, kalian telah mempelajari cara menguraikan vektor. Berdasarkan gambar 1.1, komponen vektor x dan y dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$x = r \cos \alpha, \text{ dan}$$

$$y = r \sin \alpha$$

Contoh

1. Posisi sebuah benda digambarkan dalam koordinat, seperti gambar.



- Nyatakan vektor posisi benda tersebut.
- Berapakah jarak benda tersebut dari pusat koordinat?

Penyelesaian:

Diketahui: (*Lihat gambar*)

Ditanyakan:

- \vec{r}
- $|\vec{r}|$

Jawab:

- Dari gambar tersebut, benda berada pada koordinat P(6,4) sehingga vektor posisi benda tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\vec{r} = 6\hat{i} + 4\hat{j}$$

- Jarak benda dari pusat koordinat dinyatakan dengan besar vektor \vec{r} .

$$\begin{aligned} |\vec{r}| = r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ &= \sqrt{6^2 + 4^2} \\ &= \sqrt{36 + 16} \\ &= \sqrt{52} \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, jarak benda dari pusat koordinat adalah $\sqrt{52}$ m.

2. Sebuah paku berada di tembok berukuran 6 m × 8 m. Sebuah benang diikat di paku, kemudian ditarik menuju sudut bagian kiri bawah. Panjang benang 5 meter dan membentuk sudut 30° terhadap arah mendatar. Bagaimanakah kita menyatakan vektor posisi paku tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui:

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

$$\alpha = 30^\circ$$

Ditanyakan: \vec{r}

Jawab:

Untuk menyatakan posisi benda dalam vektor posisi, kita harus mencari x dan y terlebih dahulu.

$$\begin{aligned} x &= r \cos \alpha \\ &= 5 \cos 30^\circ \\ &= 5 \times \frac{1}{2} \sqrt{3} \\ &= 2,5\sqrt{3} \\ y &= r \sin \alpha \\ &= 5 \sin 30^\circ \\ &= 5 \times \frac{1}{2} \\ &= 2,5 \end{aligned}$$

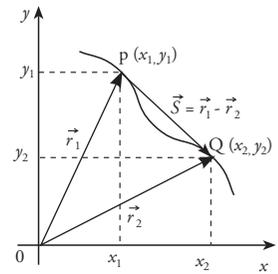
Dari persamaan di atas, vektor posisi paku dinyatakan dengan,

$$\vec{r} = 2,5\sqrt{3}\hat{i} + 2,5\hat{j}$$

Ketika vektor posisi sebuah benda berubah, dikatakan benda mengalami perpindahan. Di kelas X, kalian telah mempelajari hubungan perpindahan dengan kecepatan. Dengan demikian, kecepatan juga berhubungan dengan vektor posisi. Bagaimanakah bentuk hubungan kecepatan dan vektor posisi?

2. Perpindahan dan Kecepatan

Masih mengambil contoh cicak di dinding. Semula cicak berada di titik $P(x_1, y_1)$ dengan vektor posisi \vec{r}_1 . Kemudian cicak bergerak, sehingga berada di titik $Q(x_2, y_2)$ dalam selang waktu tertentu. Vektor posisi di titik Q dinyatakan dengan \vec{r}_2 . Perhatikan Gambar 1.2. Dari gambar tersebut, benda bergerak dari titik P ke titik Q , berarti benda mengalami perpindahan dari P ke Q .



Gambar 1.2 Perpindahan benda dinyatakan sebagai perubahan vektor posisi.

a. Menyatakan Perpindahan Dalam Vektor Posisi

Dari Gambar 1.2, perpindahan dari titik P ke titik Q dinyatakan sebagai perubahan vektor posisi. Perpindahan benda dari P ke Q dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\vec{s} &= \Delta \vec{r} \\ &= \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \\ \vec{s} &= (x_2 \hat{i} + y_2 \hat{j}) - (x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j}) \\ &= (x_2 - x_1) \hat{i} + (y_2 - y_1) \hat{j}\end{aligned}$$

$$\vec{s} = \Delta x \hat{i} + \Delta y \hat{j}$$

Keterangan:

\vec{s} = perpindahan (m)

$\Delta x = x_2 - x_1$ = perubahan posisi pada sumbu x

$\Delta y = y_2 - y_1$ = perubahan posisi pada sumbu y

b. Menyatakan Kecepatan Dalam Vektor Posisi

Kecepatan rata-rata didefinisikan sebagai perpindahan per selang waktu tertentu. Jadi, kecepatan rata-rata dinyatakan sebagai:

$$\vec{v}_{\text{rata-rata}} = \frac{\vec{s}}{\Delta t}$$

dengan mensubstitusikan persamaan \vec{s} , kita mendapatkan bentuk persamaan:

$$\vec{v}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta x \hat{i} + \Delta y \hat{j}}{\Delta t}$$

$$\vec{v}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \hat{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \hat{j}$$

Sekarang kita tinjau komponen kecepatan pada sumbu x dan sumbu y , di mana:

$$\vec{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \hat{i} \quad \text{dan} \quad \vec{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \hat{j}$$

Dari persamaan tersebut, secara umum vektor kecepatan dapat dituliskan sebagai berikut:

Teropong

- Di kelas X, kecepatan sesaat dinyatakan dengan limit perubahan kedudukan (perpindahan) dalam selang waktu mendekati nol ($\Delta t \rightarrow 0$), yang dinyatakan dengan rumus,

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{d}}{\Delta t}$$

- Di kelas XI, pada pelajaran matematika, kalian akan mempelajari materi diferensial/turunan. Rumus umum untuk mencari turunan sebagai berikut.

$$\frac{d(a t^n)}{dt} = (a \times n) t^{n-1}$$

Contoh:

$$\frac{d(3t^3)}{dt} = (3 \times 3) t^{3-1} = 9t^2$$

$$\vec{v} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j}$$

Keterangan:

\vec{v} = vektor kecepatan

v_x = komponen vektor kecepatan pada sumbu x

v_y = komponen vektor kecepatan pada sumbu y

Selain kecepatan rata-rata, kita juga mengenal kecepatan sesaat. Bagaimanakah persamaan kecepatan sesaat dalam vektor posisi? Berdasarkan persamaan kecepatan sesaat (perhatikan teropong), kita dapat mencari persamaannya dengan mengganti kedudukan (d) dengan vektor posisi (\vec{r}). Jadi, kecepatan sesaat sebagai fungsi vektor posisi dirumuskan sebagai berikut.

$$\vec{v}_{\text{sesaat}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

$$\vec{v}_{\text{sesaat}} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Persamaan $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ menyatakan bahwa kecepatan merupakan turunan/ differensial vektor posisi terhadap waktu. Dengan kata lain, kecepatan merupakan fungsi waktu, dan dapat dituliskan sebagai $\vec{v}(t)$. Secara umum, kecepatan sebagai fungsi waktu dituliskan dalam bentuk:

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

$$= \frac{d(x\hat{i} + y\hat{j})}{dt}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{dx}{dt} \hat{i} + \frac{dy}{dt} \hat{j}$$

Untuk memudahkan kalian dalam memahami penjelasan tersebut, perhatikan contoh berikut.

Tips & Trik

Pada perkalian bilangan berpangkat berlaku sifat-sifat berikut.

$$(ab)^2 = a^2 b^2$$

$$\sqrt{a^2} = a$$

$$\sqrt{ab^2} = b\sqrt{a}$$

Yang perlu diperhatikan,

$$(a+b)^2 \neq a^2 + b^2 \text{ dan}$$

$$\sqrt{a^2 + b^2} \neq a + b$$

Contoh

1. Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan tertentu. Posisi mobil dalam setiap waktu dinyatakan dengan persamaan $\vec{r} = 3t\hat{i} + 4t\hat{j}$, dengan r dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan:
 - a. posisi mobil pada saat $t = 1$ s,
 - b. posisi mobil pada saat $t = 5$ s,
 - c. kecepatan mobil pada saat $t = 1$ s, dan pada saat $t = 5$ s,
 - d. kecepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ s dan $t = 5$ s.

Penyelesaian:

Diketahui: $\vec{r} = 3t\hat{i} + 4t\hat{j}$

Ditanyakan:

- a. r pada saat $t = 1$ s
- b. r pada saat $t = 5$ s
- c. v pada saat $t = 1$ s dan pada saat $t = 5$ s
- d. $v_{\text{rata-rata}}$ untuk selang waktu $t = 1$ s dan $t = 5$ s.

Jawab:

- a. Untuk mencari posisi mobil pada waktu t , kita tinggal mensubstitusikan nilai t ke persamaan posisi.

$$\vec{r} = 3t\hat{i} + 4t\hat{j}$$

Untuk $t = 1$ s, persamaan vektor posisinya adalah:

$$\begin{aligned}\vec{r} &= 3(1)\hat{i} + 4(1)\hat{j} \\ &= 3\hat{i} + 4\hat{j}\end{aligned}$$

- b. Untuk $t = 5$ s, persamaan posisinya adalah:

$$\begin{aligned}\vec{r} &= 3(5)\hat{i} + 4(5)\hat{j} \\ &= 15\hat{i} + 20\hat{j}\end{aligned}$$

- c. Untuk mencari kecepatan pada saat t (kecepatan sesaat), kita bisa menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \frac{d\vec{r}}{dt} \\ &= \frac{d(3t\hat{i} + 4t\hat{j})}{dt} \\ &= 3\hat{i} + 4\hat{j}\end{aligned}$$

Besarnya kecepatan dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned}|v| &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ &= \sqrt{3^2 + 4^2} \\ &= \sqrt{25} \\ &= 5 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Dari persamaan kecepatan pada poin c, kecepatan benda tidak tergantung pada waktu. Dengan kata lain, kecepatan benda selalu sama setiap saat. Dengan demikian, kecepatan benda pada saat $t = 1$ s dan pada saat $t = 5$ s adalah sama yaitu 5 m/s.

- d. Sama halnya dengan kecepatan sesaat, kecepatan rata-rata benda tersebut adalah 5 m/s.

c. Mencari Vektor Posisi dari Vektor Kecepatan

Jika kecepatan sebagai fungsi waktu diketahui, kita dapat mencari persamaan vektor posisi dengan operasi integral. Persamaan vektor kecepatan sebagai fungsi waktu, yang telah kalian pelajari, dirumuskan sebagai berikut.

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

atau dapat dituliskan dalam bentuk,

$$\vec{v} dt = d\vec{r}$$

Jika kedua ruas diintegrasikan, kita akan mendapatkan persamaan vektor posisi.

$$\int \vec{v} dt = \int_{r_0}^{r_t} d\vec{r}$$

$$\int \vec{v} dt = \vec{r}_t - \vec{r}_0$$

Dari persamaan tersebut, vektor posisi pada waktu t (\vec{r}_t) dinyatakan sebagai berikut.

$$\vec{r}_t = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{v} dt$$

Keterangan:

\vec{r}_t = vektor posisi pada saat t

\vec{r}_0 = vektor posisi mula-mula

Jika $t_0 = 0$, dan v konstan (GLB), didapatkan persamaan vektor posisi setiap waktu sebagai berikut.

$$\vec{r}_t = \vec{r}_0 + \vec{v} t$$

Teropong

Integral merupakan kebalikan dari differensial/turunan. Untuk menyelesaikan integral, kita bisa menggunakan persamaan berikut.

$$\int (p t^n) dt = \frac{1}{n+1} p t^{n+1} + c$$

Jika integral dibatasi, maka berlaku persamaan berikut.

$$\int_a^b (p t^n) dt = \frac{1}{n+1} p (b^{n+1} - a^{n+1})$$

Contoh

Perhatikan contoh berikut.

- Sebuah mobil bergerak dengan persamaan kecepatan $\vec{v} = (4t \hat{i} + 8t \hat{j})$ m/s. Seseorang melihat mobil tersebut bergerak dari koordinat (5,10) m. Nyatakan posisi mobil pada saat $t = 1$ s dan $t = 3$ s.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$\vec{v} = (4t \hat{i} + 8t \hat{j}) \text{ m/s}$$

Posisi awal pada koordinat (5,10)

Ditanyakan: \vec{r}_t untuk $t = 1$ s dan $t = 3$ s

Jawab: Posisi awal mobil pada koordinat (5,10), berarti $\vec{r}_0 = 5 \hat{i} + 10 \hat{j}$.

$$\begin{aligned} \vec{r}_t &= \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{v} dt \\ &= (5 \hat{i} + 10 \hat{j}) + \int_0^t (4t \hat{i} + 8t \hat{j}) dt \\ &= (5 \hat{i} + 10 \hat{j}) + \left(\frac{1}{2} \times 4t^2 \hat{i} + \frac{1}{2} \times 8t^2 \hat{j} \right) \\ &= (5 \hat{i} + 10 \hat{j}) + (2t^2 \hat{i} + 4t^2 \hat{j}) \\ &= (5 + 2t^2) \hat{i} + (10 + 4t^2) \hat{j} \end{aligned}$$

Untuk $t = 1$ s, maka:

$$\vec{r} = (5+2)\hat{i} + (10+4)\hat{j} \\ = 7\hat{i} + 14\hat{j}$$

Jadi, vektor posisi mobil pada saat $t = 1$ s adalah $7\hat{i} + 14\hat{j}$.

Untuk $t = 3$ s, maka:

$$\vec{r} = (5+2 \times 3^2)\hat{i} + (10+4 \times 3^2)\hat{j} \\ = 23\hat{i} + 46\hat{j}$$

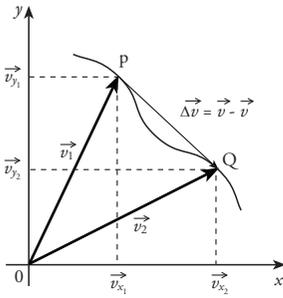
Jadi, vektor posisi mobil pada saat $t = 3$ s adalah $23\hat{i} + 46\hat{j}$.

Bagaimana, mudah bukan? Untuk menambah pengetahuan kalian, kerjakan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

- Gambarkan dan nyatakan vektor posisi setiap titik pada bidang kartesius berikut.
 - A(4,5)
 - B(-6,10)
 - C(-7,-2)
 - D(5,-3)
- Sebuah benda semula berada pada koordinat A(2,0). Setelah 5 detik benda tersebut berada pada koordinat B(0,8). Tentukan besar kecepatan gerak benda tersebut.
- Arman melihat seekor burung di sebuah pohon kelapa pada ketinggian 6 meter yang berada di sebelah timurnya pada jarak 8 meter. 10 detik kemudian, burung tersebut telah berada di atas pohon akasia pada ketinggian 10 meter. Pohon akasia tersebut berada di sebelah selatan Abdullah pada jarak 14 m. Hitunglah kecepatan terbang burung tersebut. Petunjuk: anggap Arman sebagai pusat koordinat.
- Seorang pembalap F-1 melaju dengan kecepatan yang selalu berubah setiap waktu. Kecepatan pembalap dinyatakan dengan persamaan $\vec{v} = (-12t\hat{i} - 16t^2\hat{j})$ m/s. Hitunglah posisi pembalap pada saat $t = 10$ detik.
- Posisi seorang atlet marathon yang sedang berlari dinyatakan dengan persamaan $\vec{r} = (3+4t)\hat{i} - 5t^2\hat{j}$, dengan r dalam meter, dan t dalam detik. Tentukan kecepatan pelari tersebut setelah berlari selama 5 detik.
- Sebuah mobil bergerak dengan persamaan kecepatan $\vec{v} = (3t+4)\hat{i} - 3\hat{j} + (3t-2)\hat{j}$. Tentukan vektor posisi mobil pada saat $t = 5$ detik.

Besaran yang berkaitan erat dengan kecepatan adalah percepatan. Kecepatan dan percepatan merupakan besaran vektor. Dengan demikian, percepatan juga dapat dianalisis menggunakan vektor. Kalian ingin mengetahui tentang analisis vektor untuk mencari persamaan percepatan? Simaklah uraian di bawah ini.



Gambar 1.3 Resultan v_2 dengan v_1 (Δv) pada selang waktu tertentu menunjukkan percepatan.

Teropong

Vektor **percepatan** merupakan turunan vektor **kecepatan**. Sementara vektor **kecepatan** merupakan turunan vektor **posisi**. Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa vektor **percepatan** merupakan turunan dari turunan vektor **posisi**.

Dalam bahasa matematika vektor percepatan dituliskan sebagai berikut.

$$\vec{a} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right)$$

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

3. Percepatan

Percepatan didefinisikan sebagai perubahan kecepatan per selang waktu tertentu. Percepatan merupakan besaran vektor yang mempunyai besar dan arah. Bagaimanakah persamaan percepatan gerak dengan menggunakan analisis vektor?

a. Menyatakan Vektor Percepatan dalam Vektor Kecepatan

Coba kalian baca kembali cerita pada awal sub-subbab kecepatan di depan. Pada sub-subbab tersebut, kita mengambil contoh seekor cicak yang bergerak di dinding dengan lintasan tertentu. Pada saat bergerak, cicak tersebut mempunyai kecepatan di setiap titik. Misalnya, kecepatan cicak saat di titik P adalah v_1 , dan kecepatan di titik Q adalah v_2 .

Vektor kecepatan dan vektor posisi di titik P dan Q digambarkan dalam bidang kartesius seperti Gambar 1.3. Dari gambar tersebut dan dari definisi percepatan sebagai perubahan kecepatan pada selang waktu tertentu, percepatan rata-rata dapat dirumuskan:

$$\vec{a}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

$$= \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1}$$

Dengan cara yang sama pada saat mencari kecepatan rata-rata, kita mendapatkan rumus percepatan rata-rata sebagai berikut.

$$\vec{a}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta \vec{v}_x \hat{i} + \Delta \vec{v}_y \hat{j}}{\Delta t}$$

Lalu, bagaimanakah rumus untuk mencari percepatan pada waktu t ? Percepatan pada waktu t merupakan percepatan sesaat. Di kelas X, kalian telah mengetahui rumus percepatan sesaat sebagai berikut.

$$\vec{a}_{\text{sesaat}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Persamaan ini dapat dituliskan dalam bentuk diferensial,

$$\vec{a}_{\text{sesaat}} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Dengan mensubstitusikan $\vec{v} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j}$, vektor percepatan pada waktu t dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\vec{a} = \frac{d(v_x \hat{i} + v_y \hat{j})}{dt}$$

$$\vec{a} = \frac{dv_x}{dt} \hat{i} + \frac{dv_y}{dt} \hat{j}$$

Komponen percepatan pada sumbu x dan sumbu y adalah:

$$\vec{a}_x = \frac{d\vec{v}_x}{dt} \hat{i} \quad \text{dan} \quad \vec{a}_y = \frac{d\vec{v}_y}{dt} \hat{j}$$

Jadi, vektor percepatan dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\vec{a} = \vec{a}_x \hat{i} + \vec{a}_y \hat{j}$$

Bagaimanakah kita menggunakan persamaan percepatan untuk menyelesaikan permasalahan gerak benda? Untuk mengetahuinya perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

1. Seseorang berjalan dengan kecepatan yang selalu berubah setiap waktu. Kecepatan orang tersebut dinyatakan dengan persamaan $\vec{v} = 5t \hat{i} + 12t \hat{j}$, v dalam m/s dan t dalam s.
 - a. Tuliskan persamaan percepatan pada waktu t .
 - b. Tentukan besar percepatan pada $t = 1$ s dan pada $t = 3$ s.
 - c. Tentukan besar percepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ s dan $t = 3$ s.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$\vec{v} = 5t \hat{i} + 12t \hat{j} \text{ m/s}$$

Ditanyakan:

- a. \vec{a} pada waktu t
- b. $|\vec{a}|$ pada saat $t = 1$ s dan $t = 3$ s
- c. $a_{\text{rata-rata}}$ pada selang waktu $t = 1$ s dan $t = 3$ s

Jawab:

- a. Percepatan pada waktu t merupakan percepatan sesaat, sehingga dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \frac{d\vec{v}}{dt} \\ &= \frac{d(5t \hat{i} + 12t \hat{j})}{dt} \\ &= 5 \hat{i} + 12 \hat{j} \end{aligned}$$

Jadi, persamaan percepatan setiap waktu adalah $\vec{a} = 5i + 12j$

- b. Dari persamaan percepatan pada poin a, percepatan tidak tergantung waktu. Sehingga, besar percepatan setiap saat selalu tetap/konstan. Besar percepatannya dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} |\vec{a}| &= \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \\ &= \sqrt{5^2 + 12^2} \\ &= \sqrt{25 + 144} \\ &= \sqrt{169} \\ &= 13 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Jadi, besar percepatan pada $t = 1$ s dan $t = 3$ s adalah sama yaitu 13 m/s^2 .

- c. Besar percepatan rata-rata dapat dicari dengan persamaan:

$$|a_{\text{rata-rata}}| = \frac{v_3 - v_1}{t_3 - t_1}$$

dengan

$$\vec{v}_3 = (5 \times 3)\hat{i} + (12 \times 3)\hat{j}$$

$$\begin{aligned} |\vec{v}_3| = v_3 &= \sqrt{15^2 + 36^2} \\ &= \sqrt{1.521} \\ &= 39 \end{aligned}$$

dan

$$\vec{v}_1 = (5 \times 1)\hat{i} + (12 \times 1)\hat{j}$$

$$\begin{aligned} |\vec{v}_1| = v_1 &= \sqrt{5^2 + 12^2} \\ &= \sqrt{169} \\ &= 13 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} |a_{\text{rata-rata}}| &= \frac{39 - 13}{3 - 1} \\ &= 13 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Jadi, percepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ s dan $t = 3$ s adalah 13 m/s^2 .

2. Posisi sebuah pesawat terbang berubah setiap waktu yang dinyatakan dengan persamaan $\vec{r} = (10t^3 \hat{i})\text{m}$. Tentukan :
- persamaan vektor kecepatan pada setiap waktu,
 - persamaan vektor percepatan setiap waktu,
 - besar kecepatan pada $t = 1$ s dan pada $t = 5$ s,
 - besar percepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ s sampai $t = 5$ s.

Penyelesaian:

Diketahui: $\vec{r} = (10t^3 \hat{i}) \text{ m}$

Ditanyakan:

- \vec{v}
- \vec{a}

- $|\vec{v}|$ untuk $t = 1$ s, dan untuk $t = 2$ s
- $|\vec{a}|_{\text{rata-rata}}$ untuk selang waktu $t = 1$ s sampai $t = 5$ s

Jawab:

- a. kecepatan setiap waktu merupakan kecepatan sesaat

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \frac{d\vec{r}}{dt} \\ &= \frac{d(10t^3 \hat{i})}{dt} \\ &= (30t^2 \hat{i}) \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan pesawat setiap waktu dinyatakan dengan persamaan

$$\vec{v} = (30t^2 \hat{i}) \text{ m/s.}$$

- b. Percepatan setiap waktu merupakan percepatan sesaat.

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \frac{d\vec{v}}{dt} \\ &= \frac{d(30t^2 \hat{i})}{dt} \\ &= (60t \hat{i}) \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

- c. Persamaan kecepatan pada saat $t = 1$ s adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \vec{v}_1 &= 30t^2 \hat{i} \\ &= (30 \times 1^2) \hat{i} \\ &= 30 \hat{i} \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sehingga, besar kecepatan pada $t = 1$ s adalah 30 m/s^2 .

Persamaan kecepatan pada saat $t = 2$ s adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \vec{v}_2 &= (30 \times 2^2) \hat{i} \\ &= 120 \hat{i} \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Sehingga, besar kecepatan pada $t = 2$ s adalah 120 m/s^2 .

d. Percepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ s sampai $t = 2$ s dicari dengan persamaan sebagai berikut.

$$|a_{\text{rata-rata}}| = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

$$= \frac{120 - 30}{2 - 1}$$

$$= 90 \text{ m/s}^2$$

Jadi, percepatan rata-rata pada selang $t = 1$ s sampai $t = 2$ s adalah 90 m/s^2 .

b. Mencari Vektor Kecepatan dari Vektor Percepatan

Jika diketahui persamaan percepatan sebagai fungsi waktu, kita bisa mencari persamaan kecepatannya. Dari penjelasan sebelumnya, kita mendapatkan persamaan vektor percepatan sebagai berikut.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$d\vec{v} = \vec{a} dt$$

Jika kedua ruas diintegrasikan, kita mendapatkan persamaan:

$$\int_{\vec{v}_0}^{\vec{v}_t} d\vec{v} = \int_0^t \vec{a} dt$$

$$\vec{v}_t - \vec{v}_0 = \int_0^t \vec{a} dt$$

Dari persamaan tersebut, vektor kecepatan pada saat t dapat dicari dengan rumus berikut.

$$\vec{v}_t = \vec{v}_0 + \int_{t_0}^t \vec{a} dt$$

Keterangan:

\vec{r}_t = vektor posisi pada saat t
 \vec{r}_0 = vektor posisi mula-mula

Untuk $t_0 = 0$, didapatkan persamaan kecepatan pada waktu t sebagai berikut.

$$\vec{v}_t = \vec{v}_0 + \vec{a} t$$

Jika kalian perhatikan, persamaan tersebut sama dengan persamaan pada gerak lurus berubah beraturan (GLBB) yang telah kalian pelajari. Untuk memahami penerapan persamaan tersebut, perhatikan contoh berikut.

Tips & Trik

Untuk menyelesaikan soal yang berkaitan dengan vektor, ikutilah langkah berikut.

1. Tentukan satu titik sebagai pusat koordinat. Titik ini dapat dianggap sebagai titik acuan.
2. Gambarkan vektor yang dimaksud pada bidang koordinat.
3. Uraikan vektor tersebut pada sumbu x dan sumbu y.

Contoh

Sebuah pesawat bergerak ke arah tenggara dengan percepatan konstan 10 m/s^2 dan membentuk sudut 60° dari arah timur. Jika kecepatan pesawat mula-mula 40 m/s , tentukan:

- persamaan vektor percepatan dengan arah utara sebagai sumbu y positif, dan arah timur sebagai sumbu x positif,
- persamaan vektor kecepatan awal,
- persamaan vektor kecepatan pada saat $t = 10$ detik.

Penyelesaian:

Diketahui:

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

$$\alpha = 60^\circ$$

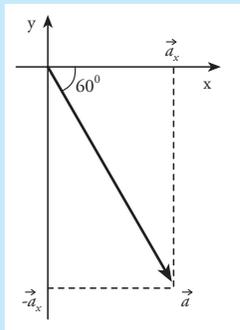
$$v_0 = 40 \text{ m/s}$$

Ditanyakan:

- \vec{a}
- \vec{v}_0
- \vec{v}_t untuk $t = 10$ detik.

Jawab:

Sebelum menjawab pertanyaan, ada baiknya jika kalian menggambar skema perjalanan pesawat terlebih dahulu dalam bidang kartesius. Gerak pesawat dapat digambarkan sebagai berikut.



- Untuk mencari persamaan percepatan, terlebih dahulu kita mencari a_x dan a_y . Berdasarkan gambar di atas, a_x dan a_y dicari dengan persamaan:

$$a_x = a \cos \alpha$$
$$= 10 \cos 60^\circ$$

$$= 10 \times \frac{1}{2}$$
$$= 5 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = a \sin \alpha$$
$$= 10 \sin 60^\circ$$

$$= 10 \times \frac{1}{2} \sqrt{3}$$
$$= 5\sqrt{3} \text{ m/s}^2$$

Arah a_x searah dengan sumbu x positif, sehingga arahnya positif (\hat{i}). Akan tetapi, arah a_y searah dengan sumbu y negatif, sehingga arahnya negatif ($-\hat{j}$). Dengan demikian persamaan vektor percepatannya adalah

$$\vec{a} = (5\hat{i} - 5\sqrt{3}\hat{j}) \text{ m/s}^2.$$

- Kecepatan dan percepatan mempunyai arah yang sama, sehingga kita bisa mencari v_{x0} dan v_{y0} sebagai berikut.

$$v_{x0} = v_0 \cos \alpha$$
$$= 40 \cos 60^\circ$$

$$= 40 \times \frac{1}{2}$$
$$= 20 \text{ m/s}$$

$$v_{y0} = v_0 \sin \alpha$$
$$= 40 \sin 60^\circ$$

$$= 40 \times \frac{1}{2} \sqrt{3}$$
$$= 20\sqrt{3} \text{ m/s}^2$$

Jadi, persamaan kecepatan awal adalah

$$\vec{v}_0 = (20\hat{i} - 20\sqrt{3}\hat{j}) \text{ m/s}.$$

- c. Untuk mencari kecepatan pada waktu t , kita dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\vec{v}_t &= \vec{v}_0 + \int \vec{a} dt \\ &= (20\hat{i} - 20\sqrt{3}\hat{j}) + \int (5\hat{i} - 5\sqrt{3}\hat{j}) dt \\ &= (20\hat{i} - 20\sqrt{3}\hat{j}) + (5t\hat{i} - 5t\sqrt{3}\hat{j}) \\ &= (20 + 5t)\hat{i} - (20\sqrt{3} + 5t\sqrt{3})\hat{j}\end{aligned}$$

Untuk $t = 10$ detik,

$$\begin{aligned}\vec{v} &= (20 + 5 \times 10)\hat{i} - (20\sqrt{3} + 5 \times 10\sqrt{3})\hat{j} \\ \vec{v} &= 70\hat{i} - 70\sqrt{3}\hat{j}\end{aligned}$$

Jadi, persamaan kecepatan pada saat $t=10$ detik adalah $\vec{v} = 70\hat{i} - 70\sqrt{3}\hat{j}$ m/s.

Menarik bukan? Nah, sebagai ajang latihan kalian, kerjakan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

1. Diketahui persamaan percepatan adalah $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, dan $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$.

Dengan mengintegrasikan kedua persamaan tersebut, buktikanlah bahwa vektor posisi pada waktu t dapat dicari dengan persamaan:

$$\vec{r}_t = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2$$

2. Kecepatan partikel yang bergerak pada bidang kartesius dinyatakan dengan persamaan $\vec{v} = (5t^2\hat{i} - (4 - 2t)\hat{j})$ m/s. Tentukan :
- besar kecepatan saat $t = 3$ s,
 - persamaan percepatan partikel pada saat $t = 3$ s,
 - persamaan vektor posisi partikel pada saat $t = 3$ s.
3. Seseorang di stasiun melihat kereta api bergerak menuju stasiun. Kereta api tersebut mengerem dengan perlambatan yang dinyatakan dengan persamaan $\vec{a} = -10t\hat{i}$ km/jam². Jika kereta api berhenti setelah 10 menit dari mulai pengereman, tentukan jarak yang ditempuh kereta mulai dari pengereman sampai berhenti. Tentukan pula kecepatan kereta sebelum pengereman.
4. Vektor posisi sebuah taksi dinyatakan dengan persamaan $\vec{r} = (t^2 + 2t)\hat{i} + (-t - 3)\hat{j}$, dengan r dalam km dan t dalam jam. Tentukan :
- kecepatan pada saat $t = 1,5$ jam,
 - percepatan pada saat $t = 1,5$ jam,
 - kecepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ jam sampai $t = 1,5$ jam,
 - percepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ jam sampai $t = 1,5$ jam.
5. Gerak lurus yang mempunyai percepatan konstan disebut GLBB. Persamaan-persamaan percepatan yang kalian pelajari berlaku untuk GLBB. Bisakah persamaan tersebut digunakan untuk menganalisis GLB? Kalau bisa apa syaratnya?

4. Analisis Gerak Lurus Beraturan (GLB) Berdasarkan Grafik

Untuk GLB, kecepatan benda tetap, sehingga percepatannya sama dengan nol. Jika kecepatannya konstan, berarti komponen kecepatan pada sumbu x maupun sumbu y adalah konstan. Jadi, pada GLB berlaku persamaan berikut.

$$v = \text{konstan},$$

sehingga, $v_x = \text{konstan}$, dan $v_y = \text{konstan}$.

Dalam mencari persamaan gerak dengan grafik, kita tidak tahu arah geraknya, sehingga kita hanya bisa mencari **nilai/besar** dari besaran pada persamaan gerak. Jadi, untuk mencari persamaan gerak berdasar grafik, kita tidak memerlukan tanda vektor.

Di kelas X, kalian telah melakukan eksperimen GLB dengan menggunakan *ticker timer*. Dari hasil eksperimen tersebut, kalian dapat mengetahui bentuk grafik hubungan kedudukan terhadap waktu dan grafik hubungan kecepatan terhadap waktu. Hubungan antara kedudukan dan waktu untuk GLB dapat kalian lihat pada Gambar 1.4.

Dari grafik tersebut, kita dapat mencari persamaan kecepatan gerak. Kecepatan ditunjukkan oleh kemiringan grafik atau gradien garis. Dari persamaan gradien yang telah kalian pelajari, kemiringan grafik pada Gambar 1.5 dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{gradien} &= \frac{\Delta d}{\Delta t} \\ &= \frac{d_1 - d_0}{t_1 - t_0} = \frac{d_t - d}{t - t_0} \end{aligned}$$

Dengan demikian, rumus untuk mencari besar kecepatan dari grafik tersebut adalah sebagai berikut.

$$v = \frac{d_t - d_0}{t - t_0}$$

Jika $t_0 = 0$, maka besar kecepatan dituliskan sebagai berikut.

$$v = \frac{d_t - d_0}{t}$$

$$v = \frac{s}{t}$$

Keterangan:

v = besar kecepatan (m/s)

d_t = kedudukan akhir (m)

d_0 = kedudukan awal (m)

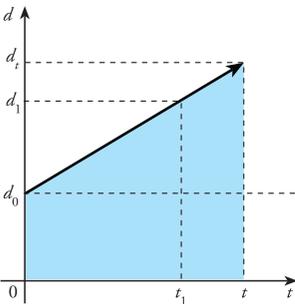
$d_t - d_0 = s$ = perpindahan (m)

t = waktu (s).

Dari persamaan kecepatan, kita dapat mencari kedudukan pada waktu t dengan persamaan:

$$v = \frac{d_t - d_0}{t}$$

$$d_t - d_0 = vt$$



Gambar 1.4 Grafik hubungan kedudukan (d) terhadap waktu (t) pada GLB.

Teropong

Kedudukan benda (d) digunakan untuk menjelaskan gerak benda pada garis bukan bidang. Jika kedudukan benda dinyatakan dalam bidang kartesius, **kedudukan (d)** dinyatakan dengan **vektor posisi (r)**.

Kesimpulannya, kedudukan dan vektor posisi merupakan dua hal yang sama.

$$d_t = d_0 + vt$$

Sementara itu, jarak yang ditempuh sama dengan perpindahan. Jarak atau perpindahan dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$d_t = d_0 + vt$$

$$s = vt$$

Jika grafik hubungan kedudukan dengan waktu merupakan garis lurus dengan kemiringan tertentu, bagaimanakah bentuk grafik hubungan antara kecepatan dan waktu? Dalam GLB, kecepatan pada setiap waktu adalah konstan. Berdasarkan hasil eksperimen yang kalian lakukan di kelas X, grafik hubungan kecepatan dan waktu dapat dilihat pada Gambar 1.5.

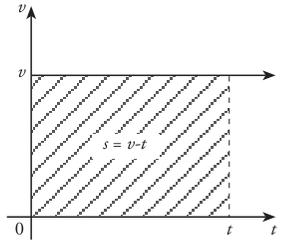
Dari grafik tersebut, jarak/perpindahan ditunjukkan oleh luas daerah yang diarsir. Luas daerah yang diarsir dapat dicari dengan persamaan,

$$\text{Luas} = vt$$

Sehingga, jarak/perpindahan dinyatakan dalam bentuk:

$$s = vt$$

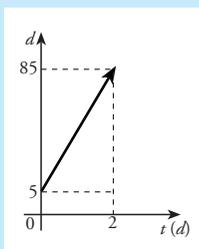
Untuk membantu kalian dalam menggunakan persamaan-persamaan pada GLB, perhatikan contoh berikut.



Gambar 1.5 Grafik hubungan kecepatan (v) dengan waktu (t) pada GLB.

Contoh

Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan konstan. Kedudukan mobil pada setiap waktu diperlihatkan pada grafik kedudukan terhadap waktu. Berdasarkan grafik, tentukan kecepatan mobil tersebut.



Penyelesaian:

Berdasarkan grafik tersebut, kecepatan mobil ditunjukkan oleh kemiringan grafik. Kecepatan mobil dicari dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} v &= \frac{\Delta d}{\Delta t} \\ &= \frac{85 - 5}{2 - 0} \\ &= 40 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan mobil tersebut adalah 40 km/jam.

5. Analisis Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) Berdasarkan Grafik

Pada gerak lurus berubah beraturan (GLBB), kecepatan yang dialami benda berubah secara beraturan. Perubahan kecepatan ini disebut percepatan. Besarnya percepatan pada GLBB selalu konstan setiap saat. Atau dapat dituliskan sebagai berikut.

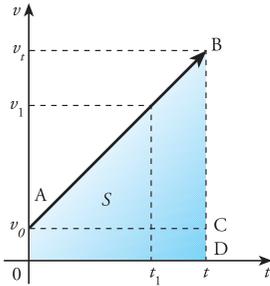
$a = \text{konstan}$,

sehingga: $a_x = \text{konstan}$, dan $a_y = \text{konstan}$

Di kelas X, kalian pernah melakukan percobaan untuk mencari bentuk grafik hubungan antara kecepatan dengan waktu, dan grafik hubungan percepatan dengan waktu pada GLBB.

Pada GLBB, grafik hubungan antara kecepatan dengan waktu digambarkan seperti gambar 1.6. Dari gambar tersebut tampak bahwa grafik hubungan kecepatan (v) dengan waktu (t) merupakan garis lurus dengan kemiringan tertentu. Kemiringan garis ini menunjukkan percepatan.

Dengan demikian percepatan dapat dicari dengan persamaan gradien garis.



Gambar 1.6 Grafik hubungan kecepatan (v) dengan waktu (t) pada GLBB.

$$\text{gradien} = a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$a = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} = \frac{v_t - v_0}{t - t_0}$$

Besar percepatan dari grafik tersebut adalah:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t - t_0}$$

Jika $t_0 = 0$, maka besar percepatan dapat dicari dengan rumus:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}$$

Dari persamaan di atas, kita bisa mencari besar kecepatan pada waktu t sebagai berikut.

$$v_t = v_0 + at$$

Bagaimanakah cara mencari jarak dan perpindahan yang ditempuh pada waktu t dari grafik pada Gambar 1.6? Pada grafik tersebut, perpindahan dan jarak ditunjukkan oleh luas daerah yang diarsir. Dengan demikian, jarak dan perpindahan dapat dicari dengan rumus berikut.

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

Dari manakah rumus perpindahan dan jarak tersebut di dapatkan? Kemudian, bagaimanakah kita mencari kedudukan benda dalam waktu t ? Untuk mengetahuinya kerjakan *Ekspedisi* berikut ini.

Perhatikan grafik pada gambar 1.6, kemudian jawablah pertanyaan berikut.

1. Bagaimanakah rumus luas segi empat OACD?
2. Bagaimanakah rumus luas segi tiga ABC?
3. Bagaimanakah rumus luas OABD?
4. Luas OABD menunjukkan perpindahan atau jarak yang ditempuh benda pada waktu t . Jika panjang $OA = t$, $AB = v_0$, dan $BC = v_t - v_0$ (ingat $v_t - v_0 = at$), bagaimanakah rumus perpindahan atau jarak yang ditempuh pada waktu t ?
5. Dari rumus perpindahan yang telah kalian dapatkan, bagaimanakah

cara mencari kedudukan benda pada waktu t (d_t)?

6. Gambarkan grafik hubungan antara percepatan (a) dengan waktu (t).
7. Dari gambar grafik pada soal nomor 6, bagaimanakah cara mencari kecepatan, perpindahan, dan kedudukan benda pada waktu t ?
8. Dari persamaan-persamaan GLBB yang kalian dapatkan, adakah kesamaan antara persamaan gerak tersebut dengan persamaan yang didapatkan dengan menggunakan analisis vektor?

Tulislah jawaban kalian dan presentasikan di depan kelas.

Dari hasil *Ekspedisi* di atas, kalian telah menemukan persamaan untuk mencari kedudukan pada waktu t sebagai berikut.

$$d_t = d_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Untuk mengetahui penggunaan persamaan GLBB tersebut untuk menyelesaikan permasalahan gerak benda, perhatikan contoh berikut.

Contoh

1. Seorang siswa mengendarai sepeda motor dengan kecepatan awal 9 km/jam. 5 detik kemudian, kecepatannya menjadi 18 km/jam. Jika percepatan sepeda motor konstan selama 20 detik, tentukan:
 - a. besar percepatan sepeda motor,
 - b. kecepatan akhir (kecepatan pada saat $t = 20$ detik),
 - c. jarak yang ditempuh selama 20 detik.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$v_0 = 9 \text{ km/jam}$$

$$= \frac{9.000 \text{ m}}{3.600 \text{ s}} = 2,5 \text{ m/s}$$

$$t = 5 \text{ s}$$

$$v_t = 18 \text{ km/jam}$$

$$= 5 \text{ m/s}$$

Ditanya:

a. a

b. v_t untuk $t = 20 \text{ s}$

c. s_t untuk $t = 20 \text{ s}$

Jawab:

- a. besar percepatan (a) dicari dengan persamaan berikut.

$$v_t = v_0 + at$$

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}$$

Untuk $t = 5$ s, maka :

$$a = \frac{5 - 2,5}{5} \\ = 0,5 \text{ m/s}^2$$

Jadi, percepatan sepeda motor tersebut adalah $0,5 \text{ m/s}^2$.

- b. Kecepatan pada saat t (v_t) dapat dicari dengan persamaan :

$$v_t = v_0 + at$$

Untuk $t = 20$ s, maka kecepatannya adalah :

$$v_t = 2,5 + 0,5 \cdot 20 \\ = 12,5 \text{ m/s}$$

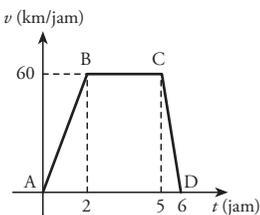
Jadi, kecepatan sepeda motor setelah 20 detik adalah $12,5 \text{ m/s}$.

- c. Jarak yang ditempuh selama 20 detik adalah :

$$s_t = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \\ = 2,5 \cdot 20 + \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 20^2 \\ = 50 + 100 \\ = 150 \text{ m}$$

Jadi, jarak yang ditempuh selama 20 detik adalah 150 m .

2. Pak Makrus melakukan perjalanan dari satu kota ke kota lain menggunakan mobil. Kecepatan mobil yang dikendarai Pak Makrus digambarkan pada grafik di bawah ini.



Berdasarkan grafik tersebut,

- gerak apakah yang dilakukan pada perjalanan dari A ke B, dari B ke C dan dari C ke D?
- Berapakah percepatan mobil dari A ke B, dari B ke C, dan dari C ke D?
- Berapakah jarak A ke B, jarak B ke C, jarak C ke D, dan jarak total yang ditempuh?
- Hitunglah kelajuan rata-rata perjalanan dari A ke D.

Penyelesaian:

Diketahui: Perhatikan grafik.

Ditanyakan:

- Jenis gerak A-B, B-C, dan C-D
- a_{A-B} , a_{B-C} , a_{C-D}
- s_{A-B} , s_{B-C} , s_{C-D}
- $v_{\text{rata-rata}}$

Jawab:

- a. Kalau kita perhatikan, kecepatan gerak A ke B bertambah secara teratur setiap waktu. Dengan demikian, gerak dari A ke B merupakan GLBB.

Pada gerak dari B ke C, kecepatannya konstan setiap waktu, sehingga gerak tersebut merupakan GLB.

Kecepatan gerak dari C ke D berkurang secara teratur setiap waktu. Dengan demikian, gerak dari C ke D merupakan GLBB.

- b. Untuk mencari percepatan, kita bisa menggunakan persamaan berikut.

$$a = \frac{v_t - v_0}{t - t_0}$$

Percepatan mobil dari A ke B

$$a_{A-B} = \frac{60 - 0}{2 - 0} \\ = 30 \text{ km/jam}^2$$

Percepatan dari B ke C adalah a_{B-C} .

$$a_{B-C} = \frac{60 - 60}{5 - 2}$$

$$= 0 \text{ km/jam}^2$$

Percepatan dari C ke D adalah a_{C-D} .

$$a_{C-D} = \frac{0 - 60}{6 - 5}$$

$$= -60 \text{ km/jam}^2$$

Berarti gerak dari C ke D mengalami perlambatan 60 km/jam^2

- c. Untuk mencari jarak tempuh, kita bisa menggunakan persamaan di bawah ini.

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

Gerak dari A ke B mempunyai $v_0 = 0$ dan $a = 30 \text{ km/jam}^2$. Sehingga, jarak A ke B (s_{A-B}) adalah :

$$\begin{aligned} s_{A-B} &= \frac{1}{2} at^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 30 \times 2^2 \\ &= 60 \text{ km} \end{aligned}$$

Gerak dari B ke C mempunyai $v_0 = 60$ dan $a = 0 \text{ km/jam}^2$. Sehingga, jarak A ke B (s_{A-B}) adalah :

$$s_{A-B} = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$= 60 \cdot 3 + 0$$

$$= 180 \text{ km}$$

Gerak dari C ke D mempunyai $v_0 = 60$ dan $a = -60 \text{ km/jam}^2$, sehingga jarak C ke D (s_{C-D}) adalah :

$$s_{C-D} = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$= 60 \times 1 - \frac{1}{2} \times 60 \times 1^2$$

$$= 30 \text{ km}$$

- d. Kelajuan rata-rata dapat dicari dengan rumus berikut.

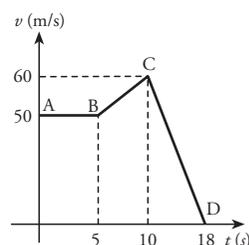
$$\begin{aligned} v_{\text{rata-rata}} &= \frac{\text{jarak}}{\text{waktu}} \\ &= \frac{s_{A-B} + s_{B-C} + s_{C-D}}{t_{A-B} + t_{B-C} + t_{C-D}} \\ &= \frac{60 + 180 + 30}{2 + 3 + 1} \\ &= 45 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

Jadi, kelajuan rata-rata dari A ke D adalah 45 km/jam .

Dengan memperhatikan contoh tersebut, sedikit banyak kalian telah menguasai cara mencari persamaan gerak baik GLB maupun GLBB berdasarkan grafik. Untuk menambah keterampilan kalian, kerjakan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

- Gerak sebuah mobil digambarkan pada grafik hubungan kecepatan terhadap waktu seperti berikut. Berdasarkan grafik tersebut, manakah yang menunjukkan :
 - gerak beraturan,
 - gerak berubah beraturan dengan percepatan konstan,
 - gerak berubah beraturan dengan perlambatan konstan,
 - benda berhenti.



2. Berdasarkan grafik pada soal no. 1, tentukan:
 - a. kecepatan dan jarak tempuh mobil untuk gerak dari A ke B,
 - b. percepatan dan jarak yang ditempuh mobil untuk gerak dari B ke C,
 - c. percepatan dan jarak yang ditempuh mobil untuk gerak dari C ke D,
 - d. jarak total yang ditempuh mobil,
 - e. kecepatan rata-rata mobil dari A ke D.
3. Abidin melakukan perjalanan dari Yogyakarta menuju Semarang menggunakan sepeda motor. Ia berangkat dari Yogyakarta pukul 07.00 WIB. Mula-mula, ia melaju dengan kecepatan tetap 40 km/jam dan sampai di Magelang pukul 08.30 WIB. Dari Magelang sampai Ambarawa, Abidin menambah kecepatannya menjadi 72 km/jam, dan sampai di Ambarawa pukul 09.15 WIB. Di Ambarawa, ia beristirahat selama 1 jam. Kemudian melanjutkan perjalanan ke Semarang dengan kelajuan tetap 60 km/jam selama 2 jam.
 - a. Gambarkan perjalanan Abidin dalam grafik kecepatan terhadap waktu.
 - b. Berdasarkan data perjalanan Abidin, tentukan jarak rata-rata Yogyakarta - Magelang, Magelang - Ambarawa, Ambarawa - Semarang, dan Yogyakarta - Semarang.
 - c. Berdasarkan jarak yang telah kalian hitung, gambarkan perjalanan Abidin pada grafik kedudukan terhadap waktu.

Dalam kehidupan sehari-hari kita tidak hanya di hadapkan pada gerak lurus. Adakalanya kita menjumpai benda yang bergerak dengan lintasan berupa lengkungan. Gerak semacam ini disebut gerak parabola atau ada yang menyebut gerak peluru. Bagaimanakah konsep GLB dan GLBB mendasari gerak parabola ini? Perhatikan dengan seksama penjelasan di bawah ini.

B Gerak Parabola

Gerak parabola dapat kita jumpai pada gerak peluru yang ditembakkan ke udara. Ketika peluru ditembakkan ke udara dengan membentuk sudut tertentu yang disebut **sudut elevasi**, lintasan yang ditempuh peluru berupa garis lengkung atau parabola. Itulah sebabnya gerak parabola disebut juga gerak peluru.

Sebelum melangkah lebih jauh, coba kalian diskusikan permasalahan pada *Eureka* berikut.

Eureka

Diskusikan dengan teman disamping kalian kasus berikut.

Dua orang siswa sedang berdebat tentang dua buah benda yang dilempar ke atas dengan kecepatan yang sama. Satu siswa mengatakan bahwa benda yang dilemparkan lurus ke atas akan jatuh ke tanah terlebih dahulu daripada benda yang dilemparkan dengan lintasan lengkung (gerak parabola). Siswa yang lain mengatakan bahwa kedua benda akan jatuh dalam waktu yang bersamaan. Pendapat manakah yang benar? Berikan alasan jawaban kalian.

A. Dasar Teori

Gerak parabola atau disebut juga sebagai gerak peluru merupakan gerak benda dengan lintasan berbentuk garis lengkung. Gerak parabola dapat diuraikan pada arah horizontal dan vertikal. Kecepatan gerak pada arah horizontal selalu tetap setiap saat.

B. Tujuan Percobaan

Setelah melakukan percobaan ini, kalian diharapkan mampu:

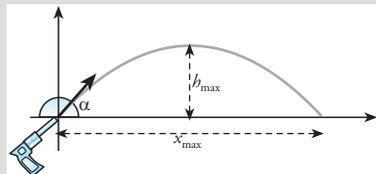
1. mengenali karakteristik gerak parabola.
2. membuktikan bahwa gerak pada arah horizontal tidak memengaruhi gerak vertikal.
3. mengetahui pengaruh sudut elevasi terhadap ketinggian maksimum dan jarak maksimum yang dicapai benda.

C. Alat dan Bahan

1. pistol mainan dan pelurunya,
2. mistar
3. stop watch
4. busur derajat besar

D. Cara Kerja

1. Lakukan percobaan ini secara berkelompok. Kekompakan dan kerja sama yang baik merupakan faktor penting untuk menghasilkan hasil yang baik.
2. Letakkan pistol menempel di dinding. Arahkan pistol mainan sehingga membentuk sudut 30° (selanjutnya disebut sudut elevasi) perhatikan gambar. Gunakan busur derajat untuk mengukur sudut. (Perhatikan gambar)
3. Tariklah pelatuk pistol agar peluru melesat. Pada saat bersamaan, siswa lain menghidupkan stopwatch dan mematikannya saat peluru jatuh di lantai. Siswa lainnya lagi memperhatikan ketinggian maksimum yang dicapai peluru, dan memberi tanda di dinding.
4. Ukurlah jarak mendatar dan ketinggian maksimum yang dicapai peluru.
5. Ulangi langkah 2 sampai 4 sebanyak 3 kali.
6. Ulangi langkah 2 sampai 5 dengan mengubah sudut elevasi menjadi 45° , 60° , dan 90° , atau besar sudut lainnya.
7. Masukkan hasil pengamatan pada tabel berikut.



Sudut (α)	Jarak (X_{\max})	Waktu ($t_{x\max}$)	Tinggi (h_{\max})
30°
45°			
60°			
90°			

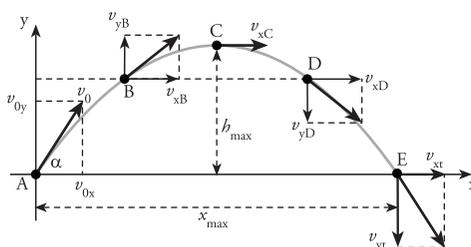
E. Pembahasan

1. Hitunglah jarak rata-rata, waktu rata-rata, dan tinggi maksimum rata-rata dari hasil percobaan untuk setiap sudut.
2. Jika kecepatan awal saat peluru keluar dari mulut pistol dianggap sama, bagaimanakah waktu yang diperlukan peluru untuk sampai di lantai pada semua sudut? Menunjukkan apakah kenyataan ini?
3. Adakah pengaruh sudut elevasi terhadap jarak tempuh dan ketinggian maksimum? Sudut manakah yang memberikan jarak tempuh terjauh? Sudut manapula yang menyebabkan peluru melesat paling tinggi?
4. Berikan contoh gerak parabola yang dapat kalian jumpai pada peristiwa sehari-hari.
5. Bagaimanakah kesimpulan kalian setelah melakukan eksperimen ini?

Buatlah laporan hasil eksperimen kalian. Kemudian, diskusikan hasilnya dengan kelompok lain.

Pada gerak parabola, gerak pada arah vertikal/sumbu y dipengaruhi percepatan konstan, maka pada arah sumbu y terjadi GLBB. Sementara itu, GLB terjadi pada arah sumbu x karena pada arah ini tidak ada percepatan. Untuk membuktikan kebenaran pernyataan tersebut, lakukan *Eksperimen* berikut.

Berdasarkan hasil eksperimen, kalian telah mengenal beberapa karakteristik gerak parabola. Dari hasil eksperimen besar sudut elevasi berpengaruh terhadap lama peluru di udara (waktu), jarak yang ditempuh, dan ketinggian maksimum yang dicapai. Bagaimanakah pengaruh ini jika dinyatakan dalam bentuk persamaan? Coba kalian perhatikan Gambar 1.7.



Gambar 1.7 Skema lintasan gerak parabola

1. Persamaan di Titik A

Titik A merupakan titik awal benda. Kecepatan pada titik ini merupakan kecepatan awal (v_0). Untuk mencari komponen kecepatan awal pada sumbu x (v_{x0}) dan komponen kecepatan awal pada sumbu y (v_{y0}) kita dapat menggunakan persamaan:

$$v_{x0} = v_0 \cos \alpha$$

$$v_{y0} = v_0 \sin \alpha$$

Keterangan:

v_{x0} = kecepatan mula-mula pada sumbu x

v_{y0} = kecepatan mula-mula pada sumbu y

v_0 = kecepatan mula-mula (m/s)

α = sudut elevasi

2. Persamaan di Titik B

Ketika benda bergerak naik dari titik A ke titik B, komponen gerak pada arah vertikal (sumbu y) mengalami perlambatan sebesar g (percepatan gravitasi). Ini menunjukkan bahwa gerak pada arah horisontal merupakan gerak lurus berubah beraturan (GLBB). Sementara kecepatan gerak pada arah horisontal (sumbu x) tidak mengalami percepatan. Dengan kata lain, kecepatan pada arah horisontal tidak berubah atau tetap setiap saat. Ini menunjukkan bahwa gerak pada arah mendatar merupakan gerak lurus beraturan.

Ini berarti, komponen kecepatan pada sumbu x (v_x) pada setiap kedudukan (baik di A, B, C, D, atau E) sama dengan komponen kecepatan awalnya (v_{x0}).

$$v_x = v_{x0} = v_0 \cos \alpha$$

Untuk mencari jarak mendatar yang telah ditempuh (x) dalam waktu t kita menggunakan persamaan:

$$x_t = v_x t$$
$$x_t = v_0 t \cos \alpha$$

Sementara itu, kecepatan gerak benda pada arah vertikal (sumbu y) pada waktu t (v_y) dapat dicari dengan persamaan umum:

$$v_y = v_{y0} - gt$$
$$v_y = (v_0 \sin \alpha) - gt$$

Karena komponen gerak vertikal merupakan GLBB, maka menurut persamaan kedudukan pada GLBB, ketinggian benda pada saat t , dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$y_t = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} gt^2$$

Keterangan:

y = ketinggian benda (m)

v_0 = kecepatan awal benda (m/s^2)

t = waktu (s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

3. Kedudukan di Titik C (Titik tertinggi)

Titik C merupakan titik tertinggi yang dicapai benda. Pada titik ini kecepatan pada sumbu y adalah nol ($v_y = 0$). Sehingga dari persamaan,

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt$$

kita memperoleh persamaan waktu untuk mencapai titik tertinggi (t_{hmax}) sebagai berikut.

T eropong

Untuk mencari ketinggian benda (y) yang bergerak naik, kita ingat persamaan $r = \int v \, dt$. Dengan mengganti r menjadi y , kita mendapatkan persamaan,

$$y = \int_0^t v_y \, dt$$
$$y = \int_0^t (v_0 \sin \alpha - gt) \, dt$$
$$y = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} gt^2$$

Persamaan ini pada dasarnya sama dengan persamaan kedudukan pada GLBB

$$t_{h\max} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

Keterangan:

$t_{h\max}$ = waktu untuk mencapai titik tertinggi (s)

v_0 = kecepatan awal (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

Untuk mencari titik tertinggi yang dapat dicapai benda, kita tinggal mensubstitusikan t ini ke dalam persamaan, $y = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2$.

Sehingga, titik tertinggi yang dapat dicapai benda (h_{\max}) dicari dengan persamaan:

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

$$h_{\max} = \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} \right)$$

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

Keterangan:

h_{\max} = titik tertinggi yang dicapai benda (m).

Titik tertinggi ini dicapai pada jarak mendatar ($x_{h\max}$). Untuk mencari $x_{h\max}$, kita bisa menggunakan persamaan berikut.

$$x_{h\max} = v_0 \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right) \cos \alpha$$

$$x_{h\max} = \frac{v_0^2}{g} \sin \alpha \cos \alpha$$

$$x_{h\max} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g}$$

Berdasarkan persamaan-persamaan di atas, koordinat titik C adalah $C \left(\frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g}, \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \right)$. Koordinat ini adalah **koordinat titik tertinggi** atau koordinat tinggi maksimum.

T eropong

Pada pelajaran matematika, kalian mengenal bentuk operasi berikut.

$$\sin(2\alpha) = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

Dari sifat tersebut kita mendapatkan,

$$\sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2} \sin 2\alpha$$

4. Persamaan di Titik D

Persamaan di titik D sama dengan persamaan di titik B. Jadi, ketika benda bergerak turun berlaku persamaan-persamaan berikut.

$$v_x = v_{x0} = v_0 \cos \alpha$$

$$x = v_0 t \cos \alpha$$

$$v_y = (v_0 \sin \alpha) - gt$$

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

5. Persamaan di Titik E

Titik E merupakan titik terjauh yang dicapai bola pada arah mendatar/horizontal. Pada titik E, ketinggian bola adalah nol ($y = 0$), sehingga:

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

$$v_0 \sin \alpha - \frac{1}{2} gt = 0$$

Jadi, waktu yang diperlukan untuk mencapai jarak terjauh ($t_{x\max}$) adalah:

$$t_{x\max} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

Keterangan:

$t_{x\max}$ = waktu untuk mencapai jarak terjauh atau x_{\max}

Untuk mencari jarak terjauh yang dicapai benda, substitusikan persamaan di atas ke dalam persamaan x.

$$x = v_0 t \cos \alpha$$

sehingga,

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

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

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

Keterangan:

x_{\max} = jarak terjauh yang dicapai benda.

Tips & Trik

Persamaan umum pada gerak parabola dapat digunakan untuk menyelesaikan semua persoalan yang berkaitan dengan gerak parabola. Hanya saja, kita perlu mengetahui keadaan khusus, seperti:

1. Kecepatan vertikal pada titik tertinggi adalah nol ($v_y = 0$).
2. Ketinggian benda pada jarak mendatar terjauh adalah nol ($y = 0$).
3. Kecepatan pada arah sumbu x di setiap kedudukan adalah tetap atau sama besar.

6. Persamaan Umum di Setiap Titik

Secara umum, untuk setiap kedudukan berlaku persamaan-persamaan berikut.

$$\begin{aligned}x_t &= v_0 t \cos \alpha \\y_t &= v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2 \\v_{xt} &= v_{x0} = v_0 \cos \alpha \\v_{yt} &= (v_0 \sin \alpha) - g t\end{aligned}$$

Keterangan:

x_t = jarak mendatar pada waktu t (m)

y_t = ketinggian benda pada waktu t (m)

v_{xt} = komponen kecepatan pada sumbu x pada waktu t (m/s)

v_{yt} = komponen kecepatan pada sumbu y pada waktu t (m/s)

Untuk menambah pemahaman kalian, kerjakan *Ekspedisi* berikut.

Ekspedisi

Dari persamaan-persamaan yang telah dipelajari, buktikan bahwa:

1. Waktu untuk mencapai jarak terjauh ($t_{x_{max}}$) adalah dua kali waktu untuk mencapai titik tertinggi ($t_{h_{max}}$).
2. Jarak terjauh yang dicapai (x_{max}) sama dengan dua kali jarak mendatar saat benda mencapai titik tertinggi ($x_{h_{max}}$).

3. Jarak terjauh dicapai ketika sudut elevasi benda 45° .
4. Dua benda yang ditembakkan dengan kecepatan awal sama dan membentuk sudut elevasi α dan $(90 - \alpha)$ akan jatuh di titik yang sama.

Tuliskan jawaban kalian pada buku tugas, kemudian diskusikan hasilnya dengan teman lainnya.

Dalam kehidupan sehari-hari, banyak sekali dijumpai gerak parabola. Untuk mengetahui penerapan persamaan gerak parabola dalam kehidupan sehari-hari, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Buffon melakukan tendangan gawang, sehingga bola melesat dengan kecepatan 36 km/jam dan membentuk sudut 60° terhadap tanah. Jika percepatan gravitasi di tempat itu adalah 10 m/s^2 , tentukan:

a. kecepatan bola pada saat $t = 1$ detik,

- b. ketinggian maksimum yang dicapai bola,
- c. waktu untuk mencapai tinggi maksimum,
- d. jarak maksimum yang dicapai bola,
- e. waktu yang diperlukan bola untuk sampai di tanah.

Penyelesaian :

Diketahui :

$$v_0 = 36 \text{ km/jam}$$

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

$$\alpha = 60^\circ$$

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

Ditanyakan:

a. v_t untuk $t = 1 \text{ s}$

b. h_{\max}

c. $t_{h\max}$

d. x_{\max}

e. $t_{x\max}$

Jawab:

- a. Untuk mencari v_t pada saat $t = 1 \text{ s}$, kita perlu mencari v_{xt} dan v_{yt} terlebih dahulu. Untuk itu, gunakan persamaan,

$$v_{xt} = v_0 \cos \alpha$$
$$= 10 \cos 60^\circ$$

$$= 10 \times \frac{1}{2}$$
$$= 5 \text{ m/s}$$

$$v_{yt} = v_0 \sin \alpha - gt$$
$$= 10 \sin 60^\circ - 10 \times 1$$
$$= 10 \times \frac{1}{2} \sqrt{3} - 10$$
$$= -1,33 \text{ m/s}$$

Kecepatan bola pada saat 1 s dicari dengan besar vektor:

$$v_t = \sqrt{v_{xt}^2 + v_{yt}^2}$$
$$= \sqrt{5^2 + (1,33)^2}$$
$$= \sqrt{25 + 1,77}$$
$$= 5,17 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan bola setelah 1 detik adalah 5,17 m/s.

- b. Untuk mencari h_{\max} , gunakan persamaan:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$
$$= \frac{10^2 (\sin 60^\circ)^2}{2 \cdot 10}$$
$$= \frac{100 \cdot \left(\frac{1}{2} \sqrt{3}\right)^2}{20}$$
$$= 3,75 \text{ m}$$

- c. Untuk mencari $t_{h\max}$, gunakan persamaan:

$$t_{h\max} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$
$$= \frac{10 \sin 60^\circ}{10}$$
$$= \frac{1}{2} \sqrt{3} \text{ s}$$

- d. Untuk mencari x_{\max} , gunakan persamaan:

$$x_{\max} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$
$$= \frac{10^2 \sin 2(60^\circ)}{10}$$
$$= 10 \sin 120^\circ$$
$$= 5\sqrt{3} \text{ m}$$
$$= 8,67 \text{ m}$$

- e. Untuk mencari $t_{x\max}$, gunakan persamaan:

$$t_{x\max} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$
$$= \frac{2 \times 10 \sin 60^\circ}{10}$$
$$= \sqrt{3} \text{ s}$$

Jadi, bola akan sampai di tanah lagi setelah $\sqrt{3}$ detik.

Untuk mengasah kompetensi kalian, kerjakan soal-soal pada *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Totti melakukan tendangan bebas sehingga bola melambung dengan membentuk sudut 30° terhadap tanah. Bola tersebut mencapai jarak terjauh 25 m. Jika percepatan gravitasi di tempat itu 10 m/s^2 , Tentukan:
 - a. kecepatan awal akibat tendangan yang dilakukan.
 - b. lama bola di udara,
 - c. koordinat tinggi maksimum bola,
 - d. kecepatan bola ketika sampai di tanah.
2. Sebuah pesawat pada ketinggian 80 m menjatuhkan satu karton mie instan untuk membantu korban banjir. Pada saat itu kecepatan pesawat 30 km/jam. Jika gesekan udara dan angin diabaikan, tentukan:
 - a. jarak jatuhnya karton jika dihitung dari titik tepat di bawah pesawat,
 - b. lama karton di udara.



C Gerak Melingkar

Sebelum kita melangkah lebih jauh, ada baiknya kalian mengingat kembali konsep gerak melingkar yang pernah dipelajari di kelas X. Nah, untuk membantu kalian mengingat materi gerak melingkar, jawablah pertanyaan-pertanyaan pada *Eureka* di bawah ini.

Eureka

Dengan mencari dari berbagai buku fisika, diskusikan jawaban pertanyaan-pertanyaan berikut bersama teman sebangkumu.

1. Apakah pengertian periode, frekuensi, kecepatan linear, kecepatan sudut, percepatan sentripetal, dan percepatan sudut? Tuliskan pula rumus setiap besaran tersebut?
2. Persamaan gerak melingkar berubah beraturan dapat dianalogikan dengan persamaan gerak lurus berubah beraturan. Lengkapilah tabel analogi persamaan gerak melingkar berubah beraturan dan gerak lurus berubah beraturan berikut.

Besaran	Gerak lurus	Besaran	Gerak melingkar	Keterangan
Percepatan	...	...	$\alpha = \frac{\omega_t - \omega_0}{t - t_0}$	$a = \alpha \times R$
...	$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$	Perpindahan sudut	...	$s = \theta \times R$
Kecepatan pada saat t detik	$v_t = \dots$ $v_t^2 = v_0^2 + 2as$	...	$\omega_t = \omega_0 + \alpha t$ $\omega_t = \dots$	$s = \theta \times R$

Tuliskan jawaban kelompok kalian, kemudian presentasikan di depan kelompok lainnya dengan bimbingan guru kalian.

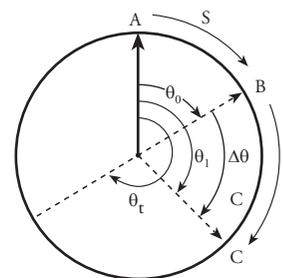
Dengan melakukan diskusi bersama kelompok kalian pada *Eureka* tersebut, sedikit banyak kalian telah mengetahui konsep gerak melingkar. Pada subbab ini, kita akan membahas persamaan gerak melingkar menggunakan analisis vektor. Persamaan gerak melingkar yang akan kita bahas adalah persamaan gerak melingkar secara umum. Nah, dari persamaan yang kita dapatkan nanti, diharapkan kalian dapat menerapkannya pada pelbagai keadaan.

Dalam membahas gerak melingkar, ada beberapa besaran penting, yaitu posisi sudut, perpindahan sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut. Bagaimanakah kita mencari persamaan besaran-besaran tersebut dalam gerak melingkar dengan analisis vektor? Mari kita ikuti dengan saksama penjelasan berikut.

1. Posisi Sudut dan Perpindahan Sudut

Pada materi gerak lurus di kelas X, kalian telah mempelajari pengertian perpindahan. Perpindahan diartikan sebagai perubahan kedudukan jika ditinjau dari acuan tertentu. Berdasarkan pengertian ini, **perpindahan sudut** menyatakan perubahan posisi sudut yang ditempuh benda yang bergerak melingkar. Agar kalian lebih mudah memahami pengertian posisi sudut dan perpindahan sudut, perhatikan Gambar 1.8.

Dari gambar tersebut, benda bergerak melingkar dengan jari-jari lingkaran R . Benda semula berada di titik A, setelah bergerak dalam selang waktu tertentu, benda sampai di titik B. Ini berarti benda mengalami perpindahan yang dinyatakan dengan busur AB (s). Sementara, perpindahan sudut dinyatakan dengan besar sudut θ . Hubungan perpindahan (s) dengan posisi sudut (θ) dinyatakan dengan persamaan:



Gambar 1.8 Perpindahan sudut pada benda yang bergerak melingkar dinyatakan sebagai perubahan posisi sudut (θ).

Teropong

Di kelas IX, kalian telah mempelajari cara mencari panjang busur lingkaran. Berdasarkan gambar 1.8, untuk mencari panjang busur AB (s), kita bisa menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{\text{busur AB}}{\text{keliling lingkaran}} = \frac{\theta}{360^\circ}$$

dengan $360^\circ = 2\pi$, maka

$$\frac{s}{2\pi R} = \frac{\theta}{2\pi}$$

$$s = \theta \cdot R$$

Keterangan:

s = perpindahan (m)

θ = perpindahan sudut (rad)

R = jejari lingkaran (m)

Pada gerak lurus, perpindahan benda dalam selang waktu tertentu disebut kecepatan. Sementara pada gerak melingkar, perubahan sudut yang ditempuh pada selang waktu tertentu disebut **kecepatan sudut/kecepatan angular**. Bagaimanakah persamaan kecepatan sudut pada benda yang melakukan gerak melingkar? Untuk lebih jelasnya, simaklah penjelasan di bawah ini.

2. Kecepatan Sudut

Perubahan sudut pada selang waktu tertentu disebut **kecepatan sudut**. Kecepatan sudut menyatakan kecepatan benda menempuh sudut tertentu dalam selang waktu tertentu. Bagaimanakah mencari persamaan kecepatan sudut dari perpindahan sudut? Ikutilah uraian berikut.

a. Mencari Persamaan Kecepatan Sudut dari Posisi Sudut

Kalian telah mempelajari cara mencari persamaan kecepatan dari vektor posisi. Dengan cara yang sama, kita juga bisa mencari persamaan kecepatan sudut dari vektor perpindahan sudut.

Coba kalian perhatikan gerak jarum jam pada gambar 1.9. Berdasarkan gambar tersebut, kita misalkan, kedudukan jarum dan gambar 1.8 semula di angka 12 (misalkan titik A). Setelah bergerak, jarum menunjuk angka tertentu (misalkan titik B) dan menempuh sudut θ_0 dalam waktu t_0 . Dari titik B benda bergerak ke titik C, menempuh sudut θ_1 dalam waktu t_1 . Setelah bergerak selama waktu total t , benda telah menempuh sudut total θ_t .

Pada materi gerak lurus, kecepatan didefinisikan sebagai perpindahan/jarak benda dalam selang waktu tertentu dan dirumuskan sebagai berikut.

$$v = \frac{s}{\Delta t}$$

Dalam gerak melingkar perpindahannya dinyatakan dengan perpindahan sudut, dan kecepatannya dinyatakan dengan kecepatan sudut. Berdasarkan gambar 1.8, kecepatan sudut rata-rata dari titik awal sampai titik akhir, dirumuskan sebagai:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

$$\omega = \frac{\theta_1 - \theta_0}{t_1 - t_0} = \frac{\theta_t - \theta_0}{t - t_0}$$



Gambar 1.9 Jarum jam bergerak melingkar beraturan. Dalam selang waktu yang sama menempuh sudut yang sama.

Tips & Trik

Dalam beberapa soal, satuan kecepatan sudut dapat dinyatakan dalam rpm (radian per menit) atau dalam putaran per menit. Yang perlu diperhatikan adalah bahwa:

1 putaran = 2π rad

Jadi, persamaan untuk mencari **kecepatan sudut rata-rata** adalah:

$$\omega = \frac{\theta_t - \theta_0}{t - t_0}$$

Keterangan:

- ω = kecepatan sudut (rad/s)
- θ_t = posisi sudut pada waktu t (rad)
- θ_0 = posisi sudut mula-mula (rad)
- t = waktu tempuh (s)

Bagaimanakah cara mencari vektor kecepatan sudut pada saat t ? Kecepatan sudut pada saat t merupakan **kecepatan sudut sesaat**. Kecepatan sudut sesaat dapat dicari dengan persamaan berikut.

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

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\theta}}{dt}$$

Arti dari persamaan tersebut adalah kecepatan sudut merupakan turunan/diferensial dari posisi sudut terhadap waktu.

Untuk membantu pemahaman kalian, perhatikan contoh di bawah ini.

Teropong

Di kelas X, kalian telah mempelajari gerak melingkar. Pada gerak melingkar ada beberapa persamaan yang penting, yaitu sebagai berikut.

- Periode (T) dan frekuensi (f).

$$T = \frac{1}{f} \text{ atau } f = \frac{1}{T}$$
- Kecepatan linear (\vec{v})

$$\vec{v} = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi f R$$
- Kecepatan sudut (ω)

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$
- Percepatan sentripetal (a_s)

$$a_s = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

Contoh

Pada roda sepeda terdapat suatu titik dengan posisi sudut dinyatakan sebagai $\theta = (6 + 8t + 5t^2)$ rad, dengan t dalam sekon. Tentukan:

- a. Posisi sudut pada $t = 0$ s dan $t = 2$ s
- b. Kecepatan sudut rata-rata dari $t = 0$ s sampai $t = 2$ s
- c. Kecepatan sudut pada $t = 0$ s dan $t = 2$ s

Penyelesaian:

Diketahui: $\theta = (6 + 8t + 5t^2)$ rad

Ditanyakan:

- a. θ untuk $t = 0$ s dan $t = 2$ s
- b. $\omega_{\text{rata-rata}}$ pada selang waktu $t = 0$ sampai $t = 2$ s
- c. ω untuk $t = 0$ s dan $t = 2$ s

Jawab:

- a. Posisi sudut $\theta = (6 + 8t + 5t^2)$ rad.
Pada $t = 0$ s,

$$\begin{aligned} \theta &= (6 + 8t + 5t^2) \text{ rad} \\ &= (6 + 8(0) + 5(0)^2) \text{ rad} \\ &= (6 + 0 + 0) \text{ rad} \\ &= 6 \text{ rad} \end{aligned}$$

Pada $t = 2$ s,

$$\begin{aligned} \theta &= (6 + 8t + 5t^2) \text{ rad} \\ &= (6 + 8(2) + 5(2)^2) \text{ rad} \\ &= (6 + 16 + 20) \text{ rad} \\ &= 42 \text{ rad} \end{aligned}$$

- b. Kecepatan sudut rata-rata untuk selang waktu $t = 0$ sampai $t = 2$ s adalah :

$$\begin{aligned}\bar{\omega} &= \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \\ &= \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \\ &= \frac{42 - 6}{3 - 0} \text{ rad/s} \\ &= \frac{36}{3} \text{ rad/s} \\ &= 12 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

- c. Kecepatan sudut sesaat dicari dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{d\theta}{dt} \\ &= \frac{d(6 + 8t + 5t^2)}{dt} \\ &= (0 + 8 + 2 \cdot 5t) \\ &= (8 + 10t) \text{ rad/s}\end{aligned}$$

Untuk $t = 0$ s, maka :

$$\begin{aligned}\omega &= 8 + 10 \cdot 0 \\ &= 8 + 0 \\ &= 8 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

Untuk $t = 2$ s, maka :

$$\begin{aligned}\omega &= 8 + 10 \cdot 2 \\ &= 8 + 20 \\ &= 26 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

b. Mencari Posisi Sudut dari Kecepatan Sudut

Dengan cara yang sama saat mencari vektor posisi dari vektor kecepatan, kita juga bisa mencari posisi sudut jika kecepatan sudutnya diketahui. Secara umum, untuk mencari posisi sudut pada waktu t , kita dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_0 + \int \bar{\omega} dt$$

Selain posisi sudut, kita juga dapat mencari percepatan sudut, jika kecepatan sudutnya diketahui. Bagaimanakah cara mencari persamaan percepatan sudut dari kecepatan sudut? Mari kita pelajari materi berikut.

3. Percepatan Sudut

Gerak melingkar yang mempunyai percepatan sudut? adalah gerak melingkar berubah beraturan. Lalu, bagaimanakah karakteristik gerak melingkar berubah beraturan (GMBB)? Karakteristik GMBB sama dengan karakteristik GLBB. Jika percepatan pada GLBB konstan setiap saat, demikian pula percepatan sudut pada GMBB juga konstan. Jadi, pada pada GMBB berlaku persamaan berikut.

$$\alpha = \text{konstan}$$

Percepatan sudut rata-rata menyatakan perubahan kecepatan sudut dalam selang waktu tertentu. Sesuai dengan definisinya, percepatan sudut dirumuskan sebagai berikut.

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\bar{\omega}}{\Delta t}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\omega}_t - \bar{\omega}_0}{t - t_0}$$

Keterangan:

α = percepatan sudut (rad/s^2)

Percepatan sudut setiap saat merupakan percepatan sudut sesaat, yaitu percepatan sudut pada waktu t yang dirumuskan:

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

$$\bar{\alpha} = \frac{d\bar{\omega}}{dt}$$

Jadi, percepatan sudut sesaat merupakan turunan dari kecepatan sudut. Bisakah kita mencari kecepatan sudut, jika diketahui percepatan sudutnya?

Dengan cara yang sama pada saat mencari persamaan kecepatan dari percepatan, kita dapat mencari kecepatan sudut dari percepatan sudut dengan persamaan berikut.

$$\bar{\omega}_t = \bar{\omega}_0 + \int \bar{\alpha} dt$$

Dengan mensubstitusikan persamaan kecepatan sudut sebagai turunan posisi sudut, kemudian mengintegrasikan persamaan tersebut, kita dapat mencari posisi sudut pada waktu t . Dengan $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, dan ω_t sebagai kecepatan sudut sebagai fungsi t , maka:

$$\omega_t = \omega_0 + \alpha t$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_0 + \alpha t$$

$$d\theta = (\omega_0 + \alpha t) dt$$

Jika setiap ruas kita diintegrasikan, kita mendapatkan persamaan posisi sudut pada waktu t sebagai berikut.

$$\int_{\theta_0}^{\theta_t} d\theta = \int_0^t (\omega_0 + \alpha t) dt$$

$$\theta_t - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

Roller Coaster

Kalian tentu sudah tidak asing lagi dengan permainan roller coaster. Namun, tahukah kalian, sebuah roller coaster terbuat dari baja di Taman Hiburan Cedar Point di kota Sandusky, Ohio memiliki sudut menikuk 60° dari ketinggian setara dengan ketinggian bangunan 20 lantai.

Sementara itu, sebuah roller coaster melingkar di Taman Hiburan Six Flags Great Amerika di Gurnee, Illinois, mengangkat para penumpang sampai ketinggian 17 tingkat. Kemudian, menikuk turun dengan kecepatan 110 km/jam, menaiki lingkaran raksasa yang membuat penumpang terbalik.

Wiese, Jim, 2005, hlm.36



www.annekaringlass.com

$$\theta_t = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

Untuk menambah pemahaman kalian, kerjakan *Ekspedisi* berikut.



Ekspedisi

Dengan menganalogikan gerak melingkar dengan gerak lurus,

1. Buktikan bahwa dari persamaan $\bar{\omega} = \frac{d\bar{\theta}}{dt}$ kita dapat mencari posisi sudut pada saat t dengan persamaan $\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_0 + \int \bar{\omega} dt$.

2. Buktikan bahwa dari persamaan

$$\bar{\alpha} = \frac{d\bar{\omega}}{dt},$$

kita dapat mencari kecepatan sudut pada waktu t dengan persamaan $\bar{\omega}_t = \bar{\omega}_0 + \int \bar{\alpha} dt$.

Konsultasikan hasil pembuktian kalian kepada bapak/ibu guru.

Untuk mengetahui penggunaan persamaan-persamaan tersebut, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah titik pada roda mobil yang bergerak mempunyai fungsi kecepatan sudut $\omega(t) = (4t^2 + 3t + 6)$ rad/s. Untuk selang waktu dari $t = 0$ sekon dan $t = 2$ sekon, tentukanlah:

- a. percepatan sudut rata-rata,
- b. percepatan sudut awal,
- c. percepatan sudut di $t = 2$ sekon,
- d. posisi sudut pada saat $t = 2$ sekon.

Penyelesaian:

Diketahui: $\omega(t) = (4t^2 + 3t + 6)$

Ditanyakan:

- a. $\alpha_{\text{rata-rata}}$
- b. α_0
- c. α_t untuk $t = 2$
- d. θ_t untuk $t = 2$

Jawab :

- a. Untuk dapat mencari percepatan sudut rata-rata, kita perlu mencari kecepatan sudut untuk $t = 0$ s dan $t = 2$ s.

$$\omega(t) = (4t^2 + 3t + 6)$$

Untuk $t = 0$ s,

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 4(0)^2 + 3(0) + 6 \\ &= (0 + 0 + 6) \\ &= 6 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega(2) &= 4(2)^2 + 3(2) + 6 \\ &= (16 + 6 + 6) \\ &= 28 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Sehingga, percepatan sudut rata-rata dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \\ &= \frac{28 - 6}{2 - 0} \\ &= \frac{22}{2} \\ &= 12 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

- b. Percepatan sudut awal adalah percepatan sudut pada saat $t = 0$ s.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{d\omega}{dt} \\ &= \frac{d(4t^2 + 3t + 6)}{dt} \\ &= 8t + 3 \end{aligned}$$

Untuk $t = 0$, percepatan sudutnya adalah :

$$\begin{aligned} \alpha &= 8(0) + 3 \\ &= 19 \text{ rad/s}^2 \end{aligned}$$

- c. Percepatan sudut pada saat $t = 2$ s,
 $\alpha = 8(0) + 3$
 $= 3 \text{ rad/s}^2$

- d. Posisi sudut pada $t = 2$ s, dapat dicari dengan rumus berikut.

$$\begin{aligned}\theta_t &= \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \\ &= 0 + 6 \times 2 + \frac{1}{2} \times 19 \times 2^2 \\ &= 46 \text{ rad}\end{aligned}$$

Untuk mengetahui sejauh mana kalian menguasai materi di depan, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

- Seorang anak menaiki komidi putar yang bergerak dengan percepatan sudut $\frac{\pi}{4}$ rad/menit². Jika kecepatan sudut awal 0 rad/menit, dan anak berada pada sudut $\frac{\pi}{8}$ rad dilihat dari penjaga, tentukan:
 - persamaan kecepatan sudut yang dialami anak pada waktu t menit,
 - kecepatan anak setelah bergerak 2 menit,
 - persamaan posisi anak pada waktu t menit,
 - posisi sudut anak setelah bergerak 2 menit.
- Posisi sudut sebuah titik pada roda dari mobil yang bergerak dinyatakan dengan persamaan $\theta = (4t^3 + 6t^2 + 8t + 2)$, dengan t dalam sekon dan θ dalam radian. Tentukan:
 - posisi sudut pada $t = 0$ s dan $t = 3$ s,
 - kecepatan sudut rata-rata dari $t = 0$ s sampai $t = 3$ s,
 - kecepatan sudut pada $t = 0$ s dan $t = 4$ s
- Sebuah titik pada roda mobil yang bergerak mempunyai fungsi kecepatan sudut $\omega(t) = (6t^2 + 2t - 3)$ rad/s. Untuk selang waktu dari $t = 1$ sekon dan $t = 4$ sekon. Tentukan:
 - persamaan posisi sudut setiap waktu,
 - posisi sudut pada saat $t = 2$ s,
 - percepatan sudut rata-rata,
 - percepatan sudut awal,
 - percepatan sudut pada $t = 3$ sekon,

Inti Sari

1. Kecepatan rata-rata menyatakan perubahan vektor posisi dalam selang waktu tertentu, yang dirumuskan:

$$\bar{v}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t_2 - t_1}$$

2. Kecepatan sesaat menyatakan kecepatan benda pada selang waktu sangat pendek (Δt mendekati 0). Secara matematis, kecepatan sesaat dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\vec{v}_{\text{semaat}} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

3. Persamaan vektor posisi pada waktu tertentu dapat dicari dari persamaan vektor kecepatan dengan persamaan:

$$\vec{r}_t = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{v} dt$$

4. Percepatan rata-rata menyatakan perubahan kecepatan pada selang waktu tertentu. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$\bar{a}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1}$$

5. Percepatan sesaat menyatakan percepatan benda pada selang waktu sangat pendek (Δt mendekati 0). Secara matematis, dituliskan sebagai berikut.

$$\bar{a}_{\text{semaat}} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

6. Vektor kecepatan dapat dicari dari vektor percepatan menggunakan persamaan:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \int_0^t \bar{a} dt$$

7. Pada gerak parabola berlaku persamaan-persamaan berikut:

$$x_t = v_0 t \cos \alpha$$

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

$$v_{xt} = v_{x0} = v_0 \cos \alpha$$

$$v_{yt} = (v_0 \sin \alpha) - g t$$

8. Kecepatan sudut rata-rata menyatakan perubahan sudut pada selang waktu tertentu, dan dituliskan sebagai berikut.

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

9. Percepatan sudut rata-rata menyatakan perubahan kecepatan sudut pada selang waktu sangat pendek (Δt mendekati 0), dan dituliskan sebagai berikut.

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

10. Percepatan sudut sesaat menyatakan percepatan pada selang waktu sangat pendek (Δt mendekati 0), dan dituliskan sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

11. Posisi sudut dapat dicari dari fungsi kecepatan sudut dengan persamaan berikut.

$$\theta_t = \theta_0 + \int_0^t \omega dt$$

12. Kecepatan sudut dapat dicari dari fungsi percepatan sudut dengan persamaan berikut.

$$\omega_t = \omega_0 + \int_0^t \alpha dt$$

Telaah Istilah

Diferensial Turunan fungsi

Integral Kebalikan dari diferensial

Kecepatan sudut Perubahan perpindahan sudut dalam selang waktu tertentu

Percepatan sudut Perubahan kecepatan sudut dalam selang waktu tertentu

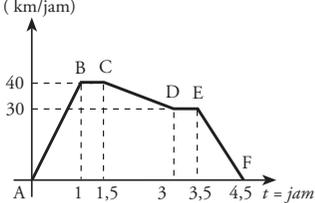
Perpindahan sudut Besar sudut yang ditempuh

Vektor posisi Kedudukan benda ditinjau dari pusat koordinat

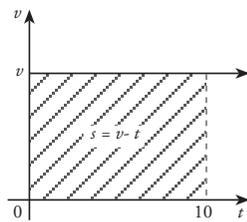
A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- Sebuah pigura terletak tepat di tengah-tengah dinding berukuran 6 m × 6 m. Jika ditinjau dari sudut kanan bawah, vektor posisi pigura tersebut dinyatakan dengan
 - $\vec{r} = 6\sqrt{2} \hat{i} + 6\sqrt{2} \hat{j}$
 - $\vec{r} = -6\sqrt{2} \hat{i} + 6\sqrt{2} \hat{j}$
 - $\vec{r} = 3\sqrt{2} \hat{i} + 3\sqrt{2} \hat{j}$
 - $\vec{r} = -3\sqrt{2} \hat{i} + 3\sqrt{2} \hat{j}$
 - $\vec{r} = -3\sqrt{2} \hat{i} - 3\sqrt{2} \hat{j}$
- Sebuah benda bergerak dari titik P(-2,-2) menuju titik Q(2,2). Vektor perpindahan benda tersebut adalah
 - $4\hat{i} + 4\hat{j}$
 - $-4\hat{i} - 4\hat{j}$
 - 0
 - $-4\hat{i} - 4\hat{j}$
 - $-2\hat{i} - 2\hat{j}$
- Seseorang melihat sebuah mobil tepat di sebelah timur pada jarak 300 m. 50 detik kemudian, orang tersebut melihat mobil berada di sebelah selatan pada jarak 400 m dari tempatnya berdiri. Jika arah utara menunjukkan arah sumbu y, dan arah timur menunjukkan arah sumbu x, persamaan kecepatan dan besar kecepatan mobil tersebut adalah
 - $\vec{v} = -300\hat{i} - 400\hat{j}, v = 700 \text{ m/s}$
 - $\vec{v} = -300\hat{i} - 400\hat{j}, v = 500 \text{ m/s}$
 - $\vec{v} = -6\hat{i} + 8\hat{j}, v = 500 \text{ m/s}$
 - $\vec{v} = -6\hat{i} + 8\hat{j}, v = 10 \text{ m/s}$
 - $\vec{v} = -6\hat{i} - 8\hat{j}, v = 10 \text{ m/s}$
- Sebuah sepeda motor bergerak dari keadaan diam pada lintasan lurus. Posisi sepeda motor setiap waktu dinyatakan dengan persaa-

maan $\vec{r} = 2t^3 - 3t^2 + 17$, r dalam meter dan t dalam sekon. Kecepatan sepeda motor pada saat t=35 detik adalah

- 10 m/s
 - 12 m/s
 - 15 m/s
 - 18 m/s
 - 20 m/s
- Sebuah partikel bergerak dengan persamaan $\vec{r} = (9t^2 - 12t + 3)\text{m}$. Percepatan pada saat t = 18 s adalah
 - 10 m/s²
 - 12 m/s²
 - 15 m/s²
 - 18 m/s²
 - 20 m/s²
 - Vektor posisi suatu benda diberikan oleh $\vec{r} = \{(3t^2 - 2t + 3)\hat{i} + (3t)\hat{j}\}$ m. Besar perpindahan benda dari t = 1 s sampai t = 2 s adalah . . . m.
 - $\sqrt{157}$
 - $\sqrt{58}$
 - $\sqrt{31}$
 - 5
 - 3
 - Perhatikan grafik 

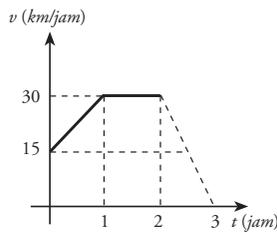
perjalanan kereta api dari stasiun yang satu ke stasiun yang lain di samping. Berdasarkan grafik tersebut, kereta menempuh jarak terjauh pada perjalanan dari

 - A ke B
 - B ke C
 - C ke D
 - D ke E
 - E ke F
 - Grafik di samping ini menunjukkan perjalanan sebuah mobil. Berdasarkan grafik tersebut, kecepatan mobil saat pada t = 10 menit adalah . . km/s.
 

- a. 55 d. 25
 b. 45 e. 15
 c. 35

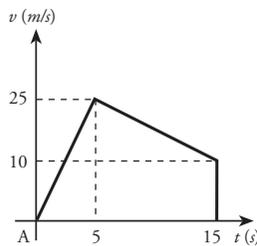
9. Berdasarkan gambar grafik di bawah, jarak yang ditempuh setelah 3 jam adalah . . .

- a. 97,5 km
 b. 67,5 km
 c. 52,5 km
 d. 30 km
 e. 15 km



10. Perhatikan grafik $v-t$ di samping. Berdasarkan gambar grafik tersebut, gerak pada selang waktu 5 sampai 15 detik, merupakan . . .

- a. gerak lurus dipercepat dengan percepatan 15 m/s^2
 b. gerak lurus dipercepat dengan kecepatan 5 m/s^2
 c. gerak lurus diperlambat dengan perlambatan 15 m/s^2
 d. gerak lurus diperlambat dengan perlambatan $1,5 \text{ m/s}^2$
 e. gerak lurus beraturan dengan kecepatan tetap 15 m/s



11. Peluru A dan B ditembakkan dari senapan yang sama oleh seorang tentara. Peluru A ditembakkan dengan sudut 30° dan peluru B ditembakkan dengan sudut 60° . Perbandingan tinggi maksimum yang dicapai peluru A dengan peluru B adalah . . .

- a. 1 : 2 d. $1 : \sqrt{3}$
 b. 1 : 3 e. $\sqrt{3} : 1$
 c. 2 : 1

12. Sebuah ember mempunyai lubang 15 cm di atas alasnya. Ketika ember diisi air, air memancar dari lubang tersebut. Jika air mencapai jarak 20 cm dari ember, kecepatan air saat keluar dari lubang adalah. . . m/s

- a. 5 d. 20
 b. 10 e. 25
 c. 15

13. Posisi sudut pentil pada roda sepeda yang berjalan, dinyatakan dengan persamaan $\theta = (7 + 3t + t^2)$ rad, maka :

- (1) posisi sudut pada $t = 2 \text{ s}$ adalah 17 rad.
 (2) kecepatan sudut pada $t = 3 \text{ s}$ adalah 9 rad/s.
 (3) percepatan sudut pada $t = 0$ adalah 0 rad/s².
 (4) percepatan sudut konstan.

Pernyataan yang benar adalah pernyataan nomor . . .

- a. (1), (2), dan (3)
 b. (1), (2), dan (4)
 c. (2), (3), dan (4)
 d. (1) dan (4)
 e. (2) dan (3)

14. Seorang anak memutar batu yang diikat dengan tali. Setiap detik batu tersebut menempuh sudut sesuai dengan persamaan

$\theta = (\frac{1}{6}t^2 + \frac{1}{6})\pi$ rad. Besar kecepatan sudut pada detik ketiga adalah . . .

- a. $\frac{1}{6}$ rad/s d. $\frac{1}{3} \pi$ rad/s
 b. $\frac{1}{6} \pi$ rad/s e. π rad/s
 c. $\frac{1}{3}$ rad/s

15. Kecepatan sudut suatu benda dinyatakan sebagai $\omega = (6t^2 + 2t + 3)$ rad/s, maka percepatan sudut pada saat $t = 2 \text{ s}$ adalah . . . rad/s².

- a. 12 d. 28
 b. 24 e. 31
 c. 26

16. Pada sebuah gasing terdapat sebuah titik. Ketika baru berputar, kecepatan sudut titik tersebut adalah 15 putaran tiap detik. Semakin lama berputar, kecepatannya semakin

berkurang dengan persamaan $\alpha = \frac{1}{2}\pi t$ rad/s². Lama gasing berputar adalah

- a. $4\sqrt{15}$ s d. $2\sqrt{5}$ s
 b. $4\sqrt{5}$ s e. $\sqrt{15}$ s
 c. $2\sqrt{15}$ s

17. Seseorang menggelindingkan roda berjari 32 cm dari keadaan diam pada lintasan miring. Akibatnya, roda mengalami percepatan linear 2 m/s². Dalam waktu t detik, roda tersebut menempuh jarak 16 meter. Kecepatan sudut sebuah titik di roda pada saat t adalah

- a. 50 rad/s d. 8 m/s
 b. 25 m/s e. 4 rad/s
 c. 8 rad/s

18. Sebuah titik berada di kincir angin mainan yang terpasang di becak. Ketika becak melaju di jalan menurun, kincir mengalami percepatan $\frac{1}{4}\pi$ rad/s². Sebelum menurun, kecepatan putaran kincir dinyatakan dengan persamaan $\omega = \frac{1}{2}\pi t$ rad/s. Jika posisi sudut titik semula adalah $\frac{1}{4}\pi$ rad, posisi

sudut pada saat t dinyatakan dengan persamaan . . . rad.

- a. $\theta_t = \frac{1}{8}\pi t$
 b. $\theta_t = \frac{1}{4}\pi + \frac{5}{8}\pi t$
 c. $\theta_t = \frac{1}{2}\pi t^2 + \frac{1}{8}\pi t + \frac{1}{4}\pi$
 d. $\theta_t = \frac{1}{4}\pi t^2 + \frac{1}{2}\pi t + \frac{1}{4}\pi$
 e. $\theta_t = \frac{1}{2}\pi t + \frac{1}{4}\pi$

19. Percepatan sudut suatu benda dinyatakan sebagai $\alpha = (6t + 2)$ rad/s². Jika ditetapkan ω_0 dan θ_0 nilainya nol, maka persamaan posisi sudut pada saat $t = 2$ s adalah . . . rad.

- a. 12 d. 26
 b. 18 e. 28
 c. 20

20. Dua buah roda dihubungkan dengan rantai. Jika perbandingan jejari roda I dan roda II adalah 2 : 3, dan roda I berputar dengan persamaan kecepatan sudut $\omega = (3t + 6)$ rad/s, maka percepatan sudut roda II pada saat $t = 1$ detik adalah . . . rad/s².

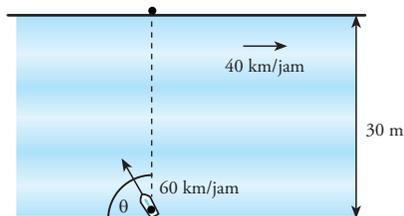
- a. 6 rad/s² d. 3 rad/s²
 b. 5 rad/s² e. 2 rad/s²
 c. 4 rad/s²

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

- Seekor kucing bergerak dari keadaan diam. Jika ditinjau dari suatu tempat, kucing tersebut semula berada pada koordinat (-4, 5). Lima detik kemudian, kucing berada pada koordinat (8, -5). Tentukan:
 - vektor posisi mula-mula dan vektor posisi akhir,
 - vektor perpindahan dan besar perpindahan,
 - vektor kecepatan dan besar kecepatan pada saat $t = 3$ s,
 - kecepatan rata-rata.
- Sebuah tongkat dilempar ke atas dengan persamaan lintasan $\bar{y} = (48 - t^3)$ meter.
 - Hitunglah kecepatan tongkat pada saat $t = 2$ detik.
 - Tentukan waktu untuk mencapai titik tertinggi.
 - Hitunglah perlambatan yang dialami tongkat.
 - Hitunglah ketinggian maksimum yang dicapai tongkat tersebut.
- Afifah pergi ke toko buku dengan mengendarai sepeda motor. Ia berangkat pukul 15.15 WIB. Saat baru berjalan, ia melihat speedometer menunjukkan angka 20 km/jam. 15 menit kemudian, speedometer menunjuk angka 60 km/jam. Karena di depannya ada lampu merah, ia mengerem motornya secara mendadak, dan ia berhenti

selama 5 menit di tempat itu. Kemudian, ia meneruskan perjalanan. Dari lampu merah tersebut, ia melaju dengan kecepatan yang terus bertambah secara konstan selama 5 menit. Setelah itu, ia melaju dengan kecepatan konstan 50 km/jam selama 10 menit, dan sampai di tujuan. Berdasarkan cerita tersebut, tentukan:

- gambar grafik fungsi kecepatan terhadap waktu,
 - waktu ketika Afifah sampai di toko buku,
 - jarak yang ditempuh Afifah.
4. Sebuah perahu akan menyeberangi sungai yang mempunyai arus dengan kecepatan 40 km/jam. Seseorang menunggu perahu tersebut tepat di seberang sungai (satu garis lurus dengan perahu). Jika kecepatan perahu 60 km/jam dan lebar sungai 30 m, dengan sudut berapakah tukang perahu harus mengarahkan perahunya agar tiba tepat pada orang yang menunggunya? Jika tukang perahu mengarahkan perahunya tegak lurus, berapakah jarak yang harus ditempuh orang yang menunggu untuk menemukan perahu itu? Perhatikan gambar.



- Tunjukkan bahwa jika dua peluru ditembakkan dengan kecepatan awal sama dan membentuk sudut α dan $90-\alpha$, akan jatuh ditempat yang sama. Tunjukkan pula bahwa dengan menembakkan peluru pada sudut 45° , peluru akan mencapai jarak yang paling jauh jika dibandingkan dengan sudut tembak yang lain.
- Seorang penjaga menambah kecepatan komidi putar sebanyak 1 putaran per menit. Sebelum dipercepat, komidi putar berputar sebanyak 4 putaran per menit. Tentukan kecepatan sudut komidi putar tersebut.

- Arman sedang mengendarai sepeda. Mula-mula ia mengayuh sepeda dengan kecepatan putaran gir depan 12 putaran tiap menit. Setiap 30 detik, ia menambah kecepatan kayuhannya, sehingga putaran gir depan bertambah 1 putaran. Ia melakukan itu selama 10 menit. Jika perbandingan jejari antara gir depan, gir belakang, dan roda sepeda adalah $2 : 1 : 5$, tentukan:
 - persamaan kecepatan sudut gir depan dalam rad/s,
 - besar kecepatan sudut pada saat $t = 5$ menit,
 - kecepatan sudut roda belakang pada saat $t = 5$ menit,
 - jarak yang ditempuh sepeda dalam 10 menit tersebut.
- Sebuah titik terletak pada suatu roda yang bergerak melingkar. Kecepatan sudut roda tersebut dinyatakan dengan persamaan $\omega(t) = (3t^2 - 2t + 5)$. Untuk selang waktu dari $t = 0$ sekon sampai $t = 5$ sekon, tentukan:
 - percepatan sudut rata-rata,
 - percepatan sudut awal,
 - percepatan sudut titik $t = 5$ sekon,
 - persamaan posisi sudut titik pada saat t ,
 - posisi sudut pada saat $t = 5$ s.
- Pada lintasan berbentuk lingkaran, sebuah roller coaster bergerak dengan percepatan sudut sesuai dengan persamaan $\alpha = \frac{1}{6} \pi t$ rad/s². Jika kecepatan sudut awal ketika mulai masuk lintasan tersebut dinyatakan dengan persamaan $\omega = \frac{1}{4} \pi t$ rad/s. Tentukan:
 - Percepatan sudut rata-rata pada selang waktu $t = 0$ s sampai $t = 5$ s,
 - kecepatan sudut pada saat $t = 5$ s,
 - posisi sudut pada saat $t = 5$ s.
- Sebuah batu diikat dengan tali sepanjang 50 cm, kemudian di putar. Kecepatan sudut semula adalah π rad/s. 10 detik kemudian kecepatan sudutnya menjadi 1 putaran per detik. Tentukan percepatan sudut yang diberikan

B a b II

Gravitasi dan Gaya Pegas



dok. PIM

Selama ini, kita menganggap bahwa matahari bergerak dari timur ke barat. Benarkah anggapan tersebut? Memang di mata kita terlihat seolah-olah matahari bergerak dari timur ke barat. Padahal sebenarnya bumi kitalah yang bergerak mengelilingi matahari dari barat ke timur. Bukan hanya bumi, tetapi planet-planet lain juga bergerak mengelilingi matahari. Lalu apakah yang menyebabkan bumi dan planet-planet terus bergerak mengelilingi matahari? Temukan jawabannya pada uraian materi di bab ini.

Kata Kunci

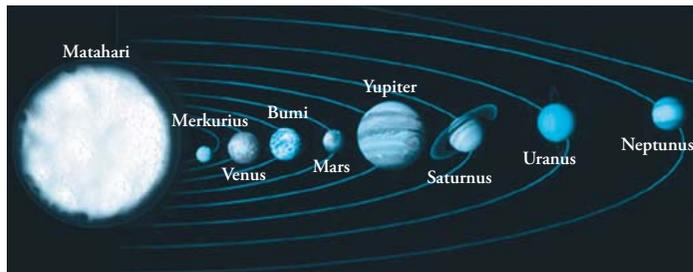
- Gravitasi
- Medan gravitasi
- Elastisitas
- Modulus elastisitas
- Konstanta pegas
- Momen inersia
- Gerak harmonis sederhana
- Grafik sinusoidal

Bergerakannya planet-planet mengelilingi matahari tidak terlepas dari pengaruh gaya tarik matahari. Gaya tarik ini disebut gaya gravitasi. Setelah mempelajari materi di bab ini, kalian diharapkan mampu mengenal dan menjelaskan pengertian gravitasi dan peranannya dalam menjaga keseimbangan alam. Di bab ini, kita akan membahas pengaruh gaya gravitasi terhadap gerak planet dalam mengelilingi matahari dan gerak satelit mengelilingi bumi. Selain itu, kalian diajak untuk menelusuri keterkaitan gravitasi dengan Hukum Newton.

Selain membahas gravitasi dan gerak planet, kita juga akan membahas pegas. Dengan pengamatan dan pengalaman yang dimiliki, kalian diharapkan mampu memberikan contoh beberapa alat yang menggunakan pegas. Kalian juga akan dibimbing melakukan eksperimen sederhana untuk menentukan kaitan gaya pegas dengan sifat elastisitasnya. Setelah itu, kalian diarahkan agar mampu menganalisis gerak benda di bawah pengaruh gaya pegas dan juga cara kerja beberapa alat yang menggunakan pegas. Terakhir, kalian akan mencoba menganalisis hubungan gaya pegas dengan getaran atau gelombang.

A Gravitasi

Untuk memulai bab ini, perhatikan benda yang dilepaskan dari ketinggian tertentu. Apa yang terjadi? Benda tersebut akan jatuh tegak lurus ke bawah akibat gaya gravitasi bumi. Gaya gravitasi memegang peranan penting bagi kehidupan di alam semesta. Kita dapat berdiri atau melakukan aktivitas sehari-hari di permukaan bumi disebabkan adanya gaya gravitasi bumi. Lebih luas lagi, bumi yang kita tempati ini juga terpengaruh gaya gravitasi matahari. Gaya gravitasi inilah yang mempertahankan bumi tetap mengelilingi matahari. Tanpa gaya gravitasi, kita mungkin tidak mengenal siang, malam, hari, bulan, atau tahun. Jika gaya gravitasi ini menghilang, alam semesta ini mungkin akan hancur. Apakah pengertian gaya gravitasi? Lalu, bagaimanakah gaya gravitasi ini menjaga keteraturan alam semesta?



Gambar 2.1 Planet-planet mengelilingi matahari akibat gaya gravitasi antara matahari dan planet.

Di kelas X semester 1, kalian telah mempelajari Hukum-hukum Newton dan gerak melingkar. Kedua hal tersebut berkaitan erat dengan materi yang akan kita bahas. Nah, untuk membantu kalian mengingat kembali Hukum-hukum Newton dan gerak melingkar, diskusikan jawaban pertanyaan-pertanyaan pada *Eureka* berikut ini.

Diskusikan bersama teman sebangku kalian, jawaban pertanyaan berikut.

1. Sebutkan dan jelaskan bunyi Hukum-Hukum Newton tentang gerak benda.
2. Dalam gerak melingkar, kita mengenal besaran gaya sentripetal dan percepatan sentripetal. Jelaskan dan tuliskan persamaan kedua besaran tersebut.
3. Kita dapat melihat televisi karena ada satelit. Satelit buatan telah banyak membantu manusia. Coba kalian sebutkan beberapa manfaat satelit.

Tuliskan hasil diskusi kalian, kemudian presentasikan di depan kelas dengan arahan dari guru.

Penguasaan materi gerak melingkar dan Hukum Newton merupakan modal untuk mempelajari materi di bab ini. Untuk itu, jika belum ingat benar materi tersebut, ada baiknya kalian membuka kembali materi gerak melingkar dan Hukum Newton.

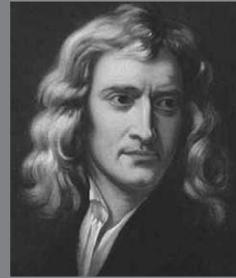
Pernahkah kalian mendengar cerita tentang seorang fisikawan yang terkenal hanya karena buah apel yang jatuh? Fisikawan itu adalah **Sir Isaac Newton**. Ketika melihat buah atau benda jatuh dari ketinggian tertentu, kita atau sebagian orang mungkin hanya menganggap sesuatu yang biasa. Akan tetapi bagi orang seperti Newton, ini merupakan peristiwa luar biasa.

Ia kemudian mencari tahu penyebab jatuhnya benda ke bawah atau ke pusat bumi. Setelah melalui proses panjang dan tidak kenal menyerah, ia akhirnya menemukan **Hukum Gravitasi Newton** yang menggepar dunia. Bagaimanakah Newton menjelaskan penyebab jatuhnya apel dengan Hukum Gravitasi? Ikutilah penjelasan berikut dengan saksama.

1. Hukum Gravitasi Newton

Gaya gravitasi menyatakan gaya tarik dua benda yang berinteraksi. Misalnya Matahari dengan planet, bintang dengan bintang lain, bumi dengan bulan, bumi dengan benda, buku dengan buku di sampingnya, atau benda dengan benda lainnya yang berada pada jarak tertentu. Ini berarti gaya gravitasi berlaku pada semua benda atau bersifat universal. Besarnya gaya gravitasi antara dua buah benda telah dirumuskan oleh Newton dengan Hukum Gravitasi.

Hukum Gravitasi Newton menyatakan bahwa setiap benda atau partikel menarik benda atau partikel lain dengan gaya yang sebanding dengan perkalian massa kedua benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak yang memisahkan keduanya.



www.horaz.com

Sir Isaac Newton (1643-1727) adalah ilmuwan berkebangsaan Inggris. Ia dikenal sebagai ahli matematika, fisika, dan filsafat. Dua karyanya yang terkenal adalah *Principia* dan *Optika*. Ia mengemukakan tiga hukum tentang gerak benda. Selain itu, ia juga mengemukakan hukum Gravitasi Universal.

Setyawan, Lilik Hidayat, 2004, hlm.120



Gambar 2.2 Dua benda bermassa yang terpisah pada jarak tertentu sebenarnya tarik-menarik dengan gaya tertentu.

Gaya gravitasi bekerja sepanjang garis yang menghubungkan keduanya. Secara matematis, Hukum Gravitasi Newton dituliskan dengan persamaan,

$$F_g = G \frac{m_1 \times m_2}{R^2}$$

Keterangan :

- F_g = besar gaya gravitasi (N)
- m_1 = massa benda pertama (kg)
- m_2 = massa benda kedua (kg)
- R = jarak kedua benda (m)
- G = konstanta gravitasi umum
= $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$

Teropong

Di kelas X semester 1, kalian telah mempelajari sifat penjumlahan vektor. Dalam penjumlahan vektor, arah vektor harus diperhatikan. Jika dua buah vektor, misalnya \vec{a} dan \vec{b} membentuk sudut α , kita bisa mencari besar penjumlahan kedua vektor tersebut dengan persamaan,

$$|\vec{a} + \vec{b}| = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha}$$

Namun, perlu diingat bahwa beberapa benda tidak hanya berinteraksi dengan satu benda saja. Ini berarti sebuah benda bisa terpengaruh oleh gaya gravitasi dari beberapa benda di sekitarnya. Kalian telah mengetahui bahwa gaya merupakan besaran vektor. Ini berarti gaya gravitasi total pada sebuah benda merupakan penjumlahan vektor dari gaya gravitasi yang disebabkan oleh benda-benda yang berinteraksi dengannya. Pernyataan ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan :

$$\vec{F}_{\text{gtor}} = \vec{F}_{g1} + \vec{F}_{g2} + \dots + \vec{F}_{gn}$$

Keterangan:

- \vec{F}_{gtor} = gaya gravitasi total
- $\vec{F}_{g1}, \vec{F}_{g2}, \vec{F}_{gn}$ = gaya gravitasi akibat benda 1, 2, dan n.

Bagaimanakah penerapan persamaan tersebut? Perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

1. Dua buah bola A dan B masing-masing bermassa 0,5 kg dan 1 kg terpisah pada jarak 10 cm. Tentukan besarnya gaya gravitasi yang dialami kedua benda.

Penyelesaian :

- Diketahui :** $m_A = 0,5 \text{ kg}$
 $m_B = 1 \text{ kg}$
 $R_{A-B} = 10 \text{ cm}$
 $= 0,1 \text{ m}$

Ditanyakan : F_g

Jawab :

Untuk mencari besarnya gaya gravitasi yang dialami benda A akibat benda B (F_{AB}) atau gaya gravitasi yang dialami benda B akibat benda A (F_{BA}) kita dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} F_{g-AB} = F_{g-BA} &= G \frac{m_A \times m_B}{(R_{AB})^2} \\ &= (6,67 \times 10^{-11}) \frac{0,5 \times 1}{0,1^2} \\ &= 3,335 \times 10^{-9} \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, kedua benda merasakan gaya gravitasi yang sama, sebesar $3,335 \times 10^{-9} \text{ N}$.

2. Tiga buah benda P, Q, dan R masing-masing bermassa 1 kg, 2 kg, dan 4 kg, diletakkan pada sudut segitiga siku-siku. Sisi-sisi segitiga tersebut adalah 5 cm, 12 cm, dan 13 cm. Jika benda Q berada pada sudut siku-sikunya, tentukan resultan gaya gravitasi yang dialami benda Q.

Penyelesaian :

Diketahui :

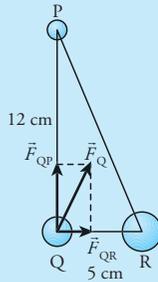
$$m_P = 1 \text{ kg}$$

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

$$m_R = 4 \text{ kg}$$

$$R_{PQ} = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$R_{QR} = 12 \text{ cm} = 1,2 \times 10^{-1} \text{ m}$$



Ditanyakan : $F_{Q \text{ total}}$

Jawab :

Kedudukan ketiga benda dan gaya gravitasi yang bekerja pada benda Q dapat dilihat pada gambar.

Berdasarkan gambar tersebut, benda Q ditarik oleh gaya gravitasi dari P (\vec{F}_{QP}) dan gaya gravitasi dari R (\vec{F}_{QR}).

Besar gaya gravitasi pada Q akibat P (F_{QP}) dan akibat R (F_{QR}) dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} F_{QP} &= G \frac{m_Q \times m_P}{(R_{QP})^2} \\ &= (6,67 \times 10^{-11}) \frac{1 \times 2}{(5 \times 10^{-2})^2} \\ &= 5,35 \times 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{QR} &= G \frac{m_Q \times m_R}{(R_{QR})^2} \\ &= (6,67 \times 10^{-11}) \frac{1 \times 4}{(1,2 \times 10^{-1})^2} \\ &= 1,85 \times 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

Kalau kalian perhatikan gaya gravitasi pada benda Q menuju ke P dan ke R, sehingga besar gaya gravitasi total yang di alami benda Q (\vec{F}_Q) sama dengan resultan dari \vec{F}_{QP} dan \vec{F}_{QR} . Besar \vec{F}_Q dapat dicari dengan persamaan :

$$\begin{aligned} F_Q &= \sqrt{(F_{QP})^2 + (F_{QR})^2} \\ &= \sqrt{(5,35 \times 10^{-8})^2 + (1,85 \times 10^{-8})^2} \\ &= \sqrt{32,04 \times 10^{-16}} \\ &= 5,66 \times 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, besarnya gaya gravitasi total yang dialami benda Q adalah $5,66 \times 10^{-8} \text{ N}$.

2. Medan Gravitasi

Berdasarkan persamaan gaya gravitasi di depan, jika sebuah benda bermassa m_1 didekatkan dengan benda bermassa m_2 , maka benda m_1 akan mengalami gaya tarik dari benda m_2 . Dengan kata lain, gaya gravitasi dari benda bermassa m_2 menarik benda bermassa m_1 . Begitu juga sebaliknya, gaya gravitasi dari benda bermassa m_1 menarik benda bermassa m_2 . Namun, selain mempengaruhi benda bermassa m_1 , gaya gravitasi dari benda bermassa m_2 juga mempengaruhi benda-benda lain di sekitarnya. Semakin jauh jarak kedua benda, gaya gravitasi yang timbul semakin kecil. Ini berarti ada suatu daerah yang terpengaruh gaya gravitasi dari suatu benda. Daerah ini disebut **medan gravitasi**.

Medan diartikan sebagai daerah yang masih terpengaruh sesuatu. Jadi: Medan gravitasi suatu benda diartikan sebagai daerah atau ruang di sekitar benda yang masih terpengaruh gaya gravitasi benda tersebut.

Kita ambil contoh matahari dalam sistem tata surya kita. Dalam sistem tata surya, matahari merupakan pusat bagi anggota lainnya, seperti planet-planet, asteroid, dan bulan. Matahari mempunyai medan gravitasi yang memengaruhi anggota tata surya lainnya. Medan gravitasi inilah yang mempertahankan gerak revolusi setiap anggota tata surya. Untuk menambah wawasan kalian, kerjakan *Ekspedisi* berikut.

Ekspedisi

Carilah minimal 5 buah artikel yang membahas gravitasi. Kalian bisa mendapatkan artikel dari internet, majalah, atau surat kabar. Setelah itu, analisislah setiap artikel untuk mengetahui kelebihan dan kekurangan artikel tersebut. Konsulta-

sikan hasil analisis kepada guru kalian. Kemudian, kirimkan hasil analisis kalian kepada penulis artikel tersebut. Mintalah balasan atau tanggapan penulisnya.

Sekarang, kita tinjau sebuah planet bermassa m_b yang berjarak R dari matahari bermassa m . Akibat interaksi ini, matahari akan menarik planet dengan gaya gravitasi tertentu. Besarnya gaya gravitasi matahari dalam menarik planet dinyatakan sebagai **kuat medan gravitasi**.

Kuat medan gravitasi diartikan sebagai kekuatan benda untuk menarik partikel bermassa yang masih berada dalam pengaruh medan gravitasi benda tersebut.

Kuat medan gravitasi matahari yang dirasakan planet atau benda bermassa m_b yang berada pada jarak R dari benda bermassa m dapat dicari dengan persamaan:

$$g = \frac{F_g}{m_b}$$

$$g = G \frac{m}{R^2}$$

Keterangan:

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

F_g = besar gaya gravitasi yang dialami benda (N)

m = massa benda yang menyebabkan medan gravitasi (kg)

Berdasarkan persamaan tersebut, besar medan gravitasi di permukaan suatu benda ditentukan oleh massa dan jearinya. Sebagai contoh, medan gravitasi bumi lebih besar daripada medan gravitasi bulan. Akibat adanya medan gravitasi dari sebuah benda, sebuah partikel selalu mendapatkan percepatan yang arahnya ke pusat benda. Oleh karena itu, kuat medan gravitasi disebut juga **percepatan gravitasi benda**. Sebagai contoh, percepatan gravitasi bumi menyebabkan benda-benda tertarik menuju pusat bumi.

Untuk menambah wawasan kalian, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Hitunglah percepatan gravitasi yang dialami seseorang yang berada di permukaan bumi. Diketahui jejari bumi $6,38 \times 10^6$ m, dan massa bumi $5,98 \times 10^{24}$ kg.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$R = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$$

$$m_{\text{bumi}} = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

Ditanyakan: g_{bumi}

Jawab:

Untuk mencari percepatan gravitasi bumi, kita dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} g &= G \frac{m_{\text{bumi}}}{R^2} \\ &= (6,67 \times 10^{-11}) \frac{5,98 \times 10^{24}}{(6,38 \times 10^6)^2} \\ &= 9,8 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Jadi, besarnya percepatan gravitasi bumi di tempat orang tersebut adalah $9,8 \text{ m/s}^2$.

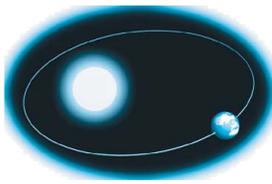
Sebagai ajang pembuktian kemampuan yang kalian kuasai, kerjakan Uji Kompetensi berikut.

Uji Kompetensi

- Di keempat sudut sebuah persegi dengan sisi 3 cm ditempatkan empat bola identik bermassa 10 gram. Tentukan :
 - besar gaya gravitasi yang dialami salah satu bola,
 - besar gravitasi pada suatu titik di tengah-tengah persegi.
- Sebuah pesawat mempunyai massa 500.000 ton. Tentukan besar gaya gravitasi bumi dan medan gravitasi bumi yang dialami pesawat jika:
 - pesawat berada di permukaan bumi,
 - pesawat berada pada ketinggian 1 kali jejari bumi dari permukaan bumi,
 - pesawat berada pada ketinggian 2 kali jejari bumi dari permukaan bumi. (diketahui jejari bumi $6,4 \times 10^6$ m dan massa bumi $5,98 \times 10^{24}$ kg).
- Berapakah besar gaya gravitasi total yang dialami bulan pada saat terjadi gerhana matahari? Diketahui jarak bumi ke matahari 150 juta km, jarak bumi ke bulan 383.000 km, massa bulan $(1/81) \times$ massa bumi, massa matahari $1,99 \times 10^{30}$ kg, dan massa bumi $5,98 \times 10^{24}$ kg. Petunjuk, gerhana matahari terjadi ketika bulan berada di antara bumi dan matahari. Anggap bumi, bulan, dan matahari terletak pada satu garis lurus.

B Penerapan Hukum Gravitasi Newton

Hukum Gravitasi Newton tidak hanya menjelaskan gaya tarik dua buah benda yang ada di bumi. Akan tetapi, hukum ini dapat digunakan untuk menjelaskan peredaran planet-planet dalam mengelilingi matahari dan juga gravitasi benda-benda langit lainnya. Bagaimanakah Newton menjelaskan peredaran planet dalam mengelilingi matahari?



Gambar 2.3 Garis edar planet dalam mengelilingi matahari berupa elips.

Di SMP, kalian telah mempelajari materi Tata Surya. Sejak Agustus 2006, sistem tata surya terdiri dari matahari, 8 planet, dan benda angkasa lainnya, seperti asteroid, meteor, dan komet. Kedelapan planet dan asteroid bergerak mengelilingi matahari dalam periode tertentu.

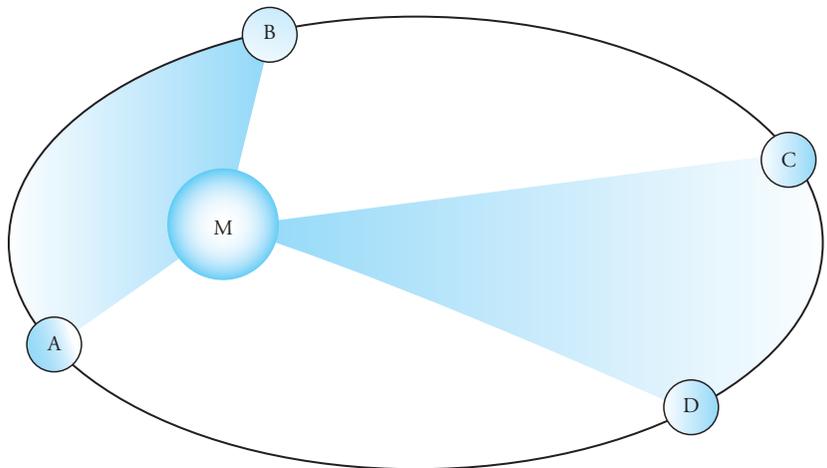
Telah banyak ilmuwan yang mencoba menjelaskan peredaran planet ini. Salah satu ilmuwan yang berhasil menjelaskan peredaran planet adalah **Johannes Kepler**. Kepler mengemukakan tiga hukum yang berkaitan dengan gerak edar planet, yang kemudian disebut dengan **Hukum Kepler**, yaitu Hukum Kepler I, Hukum Kepler II, dan Hukum Kepler III.

Hukum Kepler I disebut juga hukum lintasan planet menyatakan bahwa setiap planet bergerak pada sebuah lintasan berbentuk elips dengan matahari berada pada salah satu titik fokusnya.

Berdasarkan hukum ini, suatu planet pada saat tertentu berada pada jarak terdekat dengan matahari. Jarak terdekat ini disebut *perihelium*. Sementara jarak terjauh dari matahari disebut jarak *aphelium*.

Hukum II Kepler menyatakan bahwa garis hubung antara planet dengan matahari selama berevolusi akan menyapu luasan yang sama pada waktu yang sama pula.

Ini berarti ketika planet berada pada perihelium akan bergerak lebih cepat daripada ketika berada pada aphelium. Perhatikan gambar 2.4. Berdasarkan gambar tersebut, luas juring AMB sama dengan luas CMD, dan waktu untuk bergerak dari A ke B sama dengan waktu untuk bergerak dari C ke D.



Gambar 2.4 Pada waktu yang sama, planet akan menyapu luasan yang sama.

Hukum III Kepler menyebutkan bahwa perbandingan kuadrat waktu edar (periode) revolusi setiap planet sama dengan perbandingan pangkat tiga jarak rata-rata planet ke matahari.

MozaiK



aveiro-digital.net

Johannes Kepler (1571-1630) adalah seorang astronom dari Jerman. Ia adalah penganut paham heliosentris yang gigih. Penemuannya antara lain, hukum Kepler, teleskop Kepler, katalog bintang, dan supernova (bintang meledak). Ia juga dijuluki sebagai Bapak Astronomi Modern dan Bapak Optika Modern.

Setyawan, Ulilik Hidayat, 2004, hlm.94-95

Secara matematis, Hukum III Kepler dapat dituliskan dalam bentuk,

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

Atau,

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

Keterangan:

- T_1 = periode revolusi planet 1
- R_1 = jarak rata-rata planet 1 dari matahari
- T_2 = periode revolusi planet 2
- R_2 = jarak rata-rata planet 2 dari matahari

Di sub-subbab berikut, kita akan membahas Hukum III Kepler untuk menemukan hubungannya dengan Hukum Gravitasi Newton. Untuk lebih jelasnya, simaklah penjelasan berikut dengan saksama.

1. Hukum Gravitasi Newton pada Sistem Tata Surya

Planet-planet dalam sistem tata surya beredar mengelilingi matahari pada garis edar/orbitnya sendiri dalam waktu tertentu. Menurut Hukum I Kepler, orbit planet berbentuk elips. Akan tetapi, untuk memudahkan mempelajarinya, anggaplah orbit planet berupa lingkaran sempurna dengan matahari berada pada pusat lingkaran. Dengan begitu, kita menganggap planet melakukan gerak melingkar.

Sebuah benda yang melakukan gerak melingkar tidak dapat dipisahkan dari **percepatan sentripetal**. Kalau kita perhatikan, gaya sentripetal dan gaya gravitasi mempunyai arah menuju pusat benda. Gaya gravitasi dan gaya sentripetal yang dialami planet ketika mengelilingi matahari arahnya menuju pusat matahari. Dengan demikian, gaya gravitasi dan gaya sentripetal merupakan dua hal yang sama, atau bisa dituliskan sebagai:

$$F_s = F_g$$

$$m_p \frac{v^2}{R} = G \frac{m_m \times m_p}{R^2}$$

$$v^2 = \frac{Gm_m}{R}$$

Dari persamaan tersebut, kelajuan linear planet dalam mengelilingi matahari dapat dicari dengan persamaan:

$$v = \sqrt{\frac{Gm_m}{R}}$$

Keterangan:

- v = kelajuan linear planet (m/s)
- R = jarak planet-matahari (m)
- m_m = massa matahari

Dengan mensubstitusikan $v = \frac{2\pi R}{T}$, kita mendapatkan persamaan:

$$\frac{2\pi R}{T} = \sqrt{\frac{Gm_m}{R}}$$

T eropong

Di kelas X semester 1, kalian telah mempelajari gerak melingkar. Benda yang bergerak melingkar dengan jejari R mempunyai percepatan sentripetal yang arahnya menuju pusat lingkaran dan dirumuskan sebagai:

$$a_s = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

dengan

$$v = \omega R$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Percepatan sentripetal ditimbulkan oleh gaya sentripetal juga ke pusat lingkaran dan dirumuskan sebagai:

$$F_s = m \frac{v^2}{R} = m\omega^2 R$$

Sidang Umum Himpunan Astronomi Internasional (International Astronomical Union/IAU) ke-26 di Praha, Republik Ceko, yang berakhir 25 Agustus 2006, telah mengeluarkan Pluto dari daftar planet dalam sistem Tata Surya. Sekarang, anggota Tata Surya hanya terdiri atas 8 planet, yakni Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, dan Neptunus. Sementara Pluto dikategorikan sebagai planet kecil.

(KOMPAS, 27 Agustus 2006, hlm 2)

Dari persamaan tersebut, kita bisa mencari massa matahari jika jarak suatu planet dan periode revolusinya diketahui.

$$\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 = \frac{Gm_m}{R}$$

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

$$m_m = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$$

Selain itu, juga didapatkan persamaan:

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

Pada persamaan tersebut, G , M , dan π merupakan suatu konstanta, sehingga dapat disimpulkan bahwa:

$$\frac{T^2}{R^3} = C$$

atau,

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

Keterangan:

M = massa matahari (kg)

T = periode planet mengitari matahari (s)

G = konstanta gravitasi

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

Perhatikan contoh berikut.

Contoh

Periode revolusi bumi adalah 1 tahun dengan jarak rata-rata dari matahari 150 juta km (1 SA). Jika massa bumi 6×10^{24} kg, tentukan:

- massa matahari
- kelajuan linear bumi
- jarak planet saturnus yang mempunyai periode revolusi 30 tahun (dalam satuan SA)

Penyelesaian:

Diketahui:

$$T_{\text{bm}} = 1 \text{ tahun} = 8.760 \text{ jam} = 3,15 \times 10^7 \text{ s}$$

$$R_{\text{bm}} = 1 \text{ SA} = 1,5 \times 10^8 \text{ km} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$m_{\text{bm}} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$

Ditanyakan:

- m_m
- v_{bm}
- R_{sat}

Jawab:

- Untuk mencari massa matahari, kita menggunakan persamaan

$$m_{\text{mh}} = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4 \times 3,14^2 \times (1,5 \times 10^{11})^3}{(6,67 \times 10^{-11}) \times (3,15 \times 10^7)^2} \\
 &= \frac{1,33 \times 10^{35}}{6,62 \times 10^4} \\
 &= 2,00 \times 10^{30} \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Jadi, massa matahari adalah sekitar $2,00 \times 10^{30}$ kg.

- b. Untuk mencari kelajuan linear bumi, kita menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 v &= \sqrt{\frac{G m_{mb}}{R_{bm}}} \\
 &= \sqrt{\frac{(6,67 \times 10^{-11}) \times (2,00 \times 10^{30})}{1,5 \times 10^{11}}} \\
 &= \sqrt{8,89 \times 10^8} \\
 &= 2,98 \times 10^4 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan linear bumi adalah $2,98 \cdot 10^4$ m/s.

- c. Untuk mencari jejari orbit Saturnus, kita menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \frac{T_{bm}^2}{R_{bm}^3} &= \frac{T_{sat}^2}{R_{sat}^3} \\
 R_{sat}^3 &= \frac{R_{bm}^3 \times T_{sat}^2}{T_{bm}^2} \\
 R_{sat} &= \sqrt[3]{\frac{R_{bm}^3 \times T_{sat}^2}{T_{bm}^2}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{R_{bm}^3 \times (30T_{bm})^2}{T_{bm}^2}} \\
 &= \sqrt[3]{900 \times (R_{bm})^3} \\
 &= R_{bm} \sqrt[3]{900} \\
 &= 9,65 R_{bm}
 \end{aligned}$$

Jadi, jarak Saturnus dari matahari adalah 9,65 SA, atau 9,65 kali jarak bumi ke matahari.

2. Hukum Gravitasi pada Benda-benda di Bumi

Sebuah benda bermassa yang berada pada jarak tertentu dari pusat bumi dipastikan terpengaruh medan gravitasi bumi. Besarnya medan gravitasi bumi ini berbeda antara satu tempat dengan tempat lain. Semakin jauh jarak benda dari pusat bumi, medan gravitasi yang dirasakan semakin kecil. Akibat medan gravitasi ini, benda yang jatuh dari ketinggian tertentu akan mendapatkan percepatan gravitasi.

Untuk mengetahui besar percepatan gravitasi di tempat kalian, lakukan *Eksperimen* berikut.

Eksperimen

Mengukur Percepatan Gravitasi Bumi

A. Dasar Teori

Besarnya percepatan gravitasi bumi di suatu tempat berbeda dengan tempat lain. Hal ini disebabkan adanya perbedaan kerapatan massa dan jarak suatu tempat dari pusat bumi. Pendulum merupakan peralatan sederhana yang dapat digunakan untuk mengukur besar percepatan gravitasi di suatu tempat. Pendulum terdiri atas sebuah benda bermassa yang diikat dengan tali. Ketika diayunkan dengan sudut kecil ($<15^\circ$), pendulum akan berayun secara periodik. Dengan mengukur panjang tali yang digunakan (l) dan periode ayunan (T), percepatan gravitasi (g) di suatu tempat dapat ditentukan dengan persamaan:

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

B. Tujuan Percobaan

Setelah melakukan eksperimen ini, kalian diharapkan mampu:

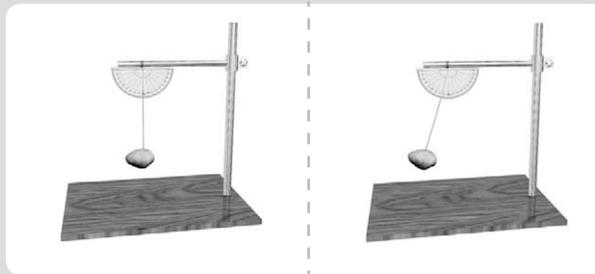
1. mengetahui hubungan panjang tali dengan periode ayunan,
2. mencari besar percepatan gravitasi di suatu tempat.

C. Alat dan Bahan

1. batu sebesar bola pingpong
2. benang secukupnya
3. stopwatch
4. busur derajat
5. statip

D. Cara Kerja

1. Ikatlah batu dengan benang. Kemudian ikatkan ujung benang pada statip yang telah dipasang busur derajat. Perhatikan gambar.



2. Ukurlah panjang benang dari statip sampai titik tengah batu.
3. Tariklah batu ke samping sehingga menyimpang maksimal 15° dari kedudukan semula.
4. Lepaskan batu dan biarkan berayun tiga atau empat ayunan. Setelah itu, hitunglah waktu yang dibutuhkan pendulum setiap melakukan 10 kali ayunan. Ingat 1 kali ayunan di hitung dari satu kedudukan sampai kembali kekedudukan semula. Ulangi lagi sampai mendapatkan 3 data.
5. Ulangilah langkah 1-4 menggunakan panjang tali yang berbeda sampai mendapatkan data untuk 5 panjang tali yang berbeda. Kemudian, masukkan data hasil eksperimen pada tabel berikut.

No.	Panjang Tali	Waktu (t)	Periode (T)	Gravitasi (g)
1.		1. ... 2. ... 3. ...	1. ... 2. ... 3. ...	
2.				
3.				
4.				
5.				

E. Pembahasan

Setelah melakukan eksperimen tersebut, cobalah kalian bahas pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Apakah penyebab pendulum dapat berayun secara periodik.
2. Carilah waktu rata-rata, periode rata-rata, dan percepatan gravitasi rata-rata untuk setiap panjang tali yang diukur.
3. Berapakah percepatan gravitasi rata-rata dari semua hasil eksperimen? Nyatakan hasilnya disertai angka ketidapastiannya.
4. Percepatan gravitasi rata-rata di permukaan bumi sekitar $9,8 \text{ m/s}^2$. Bagaimanakah hasil percobaan kalian dibandingkan dengan angka tersebut? Identifikasikan penyebab terjadinya penyimpangan hasil percobaan kalian.

Buatlah laporan hasil eksperimen kalian dan presentasikan di depan kelompok lainnya.

Berdasarkan *Eksperimen* tersebut, kalian telah mengetahui cara sederhana untuk mencari percepatan gravitasi di suatu tempat. Sebelumnya telah dijelaskan bahwa percepatan gravitasi bumi dapat dicari dengan persamaan:

$$g = G \frac{m_b}{R^2}$$

Dengan menggabungkan persamaan ini dengan Hukum Gravitasi Newton, sebuah benda bermassa m yang berada pada jarak R dari pusat bumi akan merasakan gaya gravitasi sebesar:

$$F_g = m g$$

Dari persamaan ini, besar gaya gravitasi pada sebuah benda sama dengan berat benda tersebut, atau

$$w = F_g = m g$$

Keterangan: w = berat benda (N)

Bumi yang dianggap sebagai bola bulat, sebenarnya tidak bulat sempurna melainkan agak gepat di bagian kutubnya. Pemampatan ini disebabkan gerak rotasi bumi. Akibat pemampatan ini, bagian permukaan kutub bumi mempunyai jarak yang lebih dekat dengan pusat bumi dibandingkan bagian ekuator atau khatulistiwa. Jari-jari bumi di daerah ekuator sekitar 6.379 km, sedangkan jari-jari di daerah kutub sekitar 6.357 km. Ini menyebabkan percepatan gravitasi bumi di kutub lebih besar daripada percepatan gravitasi di ekuator.

Selain menjelaskan gerak planet dalam mengelilingi matahari, hukum Gravitasi Newton juga dapat digunakan untuk menjelaskan gerak satelit dalam mengelilingi bumi. Misalnya untuk mengukur kelajuan yang harus dimiliki satelit agar tidak keluar dari garis edarnya. Kalian penasaran dan ingin tahu cara menghitung kelajuan satelit agar ia beredar pada tempatnya? Simaklah penjelasan berikut.

Mozaiik

Newton dan Huygen menyimpulkan bahwa gaya sentrifugal akibat rotasi bumi membuat bumi menonjol di ekuatornya dan memampat di kutub-kutubnya. Namun, para teoritikus yang menganut gagasan René Descartes berpendapat sebaliknya. Pada tahun 1730-an, eks-pedisi Prancis memastikan adanya pemampatan pada kutub-kutub bumi, sekaligus membenarkan pendapat Newton dan Huygen.

Jargodzki, Christopher P., 2005, hlm. 84

3. Hukum Gravitasi pada Sistem Bumi-Satelit



Gambar 2.5
Satelit dapat tetap mengorbit bumi pada ketinggian tertentu karena medan gravitasi bumi.

www.gym.vrcz

Di SMP, kalian telah mengetahui fungsi dan macam-macam satelit yang diluncurkan manusia. Kalian mengenal satelit komunikasi, satelit navigasi, atau satelit militer. Satelit yang paling kita kenal adalah satelit palapa, yang sekarang berganti nama menjadi Satelit TELKOM, milik negara kita. Satelit-satelit ini ditempatkan pada ketinggian tertentu dari permukaan bumi. Permasalahannya sekarang, berapakah kelajuan satelit agar tetap berada di orbit yang telah ditentukan?

Untuk mencari kecepatan satelit, kita bisa menganalogikan satelit sebagai planet dan bumi sebagai matahari. Sehingga persamaan kelajuan satelit mengelilingi bumi dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$v_s = \sqrt{\frac{G m_b}{R}}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan percepatan gravitasi bumi ke dalam persamaan tersebut, kita mendapatkan persamaan:

$$v_s = \sqrt{gR}$$

Keterangan:

v_s = kelajuan satelit (m/s)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

R = ketinggian orbit satelit diukur dari pusat bumi (m)

Kelajuan linear satelit tersebut merupakan kelajuan yang perlu dipertahankan agar satelit tetap mengorbit bumi pada ketinggian tertentu. Jika kelajuannya lebih besar, satelit akan keluar dari orbit yang ditentukan, sedangkan bila lebih kecil, satelit akan jatuh kembali ke bumi.

Bagaimanakah cara mencari periode edar satelit yang berada pada ketinggian tertentu? Untuk mencari periode edar satelit, kita harus ingat persamaan percepatan linear pada gerak melingkar. Dengan mensubstitusikan persamaan kelajuan linear, kita mendapatkan persamaan:

Teropong

Di bab sebelumnya, kalian telah mendapatkan hubungan kecepatan linear dengan kecepatan sudut sebagai berikut.

$$v = \omega R$$

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

sehingga, $v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi f R$

$$v_s = \sqrt{gR}$$

$$\frac{2\pi R}{T} = \sqrt{gR}$$

$$T = \frac{2\pi R}{\sqrt{gR}}$$

Keterangan:

T = periode edar (s)

R = ketinggian orbit dari pusat bumi (m)

Sebagian besar satelit digunakan untuk kepentingan suatu negara. Agar dapat digunakan, satelit harus tetap berada di atas negara bersangkutan. Untuk menjaga agar satelit tetap berada di atas suatu negara, periode satelit dibuat sama dengan periode rotasi bumi.

Untuk kepentingan komunikasi dan kepentingan lainnya, Indonesia juga telah meluncurkan satelit TELKOM. Nah, untuk mengetahui lebih banyak tentang satelit ini, kerjakan *Ekspedisi* di berikut.

Ekspedisi

Carilah informasi dari pelbagai sumber tentang Satelit TELKOM. Kalian dapat memperoleh informasi dari internet, surat kabar, atau nara sumber yang mengetahuinya. Hal-hal yang perlu kalian cari tahu antara lain, sejarah satelit TELKOM,

waktu dan tempat peluncuran, ketinggian orbit, keunggulan dibanding satelit generasi sebelumnya, dan kegunaannya. Setelah itu, buatlah sebuah artikel dan tempelkan pada majalah dinding atau kirim ke redaksi majalah di sekolah kalian.

Contoh

Sebuah satelit mengorbit pada ketinggian 450 km dari permukaan bumi. Jika diketahui jejari bumi 6.370 km dan percepatan gravitasi bumi $9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan kecepatan dan periode edar satelit tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$R = (450 + 6.370) \text{ km} = 6.820 \text{ km} = 6,82 \times 10^6 \text{ m}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Ditanyakan:

- a. v
- b. T

Jawab:

- a. Kecepatan edar satelit dapat dicari dengan persamaan:

$$v_s = \sqrt{gR}$$

$$= \sqrt{9,8 \times 6,82 \times 10^6}$$

$$= \sqrt{66,836 \times 10^6}$$

$$= 8,17 \times 10^3 \text{ m/s}^2$$

Jadi, kecepatan edar satelit itu adalah $8,17 \times 10^3 \text{ m/s}$.

- b. Periode edar satelit dapat dicari dengan persamaan:

$$T = \frac{2\pi R}{\sqrt{gR}}$$

$$= \frac{2\pi R}{v}$$

$$= \frac{2 \times 3,14 \times (6,82 \times 10^6)}{8,17 \times 10^3}$$

$$= 5,24 \times 10^3 \text{ s}$$

Jadi, periode edar satelit tersebut adalah $5,24 \times 10^3 \text{ s}$.

Nah, untuk mengasah keterampilan kalian dalam menyelesaikan soal yang berkaitan dengan hukum Gravitasi Newton, kerjakan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

1. Periode revolusi planet Jupiter 11,86 tahun bumi (1 tahun bumi = 365 hari). Jika massa matahari $5,97 \times 10^{30}$ kg, berapakah jejari orbit planet Jupiter?
2. Seorang astronot mempunyai berat 650 N di bumi. Ia kemudian mendarat di planet Mars yang massanya 0,108 massa bumi. Jika berat astronot di Mars menjadi 247 N, tentukan jejari planet Mars. Diketahui massa bumi $5,98 \times 10^{24}$ kg, jejari bumi 6.370 juta km, dan percepatan gravitasi di permukaan bumi $9,8 \text{ m/s}^2$.
3. Berapakah besar gaya gravitasi yang bekerja pada satelit TELKOM, jika massanya 2.500 kg, dan mengorbit bumi pada ketinggian 30.000 km di atas permukaan bumi?
4. Hitunglah kecepatan minimal yang harus dimiliki sebuah satelit yang mengorbit pada ketinggian 50.000 km agar tetap berada di orbitnya. Gunakan percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$.

Di depan kita telah membahas gravitasi. Besaran yang berhubungan erat dengan gravitasi adalah berat benda. Di kelas X, kalian mengenal alat yang digunakan untuk mengukur berat benda, yaitu neraca pegas. Sesuai dengan namanya, alat ini memanfaatkan sifat pegas. Nah, materi di subbab berikut akan membahas keistimewaan pegas sehingga banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Untuk penjelasan lebih lanjut, pelajailah materi berikut dengan sungguh-sungguh.

C Gaya Pegas

Coba kalian ambil sebuah pegas atau yang dikenal dengan sebutan per. Tariklah pegas tersebut, lalu lepaskan. Apakah yang terjadi? Ketika sebuah pegas ditarik, ia akan merenggang. Sebaliknya, jika pegas ditekan, ia akan memampat atau memendek. Namun, setelah tarikan atau tekanan dihilangkan, pegas akan kembali ke bentuk semula. Inilah salah satu sifat istimewa pegas, yaitu bersifat elastis.

Beberapa peralatan yang kita gunakan sehari-hari banyak yang memanfaatkan pegas atau benda dengan sifat seperti pegas. Nah, untuk untuk itu, coba kalian kerjakan *Eureka* berikut.

Eureka

Diskusikan dengan teman di samping kalian, jawaban dari pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Apakah tujuan pemasangan *shockbreaker* pada sepeda motor? Terbuat dari apakah *shockbreaker* tersebut?

- Sebuah anak panah dapat melesat dari busurnya jika tali busur diregangkan. Gaya apakah yang membuat anak panah ini melesat?
- Pegas atau per banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Coba sebutkan beberapa alat yang menggunakan pegas atau per. Jelaskan pula tujuan penggunaan pegas pada alat tersebut. Bandingkan hasil diskusimu dengan hasil diskusi yang lain.

Dari hasil diskusi, kalian telah mengetahui beberapa peralatan yang memanfaatkan pegas. Pegas banyak digunakan karena sifat elastisnya. Apakah yang dimaksud dengan elastis? Pengertian elastis dan hal-hal lain yang berkaitan dengan pegas akan kita bahas pada uraian berikut.

1. Elastisitas

Sebuah benda atau bahan dikatakan elastis apabila bentuknya berubah ketika dikenai suatu gaya dan segera kembali seperti semula bila gaya itu dihilangkan. Benda seperti ini disebut benda **elastis**. Contohnya, karet dan pegas. Sementara itu, benda yang apabila diberi gaya bentuknya berubah dan tetap bertahan walaupun gaya dihilangkan disebut **benda plastis** atau **benda tidak elastis**. Contoh benda ini adalah plastik.

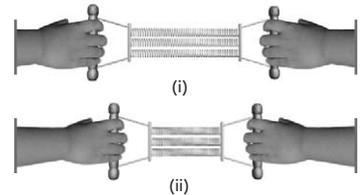
Salah satu benda elastis yang akan kita pelajari pada subbab ini adalah pegas. Kita semua tahu, jika pegas ditarik atau ditekan dengan gaya tertentu, pegas akan memanjang atau memendek searah dengan gaya penyebabnya. Namun, jika gaya tarik atau gaya tekan tersebut dihilangkan, maka pegas akan kembali ke keadaan semula. Sifat elastis suatu bahan disebut **elastisitas** atau **kelentingan**.

Semua bahan sebenarnya bersifat elastis. Walaupun begitu, besar gaya yang diberikan mempunyai batas tertentu agar elastisitas bahan tidak hilang. Jika batas ini dilewati, bahan tidak dapat kembali ke bentuk semula bahkan dapat rusak atau patah. Ini menunjukkan adanya batas-batas gaya eksternal yang dapat diberikan pada bahan. Titik dimana gaya eksternal menyebabkan bahan tidak lagi bersifat elastis disebut **batas elastik** atau **batas kelentingan**. Setelah batas ini dilewati tetapi gaya tetap diberikan, akan mengakibatkan bahan rusak atau patah. Titik ketika gaya eksternal menyebabkan bahan patah disebut **titik patah**. Perhatikan Gambar 2.7.

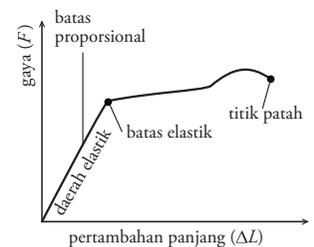
Sebenarnya, semua benda mempunyai elastisitas tertentu. Namun, tingkat elastisitas benda berbeda dengan benda lainnya. Lalu, apakah yang dapat menunjukkan tingkat elastisitas benda? Temukan jawabannya pada uraian berikut.

2. Modulus Elastisitas

Cobalah kalian menggantungkan sebuah beban pada beberapa bahan, misalnya pada kawat dan karet. Apa yang terjadi? Kedua bahan tersebut akan bertambah panjang. Akan tetapi, pertambahan panjang ini berbeda antara bahan satu dengan lainnya. Pertambahan panjang pada kawat mungkin tidak begitu tampak. Tetapi pertambahan panjang pada karet dapat dengan mudah dilihat. Perbedaan ini disebabkan kawat mempunyai **modulus elastisitas** atau **modulus Young** yang lebih besar daripada karet.



Gambar 2.6 Pegas akan kembali seperti semula ketika gaya yang bekerja dihilangkan.



Gambar 2.7 Grafik hubungan gaya eksternal yang diberikan pada bahan dengan pertambahan panjang.

Modulus elastisitas/modulus Young merupakan angka yang menggambarkan tingkat elastisitas suatu bahan. Semakin tinggi modulus elastisitasnya, bahan semakin kaku. Ini berarti untuk menekan atau meregangkan bahan dengan modulus Young besar membutuhkan gaya yang besar. Dengan kata lain, semakin besar modulus Young, bahan semakin tidak elastis.

Ketika kalian menggantungkan beban pada kawat atau karet, kedua bahan ini tampak lebih tegang dari sebelumnya atau bahan mengalami tegangan. Selain itu, kawat atau karet menjadi lebih panjang atau bahan mengalami regangan. Ini berarti **modulus Young** berkaitan dengan tegangan dan regangan. **Tegangan** atau **stress** menyatakan besarnya gaya per satuan luas. Sementara **regangan** atau **strain** menyatakan perubahan panjang benda dibandingkan dengan panjang semula.

Secara matematis, tegangan/*stress* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\text{stress} = \frac{\text{gaya}}{\text{luas permukaan}}$$

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

Keterangan:
 σ = tegangan/stress (N/m²)
 F = besar gaya yang memengaruhi benda (N)
 A = luas penampang (m²)

Sementara regangan/*strain* dapat dicari dengan persamaan:

$$\text{strain} = \frac{\text{perubahan panjang}}{\text{panjang semula}}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

atau

$$e = \frac{l - l_0}{l_0}$$

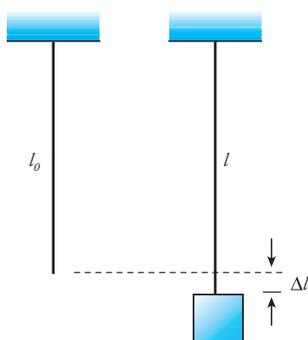
Keterangan:
 e = regangan/strain
 l_0 = panjang mula-mula (m)
 l = panjang akhir setelah diberi beban (m)

Persamaan modulus elastisitas adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}} = E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}}$$

$$E = \frac{l_0 F}{A \Delta l}$$

Keterangan :
 E = modulus elastisitas (N/m² atau Pa)
 Δl = pertambahan panjang (m)



Gambar 2.8 Perubahan panjang kawat akibat pemberian beban dinyatakan sebagai regangan.

MozaiK

Di bawah ini adalah nilai modulus young beberapa bahan.

Bahan	Modulus Young (N/m ²)
Aluminium	6,5 × 10 ⁹
Besi	2,2 × 10 ¹⁰
Kuningan	1,0 × 10 ¹⁰
Tembaga	1,2 × 10 ¹⁰

Setyawan, Lilik Hidayat, 2004, hlm.176

Perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

Ahmad menggantung sebuah beban dengan berat 5 N pada sebuah kawat yang panjangnya 2 m dan luas penampangnya 1 mm^2 . Modulus elastisitas kawat $1,0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$. Berapakah pertambahan panjang kawat tersebut ?

Penyelesaian :

Diketahui:

$$E = 1,0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$A = 1 \text{ mm}^2 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$l = 2 \text{ m}$$

$$F = 5 \text{ N}$$

Ditanyakan: Δl

Jawab:

$$E = \frac{l_0 F}{A \Delta l}$$

$$\Delta l = \frac{l_0 F}{AE}$$

$$= \frac{2 \times 5}{(1 \times 10^{-6})(1 \times 10^{10})}$$

$$= 1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Jadi pertambahan panjang kawat tersebut adalah $1,0 \times 10^{-3} \text{ m}$ atau 1 mm.

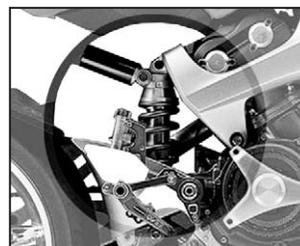
Hubungan antara gaya yang diberikan kepada pegas dengan perubahan panjang pegas, diterangkan seorang ilmuwan bernama **Hooke**. Bagaimanakah Hooke menjelaskan hubungan gaya dan pertambahan panjang pegas? Pelajarilah uraian berikut.

3. Hukum Hooke

Penggunaan pegas banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. *Shockbreaker* sepeda motor, *springbed*, neraca pegas, busur panah, dan masih banyak alat lainnya yang memanfaatkan sifat elastis pegas. Ketika kita duduk di atas sepeda motor, pegas pada *shockbreaker* akan memendek. Begitu pula ketika kita menggantung benda atau menarik neraca pegas, pegas di dalamnya akan memanjang. Ketika kita duduk di atas sepeda motor atau menggantung beban pada neraca pegas berarti kita memberikan gaya pada pegas. Gaya inilah yang menyebabkan pegas memendek atau memanjang.

Kalau jeli mengamati, kalian akan menemukan bahwa sebuah beban dengan berat tertentu akan menyebabkan pertambahan panjang yang berbeda untuk dua jenis pegas yang berbeda. Perbedaan pertambahan panjang ini disebabkan karakteristik pegas yang dinyatakan sebagai **konstanta pegas**.

Konstanta pegas menggambarkan kekakuan pegas. Semakin besar konstanta yang dimiliki, pegas semakin kaku dan semakin susah untuk diregangkan atau ditekan. Begitu pula sebaliknya, jika konstanta pegas kecil, pegas tersebut semakin mudah diregangkan atau ditekan. Dengan kata lain, jika konstanta pegas semakin besar, gaya yang diberikan untuk meregangkan dan menekannya semakin besar. Nah, untuk mengetahui hubungan besar gaya dengan pertambahan panjang pegas dan konstanta pegas, lakukan *Eksperimen* berikut.



www.sportrider.com

Gambar 2.9 Shockbreaker sepeda motor memanfaatkan pegas untuk kenyamanan pengendara.

A. Dasar Teori

Jika sebuah pegas ditarik dengan gaya tertentu, maka panjangnya akan berubah. Semakin besar gaya tarik yang bekerja, semakin besar pertambahan panjang pegas tersebut. Ketika gaya tarik dihilangkan, pegas akan kembali ke keadaan semula. Jika beberapa pegas ditarik dengan gaya yang sama, pertambahan panjang setiap pegas akan berbeda. Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik setiap pegas. Karakteristik suatu pegas dinyatakan dengan konstanta pegas (k).

Hukum Hooke menyatakan bahwa jika pada sebuah pegas bekerja sebuah gaya, maka pegas tersebut akan bertambah panjang sebanding dengan besar gaya yang bekerja padanya. Secara matematis, hubungan antara besar gaya yang bekerja dengan pertambahan panjang pegas dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F \propto x$$
$$F = k x$$

Keterangan :

F = gaya yang bekerja (N)

k = konstanta pegas (N/m)

x = pertambahan panjang pegas (m)

B. Tujuan Percobaan

Setelah melakukan eksperimen ini, kalian diharapkan mampu :

1. menentukan konstanta pegas,
2. menentukan hubungan antara gaya yang bekerja pada pegas dengan pertambahan panjang pegas,
3. membuktikan hukum Hooke.

C. Alat dan Bahan

1. dua buah pegas yang terbuat dari bahan yang berbeda
2. anak timbangan dengan massa berbeda
3. mistar
4. statif

D. Langkah Kerja

1. Gantungkan sebuah pegas pada statif, seperti pada gambar.
2. Ukurlah panjang pegas sebelum diberi beban sebagai panjang mula-mula (l_0).
3. Gantungkan anak timbangan 100 g. Kemudian, ukurlah panjang pegas ketika beban masih tergantung (l_1) dan beban tidak bergerak lagi.
4. Ukurlah pertambahan panjang pegas ($x = l_1 - l_0$).
5. Ulangilah langkah 3 dan 4 dengan mengganti anak timbangan menjadi 200 g, 300 g, 500 g, 600 g, 700 g, 800 g, dan 1 kg.
6. Ulangilah langkah 1 sampai 5 dengan menggunakan pegas yang lain.
7. Masukkan data hasil percobaan kalian ke dalam tabel berikut.



No.	Massa Beban	Berat Beban	L_0	L_0	X
1.					
2.					
3.					

E. Pembahasan

1. Bagaimanakah pengaruh berat beban dengan penambahan panjang pegas?
2. Buatlah grafik hubungan antara berat beban (w) dengan penambahan panjang (x).
3. Berbentuk apakah grafik berat benda dengan penambahan panjang pegas?
4. Berdasarkan grafik yang kalian buat, konstanta pegas ditunjukkan oleh kemiringan (gradien) grafik. Hitunglah konstanta pegas yang kalian gunakan.
5. Berikan contoh penggunaan pegas yang dapat kalian jumpai dalam kehidupan sehari-hari. Buatlah laporan hasil eksperimen kalian dan tulislah sebuah artikel tentang eksperimen kalian untuk dipublikasikan di majalah dinding sekolah.

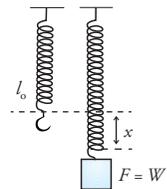
Dengan melakukan *Eksperimen* tersebut, kalian telah menyelidiki hubungan antara gaya yang bekerja pada pegas dengan penambahan panjang pegas. Hubungan antara kedua besaran tersebut telah diselidiki oleh seorang ilmuwan bernama Hooke. Berdasarkan penyelidikannya, Hooke menyatakan hukumnya, yang kemudian dikenal dengan **Hukum Hooke**.

Hukum Hooke menyatakan bahwa jika pada sebuah pegas bekerja sebuah gaya, maka pegas tersebut akan bertambah panjang sebanding dengan besar gaya yang bekerja padanya.

Untuk memahami Hukum Hooke, perhatikan gambar 2.10. Dari gambar tersebut, ketika pegas diberi beban, pegas akan bertambah panjang sejauh x . Secara matematis, hubungan gaya luar yang bekerja pada pegas dengan penambahan panjang dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut.

$F \propto x$ $F = kx$	<p>Keterangan:</p> <p>F = gaya yang bekerja (N)</p> <p>k = konstanta pegas (N/m)</p> <p>x = pertambahan panjang pegas (m)</p>
------------------------	---

Berdasarkan Hukum III Newton, ketika beban menarik pegas dengan gaya kx , maka pegas akan memberikan reaksi sebesar $-kx$ kepada beban. Gaya yang dikerjakan pegas kepada beban disebut **gaya pemulih** (F_p) atau gaya pegas. Besar gaya pegas ini sama dengan gaya luar penyebabnya tetapi arahnya berlawanan. Secara matematis, gaya pemulih atau gaya pegas dapat dicari dengan persamaan berikut.



Gambar 2.10 Sebuah gaya F bekerja pada pegas sehingga pegas mengalami perubahan panjang.

T eropong

Menurut Hukum III Newton, jika benda A melakukan gaya pada benda B (F_{aksi}), maka benda B akan melakukan gaya pada benda A (F_{reaksi}) sama besar dengan gaya yang diterima, tetapi berlawanan arah. Kedua gaya ini tidak saling menghilangkan karena bekerja pada benda yang berbeda. Hukum III Newton dituliskan dalam bentuk,

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

$$F_p = -kx$$

Keterangan:

F_p = gaya pegas (N)

k = konstanta pegas (N/m)

x = pertambahan panjang pegas (m)

Perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah pegas bila ditarik dengan gaya 10 N, panjangnya bertambah 2 cm. Berapakah pertambahan panjang pegas jika ditarik dengan gaya 12 N?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$F_1 = 10 \text{ N}$$

$$x_1 = 2 \text{ cm}$$

$$F_2 = 12 \text{ N}$$

Ditanyakan: x_2

Jawab:

Untuk mencari x_2 , terlebih dahulu kita mencari konstanta pegas (k) dari F_1 dan x_1 .

$$k = \frac{F_1}{x_1}$$

$$= \frac{10}{0,02}$$

$$= 500 \text{ N/m}$$

x_2 dapat dicari dengan persamaan:

$$x_2 = \frac{F_2}{k}$$

$$= \frac{12}{500}$$

$$= 0,024 \text{ m}$$

$$= 2,4 \text{ cm}$$

Jadi, jika pegas ditarik dengan gaya 12 N, pertambahan panjang pegas adalah 2,4 cm.

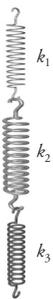
4. Susunan Pegas

Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering melihat beberapa pegas digunakan secara bersamaan. Sebagai contoh, *spring bed* menggunakan pegas dalam jumlah banyak yang disusun secara paralel. Jika beberapa pegas disusun sedemikian rupa, bagaimanakah konstanta pegas gabungannya?

Penggunaan pegas pada *spring bed* merupakan salah satu contoh susunan pegas. Susunan pegas pada *spring bed* adalah contoh susunan pegas secara paralel. Secara garis besar, susunan pegas ada dua macam, yaitu susunan seri dan susunan paralel. Mari kita bahas satu persatu susunan pegas tersebut.

a. Susunan Seri Pegas

Susunan seri pegas dapat kita buat dengan cara menyambung pegas dengan pegas lain, sehingga pegas gabungan tampak panjang. Perhatikan gambar 2.11. Dari uraian materi yang telah kita pelajari di depan, jika pegas ditarik dengan suatu gaya, pegas akan bertambah panjang sebanding dengan gaya yang menariknya. Bagaimanakah pertambahan panjang pada susunan seri pegas, jika ditarik dengan gaya F ?



Gambar 2.11 Beberapa pegas yang berbeda disusun secara seri

Jika susunan seri pegas diberi gaya F , setiap pegas akan bertambah panjang. Bukan hanya pegas yang paling dekat dengan penyebab gaya saja yang bertambah panjang, tetapi semua pegas akan bertambah panjang.

Untuk membuktikannya, coba kalian lakukan *Ekspedisi* berikut.

Ekspedisi

Lakukanlah percobaan sederhana berikut. Siapkan beberapa buah neraca pegas (lebih baik lagi menggunakan beberapa neraca pegas yang berbeda jenisnya) dan beberapa beban. Rangkailah dua neraca pegas secara seri dan gantungkan beban. Amatilah angka

yang ditunjukkan pada kedua neraca. Kemudian lakukan lagi menggunakan neraca pegas yang lebih banyak. Apa yang dapat kalian simpulkan? Diskusikan hasil pengamatan kalian dengan teman-teman lain.

Dari hasil ekspedisi, kalian mendapatkan bahwa kedua pegas menunjukkan skala yang sama. Ini berarti gaya pada neraca 1 sama dengan gaya pada neraca 2 atau neraca lainnya. Gaya ini juga menunjukkan berat benda atau gaya luar pada rangkaian seri (F_s). Jadi, kita mendapatkan persamaan,

$$F_s = F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_n$$

Keterangan:

F_s = besar gaya pada rangkaian seri (N)

F_1, F_2, \dots = gaya pada pegas 1, 2, ...

Gaya F yang diberikan pada susunan pegas menyebabkan setiap pegas bertambah panjang. Karena setiap pegas bertambah panjang, maka pertambahan panjang susunan seri pegas merupakan jumlah dari pertambahan panjang setiap pegas.

$$x_s = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$$

Keterangan:

x_s = pertambahan panjang rangkaian seri

x_1, x_2, \dots = pertambahan panjang pegas 1, 2, ...

Kalian telah mendapatkan hubungan antara x dan F dalam persamaan berikut.

$$x = \frac{F}{k}$$

Dari kedua persamaan tersebut, kita mendapatkan persamaan,

$$\frac{F_s}{k_s} = \frac{F_1}{k_1} + \frac{F_2}{k_2} + \frac{F_3}{k_3} + \dots + \frac{F_n}{k_n}$$

Karena $F_s = F_1 = F_2 = F_3 = F_n$ maka persamaan tersebut menjadi :

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

$$\frac{1}{k_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}$$

Keterangan:

k_s = konstanta susunan seri pegas (N/m)

k_1, k_2, \dots, k_n = konstanta pegas ke-1, 2, ..., dan ke-n (N/m)

x_s = pertambahan panjang susunan seri pegas (m)

x_1, x_2, \dots, x_n = pertambahan panjang pegas ke-1, 2, ..., dan ke-n (m)

F = gaya yang bekerja pada pegas (N)

Persamaan terakhir merupakan persamaan konstanta gabungan dari beberapa pegas yang dirangkai seri.

b. Susunan Paralel Pegas

Susunan paralel pegas dapat kita lihat pada *springbed*, *shockbreaker* sepeda motor, atau alat olahraga yang digunakan untuk peregangan otot. Perhatikan gambar 2.12. Ketika kita menarik alat olah raga tersebut dengan posisi mendatar, pertambahan panjang ketiga pegas sama besar. Sehingga jika beberapa pegas disusun paralel, kita mendapatkan persamaan:

$$x_p = x_1 = x_2 = x_3 = \dots = x_n$$

Keterangan:

x_p = pertambahan panjang pegas gabungan paralel

x_1, x_2, \dots = pertambahan pegas 1, 2,

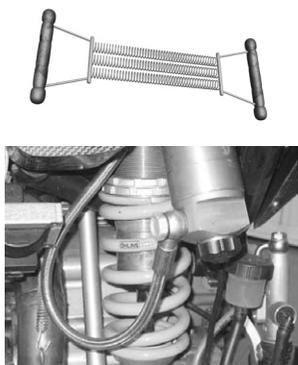
Pada saat kita menarik alat tersebut, gaya yang kita berikan terbagi menjadi tiga untuk setiap pegas. Ini berarti jika rangkaian paralel terdiri dari beberapa pegas, gaya total yang kita lakukan dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$F_p = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n$$

Keterangan:

F_p = gaya yang bekerja pada rangkaian paralel pegas

F_1, F_2, \dots = gaya pada pegas 1, 2, ...



www.gilamonster.com

Gambar 2.12 Susunan paralel pegas digunakan pada alat olahraga dan *shockbreaker* sepeda motor.

Dengan mensubstitusikan persamaan $F = kx$, kita mendapatkan persamaan:

$$k_p x_p = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + \dots + k_n x_n$$

$$k_p x = k_1 x + k_2 x + k_3 x + \dots + k_n x$$

Sehingga kita mendapatkan persamaan konstanta susunan paralel pegas sebagai berikut.

$$k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n$$

$$k_p = \sum_{i=1}^n k_i$$

Keterangan:

k_p = konstanta pegas rangkaian seri (N/m)

k_1, k_2, \dots = konstanta pegas 1, 2, ...

Contoh

Bagaimanakah kita menggunakan persamaan konstanta susunan pegas dalam menyelesaikan soal? Perhatikan contoh berikut.

1. Aminah mempunyai tiga buah pegas dengan konstanta 100 N/m, 150 N/m, dan 300 N/m. Berapakah konstanta gabungan ketiga pegas tersebut jika:

- disusun seri
- disusun paralel

Penyelesaian:

Diketahui:

$$k_1 = 100 \text{ N/m}$$

$$k_2 = 150 \text{ N/m}$$

$$k_3 = 300 \text{ N/m}$$

Ditanyakan:

- k_s
- k_p

Jawab:

a. konstanta susunan seri pegas (k_s) dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$

$$= \frac{1}{100} + \frac{1}{150} + \frac{1}{300}$$

$$= \frac{3}{300} + \frac{2}{300} + \frac{1}{300}$$

$$= \frac{6}{300}$$

$$k_s = \frac{300}{6}$$

$$= 50 \text{ N/m}$$

Jadi, konstanta pegas rangkaian seri adalah 50 N/m.

b. Konstanta susunan paralel pegas (k_p) dapat dicari dengan persamaan berikut.

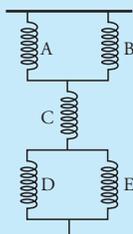
$$k_p = k_1 + k_2 + k_3$$

$$= 100 + 150 + 300$$

$$= 550 \text{ N/m}$$

Jadi, konstanta pegas rangkaian paralel adalah 550 N/m.

2. Lima buah pegas identik dengan konstanta k , di susun seperti gambar. Berdasarkan gambar tersebut, tentukan konstanta gabungannya?



Penyelesaian:

Diketahui:

5 pegas identik disusun seperti gambar.

Ditanyakan: k_{gabungan}

Jawab:

Berdasarkan gambar di atas, pegas A dan pegas B, tersusun paralel.

$$\begin{aligned} k_{p1} &= k + k \\ &= 2k \end{aligned}$$

Pegas D dan E, juga tersusun paralel, sehingga :

$$\begin{aligned} k_{p2} &= k + k \\ &= 2k \end{aligned}$$

Susunan paralel pegas pertama (k_{p1}), pegas C, dan susunan paralel kedua (k_{p2}) tersusun seri, sehingga:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_{\text{gab}}} &= \frac{1}{k_{p1}} + \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_{p2}} \\ &= \frac{1}{2k} + \frac{1}{k} + \frac{1}{2k} \\ &= \frac{1+2+1}{2k} = \frac{4}{2k} \end{aligned}$$

$$k_{\text{gab}} = \frac{1}{2}k$$

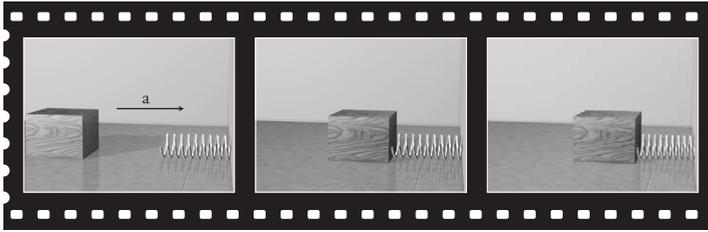
Jadi, konstanta gabungan dari sistem pegas tersebut adalah $0,5k$.

Bagaimana, menarik bukan? Nah, untuk menambah pemahaman kalian tentang pegas, kerjakan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

- Pada sebuah kawat tembaga yang mempunyai modulus Young $1,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, tergantung sebuah beban bermassa $0,75 \text{ kg}$. Jika panjang kawat mula-mula adalah 1 meter dan luas penampang kawat $0,5 \text{ mm}^2$, berapakah panjang kawat sekarang?
- Sebuah kawat besi dengan diameter penampang $0,8 \text{ mm}$ sepanjang 50 cm , ditarik dengan gaya 25 N . Akibat tarikan tersebut, kawat bertambah panjang $0,5 \text{ mm}$. Tentukan:
 - tegangan kawat,
 - regangan kawat,
 - modulus Young kawat tersebut.
- Seseorang siswa dengan massa 55 kg duduk pada jok sepeda motor. Akibatnya, kedua shockbreaker motor memendek sejauh 4 cm dari kedudukan semula. Tentukan konstanta setiap shockbreaker tersebut.
- Tiga buah pegas dengan konstanta 40 N/m , 50 N/m , dan 60 N/m disusun secara seri. Susunan pegas tersebut kemudian ditarik dengan gaya 80 N . Tentukan:
 - konstanta susunan seri,
 - pertambahan panjang pegas.

5. Sebuah balok bermassa 2 kg bergerak dengan percepatan 3 m/s^2 di atas sebuah lantai licin. Beberapa saat kemudian, balok menumbuk sebuah pegas sehingga pegas mengalami pemampatan sejauh 1,5 cm. Berapakah konstanta pegas tersebut?



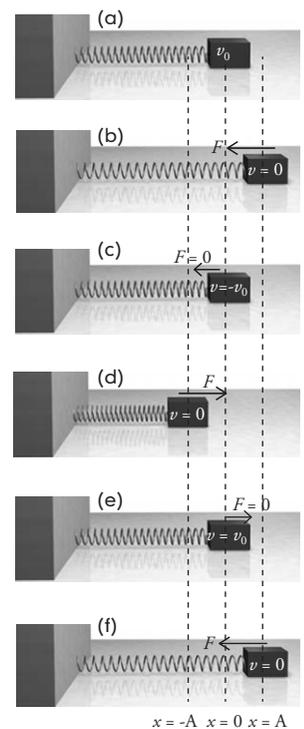
D Pegas dan Gerak Harmonis Sederhana

Jika sebuah beban digantungkan pada sebuah pegas dan kemudian ditarik, pegas akan bertambah panjang. Ketika tarikan dilepaskan, beban akan bergerak naik turun secara periodik atau berulang-ulang. Gerak beban ini merupakan contoh getaran atau osilasi yang sederhana.

Senar gitar, senar piano, garpu tala, dan pendulum merupakan beberapa contoh benda yang dapat bergetar. Getaran merupakan sumber gelombang. Getaran senar merupakan sumber gelombang pada senar, getaran udara merupakan sumber gelombang suara, dan lain sebagainya. Ini menandakan adanya hubungan yang erat antara getaran dan gelombang.

Sebuah getaran dikatakan gerak periodik apabila terjadi berulang-ulang pada lintasan yang sama. Sebagai contoh beban yang terhubung pada pegas yang ditarik dengan gaya tertentu. Perhatikan Gambar 2.13. Dari gambar tersebut, pusat massa beban pada gambar (a) berada pada titik keseimbangan, yaitu $x = 0$. Ketika beban ditarik ke kanan dengan gaya F (gambar b), pegas mengalami pemanjangan sehingga menyimpang sejauh A dari posisi seimbang. Pusat massa beban pada keadaan ini berada pada posisi $x = A$. Setelah tarikan dilepaskan, pegas kembali bergerak ke kiri. Dalam sepersekian detik, pusat massa beban kembali ke posisi seimbang di $x = A$ (gambar c). Gerak beban ini tidak berhenti di titik keseimbangan, tetapi terus bergerak ke kiri, sehingga pegas memendek dan pusat beban menyimpang sejauh A dari posisi keseimbangan (gambar d). Pada saat ini, pusat massa beban berada pada posisi $x = -A$. Setelah itu, pegas bergerak lagi ke kanan sehingga sampai di $x = 0$ (titik keseimbangan). Beberapa saat kemudian sampai pada posisi ($x = A$). Rangkaian gerak (dari $x = A$ ke $x = -A$ kembali ke $x = A$) ini terjadi berulang-ulang atau terjadi secara periodik. Inilah sebabnya gerak pusat massa beban pada pegas dapat disebut sebagai **gerak periodik**.

Nah, permasalahan sekarang adalah apakah yang menyebabkan beban bergerak ke kanan atau ke kiri, walaupun gaya tarikan telah dihilangkan?



Gambar 2.13 Beban yang terhubung pada pegas melakukan gerak periodik.

Dari penjelasan sebelumnya, kalian telah mengetahui bahwa ketika pegas diberi gaya, baik diregangkan maupun ditekan, pegas akan memberikan gaya pemulih atau gaya pegas sebesar, $F_p = -kx$ pada persamaan ini merupakan pertambahan panjang pegas dihitung dari titik keseimbangan. Dari persamaan gaya pegas tersebut, besarnya gaya yang diberikan pegas pada beban berubah setiap saat tergantung pada posisi beban. Tanda negatif (-) menunjukkan bahwa gaya pegas berlawanan dengan arah gerak beban atau arah simpangan.

Sekarang perhatikan kembali Gambar 2.13. Ketika beban bergerak ke kanan, gaya lenting pegas menariknya ke kiri. Begitu pula ketika beban bergerak ke kiri, pegas memberikan gaya ke kanan. Semua sistem yang bergetar seperti gambar 2.13 dimana gaya pemulih berbanding dengan negatif simpangannya disebut **gerak harmonis sederhana**.

Untuk mengetahui lebih jauh tentang gerak harmonis sederhana, simaklah penjelasan berikut.

1. Besaran-besaran pada Gerak Harmonis Sederhana

Dalam membahas gerak harmonis sederhana, kita perlu mendefinisikan beberapa besaran. Untuk mengenal besaran-besaran tersebut, coba kalian perhatikan kembali Gambar 2.13. Besaran-besaran yang mendasari gerak harmonis sederhana adalah sebagai berikut.

- a. **Simpangan** merupakan jarak pusat massa beban dari titik keseimbangan. Pada gambar, simpangan ditandai dengan huruf x . Besar simpangan setiap saat selalu berubah karena beban terus bergerak disekitar titik keseimbangan.
- b. **Amplitudo** menyatakan simpangan maksimum atau simpangan terbesar titik pusat massa beban. Pada Gambar 2.12, amplitudo ditunjukkan pada posisi $x = A$ atau $x = -A$. Amplitudo disimbolkan dengan huruf A .
- c. **Periode** diartikan sebagai waktu yang diperlukan untuk melakukan satu getaran. Dalam hal ini, satu getaran didefinisikan sebagai gerak dari posisi $x = A$ ke posisi $x = -A$ dan kembali ke posisi $x = A$ lagi. Periode disimbolkan dengan huruf T dan mempunyai satuan detik (s).
- d. **Frekuensi** diartikan sebagai banyaknya getaran yang dilakukan tiap satu satuan waktu. Frekuensi disimbolkan dengan huruf f dan mempunyai satuan **hertz** atau Hz. Frekuensi dapat pula diartikan sebagai kebalikan periode atau dapat dituliskan sebagai:

$$f = \frac{1}{T} \text{ atau } T = \frac{1}{f}$$

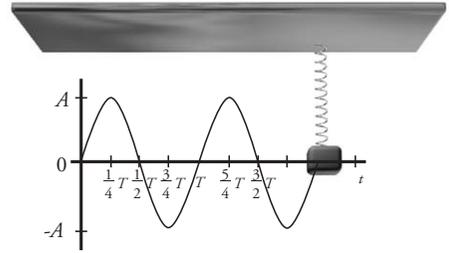
Keterangan:

f = frekuensi (Hz)

T = periode (s)

2. Bentuk Sinusoidal Gerak Harmonis Sederhana

Gerak harmonis sederhana seperti yang dilakukan pegas dapat digambarkan dalam bentuk grafik fungsi sinus atau disebut grafik sinusoidal. Perhatikan gambar 2.14. Pada beban dipasang pencil dengan tujuan menggambar simpangan beban pada kertas. Ketika beban bergerak naik turun dan kertas ditarik horisontal dengan kecepatan konstan, pencil akan menggambar meninggalkan goresan pada kertas. Untuk membuktikannya coba kalian lakukan *Ekspedisi* berikut.



Gambar 2.14 Gerak harmonis sederhana digambarkan dalam grafik sinusoidal.

Ekspedisi

Berdasarkan keterangan dan Gambar 2.13, rancanglah sebuah percobaan sederhana untuk membuktikan bahwa getaran pada pegas merupakan grafik fungsi sinusoidal. Beberapa bahan yang kalian perlukan antara lain, pegas, beban,

kertas, dan pencil. Tuliskan rancangan percobaan kalian sekaligus hasilnya menggunakan metode ilmiah. Presentasikan rancangan dan hasil percobaan kalian di depan kelas.

Grafik pada Gambar 2.14 menggambarkan simpangan pusat massa beban setiap saat. Jarak puncak grafik dari sumbu horisontal menyatakan simpangan maksimum atau amplitudo A . Perpotongan grafik dengan sumbu horisontal merupakan letak titik keseimbangan. Pegas dikatakan melakukan satu getaran jika telah bergerak dari O ke T . Waktu untuk menempuh satu getaran ini disebut satu periode (T).

Sekarang perhatikan, untuk $t = 0$ beban berada di titik keseimbangan ($x = 0$). Sementara untuk $t = \frac{1}{4} T$, beban telah menyimpang sejauh A dari titik keseimbangan ($x = A$). Secara umum, persamaan simpangan (x) setiap saat pada grafik x - t tersebut diberikan dengan persamaan:

$$x = A \sin \omega t$$

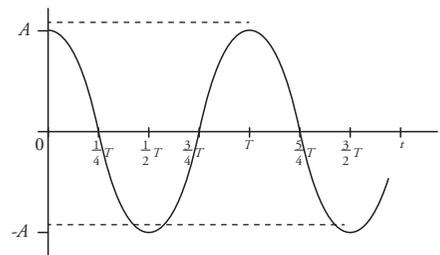
dengan mensubstitusikan persamaan $\omega = \frac{2\pi}{T}$ kita mendapatkan bentuk:

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$x = A \sin 2\pi f t$$

Keterangan:

x = simpangan (m)
 A = amplitudo (m)
 T = periode (s)
 f = frekuensi (Hz)
 t = lama beban bergerak (s)
 ω = kecepatan sudut (rad/s)



Gambar 2.15 Jika pada saat $t=0$, beban menyimpang sejauh A , maka grafik simpangannya menjadi grafik fungsi cosinus

Persamaan simpangan di atas berlaku jika pada saat $t = 0$, benda berada di titik keseimbangan ($x = 0$). Akan tetapi, jika pada saat $t = 0$, benda telah menyimpang sejauh A , simpangan sebagai fungsi sinus berubah menjadi fungsi cosinus. Perhatikan Gambar 2.15. Berdasarkan gambar tersebut, persamaan simpangannya menjadi:

$$x = A \cos \omega t$$

Persamaan ini sebenarnya sama dengan persamaan simpangan sebagai fungsi sinus, tergantung titik acuan yang kita pakai. Jika kita mengacu pada titik keseimbangan sebagai titik awal, persamaan sinuslah yang kita pakai. Sebaliknya, jika acuannya titik simpangan terjauh, persamaan yang kita pakai adalah persamaan cosinus.

3. Kecepatan dan Percepatan Getar

Simpangan pada persamaan di depan dapat diartikan sebagai posisi pusat massa beban setiap saat. Dari posisi ini, kita dapat mencari kecepatan gerak beban. Pada bab sebelumnya, kalian telah mempelajari bahwa kecepatan merupakan turunan posisi. Jadi, kecepatan gerak benda atau kecepatan getaran pegas dicari dengan persamaan:

$$\bar{v} = \frac{d\bar{x}}{dt}$$

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

Keterangan:

\bar{v} = kecepatan getar (m/s^2)

A = amplitudo (m)

ω = kecepatan sudut

Sehingga, besar kecepatan getar dicari dengan persamaan berikut.

$$v = A\omega \cos \omega t$$

Dari persamaan kecepatan getar tersebut, nilai maksimum yang dapat dicapai $\cos \omega t$ adalah 1. Jika keadaan ini tercapai, kecepatan getar akan mencapai kecepatan maksimum, yang dirumuskan sebagai:

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

Dari persamaan kecepatan, kita dapat mencari persamaan percepatan getar ketika beban menyimpang sejauh x . Percepatan getar merupakan turunan fungsi kecepatan terhadap waktu, sehingga percepatan getar dapat dicari dengan persamaan:

$$\bar{a} = \frac{d\bar{v}_x}{dt}$$

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

$$\bar{a} = -A\omega^2 \sin \omega t$$

Seperti kecepatan maksimum, percepatan maksimum juga dicapai ketika $\sin \omega t = 1$. Jadi, besar percepatan maksimum dinyatakan dalam persamaan:

Teropong

Di bab I, kita telah mengetahui bahwa kecepatan merupakan turunan posisi (r) terhadap waktu (t), atau dituliskan dalam persamaan:

$$v = \frac{dr}{dt}$$

Turunan untuk fungsi trigonometri adalah sebagai berikut.

$$\frac{d(A \sin xt)}{dt} = Ax \cos xt$$

$$\frac{d(A \cos xt)}{dt} = -Ax \sin xt$$

dengan x merupakan konstanta.

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

Keterangan:

\vec{a} = percepatan getar (m/s^2)

Dari persamaan percepatan, kita tahu bahwa $A \sin \omega t$ tidak lain adalah simpangan x . Jadi, besar percepatan getar dapat dirumuskan:

$$a = -A\omega^2 x$$

Keterangan:

x = simpangan (m)

Persamaan ini memberikan arti bahwa percepatan getar selalu berlawanan dengan simpangan. Ketika beban menyimpang ke atas (arah x positif), percepatan menuju ke bawah. Begitu pula sebaliknya, ketika beban menyimpang ke bawah, arah percepatannya ke atas.

4. Periode Getar

Percepatan getar yang selalu berlawanan dengan simpangan disebabkan oleh gaya pemulih pada pegas. Kita telah membahas bahwa besar gaya pemulih pegas dinyatakan sebagai:

$$F_p = kx$$

Gaya pemulih ini dapat juga dicari menggunakan Hukum II Newton. Berdasarkan Hukum II Newton, besar gaya lenting dapat dicari dengan persamaan:

$$F_p = m a$$

$$F_p = m\omega^2 x$$

$$F_p = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 x$$

Dari dua persamaan F_p tersebut, kita dapat mencari periode T .

$$kx = m \frac{4\pi^2}{T^2} x$$

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Keterangan:

T = periode (s)

m = massa beban (kg)

k = konstanta pegas (N/m)

Persamaan tersebut memberikan arti bahwa periode gerak tergantung pada massa beban dan konstanta pegasnya. Semakin besar massa yang digunakan, maka periode getarnya juga semakin besar. Sebaliknya, semakin besar konstanta pegas, yang berarti pegas semakin kaku, periode getarnya semakin kecil.

Untuk mengetahui penggunaan persamaan-persamaan pada pegas, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah benda bermassa 0,5 kg digantungkan pada sebuah pegas. Akibatnya, beban bergerak naik turun dengan simpangan terjauh yang dicapai 3 cm. Jika konstanta pegas yang dipakai 50 N/m, tentukan:

- periode gerakan beban,
- persamaan simpangan,
- besar kecepatan getar dan kecepatan maksimum,
- besar percepatan pada saat $t = 0,16$ s.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 0,5 \text{ kg}$$

$$A = 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$k = 50 \text{ N/m}$$

Ditanyakan:

- T
- x
- v dan v_{maks}
- a untuk $t = 0,16$ s.

Jawab:

- Untuk mencari T , gunakan persamaan,

$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \\ &= 2 \times 3,14 \sqrt{\frac{0,5}{50}} \\ &= 0,628 \text{ s} \end{aligned}$$

Jadi, periode getarnya adalah 0,628 s.

- Secara umum, persamaan simpangan di nyatakan dengan:

$$x = A \sin \omega t$$

$$x = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right)$$

$$x = 0,03 \sin \left(\frac{2\pi}{0,628} t \right)$$

$$x = 0,03 \sin (3,18\pi)t$$

Jadi, persamaan simpangannya adalah $x = 0,03 (3,18\pi) t$.

- Besar kecepatan getar dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} \\ &= \frac{d(0,03 \sin(3,18\pi)t)}{dt} \\ &= 0,10\pi \cos(3,18\pi)t \end{aligned}$$

$$= 0,314 \cos(3,18\pi)t$$

v_{maks} tercapai jika, $\cos(3,18\pi)t = 1$.

Jadi, besar kecepatan maksimumnya adalah 0,314 m/s.

- Besar percepatan dicari dengan persamaan,

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} \\ &= \frac{d(0,1\pi \cos 3,18\pi t)}{dt} \\ &= 0,318\pi \sin(3,18\pi)t \end{aligned}$$

$$= 0,10 \sin(3,18\pi)t$$

Untuk $t = 0,16$ s, besar percepatannya adalah,

$$\begin{aligned} a &= 0,10 \sin (3,18\pi \times 0,16) \\ &= 0,10 \sin 0,5\pi \\ &= 0,10 \times 1 \\ &= 0,10 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Jadi, besar percepatan pada saat $t = 0,16$ s adalah $0,10 \text{ m/s}^2$

Selain pegas, contoh lain yang merupakan gerak harmonis sederhana adalah gerak ayunan pada pendulum sederhana. Pada saat melakukan eksperimen untuk mencari percepatan gravitasi di suatu tempat, kalian menggunakan pendulum sederhana. Bagaimanakah hubungan pendulum sederhana dengan percepatan gravitasi? Kalian akan mengetahuinya setelah mempelajari materi berikut.

E Pendulum Sederhana

Seperti penjelasan pada eksperimen di subbab sebelumnya, pendulum sederhana terdiri atas sebuah benda kecil (bisa berbentuk bola atau bentuk lain) yang tergantung pada sebuah tali ringan. Dalam hal ini, massa tali diabaikan karena terlalu kecil dibandingkan massa bola. Ketika diberi sedikit gaya, bola pendulum akan bergerak berayun-ayun. Gerakan ini terjadi berulang-ulang secara periodik di sekitar titik keseimbangannya. Namun, apakah pendulum mengalami gerak harmonis sederhana? Untuk menjawabnya, perhatikan gambar 2.16 .

Titik keseimbangan bola pendulum didapatkan ketika pendulum diam dan bola tergantung vertikal. Ketika gaya diberikan, bola pendulum akan bergerak dengan lintasan berupa busur lingkaran. Bola ini akan menyimpang sejauh x dari titik keseimbangan. Sementara tali pada posisi ini membentuk sudut θ terhadap garis vertikal. Jika, panjang tali dinyatakan dalam l , maka x dan θ dihubungkan dengan persamaan:

$$x = l\theta$$

Keterangan:

x = simpangan pendulum (m)

l = panjang tali (m)

θ = sudut simpangan terhadap garis vertikal

Perhatikan kembali Gambar 2.16 (b). Berdasarkan gambar tersebut, gaya yang menyebabkan bola bergerak ke titik keseimbangannya adalah $mg \sin \alpha$ yang merupakan gaya pemulih (F_p). Arah gaya pemulih ini berlawanan dengan arah penyimpangan, sehingga kita mendapatkan persamaan:

$$\vec{F}_p = -mg \sin \theta$$

Keterangan:

\vec{F}_p = gaya pemulih (N)

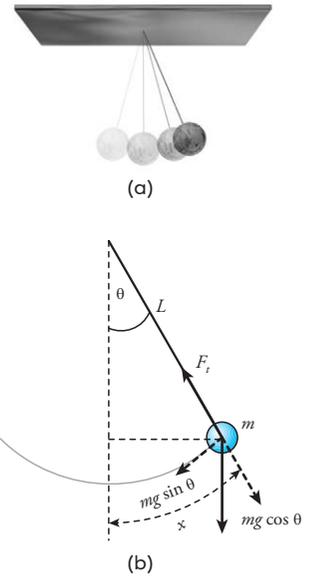
m = massa bola pendulum (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

θ = sudut yang dibentuk tali dan garis vertikal

Jika θ kecil ($\theta < 15^\circ$), maka nilai $\sin \theta$ sebanding dengan θ ($\sin \theta \approx \theta$). Jadi, kita mendapatkan persamaan:

$$F_p = -mg\theta$$
$$F_p = -\frac{mg}{l}x$$



Gambar 2.16 Sebuah pendulum sederhana dan gaya yang bekerja pada bola pendulum.



www.phys.canterbury.ac.nz

Ilmuwan Prancis, Leon Foucault, menggunakan pendulum sederhana untuk menunjukkan bahwa bumi berputar. Sebuah pendulum sederhana akan bergerak di antara dua titik yang sama menurut garis edarnya.

Foucault memasang pendulum yang berayun dalam sebuah katedral. Setelah beberapa jam, pendulum tersebut telah berayun menjauhi garis edarnya. Ini membuktikan bahwa bumilah yang bergerak, bukan jalur pendulum tersebut.

Lafferty, Peter, 2000

Persamaan ini identik dengan bentuk persamaan gaya pulih pada pegas ($F_p = -kx$). Jadi, gerak pendulum juga merupakan gerak harmonis sederhana. Dari kedua persamaan ini, kita mendapatkan:

$$k = \frac{mg}{l}$$

Dengan memasukkan harga k ini ke persamaan periode pegas $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ di depan, kita mendapatkan persamaan periode ayunan pendulum:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\frac{mg}{l}}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Jika kedua ruas dikuadratkan, kita mendapatkan persamaan:

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

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

Keterangan:

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

l = panjang tali (m)

T = periode ayunan (s)

Persamaan ini dapat kita gunakan untuk mencari besar percepatan gravitasi di suatu tempat, seperti yang telah kalian buktikan melalui eksperimen. Untuk menambah wawasan kalian, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

- Seorang anak bermassa 25 kg bermain ayunan. Ia didorong oleh temannya dengan gaya 50 N sehingga tali membentuk sudut 30° dari posisi vertikal. Jika panjang tali ayunan adalah 2 meter dan percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan:
 - simpangan dari titik keseimbangan,
 - periode ayunan.
- Ketika terjadi gempa bumi, sebuah lampu bermassa 75 gram yang tergantung pada kabel sepanjang 60 cm berayun-ayun. Dalam 30 detik, lampu berayun sebanyak 45 kali. Jika sudut ayunan kecil dan percepatan gravitasi bumi 10 m/s^2 , tentukan besar gaya akibat gempa yang menyebabkan lampu berayun.

1. Hukum Gravitasi Newton menyatakan bahwa setiap partikel dalam alam semesta selalu menarik partikel lain dengan gaya berbanding lurus dengan perkalian massa masing-masing partikel dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya. Secara matematis, besarnya gaya gravitasi antara dua partikel dirumuskan sebagai berikut.

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

2. Medan gravitasi atau percepatan gravitasi menyatakan daerah di sekitar benda yang masih terpengaruh gaya gravitasi dari benda tersebut. Medan gravitasi dari benda bermassa m , dirumuskan dengan persamaan:

$$g = G \frac{m}{R^2}$$

3. Planet bergerak mengelilingi matahari disebabkan adanya medan gravitasi matahari yang mempengaruhi planet. Kelajuan planet dalam mengelilingi matahari dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$v = \sqrt{\frac{Gm_m}{R}}$$

4. Jika jarak planet ke matahari dan periode revolusi planet diketahui, massa matahari dapat dihitung dengan rumus:

$$m_m = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$$

5. Tegangan menyatakan perbandingan besar gaya dengan luas permukaan benda, dan dirumuskan:

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

6. Regangan (*strain*) menyatakan perbandingan antara pertambahan panjang suatu benda dengan panjang mula-mula dan dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

7. Modulus elastisitas (modulus Young) menyatakan perbandingan antara tegangan dengan regangan.

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{F \times l_0}{A \times \Delta l}$$

8. Hukum Hooke menyatakan bahwa jika pada sebuah pegas bekerja sebuah gaya, maka pegas tersebut akan bertambah panjang sebanding dengan gaya yang mempengaruhi pegas tersebut. Secara matematis, hukum Hooke dinyatakan dengan persamaan:

$$F = k x$$

9. Konstanta gabungan beberapa pegas yang disusun seri dicari dengan rumus:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

10. Konstanta gabungan beberapa pegas yang disusun paralel dihitung dengan persamaan:

$$k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n$$

11. Gerak pegas merupakan contoh gerak harmonis sederhana (GHS). Sebagai GHS, gerak pegas dapat digambarkan dalam grafik sinusoidal, dan dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$x = A \sin \omega t$$

di mana x = simpangan, A = amplitudo, ω = kecepatan sudut, dan t = waktu.

12. Untuk mencari percepatan gravitasi, kita dapat menggunakan ayunan atau p_{π}^1 -dulum sederhana. Percepatan gravitasi ini berhubungan dengan periode ayunan yang dinyatakan dalam bentuk persamaan,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Telaah Istilah

Elastisitas Kelentingan benda

Gerak harmonis sederhana Gerak benda yang mempunyai gaya pemulih berlawanan dengan arah simpangan

Gravitasi Gaya tarik-menarik antara dua benda bermassa

Konstanta pegas Konstanta yang menunjukkan tingkat elastisitas pegas

Medan gravitasi Daerah di sekitar benda yang masih terpengaruh gaya gravitasi benda

Modulus Young Perbandingan antara tegangan dengan regangan

Regangan/strain Perbandingan antara pertambahan panjang suatu benda dengan panjang mula-mula

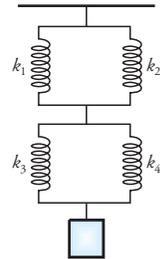
Tegangan/stress Perbandingan gaya dengan luas permukaan

Ulangan Harian

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

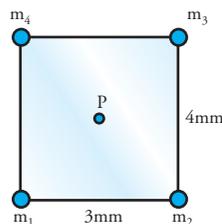
- Dua buah benda bermassa m dan M terpisah pada jarak r . Akibatnya kedua benda mengalami gaya tarik sebesar F . Jika kita ingin menambah gaya tarik kedua benda menjadi $4F$, yang perlu dilakukan adalah . . .
 - mempersingkat jarak menjadi $\frac{1}{2}r$
 - menambah massa benda pertama menjadi $2m$
 - menambah massa benda kedua menjadi $2M$
 - mempertajam jarak kedua benda menjadi $4r$
 - menambah massa pertama menjadi $2m$ dan massa kedua menjadi $\frac{1}{2}M$
- Jarak rata-rata planet A dari matahari adalah q . Sementara jarak rata-rata planet B adalah r . Jika planet A mempunyai periode revolusi T dan $r = 3q$, maka periode revolusi planet B adalah . . .
 - $3T$
 - $3\sqrt{3}T$
 - $9T$
 - $27T$
 - $81T$
- Sebuah pesawat ruang angkasa dengan massa $1,2$ ton sedang berada pada jarak 1.000 km dari permukaan bulan. Jika diketahui jejari bulan 1.738 km, dan massanya $7,38 \cdot 10^{22}$ kg, maka gaya gravitasi yang dirasakan pesawat adalah...
 - $787,95$ N
 - $878,59$ N
 - 1.200 N
 - $1.955,6$ N
 - $2.157,8$ N
- Sebuah satelit mengorbit bumi pada ketinggian 20.000 km jika diukur dari pusat bumi. Jika percepatan gravitasi bumi 10 m/s², kelajuan gerak satelit agar tetap pada orbitnya adalah . . . m/s.
 - $3\sqrt{3}T$
 - $\sqrt{2} \times 10^8$
 - 1×10^8
 - $\sqrt{2} \times 10^4$
 - 1×10^4
- Massa seorang astronot di bumi 60 kg. Jika gaya gravitasi bulan $1/6$ gaya gravitasi bumi, maka berat astronot di bulan adalah . . .
 - 10 N
 - 50 N
 - 100 N
 - 300 N
 - 500 N
- Sebuah kawat dengan jejari $0,7$ mm dengan panjang 25 cm ditarik dengan gaya $15,4$ N. Akibatnya, kawat mengalami pertambahan panjang $0,5$ mm. Besar tegangan dan regangan kawat adalah . . .

- a. 22 N/m^2 dan $0,002$
 b. $2,2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ dan $0,002$
 c. $2,2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ dan $0,02$
 d. $1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ dan $0,002$
 e. $1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ dan $0,02$
7. Sebuah kawat dengan luas penampang $3,14 \text{ mm}^2$ dengan panjang $31,4 \text{ cm}$ ditarik dengan gaya 75 N . Jika modulus elastisitas kawat adalah $1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, panjang kawat menjadi
 a. $0,75 \text{ m}$ d. $32,15 \text{ cm}$
 b. $31,4075 \text{ cm}$ e. $38,9 \text{ cm}$
 c. $31,475 \text{ cm}$
8. Sebuah anak panah bermassa 600 gram meluncur dari busurnya dengan percepatan 2 m/s^2 . Jika tali busur merenggang sejauh 15 cm ketika ditarik, maka konstanta tali yang dipakai adalah
 a. $0,4 \text{ N/m}$ d. $7,5 \text{ N/m}$
 b. $0,8 \text{ N/m}$ e. 8 N/m
 c. 4 N/m
9. Amir menarik pegas dengan gaya sebesar 200 N sehingga bertambah panjang 5 cm . Konstanta pegas tersebut adalah
 a. 40 N/m d. 4.500 N/m
 b. 400 N/m e. 5.000 N/m
 c. 4.000 N/m
10. Sebuah pistol mainan dengan pegas di dalamnya melontarkan sebuah peluru bermassa 20 gram dengan percepatan 1 m/s^2 . Ketika peluru dimasukkan, pegas memendek 3 cm . Konstanta pegas yang dipakai adalah
 a. $0,33 \text{ N/m}$ d. $6,7 \text{ N/m}$
 b. $0,67 \text{ N/m}$ e. 67 N/m
 c. $3,3 \text{ N/m}$
11. Tiga buah pegas mempunyai konstanta 2.000 N/m , 3.000 N/m , dan 6.000 N/m . Konstanta gabungan pegas jika disusun seri dan paralel berturut-turut adalah
 a. 1.000 N/m dan 11.000 N/m
 b. 2.000 N/m dan 11.000 N/m
 c. 6.000 N/m dan 11.000 N/m
 d. 11.000 N/m dan 1.000 N/m
 e. 11.000 N/m dan 2.000 N/m
12. Sepuluh pegas identik disusun secara seri. Berat beban yang harus diberikan agar pertambahan panjang pegas pada susunan seri sama dengan pertambahan panjang pegas tunggal adalah . . . kali berat beban pada pegas tunggal.
 a. $1/10$ d. 10
 b. $1/5$ e. 20
 c. 5
13. Dua pegas memiliki konstanta pegas masing-masing k_1 dan k_2 dengan $k_2 = 4k_1$. Kedua pegas disusun secara paralel kemudian diubah secara seri. Perbandingan pertambahan panjang antara susunan paralel dan seri, jika diberi beban yang sama adalah
 a. $1 : 4$ d. $5 : 16$
 b. $3 : 16$ e. $6 : 25$
 c. $4 : 25$
14. Empat buah pegas disusun seperti gambar di bawah. Jika diketahui $k_1 = k_3 = 40 \text{ N/m}$ dan $k_2 = k_4 = 80 \text{ N/m}$, konstanta gabungan keempat pegas tersebut adalah . . . N/m .
 a. $\frac{11}{24}$ d. 120
 b. $\frac{24}{11}$ e. 240
 c. 60



B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

1. Bulan jauh lebih kecil dari bumi. Massa bulan sekitar 0,012 massa bumi dan jejari bulan sekitar 0,272 jejari bumi. Buktikan bahwa percepatan gravitasi di permukaan bulan sekitar 1/6 kali gravitasi di permukaan bumi.
2. Sebuah roket bermassa 1 ton meluncur meninggalkan bumi. Roket tersebut mengorbit pada ketinggian 200 km dari permukaan bumi (anggaplah orbit roket berupa lingkaran sempurna). Jejari bumi 6.370 km dan periode edar roket sama dengan periode rotasi bumi yaitu 24 jam.
 - a. Berapakah besar kecepatan sudut dan kecepatan linear roket tersebut?
 - b. Hitunglah besar percepatan sentripetal yang dialami roket.
 - c. Berapakah besar gaya sentripetal yang dialami roket?

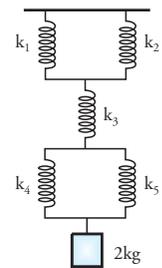


3. Empat buah partikel terletak pada sudut-sudut sebuah persegi panjang. Perhatikan gambar. Massa masing-masing partikel tersebut adalah $m_1 = 5 \text{ mg}$, $m_2 = 8 \text{ mg}$, $m_3 = 10 \text{ mg}$, dan $m_4 = 4 \text{ mg}$. Jarak antara m_1 ke m_2 adalah 3 mm dan jarak m_2 ke m_3 adalah 4 mm. Tentukan :
 - a. gaya gravitasi total yang dialami m_1 ,
 - b. medan gravitasi sebuah titik di tengah-tengah persegi panjang.
4. Diketahui kuat medan gravitasi di permukaan bumi $9,81 \text{ m/s}^2$. Hitunglah kuat medan gravitasi pada orbit di ketinggian 2 kali jejari bumi dan 5 kali jejari bumi, jika diukur dari permukaan bumi.
5. Sebuah kawat berdiameter 0,5 mm sepanjang 50 cm digunakan untuk menggantung beban seberat 100 N. Jika panjang kawat menjadi 50,09 cm, tentukan:
 - a. tegangan kawat,
 - b. regangan kawat,

c. modulus young kawat.

6. Sebuah batu bermassa 1 kg dijatuhkan dari ketinggian 2 m tanpa kecepatan awal dan menimpa tiga buah pegas yang disusun paralel. Akibat tumbukan itu, pegas mengalami pemampatan 4 cm. Jika ketiga pegas tersebut identik, berapakah konstanta pegasnya?
7. Sebuah pegas dengan konstanta 5.000 N/m ditumbuk sebuah balok bermassa 500 g. Balok tersebut semula bergerak dengan kecepatan 4 m/s. 2 detik kemudian, balok menumbuk pegas dengan kecepatan 8 m/s. Tentukan:
 - a. besar gaya yang menumbuk pegas,
 - b. pertambahan panjang pegas,

8. Perhatikan gambar susunan pegas di samping. Jika diketahui $k_1 = k_2 = 400 \text{ N/m}$, $k_3 = 500 \text{ N/m}$, $k_4 = 200 \text{ N/m}$, $k_5 = 300 \text{ N/m}$, dan massa benda 2 kg, tentukan:
 - a. konstanta gabungan pegas tersebut,
 - b. pertambahan panjang setiap pegas.



9. Simpangan pada waktu t dari sebuah beban yang tergantung pada pegas dinyatakan sebagai $x = 0,05 \sin \left(\frac{1}{2} \pi t \right)$. Jika massa beban 0,4 kg, tentukan:
 - a. amplitudo
 - b. simpangan pada saat $t = 4 \text{ s}$
 - c. periode getar
 - d. kecepatan getar
 - e. percepatan getar
 - f. konstanta pegas
10. Seorang anak bermassa 30 kg sedang bermain ayunan. Jika panjang ayunan 3 meter dan percepatan gravitasi di tempat tersebut $9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan:
 - a. periode ayunan
 - b. banyaknya ayunan yang dilakukan selama 10 detik

Latihan Ulangan Tengah Semester I

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- Titik P berada pada koordinat (4 cm, -5 cm). Vektor posisi titik P dan jarak titik ke pusat koordinat adalah . . . cm.
 - $-4\hat{i} + 5\hat{j}$ dan 9
 - $-4\hat{i} + 5\hat{j}$ dan $\sqrt{41}$
 - $4\hat{i} - 5\hat{j}$ dan 9
 - $4\hat{i} - 5\hat{j}$ dan $\sqrt{41}$
 - $5\hat{i} - 4\hat{j}$ dan $\sqrt{41}$
- Sebuah benda semula berada pada koordinat A(3m, 4m). Setelah 10 detik, benda berada pada koordinat B(5m, -12m). Besar perpindahan dan kecepatan gerak benda tersebut adalah
 - $3\sqrt{2}$ m dan $30\sqrt{2}$ m/s
 - $3\sqrt{2}$ m dan $0,3\sqrt{2}$ m/s
 - $2\sqrt{65}$ m dan $20\sqrt{65}$ m/s
 - $2\sqrt{65}$ m dan $0,2\sqrt{65}$ m/s
 - $0,2\sqrt{65}$ m dan $2\sqrt{65}$ m/s
- Vektor posisi dari seekor burung yang bergerak setiap saat, diberikan dengan persamaan $\vec{r} = 4t\hat{i} - 3t\hat{j} + \hat{k}$, dengan r dalam m dan t dalam s. Vektor kecepatan dan besar kecepatan burung tersebut adalah
 - $\vec{v} = 4\hat{i} - 3\hat{j} + 1$ dan $v = 8$ m/s
 - $\vec{v} = 4\hat{i} - 3\hat{j} + 1$ dan $v = \sqrt{26}$ m/s
 - $\vec{v} = 4\hat{i} - 3\hat{j}$ dan $v = 5$ m/s
 - $\vec{v} = 4\hat{i} - 3\hat{j}$ dan $v = \sqrt{26}$ m/s
 - $\vec{v} = 4\hat{j} - 3\hat{k}$ dan $v = 5$ m/s
- Seorang pembalap F-1 melaju dengan kecepatan yang selalu berubah setiap waktu. Kecepatan pembalap dinyatakan dengan persamaan $\vec{v} = (-12t\hat{i} - 16t^2\hat{j})$ m/s. Posisi pembalap pada saat $t = 3$ s adalah
 - $-54\hat{i} - 135\hat{j}$
 - $-6\hat{i} - \frac{16}{3}\hat{j}$
 - $-12\hat{i} - 16\hat{j}$
 - $-36\hat{i} - 48\hat{j}$
 - $-36\hat{i} - 48\hat{j}$
- Vektor posisi suatu benda diberikan oleh $\vec{r} = \{(3t^2 - 2t + 3)\hat{i} + (3t)\hat{j}\}$ m. Besar perpindahan benda dari $t = 1$ s sampai $t = 2$ s adalah . . . m.
 - $\sqrt{157}$
 - $\sqrt{58}$
 - $\sqrt{31}$
 - 5
 - 3
- Sebuah bola dilemparkan pada arah mendatar dari puncak menara yang tingginya 45 m. Jika kecepatan lemparan 10 m/s, maka jarak tempuh benda dalam arah mendatar dihitung dari kaki menara adalah . . . m.
 - 30
 - 45
 - 60
 - 90
 - 120
- Sebuah benda melakukan gerak melingkar. Apabila frekuensi geraknya diperbesar tiga kali, maka gaya sentripetalnya menjadi . . . kali semula.
 - $\frac{1}{3}$
 - 3
 - 6
 - 9
 - 18
- Sebuah bola golf dipukul sehingga melekat dengan kecepatan 9,8 m/s membentuk sudut θ terhadap tanah. Jika $\sin \theta = 4/5$, $\cos \theta = 3/5$, dan $g = 9,8$ m/s², maka lama bola di udara adalah . . . s.

- a. 0,5
b. 1,5
c. 1,6
d. 1,7
e. 17,5
9. Posisi sudut pentil pada roda sepeda yang berjalan dinyatakan dengan persamaan $\theta = (6t^2 + 2t + 3)$ rad, maka :
- (1) posisi sudut pada $t = 2s$ adalah 17 rad.
 - (2) kecepatan sudut pada $t = 3s$ adalah 9 rad/s.
 - (3) percepatan sudut pada $t = 0$ adalah 0 rad/s^2 .
 - (4) percepatan sudut konstan.
- Pernyataan yang benar adalah pernyataan nomor
- a. (1), (2), dan (3)
 - b. (1), (2), dan (4)
 - c. (2), (3), dan (4)
 - d. (1) dan (4)
 - e. (2) dan (3)
10. Kecepatan sudut suatu benda dinyatakan sebagai $\omega = (6t^2 + 2t + 3)$ rad/s, maka besar percepatan sudut pada saat $t = 2s$ adalah . . . rad/s².
- a. 10
 - b. 12
 - c. 14
 - d. 16
 - e. 18
11. Dua buah roda dihubungkan dengan rantai. Jika perbandingan jejari roda I dan roda II adalah 2 : 3, dan roda I berputar dengan persamaan kecepatan sudut $\omega = (3t + 6)$ rad/s, maka besar percepatan sudut roda II adalah . . . rad/s².
- a. 6
 - b. 5
 - c. 4
 - d. 3
 - e. 2
12. Dua buah benda bermassa m dan M terpisah pada jarak R . Akibatnya kedua benda mengalami gaya tarik sebesar F . Jika kita ingin menambah gaya tarik menjadi $9 F$, yang perlu dilakukan adalah
- a. memperpendek jarak menjadi $\frac{1}{3} R$
 - b. memperpendek jarak menjadi $3 R$
 - c. menambah massa benda pertama menjadi $3 m$
 - d. menambah massa benda kedua menjadi $3 M$
 - e. memperpanjang jarak kedua benda menjadi $9 R$
13. Periode revolusi bumi adalah 1 tahun dengan jarak rata-rata dari matahari 150 juta km (1 SA). Jika massa bumi 6×10^{24} kg, maka massa matahari adalah . . . kg.
- a. $9,00 \times 10^{30}$
 - b. $3,00 \times 10^{30}$
 - c. $2,00 \times 10^{30}$
 - d. $3,00 \times 10^{27}$
 - e. $2,00 \times 10^{27}$
14. Sebuah satelit mengorbit pada ketinggian 2.630 km dari permukaan bumi. Jika diketahui jejari bumi 6.370 km dan percepatan gravitasi bumi 10 m/s^2 , kecepatan edar satelit tersebut adalah . . . m/s.
- a. 300
 - b. 256
 - c. 221,12
 - d. 162,17
 - e. 140,3
15. Massa seorang astronout di bumi 72 kg. Jika medan gravitasi pada sebuah planet sama dengan $\frac{1}{8}$ kali medan gravitasi bumi, maka berat astronout di planet tersebut adalah . . . N.
- a. 9
 - b. 18
 - c. 90
 - d. 180
 - e. 900
16. Seseorang yang bermassa 60 kg menduduki jok sepeda motor. Jika *shockbreaker* memendek 4 cm dari kedudukan semula dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka konstanta pegas pada setiap *shockbreaker* adalah . . . N/m.

- a. 24.000
b. 15.000
c. 12.000
d. 7.500
e. 6.000
17. Arman mempunyai tiga buah pegas dengan konstanta 100 N/m, 200 N/m, dan 300 N/m. Konstanta gabungan ketiga pegas jika disusun seri dan disusun paralel berturut-turut adalah . . . N/m.
a. 600 dan $\frac{600}{11}$
b. 600 dan 50
c. $\frac{600}{11}$ dan 600
d. 300 dan 50
e. 50 dan 300
18. Dua pegas memiliki konstanta pegas masing-masing k_1 dan k_2 dengan $k_2 = 4k_1$. Kedua pegas disusun secara paralel kemudian diubah secara seri. Perbandingan pertambahan panjang antara susunan paralel dan seri, jika diberi beban yang sama adalah
a. 1 : 4
b. 3 : 16
c. 4 : 25
d. 5 : 16
e. 6 : 25
19. Sebuah bandul tergantung pada tali sepanjang 1 m dan berayun sebanyak 60 kali setiap 1 menit. Jika panjang tali dipotong 10%, maka
a. periode ayunan $\frac{1}{3}\sqrt{10}$ s
b. periode ayunan $\frac{1}{9}\sqrt{10}$ s
c. periode ayunan tetap
d. frekuensi ayunan tetap
e. bandul berayun dengan frekuensi 1 Hz
20. Sebuah benda bermassa 0,5 kg digantung pada sebuah pegas. Akibatnya, beban bergerak naik turun dengan simpangan

terjauh yang dicapai 3 cm. Jika konstanta pegas yang dipakai 50 N/m, pernyataan berikut yang **tidak** benar adalah

- a. periode geraknya 0,628 s
b. persamaan simpangannya $x = 0,03 \sin(3,18 \pi)t$
c. kecepatan maksimumnya 0,314 m/s
d. persamaan percepatannya $a = -0,10 \sin(3,18 \pi)t$
e. percepatan pada saat $t = 0,16$ s adalah 10 m/s^2

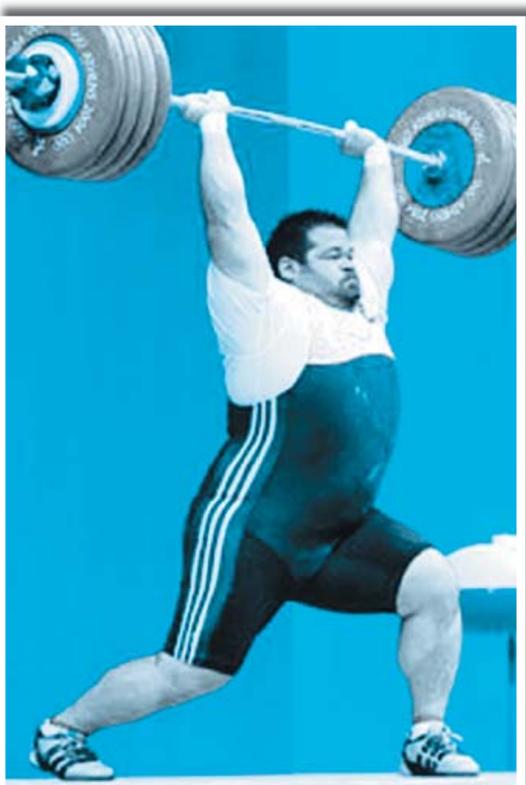
B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. Posisi seorang atlet marathon yang sedang berlari dinyatakan dengan persamaan $\vec{r} = (3+4t)\hat{i} - 5t^2\hat{j}$, dengan r dalam meter, dan t dalam secon. Tentukan kecepatan pelari tersebut setelah berlari 5 secon.
2. Gambarkan dan nyatakan vektor posisi setiap titik pada bidang kartesius berikut.
a. A (6,9)
b. B (-7,12)
c. C (-8,-10)
d. D (9,-2)
3. Vektor posisi sebuah taksi dinyatakan dengan persamaan $\vec{r} = (t^2 + 2t)\hat{i} + (-t - 3)\hat{j}$, dengan r dalam km dan t dalam jam. Tentukan:
a. kecepatan pada saat $t = 1,5$ jam,
b. percepatan pada saat $t = 1,5$ jam,
c. kecepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ jam dan $t = 1,5$ jam,
d. percepatan rata-rata pada selang waktu $t = 1$ jam dan $t = 1,5$ jam.
4. Diketahui persamaan percepatan adalah $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, dan $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. Dengan mengintegrasikan kedua persamaan tersebut, buktikanlah bahwa vektor posisi pada waktu t dapat dicari dengan persamaan $\vec{r}_t = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} a t^2$.

5. Sebuah pesawat pada ketinggian 80 m menjatuhkan satu kardus mie instan untuk membantu korban banjir. Pada saat itu, kecepatan pesawat 30 km/jam. Jika gesekan udara dan angin diabaikan, tentukan:
 - a. jarak jatuhnya kardus jika dihitung dari titik tepat di bawah pesawat semula,
 - b. lama kardus di udara.
6. Tiga buah benda A, B, dan C masing-masing bermassa 2 kg, 5 kg, dan 6 kg diletakkan pada sudut segitiga siku-siku. Sisi-sisi segitiga tersebut adalah 5 cm, 12 cm, dan 13 cm. Jika benda Q berada pada sudut siku-sikunya, tentukan resultan gaya gravitasi yang dialami benda Q.
7. Sebuah pesawat mempunyai massa 500.000 ton. Tentukan besar gaya gravitasi bumi dan medan gravitasi bumi yang dialami pesawat jika:
 - a. pesawat berada di permukaan bumi,
 - b. pesawat berada pada ketinggian 3 kali jejari bumi dari permukaan bumi,
 - c. pesawat berada pada ketinggian 4 kali jejari bumi dari permukaan bumi. (diketahui jejari bumi $6,4 \times 10^6$ m dan massa bumi $5,98 \times 10^{24}$ kg).
8. Periode revolusi planet Jupiter 11,86 tahun bumi (1 tahun bumi = 365 hari). Jika massa matahari $5,97 \cdot 10^{30}$ kg, berapakah jejari orbit planet Jupiter?
9. Sebuah kawat besi dengan diameter penampang 0,8 mm dan panjang 50 cm ditarik dengan gaya 25 N. Akibat tarikan tersebut, kawat bertambah panjang 0,5 mm. Tentukan:
 - a. tegangan kawat,
 - b. regangan kawat, dan
 - c. modulus Young kawat tersebut.
10. Sebuah partikel melakukan gerak harmonis sederhana dengan frekuensi 5 Hz dan amplitudo 10 cm. Tentukan:
 - a. persamaan simpangan,
 - b. simpangan pada saat $t = 2$ s,
 - c. kecepatan benda saat simpangannya 8 cm,
 - d. persamaan percepatan getarnya.

B a b III

Usaha dan Energi



www.weight-lifting-world.com

Olah raga angkat besi merupakan ajang unjuk kekuatan otot. Dalam olah raga ini, seorang atlet berusaha mengangkat barbel yang beratnya puluhan kilogram dengan kedua tangannya. Ketika seorang atlet berusaha mengangkat barbel tersebut, ia harus mengeluarkan energi. Semakin berat beban yang diangkat dan semakin tinggi angkatannya, energi yang dibutuhkan juga semakin besar. Ini berarti, ada hubungan antara usaha dengan energi. Bagaimanakah bentuk hubungan usaha dengan energi? Bab ini, akan memaparkannya.

Kata Kunci

- Usaha
- Energi
- Energi kinetik
- Energi potensial
- Hukum Kekekalan Energi
- Daya

Di bab ini, kalian akan mempelajari konsep usaha dan energi. Selain itu, kalian juga akan mempelajari konsep daya, Hukum Kekekalan Energi, dan penerapannya dalam pelbagai masalah sehari-hari. Nah, setelah mempelajari uraian materi di bab ini, kalian diharapkan mampu mendeskripsikan hubungan antara gaya, usaha, dan perpindahan. Kalian juga diharapkan mampu menghitung besar energi potensial, baik potensial gravitasi atau potensial pegas, dan besar energi kinetik yang dimiliki benda. Setelah itu, kalian juga dibimbing agar dapat menganalisis hubungan usaha dengan energi kinetik, serta hubungan usaha dengan energi potensial. Berdasarkan kemampuan tersebut, kalian diharapkan mampu merumuskan bentuk Hukum Kekekalan Energi dan menerapkannya pada beberapa peristiwa sehari-hari. Misalnya, pada gerak jatuh bebas, gerak parabola, gerak harmonik sederhana, gerak benda dalam bidang miring, gerak benda dalam bidang lingkaran, dan pada getaran.

A Gaya dan Usaha

Kata usaha sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya, kalian sedang berusaha memecahkan soal-soal dalam ujian, atau seorang pengusaha yang berusaha mendapatkan keuntungan maksimal dari bisnisnya. Contoh-contoh tersebut bukanlah usaha yang dimaksud dalam fisika. Namun, usaha dalam fisika memiliki pengertian tersendiri. **Usaha diartikan sebagai sesuatu yang dilakukan oleh gaya terhadap benda, sehingga benda tersebut bergerak (mengalami perpindahan).**

Jadi, berdasarkan pengertian tersebut, usaha memiliki dua komponen utama, yaitu **gaya** yang dikenakan terhadap benda dan **perpindahan** benda tersebut. Untuk mengetahui bentuk hubungan usaha dengan gaya dan perpindahan, diskusikan kejadian pada *Eureka* berikut.

T Teropong

Di kelas X, kita telah mengenal sifat perkalian titik dua vektor yang membentuk sudut θ sebagai berikut.

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = AB \cos \theta$$

Hasil perkalian titik dua vektor merupakan sebuah skalar.

Eureka

Bersama teman sebangku, diskusikan kejadian berikut.

Seorang karyawan toko sedang mendorong troli berisi barang. Manakah usaha yang lebih besar untuk:

1. memindahkan troli yang lebih berat dengan troli yang lebih ringan.
2. memindahkan troli sejauh 5 meter dan 10 meter,
3. memindahkan troli sendirian dan memindahkan troli dengan bantuan temannya.

Tuliskan hasil diskusimu beserta alasannya. Kemudian bandingkan dengan hasil diskusi teman lainnya. Jika belum puas atas jawabannya, tanyakan kepada guru kalian.

Berdasarkan hasil diskusi kalian pada *Eureka* tersebut, dapat disimpulkan bahwa usaha untuk memindahkan suatu benda dengan massa yang lebih besar (ini berarti gaya yang digunakan juga lebih besar) diperlukan usaha yang lebih besar pula. Dengan kata lain, **usaha berbanding lurus dengan gaya yang dilakukan pada benda**. Sementara, untuk memindahkan suatu benda yang jaraknya lebih jauh dan massanya sama, maka diperlukan usaha yang jauh lebih besar. Ini berarti **usaha juga berbanding lurus dengan perpindahan**.

Jika pada sebuah benda bekerja gaya \vec{F} yang menyebabkan benda berpindah sejauh s , dimana arah perpindahan sejajar atau searah dengan arah gaya, maka besar usaha yang dilakukan gaya tersebut merupakan hasil perkalian titik antara vektor gaya (\vec{F}) dengan vektor perpindahan (\vec{s}). Dalam kalimat matematika dituliskan:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

Keterangan:

W = usaha (J)

\vec{F} = vektor gaya (N)

\vec{s} = vektor perpindahan (m)

Karena perkalian dua buah vektor menghasilkan skalar, maka usaha merupakan besaran skalar dengan satuan Newton meter (Nm) atau $\text{kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2$ (joule). Perhatikan Gambar 3.1. Pada gambar tersebut, gaya dan perpindahan benda membentuk sudut θ . Berdasarkan sifat perkalian titik dua buah vektor, besar usaha yang dilakukan gaya sebesar F dapat dicari dengan persamaan:

$$W = (F \cos \theta) s$$

$$W = F_s \cos \theta$$

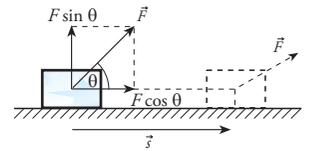
Keterangan:

θ = sudut yang dibentuk gaya dan perpindahan

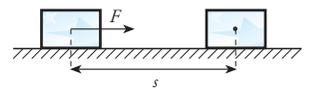
Persamaan tersebut menyatakan bahwa gaya yang melakukan usaha untuk memindahkan benda sejauh s adalah komponen gaya yang sejajar dengan perpindahan (komponen $F \cos \theta$). Ini berarti jika gaya yang diberikan sejajar dengan arah perpindahan (perhatikan Gambar 3.2), maka besar usaha yang dilakukan sebesar:

$$W = F s$$

Sementara jika arah gaya tegak lurus dengan arah perpindahan (yang berarti $\theta = 90^\circ$ dan $\cos \theta = 0$), maka usaha yang dilakukannya sama dengan nol. Kenyataan ini memberikan pengertian bahwa berat benda dan gaya normal yang dimiliki benda tidak melakukan usaha ketika benda bergerak



Gambar 3.1 Gaya membentuk sudut θ terhadap arah perpindahan. Gaya yang melakukan usaha adalah komponen gaya yang searah dengan perpindahan benda.



Gambar 3.2 Gaya sebesar F diperlukan untuk melakukan usaha guna memindahkan benda sejauh s .



Gambar 3.3 Besarnya usaha yang dilakukan adalah penjumlahan seluruh usaha dari tiap-tiap gaya.

mendatar. Contohnya adalah sebuah mobil yang sedang didorong oleh beberapa orang di jalan yang datar. Dalam hal ini, yang melakukan usaha adalah orang-orang yang mendorong mobil. Sementara gaya normal mobil dan gaya berat mobil tidak melakukan usaha.

Persamaan usaha yang telah kita dapatkan tersebut berlaku jika gaya yang bekerja pada benda hanya satu. Sementara pada sebuah benda dapat bekerja beberapa gaya. Sebagai contoh perhatikan Gambar 3.3. Jika pada suatu benda bekerja n buah gaya, $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ dan setiap gaya membentuk sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ terhadap arah perpindahan benda, maka usaha total yang bekerja pada benda merupakan jumlah aljabar usaha yang dilakukan oleh tiap-tiap gaya.

$$W_{\text{tot}} = W_1 + W_2 + \dots + W_n$$

$$W_{\text{tot}} = F_1 s \cos \theta_1 + F_2 s \cos \theta_2 + \dots + F_n s \cos \theta_n$$

Keterangan:

W_{tot} = usaha total (J)

W_1, W_2 = usaha oleh gaya 1, dan gaya 2

Untuk membantu kalian dalam memahami materi di subbab ini, perhatikan contoh soal berikut.

Contoh

1. Sebuah mobil mainan ditarik seorang anak dengan gaya sebesar 20 N membentuk sudut 30° terhadap bidang datar. Jika mobil mainan bergerak sejauh 20 m, berapakah usaha yang dilakukan anak tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui:

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

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

$$\theta = 30^\circ$$

Ditanyakan: W

Jawab:

Untuk mencari usaha, gunakan persamaan:

$$W = Fs \cos \theta$$

$$= 20 \times 20 \cos 30^\circ$$

$$= 200\sqrt{3} \text{ J}$$

Jadi, usaha yang dilakukan anak tersebut adalah $200\sqrt{3} \text{ J}$.

2. Tiga orang anak sedang menarik sebuah koper sejauh 8 m. Apabila masing-masing anak mengeluarkan gaya sebesar 150 N, 165 N, dan 155 N dalam satu arah, berapakah usaha total yang mereka lakukan?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$F_1 = 150 \text{ N,}$$

$$F_2 = 165 \text{ N,}$$

$$F_3 = 155 \text{ N}$$

$$s = 8 \text{ m}$$

Ditanyakan: W_{total}

Jawab: Untuk mencari W_{tot} kita gunakan persamaan

$$W_{\text{tot}} = W_1 + W_2 + W_3$$

$$= F_1 s + F_2 s + F_3 s$$

$$= (150 \times 8) + (165 \times 8) + (155 \times 8)$$

$$= 2.960 \text{ J}$$

Jadi, usaha total yang dilakukan ketiga anak adalah 2.960 J.

Untuk menguji kompetensi kalian, kerjakan soal-soal pada *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Seorang ibu sedang mendorong keranjang belanja di supermarket. Jika gaya yang diberikan pada keranjang belanja sebesar 40 N dan keranjang belanja bergerak sejauh 5 m, hitunglah usaha yang dilakukan ibu tersebut.
2. Hitunglah usaha yang dilakukan oleh gaya sebesar 8 N untuk memindahkan benda sejauh 10 meter, bila
 - a. arah gaya searah dengan perpindahan,
 - b. arah gaya membentuk sudut 30° dengan perpindahan,
 - c. arah gaya membentuk sudut 60° dengan perpindahan,
 - d. arah gaya tegak lurus dengan arah perpindahan,
 - e. arah gaya membentuk sudut 120° dengan arah perpindahan.
3. Zuhri dengan sengaja mendorong sebuah tembok di samping rumahnya. Ketika ia mendorong dengan gaya 235 N, ternyata tembok itu tidak bergerak sedikit pun. Berapakah besar usaha yang dilakukan Zuhri?
4. Dua tim yang masing-masing terdiri atas 5 orang sedang mengikuti lomba tarik tambang. Anggota tim pertama mengeluarkan gaya berturut-turut sebesar 233 N, 235 N, 163 N, 198 N, dan 215 N. Sementara, anggota tim kedua mengeluarkan gaya masing-masing sebesar 245 N, 187 N, 208 N, 196 N, dan 231 N. Ternyata, tim pertama dapat ditarik oleh tim kedua sejauh 2 meter. Hitunglah usaha masing-masing peserta dari kedua tim. Hitung pula usaha total dari kedua tim tersebut.

B Usaha dan Energi

Istilah energi bukanlah istilah yang asing bagi kita. Dalam beraktivitas sehari-hari kita selalu membutuhkan energi, baik ketika tidur, berjalan, menulis, membaca, dan kegiatan lainnya. Bukan hanya manusia, alat-alat seperti televisi, kipas angin, sepeda motor, mobil, dan lain sebagainya juga memerlukan energi untuk melakukan usaha.

Jadi, untuk melakukan suatu usaha diperlukan sejumlah energi. Dengan begitu **energi diartikan sebagai kemampuan untuk melakukan usaha**. Satuan energi sama dengan satuan usaha, yaitu joule ($\text{kg m}^2/\text{s}^2$).

1 joule sama dengan besar usaha yang dilakukan oleh gaya sebesar 1 newton untuk memindahkan benda sejauh 1 meter.

Satuan lain untuk menyatakan energi adalah **kalori** (disingkat kal). Satuan kalori dapat dikonversikan ke dalam satuan joule dengan faktor konversi 4,2, sehingga:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kalori} &= 4,2 \text{ joule} \\ &\text{atau} \\ 1 \text{ joule} &= 0,24 \text{ kalori} \end{aligned}$$



th.physik.uni-frankfurt.de

James Prescott Joule (1818-1889) merupakan ilmuwan yang menemukan konsep energi untuk pertama kalinya. Ilmuwan yang lahir di Salford, Inggris, ini mempelajari pengaruh pemanasan aliran listrik. Ia menyadari bahwa panas adalah salah satu bentuk energi. Sebagai penghargaan, joule dijadikan sebagai satuan energi.

Setyawan, Lilik Hidayat, 2004, hlm. 88

1. Sumber dan Bentuk Energi

Seiring kemajuan teknologi yang semakin pesat, kebutuhan energi juga semakin meningkat. Sekarang ini, sebagian besar kebutuhan energi di dunia masih tergantung pada minyak bumi. Akan tetapi, perlu diingat bahwa sumber energi minyak yang terdapat di bumi jumlahnya terbatas. Oleh karena itu, penggunaan energi secara bijaksana dapat menjamin ketersediaan energi di masa depan. Selain itu, pencarian sumber-sumber energi lain yang dapat diperbarui harus terus dilakukan, agar di masa mendatang kita tidak mengalami krisis energi.

Penggunaan minyak sebagai sumber energi memang telah dilakukan dari dulu. Hasil pengolahan minyak ini dapat digunakan sebagai sumber energi pada pelbagai bidang kehidupan. Penggunaan bensin untuk menghidupkan mesin, minyak tanah sebagai bahan bakar, solar sebagai bahan bakar diesel, bahkan pembangkit listrik juga masih tergantung pada bahan bakar minyak.

Minyak hanyalah sebagian dari sumber energi yang dapat dimanfaatkan. Sebenarnya, masih banyak sumber energi lain yang dapat dimanfaatkan, antara lain cahaya matahari, air, angin, gas bumi, gelombang laut, atau nuklir. Sumber-sumber energi ini dapat diubah menjadi energi dalam bentuk lain. Misalnya, angin yang merupakan energi gerak dapat diubah menjadi energi listrik, dan lain-lain. Sekarang mari kita ulas sekilas beberapa sumber energi tersebut.

a. Energi Cahaya Matahari

Cahaya matahari merupakan sumber energi paling besar yang terdapat di alam. Cahaya matahari memiliki peranan penting dalam kehidupan di bumi. Dengan cahaya matahari, tumbuhan dapat melakukan proses fotosintesis. Dalam proses ini, energi cahaya matahari akan diubah menjadi karbohidrat yang juga merupakan sumber energi bagi hewan dan manusia. Tanpa cahaya matahari, kehidupan di muka bumi mungkin tidak pernah ada. Inilah salah satu tanda kebesaran Tuhan Yang Maha Esa.

Beberapa dekade terakhir ini, telah ditemukan cara mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Alat yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik adalah sel surya atau *sel fotovoltaik*, seperti tampak pada gambar 3.4. Walaupun cahaya matahari berlimpah, tetapi pemanfaatannya belum maksimal. Salah satu faktor yang memengaruhinya adalah masih rendahnya efisiensi sel surya (di bawah 20 %) serta harganya yang mahal.

b. Energi Angin

Sejak zaman dahulu energi angin telah banyak digunakan, salah satunya untuk menggerakkan kapal layar. Selain itu, energi angin juga dapat digunakan untuk menggerakkan kincir angin yang terhubung dengan generator. Generator yang berputar ini dapat menghasilkan listrik sehingga



Microsoft Encarta Premium 2006

Gambar 3.4 Sel surya dapat dimanfaatkan sebagai pengganti energi listrik.



www.photo.net

Gambar 3.5 Kincir angin untuk pembangkit listrik di Belanda.

dapat dimanfaatkan dengan mudah. Ini berarti angin dapat digunakan sebagai pembangkit listrik. Salah satu negara yang memanfaatkan energi angin ini adalah Belanda yang mendapatkan julukan negeri kincir angin. Ini disebabkan karena banyak kincir angin di daratannya.

c. Energi Air

Air juga dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik, yang dikenal dengan sebutan PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air). Dalam PLTA, air yang ditampung dalam bendungan dialirkan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator. Putaran turbin ini dapat menghasilkan listrik yang besar. Contoh PLTA yang ada di Indonesia antara lain PLTA Jatiluhur dan PLTA Karangates.

d. Energi Nuklir

Energi nuklir dihasilkan dari reaksi nuklir (reaksi inti atom), baik melalui reaksi fisi (pembelahan), atau reaksi fusi (penggabungan). Energi nuklir dibangkitkan dalam sebuah reaktor. Reaksi nuklir ini dapat menghasilkan energi listrik yang sangat besar.

Bahan utama reaksi nuklir yang sering digunakan adalah Uranium dan Plutonium. Satu gram Uranium dapat menghasilkan energi sebesar 7×10^{13} J. Coba kalian bandingkan dengan 1 kilo gram batu bara yang hanya menghasilkan energi sekitar 29 MJ ($2,9 \times 10^7$ J).

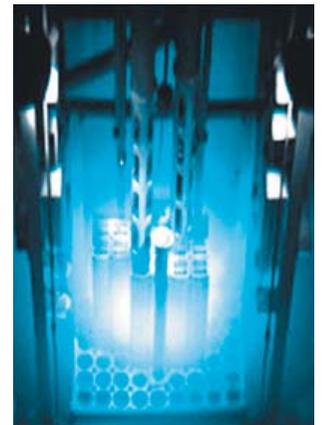
Namun, faktor keamanan masih menjadi kendala dalam pemanfaatan energi nuklir ini. Kebocoran pada reaktor nuklir dapat mengakibatkan dampak buruk bagi masyarakat di sekitarnya. Efek radiasi nuklir dapat mengakibatkan kematian, kerusakan anggota badan seumur hidup, dan kerusakan genetik turun temurun. Salah satu peristiwa mengerikan akibat ledakan nuklir adalah pengeboman kota Nagasaki dan Hiroshima di Jepang oleh Sekutu pada Perang Dunia II. Pada peristiwa ini, beribu-ribu jiwa melayang. Yang lebih mengerikan lagi adalah lahirnya anak-anak cacat sebagai dampak radiasi yang ditimbulkan.

Sumber-sumber energi yang telah kita bahas hanyalah sebagian kecil dari sumber energi di muka bumi. Nah, untuk membuka wawasan kalian tentang sumber energi, kerjakan *Ekspedisi* berikut.



www.kimpraswil.go.id.

Gambar 3.6 Selain untuk mengairi sawah, waduk air dapat difungsikan untuk menghasilkan listrik



campus.umr.edu

Gambar 3.7 Energi nuklir dapat menghasilkan listrik.

Ekspedisi

Carilah dari pelbagai sumber, baik internet, majalah, nara sumber, maupun melalui kunjungan langsung untuk mengetahui cara kerja salah satu pembangkit listrik berikut.

1. Pembangkit Listrik Tenaga Air
2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya
3. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
4. Pembangkit Listrik Tenaga Angin

5. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Pilihlah salah satu pembangkit listrik yang akan kalian bahas. Kumpulkan informasi sebanyak-banyaknya tentang pembangkit listrik tersebut. Kemudian, buatlah sebuah makalah dari informasi yang kalian dapatkan. Kumpulkan hasilnya sebagai tugas proyek kalian di semester ini.

2. Energi Kinetik dan Energi Potensial

Selain mempunyai pelbagai bentuk energi yang telah kita kenal, seperti energi gerak, energi panas, energi listrik, atau energi kimia, energi juga mempunyai dua bentuk yang khusus. Bentuk energi yang dimaksud yakni **energi kinetik** dan **energi potensial**. Kedua bentuk energi ini berkaitan erat dengan usaha yang telah kita bahas di depan. Untuk mengetahui lebih lanjut, simaklah dengan saksama penjelasan berikut.

a. Usaha dan Energi Kinetik

Ketika kita melakukan usaha pada sebuah benda, maka benda akan berpindah sejauh s . Jika benda semula berada pada kedudukan d_1 dan kelajuannya v_1 , setelah diberi usaha dalam waktu t , kedudukan benda di d_2 dan bergerak dengan kelajuan v_2 . Ini berarti benda yang dikenai suatu usaha akan mengalami gerak lurus berubah beraturan.

Berdasarkan materi yang telah kita pelajari di semester 1, pada gerak lurus beraturan berlaku persamaan:

$$v_2^2 = v_1^2 + 2as$$

Sehingga,

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan perpindahan ini dan persamaan Hukum II Newton ($F = ma$) ke dalam persamaan usaha, kita memperoleh persamaan:

$$W = F s$$

$$W = m a \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} \right)$$

$$W = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

Keterangan:

W = usaha (J)

m = massa benda (kg)

v_t = kecepatan benda pada kedudukan akhir (m/s)

v_0 = kecepatan benda pada kedudukan awal (m/s)

Faktor $\frac{1}{2} m v^2$ pada persamaan tersebut tidak lain adalah energi kinetik yang dimiliki benda. **Energi kinetik** adalah energi yang dimiliki benda yang bergerak dengan kecepatan tertentu. Besar energi kinetik ditentukan oleh massa dan besar kecepatan geraknya. Jadi, energi kinetik benda dapat dicari dengan persamaan:

T eropong

Di kelas X kalian telah mempelajari konsep gerak lurus berubah beraturan (GLBB). Besar perpindahan dirumuskan:

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

Sementara, kelajuan dirumuskan:

$$v_t = v_0 + a t$$

atau

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

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

Keterangan:

E_K = energi kinetik (J)

m = massa benda (kg)

v = kelajuan benda (m/s)

Berdasarkan definisi energi kinetik tersebut, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa usaha yang dilakukan pada suatu benda sama dengan perubahan energi kinetik benda tersebut. Pernyataan ini dikenal dengan **teorema usaha-energi**, atau dapat dituliskan:

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$W = E_{K2} - E_{K1}$$

$$W = \Delta E_K$$

Kalian sudah mempelajari konsep usaha yang terkait dengan perubahan energi kinetik. Selanjutnya, perhatikan contoh soal di bawah ini.

Contoh

1. Sebuah bola bermassa 0,5 kg semula diam. Seseorang kemudian menendang bola sehingga kelajuannya menjadi 10 m/s. Berapakah energi kinetik bola sebelum dan sesudah ditendang? Berapa pula usaha yang dilakukan orang tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 0,5 \text{ kg}$$

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

$$v_0 = 0 \text{ m/s}$$

Ditanyakan:

a. E_{k1} dan E_{k2}

b. W

Jawab:

- a. Untuk mencari energi kinetik, gunakan persamaan:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_{K1} = \frac{1}{2}mv_0$$

$$= 0$$

$$E_{K2} = \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 0,5 \times 10^2$$

$$= 25 \text{ J}$$

Jadi, energi kinetik bola ketika kelajuannya 10 m/s adalah 25 J.

- b. Untuk mencari usaha yang dilakukan gunakan persamaan:

$$W = E_{K2} - E_{K1}$$

$$= 25 - 0$$

$$= 25 \text{ J}$$

Jadi, usaha yang dilakukan adalah 25 J.

2. Sebuah truk bermassa 3 ton bergerak dengan kelajuan 72 km/jam. Beberapa saat kemudian truk menabrak sebuah batang pohon. Akibatnya batang pohon terpental sejauh 3 meter, sementara truk diam. Tentukan:
- energi kinetik truk saat bergerak,
 - energi kinetik truk setelah menabrak,
 - gaya tumbukan truk pada batang pohon,
 - gaya yang menghentikan truk.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 3 \text{ ton} = 3.000 \text{ kg}$$

$$v_1 = 72 \text{ km/jam} = 20 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 0 \text{ m/s}$$

Ditanyakan:

- E_{K1}
- E_{K2}
- $F_{\text{truk-pohon}}$
- $F_{\text{pohon-truk}}$

Jawab:

- Energi kinetik truk saat bergerak dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned} E_{K1} &= \frac{1}{2}mv^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 3.000 \times 20^2 \end{aligned}$$

$$= 600.000 \text{ J}$$

$$= 600 \text{ kJ}$$

Jadi pada saat bergerak, truk mempunyai energi 600 kJ.

- Energi kinetik setelah menabrak adalah 0, karena truk diam ($v = 0$).
- Untuk mencari gaya yang diberikan truk pada pohon, gunakan persamaan,

$$W = Fs$$

$$E_{K2} - E_{K1} = Fs$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{E_{K2} - E_{K1}}{s} \\ &= \frac{0 - 600.000}{3} \\ &= -200.000 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, gaya tumbukan truk pada batang pohon adalah -200.000 N.

- Berdasarkan Hukum III Newton, yang menyatakan bahwa

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

maka gaya yang menghentikan truk sama dengan gaya yang diberikan truk pada pohon tetapi arahnya berlawanan, yaitu sebesar 200.000 N.

b. Usaha dan Energi Potensial

Kita telah mempelajari energi kinetik pada sebuah benda yang bergerak dengan kecepatan tertentu. Namun bukan berarti benda yang diam tidak mempunyai energi sama sekali. Benda yang diam dapat mempunyai energi dalam bentuk energi potensial. Untuk mengenali konsep energi potensial, coba kalian diskusikan peristiwa pada *Eureka* berikut.

Eureka

Berdiskusilah dengan teman sebangku untuk membahas kejadian berikut.

1. Dua buah kelapa dengan massa sama jatuh di atas tanah liat yang lembek dari pohon dengan ketinggian berbeda. Ternyata, kelapa dari pohon yang tinggi mampu membuat cekungan yang lebih lebar dibandingkan kelapa satunya. Apakah penyebabnya? Apakah yang terjadi jika dua buah kelapa dengan massa berbeda jatuh dari ketinggian sama?
2. Seorang anak sedang menekan sebuah bola pada pegas. Setelah pegas memendek, anak tersebut melepaskan tangannya dari bola. Akibatnya, bola terpental beberapa meter. Apakah yang menyebabkan bola terpental?

Tuliskan hasil diskusi kalian pada buku tugas. Kemudian cocokkan jawabannya dengan hasil diskusi teman yang lain.

Dengan melakukan diskusi pada *Eureka* tersebut, diharapkan kalian mampu menemukan konsep energi potensial pada dua kejadian tersebut. Kejadian pertama berkaitan dengan percepatan gravitasi, sedangkan kejadian kedua berkaitan dengan gaya pegas. Kejadian pada kelapa dan bola tersebut berkaitan erat dengan energi potensial. **Energi potensial adalah energi yang dimiliki benda karena interaksinya dengan benda lain. Besar gaya energi potensial tergantung pada posisi relatif kedua benda**

Sekarang mari kita bahas energi potensial pada dua kejadian tersebut.

1) Energi Potensial Gravitasi

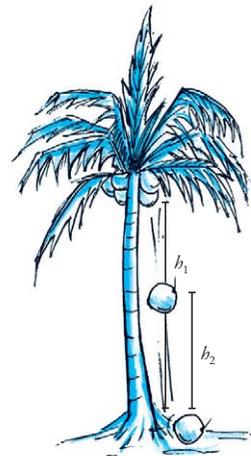
Peristiwa yang terkait dengan energi potensial gravitasi adalah peristiwa pertama, yaitu jatuhnya buah kelapa dari pohon. Dalam hal ini, buah kelapa berinteraksi dengan bumi. Akibat kedudukannya terhadap bumi, buah kelapa mempunyai energi potensial. Semakin jauh jarak buah kelapa ke bumi, energi potensial yang dimiliki akan semakin besar. Energi yang dimiliki buah kelapa ini disebabkan karena buah kelapa masih berada di medan gravitasi bumi. Oleh karena itulah energi yang dimiliki disebut energi potensial gravitasi.

Sekarang, mari kita analisis peristiwa jatuhnya buah kelapa menggunakan konsep energi kinetik yang telah dipelajari di depan. Anggaplah sebelum terjatuh ketinggian buah kelapa adalah h_1 . Setelah terjatuh beberapa saat, ketinggian buah kelapa adalah h_2 .

Untuk gerak jatuh bebas, kecepatan benda setelah berada di ketinggian h , dapat dicari dengan persamaan:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Dengan demikian, usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi untuk memindahkan benda dari ketinggian h_1 ke ketinggian h_2 ditinjau dari titik acuan tertentu adalah:



Gambar 3.8 Buah kelapa yang jatuh mempunyai energi potensial gravitasi.

Teropong

Di kelas X, kalian telah mencari kecepatan benda yang jatuh bebas pada ketinggian tertentu. Kecepatan benda tersebut dapat dihitung dengan rumus:

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$\begin{aligned}W &= E_{K2} - E_{K1} \\&= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \\&= \frac{1}{2}m(\sqrt{2gh_2})^2 - \frac{1}{2}m(\sqrt{2gh_1}) \\W &= mgh_2 - mgh_1\end{aligned}$$

Keterangan:

W = usaha yang dilakukan (J)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

h_1 = ketinggian benda mula-mula (m)

h_2 = ketinggian benda akhir (m)

Faktor mgh pada persamaan tersebut merupakan **besar energi potensial gravitasi** dari benda bermassa m yang berada pada ketinggian h . Jadi, energi potensial yang dimiliki sebuah benda dinyatakan dalam persamaan:

$$E_p = m g h$$

Keterangan:

E_p = energi potensial gravitasi benda (J)

m = massa benda (kg)

h = kedudukan/ketinggian benda (m)

Dari definisi energi potensial gravitasi tersebut, kita dapat menyimpulkan bahwa usaha yang dilakukan untuk memindahkan benda dari ketinggian h_1 ke ketinggian h_2 sama dengan perubahan energi potensial gravitasi. Dalam bahasa matematis dituliskan:

$$\begin{aligned}W &= mgh_2 - mgh_1 \\W &= E_{p2} - E_{p1} \\W &= \Delta E_p\end{aligned}$$

Dari persamaan usaha tersebut, jika benda dipindahkan ke tempat yang lebih tinggi (benda bergerak ke atas), usaha yang dilakukan akan bernilai positif ($\Delta E_p > 0$). Sebaliknya, jika benda dipindahkan ke tempat yang lebih rendah (benda bergerak ke bawah), usaha akan bernilai negatif ($\Delta E_p < 0$).

Ketika benda bergerak ke atas, energi potensial akhir lebih besar dari energi potensial awal yang berarti ada penambahan energi. Penambahan energi ini didapatkan dengan mengubah energi kinetik benda menjadi energi potensial. Inilah yang menyebabkan benda yang bergerak ke atas kecepatannya makin berkurang. Sebaliknya, ketika benda bergerak ke bawah, energi potensial akhir lebih sedikit dari energi potensial awal. Ini terjadi karena sebagian energi potensial diubah menjadi energi kinetik. Ini menyebabkan kecepatan benda yang bergerak turun, semakin besar.

Baiklah untuk melengkapi penjelasan yang telah diberikan, berikut disertakan contoh soal. Perhatikan contoh berikut.

Contoh

- Sebuah benda dengan massa 1 kg dilemparkan ke atas dengan kecepatan awal 25 m/s. Jika $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, berapakah energi potensial gravitasi benda ketika berada di ketinggian maksimum?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 25 \text{ kg}$$

$$v_0 = 25 \text{ m/s}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}$$

Ditanyakan: E_p

Jawab: Ketinggian maksimal yang dicapai benda dapat dicari dengan persamaan:

$$v_t^2 = v_0^2 - 2gh$$

$$0 = 25^2 - 2 \times 9,8 \times h$$

$$h = 31,89 \text{ m}$$

Dengan demikian, energi potensialnya dapat dicari dengan persamaan:

$$E_p = mgh$$

$$= 1 \times 9,8 \times 31,89$$

$$= 312,52 \text{ J}$$

Jadi, energi potensial benda ketika mencapai tinggi maksimum adalah 312,52 J.

2) Energi Potensial Pegas

Di bab II semester 1, kita telah mempelajari bab Gravitasi dan Pegas. Pada bab itu, kita telah membahas gaya pegas dan Hukum Hooke. Nah di subbab ini, kita akan membahas energi yang dimiliki sebuah pegas. Kita ambil contoh peristiwa yang diceritakan pada *Eureka* di depan, yaitu seorang anak yang menekan sebuah bola pada pegas kemudian dilepaskan. Perhatikan Gambar 3.9.

Dari gambar tersebut, pegas semula berada dalam keseimbangan. Ketika ditekan dengan gaya F , pegas memendek sejauh x . Besarnya gaya tekan ini sebanding dengan perubahan panjang pegas.

Berdasarkan Hukum Hooke, besarnya gaya yang harus diberikan pada pegas untuk mempertahankan agar pegas meregang atau memampat sejauh x adalah:

Keterangan:

$$F = \text{gaya}$$

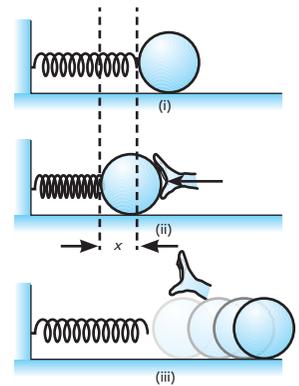
$k = \text{konstanta pegas}$

$x = \text{perubahan panjang pegas}$

$$F = kx$$

Dari persamaan tersebut, besar gaya yang diberikan tergantung pada pertambahan panjang. Semakin besar pertambahan panjang pegas, gaya yang diperlukan semakin besar. Ini berarti gaya pada pegas tidak tetap atau selalu berubah seiring perubahan panjang pegas. Kenyataan ini memberikan konsekuensi bahwa usaha yang dilakukan gaya tidak dapat dicari secara langsung dengan persamaan Fx .

Usaha yang dilakukan oleh gaya yang bekerja pada pegas dapat dicari dari grafik hubungan gaya dan panjang pegas. Karena gaya berbanding lurus dengan x , maka dapat dipastikan grafik hubungan keduanya berupa garis lurus dengan kemiringan tertentu, seperti tampak pada Gambar 3.10.



Gambar 3.9 Akibat gaya tekan yang diberikan, pegas akan memendek sejauh x .

T eropong

Menurut Hukum Hooke, untuk meregangkan atau memampatkan pegas sejauh X diperlukan gaya sebesar:

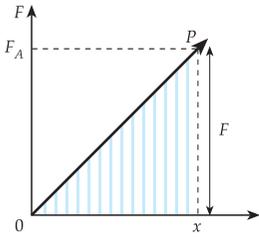
$$F = kx$$

Keterangan:

$F = \text{gaya pegas (N)}$

$k = \text{tetapan pegas (N/m)}$

$x = \text{pertambahan panjang (m)}$



Gambar 3.10 Grafik hubungan gaya dan pertambahan panjang pada pegas

Pada gambar tersebut, kemiringan grafik menyatakan konstanta pegas. Sementara luas daerah di bawah grafik (luas daerah yang diarsir = luas OPx) menyatakan besar usaha yang dilakukan gaya pada pegas. Jadi, untuk meregangkan atau memampatkan pegas sejauh x dari posisi seimbang diperlukan usaha sebesar:

$$W = \frac{1}{2} F x$$

$$W = \frac{1}{2} k x^2$$

Sementara itu, jika semula pegas sudah meregang atau memampat sejauh x_1 , maka usaha yang dilakukan untuk meregangkan pegas sejauh x_2 sebesar:

$$W_b = \frac{1}{2} k x_2^2 - \frac{1}{2} k x_1^2$$

Keterangan:

W_b = usaha yang dilakukan benda pada pegas (J)

x_2 = pertambahan pegas akhir (m)

x_1 = pertambahan pegas awal (m)

Faktor $\frac{1}{2} k x^2$ pada persamaan tersebut tidak lain adalah energi potensial yang dimiliki sebuah benda ketika menekan atau menarik pegas. Jadi, energi potensial yang dimiliki benda adalah:

$$E_{pb} = \frac{1}{2} k x^2$$

Keterangan:

E_{pb} = energi potensial benda (J)

k = konstanta pegas (N/m)

x = pertambahan panjang pegas (m)

Sehingga usaha yang dilakukan **benda pada pegas** dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$W_b = E_{pb(2)} - E_{pb(1)}$$

Lalu, bagaimanakah usaha yang dilakukan **pegas pada benda**? Ketika benda memberikan gaya tarik pada pegas, maka pegas akan memberikan gaya yang sama besar tetapi berlawanan arah. Gaya ini disebut **gaya pemulih**. Sesuai dengan Hukum III Newton, maka besarnya gaya pemulih sama dengan gaya yang menarik benda tetapi berlawanan arah.

$$F_p = -F_b$$

Dengan demikian, energi potensial yang dimiliki pegas adalah:

$$E_{pp} = -E_{pb}$$

$$E_{pp} = -\frac{1}{2} k x^2$$

Keterangan:

E_{pp} = energi potensial pegas (J)

Energi potensial yang dimiliki pegas disebut **energi potensial pegas** atau **energi potensial elastik**. Berdasarkan persamaan tersebut, besar usaha yang **dilakukan pegas** untuk menggeser benda dari posisi 1 ke posisi 2 adalah:

$$W_p = \frac{1}{2} k x_1^2 - \frac{1}{2} k x_2^2$$

$$W_p = E_{p1} - E_{p2}$$

Dari persamaan tersebut, kita dapat mengambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Jika pegas diregangkan atau ditarik ($x_2 > x_1$) maka usaha yang dilakukan pegas bernilai negatif dan energi potensial pada kedudukan akhir lebih besar daripada energi potensial pada kedudukan semula. Ini berarti untuk menarik pegas dibutuhkan energi.
2. Jika pegas dimampatkan atau ditekan maka pertambahan panjang pegas akhir (x_2) lebih besar dari pertambahan panjang pegas awal (x_1), sehingga , usaha yang dilakukan juga bernilai negatif. Ini memberikan kenyataan bahwa ketika pegas ditarik atau ditekan, usaha yang dilakukan pegas bernilai negatif.

Supaya kalian lebih paham, perhatikan contoh soal berikut.

Contoh

1. Sebuah neraca pegas dengan konstanta 20 N/m digunakan untuk mengukur massa sebuah batu. Neraca pegas meregang sepanjang 5 cm. Apabila $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:
 - a) massa batu yang ditimbang tersebut,
 - b) usaha yang dilakukan pegas pada batu.

Penyelesaian:

Diketahui:

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

$$x = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

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

Ditanyakan:

- a) m
- b) W_{neraca}

Jawab:

- a) Gaya yang memberikan usaha pada pegas adalah gaya berat benda. Sehingga:

$$W = E_p$$

$$w x = \frac{1}{2} k x^2$$

$$w = \frac{1}{2} k x$$

$$mg = \frac{1}{2} k x$$

$$m = \frac{k x}{2 g}$$

$$m = \frac{20 \times 0,05}{2 \times 10}$$

$$= 0,05 \text{ kg}$$

Jadi, massa batu tersebut adalah 0,05 kg atau 50 gram.

- b) Usaha yang dilakukan neraca pegas pada batu;

$$W_{\text{pegas}} = E_{\text{Pp}(1)} - E_{\text{Pp}(2)}$$

$$= 0 - \frac{1}{2} k x^2$$

$$= -\frac{1}{2} \times 20 \times (0,05)^2$$

$$= -2,5 \times 10^{-2} \text{ J}$$

Jadi, usaha yang dilakukan pegas adalah $-2,5 \times 10^{-2} \text{ J}$.

2. Sebuah pegas yang digantung vertikal ditarik dengan gaya 10 N. Jika pegas bertambah panjang 10 cm, tentukan:
- energi potensial pegas,
 - konstanta pegas.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$F = 10 \text{ N}$$

$$x = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

Ditanyakan:

a) E_p

b) k

Jawab:

- a. Untuk mencari energi potensial pegas, gunakan persamaan:

$$E_p = W$$

$$= -Fx$$

$$= -10 \times 0,1$$

$$= -1 \text{ J}$$

Jadi, energi potensial pegasnya adalah -1 J .

- b. Untuk mencari konstanta pegas, kita dapat menggunakan persamaan:

$$E_p = \frac{1}{2} k x^2$$

$$k = \frac{2E_p}{x^2}$$

$$= \frac{2 \times 1}{0,1^2}$$

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

Jadi, konstanta pegas yang digunakan adalah 200 N/m .

Untuk mengetahui sejauh mana kalian menguasai materi di depan, selesaikan soal pada *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

- Sebuah sepeda motor dengan massa 100 kg bergerak dengan kelajuan 36 km/jam. Berapakah energi kinetik sepeda motor tersebut? Hitung pula usaha sepeda motor tersebut untuk mengubah kelajuannya menjadi 72 km/jam.
- Sebuah sepeda bergerak dengan kecepatan 36 km/jam. Beberapa saat kemudian, sepeda diperlambat sehingga kecepatannya menjadi 12 km/jam. Jika massa sepeda beserta pengendaranya 65 kg,

hitunglah:

- a. energi kinetik mula-mula dan energi kinetik akhir,
 - b. usaha yang dilakukan orang dan sepeda.
3. Sebuah pelontar rudal menembakkan rudal bermassa 50 kg, sehingga mencapai ketinggian 100 m dari ketinggian semula. Ketika jatuh, rudal tersebut mengenai atap markas musuh yang ketinggiannya 10 m.
- a. Berapakah energi potensial rudal tersebut ketika mencapai titik tertinggi?
 - b. Berapa perubahan energi potensialnya?
4. Sebuah pegas digunakan pada pistol mainan anak-anak. Ketika peluru dimasukkan, pegas memendek sejauh 2 cm dari kedudukan semula. Jika konstanta pegas yang dipakai adalah 50 N, tentukan:
- a. energi potensial yang dimiliki peluru,
 - b. energi potensial pegas,
 - c. usaha yang dilakukan pegas untuk melontarkan peluru.

C Gaya Konservatif dan Gaya Disipatif (Pengayaan)

Kita telah mempelajari hubungan usaha dan energi potensial. Dari penjelasan sebelumnya, kalian telah mengetahui bahwa usaha merupakan perubahan energi potensial. Usaha dan energi potensial berhubungan erat dengan gaya konservatif. Untuk mengetahui lebih jauh pengertian gaya konservatif, simaklah penjelasan berikut.

1. Gaya Konservatif dan Medan Konservatif

Untuk memahami pengertian gaya konservatif, perhatikan Gambar 3.11. Gambar tersebut memperlihatkan dua orang yang berusaha memindahkan sebuah kotak dari atas truk ke tanah. Orang pertama menggunakan papan yang disandarkan dan melepaskan kotak sehingga kotak meluncur turun. Orang kedua memindahkan kotak secara langsung dengan menjatuhkannya dari atas truk ke tanah.

Jika massa kedua benda sama, maka kedua benda mengalami usaha yang sama, walaupun lintasan yang dilalui keduanya berbeda. Ini disebabkan kedua benda mengalami perubahan energi potensial yang sama, yaitu jatuh dari ketinggian sama. Selain itu, gaya yang bekerja pada kedua benda adalah gaya yang sama, yakni gaya berat dan perpindahan yang dialaminya juga sama. Gaya berat ini merupakan salah satu contoh gaya konservatif.

Gaya konservatif merupakan gaya yang hanya tergantung pada kedudukan awal dan kedudukan akhir, tidak tergantung pada lintasan yang dilalui benda. Beberapa ciri gaya konservatif adalah sebagai berikut.

- 1) Usaha selalu dinyatakan sebagai perubahan energi potensial.
- 2) Usaha yang dilakukan dapat kembali ke keadaan awal (reversibel/ dapat balik).



Gambar 3.11 Dua orang memindahkan benda dengan cara berbeda akan tetapi usaha yang dilakukan sama besar.

- 3) Usaha bergantung pada posisi awal dan posisi akhir, tidak memperhatikan lintasan yang dilalui.
- 4) Jika titik awal dan akhir sama, maka usaha sama dengan nol.

Sekarang, kita akan membahas beberapa contoh gaya konservatif, yaitu gaya berat, gaya gravitasi, dan gaya pegas.

a. Gaya Berat (Gaya Gravitasi Khusus)

Perhatikan sekali lagi Gambar 3.12. Diagram gaya yang dilakukan kedua orang tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.12. Dari dua cara untuk memindahkan benda tersebut, gaya berat memainkan peranan yang penting.

Kita tinjau gambar a, yaitu ketika benda dijatuhkan secara langsung. Dalam hal ini, gaya berat memberikan usaha pada benda sebesar:

$$W = F s$$

$$W = w h$$

$$W = m g h$$

Sekarang, kita tinjau gambar (b). Pada gambar tersebut, benda dipindahkan menggunakan bidang miring. Gaya yang melakukan usaha pada benda adalah:

$$F = w \sin \theta$$

$$F = m g \sin \theta$$

Sementara itu, perpindahan benda pada arah miring ke atas dapat dicari dengan rumus berikut.

$$\sin \theta = \frac{h}{s}$$

$$s = \frac{h}{\sin \theta}$$

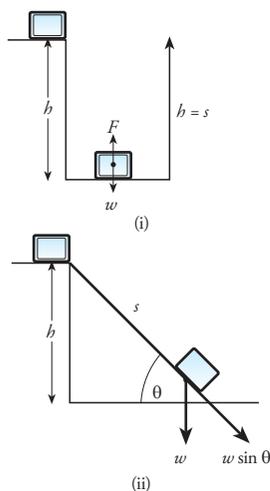
Besar usaha untuk menurunkan pada lintasan miring ini sebesar:

$$W = F s$$

$$W = m g \sin \theta \frac{h}{\sin \theta}$$

$$W = m g h$$

Dari dua persamaan usaha tersebut, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa besarnya usaha yang dilakukan untuk memindahkan suatu benda dari ketinggian tertentu tidak tergantung pada lintasan yang dilalui benda, akan tetapi hanya dipengaruhi kedudukan awal dan kedudukan akhir benda. Dengan demikian, gaya berat termasuk gaya konservatif.



Gambar 3.12 Gaya berat saat menurunkan benda secara (i) vertikal dan (ii) melalui bidang miring.

b. Gaya Gravitasi Umum

Di bab II di depan, kalian sudah mempelajari gaya gravitasi Newton. Menurut Hukum Gravitasi Newton, gaya tarik-menarik antara dua benda yang bermassa m dan m_2 serta berjarak R diberikan dengan persamaan:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

Sekarang, perhatikan Gambar 3.13. Usaha yang dilakukan gaya tarik-menarik antara dua benda dapat dijelaskan sebagai berikut:

a) Usaha melalui lintasan AC

$$\begin{aligned} W_{A \rightarrow C} &= F_g \cos \theta \times s \\ &= \left(G \frac{m_1 m_2}{R^2} \right) \left(\frac{\frac{1}{2} R}{s} \right) s \\ &= G \frac{m_1 m_2}{2R} \end{aligned}$$

b) Usaha melalui lintasan ABC

$$\begin{aligned} W_{A \rightarrow B \rightarrow C} &= F_g \left(\frac{1}{2} R \right) + F_g \cos \theta (h), \text{ padahal } \cos \theta = \cos 90^\circ = 0 \\ W_{A \rightarrow B \rightarrow C} &= G \frac{m_1 m_2}{R^2} \left(\frac{1}{2} R \right) \\ W_{A \rightarrow B \rightarrow C} &= G \frac{m_1 m_2}{2R} \end{aligned}$$

Dari dua persamaan tersebut, kita memperoleh bahwa usaha yang dilakukan gaya gravitasi dengan lintasan AC sama dengan usaha dengan lintasan ABC. Oleh sebab itu, gaya gravitasi umum dapat disebut sebagai gaya konservatif.

c. Gaya Pegas

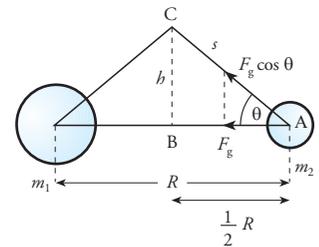
Apabila dikenai gaya \vec{F} , maka pegas akan bertambah panjang atau barangkali bertambah pendek. Pegas tersebut akan memberikan gaya perlawanan yang besarnya sama dengan gaya penyebabnya. Gaya penyebabnya yang berlawanan disebut **gaya pemulih** (F_p).

$$\vec{F}_p = -\vec{F} = -k\vec{x}$$

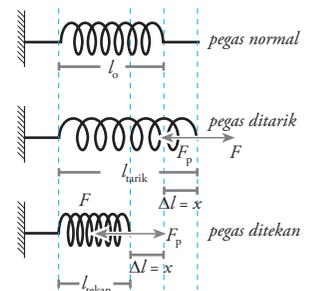
$$F_p = |-\vec{F}_p| = k|\vec{x}| = kx$$

Usaha untuk mengubah panjang pegas adalah:

$$W = \frac{1}{2} kx^2$$



Gambar 3.13 Usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi dua lintasan.



Gambar 3.14 Gaya tarik atau tekan menyebabkan perubahan panjang pegas

Usaha dapat juga ditentukan dengan mengintegrasikan gaya pegas pada perubahan panjangnya.

$$W = \frac{1}{2} kx^2$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} kx dx$$

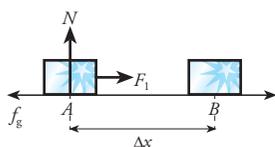
$$W = \left[\frac{1}{2} kx^2 \right]_{x_1}^{x_2}$$

$$W = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, usaha yang dilakukan oleh gaya pegas ditentukan oleh konstanta pegas, posisi awal (panjang awal pegas) dan posisi akhir (panjang pegas ketika dikenai gaya). Dengan demikian, gaya pegas merupakan gaya konservatif.

2. Gaya Disipatif

Gaya disipatif atau gaya tidak-konservatif adalah gaya yang tergantung pada lintasan yang dilalui benda. Gaya disipatif dapat memberikan pengaruh terhadap energi mekanik sebuah benda. Energi mekanik sebuah benda akan kekal jika tidak ada gaya disipatif yang bekerja terhadapnya. Salah satu contoh gaya disipatif adalah **gaya gesekan**. Gaya gesek merupakan gaya yang selalu berlawanan dengan arah gerak benda. Perhatikan Gambar 3.15.

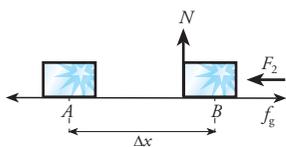


Gambar 3.15 Benda bergerak ke kanan, sedangkan gaya gesekan arahnya ke kiri

Pada Gambar 3.15, sebuah kotak bergerak ke kanan dengan gaya tarik F_1 sehingga gaya gesek antara kotak dengan lantai adalah f_g ke arah kiri. Usaha yang dilakukan gaya gesek saat kotak bergerak ke kanan adalah:

$$W_{A \rightarrow B} = -f_g \Delta x$$

Pada gambar 3.16 kotak bergerak ke kiri dengan gaya dorong F_2 , sehingga gaya gesek antara kotak dengan lantai adalah f_g arahnya ke kanan. Usaha yang dilakukan pada saat ke kiri adalah:



Gambar 3.16 Benda bergerak ke kiri, sementara gaya gesekan arahnya ke kanan

$$W_{B \rightarrow A} = -f_g \Delta x$$

Keterangan:

Δx = perpindahan

Usaha yang dilakukan gaya gesek ketika kotak bergerak ke kanan kemudian kembali lagi ke kiri adalah:

$$W_{A \rightarrow B \rightarrow A} = -f_g (\Delta x) + (-f_g (\Delta x))$$

$$W_{A \rightarrow B \rightarrow A} = -2f_g \Delta x$$

Dari dua persamaan tersebut, diketahui bahwa usaha yang dilakukan gaya gesek dari A kembali ke A tidak sama dengan nol. Dengan demikian, gaya gesekan termasuk gaya disipatif.

D Hukum Kekekalan Energi

Energi dapat mempunyai bentuk yang berbeda-beda. Selain itu, energi juga dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Contohnya, energi air dapat diubah menjadi energi listrik, energi kimia pada baterai dapat diubah menjadi energi listrik, energi listrik pada kipas angin dapat diubah menjadi energi gerak, dan sebagainya. Walaupun bentuknya berubah, namun jumlah energi di alam ini adalah kekal.

Hukum Kekekalan Energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, namun dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain.

Demikian pula energi kinetik dapat diubah menjadi energi potensial atau sebaliknya energi potensial dapat diubah menjadi energi kinetik. Perubahan energi kinetik menjadi energi potensial dapat dilihat pada kejadian benda yang bergerak vertikal. Sebuah benda yang dilemparkan ke atas dengan kecepatan tertentu mempunyai energi kinetik maksimum pada awal geraknya. Semakin ke atas, kecepatannya semakin berkurang yang berarti energi kinetiknya semakin berkurang dan akhirnya nol sampai di titik tertinggi.

Sementara itu, energi potensial pada awal gerakan adalah nol. Ketika benda bergerak ke atas, energi potensial gravitasi yang dimilikinya semakin besar. Pada titik tertinggi, energi potensial yang dimiliki benda menjadi maksimum. Besar energi potensial di titik tertinggi ini sama dengan besar energi kinetik di awal gerak. Ketika benda bergerak turun, terjadi proses sebaliknya, yaitu perubahan energi potensial menjadi energi kinetik.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa ketika benda bergerak ke atas, energi kinetik yang dimiliki benda diubah menjadi energi potensial. Satu hal yang penting adalah bahwa besarnya energi kinetik pada awal gerakan sama dengan besar energi potensial di titik tertinggi. Kenyataan ini menunjukkan bahwa jumlah energi yang dimiliki benda selalu tetap, walaupun energinya berubah bentuk. Peristiwa ini adalah salah satu contoh penerapan Hukum Kekekalan Energi.

Berdasarkan penjelasan pada peristiwa gerak vertikal, kita dapat menuliskan bentuk persamaan Hukum Kekekalan Energi sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta E_K &= \Delta E_P \\ E_{K2} - E_{K1} &= E_{P2} - E_{P1} \\ E_{K1} + E_{P1} &= E_{K2} + E_{P2}\end{aligned}$$

Keterangan:

- E_{K1} = energi kinetik pada kedudukan awal (J)
- E_{P1} = energi potensial pada kedudukan awal (J)
- E_{P2} = energi potensial pada kedudukan akhir (J)
- E_{K2} = energi kinetik pada kedudukan akhir (J)



dok. PIM

Gambar 3.17 Benda yang dilempar ke atas mengalami perubahan energi kinetik menjadi energi potensial

E_{p2} = energi potensial pada kedudukan akhir (J)

Faktor $E_p + E_K$ dari persamaan tersebut didefinisikan sebagai **energi mekanik total sistem** (E_M). Sehingga, Hukum Kekekalan Energi tersebut disebut sebagai Hukum Kekekalan Energi Mekanik, yang dirumuskan,

$$E_{M1} = E_{M2}$$

dengan,

$$E_M = E_p + E_K$$

Jadi, energi mekanik benda pada setiap posisi nilainya akan selalu konstan.

Hukum Kekekalan Energi Mekanik yang menyatakan bahwa pada sistem yang terisolasi (tidak ada gaya luar yang bekerja), energi mekanik total sistem adalah konstan.

Dengan menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik ini, kita dapat menjelaskan beberapa persoalan gerak benda dengan mudah. Untuk mengetahui penerapan Hukum Kekekalan Energi Mekanik, simaklah uraian selanjutnya.

1. Hukum Kekekalan Energi pada Gerak Vertikal

Penerapan Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada gerak vertikal telah kita singgung sedikit di depan. Gerak vertikal dapat kita bagi menjadi dua yaitu gerak ke atas dan gerak vertikal ke bawah.

a. Gerak Vertikal ke Atas

Perhatikan Gambar 3.18, misalkan pada kedudukan A benda dilemparkan ke atas dengan kecepatan v_0 . Setelah beberapa saat, benda akan mencapai ketinggian maksimum (h_{maks}) di B. Pada saat benda baru bergerak (posisi A) energi kinetik mencapai nilai maksimum, sedangkan energi potensial benda sama dengan nol, jika tangan sebagai acuan. Sementara itu, pada saat benda mencapai titik tertinggi (posisi B), energi potensial mencapai maksimum, sedangkan energi kinetiknya sama dengan nol.

Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi Mekanik, pada gerak vertikal ke atas berlaku persamaan:

$$E_{KA} + E_{PA} = E_{KB} + E_{PB}$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = 0 + mgh_{\text{maks}}$$

Sehingga tinggi maksimum yang dapat dicapai benda adalah:

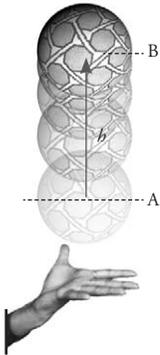
$$h_{\text{maks}} = \frac{v_0^2}{2g}$$

Keterangan:

h_{maks} = tinggi maksimum (m)

v_0 = kelajuan awal benda (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)



Gambar 3.18 Benda melakukan gerak vertikal ke atas

Selain mencari ketinggian maksimum yang dapat dicapai benda, Hukum Kekekalan Energi Mekanik dapat digunakan untuk mencari kelajuan benda saat berada pada ketinggian h . Ketika benda berada pada ketinggian h berlaku persamaan:

$$Ek_1 + Ep_1 = Ek_2 + Ep_2$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

$$v^2 = v_0^2 - 2gh$$

Persamaan ini sama persis dengan persamaan kecepatan pada gerak lurus berubah beraturan dengan percepatan sebesar g .

Perhatikan contoh berikut.

Contoh

1. Sebuah bola bermassa 0,2 kg dilempar vertikal ke atas dengan kelajuan awal 10 m/s. Dengan menggunakan hukum kekekalan energi dan gesekan udara diabaikan, tentukan:
 - a. ketinggian maksimum yang dicapai bola,
 - b. kelajuan bola saat bola berada pada ketinggian 3 meter.

Penyelesaian :

Diketahui:

$$m = 0,2 \text{ kg}$$

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

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

Ditanyakan:

a. h_{maks}

b. v jika $h = 3 \text{ m}$

Jawab:

- a. Dari Hukum Kekekalan Energi di peroleh:

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2}$$

$$0 + \frac{1}{2}mv_0^2 = mgh + 0$$

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

$$= \frac{10^2}{2 \times 10}$$

$$= 5 \text{ m}$$

Jadi, ketinggian bola tersebut adalah 5 m.

- b. Kelajuan bola pada ketinggian 3 m dapat dicari dengan persamaan:

$$v^2 = v_0^2 - 2gh$$

$$= (10^2) - (2 \times 10 \times 3)$$

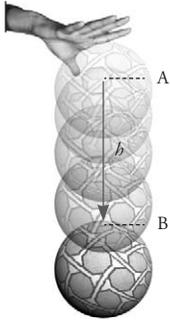
$$= 40$$

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

Jadi, kelajuan bola di ketinggian 3 meter adalah $v = 2\sqrt{10} \text{ m/s}$

b. Gerak Vertikal Ke Bawah

Gerak vertikal ke bawah dibedakan menjadi 2, yaitu gerak tanpa kecepatan awal dan gerak dengan kecepatan awal. Untuk gerak tanpa kecepatan awal, disebut **gerak jatuh bebas**. Contoh gerak jatuh bebas adalah gerak benda yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu. Perhatikan Gambar 3.19. Pada saat dijatuhkan, kecepatan benda sama dengan nol, sehingga



Gambar 3.19 Gerak jatuh bebas

energi kinetiknya nol. Akan tetapi energi potensialnya maksimal. Ketika benda sampai di lantai atau bidang acuan, kelajuannya menjadi maksimal dan energi kinetiknya juga maksimal. Sementara energi potensialnya sama dengan nol.

Pada gerak jatuh bebas dari A ke B, berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik sebagai berikut.

$$E_{KA} + E_{PA} = E_{KB} + E_{PB}$$

$$0 + mgh_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B$$

$$v_B^2 = 2g(h_A - h_B)$$

$$v_B = \sqrt{2g(h_A - h_B)}$$

Keterangan:

v_B = kelajuan benda (m/s)

h_B = tinggi benda (m)

h_A = tinggi benda mula-mula (m)

Jika posisi B adalah ketika bola mencapai lantai ($h_B = 0$), maka kelajuan bola ketika menyentuh lantai adalah:

$$v = \sqrt{2gh_A}$$

Persamaan tersebut berlaku jika benda tidak diberi kecepatan awal. Jika benda dijatuhkan dengan kecepatan v_0 (benda dihempaskan), berlaku persamaan:

$$E_{KA} + E_{PA} = E_{KB} + E_{PB}$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B$$

$$v_B^2 = v_0^2 + 2g(h_A - h_B)$$

$$v_B = \sqrt{v_0^2 + 2g(h_A - h_B)}$$

Sehingga kelajuan benda saat sampai di lantai dapat dicari dengan persamaan,

$$v^2 = v_0^2 + 2gh$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

Keterangan:

v = kelajuan benda (m/s)

v_0 = kelajuan awal (m/s)

Persamaan tersebut sama dengan persamaan gerak vertikal ke atas, hanya saja g bernilai positif.

Sebagai ajang untuk mengasah keterampilan kalian, kerjakan *Ekspedisi* berikut.

Tips & Trik

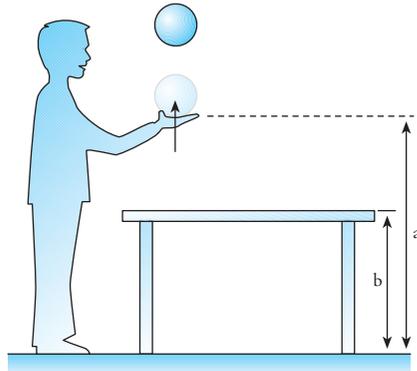
Saat benda mengalami gerak jatuh bebas, akan terjadi beberapa keadaan.

- Pada kedudukan awal, kelajuan awal sama dengan nol, sehingga $E_k = 0$ dan $E_{p_{maks}} = E_m$.
- Keadaan selanjutnya, energi potensial berkurang dan berubah menjadi energi kinetik, pada setengah perjalanannya $E_p = E_k$ dan $E_m = E_p + E_k$
- Ketika menyentuh tanah (bidang acuan) dan $E_p = 0$ dan $E_{k_{maks}} = E_m$.

Cobalah analisis kejadian berikut menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik.

Seorang anak melemparkan bola ke atas dengan kecepatan awal v_0 . Bola dilempar dari ketinggian a meter dari tanah. Setelah mencapai titik tertinggi, bola kemudian turun dan jatuh di atas meja dengan ketinggian b meter dari lantai. Perhatikan gambar. Dengan menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik, buktikan bahwa kelajuan bola ketika jatuh di meja diberikan dengan persamaan:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{a-b}{2g}}$$



Untuk melengkapi penjelasan di depan, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Seorang tukang batu menjatuhkan batu bata yang massanya 500 g dari ketinggian 10 m di atas tanah tanpa kecepatan awal. Jika percepatan gravitasi di tempat itu $9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan:

- energi potensial benda tersebut,
- energi kinetik ketika batu bata berada pada ketinggian 4 m di atas tanah,
- kelajuan batu bata saat mengenai tanah.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 500 \text{ g} = 0,5 \text{ kg}$$

$$h_1 = 10 \text{ m}$$

$$h_2 = 4 \text{ m}$$

Ditanyakan:

- E_{p1}
- E_{k2}
- $v_{\text{di tanah}}$

Jawab:

- Energi potensial pada ketinggian awal dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned} E_p &= mgh \\ &= 0,5 \times 9,8 \times 10 \\ &= 49 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, energi potensial pada ketinggian awal adalah 49 J.

- Energi kinetik pada ketinggian 4 m dapat dicari dengan Hukum Kekekalan Energi Mekanik berikut.

$$\begin{aligned} E_{p1} + E_{k1} &= E_{p2} + E_{k2} \\ mgh_1 + 0 &= mgh_2 + Ek_2 \\ Ek_2 &= mg(h_1 - h_2) \\ &= 0,5 \times 9,8 (10 - 4) \\ &= 29,4 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, energi kinetik pada ketinggian 4 m adalah 19,4 J.

- Untuk mencari kecepatan benda saat tiba di tanah, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{2gh} \\ &= \sqrt{2 \times 9,8 \times 10} \\ &= 14 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan batu bata saat tiba di tanah adalah 14 m/s.

2. Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada Gerak Parabola

Di bab I kita telah mempelajari gerak parabola ditinjau secara vektor. Sekarang, kita akan mencoba untuk menganalisis gerak parabola dengan Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Namun sebelum kita membahasnya lebih lanjut, kerjakan *Eureka* berikut.

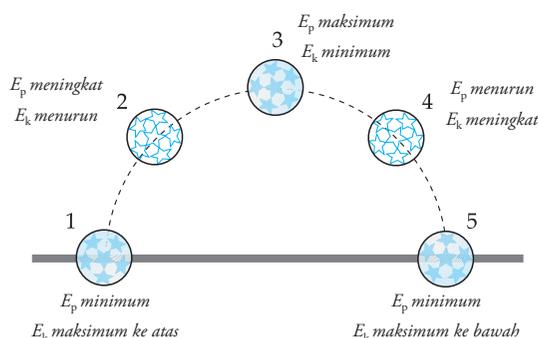
Eureka

Bersama teman sebangku kalian, carilah jawaban dari pertanyaan-pertanyaan di bawah ini.

1. Carilah 5 contoh peristiwa sehari-hari yang menunjukkan gerak parabola.
2. Tuliskan persamaan gerak parabola untuk mencari:
 - a. ketinggian maksimum yang dicapai,
 - b. jarak maksimum yang dicapai,
 - c. kecepatan benda di setiap kedudukan

Konsultasikan hasil pencarian kalian kepada bapak/ibu guru.

Sekarang kita akan mencoba untuk membuktikan persamaan-persamaan pada gerak parabola menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Perhatikan skema lintasan gerak parabola pada gambar 3.20.



Gambar 3.20 Energi mekanik bola pada setiap keadaan

Energi mekanik dari bola yang ditendang ke atas merupakan energi total yang terdiri dari energi potensial dan energi kinetik pada setiap waktu dan keadaan yang sama. Saat bola ditendang (titik 1), energi potensialnya minimum, sedangkan energi kinetiknya maksimum. Saat bergerak ke atas, setelah bola naik (titik 2), energi potensialnya meningkat, sedangkan energi kinetiknya menurun. Kemudian, sampai pada titik tertinggi (titik 3), energi energi potensialnya maksimum dan energi kinetiknya minimum. Selanjutnya, bola kembali bergerak turun (titik 4), energi potensial bola kembali menurun, sementara energi kinetiknya meningkat. Sampai menyentuh tanah (titik 5), energi potensial bola menjadi minimum dan energi kinetiknya maksimum.

Sesuai Hukum Kekekalan Energi, kejadian tersebut dapat dijelaskan dengan persamaan,

$$E_{P1} + E_{K1} = E_{P2} + E_{K2} = E_{P3} + E_{K3} = E_{P4} + E_{K4}$$

Sekarang kita tinjau kedudukan benda di titik 2. Dalam hal ini, kita hanya memperhitungkan komponen kelajuan pada sumbu y . Ini karena komponen kelajuan pada sumbu x selalu tetap setiap saat, sehingga tidak perlu diperhitungkan. Ketika benda berada di titik 2, persamaan yang berlaku adalah:

$$E_{K1} + E_{P1} = E_{K2} + E_{P2}$$

$$\frac{1}{2}mv_{y0}^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_y^2 + mgy_2$$

$$v_y^2 = v_{y0}^2 - 2gy_2$$

$$v_y^2 = (v_0 \sin \alpha)^2 - 2gy_2$$

$$v_y^2 = v_0^2 \sin^2 \alpha - 2gy_2$$

Secara umum, persamaan komponen kelajuan pada sumbu y ketika benda mencapai ketinggian y adalah:

$$v_y^2 = v_0^2 \sin^2 \alpha - 2gy$$

Keterangan:

v_y = kelajuan benda di ketinggian y (m/s)

v_0 = kelajuan awal benda (m/s)

α = sudut elevasi

y = ketinggian benda (m)

Ketika benda mencapai titik tertinggi (posisi 3), berlaku persamaan:

$$E_{K1} + E_{P1} = E_{K3} + E_{P3}$$

$$\frac{1}{2}mv_{y0}^2 + 0 = 0 + mgy_3$$

$$y_3 = y_{\text{maks}} = \frac{(v_0 \sin \alpha)^2}{2g}$$

$$y_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

Keterangan:

y_{maks} = ketinggian maksimum (m)

Teropong

Di bab I tentang Kinematika, kita telah mempelajari gerak parabola. Kecepatan awal gerak parabola dapat diuraikan dalam sumbu x dan sumbu y , yang diberikan dengan persamaan:

$$v_{x0} = v_x = v_0 \cos \alpha$$

$$v_{y0} = v_y \sin \alpha$$

Besar kecepatan pada sumbu x (v_x) selalu tetap pada semua posisi, sedangkan besar v_y tergantung pada posisi benda.

Untuk melengkapi penjelasan tersebut, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah pelontar rudal menembakkan rudal ke angkasa dengan kecepatan awal 60 m/s dengan sudut elevasi 45° . Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:

- tinggi maksimum yang dicapai peluru,
- laju peluru ketika berada di ketinggian 30 m,
- laju peluru ketika tiba di tanah.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$v_0 = 60 \text{ m/s}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

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

Ditanyakan:

- y_{maks}
- v untuk $y = 30 \text{ m}$
- v_{tanah}

Jawab:

- Untuk mencari ketinggian maksimum yang dicapai peluru, kita dapat menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} y_{\text{maks}} &= \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \\ &= \frac{60^2 (\sin 45^\circ)^2}{2 \times 10} \\ &= \frac{3.600 \times \left(\frac{1}{2}\sqrt{2}\right)^2}{20} \\ &= 90 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, ketinggian maksimal peluru tersebut adalah 90 m.

- Untuk mencari kelajuan rudal di ketinggian 30 m, kita harus mencari v_y dan v_x terlebih dahulu.

$$v_x = v_0 \cos \alpha$$

$$v_x = v_0 \cos \alpha$$

$$= 60 \cos 45^\circ$$

$$= 60 \left(\frac{1}{2}\sqrt{2}\right)$$

$$= 30\sqrt{2} \text{ m/s}$$

Kelajuannya dapat dicari dengan persamaan:

$$v_y^2 = v_0^2 \sin^2 \alpha - 2gy$$

$$= 60^2 \sin^2 45^\circ - 2 \times 10 \times 30$$

$$= 3.600 \times \left(\frac{1}{2}\sqrt{2}\right)^2 - 600$$

$$v_y = \sqrt{1.200}$$

$$= 20\sqrt{3} \text{ m/s}$$

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

$$= \sqrt{(30\sqrt{2})^2 + (20\sqrt{3})^2}$$

$$= \sqrt{1.800 + 1.200}$$

$$= 20\sqrt{10} \text{ m/s}$$

Jadi, kelajuan benda di ketinggian 30 m adalah $20\sqrt{10} \text{ m/s}$.

- Untuk mencari kelajuan rudal saat sampai di tanah, kita dapat menggunakan persamaan:

$$E_{\text{Pawal}} + E_{\text{Kawal}} = E_{\text{Pakhir}} + E_{\text{Kakhir}}$$

$$0 + \frac{1}{2}mv_0^2 = 0 + \frac{1}{2}mv_{\text{akhir}}^2$$

$$v_{\text{akhir}} = v_0$$

$$v_{\text{akhir}} = 60 \text{ m/s}$$

Jadi, kelajuan rudal ketika sampai di tanah sama dengan kelajuan awalnya yaitu 60 m/s.

3. Hukum Kekekalan Energi Mekanik untuk Gerak Harmonis Sederhana

Pada bab II tentang Gravitasi dan Gaya Pegas, kalian telah mempelajari materi Gerak Harmonis Sederhana yang dilakukan benda yang terhubung dengan pegas. Sebagai bekal kalian, coba buka kembali materi tersebut. Di depan, kita telah juga telah membahas energi potensial pegas. Sekarang kita akan mencoba untuk menganalisis gerak benda di bawah pengaruh pegas berdasarkan Hukum Kekekalan Energi Mekanik.

Perhatikan Gambar 3.21. Gambar tersebut memperlihatkan beberapa posisi benda yang melakukan gerak harmonik sederhana. Energi mekanik total sistem pegas dan benda merupakan jumlah energi kinetik dan energi potensial.

$$E_M = E_K + E_P$$

Ketika menyimpang sejauh $x = A$ dari titik keseimbangan, energi potensial yang dimiliki benda mencapai maksimal. Sementara energi kinetik benda sama dengan nol. Ini disebabkan karena pada posisi ini benda tidak bergerak untuk beberapa saat. Jadi, ketika simpangan pegas maksimal berlaku persamaan:

$$E_M = E_P = \frac{1}{2}kA^2$$

Setelah menyimpang sejauh A , pegas akan menarik beban. Akibatnya, beban bergerak dengan kecepatan v dan suatu saat berada di titik keseimbangan (gambar b). Pada titik ini, energi potensial yang dimiliki benda sama dengan nol (ingat acuannya adalah titik keseimbangan). Ini berarti energi total yang dimiliki sistem berada dalam bentuk energi kinetik. Ini berarti kecepatan benda di titik keseimbangan (kita beri lambang v_0) mencapai maksimum.

$$E_M = E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

Jadi, ketika benda bergerak dari titik $x = A$ (posisi 1) ke titik $x = 0$ (posisi 2), berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik sebagai berikut.

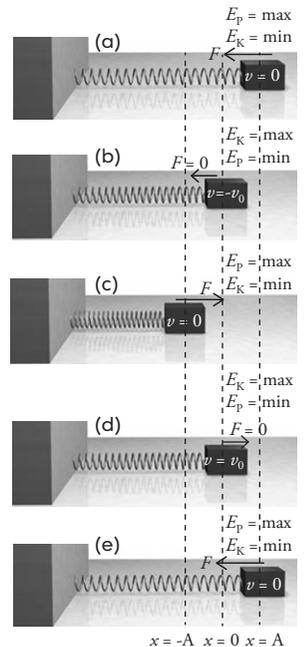
$$E_{M1} = E_{M2}$$

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$v_0 = A\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Keterangan:

- v_0 = kecepatan benda di titik keseimbangan (m/s)
- A = simpangan maksimum atau amplitudo (m)
- k = konstanta pegas (N/m)
- m = massa benda (kg)



Gambar 3.21 Benda melakukan gerak harmonik sederhana ketika dihubungkan dengan pegas.

Setelah mencapai titik keseimbangan, benda terus bergerak sehingga mencapai titik $x = -A$. Di titik ini, energi potensial kembali mencapai nilai maksimal sedangkan energi kinetiknya sama dengan nol. Jadi persamaan yang berlaku:

$$E_M = E_p = \frac{1}{2}kA^2$$

Lalu, bagaimanakah energi sistem ketika benda menyimpang sejauh x ? Untuk kasus ini, energi mekaniknya adalah penjumlahan dari energi kinetik dan energi potensialnya. Pada posisi ini (gambar d) berlaku persamaan:

$$E_M = E_K + E_p$$

$$E_M = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$$

Jika benda bergerak dari titik keseimbangan ($x = 0$) ke titik $x = x$ berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik sebagai berikut.

$$E_{K0} + E_{p0} = E_{Kx} + E_{px}$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$$

$$v^2 = v_0^2 - \frac{k}{m}x^2$$

Dengan mensubstitusikan persamaan $v_0 = A\sqrt{\frac{k}{m}}$ atau $v_0^2 = \frac{k}{m}A^2$, kita dapatkan persamaan kelajuan benda ketika menyimpang sejauh x .

$$v^2 = A^2 \frac{k}{m} - \frac{k}{m}x^2$$

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

$$v^2 = \frac{k}{m}A^2 \left(1 - \frac{x^2}{A^2}\right)$$

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}A^2 \left(1 - \frac{x^2}{A^2}\right)}$$

$$\text{Jadi, } v = v_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}$$

Keterangan:

v = kelajuan benda (m/s)

v_0 = kelajuan benda di titik keseimbangan (m/s)

x = pertambahan panjang pegas/simpangan (m)

4. Hukum Kekekalan Energi Mekanik untuk Gerak Benda di Bidang Miring

Analisis gerak benda pada bidang miring telah kita bahas di kelas X pada materi Gaya dan Gerak. Sekarang kita akan mencoba menganalisis gerak benda pada bidang miring menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik.

Kita ambil contoh sebuah mobil yang sedang bergerak di tanjakan dengan kemiringan α . Ketika berada di dasar tanjakan, mobil bergerak dengan kecepatan awal v_0 . Bisakah kalian menghitung kecepatan awal minimal yang harus dimiliki mobil agar sampai di atas tanjakan? Dengan menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik kita dapat menyelesaikan permasalahan tersebut dengan mudah. Perhatikan Gambar 3.22.

Sekarang kita tinjau kedudukan mobil ketika di tanjakan (posisi B). Ketika mobil bergerak dari dasar (posisi A) ke posisi B, berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik sebagai berikut.

$$E_{MA} = E_{Mg}$$

$$E_{KA} + E_{PA} = E_{KB} + E_{PB}$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B$$

$$v_B^2 = v_0^2 - 2gh_B$$

Jika mobil bergerak turun dari atas ke dasar tanjakan (dari C ke A), maka g bernilai negatif ($-$) sehingga:

$$v_B^2 = v_0^2 + 2gh_B$$

Keterangan:

v_B = kelajuan mobil di tanjakan (m/s)

v_0 = kelajuan awal (m/s)

h_B = kedudukan mobil dari bidang acuan (m)

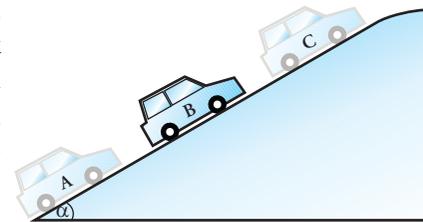
Lalu, untuk mencari kelajuan awal minimal yang dibutuhkan agar mobil mampu melewati tanjakan tanpa ada usaha menambah kelajuannya, kita dapat menggunakan persamaan:

$$E_{KA} + E_{PA} = E_{KC} + E_{PC}$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = 0 + mgh$$

$$v_0 = \sqrt{2gh}$$

v_0 pada persamaan tersebut adalah kelajuan minimal yang harus dimiliki mobil agar mampu melewati tanjakan.



Gambar 3.22 Mobil bergerak di tanjakan dengan kemiringan α .

5. Hukum Kekekalan Energi pada Gerak Melingkar

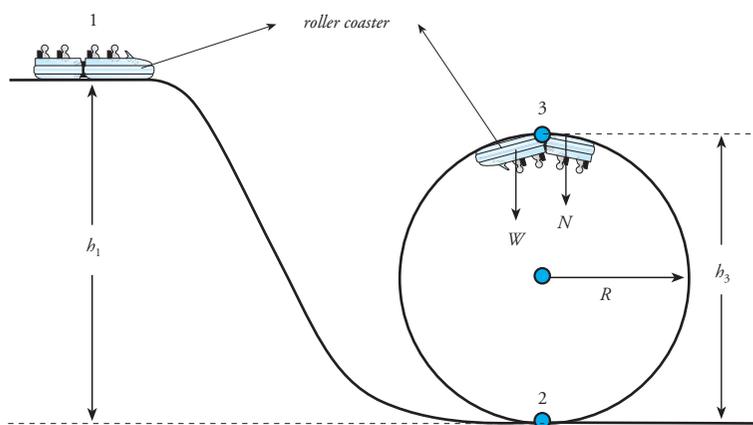
Untuk membahas Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada Gerak Melingkar, kita ambil contoh sebuah lintasan melingkar pada **roller coaster**. *Roller coaster* adalah permainan berupa kereta yang meluncur di atas rel. Lintasan rel dibuat beraneka macam bentuknya, ada lintasan melengkung, mendatar, ataupun berputar atau lingkaran. Permainan ini tidak digerakkan oleh mesin. Mesin hanya digunakan untuk mengangkat kereta ke rel tertinggi. Setelah itu, mesin tidak lagi bekerja. Kecepatan kereta yang meluncur pada pelbagai bentuk lintasan hanya memanfaatkan konsep Hukum Kekekalan Energi Mekanik.

Sekarang kita akan membahas bagaimanakah Hukum Kekekalan Energi Mekanik menjelaskan gerak kereta pada *roller coaster* tersebut, terutama saat melewati lintasan berupa lingkaran. Perhatikan gambar 3.28.



www.nolimitscoaster.com

Gambar 3.23 Pada *roller coaster* berlaku hukum kekekalan energi



Gambar 3.24 Skema lintasan gerak roller coaster

Ketika naik *roller coaster*, kita akan melihat lintasan yang lingkaran berada setelah lintasan tertinggi. Ini dilakukan agar kereta mempunyai kecepatan yang cukup yang diperlukan untuk melewati lingkaran dengan aman. Bagaimanakah lintasan yang tinggi mampu memberikan kecepatan pada kereta?

Ketika kereta bergerak dari lintasan tertinggi (posisi 1) ke bagian bawah lingkaran (posisi 2), berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik sebagai berikut.

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2}$$

Di posisi 1, kecepatan kereta adalah nol. Jika posisi 2 dijadikan acuan, ketinggian kereta di posisi ini nol. Jadi, Hukum Kekekalan Energi Mekanik tersebut dapat dituliskan:

$$mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$v_2 = \sqrt{2gh_1}$$

Dari persamaan tersebut, kita mendapatkan kecepatan saat di titik 2. Kecepatan yang dimiliki kereta di dasar lingkaran ini harus bisa digunakan untuk mencapai titik tertinggi (titik 3). Jika kecepatannya kurang sedikit saja, maka kereta tidak akan sampai di titik 3 dan sangat membahayakan penumpangnya. Dengan demikian, perhitungan ketinggian lintasan sebelum memasuki lingkaran sangat diperlukan.

Sekarang kita akan mencari kecepatan minimal yang harus dimiliki benda saat mulai berada di titik tertinggi (di posisi 3). Kecepatan ini diperlukan agar kereta tidak jatuh saat berada di posisi ini. Untuk mencari kecepatan di posisi ini, kita ingat gaya sentripetal. Agar kereta tidak jatuh, maka besar gaya sentripetal harus sama dengan berat benda. Jadi, kita memperoleh persamaan:

$$F_s = w$$

$$m \frac{v_3^2}{R} = mg$$

Dengan demikian, kelajuan minimal yang harus dimiliki kereta di titik tertinggi adalah:

$$v_{3,\min} = \sqrt{gR}$$

Untuk mencapai kelajuan minimal ini, kelajuan kereta di titik terbawah lingkaran juga harus tepat. Kelajuan di titik 2 sehingga di titik 3 kereta mempunyai kelajuan minimal dapat dicari dengan Hukum Kekekalan Energi Mekanik sebagai berikut.

$$E_{M2} = E_{M3}$$

$$E_{K2} + E_{P2} = E_{K3} + E_{P3}$$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_3^2 + mg(2R)$$

$$\frac{1}{2}v_2^2 = \frac{1}{2}(\sqrt{gR})^2 + 2gR$$

$$v_2^2 = gR + 4gR$$

Jadi, kelajuan v_2 yang harus dimiliki kereta agar dapat melewati lingkaran dengan aman adalah:

$$v_2 = \sqrt{5gR}$$

Di depan, kita telah menemukan bahwa kelajuan di titik terbawah diberikan dengan persamaan:

$$v_2 = \sqrt{2gh_1}$$

Dari dua persamaan ini, diperoleh tinggi puncak lintasan sebelum lintasan lingkaran sebagai berikut.

$$\sqrt{2gh_1} = \sqrt{5gR}$$

$$2gh_1 = 5gR$$

$$h_1 = \frac{5}{2}R$$

Keterangan:

h_1 = tinggi puncak sebelum lintasan lingkaran (m)

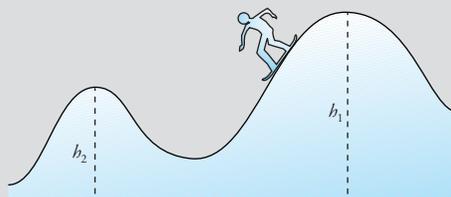
R = jari-jari lingkaran (m)

Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada gerak melingkar tidak hanya dapat digunakan untuk menganalisis gerak kereta pada *roller coaster*. Akan tetapi dapat juga digunakan untuk menjelaskan gerak melingkar lainnya. Nah, untuk menambah pengetahuan kalian, berdiskusilah untuk mengerjakan *Eureka* berikut.

Eureka

Benda yang melakukan gerak melingkar banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Gerak ini dapat dijelaskan dengan Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Nah, sekarang analisislah beberapa kejadian berikut menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik dan jawablah pertanyaan yang diberikan.

1. Seseorang pemain ski meluncur menuruni sebuah bukit kecil. Di depannya terdapat bukit lain yang lebih rendah dari bukit pertama jika dihitung dari dasar



lembah, seperti tampak pada gambar. Pemain ski meluncur tanpa kecepatan awal dan ia berhasil mencapai puncak bukit kedua. Buktikan bahwa kelajuan pemain ski di puncak bukit kedua diberikan dengan persamaan:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

2. Carilah dari pelbagai referensi mengenai penerapan Hukum Kekekalan Energi Mekanik untuk menjelaskan gerak satelit dalam mengelilingi bumi atau gerak planet dalam mengelilingi matahari.

Tuliskan hasil diskusi kalian dalam bentuk paper dan publikasikan lewat majalah sekolah atau majalah dinding.

Untuk membantu kalian dalam memahami penggunaan Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada gerak melingkar, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah roller coaster memiliki rel berupa lingkaran dengan jejari 5 m. Dengan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan kelajuan minimal kereta ketika berada pada titik tertinggi dan ketika berada pada titik terendah agar kereta dapat melewati lingkaran tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$R = 5 \text{ m}$$

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

Ditanyakan:

- v minimal di titik tertinggi
- v minimal di titik terendah

Jawab:

- Pada titik tertinggi

$$v_{\min} = \sqrt{gR}$$

$$= \sqrt{10 \times 5}$$

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

Jadi, kelajuan minimal di titik tertinggi adalah $5\sqrt{2} \text{ m/s}$.

- Pada titik terendah

$$v_{\min} = \sqrt{5gR}$$

$$= \sqrt{5 \times 10 \times 5}$$

$$= \sqrt{250}$$

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

Jadi, pada titik terendah kelajuan minimalnya adalah $5\sqrt{10} \text{ m/s}$.

Untuk mengetahui kompetensi yang kalian kuasai, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

- Sebuah batu dengan massa 2 ons dilempar ke atas dengan kelajuan 50 m/s. Tentukan:
 - energi kinetik maksimum batu,
 - energi potensial batu pada ketinggian maksimum.
- Sebuah pesawat pembom menjatuhkan sebuah bom yang massanya 100 kg dari ketinggian 1 km dari permukaan tanah. Jika gesekan udara diabaikan, tentukan:
 - kecepatan bom pada saat menyentuh tanah,
 - energi kinetik pada saat menyentuh tanah.
- Sebuah pegas memiliki konstanta 500 N/m. Arifin menekan pegas tersebut sehingga pegas memendek 5 cm. Zaenal menarik pegas yang sama dan pegas tersebut meregang 5 cm. Berapakah perbandingan usaha yang dilakukan Arifin dan Zaenal?
- Sebuah benda dijatuhkan dari ketinggian 5 m di atas tanah. Pada saat mengenai tanah, benda tersebut memperoleh energi kinetik 245 joule. Berapakah massa benda itu?
- Sebuah benda dengan massa 5 kg dilepaskan dari ketinggian 25 m. Berapakah energi kinetik benda tersebut saat mencapai tempat setinggi 5 m dari tanah? Hitung pula kecepatan benda di tempat tersebut ($g = 10 \text{ m/s}^2$).



www.sovereign-publications.com

Gambar 25. PLTA memanfaatkan air yang mengalir dari ketinggian tertentu untuk menghasilkan listrik.

Berdasarkan keterangan sebelumnya, kalian telah mengetahui bahwa suatu bentuk energi dapat berubah menjadi bentuk energi lainnya. Sebagai contoh PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) yang memanfaatkan energi air yang mengalir untuk diubah menjadi energi listrik. Air yang dialirkan sedemikian rupa, biasanya dari ketinggian tertentu, digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator. Dari generator inilah listrik dihasilkan.

Di kelas X kalian telah mempelajari pengertian daya listrik. Secara umum, daya diartikan sebagai **besarnya usaha yang dilakukan tiap satu satuan waktu atau perubahan energi tiap satuan satuan waktu**. Dari pengertian ini, kita dapat merumuskan daya sebagai berikut.

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = \frac{\Delta E}{t}$$

Keterangan:

P = daya (W = watt)

W = usaha (J)

ΔE = perubahan energi (J)

t = waktu (s)

Dalam SI, satuan daya adalah watt (W). Satu watt sama dengan besarnya usaha yang dilakukan untuk mengubah energi yang dimiliki benda sebesar 1 joule tiap detik. Satuan daya lainnya selain watt adalah *horse power* (*hp*). Satuan ini sering digunakan untuk menyatakan daya yang dimiliki sebuah mesin. 1 hp sama dengan 746 W (untuk mempermudah perhitungan dibulatkan menjadi 750 W).

Daya menunjukkan kecepatan usaha yang dilakukan atau kecepatan perubahan energi dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Sebagai contoh, kita dapat membandingkan dua alat pemanas air listrik yang besarnya 500 W dan 250 W. Apabila air yang dipanaskan sama, maka alat pemasak air 500 W akan mengubah energi listrik menjadi energi panas dua kali lebih cepat daripada alat pemasak air listrik 250 W. Artinya, alat pemasak air 500 W membutuhkan waktu lebih sedikit dibandingkan alat pemasak air 250 W untuk menaikkan suhu yang sama. Ini disebabkan alat pemanas air 500 W mempunyai daya lebih besar dibandingkan alat pemasak air 250 W.

Kita kembali ke kasus air yang digunakan pada PLTA. Jika massa air m jatuh dari ketinggian h dari turbin, maka energi yang dimiliki air merupakan energi potensial. Besarnya energi yang dimiliki air merupakan energi potensial, yang dirumuskan:

$$E_p = mgh$$

Energi potensial inilah yang akan diubah menjadi energi listrik. Jika energi potensial ini diubah seluruhnya menjadi energi listrik, maka besarnya energi listrik tiap detik yang dihasilkan adalah:

$$W_{\text{listrik}} = E_{\text{pair}} = mgh$$

Jika air mengalir selama t sekon, maka besar daya yang dihasilkan adalah:

$$P = \frac{W_{\text{listrik}}}{t}$$

$$P = \frac{mgh}{t}$$

Namun, untuk mengubah semua energi air menjadi energi listrik sebesar 100% sangat mustahil dilakukan. Jika hanya $\eta\%$ air yang diubah menjadi energi listrik, maka besarnya daya listrik yang dihasilkan sebesar:

$$P = \frac{mgh}{t} \times \eta\%$$

Keterangan:

η = efisiensi

Agar kalian mampu menguasai subbab ini, cermatilah contoh soal berikut.

Contoh

Sebuah air terjun yang mempunyai ketinggian 100 m digunakan untuk memutar turbin di dasarnya. Sekitar $7,2 \times 10^5 \text{ m}^3$ air mengalir setiap jam (massa jenis air 10^3 kg/m^3). Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan hanya 50% energi air yang diubah menjadi energi listrik, berapa daya listrik yang dikeluarkan generator?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$h = 100 \text{ m}$$

$$V = 7,2 \times 10^5 \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{air}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta = 50\%$$

Ditanyakan: P

Jawab:

Untuk mencari P , kita harus mencari massa air yang mengalir selama 1 jam.

$$\begin{aligned} m &= \rho_{\text{air}} \times V \\ &= (1 \times 10^3) \times (7,2 \times 10^5) \\ &= 7,2 \times 10^8 \text{ kg} \end{aligned}$$

Energi potensial yang dimiliki tiap 1 jam:

$$\begin{aligned} E_p &= mgh \\ &= (7,2 \times 10^8) \times 10 \times 100 \\ &= 7,2 \times 10^{11} \text{ J} \end{aligned}$$

Karena hanya 50% yang diubah menjadi energi listrik, maka energi listrik yang dihasilkan dalam 1 jam adalah:

$$W_{\text{listrik}} = 50\% \times (7,2 \times 10^{11})$$

$$= 3,6 \times 10^{11} \text{ J}$$

Daya listrik yang dihasilkan,

$$P = \frac{W_{\text{listrik}}}{t}$$

$$= \frac{3,6 \times 10^{11}}{3.600}$$

$$= 1 \times 10^8 \text{ wat}$$

$$= 100 \text{ MW}$$

Jadi, daya listrik yang dihasilkan adalah 100 MW.

Air yang mengalir dari ketinggian tertentu (air terjun) ternyata dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Padahal kita tahu bahwa air merupakan salah satu dari sekian banyak sumber energi. Ini berarti masih banyak sumber energi lainnya yang dapat digunakan sebagai sumber energi listrik. Nah, untuk menambah pengetahuan kalian, kerjakan *Ekspedisi* berikut.

Ekspedisi

Carilah artikel dari pelbagai sumber yang menjelaskan pemanfaatan beberapa sumber energi sebagai sumber tenaga listrik. Pilihlah salah satu dari beberapa tema berikut.

1. Pemanfaatan angin sebagai sumber listrik.
2. Nuklir sumber listrik masa depan.
3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang ramah lingkungan.
4. Gelombang laut, sumber tenaga listrik yang belum tergali.

Buatlah sebuah karya tulis ilmiah berdasarkan tema yang kalian pilih. Jika memungkinkan, buatlah sebuah model sederhana mengenai pemanfaatan sumber energi tersebut hingga dapat dijadikan sebagai pembangkit tenaga listrik. Kirimkan hasil karyamu pada lomba karya ilmiah remaja. Kumpulkan juga salinan hasil karyamu kepada bapak/ibu guru yang akan menilainya sebagai tugas proyek di semester ini.

Untuk menguji pemahaman kalian, selesaikan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Sebuah mobil bergerak dengan gaya 100 N sejauh 20 m. Apabila waktu tempuhnya 5 s, berapakah besar daya mobil tersebut?
2. Sebuah pesawat F-16 mempunyai mesin yang sanggup memberikan daya dorong sebesar 10^5 N. Berapakah daya yang diberikan mesin ketika pesawat mempunyai kecepatan 1.800 km/jam? Petunjuk: gunakan konsep usaha-energi kinetik.
3. Fatimah menyetrika baju menggunakan setrika listrik berdaya 250 W selama 2 jam. Berapakah energi listrik yang dihabiskan setrika tersebut? Jika biaya listrik per kWh adalah Rp 300,00, berapakah biaya listriknya?
4. Seorang siswa bermassa 60 kg berlari mendaki tangga setinggi 4 m dalam waktu 3 s. Apabila diperkirakan percepatan gravitasi adalah 10 m/s^2 , hitunglah
 - a) energi potensial murid,
 - b) daya yang digunakan siswa ketika mendaki tangga.

5. Sebuah air terjun dengan ketinggian 75 m digunakan sebagai pembangkit listrik. Turbin ditempatkan 5 meter di atas permukaan air. Hanya sekitar 40% energi air yang diubah menjadi energi listrik. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan daya keluaran listrik yang dihasilkan adalah 70 MW, berapakah debit (volume) air yang mengalir tiap menitnya?

Inti Sari

1. Usaha merupakan hasil kali gaya dengan perpindahannya, yang dirumuskan:

$$W = F \cdot s$$

$$W = Fs \cos\theta$$

2. Prinsip usaha-energi menyatakan bahwa pada benda bergerak, usaha merupakan perubahan energi kinetik benda, yang dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$W = \Delta E_k$$

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

3. Energi potensial merupakan energi yang dimiliki benda karena kedudukannya. Energi potensial gravitasi dirumuskan sebagai:

$$E_p = mgh$$

4. Energi potensial yang dimiliki pegas yang dikenai gaya F sehingga menyebabkan perubahan panjang sebesar x dirumuskan sebagai:

$$E_p = \frac{1}{2}Fx$$

dimana $F = kx$

Sehingga
$$E_p = \frac{1}{2}kx^2$$

5. Hukum Kekekalan Energi Mekanik menyatakan bahwa energi yang dimiliki suatu sistem yang terisolasi selalu konstan. Hukum Kekekalan Energi Mekanik dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$E_{M1} = E_{M2}$$

$$E_{K1} + E_{P1} = E_{K2} + E_{P2}$$

6. Daya merupakan banyaknya energi tiap satu satuan waktu, yang dirumuskan sebagai:

$$P = \frac{W}{t}$$

Telaah Istilah

Daya Besarnya usaha yang tiap satu satuan waktu

Energi Kemampuan untuk melakukan usaha

Energi kinetik Energi yang dimiliki suatu benda karena gerakannya.

Energi potensial Energi yang dimiliki benda karena interaksinya dengan benda lain

Gaya konservatif Gaya yang memindahkan benda dalam medan konservatif

Usaha Hasil kali gaya dengan perpindahan

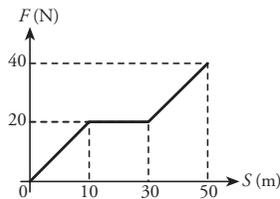
Ulangan Harian

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. Fahmi mendorong sebuah meja dengan gaya 100 N sejauh 10 m. Apabila Fahmi mendorong meja tersebut dengan sudut 30° terhadap arah vertikal, maka usaha yang dilakukan Fahmi adalah

- a. $0,5\sqrt{3}$ kJ
- b. $0,8\sqrt{3}$ kJ
- c. 0,5 kJ
- d. 0,8 kJ
- e. 1 kJ

2. Perjalanan sebuah bus dinyatakan dalam diagram berikut. Usaha yang dilakukan bus adalah



- a. 900 J
- b. 1.000 J
- c. 1.100 J
- d. 1.200 J
- e. 2.000 J

3. Seorang kuli bangunan mengangkat sekantung semen yang bermassa 50 kg dari permukaan tanah ke atas truk. Apabila tinggi bak truk 1 m dari permukaan tanah, usaha yang dilakukan oleh kuli bangunan tersebut adalah

- a. 10 J
- b. 25 J
- c. 250 J
- d. 500 J
- e. 520 J

4. Usaha yang dilakukan oleh suatu gaya terhadap mobil mainan sama dengan nol, apabila arah gaya dengan perpindahan mobil mainan membentuk sudut sebesar

- a. 0°
- b. 30°
- c. 45°
- d. 60°
- e. 90°

5. Sebuah mobil bermassa 1 ton bergerak dengan kelajuan 72 km/jam. Energi kinetik mobil tersebut adalah

- a. 200 kJ
- b. 20 kJ
- c. 10 kJ
- d. 4 kJ
- e. 2,6 kJ

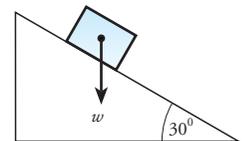
6. Sebuah sepeda bergerak dengan kelajuan v . Jika kelajuannya diubah menjadi 3 kali kelajuan semula, maka energi kinetiknya menjadi

- a. E_k
- b. $(3/2) E_k$
- c. $2 E_k$
- d. $3 E_k$
- e. $9 E_k$

7. Dua buah benda yang masing-masing bermassa 10 kg dan 5 kg memiliki energi kinetik yang sama besar. Bila benda pertama bergerak dengan kelajuan 15 m/s, maka kelajuan benda kedua adalah...

- a. 900 m/s
- b. 90 m/s
- c. 30,2 m/s
- d. 30 m/s
- e. 21,2 m/s

8. Sebuah kotak meluncur sejauh 2 m di atas bidang miring seperti pada gambar. Kotak tersebut beratnya 20 N.



Usaha yang dilakukan kotak adalah....

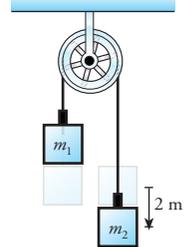
- a. 2 J
 b. 10 J
 c. 20 J
 d. $20\sqrt{3}$ J
 e. $40\sqrt{3}$ J
9. Sebuah mobil dengan massa m dari keadaan diam bergerak sehingga kelajuannya mencapai v . Apabila mesin mobil tersebut mempunyai daya sebesar $2P$, waktu yang diperlukan mobil tersebut dari keadaan diam hingga mencapai kelajuan v adalah
- a. $\frac{(mv)}{(2P)}$
 b. $\frac{(2P)}{m(v)}$
 c. $\frac{(4P)}{(mv)}$
 d. $\frac{(4P)}{(mv^2)}$
 e. $\frac{(mv^2)}{(4P)}$
10. Ronaldinho melakukan tendangan voli ketika bola berada pada ketinggian 1 m dari tanah dengan kecepatan 20 m/s. Apabila massa bola 0,5 kg, kelajuan bola pada ketinggian 5 m adalah
- a. 320 m/s
 b. 32 m/s
 c. $\sqrt{320}$ m/s
 d. $\sqrt{32}$ m/s
 e. 0 m/s
11. Benda bermassa 10 kg dilemparkan ke atas dengan kecepatan awal 5 m/s, energi potensial benda ketika berada di titik tertinggi sebesar
- a. 500 J
 b. 450 J
 c. 300 J
 d. 250 J
 e. 125 J
12. Fikri mengangkat sebuah balok kayu sejauh 20 m dengan gaya 20 N selama 40 s. Besar daya yang dilakukan Fikri adalah....
- a. 10 W
 b. 100 kW
 c. 4 kW
 d. 4 W
 e. 50 W
13. Air terjun yang ketinggiannya 50 m mengalirkan air sebanyak 100 m^3 setiap sekon. Jika seluruh energi potensial air ketika jatuh diubah menjadi energi listrik oleh generator, daya yang dihasilkan generator adalah
- a. 5×10^8 kW
 b. 5×10^7 kW
 c. 5×10^7 kW
 d. 5×10^4 W
 e. 5×10^3 W
14. Sebuah bola bowling menggelinding pada sebuah papan dengan kemiringan 37° ($\sin 37 = 0,6$). Jika papan tersebut mempunyai titik tertinggi 0,2 m dan bola digelindingkan dari titik tertinggi tersebut, maka kecepatan bola saat di titik terendah adalah....
- a. 5 m/s
 b. 4 m/s
 c. 3 m/s
 d. 2 m/s
 e. 1 m/s
15. Sebuah rudal diluncurkan vertikal ke atas. Ketika rudal tersebut mencapai ketinggian 100 m, kelajuannya 10 m/s. Kelajuan awal rudal adalah ...
- a. 2.100 m/s
 b. 1.050 m/s
 c. 1.000 m/s
 d. $10\sqrt{21}$ m/s
 e. $5\sqrt{21}$ m/s

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

1. Seorang kuli mengangkat 1 kuintal beras. Berapakah usaha yang telah dilakukan kuli apabila bergerak 20 m?
2. Sebuah gaya sebesar 50 N digunakan untuk memindahkan benda sejauh 20 m. Apabila membentuk sudut 37° terhadap bidang horizontal, hitunglah usaha yang dilakukan gaya tersebut.
3. Sebuah batu ditarik dengan gaya sebesar 50 N sehingga bergeser sejauh 5 m. Tentukan usaha yang dilakukan gaya tersebut apabila,
 - a. arah gaya searah dengan perpindahan,
 - b. arah gaya membentuk sudut 45° terhadap bidang.
4. Dua orang anak memindahkan sebuah kotak kayu dengan cara mendorongnya. Anak pertama mendorong dengan gaya $F_1 = 50$ N. Sementara anak kedua mendorongnya dengan gaya $F_2 = 70$ N. Hitunglah usaha total yang dilakukan oleh kedua anak tersebut.
5. Amir akan membidik seekor burung kutilang dengan menggunakan katapel. Dia menggunakan sebuah batu dengan massa 20 gr. Ketika karet katapel ditarik sepanjang 40 cm dan dilepaskan, batu tersebut terlontar dengan kecepatan 10 m/s. Tentukan:
 - a. energi kinetik,
 - b. konstanta pegas karet.
6. Sebuah mini truk mempunyai massa total 0,6 ton. Mobil tersebut bergerak dengan kecepatan 10 m/s. Setelah 2 sekon, kecepatannya menjadi 30 m/s. Berapakah besar gaya dan usaha yang dilakukan mesin mobil tersebut?

7. Sebuah keluarga mempunyai televisi dengan daya 25 W dan *tape recorder* 20 W yang masing-masing digunakan selama 1 jam tiap hari. Berapa energi listrik yang dipakai tiap bulan? Apabila biaya listrik per kWh Rp 500,00, berapa kas biaya yang harus dibayar selama 1 bulan tersebut ?

8. Dua buah benda dengan massa berturut-turut m_1 dan m_2 . Masing-masing diikatkan pada ujung tali melalui sebuah katrol seperti ditunjukkan pada gambar. Tentukan kecepatan balok jika balok yang lebih berat telah bergerak sejauh 2 m ke bawah ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).



9. Sebuah buah mangga bermassa 200 gr jatuh dari ketinggian 10 m. Tentukan:
 - a. energi potensial mangga ketika berada pada ketinggian 10 m,
 - b. kecepatan mangga ketika menyentuh tanah,
 - c. energi kinetik ketika menyentuh tanah,
- 10.



Seekor lumba-lumba berenang di kedalaman 2 m di bawah permukaan laut. Tiba-tiba lumba-lumba tersebut meloncat ke atas setinggi 3 m dari permukaan air laut kemudian menyelam lagi. Apabila gesekan antara lumba-lumba dengan air diabaikan Berapakah perbedaan energi potensial yang dialami lumba-lumba?

B a b IV

Momentum dan Impuls



www.indopos.co.id

Kecelakaan berupa tabrakan tentu peristiwa yang tidak kita harapkan. Beberapa peristiwa tabrakan menimbulkan korban harta dan jiwa yang tidak sedikit. Untuk itulah kewaspadaan mutlak diperlukan saat melaju di jalan. Di balik peristiwa tabrakan terdapat beberapa konsep fisika, antara lain impuls dan momentum. Ingin tahu penjelasan peristiwa tabrakan ditinjau dari sudut pandang fisika? Simaklah setiap uraian yang diberikan di dalam bab ini.

Kata Kunci

- Momentum
- Impuls
- Hukum Kekekalan Momentum
- Tumbukan
- Hukum Kekekalan Energi
- Tumbukan lenting sempurna
- Tumbukan tidak lenting

Pada bab berikut, kalian akan mempelajari konsep momentum dan impuls yang dapat digunakan untuk menjelaskan peristiwa tabrakan atau tumbukan. Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu memformulasikan konsep momentum dan impuls serta keterkaitan antara keduanya. Selanjutnya, kalian akan mampu mengaplikasikannya untuk menjelaskan kejadian sehari-hari. Kemampuan yang harus dimiliki lainnya adalah kemampuan untuk merumuskan Hukum Kekekalan Momentum untuk sistem tanpa gaya luar. Terakhir, kalian diharapkan mampu menggabungkan hukum kekekalan energi dengan Hukum Kekekalan Momentum untuk menganalisis pelbagai peristiwa tumbukan.

A Momentum dan Impuls

Konsep momentum dan impuls dapat digunakan untuk menjelaskan beberapa peristiwa yang kita temui dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya melambungkan bola ketika ditendang, tabrakan dua mobil, benturan bola yang memantul di lantai atau tembok, bahkan peristiwa peluncuran roket. Untuk lebih memahami konsep momentum dan impuls, coba kalian diskusikan beberapa jawaban dari pertanyaan pada *Eureka* berikut.

Eureka

Berdiskusilah dengan teman sebangku kalian untuk menjawab beberapa pertanyaan berikut. Agar jawaban lebih mantap, kalian dapat melakukan percobaannya terlebih dahulu.

1. Lemparkan sebuah bola kasti ke arah tembok dengan lemparan yang tidak terlalu kuat. Lakukan lagi dengan gaya yang semakin besar dari jarak yang sama. Bagaimanakah perbandingan jarak yang ditempuh bola setelah memantul?
2. Ketika dua bola bilyard yang bemassa sama bergerak dengan kelajuan sama bertabrakan tepat di tengah, bagaimanakah gerak kedua bola setelah tabrakan? Bagaimana pula jika massa salah satu bola jauh lebih besar dari massa bola satunya?

Bandingkan hasil diskusi kalian dengan hasil diskusi teman yang lain.

1. Momentum

Perhatikan kembali hasil diskusi kalian pada *Eureka* di atas. Ketika melemparkan bola karet dengan massa tertentu ke arah tembok, berarti kalian memberikan kecepatan pada bola. Sementara tembok dalam keadaan diam. Pada saat itu dapat dikatakan bahwa bola mempunyai momentum sedangkan tembok tidak memiliki momentum.

Untuk kasus bola bilyard kedua bola bergerak dengan kecepatan tertentu. Dalam keadaan ini, setiap bola bilyard memiliki momentum. Jika dua bola bilyard dengan massa sama bergerak dengan kecepatan sama

(besar dan arah diperhatikan), maka momentum keduanya juga sama. Sementara, jika massa salah satu bola lebih besar dari massa satunya dan keduanya bergerak dengan kecepatan yang sama, maka bola dengan massa lebih besar mempunyai momentum yang lebih besar. Sementara jika salah satu dari dua bola bermassa sama bergerak dengan kecepatan lebih besar dari kecepatan bola satunya, maka momentumnya juga lebih besar.

Dari penjelasan tersebut, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa momentum berbanding lurus dengan kecepatannya. Lebih khusus lagi, **momentum diartikan sebagai hasil kali antara massa benda dengan kecepatannya**. Atau dapat dituliskan:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Keterangan:

\vec{p} = momentum (kg m/s)

m = massa (kg)

\vec{v} = kecepatan (m/s)

Perhatikan persamaan momentum tersebut. Kalian telah mengetahui bahwa kecepatan merupakan besaran vektor, sementara massa merupakan besaran skalar. Hasil kali besaran vektor dengan besaran skalar menghasilkan besaran vektor. Dengan demikian, momentum termasuk besaran vektor yang mempunyai besar dan arah. Arah momentum searah dengan kecepatan benda.

2. Impuls dan Perubahan Momentum

Momentum yang dimiliki benda selalu sama setiap saat apabila kecepatannya tetap. Namun, jika kecepatannya berubah, momentumnya juga berubah. Sebagai contoh, bola bilyard A semula bergerak dengan kecepatan \vec{v}_1 . Beberapa saat kemudian bola A menumbuk bola B. Akibatnya, kecepatan bola A berubah menjadi \vec{v}_2 dan bola B yang semula diam akan bergerak dengan kecepatan \vec{v} . Karena kecepatannya berubah, maka bola A dan bola B dikatakan mengalami **perubahan momentum**.

Besarnya perubahan momentum dapat dicari dengan persamaan:

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}_{\text{akhir}} - \vec{p}_{\text{awal}}$$

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$$

$$= m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$$

$$\Delta\vec{p} = m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

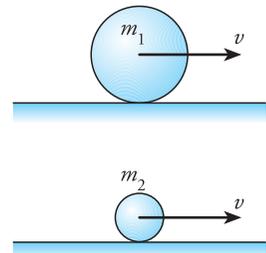
Keterangan:

$\Delta\vec{p}$ = perubahan momentum (kgm/s)

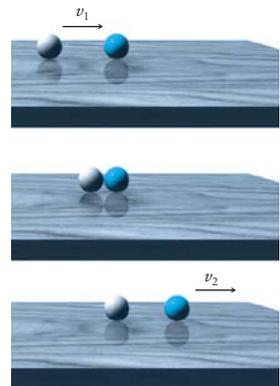
m = massa benda (kg)

\vec{v}_2 = kecepatan akhir (m/s)

\vec{v}_1 = kecepatan awal (m/s)



Gambar 4.1 Bola dengan massa lebih besar yang bergerak dengan kecepatan sama dengan bola yang bermassa lebih kecil, mempunyai momentum lebih besar.



Gambar 4.2 Perubahan momentum terjadi pada benda yang mengalami perubahan kecepatan.

Dengan mensubstitusikan persamaan percepatan dan Hukum II Newton, pada persamaan tersebut, kita mendapatkan persamaan:

$$\vec{F} = \frac{m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\Delta t} \quad \text{atau,} \quad \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Untuk Δt yang sangat kecil ($\Delta t \propto 0$) persamaan tersebut dapat dituliskan dengan:

$$\vec{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Dari persamaan tersebut, dapat disimpulkan bahwa gaya merupakan turunan atau diferensial dari momentum terhadap waktu. Gaya semacam ini dinamakan dengan **gaya impulsif**.

Persamaan $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ dapat kita tuliskan dalam bentuk:

$$\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}$$

Faktor di ruas kiri pada persamaan tersebut merupakan **impuls (I)**. Jadi: **Impuls adalah hasil kali gaya yang bekerja pada benda dengan selang waktu yang sangat pendek.**

Berdasarkan definisi tersebut, impuls dapat dicari dengan persamaan:

$$I = \vec{F} \Delta t$$

$$I = \Delta \vec{p}$$

Keterangan:

I = impuls (N s)

F = gaya (N)

Δt = selang waktu (s)

Dari persamaan tersebut, kalian mengetahui bahwa impuls tidak lain adalah perubahan momentum ($\Delta \vec{p}$). Persamaan tersebut dapat dinamakan dengan **teorema impuls-momentum**.

Teorema Impuls-momentum berbunyi perubahan momentum partikel/benda selama selang waktu tertentu sama dengan resultan gaya yang bekerja selama interval waktu tersebut.

Satuan impuls dalam sistem SI adalah N s atau kg m/s.

Penerapan persamaan-persamaan tersebut dapat kalian simak pada contoh soal berikut.

Teropong

Di semester 1, kalian telah mengetahui bahwa perubahan kecepatan dalam selang waktu tertentu (Δt) disebut percepatan, yang dirumuskan,

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

Besarnya percepatan ini berkaitan erat dengan resultan gaya yang dikenal sebagai Hukum II Newton, yang dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\Sigma F = ma$$

Contoh

1. Sebuah bola ditendang dengan gaya sebesar 48 N dalam waktu 0,8 sekon. Berapakah besar impuls pada saat kaki menyentuh bola?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$F = 48 \text{ N}$$

$$\Delta t = 0,8 \text{ s}$$

Ditanyakan: I

Jawab:

Untuk mencari besar impuls, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned} I &= F \Delta t \\ &= 48 \times 0,8 \\ &= 38,4 \text{ N s} \end{aligned}$$

Jadi, saat kaki menyentuh bola terjadi impuls sebesar 38,4 N s.

2. Sebuah bola ditendang dengan keras oleh seorang penyerang dengan kecepatan 25 m/s ke arah gawang lawan. Dengan cekatan penjaga gawang menepisnya, sehingga bola memantul kembali dengan kecepatan 30 m/s. Apabila massa bola 0,8 kg dan bola menyentuh tangan selama 0,002 s, tentukan:
 - a. Besar impuls saat tangan menyentuh bola,
 - b. gaya tangan saat menepis bola.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$\vec{v}_1 = 25 \text{ m/s}$$

$$\vec{v}_2 = -30 \text{ m/s (tanda - menunjukkan } \vec{v}_2 \text{ berlawanan dengan } \vec{v}_1)$$

$$m = 0,8 \text{ kg}$$

$$\Delta t = 0,002 \text{ s}$$

Ditanyakan:

a. I

b. F

Jawab:

- a. Impuls (I) di cari dengan rumus:

$$\begin{aligned} I &= \Delta p \\ &= m (v_2 - v_1) \\ &= 0,8 (-30 - 25) \\ &= -44 \text{ kg m/s} \end{aligned}$$

Jadi, besar impuls saat tangan menyentuh bola adalah 44 kg m/s.

- b. Gaya tangan saat menepis bola dicari dengan rumus:

$$\begin{aligned} I &= F \Delta t \\ F &= \frac{I}{\Delta t} \\ &= \frac{-44}{0,02} \\ &= -2.200 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, besar gaya tangan saat menepis bola adalah 2.200 N yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan bola mula-mula.

Setelah kalian mempelajari contoh soal, terapkanlah dalam Uji Kompetensi berikut.

Uji Kompetensi

1. Truk bermassa 4 ton melintas di jalan dengan kecepatan 54 km/jam. Berapakah momentum truk tersebut?
2. Sebuah bola bilyard dengan massa 0,2 kg didorong dengan tongkat sehingga menghasilkan kecepatan 6 m/s. Dorongan tongkat tersebut membuat bola biliar membentur bola lainnya yang diam sehingga kecepatannya menjadi 2 m/s. Hitunglah perubahan momentum bola tersebut.

3. Sebuah bola golf dipukul dengan gaya 250 N. Apabila tongkat golf menyentuh bola selama 0,005 s, hitunglah impuls dari bola tersebut.
4. Sebuah truk yang berjalan dengan kecepatan 15 m/s bertabrakan dengan mobil yang bergerak dari arah yang berlawanan dengan kecepatan 30 m/s. Massa truk dan mobil masing-masing adalah 6.000 kg dan 1.500 kg. Tentukan:
 - a. momentum truk sebelum tabrakan,
 - b. momentum mobil sebelum tabrakan,
 - c. momentum total dari mobil dan truk.

B Hukum Kekekalan Momentum

Untuk memahami Hukum Kekekalan Momentum, kita ambil contoh sebuah mobil truk yang bergerak dengan kelajuan tinggi. Mobil ini tentunya mempunyai momentum yang besar. Ketika menabrak mobil lain, misalnya sedan, yang diam, kecepatan truk akan berkurang, sedangkan sedan akan bergerak. Ini berarti momentum mobil truk berkurang dan momentum mobil sedan bertambah. Ini disebabkan karena truk memberikan momentumnya pada mobil sedan. Dengan kata lain, momentum truk tidak hilang melainkan diberikan kepada sedan. Inilah salah satu contoh yang menunjukkan Hukum Kekekalan Momentum.

Kita ambil contoh dua benda dengan massa m_1 dan m_2 yang masing-masing bergerak dengan kecepatan \vec{v}_1 dan \vec{v}_2 . Ketika bertumbukan, kedua benda akan memberikan gaya pada benda satunya yang sama besar tetapi berlawanan arah. Hal ini sesuai dengan Hukum III Newton yang menyatakan,

$$\vec{F}_{\text{aksi}} = -\vec{F}_{\text{reaksi}}$$

Jika benda 1 yang memberikan gaya aksi (F_{aksi}), maka benda 2 melakukan reaksi. Dari pengertian impuls sebagai perubahan momentum, kita mendapatkan,

$$\vec{F}_{\text{aksi}} \Delta t = m_1 \vec{v}_1' - m_1 \vec{v}_1$$

$$\vec{F}_{\text{reaksi}} \Delta t = m_2 \vec{v}_2' - m_2 \vec{v}_2$$

Jika kedua persamaan ini dijumlahkan, kita mendapatkan persamaan,

$$(\vec{F}_{\text{aksi}} + \vec{F}_{\text{reaksi}}) \Delta t = (m_1 \vec{v}_1' - m_1 \vec{v}_1) + (m_2 \vec{v}_2' - m_2 \vec{v}_2)$$

Karena $\vec{F}_{\text{aksi}} = -\vec{F}_{\text{reaksi}}$, maka

$$0 = (m_1 \vec{v}_1' - m_1 \vec{v}_1) + (m_2 \vec{v}_2' - m_2 \vec{v}_2)$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2'$$

Persamaan terakhir menunjukkan bahwa jumlah momentum sebelum dan sesudah tumbukan adalah sama. Ini merupakan bunyi **Hukum Kekekalan Momentum** untuk tumbukan.

Hukum momentum menyatakan bahwa jumlah momentum pada suatu sistem sebelum dan sesudah tumbukan yang tidak dipengaruhi oleh gaya dari luar adalah tetap.

Hukum ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2'$$

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2'$$

Keterangan:

m_1 = massa benda pertama (kg)

m_2 = massa benda kedua (kg)

\vec{v}_1 = kecepatan benda pertama sebelum tumbukan (m/s)

\vec{v}_2 = kecepatan benda kedua sebelum tumbukan (m/s)

\vec{v}_1' = kecepatan benda pertama setelah tumbukan (m/s)

\vec{v}_2' = kecepatan benda kedua setelah tumbukan (m/s)

Coba perhatikan persamaan Hukum Kekalan Momentum di atas. Pada persamaan tersebut, benda 1 dan benda 2 dapat dianggap sebagai suatu sistem. Momentum total pada sistem tersebut adalah jumlah momentum dari penyusun sistem tersebut. Jika sistem tersusun atas n benda, maka:

$$\vec{p}_{sistem} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots + \vec{p}_n$$

Dari bekal kalian pada bab sebelumnya, gaya luar pada sebuah sistem benda dapat menyebabkan perubahan kecepatan. Jadi, jika tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem, maka sistem tidak mengalami perubahan kecepatan. Ini berarti sistem tidak mempunyai perubahan momentum. Dengan kata lain, momentum sistem adalah konstan. Kenyataan ini dirumuskan dalam **Hukum Kekalan Momentum Linear**.

Hukum Kekalan Momentum Linear menyatakan bahwa apabila resultan gaya luar yang bekerja pada sistem benda sama dengan nol, maka momentum total sistem benda tersebut adalah konstan.

Contoh sederhana penerapan Hukum Momentum Linear adalah peluru yang ditembakkan dari senapan. Dalam hal ini, peluru, senapan, dan orang yang memegang senapan dapat dianggap sebagai suatu sistem. Peluru dapat melesat dari senapan disebabkan gaya internal sistem, bukan gaya dari luar sistem. Sebelum peluru melesat, momentum total sistem dapat dianggap nol, karena senapan, peluru, dan orang tidak mempunyai kecepatan. Ketika peluru melesat dengan kecepatan tertentu, ia mempunyai momentum. Karena momentum semula sama dengan nol maka harus ada momentum lain yang melawan momentum peluru. Momentum ini dimiliki oleh senapan dan orang yang bergerak mundur ketika peluru melesat ke depan. Inilah sebabnya ketika seorang serdadu menembak dengan senapan, dia akan tersentak ke belakang.



www.redbrush.org

Gambar 4.3 Ketika peluru melesat meninggalkan senapan, orang dan senapan akan terdorong ke belakang.

Peristiwa peluru dan senapan dapat dijelaskan dalam bentuk persamaan berikut.

$$\vec{p} = \vec{p}'$$

$$(m_{\text{sen}} + m_o + m_p)\vec{v} = m_{\text{sen}}\vec{v}'_{\text{sen}} + m_o\vec{v}'_o + m_p\vec{v}'_p$$

$$0 = m_{\text{sen}}\vec{v}'_{\text{sen}} + m_o\vec{v}'_o + m_p\vec{v}'_p$$

$$m_{\text{sen}}\vec{v}'_{\text{sen}} + m_o\vec{v}'_o = -m_p\vec{v}'_p$$

Karena, $\vec{v}_{\text{sen}} = \vec{v}_0$, maka

$$(m_{\text{sen}} + m_o)\vec{v}'_o = -m_p\vec{v}'_p$$

Dari persamaan tersebut, tampak jelas bahwa senapan dan orang yang memegang juga memperoleh kecepatan yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan peluru.

Sebenarnya masih banyak peristiwa lain yang dapat dijelaskan dengan Hukum Kekekalan Momentum Linear. Untuk menambah wawasan kalian, coba kerjakan *Eureka* berikut.

Eureka

Hukum Kekekalan Momentum dapat digunakan untuk menjelaskan beberapa peristiwa sehari-hari. Terapkanlah Hukum Kekekalan Momentum yang telah kalian pelajari untuk menjelaskan beberapa peristiwa berikut.

1. Beberapa buah bola dengan massa berbeda dan terbuat dari bahan yang sama dijatuhkan dari ketinggian yang sama. Bola manakah yang akan memantul paling tinggi? Coba jelaskan dengan Hukum Kekekalan Momentum.
2. Pada peristiwa ledakan bom, daerah yang mengalami kerusakan biasanya berada pada radius tertentu. Ini berarti partikel bom menyebar ke segala arah. Bagaimanakah penjelasan atas peristiwa ini?
3. Roket membutuhkan gaya pendorong yang sangat besar agar dapat meluncur. Gaya pendorong ini didapatkan dari gas yang disemurkan. Jelaskan cara kerja gas pendorong roket ditinjau dari Hukum Kekekalan Momentum.

Lakukan diskusi untuk menjelaskan beberapa peristiwa tersebut ditinjau dari konsep Hukum Kekekalan Momentum. Setelah itu, tuliskan hasilnya dan presentasikan di depan kelas.

Dengan mengerjakan *Eureka* tersebut, kalian telah mengetahui beberapa penerapan Hukum Kekekalan Momentum. Supaya kalian lebih mendalami penggunaan Hukum Kekekalan Momentum, perhatikan contoh soal berikut.

Contoh

1. Bola A dan B dengan massa masing-masing 300 gram dan 400 gram bergerak dengan arah berlawanan pada satu garis lurus. Bola A bergerak dengan kecepatan 4 m/s dan bola B bergerak dengan kecepatan 6 m/s. Ketika terjadi tumbukan, kecepatan bola B menjadi 3 m/s berlawanan dengan arah semula. Hitunglah kecepatan bola A setelah tumbukan. Apakah yang terjadi dengan bola A?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m_A = 300 \text{ g} = 0,3 \text{ kg}$$

$$m_B = 400 \text{ g} = 0,4 \text{ kg}$$

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

$$v_B = -6 \text{ m/s (berlawanan dengan arah } v_A)$$

$$v_B' = 3 \text{ m/s (searah dengan } v_A)$$

Ditanyakan: v_A'

Jawab:

Untuk mencari v_A' gunakan persamaan:

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B'$$

$$(0,3 \times 4) + (0,4 \times (-6)) = 0,3 v_A' + (0,4 \times 3)$$

$$1,2 - 2,4 = 0,3 v_A' + 1,2$$

$$v_A' = -\frac{2,4}{0,3}$$

$$= -8 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan bola A adalah 8 m/s berlawanan dengan arah semula (bola A memantul kembali).

2. Afif yang bermassa 30 kg berada di dalam perahu bermassa 120 kg yang bergerak dengan kecepatan 6 m/s. Tiba-tiba Afif melompat ke dalam air dari bagian belakang perahu dengan kecepatan mendarat 2 m/s berlawanan dengan arah perahu. Hitung kecepatan perahu sesaat setelah Afif melompat.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m_A = 30 \text{ kg}$$

$$m_p = 120 \text{ kg}$$

$$v_A = v_p = 6 \text{ m/s (Afif di atas perahu)}$$

$$v_A' = -2 \text{ m/s (berlawanan dengan arah gerak semula)}$$

Ditanyakan: v_p'

Jawab:

Untuk mencari kecepatan perahu, gunakan Hukum Kekekalan Momentum berikut:

$$m_A v_A + m_p v_p = m_A v_A' + m_B v_p'$$

$$(30 \times 6) + (120 \times 6) = (30 \times (-2)) + 120 v_p'$$

$$180 + 720 = -60 + 120 v_p'$$

$$v_p' = \frac{960}{120}$$

$$= 7,5 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan perahu saat Afif melompat adalah 7,5 m/s.

Nah, untuk menguji pemahaman kalian, selesaikan soal-soal pada *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Dua buah benda A dan B masing-masing mempunyai massa 3 kg dan 7 kg, bergerak berlawanan di atas lantai. Kecepatan masing-masing adalah 6 m/s dan 1 m/s. Suatu saat saling bertumbukkan sehingga menyebabkan kecepatan B menjadi 6 m/s, berlawanan dengan arah gerak semula. Hitunglah kecepatan A setelah menumbuk B.
2. Bola kasti dengan massa 200 g dipukul dengan gaya 200 N. Lama pemukul menempel pada bola 0,4 s. Hitung kecepatan bola saat lepas dari pemukul.

- Seorang tentara bermassa 70 kg menembakkan peluru dari sebuah senapan bermassa 3 kg. Jika massa peluru 6 g dan melesat dengan kecepatan 2 m/s, dengan kecepatan berapakah senapan dan orang terdorong ke belakang saat peluru ditembakkan?

C Tumbukan



www.wikimedia.org

Gambar 4.4 Contoh peristiwa tumbukan.

Kalian telah mempelajari momentum dan impuls, termasuk hukum Kekekalan Momentum yang berlaku pada suatu benda. Momentum dan impuls banyak kita temui dalam kehidupan sehari-hari kita. Nah, salah satu peristiwa yang berkaitan erat dengan momentum adalah tumbukan. Dua kendaraan yang bertabrakan, bola golf yang dipukul, atau bola basket yang dipantulkan ke tanah semuanya mengalami tumbukan.

1. Hukum Kekekalan Momentum pada Tumbukan

Di depan, kita telah mempelajari Hukum Kekekalan Momentum untuk menjelaskan peristiwa tumbukan dua buah benda. Dari penjelasan sebelumnya, jika terjadi tumbukan dua buah benda, maka momentum total sebelum tumbukan sama dengan momentum total sesudah tumbukan. Jadi, dalam peristiwa tumbukan berlaku persamaan:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2'$$

2. Hukum Kekalan Energi Mekanik pada Tumbukan

Selain Hukum Kekekalan Momentum, beberapa peristiwa tumbukan dapat dijelaskan dengan Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Di bab sebelumnya, kalian telah mempelajari Hukum Kekekalan Energi Mekanik.

Pada peristiwa tumbukan, Hukum Kekekalan Energi Mekanik dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_{M1} + E_{M2} &= E_{M1}' + E_{M2}' \\ (E_{K1} + E_{P1}) + (E_{K2} + E_{P2}) &= (E_{K1}' + E_{P1}') + (E_{K2}' + E_{P2}') \\ E_{K1} + E_{K2} + E_{P1} + E_{P2} &= E_{K1}' + E_{K2}' + E_{P1}' + E_{P2}' \end{aligned}$$

Keterangan:

m = massa benda (kg)

g = percepatan gravitasi bumi ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$ atau 10 m/s^2)

\vec{v} = kecepatan benda sebelum tumbukan (m/s)

\vec{v}' = kecepatan benda sesudah tumbukan (m/s)

h = ketinggian benda sebelum tumbukan (m)

h' = ketinggian benda sesudah tumbukan (m)

T eropong

Di bab Usaha dan Energi, kalian telah memperoleh persamaan energi kinetik (E_k) dan energi potensial (E_p) sebagai berikut.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_p = mgh$$

Untuk pegas,

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

3. Jenis Tumbukan

Hukum Kekekalan Momentum berlaku pada semua jenis tumbukan. Sedangkan Hukum Kekekalan Energi Mekanik hanya berlaku pada jenis tumbukan tertentu saja. Untuk mengetahui jenis-jenis tumbukan, kerjakan *Eureka* berikut.

Eureka

Lakukan kegiatan ini bersama teman di samping kalian. Kemudian berdiskusilah untuk menganalisis fenomena yang teramati dengan menggunakan Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Energi Mekanik.

1. Gelindingkan dua buah bola bermassa sama secara berhadapan pada garis lurus. Usahakan kecepatan kedua bola sama. Ketika bertabrakan, bagaimanakah gerak kedua bola tersebut setelah tabrakan?
2. Jatuhkan sebuah bola karet dari ketinggian tertentu. Kemudian amatilah ketinggian maksimal yang dicapai bola setelah memantul.
3. Lemparkan sebuah bola kepada temanmu. Mintalah teman kalian untuk menangkap bola tersebut. Lakukan lemparan beberapa kali dengan kecepatan yang berbeda. Amati gerak tubuh teman kalian saat menangkap bola.

Bandingkan hasil diskusi kalian dengan hasil diskusi teman kalian

Berdasarkan kegiatan sederhana pada *Eureka* tersebut, kalian telah mengenal beberapa jenis tumbukan. Jenis-jenis tumbukan ini didasarkan pada kelakuan benda setelah tumbukan. Secara garis besar, tumbukan dibedakan menjadi tiga macam, yaitu **tumbukan elastis sempurna (lenting sempurna)**, **tumbukan elastis sebagian (lenting sebagian)**, dan **tumbukan tidak elastis (tidak lenting)**. Mari kita bahas ketiga jenis tumbukan tersebut.

a. Tumbukan Elastis Sempurna

Coba kalian ingat kembali kegiatan nomor 1 pada *Eureka* sebelumnya. Ketika dua bola bermassa sama yang bergerak dengan kelajuan sama bertabrakan, keduanya akan berbalik ke arah datangnya. Jika lantai cukup licin, hingga tidak ada gaya gesek antara bola dengan lantai, keduanya akan berbalik dengan kelajuan yang sama dengan kelajuan semula. Ini merupakan salah satu contoh tumbukan elastis sempurna atau tumbukan lenting sempurna.

Dalam kehidupan sehari-hari, memang sangat sulit menemukan tumbukan lenting sempurna. Akan tetapi ilustrasi bola tersebut dapat dianggap sebagai tumbukan lenting sempurna. Namun dalam skala mikro, tumbukan jenis ini dapat terjadi antarpartikel atau antaratom dalam suatu unsur atau molekul.

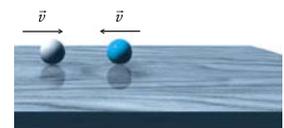
Mozaik

Ini adalah kawah Barringer yang terdapat di dekat Winslow, Arizona, Amerika Serikat. Kawah ini terbentuk akibat benturan meteor pada bumi. Hasilnya berupa cekungan dengan diameter kira-kira 1.200 meter (4.000 kaki) dengan kedalaman 50 meter (160 kaki).

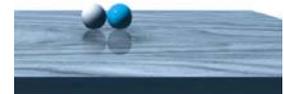
Lafferty, Peter, 2006



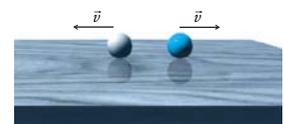
craters.gsfc.nasa.gov



(a) sebelum tumbukan



(b) ketika tumbukan



(c) setelah tumbukan

Gambar 4.5 Contoh dua benda yang mengalami tumbukan lenting sempurna.

Pada tumbukan lenting sempurna berlaku Hukum Kekekalan Momentum, sesuai dengan persamaan,

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2'$$

atau,

$$m_1 (\vec{v}_1 - \vec{v}_1') = m_2 (\vec{v}_2' - \vec{v}_2)$$

Pada tumbukan lenting sempurna, kelajuan benda sebelum dan sesudah tumbukan sama besar. Ini berarti energi kinetiknya juga sama. Jadi, pada tumbukan lenting sempurna berlaku Hukum Kekekalan Energi Kinetik.

$$E_{K1} + E_{K2} = E_{K1}' + E_{K2}'$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 (v_1')^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_2')^2$$

$$m_1 (v_1^2 - v_1'^2) = m_2 (v_2'^2 - v_2^2)$$

$$m_1 (v_1 + v_1')(v_1 - v_1') = m_2 (v_2 + v_2')(v_2 - v_2')$$

Jika persamaan ini kita bagikan dengan persamaan $m_1 (v_1 - v_1') = m_2 (v_2' - v_2)$ didapatkan:

$$(v_1 + v_1') = (v_2' + v_2)$$

$$(v_1 - v_2) = -(v_1' - v_2')$$

Dari persamaan terakhir ini, kita mendapatkan *koefisien restitusi* yang dinyatakan dengan persamaan:

$$e = -\frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2}$$

Keterangan:

e = koefisien restitusi

v_1 dan v_2 = kelajuan benda sebelum tumbukan (m/s)

v_1' dan v_2' = kelajuan benda setelah tumbukan (m/s)

Karena pada tumbukan lenting sempurna berlaku $(v_1 - v_2) = -(v_1' - v_2')$, maka koefisien restitusinya sama dengan 1 ($e = 1$).

Supaya kalian lebih mudah dalam memahami tumbukan lenting sempurna, pelajilah contoh berikut.

Teropong

Pada pelajaran matematika, kalian telah mempelajari persamaan berikut.

$$(a^2 - b^2) = (a + b)(a - b)$$

Contoh

Sebuah bola karet dengan massa 100 g bergerak dengan kecepatan 6 m/s ke timur. Bola lain dengan massa 300 g bergerak dengan kecepatan 2 m/s ke arah barat dalam satu garis lurus dengan arah bola A. Keduanya kemudian bertabrakan. Jika tabrakan dianggap sebagai tumbukan lenting sempurna, buktikan bahwa setelah tumbukan kedua bola akan bergerak dengan kelajuan yang sama dengan kelajuan semula, tetapi berlawanan arah.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m_A = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$$

$$m_B = 300 \text{ g} = 0,3 \text{ kg}$$

$$\vec{v}_A = 6 \text{ m/s}$$

$$\vec{v}_B = -2 \text{ m/s (berlawanan arah dengan A)}$$

Ditanyakan:

bukti bahwa $\vec{v}_A' = -\vec{v}_A$ dan $\vec{v}_B' = -\vec{v}_B$

Jawab:

Untuk mencari v_A' dan v_B' , kita dapat menggunakan Hukum Kekekalan Momentum

$$m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B = m_A \vec{v}_A' + m_B \vec{v}_B'$$

$$(0,1 \times 6) + (0,3 \times (-2)) = 0,1 \vec{v}_A' + 0,3 \vec{v}_B'$$

$$0 = 0,1 \vec{v}_A' + 0,3 \vec{v}_B'$$

$$\vec{v}_A' = -3 \vec{v}_B' \quad \dots (1)$$

Koefisien restitusi untuk tumbukan lenting sempurna,

$$1 = -\frac{v_A' - v_B'}{v_A - v_B}$$

$$v_A' - v_B' = -(v_A - v_B)$$

$$v_A' - v_B' = -(6 - (-2))$$

$$v_A' = v_B' - 8 \quad \dots (2)$$

Jika persamaan (1) disubstitusikan ke persamaan (2) didapatkan:

$$-3v_B' = v_B' - 8$$

$$-4v_B' = -8$$

$$v_B' = 2 \text{ m/s}$$

Dengan demikian,

$$v_A' = v_B' - 8$$

$$= 2 - 8$$

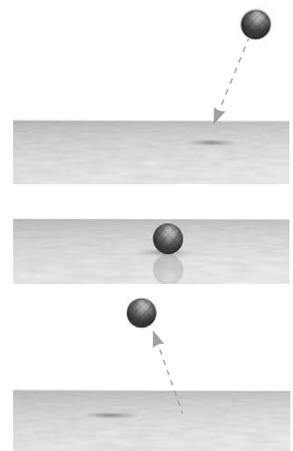
$$= -6 \text{ m/s}$$

Jadi, terbukti bahwa kedua bola bergerak dengan kelajuan yang sama tetapi berlawanan arah dengan arah semula.

b. Tumbukan Elastis Sebagian

Ketika kalian menjatuhkan sebuah bola karet dari ketinggian tertentu di atas lantai, seperti yang kalian lakukan pada *Eureka* di depan, bola akan memantul. Setelah mencapai titik tertinggi, bola akan jatuh lagi dan memantul lagi setelah mengenai lantai. Begitu seterusnya hingga bola akhirnya diam. Hal menarik yang perlu kita perhatikan adalah ketinggian maksimal yang dicapai pada setiap tahap pantulan selalu berbeda. Pada pantulan pertama, bola mencapai titik tertinggi yang lebih rendah dari tinggi semula. Pada pantulan kedua, tinggi maksimal yang dicapai bola lebih rendah dari pantulan pertama, begitu seterusnya.

Kenyataan tersebut memberikan arti bahwa kecepatan bola sebelum menumbuk lantai lebih besar dari kecepatan bola setelah tumbukan. Dengan begitu, koefisien restitusi pada kejadian ini berkisar antara nol sampai satu ($0 < e < 1$). Tumbukan seperti ini disebut **tumbukan lenting sebagian** atau **tumbukan elastis sebagian**.



Gambar 4.6 Skema bola yang jatuh ke lantai.

Pada peristiwa pemantulan bola pada lantai, energi kinetik yang dimiliki bola tidak tetap. Ini dapat dilihat dari kecepatan bola yang berubah sebelum dan sesudah tumbukan. Jadi, Hukum Kekekalan Energi Kinetik pada tumbukan lenting sebagian tidak berlaku. Akan tetapi, Hukum Kekekalan Energi Mekanik tetap berlaku. Ini karena sebagian energi kinetik yang hilang telah diubah menjadi bentuk energi lainnya, seperti energi potensial, energi panas, atau energi yang merusak lantai.

Untuk lebih mengenal peristiwa tumbukan lenting sebagian pada benda yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu, coba kalian lakukan *Eksperimen* berikut.

Eksperimen

Menentukan Koefisien Restitusi pada Benda Jatuh Bebas

A. Dasar Teori

Koefisien restitusi merupakan suatu konstanta yang menyertai dua benda ketika mengalami tumbukan. Koefisien restitusi dalam peristiwa tumbukan menunjukkan jenis tumbukan dua benda. Tumbukan itu dapat berupa tumbukan lenting sempurna dengan koefisien restitusi sama dengan satu ($e = 1$), tumbukan lenting sebagian dengan koefisien restitusi lebih kecil dari satu dan lebih besar nol ($0 < e < 1$), dan tumbukan tidak lenting sama sekali dengan koefisien restitusi sama dengan nol ($e = 0$).

Besar koefisien restitusi suatu benda sangat bergantung pada kecepatan dua benda sebelum dan sesudah tumbukan. Untuk benda jatuh bebas, koefisien restitusi tergantung pada ketinggian benda ketika dijatuhkan. Ini disebabkan karena kecepatan benda yang jatuh bebas sangat ditentukan oleh ketinggian benda dan percepatan gravitasi bumi.

B. Tujuan Percobaan

Setelah melakukan eksperimen ini, kalian diharapkan mampu:

1. menemukan hubungan antara tinggi awal dengan tinggi pantulan,
2. menghitung koefisien restitusi bola yang jatuh bebas.

C. Alat dan Bahan

1. bola tenis
2. bola pingpong
3. meteran

D. Langkah Kerja

1. Jatuhkan bola tenis dari ketinggian h . Jangan lupa untuk mengukur ketinggiannya.
2. Ukurlah ketinggian maksimum yang dicapai saat pemantulan pertama (h').
3. Ukurlah ketinggian maksimum yang dicapai untuk pantulan kedua, ketiga, keempat, dan seterusnya.
4. Masukkan hasil pengamatan kalian pada tabel berikut.

No.	h	h'	\sqrt{h}	$\sqrt{h'}$
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				

5. Ulangi langkah 1 – 4 untuk ketinggian yang berbeda.
6. Ulangi kembali langkah 1 – 5 menggunakan bola pingpong.

E. Pembahasan

Setelah kalian melakukan langkah-langkah di atas, selanjutnya selesaikan tugas berikut.

1. Buatlah grafik akar tinggi bola sebelum dijatuhkan (\sqrt{h}) dengan akar tinggi bola pantulan ($\sqrt{h'}$). Berapakah gradien garis pada grafik tersebut.
2. Bandingkanlah gradien garis yang terbentuk antara akar tinggi bola sebelum dijatuhkan (\sqrt{h}) dengan akar tinggi bola pantulan ($\sqrt{h'}$) untuk bola tenis dengan bola pingpong.
3. Apakah kesimpulan kalian setelah melakukan eksperimen ini?

Buatlah laporan hasil eksperimen kalian dengan aturan penulisan yang baik dan benar. Kemudian, kumpulkan hasilnya pada bapak/ibu guru.

Dari hasil pengamatan tampak bahwa bola yang dijatuhkan (tanpa kecepatan awal) dari ketinggian tertentu akan memantul. Akan tetapi, tinggi pantulan tidak akan sama dengan tinggi semula. Pada pemantulan selanjutnya, tinggi yang dicapai lebih rendah dari tinggi pantulan sebelumnya.

Walaupun saat bola dijatuhkan tidak mempunyai kecepatan, namun pada saat menumbuk lantai bola telah mempunyai kecepatan. Kecepatan bola didapatkan dari perubahan energi potensial menjadi energi kinetik. Seperti yang telah kalian ketahui bahwa suatu benda yang berada pada ketinggian tertentu mempunyai energi potensial. Pada posisi ini, energi kinetik bola sama dengan nol, karena bola tidak mempunyai kecepatan. Energi potensial ini akan diubah seluruhnya menjadi energi kinetik pada saat bola menumbuk lantai. Di sini, energi potensialnya sama dengan nol. Jadi, ketika bola bergerak turun dari kedudukan semula sampai ke lantai berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik.

$$E_{P_{awal}} + E_{K_{awal}} = E_{P_{akhir}} + E_{K_{akhir}}$$

$$mgh + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

Keterangan:

v = kelajuan benda (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

h = ketinggian benda (m)

Kelajuan pada persamaan tersebut adalah kelajuan yang dimiliki bola pada saat menumbuk lantai. Untuk mencari kelajuan bola setelah menumbuk lantai (kelajuan pantulan bola), kita dapat menggunakan persamaan koefisien restitusi sebagai berikut.



Pele merupakan pemain bola yang hebat. Legenda Brazil ini mampu menghentikan bola yang melesat cepat ke tubuhnya dengan cara mengendurkan bagian tubuhnya yang digunakan untuk menghentikan bola. Dengan begitu, bola tidak akan memantul dan dapat dihentikan. Seandainya, ini tidak dilakukan, niscaya bola akan memantul kembali dengan kecepatan hampir sama dengan kecepatan semula.

dari pelbagai sumber

T eropong

Di kelas X, kalian telah membahas gerak jatuh bebas. Benda yang jatuh bebas dari ketinggian tertentu akan mempunyai kecepatan yang dapat dihitung dengan rumus,

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$e = -\frac{v_b' - v_1'}{v_b - v_1}$$

$$e = -\frac{v_b' - 0}{v_b - 0}$$

$$e = -\frac{v_b'}{v_b}$$

$$e = -\frac{\sqrt{2gh'}}{\sqrt{2gh}}$$

$$e = -\sqrt{\frac{h'}{h}}$$

Karena tinggi tidak berharga negatif, maka koefisien restitusi dapat ditulis sebagai berikut.

$$e = \left| -\sqrt{\frac{h'}{h}} \right| = \sqrt{\frac{h'}{h}}$$

Keterangan:

h' = tinggi pantulan benda

h = tinggi benda semula atau tinggi pantulan sebelumnya

Agar kalian menguasai lebih dalam konsep ini, perhatikan contoh soal berikut.

Contoh

- Sebuah bola dijatuhkan dari ketinggian 4,5 meter tanpa kecepatan awal. Apabila koefisien restitusi tumbukan bola dengan lantai 0,2 dan percepatan gravitasi 10 m/s^2 , tentukan kelajuan pantulan bola dan tinggi pantulan pertama.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$e = 0,2$$

$$h = 4,5 \text{ m}$$

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

Ditanyakan: v' dan h'

Jawab:

Untuk mencari kelajuan pantulan bola (v'), gunakan persamaan:

$$e = -\frac{v'}{v}$$

$$v' = -ev$$

$$= -0,2 \times \sqrt{2gh}$$

$$= -0,2 \times \sqrt{2 \times 10 \times 4,5}$$

$$= -0,6\sqrt{10} \text{ m/s}$$

Tinggi pantulan bola pertama (h'):

$$e = \sqrt{\frac{h'}{h}}$$

$$0,2 = \sqrt{\frac{h'}{4,5}}$$

$$0,04 = \frac{h'}{4,5}$$

$$h' = 0,18 \text{ m}$$

Jadi, kelajuan pantulan bola adalah $-0,6\sqrt{10}$ m/s dan ketinggian pantulan bola pertama adalah 0,18 m.

- Sebuah bola yang berada 9 m di atas lantai mendarat dijatuhkan bebas. Ternyata, bola tersebut dipantulkan setinggi 4 m. Berapakah tinggi pantulan bola yang kedua kalinya?

Penyelesaian:

Diketahui:

tinggi bola awal = $h = 9$ m

Tinggi pantulan bola pertama = $h_1 = 4$ m

Ditanyakan:

tinggi pantulan bola kedua = h_2

Jawab:

Untuk pantulan bola pertama

$$e = \sqrt{\frac{h_1}{h}}$$

$$= \sqrt{\frac{4}{9}}$$

$$= \frac{2}{3}$$

Kemudian, untuk pantulan kedua

$$e = \sqrt{\frac{h_1}{h}} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

$$\frac{2}{3} = \sqrt{\frac{h_2}{4}}$$

$$h_2 = \frac{16}{9} \text{ m}$$

Jadi, tinggi bola pada pantulan kedua adalah $16/9$ m.

c. Tumbukan Tidak Elastis Sama Sekali

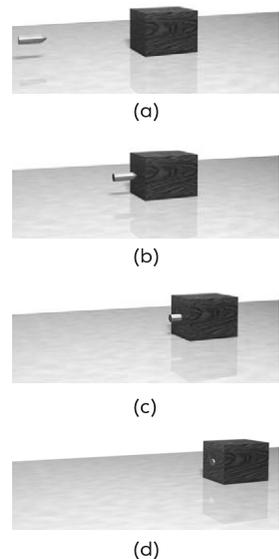
Selain tumbukan elastis sempurna dan tumbukan elastis sebagian, terdapat jenis tumbukan yang lainnya. Tumbukan yang dimaksud adalah tumbukan tidak elastis sama sekali.

Tumbukan tidak elastis sama sekali terjadi apabila dua benda setelah tumbukan menjadi satu dan bergerak bersama-sama. Contoh sederhana dari tumbukan tidak elastis sama sekali adalah peluru yang ditembakkan pada balok ringan yang berada pada lantai licin. Peluru ini kemungkinan akan tertancap pada balok. Gabungan balok dan peluru ini akan bergerak, yang berarti kecepatan gerak balok dan gerak peluru adalah sama. Kejadian ini dapat dijelaskan dengan Hukum Kekekalan Momentum sebagai berikut.

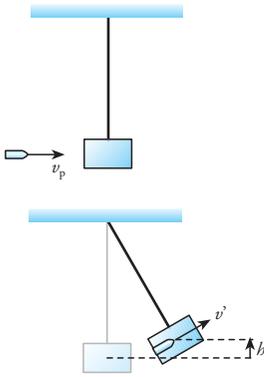
$$m_p \vec{v}_p + m_b \vec{v}_b = (m_p + m_b) \vec{v}'$$

Dari persamaan tersebut, kecepatan gerak balok dan peluru dapat dicari dengan mudah jika kecepatan balok dan kecepatan peluru semula diketahui. Karena kecepatan balok dan kecepatan peluru setelah tumbukan sama, maka koefisien restitusi untuk tumbukan tidak lenting sama sekali adalah nol ($e = 0$).

Sekarang bagaimanakah jika balok tidak berada di atas lantai licin tetapi digantung dengan tali? Sebuah peluru yang ditembakkan pada balok yang tergantung dengan tali akan membuat balok berayun-ayun. Sistem seperti ini disebut juga sebagai **ayunan balistik**. Dengan ayunan balistik ini, kita dapat mengukur kelajuan sebuah peluru yang ditembakkan dari sebuah senapan atau pistol.



Gambar 4.7 Peluru yang ditembakkan mengenai balok ringan yang berada di atas lantai licin menyebabkan balok bergerak.



Gambar 4.8 Ayunan balistik

Prinsip kerja ayunan balistik didasarkan pada Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Sebuah peluru yang ditembakkan pada balok akan bersarang dalam balok yang mengakibatkan balok mengayun dan mencapai ketinggian tertentu. Pada saat balok mengayun terjadilah perubahan energi kinetik yang dimiliki peluru menjadi energi potensial. Apabila massa peluru, massa balok, ketinggian ayunan diketahui, maka kecepatan peluru dapat dihitung. Perhatikan Gambar 4.18.

Sekarang mari kita tinjau keadaan sesaat setelah peluru menumbuk balok. Pada saat ini berlaku Hukum Kekekalan Momentum yang diberikan dengan persamaan:

$$m_p \vec{v}_p + m_b \vec{v}_b = (m_p + m_b) \vec{v}'$$

Karena balok diam maka $v_b = 0$, sehingga:

$$m_p \vec{v}_p = (m_p + m_b) \vec{v}'$$

Nah, setelah peluru bersarang di balok keduanya akan bergerak dengan kecepatan v' . Sehingga energi kinetik yang dimiliki adalah $\frac{1}{2}(m_p + m_b) v'^2$. Ketika balok dengan peluru ini berayun, Hukum Kekekalan Energi Mekanik akan berlaku yang dinyatakan dalam bentuk,

$$Ek_1 + Ep_1 = Ek_2 + Ep_2$$

$$\frac{1}{2}(m_p + m_b) v'^2 + 0 = 0 + (m_p + m_b) gh$$

$$v'^2 = 2gh$$

$$v' = \sqrt{2gh}$$

Jika persamaan ini disubstitusikan ke persamaan Hukum Kekekalan Momentum didapatkan,

$$m_p v_p = (m_p + m_b) \sqrt{2gh}$$

$$m_p v_p = (m_p + m_b) \sqrt{2gh}$$

Keterangan:

v_p = kelajuan peluru saat keluar senapan (m/s)

m_p = massa peluru (kg)

m_b = massa balok (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s)

h = tinggi maksimal ayunan (m)

Untuk mengetahui penerapan persamaan tersebut, simaklah contoh berikut.

Contoh

1. Sebuah balok bermassa 2 kg digantung pada sebuah pohon. Balok tersebut ditembak dengan peluru yang bergerak dengan kelajuan berkecepatan 120 m/s. Setelah mengenai balok, peluru bersarang pada balok tersebut. Apabila massa peluru 0,003 kg, berapakah kecepatan balok dan peluru setelah tembakan?

Penyelesaian:

Diketahui:

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

$$m_p = 0,003 \text{ kg}$$

$$v_p = 120 \text{ m/s}$$

$$v_b = 0$$

Ditanyakan: v'

Jawab:

Untuk mencari kelajuan peluru dan balok setelah ditembakkan, kita dapat menggunakan Hukum Kekekalan Momentum.

$$m_p v_p + m_b v_b = (m_p + m_b) v'$$

$$(0,003 \times 120) + (0,5 \times 0) = (0,003 + 0,5) v'$$

$$0,36 = 0,503 v'$$

$$v' = 0,72 \text{ m/s}$$

Jadi, kelajuan mengayun balok dan peluru setelah tembakan adalah 0,72 m/s.

2. Sebuah peluru dengan massa 30 g ditembakkan dengan sasaran ayunan balistik yang bermassa 2,97 kg. Akibat tembakan peluru, balok berayun hingga tingginya 24,5 cm dari ketinggian semula. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah kelajuan peluru saat mengenai balok?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m_p = 30 \text{ g} = 0,03 \text{ kg}$$

$$m_b = 2,97 \text{ kg}$$

$$h = 24,5 \text{ cm} = 0,245 \text{ m}$$

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

Ditanyakan: v_p

Jawab:

Untuk mencari kelajuan peluru, kita dapat menggunakan persamaan,

$$\begin{aligned} v_p &= \left(\frac{m_p + m_b}{m_p} \right) \sqrt{2gh} \\ &= \left(\frac{0,03 + 2,97}{0,03} \right) \sqrt{2 \times 10 \times 0,245} \\ &= \left(\frac{3}{0,03} \right) \sqrt{0,49} \\ &= 70 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, kelajuan peluru saat mengenai balok adalah 70 m/s.

Kalian telah mempelajari penjelasan beberapa peristiwa tumbukan berdasarkan Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi. Nah, untuk mengetahui kompetensi kalian, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Sebuah balok bermassa 2 kg bergerak ke kanan dengan kecepatan 2 m/s. Balok ini menumbuk balok lain yang bermassa 1,5 kg yang bergerak ke kiri dengan kecepatan 1 m/s. Apabila dua benda tersebut mengalami tumbukan lenting sempurna, hitunglah kecepatan masing-masing benda setelah tumbukan.

2. Sebuah mobil sedan dengan massa 1.200 kg melaju dengan kecepatan 54 km/jam. Di belakangnya, sebuah truk dengan massa 2.500 kg melaju dengan kecepatan 72 km/jam. Sopir truk mengantuk sehingga menabrak mobil sedan tersebut. Apabila terjadi tumbukan elastis sebagian dengan koefisien restitusi $\frac{1}{2}$, hitunglah kecepatan keduanya setelah tabrakan.
3. Sebuah bola terjatuh dari atas meja setinggi 2 meter. Setelah terjatuh bola ini memantul, hingga mencapai ketinggian 1,25 meter. Tentukan ketinggian bola pada pemantulan ketiga.
4. Dua truk A dan B masing-masing bermassa 4 ton dan 3,5 ton bergerak lurus dengan arah berlawanan, sehingga keduanya bertabrakan. Jika kecepatan truk A 36 km/jam ke kanan, kecepatan truk B adalah 72 km/jam ke kiri, dan setelah tabrakan kedua truk bergerak bersama, hitunglah kecepatan kedua truk tersebut.
5. Amin sedang belajar memanah dengan target buah mangga bermassa 485 gram yang digantung sejajar dengan arah anak panah. Setelah dilepaskan, anak panah dengan massa 0,015 kg tertancap pada buah mangga dan bergerak bersama-sama. Jika mangga berayun hingga tingginya bertambah 4 cm dari ketinggian semula, hitunglah:
 - a. kecepatan anak panah,
 - b. kecepatan ayunan mangga setelah anak panah tertancap.

Inti Sari

1. Momentum adalah hasil kali massa benda (m) dengan kecepatan yang dimilikinya. Momentum suatu benda dinyatakan dengan rumus:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Sementara, perubahan momentum (Δp) dirumuskan:

$$\begin{aligned}\Delta\vec{p} &= \vec{p}_2 - \vec{p}_1 \\ &= m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 \\ \Delta\vec{p} &= m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)\end{aligned}$$

2. Gaya impulsif adalah gaya yang bekerja pada suatu benda yang sebanding dengan perubahan kecepatan dalam selang waktu tertentu. Gaya impulsif dirumuskan:

$$\vec{F} = \frac{m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\Delta t}$$

3. Impuls adalah hasil kali gaya yang bekerja pada benda dengan selang waktu gaya tersebut bekerja. Impuls juga diartikan sebagai perubahan momentum benda.

$$\vec{I} = \vec{F} \Delta t$$

$$\vec{I} = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$$

4. Hukum Kekekalan Momentum Linear menyatakan bahwa apabila resultan gaya luar yang bekerja pada sistem benda sama dengan nol, maka momentum total benda atau partikel tersebut sama dengan konstan.

$$\vec{p}_{\text{tot}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n$$

$$\vec{p}_{\text{tot}} = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2 + \dots + m\vec{v}_n$$

5. Hukum Kekekalan Momentum pada tumbukan menyatakan bahwa jumlah momentum pada suatu sistem sebelum dan sesudah

tumbukan yang tidak dipengaruhi oleh gaya dari luar adalah tetap.

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

6. Dua hukum yang berpengaruh pada peristiwa tumbukan, yaitu:
- Hukum Kekekalan Momentum
 - Hukum Kekekalan Energi

$$E_{M1} + E_{M2} = E_{M1}' + E_{M2}'$$

$$E_{K1} + E_{P1} + E_{K2} + E_{P2} = E_{K1}' + E_{P2}' + E_{K2}' + E_{P2}'$$

7. Koefisien restitusi pada peristiwa tumbukan dirumuskan:

$$e = \frac{-(v'_B - v'_A)}{v_A - v_B}$$

8. Tumbukan dibagi menjadi tiga macam, yaitu:
- Tumbukan elastis sempurna atau tumbukan lenting sempurna. Tumbukan jenis ini mempunyai $e = 1$, sehingga mempunyai persamaan:

$$\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2 = -(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)$$

Pada tumbukan ini berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi Kinetik.

- Tumbukan elastis sebagian atau tumbukan lenting sebagian, jika nilai $0 < e < 1$. Pada tumbukan ini berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi Mekanik, tetapi Hukum Kekekalan Energi Kinetik tidak berlaku.
- Tumbukan tak elastis sama sekali, dengan nilai $e = 0$. Tumbukan ini terjadi jika setelah tumbukan kedua benda menjadi satu dan bergerak bersama. Hukum Kekekalan Momentum yang berlaku:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}'$$

9. Untuk benda jatuh bebas yang memantul pada lantai, koefisien restitusi saat memantul di lantai dapat dicari dengan persamaan:

$$e = \sqrt{\frac{h'}{h}}$$

Telaah Istilah

Energi kinetik Energi yang dimiliki benda karena kecepatannya

Energi potensial Energi yang dimiliki benda karena kedudukannya

Energi mekanik Jumlah dari energi kinetik dan potensial benda

Hukum Kekekalan Momentum Linear Apabila resultan gaya luar yang bekerja pada sistem benda sama dengan nol, maka momentum total sistem tetap atau konstan

Hukum Kekekalan Momentum Hukum yang menyatakan bahwa momentum total setelah tumbukan sama dengan momentum total sebelum tumbukan

Impuls Hasil kali gaya yang bekerja pada benda dengan selang waktu

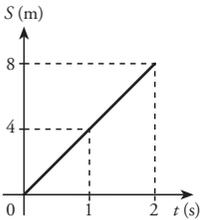
Koefisien restitusi Konstanta yang menyatakan perbandingan kecepatan relatif benda setelah tumbukan dengan kecepatan relatif sebelum tumbukan

Momentum Hasil kali massa dengan kecepatan benda

Teorema impuls-momentum Perubahan momentum partikel/benda selama selang waktu tertentu sama dengan resultan gaya yang bekerja pada partikel selama interval waktu tertentu

A Pilihlah jawaban yang paling tepat

1. Di bawah ini adalah pengertian dari impuls, *kecuali*....
 - a. gaya sesaat
 - b. momentum akhir dikurangi momen-
tum awal
 - c. vektor yang bersatuan kg m/s^2
 - d. besaran berdimensi $[M][L][T]^{-1}$
 - e. perubahan momentum
2. Seorang anak bermain mobil-mobilan bermassa 12 kg yang bergerak dengan ke-
cepatan 5 m/s. Momentum dan energi ki-
netik yang dimiliki mobil-mobilan tersebut
adalah....
 - a. 60 J dan 150 kg m/s
 - b. 60 kg m/s dan 150 J
 - c. 75 kg m/s dan 150 J
 - d. 100 kg m/s dan 200 J
 - e. 60 J dan 200 kg m/s
3. Gambar di bawah menunjukkan grafik (s-t) dari gerak sebuah benda yang masanya 6 kg. Momentum benda tersebut adalah ... kg m/s.



 - a. 24
 - b. 20
 - c. 16
 - d. 8
 - e. 4
4. Seorang anak memukul bola tenis yang massanya 100 gr dengan gaya 10 N den-
gan sebuah pemukul. Bola menempel pada
pemukul selama 0,2 sekon. Kecepatan bola
waktu lepas dari pemukul adalah ... m/s.
 - a. 2
 - b. 5

- c. 10
 - d. 15
 - e. 20
5. Sebuah benda mengalami perubahan momen-
tum sebesar 3 kgm/s dalam waktu 0,05
sekon. Besar gaya yang mengakibatkan pe-
rubahan tersebut adalah ... N.
 - a. 0,06
 - b. 0,6
 - c. 6
 - d. 60
 - e. 600
6. Sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian
10 m di atas lantai. Jika koefisien restitusi
antara bola dengan lantai 0,5, maka tinggi
pantulan pertama adalah....
 - a. 8 m
 - b. 7,5 m
 - c. 5 m
 - d. 2,5 m
 - e. 2 m
7. Sebuah bola menumbuk tegak lurus
sebuah tembok dengan kecepatan 8 m/s.
Jika koefisien tumbukan yang dialami bola
dengan tembok adalah 0,5, maka kelajuan
bola setelah memantul adalah....
 - a. 16 m/s
 - b. 10 m/s
 - c. 8 m/s
 - d. 6 m/s
 - e. 4 m/s
8. Seorang polisi menembakkan peluru de-
ngan masa 4 gram ke sebuah balok kayu
bermassa 5 kg. Peluru mengenai balok dan
bersarang di dalamnya. Kecepatan peluru
ketika mengenai balok 300 m/s. Kecepatan
sistem sekarang adalah....
 - a. 0,36 m/s
 - b. 0,24 m/s

- c. 0,18 m/s
d. 0,09 m/s
e. 0,03 m/s
9. Dimensi dari impuls adalah....
- $[M][L][T]^{-1}$
 - $[M][L][T]^{-2}$
 - $[M][L]^{-2}[T]^{-1}$
 - $[M][L^2][T]^{-2}$
 - $[L][T]^{-2}$
10. Sebuah benda yang memiliki massa 1 kg bergerak dengan kelajuan 12 m/s. Benda ini bertabrakan dengan benda bermassa 2 kg yang bergerak dengan kelajuan 24 m/s. Kelajuan masing-masing benda setelah tabrakan adalah. . .
- 14 m/s dan 2 m/s
 - 14 m/s dan 4 m/s
 - 20 m/s dan 2 m/s
 - 28 m/s dan 4 m/s
 - 28 m/s dan 14 m/s
11. Sebuah benda yang bermassa 5 kg bergerak dengan kecepatan 2 m/s menumbuk dinding secara tegak lurus. Akibatnya, benda dipantulkan dengan kecepatan 1 m/s. Besar impuls yang dilakukan dinding pada benda saat tumbukan adalah....
- 20 Ns
 - 15 Ns
 - 10 Ns
 - 5 Ns
 - 0
12. Sebuah batu yang dilemparkan memiliki momentum 25 Ns selama 0,05 sekon. Gaya rata-rata yang diperlukan untuk menghentikan batu tersebut adalah....
- 510 N
 - 500 N
 - 55 N
 - 50 N
 - 25N
13. Sebuah bom yang diam tiba-tiba meledak dan pecah menjadi 2 bagian dengan perbandingan massa 1 : 2 yang

bergerak dalam arah yang berlawanan. Perbandingan kecepatan kedua pecahan 3 : 2. Perbandingan energi kinetik pecahan bom pertama dan kedua adalah. . .

- 1 : 1
 - 2 : 3
 - 3 : 2
 - 4 : 9
 - 9 : 4
14. Bola yang massanya 800 gram ditendang dengan gaya 200 N. Bila lamanya kaki menyentuh bola 0,04 sekon, maka bola akan melayang dengan kecepatan awal . . . m/s
- 10
 - 9
 - 8
 - 6
 - 5
15. Benda A yang semula mempunyai momentum p bertumbukan dengan benda B. Setelah tumbukan, momentum benda A menjadi $3p$. Perubahan momentum benda B adalah. . .
- $4p$
 - $2p$
 - p
 - $-2p$
 - $-3P$

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

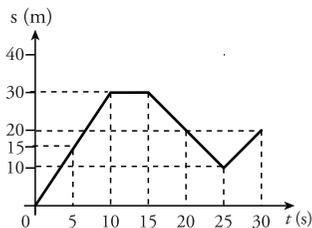
- Seorang pemain ski bermassa 60 kg meluncur dengan kecepatan 54 km/jam. Ia kemudian mengerem dan berhenti mendadak dalam waktu 2 detik. Tentukan:
 - momentum yang dimiliki saat bergerak,
 - gaya pengereman,
 - impuls yang bekerja pada saat pengereman.
- Sebuah bola ditendang seorang anak dengan gaya 50 N selama 0,5 sekon. Hitunglah selisih momentum pada awal dan akhir pukulan.

3. Seekor monyet berdiri di atas meja beroda yang diam. Ketika melihat pisang yang digantung, monyet melompat dari meja. Massa monyet 10 kg dan massa meja 15 kg. Jika monyet melompat gaya 80 N dan sentuhan kaki monyet dengan bibir meja terjadi selama 0,02 detik, tentukan:
 - a. impuls yang diberikan meja pada monyet,
 - b. kecepatan gerak meja pada saat monyet melompat
4. Sebuah bola kasti dilepaskan dari ketinggian 4 m di atas lantai. Setelah menumbuk lantai, bola dipantulkan setinggi 2 m. Tentukan:
 - a. kecepatan bola saat menumbuk lantai,
 - b. koefisien restitusi antara bola dan lantai,
 - c. tinggi pantulan kedua dan ketiga
5. Sebuah peluru dengan massa 4 gram ditembakkan ke sebuah balok kayu bermassa 250 gram yang berada di atas lantai licin. Peluru mengenai balok dan bersarang di dalamnya. Jika kecepatan peluru ketika mengenai balok 30 m/det, hitunglah kecepatan balok dan peluru.
6. Bola putih pada permainan bola bilyar disodok dengan gaya 30 N. Tongkat bilyar menyentuh bola putih selama 0,5 detik. Setelah bergerak, bola putih menumbuk bola merah yang massanya sama dengan massa bola putih yang diam, secara lenting sempurna.
 - a. Tentukan impuls yang diberikan tongkat pada bola.
 - b. Kecepatan yang dimiliki bola putih saat menumbuk bola merah.
 - c. Buktikan bahwa setelah tumbukan, bola putih akan berhenti dan bola merah bergerak dengan kelajuan sama dengan kelajuan bola putih semula.
7. Sebuah benda bermassa 1 kg bergerak dengan kecepatan 0,5 m/s menumbuk benda lain bermassa 2 kg yang diam. Jika tumbukkan kedua benda lenting sempurna, tentukan kecepatan kedua benda setelah tumbukan.
8. Dua buah gerobak bergerak pada arah berlawanan. Gerobak I yang massanya 30.000 gr mula-mula bergerak ke kanan dengan kecepatan 10 m/s. Gerobak ini menabrak gerobak kedua yang massanya 50.000 gr yang mula-mula bergerak ke kiri dengan kecepatan 5 m/s. Jika koefisien restitusi pada saat terjadi tabrakan adalah 0,3, hitunglah kecepatan kedua gerobak setelah tumbukan.
9. Sebuah benda dengan massa 2 kg jatuh bebas dari ketinggian 4 m terhadap lantai. Setelah menumbuk lantai, benda tidak lenting sama sekali. Hitunglah kalor yang ditimbulkan oleh benda (dalam kalori). (1 kalori = 4,2 joule).
10. Sebuah ayunan balistik mempunyai massa sasaran 2,85 kg. Kemudian, sebuah peluru yang massanya 0,15 kg ditembakkan. Setelah ditembakkan, peluru bersarang pada balok balistik dan berayun bersama. Jika tinggi ayunan yang terjadi 1,8 cm dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan kecepatan peluru saat mengenai balok.

Latihan Ulangan Akhir Semester I

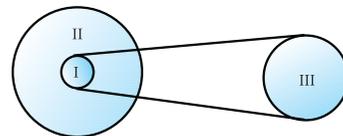
A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- Sebuah benda dilempar vertikal ke udara dengan persamaan ketinggian, $h(t) = 10t - 5t^2$ dengan h dalam meter dan t dalam sekon. Lamanya bola melayang di udara adalah ... s.
 - 0,5
 - 1
 - 2
 - 2,5
 - 4
- Sebuah benda bergerak lurus dengan dengan persamaan $\vec{v} = \{4\hat{i} + (t^2 + 2t)\hat{j}\}$ m/s. Bila posisi benda mula-mula di pusat koordinat, perpindahan benda selama 3 sekon adalah ... m.
 - 10
 - 20
 - 30
 - 40
 - 50
- Sebuah partikel bergerak sesuai dengan persamaan posisi $\vec{r} = (t^2 - 4)\hat{i} + (3t^2 + 5)\hat{j}$, r dalam meter dan t dalam sekon. Kelajuan benda pada $t = 1$ sekon adalah ... m/s.
 - 2
 - 6
 - 40
 - $2\sqrt{10}$
 - $6\sqrt{10}$
- Grafik perpindahan sebuah benda terhadap waktu ditunjukkan pada gambar berikut.



Kecepatan benda pada saat $t = 5$ s dan $t = 15$ s adalah ... m/s.

- 3 dan 0
 - 3 dan 6
 - 3 dan -1
 - 0 dan 3
 - 3 dan -5
- Posisi suatu benda yang bergerak lurus vertikal dinyatakan dengan persamaan $y(t) = 40t - 5t^2$, dengan y dalam m dan t dalam s. Besar kecepatan benda saat $t = 3$ s adalah ... m/s.
 - 40
 - 30
 - 20
 - 10
 - 5
 - Posisi sebuah peluru yang ditembakkan vertikal ke atas dinyatakan oleh persamaan $y(t) = 60t - 15t^2$ meter. Ketinggian yang dicapai oleh peluru adalah ... m.
 - 60
 - 50
 - 40
 - 30
 - 20
 - Sebuah roket terdeteksi oleh radar pada koordinat (4 m, 5 m) pada waktu $t_1 = 0$ s dan (16 m, 21 m) pada waktu $t_2 = 4,05$ s. Besar kecepatan rata-rata roket pada selang waktu tersebut adalah ... m/s.
 - 6
 - 8
 - 10
 - 16
 - 21
 - Perhatikan gambar di bawah ini. Jari-jari roda I = 0,2 m, jari-jari roda II = 0,8 m, dan jari-jari roda III = 0,4. Jari-jari roda I dan III terhubung dengan tali. Jika kecepatan sudut roda III = 30 rad/s, maka laju linier roda II adalah ... m/s.



- 18
- 28
- 38
- 48
- 58

9. Sebuah partikel bergerak searah sumbu y dengan persamaan kedudukan $y(t) = 8t - 2t^2$ meter. Apabila partikel tersebut memiliki persamaan tetap, lama gerak partikel sebelum berubah arah adalah ... s
- 1
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
10. Peluru A dan B ditembakkan dari senapan yang sama oleh seorang tentara. Peluru A ditembakkan dengan sudut 30° dan peluru B ditembakkan dengan sudut 60° . Perbandingan tinggi maksimum yang dicapai peluru A dan B adalah
- 1 : 2
 - 1 : 3
 - 2 : 1
 - $1 : \sqrt{3}$
 - $\sqrt{3} : 1$
11. Benda yang bergerak melingkar beraturan memiliki sifat berikut, **kecuali**
- kecepatan linear konstan
 - kecepatan sudut tetap
 - percepatan sudut konstan
 - jari-jari lintasan konstan
 - arah kecepatan tetap
12. Posisi sudut pentil pada roda sepeda yang berjalan, dinyatakan dengan persamaan $\theta = (7 + 3t + t^2)$ rad, maka:
- (1) posisi sudut pada $t = 2$ s adalah 17 rad.
 - (2) kecepatan sudut pada $t = 2$ s adalah 9 rad/s.
 - (3) percepatan sudut pada $t = 0$ adalah 0 rad/s².
 - (4) percepatan sudut konstan.
- Pernyataan yang benar adalah pernyataan nomor
- (1), (2), dan (3)
 - (1), (2), dan (4)
 - (2), (3), dan (4)
 - (1) dan (4)
 - (2) dan (3)
13. Seorang anak memutar batu yang diikat dengan tali. Setiap detik, batu tersebut

menempuh sudut sesuai dengan persamaan $\theta = (\frac{1}{6}t^2 + \frac{1}{6})\pi$ rad. Besar kecepatan sudut pada detik ke-3 adalah . . . rad/s.

- $\frac{1}{6}$
 - $\frac{1}{6}\pi$
 - $\frac{1}{3}$
 - $\frac{1}{3}\pi$
 - π
14. Pernyataan berikut yang benar adalah
- gaya gravitasi berbanding lurus dengan jaraknya
 - gaya gravitasi berbanding terbalik dengan jaraknya
 - gaya gravitasi berkurang terhadap kuadrat jaraknya
 - gaya gravitasi berbanding terbalik dengan kedua massanya
 - gaya gravitasi sama dengan perkalian kedua massanya
15. Jarak rata-rata planet A dari matahari adalah q . Sedangkan jarak rata-rata planet B adalah r . Jika planet A mempunyai periode revolusi T dan $r = 3q$, maka periode revolusi planet B adalah
- $3T$
 - $3\sqrt{3}T$
 - $9T$
 - $27T$
 - $81T$
16. Sebuah satelit berjarak 3 kali radius bumi diukur dari pusat bumi. Jika massa satelit 3 ton dan gravitasi bumi $9,8 \text{ m/s}^2$, gaya gravitasi yang bekerja pada satelit tersebut adalah . . . N.
- 327,33
 - 327

- c. 326,67
d. 326,33
e. 325
17. Massa benda A, B, dan C masing-masing 3 kg, 4 kg, dan 5 kg, terletak pada sudut siku-siku. Apabila jarak AB = 5 m dan BC = 8 m, gaya gravitasi total pada benda B adalah ... N. (diketahui: $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$)
a. $3,8 \times 10^{-7}$ d. $3,8 \times 10^{-10}$
b. $3,8 \times 10^{-8}$ e. $3,8 \times 10^{-11}$
c. $3,8 \times 10^{-9}$
18. Sebuah benda yang mempunyai berat 50 N digantungkan pada sebatang kawat yang berdiameter 0,1 cm dan panjang 1 m. Apabila pertambahan kawat adalah 0,5 cm, modulus Young kawat adalah ... Nm^{-2} .
a. $1,28 \times 10^{-11}$ d. $4,54 \times 10^{11}$
b. $1,28 \times 10^{11}$ e. 2×10^{11}
c. $4,54 \times 10^{-11}$
19. Sebuah kawat mempunyai panjang 1 m, luas penampang $0,7 \text{ cm}^2$, dan modulus Young 10^9 Nm^{-2} . Apabila sebuah beban yang bermassa 500 kg digantungkan pada kawat tersebut, pertambahan panjang kawat adalah ... cm.
a. 8 d. 20
b. 12 e. 21
c. 14
20. Sebuah kawat logam mempunyai panjang 1 m, luas penampang 1 cm^2 , dan modulus Young 10^{10} Nm^{-2} . Apabila diberi gaya sebesar 40 N, berapakah pertambahan energi potensialnya?
a. $4 \times 10^4 \text{ J}$ d. $7 \times 10^4 \text{ J}$
b. $6 \times 10^4 \text{ J}$ e. $8 \times 10^4 \text{ J}$
c. $6 \times 10^4 \text{ J}$
21. Sebuah kotak didorong sejauh 2 m dengan menggunakan gaya sebesar 50 N. Usaha yang dilakukan terhadap batu sebesar ... J.
a. 15 d. 75
b. 25 e. 100
c. 52
22. Sebuah meja didorong oleh Ibnu dan Munir dengan arah berlawanan. Ibnu mendorong dengan gaya 50 N dan Munir dengan gaya 40 N. Ternyata, meja berpindah sejauh 1 m ke arah Munir. Usaha total yang dilakukan Ibnu dan Munir adalah ... J.
a. 90 d. 20
b. -90 e. 10
c. 30
23. Kemampuan untuk melakukan usaha disebut
a. gaya d. newton
b. joule e. energi mekanik
c. energi
24. Dari sumber-sumber energi di bawah ini, yang memiliki efisiensi paling kecil adalah
a. cahaya d. listrik
b. angin e. nuklir
c. air
25. Sebuah sedan dengan massa 0,8 ton bergerak sejauh 10 m dalam waktu 2 s. Energi kinetik mobil tersebut adalah ... kJ.
a. 5 d. 2
b. 4 e. 1
c. 3
26. Sebuah apel jatuh dari pohon setinggi 3 m. Jika massa buah apel tersebut adalah 1,5 hg, berapakah energi potensial maksimumnya?
a. 4,5 kJ. d. 4,4 J.
b. 4,4 kJ. e. 1,5 J.
c. 4,5 J.
27. Perhatikan pelbagai gaya berikut.
(1) gaya berat
(2) gaya gesek
(3) gaya gravitasi umum
(4) gaya pegas
Yang termasuk gaya konservatif dari gaya-gaya di atas adalah ...
a. (1), (2), dan (3) d. (1)
b. (1) dan (3) e. (4)
c. (2) dan (4)
28. Sebuah bola dengan massa 0,1 kg dilemparkan ke atas dari permukaan tanah dengan kelajuan awal 20 m/s. Apabila gesekan antara permukaan bola dengan udara diabaikan,

waktu yang diperlukan bola untuk kembali ke permukaan tanah adalah ... s.

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

- a. 5
b. 4
c. 3
d. 2
e. 1

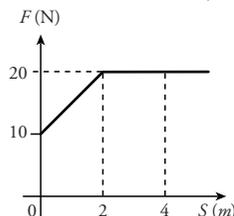
29. Sebuah mobil mempunyai mesin yang menghasilkan gaya sebesar 1.000 N. Mobil tersebut bergerak ke timur sejauh 100 m, kemudian ke selatan sejauh 50 m, dan ke timur sejauh 50 m. Usaha total yang dilakukan mesin mobil tersebut adalah ... kJ.

- a. 200
b. 150
c. 100
d. 50
e. 0

30. Sebuah benda bergerak pada lintasan berbentuk lingkaran vertikal dengan jari-jari R . Saat di titik tertinggi lintasan, kecepatan minimal benda agar tidak jatuh adalah ...

- a. $\frac{5}{2}R$
b. $\frac{2}{5}R$
c. $\sqrt{5gR}$
d. $\sqrt{2gR}$
e. \sqrt{gR}

31. Perhatikan gambar di samping. Sebuah benda yang terletak pada permukaan datar dan licin diberikan sebuah gaya.



Jika benda bermassa 20 kg dan mula-mula bergerak dengan kecepatan awal 1 m/s, berapakah energi kinetik benda setelah menempuh jarak 4 m?

- a. 30 joule.
b. 40 joule.
c. 60 joule.
d. 70 joule.
e. 80 joule.

32. Satuan dari momentum adalah $\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$, sehingga momentum dapat diartikan sebagai massa dikalikan dengan kecepatan. Satuan lain yang dapat dipakai untuk momentum adalah ...

- a. Nm
b. N s
c. Nm s
d. $\frac{\text{Nm}}{\text{s}}$
e. $\frac{\text{N}}{\text{s}}$

33. Berikut merupakan pengertian dari impuls, **kecuali** ...

- a. gaya sesaat
b. momentum akhir dikurangi momentum awal
c. vektor yang bersatuan kgms^{-1}
d. besaran berdimensi ML^{-1}T
e. perubahan momentum

34. Pada tumbukan berlaku hukum kekekalan ...

- a. energi kinetik dan momentum
b. energi
c. momentum
d. energi kinetik
e. energi mekanik dan momentum

35. Seorang anak menjatuhkan bola. Bola itu jatuh bebas dari ketinggian h dan memantul setinggi h' . Besar koefisien restitusi antara bola dengan lantai adalah ...

- a. $\frac{h'}{h}$
b. $\frac{h}{b}$
c. $\sqrt{\frac{h'}{h}}$
d. $\sqrt{\frac{h}{b}}$
e. $h \cdot h'$

36. Yang merupakan dimensi dari impuls, adalah ...

- a. $[\text{M}][\text{L}][\text{T}]^{-3}$
b. $[\text{M}][\text{L}][\text{T}]^{-2}$
c. $[\text{M}][\text{L}][\text{T}]^{-1}$
d. $[\text{M}][\text{L}][\text{T}]^2$
e. $[\text{M}][\text{L}]^{-1}[\text{T}]$

37. Sebuah benda mengalami perubahan momentum 4 kgm/s dalam waktu 2 s. Perubahan momentum ini disebabkan oleh gaya sebesar ... N.

- a. 0,5
b. 0,2
c. 2
d. 4
e. 8

38. Bola bermassa 800 gram ditendang dengan gaya 200 N. Apabila lamanya kaki menyentuh bola 0,04 sekon, maka bola akan melayang dengan kecepatan awal... m/s.
- 10
 - 9
 - 8
 - 6
 - 5
39. Seorang anak melemparkan kelereng dengan kecepatan awal v . Apabila anak tersebut melemparkan kembali kelerengnya dengan kecepatan dua kali semula, maka energi kinetik kelereng sekarang adalah . . . kali semula.
- 1
 - 2
 - 3
 - 4
 - 6
40. Sebuah bola bermassa 1 kg mula-mula diam. Bola ditendang dengan kecepatan 10 m/s. Jika waktu kontak bola dengan kaki penendang 0,25 sekon, maka besar gaya rata-rata yang dialami bola adalah ... N.
- 50
 - 40
 - 25
 - 10
 - 2,5

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

- Sebuah mobil bergerak dengan persamaan $r(t) = 8 + 3t + 2t^2 + 5t^3$ dengan r dalam meter dan t dalam sekon, tentukan:
 - kecepatan sebagai fungsi waktu,
 - percepatan sebagai fungsi waktu,
 - besar percepatan awal, dan
 - besar percepatan pada saat $t = 2$ s.
- Sebuah roda mobil berputar terhadap poros sumbu z menurut persamaan

$$\theta(t) = 5\text{rad} - \left(6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)t + \left(3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right)t^2 + \left(2 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right)t^3$$

Tentukan:

- kecepatan sudut sebagai fungsi waktu,
 - percepatan sudut sebagai fungsi waktu,
 - besar percepatan sudut awal, dan
 - percepatan sudut pada saat $t = 3$ s.
- Jarak yang ditempuh titik materi bergerak lurus sembarang dinyatakan dengan persamaan $r(t) = 4t^2 - 8t + 4$, (r dalam meter dan t dalam sekon). Berapakah besar kecepatan partikel pada saat $t = 5$ s?
 - Totti melakukan tendangan bebas sehingga bola melambung dengan membentuk sudut 30° terhadap tanah. Bola tersebut mencapai jarak terjauh 25 m. Jika percepatan gravitasi di tempat itu sebesar 10 m/s^2 , tentukan:
 - kelajuan awal akibat tendangan yang dilakukan.
 - lama bola di udara,
 - koordinat tinggi maksimum bola,
 - kelajuan bola ketika sampai di tanah.
 - Ketika terjadi gempa bumi, sebuah lampu bermassa 50 gram yang tergantung pada kabel sepanjang 30 cm berayun-ayun. Dalam 20 detik, lampu berayun sebanyak 20 kali. Jika sudut ayunan kecil dan percepatan gravitasi bumi 10 m/s^2 , tentukan besar gaya akibat gempa yang menyebabkan lampu berayun.
 - Sebuah batu yang massanya 100 g dilempar vertikal ke atas dari permukaan tanah dengan kecepatan awal 25 m/s. Jika percepatan gravitasi (g) = $9,8 \text{ m/s}^2$, dengan menggunakan Hukum Kekekalan Energi, tentukan:
 - ketinggian maksimum batu,
 - waktu yang diperlukan untuk sampai kembali ke tanah,
 - energi kinetik batu pada saat di ketinggian 10 m dari permukaan tanah,
 - energi potensial batu saat $t = 1$ s.
 - Dua buah pegas mempunyai konstanta masing-masing k_1 dan k_2 dengan $k_1 < k_2$. Untuk menyamakan pertambahan kedua

- pegas, manakah dari kedua pegas tersebut yang membutuhkan usaha lebih kecil?
8. Neraca pegas digunakan untuk mengukur batu dengan massa 20 g, ternyata meregang sepanjang 1 cm. Jika percepatan gravitasi $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan:
 - a. konstanta pegas,
 - b. usaha yang dilakukan neraca pegas.
 9. Sebuah balok bermassa 2 kg bergerak dengan percepatan 3 m/s^2 di atas sebuah lantai licin. Beberapa saat kemudian, balok menumbuk sebuah pegas hingga pegas mengalami pemampatan sejauh 1,5 cm. Berapakah konstanta pegas tersebut?
 10. Amir akan membidik seekor burung kutilang dengan menggunakan katapel. Dia menggunakan sebuah batu dengan massa 20 gr. Ketika karet katapel ditarik sepanjang 40 cm dan dilepaskan, batu tersebut terlonjar dengan kecepatan 10 m/s. Tentukan:
 - a. energi kinetik,
 - b. konstanta karet.
 11. Peluru bermassa 4 gram ditembakkan ke sebuah balok kayu bermassa 6 kg. Peluru mengenai balok dan bersarang di dalamnya. Apabila kecepatan peluru ketika mengenai balok 300 m/s, berapa kecepatan sistem setelah tumbukan?
 12. Dua buah benda titik bermassa $m_1 = 10 \text{ kg}$ dan $m_2 = 5 \text{ kg}$ terletak berdekatan di bidang datar licin. Sistem ini mendapat gaya impuls sehingga kedua benda bergerak masing-masing dengan laju $v_1 = 0,5 \text{ m/s}$ dan $v_2 = 2,5 \text{ m/s}$ dengan arah saling tegak lurus. Berapakah besar gaya impuls yang bekerja pada sistem?
 13. Sebuah benda bermassa 1 kg yang bergerak dengan kelajuan 2 m/s menumbuk benda lain bermassa 1 kg yang diam. Jika tumbukan kedua benda lenting sempurna, berapakah kecepatan benda pertama dan kedua sesaat setelah tumbukan?
 14. Air terjun yang memiliki ketinggian 50 m mengalirkan air sebanyak 100 m^3 tiap sekon. Jika seluruh energi potensial air ketika jatuh diubah menjadi energi listrik oleh generator, tentukan daya yang dihasilkan generator.
 15. Sebuah mobil sedan bermassa 1.200 kg melaju dengan kecepatan 54 km/jam. Di belakangnya, sebuah truk dengan massa 2.500 kg melaju dengan kecepatan 72 km/jam. Sopir truk mengantuk sehingga menabrak mobil sedan tersebut. Apabila terjadi tumbukan elastis sebagian dengan koefisien restitusi $\frac{1}{2}$, hitunglah kecepatan keduanya setelah tabrakan.

B a b V

Keseimbangan Benda Tegar



www.pogo.org.uk

Untuk memindahkan benda-benda yang berat. Kita dapat menggunakan crane. Benda-benda ini digantungkan di bawah lengan *crane* yang panjang. Letak benda ini dapat diatur, sehingga kedua lengan seimbang. Setelah itu barulah crane berputar untuk menempatkan benda di tempat yang diinginkan. Tahukah kalian bahwa crane bekerja berdasarkan konsep fisika? Konsep fisika yang mendasari cara kerja crane adalah momen gaya atau torsi. Konsep ini merupakan salah satu besaran yang mendasari materi momentum sudut dan keseimbangan benda tegar yang akan kita pelajari di bab ini. Ingin tahu lebih lanjut? Simaklah setiap penjelasan yang diberikan dengan sungguh-sungguh.

Kata Kunci

- Torsi/momen gaya
- Sumbu rotasi
- Lengan gaya
- Rotasi
- Translasi
- Momen inersia
- Momentum sudut
- Benda Tegas

Setelah mempelajari materi di bab ini, kalian akan mampu memformulasikan pengaruh momen gaya (torsi) terhadap gerak rotasi benda. Selain itu, kalian dapat menggunakan persamaan Hukum II Newton untuk menjelaskan gerak translasi, gerak rotasi, atau perpaduan keduanya. Kalian juga akan dikenalkan dengan konsep momen inersia dan memformulasikannya pada pelbagai bentuk benda tegar. Konsep yang berkaitan dengan momen inersia adalah momentum sudut. Di bab ini, kalian akan dibimbing untuk memformulasikan Hukum Kekekalan Momentum Sudut dan menggunakannya untuk menjelaskan beberapa peristiwa gerak rotasi. Terakhir, kalian diharapkan mampu menganalisis keseimbangan benda tegar.

Dengan menguasai materi di bab ini, kalian akan mampu menjelaskan cara kerja beberapa alat sederhana. Sebagai contoh, cara kerja *crane*, permainan jungkat-jungkit, penggunaan engsel pada pintu, pemakaian kunci pas, perputaran roda, dan masih banyak aplikasi lainnya yang dapat dijelaskan dengan momen gaya.

A Momen Gaya (Torsi)

Sebelum kita melangkah lebih jauh, coba kalian jawab pertanyaan-pertanyaan pada *Eureka* di bawah ini.

Eureka

Diskusikan dengan teman sebangku kalian jawaban pertanyaan-pertanyaan di bawah ini.

1. Dua benda dengan massa berbeda akan dipindahkan menggunakan *crane* secara bergantian. Untuk menjaga agar lengan *crane* seimbang, bagaimanakah letak benda yang berat bila dibandingkan benda yang lebih ringan?
2. Manakah yang lebih mudah digunakan, kunci inggris pendek atau kunci inggris panjang untuk membuka baut yang sama?
3. Ketika kalian bermain jungkat-jungkit dengan orang yang lebih berat dari berat tubuh kalian, bagaimanakah cara agar jungkat-jungkit dapat seimbang?
4. Seorang pemain *ice-skating* terkadang melakukan gerak berputar ditempat. Bagaimanakah kecepatan putar pemain tersebut jika tangannya bersedekap dibandingkan ketika tangannya terentang. Bagaimanakah penjelasan peristiwa ini ditinjau dari sudut pandang fisika?

Konsultasikan jawabannya kepada guru kalian.

Dengan melakukan diskusi tersebut, kalian telah mengetahui arah pembahasan materi pada bab ini. Di bab ini, kalian akan menemukan penjelasan dan jawaban untuk pertanyaan-pertanyaan tersebut.

Pada bab I tentang Kinematika Partikel, kita telah mempelajari gerak melingkar atau gerak rotasi tanpa meninjau penyebabnya. Di bab ini, kita akan mempelajari penyebab gerak rotasi. Ketika mempelajari Dinamika Partikel, kita telah mengetahui bahwa gerak benda dipengaruhi gaya. Benda yang melakukan gerak rotasi juga dipengaruhi gaya. Namun, gaya yang menyebabkan gerak rotasi tidak sama dengan gaya pada gerak linear, walaupun keduanya mempunyai hubungan yang erat. Gaya yang menyebabkan benda berotasi adalah gaya putar yang disebut **momen gaya** atau **torsi**.

Benda dapat berotasi disebabkan adanya gaya putar. Dalam fisika, gaya putar ini disebut momen gaya atau torsi. Momen gaya mempunyai kaitan yang sangat erat dengan gaya yang telah kalian kenal. Momen gaya termasuk besaran vektor yang disimbolkan dengan $\vec{\tau}$ (baca: *tau*) dan mempunyai satuan Nm. Beberapa hal yang berkaitan dengan momen gaya, yaitu **sumbu rotasi**, **lengan gaya**, dan **garis kerja gaya**.

1. Pengertian Momen Gaya

Momen gaya atau **torsi** merupakan besaran yang mengakibatkan benda berotasi atau berputar. Untuk memahami pengertian tersebut, coba perhatikan seseorang yang sedang menggunakan kunci inggris untuk membuka mur atau baut. Seseorang yang menggunakan kunci pas untuk membuka baut mengeluarkan gaya. Perhatikan gambar 5.1.

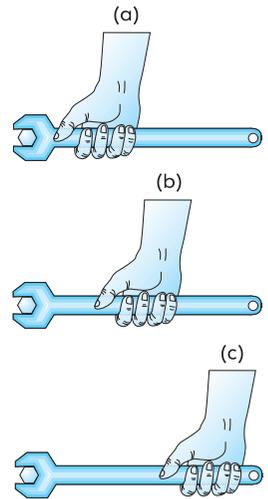
Berdasarkan gambar tersebut, orang memberikan gaya kepada kunci sehingga kunci dapat memutar baut. Diagram gaya yang diberikan pada baut dan kunci pas tampak pada Gambar 5.2. Dari gambar tersebut, baut berfungsi sebagai **sumbu rotasi**, sedangkan perpanjangan garis gaya disebut **garis kerja gaya**. Jika gaya yang diberikan tangan (garis kerja gaya) tegak lurus terhadap lengan kunci, maka lengan kunci ini berfungsi sebagai **lengan gaya**. Namun, jika gaya yang diberikan tidak tegak lurus lengan kunci, maka **lengan gaya merupakan jarak yang tegak lurus dari sumbu rotasi dengan garis kerja gaya**.

Perhatikan sekali lagi Gambar 5.1. Berdasarkan gambar tersebut, manakah yang lebih mudah dilakukan untuk memutar baut? Untuk memutar baut, kedudukan tangan seperti gambar (c) lebih mudah dilakukan daripada gambar (a) dan (b). Sementara kedudukan seperti gambar (b) lebih mudah dilakukan daripada gambar (a). Gaya yang diperlukan untuk memutar baut pada kedudukan (c) lebih kecil dari gaya yang diperlukan pada gambar (b) atau (a). Berdasarkan fakta ini, besar gaya putar atau momen gaya tidak hanya ditentukan oleh besar gaya, tetapi juga panjang lengan gaya. Hubungan ketiga faktor ini diberikan dengan persamaan berikut.

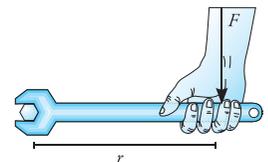
$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Tips & Trik

Di bab III pada buku ini, kalian telah mengenal besaran usaha. Usaha juga merupakan perkalian gaya dengan jarak. Ini berarti satuan usaha adalah Nm sama seperti satuan momen gaya. Yang perlu diperhatikan adalah bahwa usaha dan momen gaya adalah besaran yang berbeda. Di manakah letak perbedaan kedua besaran ini?



Gambar 5.1 Pemberian gaya pada kunci pas menyebabkan baut berputar.

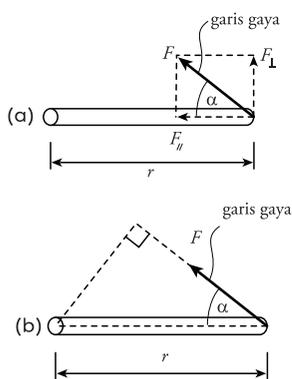


Gambar 5.2 Sumbu rotasi, lengan gaya, dan garis kerja gaya pada pemakaian kunci pas.

Teropong

Di kelas X semester 1, kalian telah mempelajari sifat perkalian silang dua buah vektor, sebagai berikut.

$$\vec{a} \times \vec{b} = ab \sin \alpha$$



Gambar 5.3 (a) Momen gaya diberikan oleh gaya yang tegak lurus lengan gaya. (b) Lengan gaya yang memberi momen gaya adalah lengan yang tegak lurus garis gaya.

Berdasarkan sifat perkalian silang dua vektor, besar momen gaya dapat dicari dengan rumus:

$$\tau = r F \sin \alpha$$

Keterangan:

τ = momen gaya (Nm)

r = lengan gaya (m)

F = gaya yang bekerja (N)

α = sudut antara garis kerja gaya (F) dan lengan gaya (r).

Perhatikan faktor $\sin \alpha$ pada persamaan tersebut. Jika gaya yang bekerja membentuk sudut α terhadap lengan gaya, maka faktor $F \sin \alpha$ merupakan komponen gaya yang tegak lurus lengan gaya. Ini berarti bahwa **gaya yang menimbulkan momen gaya adalah gaya yang tegak lurus lengan gaya**. Atau, jika $\sin \alpha$ melekat pada lengan gaya ($r \sin \alpha$) maka lengan gaya yang memberikan momen gaya adalah **lengan yang tegak lurus garis gaya**. Kedua pernyataan ini memberikan hasil sama. Perhatikan Gambar 5.3.

Berdasarkan keterangan dan gambar tersebut, besar momen gaya dapat dicari dengan rumus:

$$\tau = F_{\perp} r$$

$$\tau = (F \sin \alpha) r$$

atau,

$$\tau = F r_{\perp}$$

$$\tau = F (r \sin \alpha)$$

Keterangan:

τ = momen gaya (Nm)

r = lengan gaya (m)

F = gaya yang bekerja (N)

α = sudut antara garis kerja gaya dan lengan gaya.

Sebagai besaran vektor, momen gaya tentunya mempunyai arah. Bagaimanakah cara menentukan arah momen gaya? Perhatikan Gambar 5.2 di depan. Ketika, gaya menekan ke bawah, baut akan berputar searah putaran jarum jam. Sebaliknya, jika gaya yang diberikan mengarah ke atas, baut berputar berlawanan jarum jam. Putaran baut ke kanan (searah putaran jarum jam) menyebabkan baut bergerak masuk tegak lurus bidang gambar. Sebaliknya, putaran ke kiri (berlawanan arah putaran jarum jam) menyebabkan baut keluar bidang gambar. Arah baut (masuk atau keluar bidang) menunjukkan arah momen gaya. Arah momen gaya ini dapat dicari menggunakan aturan genggaman tangan kanan. Arah genggaman tangan menunjukkan arah putaran baut (sumbu rotasi), sedangkan arah ibu jari menunjukkan arah momen gaya.

Mozaiik

Kepakkan Sayap Burung

Salah satu tanda kebesaran Tuhan adalah diciptakan-Nya sayap pada burung. Dengan sayap tersebut, burung dapat terbang dari satu tempat ke tempat lainnya. Tahukah kalian, bahwa semakin panjang sayap yang dimiliki burung, semakin besar energi yang dikeluarkan untuk mengepakkan sayap. Fakta kepakkan sayap ini berhubungan dengan konsep momen gaya dan gerak rotasi.

Untuk memudahkan pembahasan, kita menggunakan perjanjian berikut.

- Jika benda ketika diberi gaya berputar searah dengan putaran jarum jam, maka momen gaya diberi tanda positif (+).
- Jika benda ketika diberi gaya berputar berlawanan arah dengan arah putaran jarum jam momen gaya diberi tanda negatif (-).

Perhatikan contoh berikut.

Contoh

- Diagram berikut menggambarkan gaya yang diberikan seseorang saat menarik kunci pintu. Jika gaya yang digunakan 5 N, tentukan momen gaya pada engsel pintu akibat tarikan yang diberikan.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$F = 5 \text{ N}$$

Ditanyakan:

- τ_1
- τ_2
- τ_3

Jawab:

Untuk mencari momen gaya pada pintu, yang harus diperhatikan adalah lengan gaya dan sudut antara garis gaya dan lengan gaya.

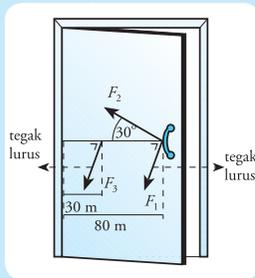
- pada gambar a, arah lengan gaya ($r = 80 \text{ cm}$) tegak lurus arah gaya, sehingga $\alpha = 90^\circ$. Besar momen gaya dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= F r \sin \alpha \\ &= 5 \times 0,8 \sin 90^\circ \\ &= 4 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Jadi, besar momen gaya akibat gaya 1 adalah 4 Nm.

- Pada gambar b, arah lengan gaya ($r = 80 \text{ cm}$) membentuk sudut 30° , sehingga $\alpha = 30^\circ$. Besar momen gaya dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\tau_2 &= F r \sin \alpha \\ &= 5 \times 0,8 \sin 30^\circ \\ &= 2 \text{ Nm}\end{aligned}$$



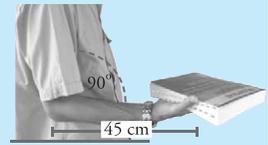
Jadi, besar momen gaya akibat gaya 2 adalah 2 Nm.

- pada gambar c, arah lengan gaya ($r = 30 \text{ cm}$) tegak lurus arah gaya, sehingga $\alpha = 90^\circ$. Besar momen gaya dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\tau_3 &= F r \sin \alpha \\ &= 5 \times 0,3 \sin 90^\circ \\ &= 1,5 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Jadi, besar momen gaya akibat gaya 3 adalah 1,5 Nm.

- Seseorang meletakkan benda bermassa 500 gram pada telapak tangannya, seperti ditunjukkan pada gambar di samping. Jika panjang lengan, dari siku ke benda adalah 45 cm, dan massa



lengan diabaikan, berapakah momen gaya di sekitar siku pada setiap posisi yang diberikan.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 500 \text{ g} = 0,5 \text{ kg}$$

$$r = 45 \text{ cm} = 0,45 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = 90^\circ$$

$$\alpha_2 = 30^\circ$$

Ditanyakan: τ_1 dan τ_2

Jawab:

Untuk mencari momen gaya, gunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\tau_1 &= F r \sin \alpha \\ &= mg \sin 90^\circ \\ &= 0,5 \times 10 \times 0,45 \times \sin 90^\circ \\ &= 2,25 \text{ Nm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_2 &= F r \sin \alpha \\ &= mg \sin 30^\circ \\ &= 0,5 \times 10 \times 0,45 \times \sin 30^\circ \\ &= 1,125 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Jadi, momen gaya untuk gambar 1 adalah 2,25 Nm. Sedangkan momen gaya untuk gambar 2 adalah 1,125 Nm.

Momen gaya yang telah kita bahas adalah momen gaya akibat satu macam gaya. Bagaimanakah jika pada benda bekerja dua atau lebih gaya? Kalian ingin mengetahuinya bukan? Untuk itu, simaklah penjelasan berikut dengan saksama.

2. Momen Gaya Akibat Resultan Beberapa Gaya

Coba kalian perhatikan gambar *crane* di awal bab. Pada setiap lengan *crane* terdapat beban. Beban-belan ini memberikan gaya berat yang arahnya ke bawah. Jika berat lengan *crane* diabaikan, berarti ada dua gaya yang bekerja. Lalu, bagaimanakah momen gaya di sekitar tiang *crane* (sumbu *crane*)? Perhatikan gambar 5.4.

Dari gambar tersebut, gaya akibat berat benda 1 (w_1) menyebabkan gerak rotasi berlawanan jarum jam (momen gaya bernilai negatif). Sementara gaya akibat gerak benda 2 (w_2) menyebabkan gerak rotasi searah putaran jarum jam (momen gaya bernilai positif). Jika pada sebuah benda bekerja dua atau lebih momen gaya, maka **momen gaya total di sekitar sumbu benda merupakan penjumlahan vektor semua momen gaya yang bekerja**. Dalam bahasa matematika dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\vec{\tau}_{\text{tot}} &= \vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 + \vec{\tau}_3 + \dots + \vec{\tau}_n \\ \vec{\tau}_{\text{tot}} &= \sum_{i=1}^n \vec{\tau}_i\end{aligned}$$

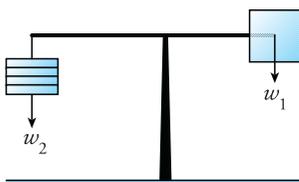
Keterangan:

$\vec{\tau}_{\text{tot}}$ = momen gaya total

$\vec{\tau}_1$ = momen gaya akibat gaya ke-1

$\vec{\tau}_2$ = momen gaya akibat gaya ke-2

Ingat, penjumlahan di atas adalah penjumlahan vektor. Jadi, penentuan arah putaran (arah momen gaya) sangat penting. Sekarang, mari kita kembali pada Gambar 5.4. Akibat w_1 dan w_2 , pada sumbu timbul dua momen gaya. Arah momen gaya ini berlawanan satu sama lain, sedangkan besar momen gaya total pada sumbu *crane* dicari dengan persamaan:



Gambar 5.4 Diagram gaya pada crane akibat beban di setiap lengannya.

$$\tau_{\text{tot}} = -\tau_1 + \tau_2$$

Berdasarkan persamaan tersebut, lengan-lengan *crane* akan seimbang jika $\tau_1 = \tau_2$, dan pada sumbu *crane* tidak bekerja momen gaya. Namun, jika $\tau_1 > \tau_2$, maka lengan-lengan *crane* akan berputar berlawanan putaran jarum jam, dengan sumbu *crane* sebagai sumbu putar. Hal sebaliknya juga berlaku. Itulah sebabnya mengapa benda pada lengan panjang dapat diatur-aturnya, dengan tujuan menyeimbangkan lengan-lengan *crane*.

Untuk memahami penjelasan tersebut, perhatikan contoh berikut.

Contoh

- Sebuah *crane* mempunyai beban tetap sebesar 200 kg yang diletakkan pada jarak 1 m dari sumbu. Dimanakah harus diletakkan beban sebesar 50 kg agar *crane* seimbang? (gunakan $g = 10 \text{ m/s}^2$).

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m_1 = 200 \text{ kg}$$

$$r_1 = 1 \text{ m}$$

$$m_2 = 50 \text{ kg}$$

Ditanya: r_2 agar seimbang.

Jawab: Agar *crane* seimbang, maka:

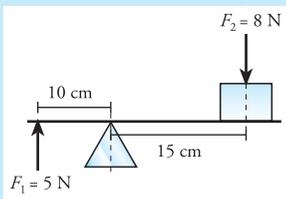
$$\tau_1 = \tau_2$$

$$m_1 g r_1 = m_2 g r_2$$

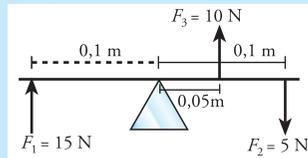
$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{m_1 r_1}{m_2} \\ &= \frac{200 \times 1}{50} \\ &= 4 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, agar seimbang, beban 50 kg harus diletakkan 4 m dari sumbu (tiang).

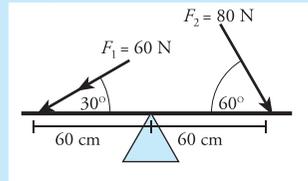
- Hitunglah momen gaya total di sekitar sumbu yang ditunjukkan pada setiap gambar.



(b)



(c)



Penyelesaian:

Diketahui: lihat gambar.

Ditanya: τ_{tot} pada setiap gambar.

Jawab:

- Untuk mencari τ_{tot} pada gambar a, kita menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{tot}} &= \tau_1 + \tau_2 \\ &= F_1 r_1 + F_2 r_2 \\ &= (5 \times 0,1) + (8 \times 0,15) \\ &= 1,4 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Jadi, momen gaya total pada gambar a adalah 1,4 Nm.

- Untuk mencari τ_{tot} pada gambar b, kita menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{tot}} &= \tau_1 + \tau_2 - \tau_3 \\ &= F_1 r_1 + F_2 r_2 - F_3 r_3 \\ &= (15 \times 0,1) + (5 \times 0,1) - (10 \times 0,05) \\ &= 1,5 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Jadi, momen gaya total pada gambar b adalah 1,5 Nm.

c. untuk mencari τ_{tot} pada gambar c, kita menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}\tau_{tot} &= -\tau_1 + \tau_2 \\ &= -F_1 r_1 \sin \alpha_1 + F_2 r_2 \sin \alpha_2 \\ &= (-60 \times 0,6 \sin 30^\circ) + (80 \times 0,4 \sin 60^\circ)\end{aligned}$$

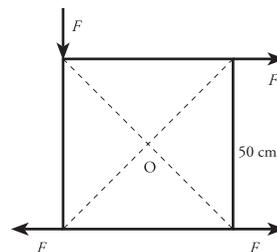
$$\begin{aligned}&= (-36 \times \frac{1}{2}) + (32 \times \frac{1}{2} \sqrt{3}) \\ &= (16\sqrt{3} - 18) \text{ Nm}\end{aligned}$$

Jadi, momen gaya total dari gambar c adalah $(16\sqrt{3} - 18) \text{ Nm}$.

Nah, mudah kan? Untuk menambah wawasan kalian, kerjakan soal pada *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

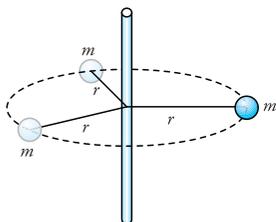
- Salah satu contoh alat yang menerapkan konsep momen gaya adalah timbangan dacin. Jelaskan penerapan momen gaya pada timbangan dacin tersebut.
- Dua orang anak yang massanya masing-masing 20 kg dan 30 kg sedang bermain jungkat-jungkit. Anak yang bermassa 30 kg duduk pada jarak 1,5 m dari penopang. Jika panjang papan pada setiap sisi 2,5 m, pada jarak berapakah anak lainnya harus duduk agar permainan dapat terus berlangsung?
- Pada sudut-sudut sebuah bujur sangkar dengan rusuk 50 cm bekerja 4 gaya yang sama besar, yaitu 10 N seperti gambar. Hitunglah jumlah momen gaya terhadap titik O.



B Momen Inersia

Dari penjelasan di depan, kita tahu bahwa momen gaya menyebabkan benda berotasi. Ketika momen gaya terus bekerja, sebuah benda akan mengalami percepatan sudut. Ini berarti momen gaya sebanding dengan percepatan sudut. Kesebandingan ini sama dengan kesebandingan gaya dan percepatan, yang telah kita pelajari di bab II.

Kalian masih ingat dengan bunyi Hukum II Newton? Dengan melihat persamaan gaya dan momen gaya pada gerak rotasi, kita dapat mencari hubungan momen gaya dengan percepatan sudut. Peran $\sum \vec{F}$ pada gerak linear digantikan oleh $\sum \vec{\tau}$ untuk gerak rotasi. Sementara peran percepatan (\vec{a}) digantikan oleh percepatan sudut ($\vec{\alpha}$). Lalu, apakah yang menggantikan peran massa (m)? Sekarang, coba kalian perhatikan sebuah benda bermassa m yang diputar sehingga berotasi dengan jejari r dari poros. Perhatikan Gambar 5.6.



Gambar 5.5 Partikel bermassa m berotasi dengan lintasan lingkaran berjari r .

Kita tinjau satu titik atau partikel pada benda yang bermassa m . Anggaphlah gaya yang menyebabkan partikel berputar adalah gaya \vec{F} yang bekerja menyinggung lintasan benda dan tegak lurus jejaringnya. Akibat gaya tersebut, partikel mendapatkan percepatan tangensial (\vec{a}_T). Hubungan besar gaya, massa, dan percepatan tangensial dirumuskan sesuai Hukum II Newton sebagai berikut.

$$F = m a_T$$

Ketika kita membahas persamaan gerak melingkar, kita mendapatkan hubungan percepatan tangensial dengan percepatan sudut. Dengan memasukkan persamaan $a = \alpha r$, kita mendapatkan persamaan:

$$F = m r \alpha$$

Jika dua ruas dikalikan dengan r maka:

$$rF = m r^2 \alpha$$

Kalian telah mengetahui bahwa faktor di ruas kiri tidak lain adalah momen gaya. Sementara faktor $m r^2$ di ruas kanan disebut **momen inersia partikel**. Momen inersia disimbolkan dengan huruf I , dan mempunyai satuan **kilogram meter kuadrat** ($\text{kg} \times \text{m}^2$).

Momen inersia $m r^2$ pada persamaan tersebut adalah momen inersia untuk satu partikel yang terdapat pada benda. Padahal kita tahu bahwa benda terdiri dari banyak partikel. Kita ambil contoh sebuah roda sepeda yang berputar pada sumbunya. Roda sepeda ini terdiri dari banyak partikel, yang mempunyai pelbagai jarak dari sumbu rotasi.

Momen inersia dari sebuah benda yang terdiri dari banyak partikel merupakan penjumlahan momen inersia semua partikel. Jadi, momen inersia roda sepeda dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots + m_n r_n^2$$

Keterangan:

I = momen inersia (kg m^2)

m_1, m_2, \dots = massa partikel 1, 2, ... (kg)

(perlu diingat, Σm_i sama dengan massa benda)

r_1, r_2, \dots = jarak partikel 1, 2, ... ke sumbu putar (m)

Untuk gerak rotasi, peran massa digantikan dengan momen inersia. Jadi, momen gaya dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

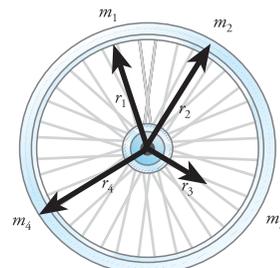
Teropong

Hukum II Newton menyatakan bahwa besar percepatan yang dialami benda berbanding lurus dengan gaya total yang bekerja pada benda tersebut. Hukum II Newton dapat dituliskan dalam bentuk,

$$\alpha \propto \sum F$$

$$\alpha = \frac{\sum F}{m}$$

$$\sum F = m \alpha$$



Gambar 5.6 Roda sepeda terdiri dari banyak partikel pada jarak jarak yang berbeda dari sumbu (as).

Angin tornado atau dikenal dengan sebutan anging puyuh merupakan angin badai yang paling menghancurkan di bumi. Angin ini mampu berputar dengan kecepatan putaran 480 km perjam. Jika angin ini terjadi di lautan, yang disebut angin puting beliung, dapat mengangkat air sehingga terbentuk tiang dari air dan juga mengangkat ikan-ikan.



www.usatoday.com

$$\Sigma \vec{\tau} = I\vec{\alpha}$$

Keterangan:

τ = momen gaya/torsi (Nm)

I = momen inersia (kg m^2)

α = percepatan sudut (rad/s)

Kalian telah mengetahui bahwa massa benda pada gerak translasi menyatakan ukuran kemampuan benda dalam mempertahankan kecepatan liniernya. Sementara itu, **momen inersia pada gerak rotasi untuk menyatakan ukuran kemampuan benda untuk mempertahankan kecepatan sudut rotasi.** Berdasarkan persamaan momen inersia pada suatu benda, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa jika konsentrasi massa semakin jauh dari pusat rotasi (sumbu rotasi), maka momen inersianya lebih besar.

Bentuk persamaan momen inersia berbeda untuk setiap benda dengan sumbu putar tertentu. Artinya, sebuah benda akan mempunyai momen inersia berbeda, jika sumbu putarnya berbeda. Persamaan momen inersia pada pelbagai bentuk benda dengan distribusi massa yang teratur dapat kalian lihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Momen inersia beberapa benda

$I = MR^2$ <p>Cincin tipis terhadap sumbu silinder</p>	$I = \frac{M}{2} (R_1^2 + R_2^2)$ <p>Silinder berongga (atau cincin) terhadap sumbu</p>
$I = \frac{MR^2}{2}$ <p>Silinder pejal terhadap sumbu silinder</p>	$I = \frac{MR^2}{4} + \frac{Ml^2}{12}$ <p>Silinder pejal (atau cakram) terhadap diameter pusat</p>
$I = \frac{Ml^2}{12}$ <p>Batang kurus terhadap sumbu yang melalui pusat dan \perp kepada panjangnya</p>	$I = \frac{Ml^2}{3}$ <p>Batang kurus terhadap sumbu yang melalui salah satu dan \perp kepada panjangnya</p>
$I = \frac{2MR^2}{5}$ <p>Bola pejal terhadap salah satu diameternya</p>	$I = \frac{2MR^2}{3}$ <p>Kulit bola tipis terhadap salah satu diameternya</p>
$I = \frac{MR^2}{2}$ <p>Cincin tipis terhadap salah satu diameternya</p>	$I = \frac{3MR^2}{2}$ <p>Cincin tipis terhadap salah satu garis singgungnya</p>

Halliday & Resnick, 1995. hlm. 354

Agar kalian lebih mudah dalam menguasai materi tersebut, perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

Dua buah bola, masing-masing bermassa 1 kg dan 0,7 kg dihubungkan dengan batang kaku dan ringan dengan panjang 1 m. Bola dapat dianggap sebagai sebuah partikel dan massa batang diabaikan. Tentukan momen inersia sistem, jika:

- sumbu putarnya adalah bola bermassa 1 kg,
- sumbu putarnya adalah bola bermassa 0,7 kg,
- sumbu putarnya berada 0,4 m dari bola 1 kg.
- sumbu putarnya tepat di tengah batang.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m_1 = 1 \text{ kg}$$

$$m_2 = 0,7 \text{ kg}$$

$$r_1 = 0,4 \text{ m}$$

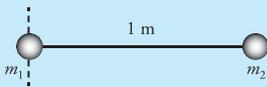
$$r_2 = (1 - 0,4) \text{ m} = 0,6 \text{ m}$$

Ditanyakan: I jika,

- sumbu putarnya bola bermassa 1 kg
- sumbu putarnya bola bermassa 0,7 kg
- sumbu putarnya 0,4 m dari bola 1 kg
- sumbu putarnya tepat di tengah.

Jawab:

- Jika sumbu putarnya pada bola bermassa 1 kg, sistem dapat digambarkan sebagai berikut.

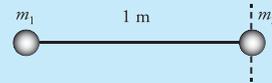


Berdasarkan gambar di atas, momen inersia sistem hanya dipengaruhi oleh bola bermassa 0,7 kg. Jadi, I dapat dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned} I &= mr^2 \\ &= 0,7 \times 1^2 \\ &= 0,7 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Jadi, momen inersia sistem dengan sumbu putar bola bermassa 1 kg adalah $0,7 \text{ kgm}^2$.

- Jika sumbu putarnya pada bola bermassa 0,7 kg, sistem dapat digambarkan sebagai berikut.

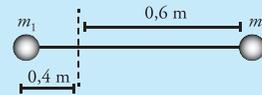


Dari gambar, momen inersia sistem hanya dipengaruhi oleh bola bermassa 1 kg. Jadi,

$$\begin{aligned} I &= mr^2 \\ &= 1 \times 1^2 \\ &= 1 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Jadi, momen inersia sistem dengan sumbu putar bola bermassa 0,7 kg adalah 1 kgm^2 .

- Jika sumbu putarnya 0,4 m dari bola 1 kg, sistem dapat digambarkan sebagai berikut.

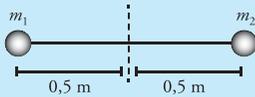


Dari gambar, momen inersia sistem dipengaruhi oleh kedua bola, sehingga:

$$\begin{aligned} I &= \sum_i m_i r_i^2 \\ &= m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 \\ &= 1 \times (0,4)^2 + 0,7 \times (0,6)^2 \\ &= 1 \times (0,16) + 0,7 \times (0,36) \\ &= 0,16 + 0,252 \\ &= 0,412 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Jadi besarnya momen inersia dari sistem tersebut adalah $0,412 \text{ kgm}^2$.

d. Jika sumbu putarnya di tengah batang,



Dari gambar, momen inersia dipengaruhi kedua bola, sehingga,

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

$$\begin{aligned} &= m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 \\ &= 1 \times (0,5)^2 + 0,7 \times (0,5)^2 \\ &= 1 \times (0,25) + 0,7 \times (0,25) \\ &= 0,25 + 0,175 \\ &= 2 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Jadi, momen inersia sistem jika sumbunya di tengah adalah 2 kgm^2 .

Kalian telah mengetahui adanya kemiripan antara gaya pada gerak linear dengan momen gaya pada gerak melingkar. Pada pembahasan gerak linear, kalian juga mengenal konsep momentum. Adakah momentum pada gerak rotasi? Kalian akan mengetahuinya dengan mempelajari materi di bawah ini.

T eropong

Di semester 1, kalian telah mempelajari materi Impuls dan momentum. Momentum linear dirumuskan sebagai berikut.

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

Hubungan momentum dan gaya diberikan dengan persamaan,

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

C Momentum Sudut dan Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Apakah pengertian momentum pada gerak linear (gerak lurus)? Dengan menganalogikan gerak linear dengan gerak rotasi, kita dapat mencari momentum pada gerak rotasi. Berdasarkan penjelasan di depan, fungsi massa (pada gerak linear) digantikan oleh momen inersia (pada gerak rotasi). Sementara itu, fungsi kecepatan digantikan dengan kecepatan sudut. Berdasarkan analogi tersebut, kita mempunyai besaran sebagai hasil kali momen inersia dengan kecepatan sudut. Besaran tersebut adalah **momentum sudut**.

Momentum sudut dilambangkan dengan huruf L dan mempunyai satuan kgm^2/s . Jadi, momentum sudut pada gerak rotasi dinyatakan dengan persamaan:

$$L = I \omega$$

Keterangan:

L = momentum sudut/momentum anguler ($\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$)

I = momen inersia (kg m^2)

ω = kecepatan sudut (rad/s)



Gambar 5.7 Genggaman tangan kanan untuk menentukan arah momentum sudut. Keempat jari menunjukkan arah rotasi (ω), sedangkan ibu jari menunjukkan arah momentum sudut.

Sama halnya dengan momentum linier, momentum sudut merupakan besaran vektor. Arah momentum sudut suatu benda yang berputar ditentukan dengan kaidah genggaman tangan kanan. Menurut kaidah ini, jika keempat jari yang dirapatkan sesuai dengan arah rotasi, maka arah ibu jari menyatakan arah vektor momentum sudut. Perhatikan Gambar 5.7.

Bagaimanakah bentuk hubungan momentum sudut dengan momenta? Dari definisi gaya sebagai turunan momentum, gaya dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$F = \frac{dp}{dt}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan $p = mv$ dan $v = \omega r$, persamaan tersebut menjadi:

$$\begin{aligned} F &= \frac{dp}{dt} \\ &= \frac{d(mv)}{dt} \\ &= \frac{d(mr\omega)}{dt} \end{aligned}$$

Jika kedua ruas dikalikan dengan r , kita mendapatkan persamaan:

$$\begin{aligned} rF &= \frac{d(mr^2\omega)}{dt} \\ &= \frac{d(L\omega)}{dt} \end{aligned}$$

Besaran di ruas kiri (rF) tidak lain adalah besar momen gaya (τ), dan $L\omega$ adalah momentum sudut. Jadi, hubungan momen gaya dan momentum sudut dinyatakan dengan persamaan:

$$\tau = \frac{dL}{dt}$$

Keterangan:

τ = momen gaya (Nm)

L = momentum sudut ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$)

t = waktu (s)

Ketika membahas momentum, kita tidak terlepas dari Hukum Kekekalan Momentum. Apakah Hukum Kekekalan Momentum berlaku pada gerak melingkar? Jika pada gerak linear berlaku Hukum Kekekalan Momentum, maka pada gerak rotasi berlaku **Hukum Kekekalan Momentum Sudut**.

Hukum Kekekalan Momentum Sudut menyatakan bahwa:

Jika resultan momen gaya (torsi) luar sama dengan nol ($\sum \tau = 0$), maka momentum sudutnya konstan.

Hukum Kekekalan Momentum Sudut dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut.

Terpong

Hukum Kekekalan Momentum Linier menyatakan bahwa jika pada suatu sistem tidak bekerja resultan gaya luar, maka momentum linier sistem adalah tetap (kekak). Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$m_1 \vec{v}_1 = m_2 \vec{v}_2$$

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$$

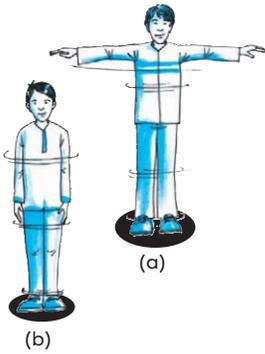
Keterangan:

I_1 = momen inersia 1

ω_1 = kecepatan sudut 1

I_2 = momen inersia 2

ω_2 = kecepatan sudut 2



Gambar 5.8 (a) Momen inersia besar, kecepatan sudut kecil. (b) Momen inersia kecil, kecepatan sudut besar.



members.aol.com

Gambar 5.9 Orang bersalto menerapkan Hukum kekekalan Momentum Sudut.

Banyak peristiwa sehari-hari yang dapat dijelaskan dengan hukum kekekalan momentum sudut. Salah satu contohnya adalah ketika kalian berputar di tempat. Kalian berputar lebih lambat ketika tangan kalian terentang, jika dibandingkan ketika tangan kalian lurus ke bawah. Apakah penyebabnya? Perhatikan Gambar 5.8.

Ketika berputar dengan tangan direntangkan, tangan berada pada jarak yang jauh dari sumbu putar yang membuat momen inersia menjadi besar. Namun, ketika tangan tiba-tiba diluruskan ke bawah atau bersedekap, momen inersia berubah menjadi lebih kecil. Perbedaan momen inersia pada dua keadaan ini menyebabkan perbedaan kecepatan sudut. Perbedaan ini dapat dijelaskan dengan Hukum Kekekalan Momentum Sudut. Ketika momen inersia besar, yaitu ketika tangan terentang, kecepatan sudutnya lebih kecil dibandingkan ketika tangan lurus ke bawah. Sesuai dengan Hukum Kekekalan Momentum sudut, ketika tangan lurus ke bawah, kecepatan sudutnya akan lebih besar karena momen inersianya kecil.

Contoh lain penerapan hukum kekekalan momentum adalah orang yang melakukan gerakan salto. Orang yang melakukan salto berusaha mempercepat putaran tubuhnya ketika bergerak naik dengan cara merapatkan dan menekuk tubuhnya. Dengan melakukan hal ini, berarti momen inersia semakin kecil dan kecepatan sudutnya semakin besar. Ketika bergerak turun, orang tersebut mencoba mengurangi kecepatan sudutnya dengan cara meluruskan badannya secara bertahap. Dengan melakukan gerakan ini, momen inersia akan bertambah besar. Akibatnya, kecepatan sudutnya berkurang dan orang akan tiba kembali dengan posisi tegak.

Untuk menambah wawasan kalian, kerjakan *Ekspedisi* berikut:

Ekspedisi

Dari pelbagai sumber, baik internet maupun media cetak, carilah minimal lima contoh peristiwa sehari-hari yang dapat dijelaskan dengan Hukum Momentum Sudut. Kemudian, jelaskan

dengan kata-kata kalian sendiri bagaimana hukum kekekalan momentum sudut menjelaskan peristiwa tersebut. Publikasikan hasil penelusuran kalian di majalah dinding sekolah.

Bagaimanakah penerapan persamaan-persamaan pada momentum sudut dalam menyelesaikan soal? Perhatikan contoh berikut ini.

Contoh

Seorang balerina melakukan gerak berputar dengan frekuensi 2 putaran ketika tangannya terentang. Momen inersia pada keadaan tersebut adalah 5 kgm^2 . Beberapa saat kemudian, ia melipat tangannya di depan dada. Akibatnya, ia dapat melakukan 3 putaran tiap detik. Tentukan momen inersia pada keadaan ini.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$f_1 = 2 \text{ putaran}$$

$$I_1 = 5 \text{ kgm}^2$$

$$f_2 = 3 \text{ putaran}$$

Ditanyakan: I_2

Jawab:

Untuk menyelesaikan soal ini, kita dapat menggunakan Hukum Kekekalan Momentum Sudut.

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$$

$$I_1 2\pi f_1 = I_2 2\pi f_2$$

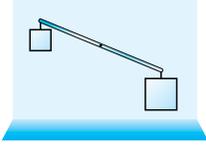
$$I_2 = \frac{I_1 f_1}{f_2}$$

$$= \frac{5 \times 2}{3}$$

$$= 3,3 \text{ kgm}^2$$

Jadi, momen inersia ketika tangannya bersedekap adalah $3,3 \text{ kgm}^2$.

Uji Kompetensi

- Sebuah batang tipis dengan panjang 0,75 m diberi poros pada pusatnya. Kemudian, poros ditempelkan pada dinding, sehingga batang bebas berotasi. Pada kedua ujung batang dipasang balok dengan beban 10 N dan 20 N. Jika massa batang diabaikan, berapakah kelajuan linier balok 20 N, ketika mencapai titik terendah?
- Dengan melihat tabel 1.1 tentukan besar momen inersia benda-benda berikut.
 - Sebuah batang bermassa 0,6 kg dan massa jenis 300 g/m dengan sumbu putar di ujungnya.
 - Sebuah buku yang tipis berukuran 18 cm \times 28 cm dan bermassa 200 gram dengan sumbu putar di pusatnya.
 - Sebuah cincin tipis berdiameter 1,2 cm dan bermassa 1 gram dengan diameternya sebagai sumbu putar.
 - Sebuah bola besi berdiameter 7 cm dan massa jenisnya 1 ton/m^3 dengan sumbu putar pada diameter bola.
 - Sebuah barbel dengan berat setiap sisinya 35 N dengan panjang 20 cm jika diputar tepat di tengah. Anggap sisi barbel adalah silinder pejal, massa batang penghubung diabaikan, dan gravitasi bumi 10 m/s^2 .
- Seseorang anak memutar sebuah tongkat sepanjang 1 m dan bermassa 200 gram, dengan sumbu putar di salah satu ujungnya. Tongkat tersebut dapat berputar sebanyak 2 putaran per detik. Jika anak memutar tongkat dengan sumbu di tengah, berapa banyak putaran yang terjadi tiap 5 menit?
- Seorang pemain ice skating melakukan gerak memutar. Jika tangannya direntangkan ke samping, ia mampu melakukan 2 putaran tiap detik. Namun, jika ia merapatkan tangannya di samping badan, ia mampu melakukan putaran 180 putaran tiap menit. Jika momen inersia ketika tangan direntangkan $12,5 \text{ kgm}^2$, tentukan momen inersia ketika tangannya dirapatkan.

Kita telah mempelajari beberapa konsep fisika yang mendasari gerak rotasi. Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering menjumpai benda yang melakukan gerak rotasi, misalnya roda. Namun, roda yang dipakai pada kendaraan tidak hanya melakukan gerak rotasi, tetapi juga mengalami perpindahan tempat, atau bergerak translasi. Bagaimanakah analisis fisika menjelaskan kejadian tersebut? Ikuti terus penjelasan di bawah ini.

D Hukum II Newton pada Gerak Rotasi

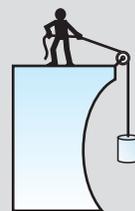
Pada materi Gaya dan Gerak, kita telah menggunakan Hukum II Newton untuk menjelaskan gerak sistem benda yang dihubungkan dengan tali melalui katrol. Namun, pada pembahasan tersebut, gerak katrol yang berotasi tidak diperhitungkan. Nah, bagaimanakah jika gerak rotasi katrol diperhitungkan?

Selain masalah katrol, di subbab ini, kita juga akan menganalisis gerak roda yang melakukan gerak translasi dan rotasi sekaligus. Namun, sebelum membahas dua hal tersebut, coba kalian diskusikan pertanyaan pada *Eureka* berikut.

Eureka

Berdiskusilah dengan teman sebangkumu untuk menemukan jawaban dari pertanyaan-pertanyaan di bawah ini.

1. Bagaimanakah bunyi Hukum I Newton, hukum II Newton, dan Hukum III Newton?
2. Perhatikan gambar di samping ini. Gambarkan diagram gaya-gaya yang berkerja pada sistem benda tersebut. Abaikan gerak rotasi katrol.
3. Apakah yang akan terjadi jika seseorang mengerem laju sepeda motornya di jalan yang licin?
4. Kita sering mengatakan roda mengalami slip. Apakah arti slip? Bagaimanakah kaitannya dengan gerak rotasi dan gerak translasi?



Presentasikan hasil diskusi kalian di depan teman-teman lainnya.

Dengan menjawab pertanyaan pada *Eureka* di atas, paling tidak kalian ingat kembali materi yang telah lalu. Materi-materi tersebut berkaitan erat dengan materi yang akan kita pelajari. Sekarang kita akan menganalisis gerak rotasi katrol yang digunakan untuk mengangkat benda. Untuk itu, simaklah penjelasan berikut.

1. Momen Gaya pada Katrol

Di kelas X dan kelas XI semester 1, kalian telah mempelajari materi dinamika partikel untuk gerak lurus (gerak linear). Pada Subbab kali ini, kalian akan mempelajari dinamika rotasi yang didasari oleh Hukum II Newton. Hukum II Newton tidak hanya dapat digunakan untuk memecahkan masalah dinamika translasi, tetapi dapat juga digunakan untuk menjelaskan dinamika rotasi.

Contoh sederhana tentang dinamika rotasi yang dapat dijelaskan dengan Hukum II Newton adalah gerak putaran katrol. Kita tahu, katrol sering digunakan untuk mengangkat atau memindahkan benda. Ketika digunakan untuk mengangkat benda, katrol berputar pada sumbunya. Dengan kata lain, katrol melakukan gerak rotasi. Perhatikan Gambar 5.10.

Gaya apakah yang menyebabkan katrol berotasi? Gaya pada tali yang digunakan atau gaya yang menyinggung katrol menyebabkan katrol berotasi. Pada pembahasan di depan, kita telah menemukan persamaan:

$$\sum \vec{\tau} = I\vec{\alpha}$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan Hukum II Newton untuk gerak rotasi. Jika persamaan tersebut diterapkan pada gerak katrol, kita mendapatkan persamaan berikut.

$$F_T r - f r = I\alpha$$

Jika katrol licin, maka f diabaikan, sehingga:

$$F_T r = I\alpha$$

Bagaimanakah kita mencari F_T ? Untuk mencari F_T kita harus tahu arah gerak benda. Gerak benda mempunyai dua kemungkinan yaitu bergerak ke bawah atau bergerak ke atas.

a. Jika benda bergerak ke bawah

Jika benda bergerak ke bawah, maka berlaku Hukum II Newton sebagai berikut.

$$\begin{aligned} w - F_T &= ma \\ mg - F_T &= ma \\ F_T &= mg - ma \end{aligned}$$

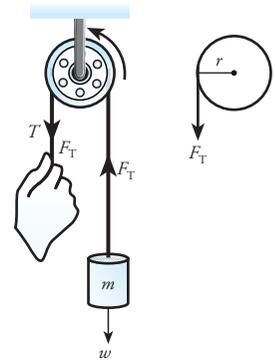
Kita juga tahu hubungan a dan α , yang dinyatakan dengan

$$a = \alpha r$$

Jadi, persamaan rotasi pada katrol dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} (mg - ma)r &= I\alpha \\ mgr - m(\alpha r)r &= I\alpha \\ mgr - mr^2\alpha &= I\alpha \end{aligned}$$

$$mgr = (I + mr^2)\alpha$$



Gambar 5.10 Skema gaya-gaya yang bekerja pada katrol.

$$\alpha = \frac{mgr}{I + mr^2}$$

Keterangan:

α = percepatan sudut (rad/s^2)

m = massa beban (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

r = jejari katrol (m)

I = momen inersia katrol (kgm^2)

b. Jika benda bergerak ke atas

Jika benda bergerak ke atas, berlaku persamaan sebagai berikut.

$$F_T - w = ma$$

$$F_T - mg = ma$$

$$F_T = mg + ma$$

Sehingga, percepatan sudut katrol dapat dicari dengan persamaan:

$$(mg + ma)r = I\alpha$$

$$mgr + m(\alpha r)r = I\alpha$$

$$mgr + mr^2\alpha = I\alpha$$

$$mgr = (I - mr^2)\alpha$$

$$\alpha = \frac{mgr}{I - mr^2}$$

Agar lebih jelas, perhatikan contoh berikut

Contoh

Seseorang menggunakan katrol berjejari 10 cm dan bermassa 1 kg untuk mengangkat beban seberat 40 N. Katrol yang digunakan berupa silinder pejal. Berapakah besar perlambatan sudut katrol?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$w = 40 \text{ N}$$

$$m_{\text{katrol}} = 1 \text{ kg}$$

Ditanya: α

Jawab:

Beban bergerak ke atas, sehingga percepatan sudut dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{mgr}{I - mr^2} \\ &= \frac{wr}{I - mr^2} \end{aligned}$$

Ingat momen inersia untuk silinder pejal diberikan dengan persamaan

$$I = \frac{1}{2} m_{\text{katrol}} r^2$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{wr}{\frac{1}{2} m_{\text{katrol}} r^2 - mr^2} \\ &= \frac{40 \times 0,1}{\left(\frac{1}{2} \times 1 \times (0,1)^2\right) - (1 \times (0,1)^2)} \\ &= \frac{4}{-0,035} \\ &= -114,3 \text{ rad/s}^2 \end{aligned}$$

Jadi, katrol mengalami perlambatan sudut sebesar $114,3 \text{ rad/s}^2$.

Setelah kita menganalisis gerak rotasi katrol, sekarang kita akan menganalisis gerak menggelinding. Apakah pengertian gerak menggelinding? Cari tahu jawabannya pada uraian selanjutnya.

2. Gerak Menggelinding

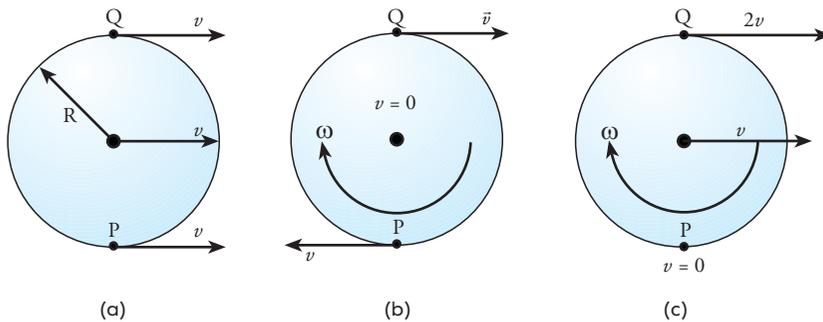
Ketika sepeda bergerak, roda sepeda berputar dan berpindah tempat. Ini berarti roda melakukan gerak rotasi dan gerak translasi sekaligus. Gerak roda sepeda ini disebut gerak **menggelinding**. Jadi, gerak menggelinding terjadi pada benda yang melakukan gerak rotasi dan translasi sekaligus. Perhatikan Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Roda sepeda melakukan gerak translasi dan rotasi sekaligus.

Bagaimanakah kita membedakan gerak rotasi, gerak translasi, dan gerak menggelinding? Perhatikan Gambar 5.12. Jika roda hanya bertranslasi, maka titik pusat O (disebut **titik pusat massa**) dan titik pada roda (misal titik P dan Q) bergerak dengan kecepatan sama dan menempuh jarak yang sama setiap waktu. Sementara ketika hanya berotasi, titik pusat O tetap diam, tetapi titik P dan Q bergerak dengan kecepatan sudut ω dan kecepatan linear \vec{v} dengan arah berlawanan. Namun, ketika roda menggelinding, titik pusat O bergerak dengan kecepatan \vec{v} . Sementara itu, kecepatan linear titik P sama dengan nol dan kecepatan linear titik Q sama

gbr 15 dengan $2\vec{v}$.



Gambar 5.12 (a) Gerak translasi. (b) Gerak rotasi. (c) Gerak menggelinding.

Sekarang mari kita tinjau gerak menggelinding. Gaya yang menyebabkan roda berotasi adalah gaya yang bersinggungan dengan roda, yaitu gaya gesek. Diagram gaya pada benda yang bergerak menggelinding digambarkan pada Gambar 5.13.

Sesuai dengan Hukum II Newton, kita mendapatkan bentuk persamaan:

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m \vec{a}_{PM} \\ \vec{F} - \vec{f} &= m \vec{a}_{PM} \end{aligned}$$

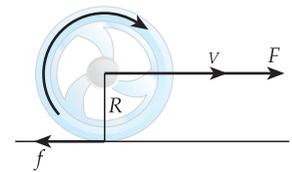
Keterangan:

\vec{F} = gaya yang menyebabkan benda bergerak (N)

\vec{f} = gaya gesek (N)

m = massa benda (kg)

\vec{a}_{PM} = percepatan pusat massa (m/s^2)



Gambar 5.13 Gaya gesek menyebabkan roda berotasi pada pusat massanya.

Kita tahu bahwa gaya gesek menyebabkan roda berotasi. Ini berarti gaya gesek menyebabkan momen gaya di sumbu rotasi. Jadi, besar momen gaya yang bekerja diberikan dengan persamaan:

$$\tau = f r$$

$$I_{PM} \alpha = f r$$

$$I_{PM} \frac{a_{PM}}{r} = f r$$

$$f = I_{PM} \frac{a_{PM}}{r^2}$$

Keterangan:

I_{PM} = momen inersia benda dengan sumbu putar di pusat massa

Jika persamaan gaya gesek tersebut disubstitusikan ke Hukum II Newton di depan, kita dapatkan persamaan:

$$F - I_{PM} \frac{a_{PM}}{r^2} = m a_{PM}$$

$$F = \left(m + \frac{I_{PM}}{r^2}\right) a_{PM}$$

$$a_{PM} = \frac{F}{m + \frac{I_{PM}}{r^2}}$$

Untuk membantu kalian dalam memahami uraian tersebut, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Seorang anak menggelindingkan sebuah bola plastik dengan gaya 5 N. Jika jejari bola 10 cm dan massanya 60 gram, tentukan:

- momen inersia pusat massa bola tersebut.
- percepatan yang dialami bola.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$F = 5 \text{ N}$$

$$r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$m = 60 \text{ g} = 0,06 \text{ kg}$$

Ditanyakan:

- I_{PM}
- a

Jawab:

- Bola terbuat dari plastik, berarti untuk mencari momen inersia pusat massanya, kita melihat momen inersia kulit bola. Berdasarkan Tabel 5.1, kita mendapatkan,

$$\begin{aligned} I_{PM} &= \frac{2}{3} m r^2 \\ &= \frac{2}{3} \times 0,06 \times (0,1)^2 \\ &= 4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Jadi, momen inersia bola melalui pusat massa adalah $4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$.

- Untuk mencari percepatan bola, kita dapat menggunakan persamaan berikut.

$$a_{\text{PM}} = \frac{F}{m + \frac{I_{\text{PM}}}{r^2}}$$

$$= \frac{5}{0,06 + \frac{4 \times 10^{-4}}{(0,1)^2}}$$

$$= \frac{5}{0,06 + 0,04}$$

$$= 50 \text{ m/s}^2$$

Jadi, percepatan bola tersebut adalah 50 m/s^2 .

Selain menggunakan Hukum II Newton, kita dapat menganalisis gerak rotasi menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Bagaimanakah analisis gerak rotasi menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik? Untuk lebih jelasnya, simaklah penjelasan di bawah ini.

3. Hukum Kekekalan Energi pada Gerak Rotasi

Benda dengan massa m yang bergerak translasi dengan kelajuan v bisa dipastikan mempunyai energi kinetik. Seperti halnya gerak translasi, benda yang berotasi juga mempunyai energi kinetik. Energi kinetik rotasi dapat diturunkan dari energi kinetik translasi.

Kalian telah mengetahui persamaan energi kinetik translasi yakni sebagai berikut.

$$E_{\text{K trans}} = \frac{1}{2}mv^2$$

Dengan mensubstitusikan persamaan, $v = r \omega$ maka:

$$E_{\text{K rot}} = \frac{1}{2}m(r)^2$$

$$E_{\text{K rot}} = \frac{1}{2}(mr^2)\omega^2$$

Faktor mr^2 pada persamaan tersebut tidak lain adalah momen inersia (I). Jadi:

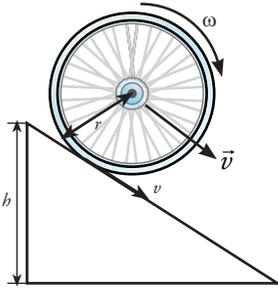
$$E_{\text{K rot}} = \frac{1}{2}I\omega^2$$

Keterangan: $E_{\text{K rot}}$ = energi kinetik rotasi

Persamaan tersebut menyatakan energi kinetik dari suatu benda tegar yang mempunyai momen inersia I dan kecepatan sudut ω . Lalu, bagaimanakah energi kinetik pada gerak menggelinding? Benda dikatakan menggelinding jika melakukan gerak translasi sekaligus gerak rotasi. Jadi, energi kinetik yang dimiliki benda yang menggelinding merupakan jumlah energi kinetik translasi dan energi kinetik rotasinya.

$$E_K = E_{K_{trans}} + E_{K_{rot}}$$

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$



Gambar 5.14 Roda yang menggelinding dari ketinggian tertentu mempunyai energi kinetik translasi, energi kinetik rotasi, dan energi potensial.

Jika benda menggelinding dari ketinggian tertentu, selain mempunyai energi kinetik, ia juga memiliki energi potensial. Energi total yang dimiliki benda merupakan energi mekanik yang dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$E_m = E_{K_{trans}} + E_{K_{rot}} + E_p$$

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + mgh$$

Keterangan:

m = massa (kg)

v = kelajuan linear (m/s)

I = momen inersia (kg m²)

ω = kecepatan sudut terhadap poros (rad/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

h = ketinggian benda

Untuk menganalisis gerak benda kita menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik yang dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$E_{m1} = E_{m2}$$

$$E_{K_{trans1}} + E_{K_{rot1}} + E_{p1} = E_{K_{trans2}} + E_{K_{rot2}} + E_{p2}$$

Bagaimanakah penerapan Hukum Kekekalan Energi Mekanik untuk menyelesaikan soal-soal yang berhubungan dengan gerak rotasi dan menggelinding? Perhatikan contoh berikut.

Contoh

- Sebuah roda dengan jari 19 cm, dan bermassa 4,5 kg, berputar dengan kecepatan 50 rad/s. Jika roda dianggap silinder tipis berongga. Tentukanlah energi kinetik rotasi roda.

Penyelesaian :

Diketahui:

$$m = 4,5 \text{ kg,}$$

$$r = 19 \text{ cm} = 1,9 \times 10^{-1} \text{ m}$$

$$\omega = 50 \text{ rad/s}$$

Ditanyakan: $E_{k_{rot}}$

Jawab:

Untuk mencari energi kinetik, terlebih dahulu kita mencari momen inersia roda. Berdasarkan Tabel 5.1, momen inersia untuk silinder tipis berongga adalah:

$$\begin{aligned} I &= mr^2 \\ &= 4,5 \times (1,9 \times 10^{-1})^2 \\ &= 4,5 \times (3,61 \times 10^{-2}) \\ &= 1,624 \times 10^{-1} \\ &= 0,1624 \text{ kg m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_k &= \frac{1}{2} I \omega^2 \\
 &= \frac{1}{2} (0,1624) (50)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \times 406 \\
 &= 203 \text{ J}
 \end{aligned}$$

Jadi, energi kinetik rotasi roda tersebut adalah 203 joule.

2. Sebuah bola pejal yang mempunyai berat 64 N dan jari-jari 0,1 m bergerak dengan kelajuan 32 m/s sambil berotasi. Tentukanlah energi kinetik bola pejal tersebut.

Penyelesaian :

Diketahui :

$$w = 64 \text{ N}$$

$$m = w/g = 64/10 = 6,4 \text{ kg}$$

$$v = 32 \text{ m/s,}$$

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

Ditanya : E_K

Jawab:

Momen inersia untuk bola pejal adalah

$$I = \frac{2}{5} mr^2$$

$$= \frac{2}{5} \times 6,4 \times (0,1)^2$$

$$= 2,56 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

Kecepatan sudut dapat dicari dengan persamaan:

$$\omega = \frac{v}{r}$$

$$= \frac{32}{0,1}$$

$$= 320 \text{ rad/s}$$

Energi kinetik total:

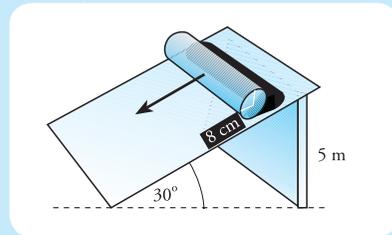
$$E_K = E_{K \text{ Trans}} + E_{K \text{ Rot}}$$

$$= \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{1}{2} \times 6,4 \times 32^2\right) + \\
 &\frac{1}{2} \times (2,56 \times 10^{-3} \times 320^2) \\
 &= 3276,8 + 131,07 \\
 &= 3407,87 \text{ J} \\
 &= 3,4 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Jadi, besar energi kinetik yang dimiliki bola tersebut adalah 3,4 kJ.

3. Sebuah silinder pejal homogen mempunyai jari-jari 8 cm dan massa 800 gram. Silinder tersebut menggelinding dari puncak bidang miring seperti gambar, tanpa kecepatan awal. Tentukanlah kelajuan silinder ketika tiba di dasar bidang.



Penyelesaian:

Diketahui:

$$r = 8 \text{ cm}$$

$$h = 5 \text{ m,}$$

$$m = 800 \text{ g} = 0,8 \text{ kg}$$

$$\theta = 30^\circ$$

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

Ditanyakan : v di dasar bidang

Jawab:

Untuk menyelesaikan soal ini, kita dapat menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik sebagai berikut.

$$E_{K \text{ Trans } 1} + E_{K \text{ Rot } 1} + E_{P 1} = E_{K \text{ Trans } 2} +$$

$$E_{K \text{ Rot } 2} + E_{P 2}$$

Karena silinder bergerak tanpa kecepatan awal, maka $E_{K \text{ Trans}} = E_{K \text{ Rot}} = 0$. Ketika sampai di dasar bidang, silinder tidak mempunyai ketinggian, sehingga $E_{P 2} = 0$. Jadi, persamaan tersebut menjadi:

$$E_p = E_{K \text{ Trans } 2} + E_{K \text{ Rot } 2}$$

$$mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}I\omega_2^2$$

Ingat untuk silinder pejal berlaku:

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \text{ dan, } \omega = \frac{v}{r}$$

Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}mr^2\right) \times \left(\frac{v_2}{r}\right)^2$$

$$gh_1 = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{1}{4}v_2^2$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{4}{3}gh_1}$$

$$= \sqrt{\frac{4}{3} \times 10 \times 6}$$

$$= 4\sqrt{5} \text{ m/s}^2$$

Jadi, besar kecepatan silinder ketika sampai di dasar bidang adalah $= 4\sqrt{5} \text{ m/s}^2$.

Mudah dan mengasyikkan bukan? Nah, untuk melatih keterampilan kalian dalam menggunakan persamaan-persamaan yang telah dipelajari disubbab ini, kerjakan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

- Sebuah katrol digunakan untuk mengambil air dari sumur. Katrol tersebut berupa silinder pejal berjari 8 cm dan bermassa 2,5 kg. Jika massa ember beserta isinya adalah 4 kg dan gravitasi bumi 10 m/s^2 , tentukan:
 - momen inersia katrol,
 - percepatan sudut katrol,
 - perlambatan yang dialami ember.
- Seseorang menendang bola yang diam dengan gaya 10 N. Akibatnya, bola menggelinding sejauh 10 m dalam waktu 5 detik. Jika bola mempunyai diameter 20 cm dan massanya 0,8 kg, tentukan:
 - momen inersia bola,
 - energi kinetik bola,
 - kecepatan bola pada saat $t = 3$ detik.
- Sebuah silinder pejal menggelinding di bidang miring sepanjang 5 m dari ketinggian 3 meter. Silinder tersebut mempunyai diameter 50 cm, panjang 40 cm, dan massa 10 kg. Jika silinder menggelinding dengan kecepatan awal 0,5 m/s, tentukan:
 - momen inersia silinder,
 - energi kinetik silinder,
 - kecepatan silinder ketika mencapai dasar bidang.
- Lengkapilah tabel berikut.

Gerak linear		Gerak rotasi	
Besaran	Rumus	Besaran	Rumus
Kecepatan linear	$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}$	...	$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$
Percepatan linear	...	Percepatan sudut	...
...	$F = ma$	Momen gaya	...

Momentum linear	...	...	$p = I\omega^2$
...	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$	Energi kinetik rotasi	...

Di awal bab ini, kita membahas tentang *crane*. Untuk membuat kedua lengan *crane* seimbang, beban dengan massa tertentu pada lengan panjang harus diletakkan pada jarak tertentu dari tiang atau sumbu. Peristiwa ini merupakan salah satu contoh keseimbangan benda tegar. Untuk mengetahui lebih banyak tentang keseimbangan benda tegar, pelajirlah uraian di bawah ini.

E Keseimbangan Benda Tegar

Benda tegar adalah benda yang bentuknya tidak berubah ketika diberi gaya luar. Salah satu contoh benda tegar adalah *crane* yang telah kita bahas di awal bab ini. *Crane* terdiri dari tiang utama (sumbu), lengan dengan beban tetap (lengan kuasa), dan lengan tempat beban (lengan beban) yang panjang. Menurut kalian, mengapa untuk membuat lengan *crane* seimbang, beban bermassa tertentu harus diletakkan pada jarak tertentu dari titik sumbu? Tujuannya adalah agar momen gaya yang ditimbulkan beban dan momen gaya yang ditimbulkan kuasa sama besar. Mengapa momen gaya pada kedua lengan *crane* harus sama besar agar seimbang? Sebelum kita melangkah lebih lanjut coba kalian lakukan kegiatan pada *Ekspedisi* berikut

Ekspedisi

Coba kalian buat susunan sendok dan garpu seperti gambar. Kemudian analisislah mengapa sendok dan garpu yang hanya ditopang sebatang korek api tersebut tidak jatuh? Publikasikan hasil analisis kalian di majalah dinding atau majalah sekolah.



1. Syarat Keseimbangan

Kalian telah mengetahui bahwa yang menyebabkan momen gaya pada *crane* adalah gaya berat pada beban dan kuasa, yang sama-sama mengarah ke bawah. Namun, momen gaya yang ditimbulkan kedua gaya berat tersebut mempunyai arah berlawanan. Jika besar kedua momen gaya sama besar maka *crane* dikatakan dalam keadaan keseimbangan rotasi. Artinya, *crane* tidak berotasi selama tidak ada gaya luar yang bekerja.

Sekarang coba kalian perhatikan sebuah bola yang diam. Jika bola menggelinding, berarti bola melakukan gerak rotasi dan translasi. Ini berarti ketika bola diam, bola tidak berotasi atau bertranslasi. Pada keadaan

ini, bola berada dalam **keseimbangan statis**. Artinya, bola tidak melakukan gerak rotasi maupun gerak translasi atau bola dalam **keseimbangan rotasi** dan **keseimbangan translasi**. Namun, jika bola berotasi di tempat, bola tidak dapat dikatakan dalam keseimbangan rotasi. Demikian juga ketika bola bertranslasi tanpa berotasi, bola tidak berada dalam keseimbangan translasi.

Berdasarkan contoh tersebut, kita dapat menyimpulkan bahwa: Suatu benda tegar berada dalam keseimbangan statis jika benda seimbang secara translasi dan seimbang secara rotasi. Jadi, syarat keseimbangan statis ada dua yaitu seimbang translasi dan seimbang rotasi.

Keseimbangan translasi tercapai bila resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol, atau

$$\sum F = 0$$

Jika gaya diuraikan dalam bidang kartesius, maka:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \end{aligned}$$

Sementara keseimbangan rotasi dapat tercapai jika resultan momen gaya sama dengan nol. Jadi, syarat keseimbangan rotasi adalah:

$$\sum \tau = 0$$



Microsoft Encarta Premium 2006

Gambar 5.15 Tongkat panjang digunakan pemain akrobat untuk menjaga keseimbangan

Jenis keseimbangan rotasi dapat ditemui pada pemain akrobat yang berjalan di atas tali dengan membawa tongkat yang panjang. Pemain ini memegang tongkat tepat di tengah-tengah. Akibatnya, gaya berat tongkat pada setiap sisi sama besar. Gaya ini menimbulkan momen gaya pada sumbu putar (tubuh pemain akrobat) sama besar dengan arah berlawanan, sehingga terjadi keseimbangan rotasi. Ini menyebabkan pemain lebih mudah berjalan di atas tali.

Untuk mengetahui kegunaan persamaan keseimbangan benda tegar, perhatikan contoh berikut.

Contoh

1. Tiga orang anak bermain jungkat-jungkit. Sebelah kanan penompang berisi anak bermassa 40 kg. Sementara sebelah kiri berisi dua anak masing-masing bermassa 35 kg, yang duduk pada jarak 0,5 m dan 1 m dari penopang. Jika balok yang digunakan bermassa 8 kg, tentukan letak tempat duduk anak di sebelah

kanan penompang agar jungkat-jungkit seimbang.

Penyelesaian:

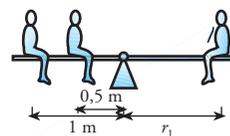
Diketahui:

$$m_1 = 40 \text{ kg}$$

$$m_2 = m_3 = 35 \text{ kg}$$

$$r_2 = 0,5 \text{ m}$$

$$r_3 = 1 \text{ m}$$



Ditanyakan: r_1

Jawab:

Diagram gaya-gaya yang bekerja pada jungkat-jungkit dapat dilihat pada gambar. Dari gambar tersebut, ada empat gaya yang bekerja, yaitu w_1 , w_2 , w_3 , dan w_b . Namun w_b berada tepat di sumbu, sehingga w_b tidak menimbulkan momen gaya. Agar seimbang,

maka:

$$\sum \tau = 0$$

$$\tau_1 - \tau_2 - \tau_3 = 0$$

$$\tau_1 = \tau_2 + \tau_3$$

$$m_1 r_1 = m_2 r_2 + m_3 r_3$$

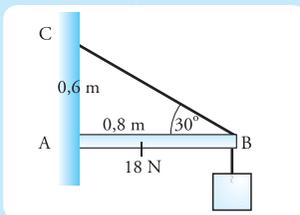
$$40 r_1 = (35 \times 0,5) + (35 \times 1)$$

$$r_1 = 1,31 \text{ m}$$

Jadi, anak bermassa 40 kg harus duduk pada jarak 1,31 m dari penopang.

2. Sebuah batang homogen AB dengan berat 18 N dan panjang 80 cm

digantung dengan tali BC. Lihat gambar. Berat beban yang tergantung adalah 30 N. Jika jarak AC 60 cm, tentukan besar tegangan tali agar sistem seimbang.



Penyelesaian:

Diketahui:

lihat gambar

$$w_{AB} = 18 \text{ N}$$

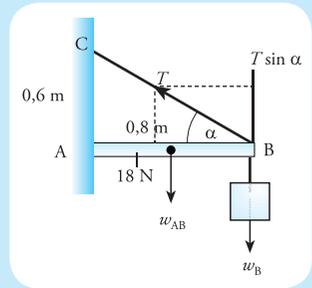
$$L_{AB} = 80 \text{ cm}$$

$$= 0,8 \text{ m}$$

$$AC = 60 \text{ cm}$$

$$= 0,6 \text{ m}$$

$$w_b = 30 \text{ N}$$



Ditanyakan: T (tegangan tali)

Jawab: Diagram gaya yang bekerja pada sistem tersebut dapat dilihat pada gambar di atas.

$$BC = \sqrt{AB^2 + AC^2}$$

$$= \sqrt{0,8^2 + 0,6^2}$$

$$= 1 \text{ m}$$

Syarat keseimbangan: $\sum \tau = 0$. Karena sumbu putarnya di titik A maka,

$$w_{AB} \left(\frac{1}{2} AB \right) + w_b AB - (T \sin \alpha) AB = 0$$

$$w_{AB} \left(\frac{1}{2} AB \right) + w_b AB - T \left(\frac{AC}{BC} \right) AB = 0$$

$$18 \left(\frac{1}{2} \times 0,8 \right) + 30 \times 0,8 - T \left(\frac{0,6}{1} \right) \times 0,8 = 0$$

$$7,2 + 24 = 0,48 T$$

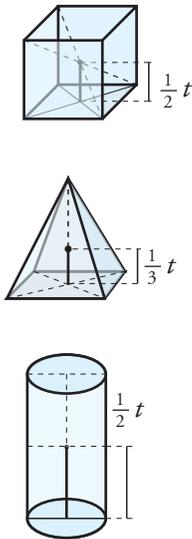
$$T = \frac{31,2}{0,48}$$

$$T = 65 \text{ N}$$

Jadi, besar tegangan tali adalah 65 N.

2. Titik Berat

Setiap partikel pada benda tegar mempunyai berat. Resultan gaya berat dari semua partikel menghasilkan gaya berat benda. Titik tangkap gaya berat benda disebut **titik berat**. Benda homogen yang memiliki sumbu simetris, misalnya berbentuk kubus, sangatlah mudah ditentukan titik beratnya. Titik berat benda homogen berbentuk kubus terletak tepat di titik tengah kubus. Perhatikan Gambar 5.16 untuk memahami konsep titik berat pada pelbagai bentuk benda.



Gambar 5.16 Letak titik berat pada pelbagai benda.

Titik berat seperti ditunjukkan Gambar 5.16 adalah titik berat untuk benda homogen (sebaran partikel merata di semua tempat). Bagaimanakah cara menentukan titik berat jika beberapa benda homogen digabung? Untuk menentukan titik berat benda gabungan, kita dapat menentukan dengan sistem koordinat. Kita ambil contoh dua buah batu bata yang ditumpuk seperti Gambar 5.17.

Bagaimanakah cara mencari titik berat dari gabungan kedua batu bata tersebut? Kita anggap batu bata adalah benda homogen. Jadi titik berat pada setiap bata adalah tepat di titik tengah. Jika kita mengambil sumbu koordinat seperti gambar, maka letak titik berat masing-masing bata adalah di koordinat (x_1, y_1) dan di (x_2, y_2) .

Kalian tahu bahwa berat gabungan dari kedua batu bata tersebut adalah jumlah berat dari masing-masing batu bata.

$$w_{gab} = w_1 + w_2$$

Kita misalkan letak titik berat gabungan adalah pada koordinat (x_0, y_0) . Jika benda berotasi terhadap sumbu y , maka momen gaya yang timbul adalah:

$$\begin{aligned} \tau_{gab} &= \tau_1 + \tau_2 \\ x_0 w_{gab} &= x_1 w_1 + x_2 w_2 \end{aligned}$$

Jadi, absis koordinat titik berat gabungan dapat dicari dengan persamaan:

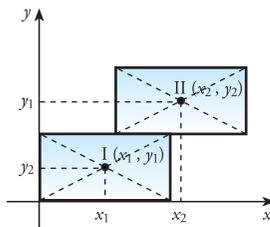
$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2}{w_{gab}} \\ x_0 &= \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2}{w_1 + w_2} \end{aligned}$$

Jika sistem benda terdiri lebih dari dua benda, maka x_0 dapat dicari dengan persamaan:

$$x_0 = \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}$$

Atau dapat ditulis dalam bentuk:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$



Gambar 5.17 Letak titik berat benda gabungan

Sekarang, seandainya benda berotasi terhadap sumbu x , kita mendapatkan ordinat titik berat gabungan (y_0) dengan persamaan:

$$y_0 = \frac{y_1 w_1 + y_2 w_2 + \dots + y_n w_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Jadi, koordinat titik berat gabungan beberapa benda adalah $Z(x_0, y_0)$.

Koordinat titik berat tersebut dapat kita perluas untuk menentukan koordinat titik berat gabungan dari benda tiga dimensi, benda dua dimensi, dan batang. Kita tahu bahwa gaya berat merupakan perkalian massa dengan gravitasi ($w = mg$). Jika kita substitusikan persamaan tersebut, kita mendapatkan persamaan:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \text{dan} \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

Keterangan: m = massa benda

Jika sistem terdiri dari benda-benda yang diketahui volumenya, kita dapat mencari koordinat titik berat dengan persamaan berikut.

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad \text{dan} \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Keterangan: V = volume benda

Dengan mensubstitusikan persamaan $V = At$ (luas kali tinggi), kita mendapatkan bentuk persamaan berikut.

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{dan} \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

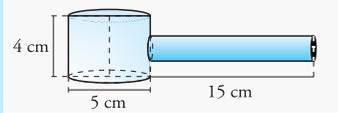
Keterangan: A = luas benda (m^2)

Dari semua persamaan tersebut, koordinat titik berat adalah $Z(x_0, y_0)$.

Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

Sebuah palu terdiri dari bagian kepala yang berbentuk silinder dengan massa 0,5 kg, diameter 5 cm, dan panjang 4 cm. Tangkainya juga berbentuk silinder dengan massa 0,2 kg, panjang 15 cm, dan diameter 0,4 cm. Perhatikan gambar. Tentukan letak titik berat palu tersebut.



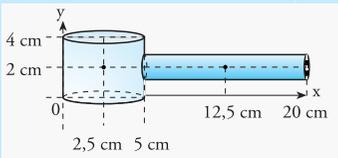
Penyelesaian:

Diketahui :

$$m_1 = 0,2 \text{ kg}$$

$$m_2 = 0,5 \text{ kg}$$

Ditanyakan : Z



Jawab:

Untuk mencari letak titik berat, kita harus menentukan x_1 , y_1 , x_2 , dan y_2 , seperti tampak pada gambar. Berdasarkan gambar tersebut, kita mendapatkan

$$x_1 = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ cm}$$

$$y_1 = \frac{1}{2} t = \frac{1}{2} \times 4 = 2 \text{ cm}$$

$$x_2 = 5 + \left(\frac{1}{2} \times 15\right) = 12,5 \text{ cm}$$

$$y_2 = y_1 = 2 \text{ cm}$$

Berdasarkan data-data tersebut, kita mendapatkan:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ &= \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{(2,5 \times 0,5) + (12,5 \times 0,2)}{0,5 + 0,7} \\ &= 3,125 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ &= \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{(2 \times 0,5) + (2 \times 0,2)}{0,5 + 0,2} \\ &= 2 \text{ cm} \end{aligned}$$

Jadi, titik berat palu tersebut berada pada titik $Z(3,125;2)$ cm.

3. Jenis-jenis Keseimbangan

Ada tiga macam keseimbangan benda tegar yaitu:

a. Keseimbangan Stabil

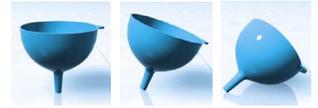
Keseimbangan stabil merupakan keseimbangan benda di mana sesaat setelah gangguan kecil dihilangkan, benda akan kembali pada kedudukan semula. Contoh keseimbangan ini adalah ketika sebuah cangkir yang mempunyai titik keseimbangan di tengah diberi gangguan sedikit. Setelah gangguan dihilangkan, cangkir tersebut kembali ke posisi semula. Perhatikan gambar 5.18.



Gambar 5.18 Keseimbangan stabil.

b. Keseimbangan Labil

Keseimbangan labil merupakan keseimbangan dimana sesaat setelah gangguan kecil dihilangkan, benda tidak kembali kedudukan semula. Contoh dari keseimbangan ini adalah, sebuah corong. Sebuah corong yang berdiri dengan bagian kecil dibawah ketika diberi gangguan kecil, tidak dapat kembali kedudukan semula. Perhatikan Gambar 5.19.



Gambar 5.19 Keseimbangan labil.

c. Keseimbangan Netral

Keseimbangan netral, yaitu keseimbangan dimana gangguan kecil tidak akan mempengaruhi keseimbangan benda. Contohnya sebuah bola yang diberi gangguan. Dalam kedudukannya yang baru, bola tetap seimbang. Perhatikan Gambar 5.20.



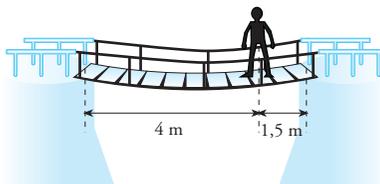
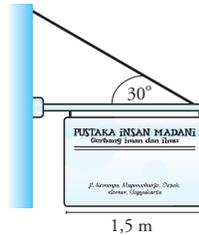
Gambar 5.20 Keseimbangan netral

Apakah ketiga jenis keseimbangan berkaitan dengan pergerakan titik berat benda setelah gangguan kecil dihilangkan? Jenis keseimbangan berkaitan dengan pergerakan titik berat benda ketika gangguan kecil dihilangkan. Jika titik berat bergerak naik ketika diberi gangguan, maka keseimbangan yang terjadi adalah **keseimbangan stabil**. Sedangkan jika titik berat bergerak turun ketika diberi gangguan, maka keseimbangan benda adalah **keseimbangan labil**. Namun, jika titik berat tetap walaupun ada gangguan, maka keseimbangan benda adalah **keseimbangan netral**.

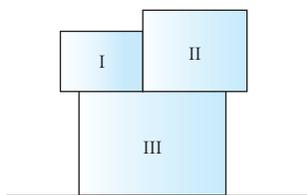
Untuk mengetahui sejauh mana kalian memahami materi di depan, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Sebutkan syarat-syarat keseimbangan. Sebutkan pula jenis-jenis keseimbangan dan berikan contohnya, minimal 3 contoh untuk setiap jenis keseimbangan.
2. Sebuah papan nama dengan panjang 1,5 m tergantung vertikal oleh kabel dan suatu penopang. Pusat massa dari papan terletak di tengah-tengah. Jika berat papan 150 N dan $\theta = 30^\circ$, tentukan:
 - a. tegangan kabel,
 - b. gaya dan arah gaya yang dilakukan oleh penopang.
3. Fandi dengan massa 50 kg berdiri di sebuah jembatan gantung terbuat dari bambu (lihat gambar). Jika massa jembatan 50 kg dengan panjang 4 m, dan Fandi berdiri 1,5 m dari salah satu ujung jembatan, tentukan letak titik berat jembatan tersebut dihitung dari salah satu ujung jembatan.



4. Sebuah tangga homogen dengan panjang 5 meter yang mempunyai berat 250 N, disandarkan di dinding. Seseorang dengan massa 50 kg sedang berada tepat di tengah tangga. Ujung tangga bawah berada pada jarak 3 m dari dinding. Tentukan:
 - a. gambar gaya-gaya yang bekerja pada tangga.
 - b. gaya normal dinding pada ujung tangga.
 - c. gaya gesek lantai dengan tangga.
5. Tiga buah benda berbentuk segiempat dengan massa masing-masing $m_1 = 2$ kg, $m_2 = 3$ kg, dan $m_3 = 4$ kg tersusun seperti gambar di bawah. Benda I berukuran $8\text{ cm} \times 6\text{ cm}$, benda II berukuran $10\text{ cm} \times 8\text{ cm}$, dan benda III berukuran $14\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. Tentukan letak titik berat sistem benda tersebut.



6. Seorang pemain akrobat dapat berjalan di atas tali dengan membawa sebuah tongkat panjang. Apakah tujuan penggunaan tongkat panjang tersebut?

Telaah Istilah

Inersia Kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan keadaan diam

Keseimbangan Keadaan seimbang diantara pengaruh-pengaruh gaya-gaya berlawanan

Keseimbangan stabil Keadaan sebuah benda jika diberi gangguan sedikit akan kembali ketempat semula

Keseimbangan labil Keadaan suatu benda, jika diberi gangguan maka benda akan berubah kedudukannya

Keseimbangan netral Keadaan dari sebuah benda, jika diberi gangguan sedikit maka benda tetap pada posisi yang baru

Momentum linier Hasil kali massa suatu benda dengan kecepatan sesaatnya

Momentum sudut Hasil kali momen inersia dengan kecepatan sudutnya

Partikel Bagian kecil suatu materi / benda

Inti Sari

1. Besarnya keefektifan sebuah gaya yang bekerja pada benda untuk melakukan putaran terhadap suatu titik poros tertentu disebut torsi atau momen gaya. Momen gaya dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$\tau = rF \sin \theta$$

2. Besarnya momen gaya yang diakibatkan beberapa gaya merupakan penjumlahan vektor dari setiap momen gaya yang ditimbulkan. Resultan momen gaya dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\vec{\tau}_{\text{tot}} = \sum \vec{\tau} = \vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 + \dots + \vec{\tau}_n$$

Karena merupakan penjumlahan vektor, maka tanda (+) dapat berubah menjadi (-) dengan ketentuan jika momen gaya searah putaran jarum jam, momen bertanda (+). Sebaliknya, jika arah momen berlawanan putaran jarum jam, momen bertanda (-).

3. Momen inersia dari suatu benda bermassa m didefinisikan sebagai hasil perkalian massa benda (m) dengan kuadrat jarak benda dari titik poros (r^2). Dalam bahasa matematika, momen inersia dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$I = mr^2$$

4. Sebuah benda tegar tersusun dari banyak partikel terpisah dengan massa masing-masing $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$. Momen inersia dari benda tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$I = \sum_i m_i r_i^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots + m_n r_n^2$$

5. Hukum II Newton untuk rotasi adalah:

$$\tau = I\alpha$$

6. Energi kinetik rotasi diperoleh dengan menurunkan energi kinetik translasi. Energi kinetik rotasi dapat dicari dengan rumus:

$$E_k = \frac{1}{2} m(r\omega)^2 = \frac{1}{2} I\omega^2$$

7. Energi kinetik untuk benda menggelinding dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_k = E_{K\text{translasi}} + E_{K\text{rotasi}}$$

8. Pada gerak rotasi, momentum sudut dinyatakan dengan persamaan:

$$L = I\omega$$

$$L = mvr$$

9. Momen gaya atau torsi adalah turunan dari fungsi momentum sudut terhadap waktu.

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

10. Hukum Kekekalan Momentum Sudut menyatakan bahwa jika resultan gaya luar yang bekerja pada sistem sama dengan nol (tidak ada), maka momentum sudutnya adalah kekal. Hal ini dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = 0$$

11. Benda tegar disebut seimbang statis jika tidak bergerak translasi dan rotasi. Syarat keseimbangan statis:

- a. Resultan gaya harus nol,

$$\sum \vec{F}_x = 0, \sum \vec{F}_y = 0$$

- b. Resultan torsi harus nol,

$$\sum \vec{\tau} = 0$$

12. Letak titik berat benda dalam bidang koordinat kartesius dinyatakan dengan $Z(x_0, y_0)$. x_0 dan y_0 dapat dicari melalui perhitungan sebagai berikut.

$$x_0 = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots} = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i}$$

$$y_0 = \frac{w_1 y_1 + w_2 y_2 + w_3 y_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots} = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i}$$

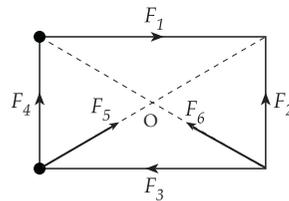
A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. Faktor-faktor di bawah ini memengaruhi gerak rotasi.
 - (1) letak sumbu rotasi
 - (2) kecepatan sudut
 - (3) massa benda
 - (4) bentuk benda
 Faktor yang mempengaruhi besarnya momen gaya adalah
 - a. (1) dan (3)
 - b. (2) dan (4)
 - c. (3) dan (4)
 - d. (2) dan (3)
 - e. (1) dan (4)

2. Benda bermassa 1 kg diikat dengan seutas tali yang panjangnya 0,2 m. Kemudian, benda diputar vertikal dengan kecepatan sudut tetap. Ketika benda berada dititik terendah, tali mengalami tegangan sebesar 15 N. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka kecepatan sudutnya adalah ... rad/s.
 - a. 6
 - b. 5
 - c. 4
 - d. 3
 - e. 2

3. Percepatan sudut sebuah roda diberikan oleh persamaan $a = 20 t$. Jika kecepatan sudut awal adalah 10 rad, persamaan kecepatan sudutnya adalah
 - a. $\omega = 10 t^2 + 10 t$
 - b. $\omega = 20 t^2 + 10 t$
 - c. $\omega = 10 t^2 + 10$
 - d. $\omega = 20 t^2 + 10$
 - e. $\omega = 20 t^2 + 10 t$

4. Sebuah benda berbentuk persegi panjang mempunyai panjang 6 m dan lebar 4 m. Pada benda bekerja gaya $F_1 = 40 \text{ N}$, $F_2 = 15 \text{ N}$, $F_3 = 25 \text{ N}$, $F_4 = 20 \text{ N}$, $F_5 = 40 \text{ N}$, dan $F_6 = 30 \text{ N}$ seperti gambar. Besar momen gaya total terhadap poros melalui titik O adalah



- a. 140 Nm
 - b. 145 Nm
 - c. 120 Nm
 - d. 130 Nm
 - e. 135 Nm

5. Sebuah roda mempunyai momen inersia 15 kg m^2 . Roda tersebut berputar pada sumbu-nya dengan percepatan sudut 3 rad/s^2 . Besar momen gaya yang memutar roda adalah
 - a. 5 Nm
 - b. 18 Nm
 - c. 12 Nm
 - d. 9 Nm
 - e. 45 Nm

6. Sebuah bola pejal dengan jari-jari 10 cm dan massa 5 kg berotasi dengan sumbu sebagai porosnya. Bola mula-mula dalam keadaan diam. Kemudian bola mengalami percepatan sudut $0,2 \text{ rad/s}^2$. Besar momentum sudut bola pada detik ke 10 adalah
 - a. $2 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2 \text{ rad s}^{-1}$
 - b. $3 \times 10^{-1} \text{ kg m}^2 \text{ rad s}^{-1}$
 - c. $4 \times 10^{-1} \text{ kg m}^2 \text{ rad s}^{-1}$
 - d. $5 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2 \text{ rad s}^{-1}$
 - e. $6 \times 10^{-1} \text{ kg m}^2 \text{ rad s}^{-1}$

7. Sebuah kelereng dengan berat 0,2 N dan berjari 0,5 cm bergerak pada kelajuan 1,5 m/s sambil berputar. Total energi kinetiknya adalah
- 9×10^{-6} J
 - $8,25 \times 10^{-6}$ J
 - $6,25 \times 10^{-6}$ J
 - 5×10^{-5} J
 - $4,5 \times 10^{-5}$ J

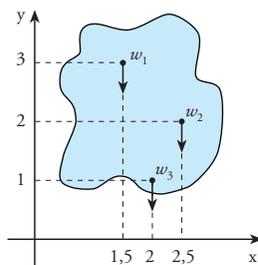
8. Silinder homogen mempunyai jari-jari r yang berada di puncak bidang miring, kemudian menggelinding. Kelajuan saat tiba di dasar bidang miring adalah

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| a. $\sqrt{2gh}$ | d. $\sqrt{\frac{1}{2}gh}$ |
| b. \sqrt{gh} | e. $\sqrt{\frac{4}{3}gh}$ |
| c. $\sqrt{\frac{3}{4}gh}$ | |

9. Benda yang mula-mula dalam keadaan diam, resultan gaya pada benda sama dengan nol, dan resultan torsi sama dengan nol. Keadaan ini disebut keseimbangan. . . .

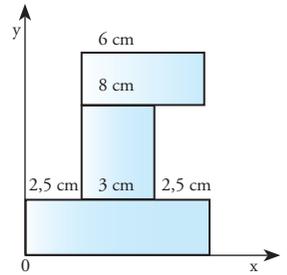
- keseimbangan netral
- keseimbangan statis
- keseimbangan stabil
- keseimbangan labil
- keseimbangan mantap

10. Perhatikan gambar di samping. Jika $w_1 = 30$ N, $w_2 = 40$ N, $w_3 = 25$ N, titik berat dari gambar tersebut berapa pada koordinat



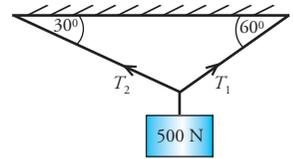
- (1,7 ; 1,8)
- (1,8 ; 1,6)
- (1,6 ; 1,8)
- (1,8 ; 1,7)
- (1,7 ; 1,6)

11. Perhatikan gambar di samping. Letak titik berat sistem benda terhadap pusat koordinat adalah



- (2,5)
- (4,4)
- (4 ; 4,7)
- (4 ; 4,9)
- (4,9 ; 4)

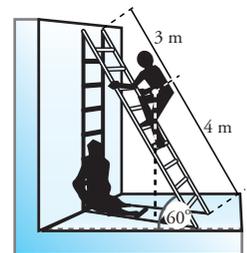
12. Benda pada gambar disamping mempunyai berat 500 N digantung pada keadaan diam.



Tegangan tali T_1 dan T_2 adalah

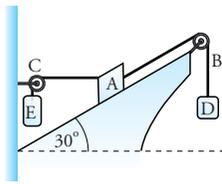
- $300\sqrt{2}$ N dan 350 N
- $250\sqrt{3}$ N dan 250 N
- 250 N dan 150 N
- 150 N dan $150\sqrt{3}$ N
- $\sqrt{3}$ N dan 3 N

13. Sebuah tangga dengan berat 150 N bersandar pada tembok licin dan bertumpu pada lantai. Amir dengan berat 450 N berdiri pada tangga (lihat gambar). Jika sistem seimbang, maka besar gaya yang bekerja pada tembok adalah

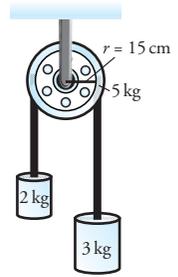


- 1.010,5 N
- 1.210 N
- 1.081,5 N
- 1.135,7 N
- 1.081,6 N

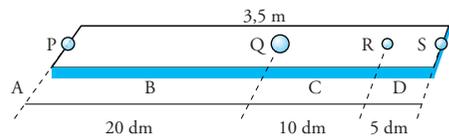
14. Pada gambar sistem katrol di samping, berat benda A dan E masing-masing 100 N dan 10 N. Tali AC horisontal dan tali AB sejajar bidang. Jika bidang miring dan katrol licin, maka sistem seimbang untuk berat D sebesar . . .
- 50,5 N
 - 58,5 N
 - 62,5 N
 - 72,5 N
 - 81,5 N
15. Silinder pejal homogen dengan jejari r dan tinggi $2r$, dilubangi bagian atasnya. Lubang tersebut berbentuk kerucut dengan jejari alas r dan tinggi r . Letak titik berat silinder ini dari bidang alasnya adalah. . .
- $0,35 r$
 - $0,45 r$
 - $0,85 r$
 - $0,95 r$
 - $1,5 r$



5. Sebuah silinder pejal menggelinding dari keadaan diam menuruni suatu bidang miring dari ketinggian 2 m. Hitunglah kelajuan linear silinder ketika tiba di dasar bidang?
6. Katrol dengan massa 5 kg dan jari-jari 15 cm dililiti seutas tali. Pada ujung-ujung tali terikat benda yang massanya 2 kg dan 3 kg, perhatikan gambar di samping. Tentukan percepatan masing-masing benda.
7. Dua bola pejal identik menuruni bidang miring pada waktu yang bersamaan. Bola pertama meluncur (bertranslasi) dan bola yang kedua menggelinding. Manakah yang lebih dahulu tiba di kaki bidang miring? Jelaskan kaitannya dengan Hukum Kekekalan Energi.



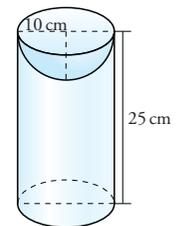
8. Perhatikan gambar di bawah ini. P, Q, R dan S adalah kelereng dengan massa masing-masing adalah 20 gr, 25 gr, 10 gr dan 15 gr. Keempat kelereng diletakkan pada sebatang kayu yang panjangnya 3 m, dengan kedudukan AB = 20 dm, BC = 10 dm dan CD = 5 dm. Tentukanlah letak titik berat sistem tersebut.



B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

- Kecepatan putar sebuah roda bertambah secara tetap dari 2 rad/s menjadi 7 rad/s dalam waktu 0,9 s. Jika diameter roda 90 mm, tentukanlah percepatan total yang dialami poros?
- Mengapa benda yang bergerak melingkar beraturan tidak mengalami percepatan tangensial tetapi hanya mengalami percepatan sentripetal?
- Sebuah benda mengalami momen inersia sebesar $4,5 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ dan kecepatan sudut 15 rad/s. Agar benda berhenti dalam waktu 3 sekon, berapa besar torsi yang harus dikerjakan benda?
- Berikan dan jelaskan contoh penerapan hukum kekekalan momentum sudut.

9. Sebuah silinder berongga mempunyai jari-jari 10 cm dan tinggi 25 cm. Di atas silinder ditempatkan setengah bola pejal dengan jari-jari 10 cm. Tentukanlah letak titik berat sistem?
10. Jelaskan perbedaan jenis-jenis keseimbangan. Berikan minimal 3 contoh untuk setiap jenis keseimbangan.



B a b VI

Fluida



www.moc.noaa.gov

Sudah sejak ratusan tahun silam, perairan yang luas tak terbatas telah dapat ditaklukkan oleh manusia. Dengan keistimewaan yang dimiliki air, kapal berbobot ratusan ton pun mampu mengapung dan meluncur di atasnya. Inilah salah satu kuasa Tuhan, berupa air laut dan segala isinya untuk manusia. Air yang dalam fisika merupakan salah satu jenis fluida memiliki beberapa sifat istimewa, baik ketika diam maupun ketika bergerak. Ingin tahu lebih banyak tentang sifat-sifat fluida lainnya? Pelajari saja bab ini, dan pengetahuan kalian akan semakin luas.

Kata Kunci

- Fluida statis
- Tekanan hidrostatik
- Hukum Archimedes
- Hukum Pascall
- Fluida dinamis
- Hukum Kontinuitas
- Asas Bernoulli

Di bab ini kita akan mempelajari sifat-sifat fluida, baik ketika diam (fluida statis) maupun ketika bergerak (fluida dinamis). Dengan mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu memformulasikan hukum dasar fluida statis dan fluida dinamis. Bukan hanya memformulasikannya, tetapi kalian juga dituntut agar mampu menerapkannya dalam kehidupan sehari-hari.

Ketika membahas fluida statis, kita akan mengenal beberapa konsep yang saling berkaitan, yaitu tekanan hidrostatik, Hukum Archimedes, Hukum Pascall, tegangan permukaan, kapilaritas, dan kekentalan zat cair. Dengan melakukan percobaan sederhana, kalian diharapkan mampu menerapkan konsep-konsep tersebut dalam kehidupan sehari-hari. Setelah itu, pada bahasan fluida dinamis, kalian akan berkenalan dengan konsep fluida ideal, Hukum Kontinuitas, dan Asas Bernoulli. Setelah mempelajari konsep tersebut, kalian diharapkan mampu membuat alat peraga untuk menunjukkan Asas Bernoulli.

A Fluida Statis

Telah kita ketahui bersama bahwa benda di sekitar kita terbagi menjadi 3 macam, yaitu: benda padat, benda cair, dan gas. Benda padat mempunyai ciri khas yakni bentuknya yang sulit berubah. Sementara itu, benda cair dan gas mudah berubah dan mengalir. Karenanya, zat cair dan gas dinamakan **zat alir** atau **fluida**.

Perlu kita ketahui bahwa fluida terbagi menjadi dua jenis, **fluida tak bergerak (fluida statis)** dan **fluida bergerak (fluida dinamis)**. Di subbab ini, kita akan membahas fluida statis terlebih dahulu. Sementara fluida dinamis akan kita bahas kemudian.

Baiklah untuk mengenal konsep fluida statis yang sangat dekat dengan kehidupan kita, coba kalian diskusikan beberapa pertanyaan pada *Eureka* berikut.

Eureka

Berdiskusilah dengan teman sebangku kalian untuk mencari jawaban pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Ketika kita menempatkan 100 ml air pada gelas, kemudian dipindahkan ke dalam botol, atau tempat lainnya, bagaimanakah volume air tersebut? Bagaimana pula dengan bentuknya?
2. Menurut kalian, manakah yang lebih berat, besi 1 kg atukah kayu 1 kg? Manakah pula yang lebih berat, besi atukah kayu dengan volume yang sama?
3. Menurut kalian, bagaimanakah kapal dapat terapung di permukaan air? Mengapakah benda dapat mengapung, melayang, atau tenggelam? Faktor apakah yang memengaruhinya?
4. Ada beberapa jenis hewan yang dapat berdiri atau berjalan di permukaan air. Apakah yang menyebabkan hewan ini dapat berjalan di permukaan air?

- Pada saat menyelam, kalian akan merasakan telinga bertambah sakit ketika kedalaman semakin bertambah. Menunjukkan apakah hal ini?

Konsultasikan hasil diskusi kalian kepada guru.

Beberapa peristiwa yang tertulis pada *Eureka* tersebut hanyalah sebagian kecil peristiwa yang berkaitan dengan fluida statis. Dari hasil diskusi, kalian telah mengenal salah satu sifat benda cair, yaitu bentuknya yang dapat berubah-ubah sesuai dengan tempatnya, walaupun volumenya tetap.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, dalam subbab Fluida Statis, kita akan membahas beberapa konsep, antara lain massa jenis zat, tekanan hidrostatis, Hukum Pascal, Hukum Archimedes, tegangan permukaan, kapilaritas, dan viskositas. Mari kita simak uraiannya bersama-sama.

1. Massa Jenis Zat

Besi dan kayu dengan massa sama tentunya mempunyai berat yang sama, karena berat tidak tergantung pada jenis benda. Akan tetapi, pada volume yang sama, besi lebih berat daripada kayu. Perbedaan ini disebabkan karena massa jenis besi lebih besar daripada massa jenis kayu.

Massa jenis (density) didefinisikan sebagai massa per satuan volume.

Massa jenis disimbolkan dengan ρ (*rho*) dengan satuan kg/m^3 . Massa jenis suatu benda dapat dihitung dengan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Keterangan:

ρ = massa jenis zat (kg/m^3)

m = massa benda (kg)

V = volume benda (m^3)

Konsep massa jenis dapat digunakan untuk menjelaskan penyebab benda dapat mengapung, melayang, atau tenggelam. Suatu benda dapat mengapung jika massa jenisnya jauh lebih kecil daripada air. Inilah yang menyebabkan kapal laut dapat mengapung di atas permukaan air. Walaupun kapal terbuat dari logam yang massa jenisnya lebih besar daripada air, akan tetapi di dalam kapal terdapat ruangan kosong. Ruangan ini akan memperbesar volume kapal yang mengakibatkan massa jenis kapal menjadi lebih kecil daripada massa jenis air.

Sementara itu, benda dapat melayang karena massa jenisnya hampir sama dengan massa jenis air. Kemudian, jika massa jenis benda jauh lebih besar daripada massa jenis air, benda akan tenggelam. Untuk keterangan lebih jauh akan kalian dapatkan ketika membahas Hukum Archimedes.

Mozaiik

Massa jenis dari beberapa zat dapat kalian lihat pada tabel 6.1 berikut.

Tabel 6.1 Massa jenis beberapa zat

Zat	ρ (kg/m^3)
Aluminium	$2,7 \cdot 10^3$
Besi dan Baja	$7,8 \cdot 10^3$
Tembaga	$8,9 \cdot 10^3$
Timah	$1,13 \cdot 10^4$
Emas	$1,93 \cdot 10^4$
Kayu	$(3 - 9) \cdot 10^2$
Air (4°C)	$1,025 \cdot 10^3$
Air laut	$6,8 \cdot 10^2$
Bensin	$6,8 \cdot 10^2$
Udara	1,29
Gas CO_2	1,98
Uap air (100°C)	0,598

Giancolli, 2001, hlm. 325



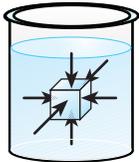
Gambar 6.1 Benda mengapung jika $\rho_{\text{benda}} < \rho_{\text{air}}$. Benda melayang jika $\rho_{\text{benda}} = \rho_{\text{air}}$. Benda tenggelam apabila $\rho_{\text{benda}} > \rho_{\text{air}}$.

Penjelajah Kolam

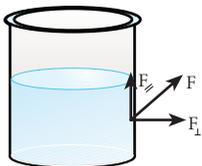
Apa yang membuat burung di bawah tidak tenggelam? Ternyata, dengan pintarnya burung tersebut memekarkan jari-jari panjangnya supaya tekanan pada daun berkurang. Akibatnya, saat berjalan dari satu daun tumbuhan air ke daun lainnya tidak tenggelam.



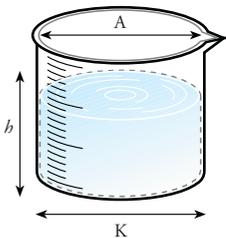
www.honoluluomagazine.com



Gambar 6.2 Besar tekanan fluida ke semua arah selalu sama.



Gambar 6.3 Tekanan yang diberikan fluida selalu tegak lurus permukaan.



Gambar 6.4 Tekanan hidrostatis pada dasar gelas ukur.

2. Tekanan Hidrostatik

Ketika kita memberikan gaya pada suatu benda, berarti memberi tekanan pada benda tersebut. Besar tekanan yang dirasakan benda sebanding dengan besar gaya yang diberikan dan berbanding terbalik dengan luas permukaan benda yang mendapatkan gaya tersebut. Sebagai contoh, ketika kita berdiri dengan satu kaki, tanah akan mendapatkan gaya sebesar berat tubuh kita. Ketika kita berbaring di atas tanah, tanah juga akan mendapatkan gaya sebesar berat tubuh kita. Akan tetapi, tekanan yang diterima tanah ketika kita berdiri lebih besar daripada ketika kita tidur, walaupun gaya yang bekerja sama besar. Ini disebabkan karena luas permukaan tanah yang terkena gaya berbeda.

Besar tekanan yang diberikan oleh sebuah gaya dapat dihitung dengan persamaan:

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

Keterangan:

P = tekanan pada benda (N/m^2 atau Pa)

F = gaya yang diberikan pada benda (N)

A = luas penampang bidang tekan (m^2)

Konsep tekanan ini sangat berguna sekali saat kita membahas fluida. Sebuah benda yang berada di dalam air akan mendapatkan tekanan dari zat cair. Zat cair atau fluida yang diam **memberikan tekanan sama besar ke semua arah**. Perhatikan gambar 6.2. Pada gambar tersebut, kita membayangkan sebuah kubus kecil berada pada kedalaman tertentu dalam suatu fluida. Kubus ini mendapatkan tekanan yang besarnya sama dari segala arah. Apabila besar tekanan tidak sama, maka kubus akan bergerak. Tekanan yang dirasakan kubus atau benda ini disebut tekanan hidrostatis. Jadi:

Tekanan hidrostatis adalah tekanan yang diberikan fluida yang diam pada kedalaman tertentu.

Sifat lain dari tekanan fluida adalah selalu diberikan tegak lurus bidang. Misalnya, tekanan pada dinding bejana selalu tegak lurus dinding. Perhatikan Gambar 6.3. Jika ada komponen gaya yang sejajar permukaan dinding, maka fluida akan bergerak. Ini berarti sifat fluida statis tidak berlaku.

Besarnya tekanan hidrostatis pada kedalaman tertentu tergantung pada kedalaman, massa jenis, dan luas permukaan. Kita ambil contoh cairan dengan massa m yang dimasukkan pada gelas beker yang mempunyai luas alas A dengan ketinggian h . Ini berarti, berat air yang menekan dasar gelas adalah mg . Jadi, tekanan di dasar gelas akibat zat cair tersebut adalah:

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

$$P_b = \frac{mg}{A}$$

Di depan telah kita ketahui bahwa massa jenis zat cair dinyatakan dengan persamaan $\rho = \frac{m}{V}$. Sedangkan volume zat cair dapat dicari dengan persamaan $V = Ah$. Sehingga massa zat cair yang menekan dasar gelas adalah:

$$m = \rho V$$

$$m = \rho A h$$

Dengan demikian, persamaan tekanan hidrostatika menjadi:

$$P_h = \rho g h$$

Persamaan ini digunakan untuk mencari tekanan hidrostatika yang diakibatkan oleh fluida itu sendiri tanpa melibatkan udara luar. Jika gelas dalam keadaan terbuka, maka udara juga akan memberikan tambahan tekanan hidrostatika. Besarnya tekanan hidrostatika pada gelas atau wadah terbuka yang berhubungan langsung dengan udara diberikan dengan persamaan:

$$P_h = P_0 + \rho g h$$

Keterangan:

- P_h = tekanan hidrostatika (N/m^2)
- P_0 = tekanan udara atau tekanan atmosfer (N/m^2)
- ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = tinggi zat cair (m)

Persamaan tersebut berlaku jika di dalam gelas hanya terdiri atas satu jenis fluida yang massa jenisnya tidak berubah karena tekanan. Dari persamaan tersebut, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa semakin dalam, tekanan hidrostatika semakin besar. Hal ini dapat dirasakan ketika kita menyelam. Pada kedalaman yang relatif dangkal, tekanan dari air tidak terlalu besar. Tekanan akan semakin besar, jika kita terus bergerak ke bawah.

Persamaan tersebut di atas juga memberikan arti bahwa tekanan hidrostatika oleh fluida sejenis pada titik-titik yang berada pada kedalaman sama adalah sama besar, walaupun bentuk bejana atau tempatnya berbeda-beda. Perhatikan Gambar 6.5.

Pada gambar tersebut, terdapat sebuah bejana berhubungan yang berisi fluida sejenis. Jika kita perhatikan, masing-masing bejana mempunyai bentuk yang berbeda-beda. Titik A, B, C dan D mempunyai kedalaman yang sama. Perlu kita ingat, tekanan hidrostatika pada suatu titik bergantung pada massa jenis fluida dan ketinggian titik tersebut dari permukaan fluida. Akibatnya, bentuk bejana yang berbeda-beda tidak berpengaruh terhadap tekanan hidrostatika pada tiap-tiap titik. Nah, pemahaman ini akan membawa kita pada **hukum utama hidrostatika**.

Tips & Trik

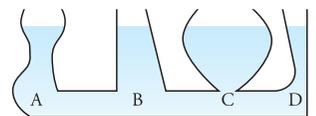
Satuan lain dari tekanan adalah atmosfer (atm), pascal (pa), dan bar. Di mana:

- 1 atm = $1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- 1 atm = 101,3 kPa

jadi:

- 1 pa = 10^5 N/m^2
- 1 bar = $1,00 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- 1 bar = 100 kPa

Bentuk konversi tersebut sangat diperlukan untuk menyelesaikan soal.

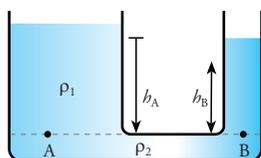


Gambar 6.5 Tekanan hidrostatika di A, B, C, dan D adalah sama.

Hukum Utama Hidrostatika menyatakan bahwa semua titik yang terletak pada kedalaman yang sama dan dalam fluida yang sama, besar tekanan hidrostatikanya sama besar.

Apabila kita memasukkan berbagai jenis zat cair yang berbeda pada satu bejana, akan tetap mempunyai tekanan hidrostatika di dasar bejana. Bagaimana kita mengetahuinya? Ternyata, tekanan hidrostatika yang terjadi pada dasar bejana merupakan total penjumlahan tekanan hidrostatika pada masing-masing zat cair tersebut. Karena itu, kita dapat memperoleh persamaan berikut.

$$P_h = \sum_{i=1}^n \rho_i g h_i = \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 + \dots + \rho_n g h_n$$



Gambar 6.6 Tekanan hidrostatika pada fluida yang berbeda jenis.

Gambar 6.6 menunjukkan sebuah tabung yang saling berhubungan atau biasa disebut bejana berhubungan. Bejana ini diisi fluida yang berbeda jenis atau massa jenisnya berbeda. Kedua jenis fluida ini tidak akan bercampur, sehingga tinggi permukaannya berbeda. Melalui hukum utama hidrostatika, kita dapat mencari tekanan hidrostatika yang sama pada tabung tersebut. Kita dapat menentukan tekanannya di titik yang terletak pada kedalaman sama. Misalnya, titik A dan B yang terletak pada perbatasan dua fluida yang tidak bercampur. Maka, kita akan memperoleh persamaan berikut.

$$\begin{aligned} P_{hA} &= P_{hB} \\ \rho_A g h_A &= \rho_B g h_B \\ \rho_A h_A &= \rho_B h_B \end{aligned}$$

Keterangan:

ρ_A = massa jenis fluida A (kg/m^3)

ρ_B = massa jenis fluida B (kg/m^3)

h_A = ketinggian fluida A dari permukaan (m)

h_B = ketinggian fluida B dari permukaan (m)

Nah, sekarang tentunya kalian ingin mengetahui cara menggunakan persamaan-persamaan yang telah dipelajari. Coba kalian perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

1. Air di dalam sebuah tabung tingginya 30 cm. Apabila massa jenis air 1.000 kg/m^3 dan percepatan gravitasi di tempat itu 10 m/s^2 , tentukan:
 - a. besar tekanan hidrostatika di dasar tabung, jika tekanan udara luar diabaikan,
 - b. tinggi air raksa yang setara dengan tekanan hidrostatika soal (a), apabila massa jenis air raksa $13,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$h = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

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

Ditanyakan:

- a. P_h
- b. h air raksa, dengan $\rho = 13,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

Jawab:

- a. Tekanan hidrostatika di dasar tabung di cari dari persamaan:

$$\begin{aligned}
 P_h &= \rho gh \\
 &= 1.000 \times 10 \times 0,3 \\
 &= 3.000 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

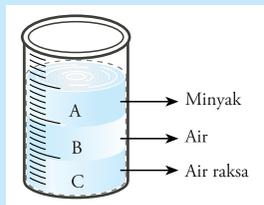
Jadi, tekanan hidrostatika di dasar tabung adalah 3.000 N/m^2 .

b. Tinggi air raksa

$$\begin{aligned}
 P_b &= \rho_{\text{raksa}} gh \\
 h &= \frac{P_b}{\rho_{\text{raksa}} g} \\
 &= \frac{3.000}{13,6 \times 10^3 \times 10} \\
 &= 0,022 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi, tinggi air raksa adalah $0,022 \text{ m}$.

2. Dalam sebuah gelas ukur dimasukkan tiga jenis fluida yang tidak bercampur yaitu minyak, air, dan air raksa. Massa jenis masing-masing fluida adalah 800 kg/m^3 , 1.000 kg/m^3 , dan $1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$. Apabila ketinggian masing-masing fluida dari dasar gelas adalah 6 cm , 4 cm , dan 3 cm , tentukan tekanan hidrostatika pada dasar gelas ukur. (gunakan $g = 10 \text{ m/s}^2$)



Penyelesaian:

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{minyak}} &= 800 \text{ kg/m}^3 \\
 \rho_{\text{air raksa}} &= 1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3 \\
 \rho_{\text{air}} &= 1.000 \text{ kg/m}^3 \\
 h_{\text{air raksa}} &= 3 \text{ cm} = 0,03 \text{ m} \\
 h_{\text{air}} &= 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m} \\
 h_{\text{minyak}} &= 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}
 \end{aligned}$$

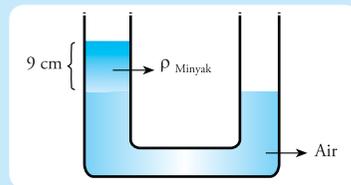
Ditanyakan: P_h total

Jawab:

Untuk mencari tekanan total, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 P_h &= \rho_{\text{minyak}} gh_{\text{minyak}} + \rho_{\text{air raksa}} gh_{\text{air}} + \\
 &\quad \rho_{\text{air}} gh_{\text{air raksa}} \\
 &= (800 \times 10 \times 0,06) + (1,36 \times 10^4) \times \\
 &\quad 10 \times 0,04 + (1.000 \times 10 \times 0,03) \\
 &= 480 + 5.440 + 300 \\
 &= 6.220 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

3. Sebuah pipa U terdapat minyak dan air. Selisih tinggi antara permukaan minyak dan air dalam pipa adalah 9 cm (seperti tampak pada gambar). Apabila massa jenis minyak 800 kg/m^3 dan massa jenis air 1.000 kg/m^3 , tentukan tinggi minyak pada pipa U tersebut.



Penyelesaian:

Diketahui:

$$h = 9 \text{ cm} = 0,09 \text{ m}$$

$$\rho_1 = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_2 = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

Ditanyakan: h_1

Jawab:

Selisih tinggi minyak dan air adalah:

$$h = h_1 - h_2$$

$$0,09 = h_1 - h_2$$

$$h_2 = h_1 - 0,09 \text{ m}$$

Dengan menggunakan hukum tekanan hidrostatika, kita memperoleh:

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$$

$$800 h_1 = 1.000 (h_1 - 0,09)$$

$$800 h_1 = 1.000 h_1 - 90$$

$$200 h_1 = 90$$

$$h_1 = 0,45 \text{ m}$$

Jadi, tinggi minyak pada pipa U adalah $0,45 \text{ m}$ atau 45 cm .

3. Alat Ukur Tekanan

Tahukah kalian, alat apa yang digunakan untuk mengukur tekanan? Alat untuk mengukur tekanan atmosfer atau tekanan luar disebut **barometer**. Contohnya, barometer aneroid. Sementara itu, untuk mengukur tekanan ruangan tertutup digunakan alat yang disebut **manometer**. Sebagai contoh manometer tabung terbuka dan pengukur tekanan ban. Perhatikan Gambar 6.7. Alat-alat tersebut biasanya menggunakan air raksa, air, atau alkohol.

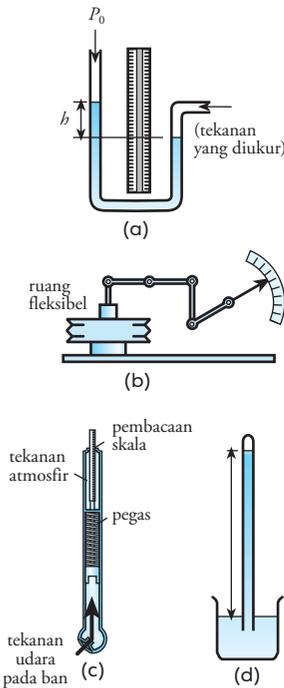
Selanjutnya, bagaimanakah cara menghitung tekanan menggunakan alat ukur tersebut? Ada beberapa persamaan yang dapat kita gunakan untuk mengukur tekanan. Saat kita mengukur tekanan dengan menggunakan manometer tabung terbuka yang fluidanya berupa air raksa dan air, kita dapat menggunakan persamaan berikut.

$$P = P_0 + \rho gh$$

Kemudian, untuk mengukur tekanan udara luar atau tekanan atmosfer, kita dapat menggunakan barometer dengan persamaan berikut.

$$P_A = \rho gh$$

Agar pemahaman kalian lebih lengkap, di bawah ini akan ditunjukkan beberapa penggunaan persamaan di atas. Coba kalian perhatikan contoh berikut.



Gambar 6.7 Pengukur tekanan;

- (a) manometer tabung terbuka,
- (b) pengukur aneroid,
- (c) pengukur tekanan ban,
- (d) barometer ruang terbuka.

Contoh

Apabila tekanan di permukaan fluida pada manometer tabung terbuka sebesar 1 atm dan ketinggian air raksa 10 cm, tentukan besar tekanan ruangan pada manometer tersebut.

Dengan, $\rho_{\text{raksa}} = 1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ dan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Penyelesaian:

Diketahui:

$$P_0 = 1 \text{ atm} = 101 \text{ kPa} = 101 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$h = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{raksa}} = 1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

Ditanyakan: P

Jawab:

Untuk mencari tekanan ruangan pada manometer, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned} P &= P_0 + \rho gh \\ &= 1,01 \times 10^5 + (1,3 \times 10^4 \times 9,8 \times 0,1) \\ &= 1,01 \times 10^5 + 0,13 \times 10^5 \\ &= 1,14 \times 10^5 \text{ Pa} \\ &= 1,14 \text{ atm} \end{aligned}$$

Jadi, tekanan di ruangan tersebut adalah 1,13 atm.

Untuk mengetahui tingkat pemahaman kalian, kerjakan soal-soal pada *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Jumlah luas dua telapak kaki Haris 550 cm^2 . Jika berat badan Haris 60 kg , dan percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$, berapakah tekanan pada lantai yang diberikan Haris saat berdiri dengan satu kaki?
2. Sebuah meja yang mempunyai 4 kaki memberikan tekanan pada lantai sebesar 10 N/m^2 . Apabila massa meja sebesar 50 kg dan percepatan gravitasi di daerah itu $9,8 \text{ m/s}^2$, berapa luas permukaan setiap kaki meja?
3. Sebuah kapal selam berada di kedalaman $4.081,6 \text{ meter}$. Anggaplah massa jenis air laut uniform yakni sebesar $1,25 \text{ kg/m}^3$. Bila tekanan permukaan air laut 10^5 Pa dan percepatan gravitasi sebesar $9,8 \text{ m/s}^2$, berapakah tekanan air laut (tekanan hidrostatis) pada kedalaman tersebut? Berapa pula tekanan total yang diterima kapal selam?
4. Pada kegiatan eksplorasi laut, seorang ilmuwan menyelam sampai kedalaman 6 meter . Apabila massa jenis air laut uniform sebesar $1,2 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$, tekanan permukaan air laut 10^5 Pa , dan percepatan gravitasi sebesar $9,8 \text{ m/s}^2$, berapa tekanan hidrostatis air laut? Berapa pula tekanan total yang diterima ilmuwan tersebut?
5. Alat ukur tekanan pada kapal selam yang berada pada kedalaman 400 m mendeteksi tekanan hidrostatis sebesar $4,67 \times 10^4 \text{ Pa}$ dan tekanan yang diterima kapal selam sebesar $1,48 \times 10^5 \text{ Pa}$. Berapa massa jenis air laut jika percepatan gravitasinya sebesar $9,8 \text{ m/s}^2$? Berapa atm tekanan pada permukaannya?

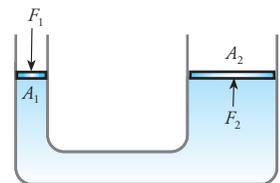
B

Hukum-hukum Dasar Fluida Statis dan Penerapannya

Di SMP/MTs kelas VII, kalian sebenarnya sudah mempelajari dan membuktikan hukum-hukum dasar fluida statik. Hukum dasar fluida statik yang dimaksud meliputi Hukum Pascal dan Hukum Archimedes. Bagaimana penjelasan dari hukum-hukum tersebut? Mari kita ulas kembali pada materi di bawah ini.

1. Hukum Pascal

Di depan, kita telah mempelajari konsep tekanan hidrostatis dan pengaruh tekanan udara luar. Tekanan yang diberikan fluida ini selalu tegak lurus dengan permukaan dinding. Ketika kita menambahkan tekanan ke dalam fluida, maka tekanan fluida akan bertambah secara merata di setiap bagian fluida. Inilah salah satu hal yang mendasari Hukum Pascal.



Gambar 6.8 Penambahan tekanan pada A_1 akan menambah tekanan di seluruh fluida dengan besar yang sama.



www.philotheek.de

Blaise Pascal (1623-1662) adalah ahli fisika yang berasal dari Prancis. Selain penemu Hukum Pascal, ia juga dikenal sebagai bapak probabilitas, ahli matematika, filsafat, sas-trawan, dan biarawan. Ketika berumur 12 tahun, ia sudah dapat menguasai dalil dan ajaran Euclides. Umur 16 tahun, ia menulis buku tentang kerucut. Ia juga menciptakan kalkula-tor pertama di dunia.

Setyawan, Lilik Hidayat, 2004, hlm. 125

Kita ambil contoh bejana berhubungan berbentuk U yang masing-masing permukaan dilengkapi dengan piston. Perhatikan Gambar 6.11. Ketika tekanan ditambahkan pada fluida dengan cara menekan piston pertama (piston 1 dengan luas permukaan A_1) maka tekanan ini akan diteruskan ke segala arah dengan besar yang sama.

Hal inilah yang pertama kali ditemukan oleh ilmuwan Perancis, **Blaise Pascal** (1623-1662).

Ia menyatakan bahwa tekanan yang diberikan pada suatu fluida dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama besar.

Pernyataan ini dikenal dengan **Hukum Pascal**.

Perhatikan kembali Gambar 6.8. Jika gaya F_1 diberikan pada piston A_1 , maka tekanan fluida akan bertambah. Akibatnya, piston kedua (A_2) akan mendapatkan tekanan yang sama dengan tekanan yang diberikan pada A_1 . Jadi, pada kedua piston berlaku persamaan:

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$$

Keterangan:

F_1 = gaya pada piston 1 (N)

F_2 = gaya pada piston 2 (N)

A_1 = luas piston 1 (m^2)

A_2 = luas piston 2 (m^2)

Skema pada Gambar 6.11 dan persamaan tersebut merupakan prinsip kerja dari pelbagai peralatan, misalnya pompa hidrolik, rem hidrolik, dan dongkrak hidrolik.

a. Dongkrak Hidrolik atau Lift Hidrolik

Perhatikan Gambar 6.10. Gambar tersebut adalah gambar dongkrak mobil hidrolik yang dapat digunakan untuk mengangkat mobil. Dongkrak hidrolik bekerja berdasarkan Hukum Pascal. Bisakah kalian menjelaskan cara kerja dongkrak mobil tersebut?

Ketika menggunakan dongkrak mobil, hal pertama yang dilakukan adalah memompa untuk memperbesar tekanan. Ketika tekanan udara di dalam dongkrak meningkat, maka udara akan mendorong penyangga ke atas, sehingga dapat mengangkat mobil. Inilah salah satu kelebihan Hukum Pascal. Kita dapat mengangkat mobil yang berat hanya dengan alat yang begitu kecil. Dongkrak mobil yang lebih besar biasanya digunakan dibengkel. Skema dongkrak ini sama dengan Gambar 6.9.

Supaya pengetahuan kalian lengkap, perhatikan contoh berikut ini.



dok. PIM

Gambar 6.9 Dongkrak mobil.

Contoh

Tekanan ukur maksimum pada dongkrak hidrolik adalah 18 atm. Berapa beban mobil maksimum yang dapat diangkat jika diameter silinder keluarannya 22 cm?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$P_1 = 18 \text{ atm} = 1.818 \text{ kPa} = 1,818 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$d_2 = 22 \text{ cm} = 0,22 \text{ m}$$

Ditanyakan: m_{mobil}

Jawab: Untuk mencari massa mobil, kita dapat menggunakan persamaan:

$$P_1 = P_2$$

$$P_1 = \frac{F_2}{A_2}$$

$$P_1 = \frac{m_{\text{mobil}} g}{\frac{1}{4} \pi d_2^2}$$

$$m_{\text{mobil}} = \frac{P_1 \pi d_2^2}{4g}$$

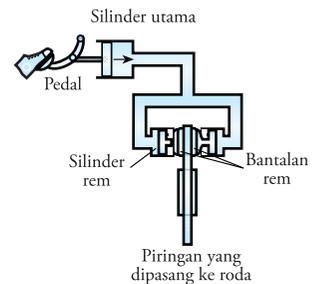
$$= \frac{(1,818 \times 10^6) \times 3,14 \times 0,22^2}{4 \times 9,8}$$

$$= 7,05 \times 10^3 \text{ kg}$$

Jadi, beban mobil maksimum yang dapat diangkat dongkrak tersebut adalah 7,05 ton.

b. Rem Hidrolik

Selain dongkrak hidrolik atau lift hidrolik, penerapan Hukum Pascal juga digunakan pada rem hidrolik. Dalam kehidupan sehari-hari, rem hidrolik sering kita sebut rem cakram. Rem ini memanfaatkan minyak rem untuk mengurangi laju kendaraan. Prinsip kerja rem hidrolik ternyata tidak jauh beda dengan prinsip kerja dongkrak hidrolik. Saat kita menginjakkan kaki pada pedal rem, maka silinder utama akan memberikan tekanan yang sama melalui minyak rem ke silinder rem. Akibatnya, bantalan rem akan menekan cakram yang terpasang pada roda.



Gambar 6.10 Skema rem hidrolik

2. Hukum Archimedes

Archimedes adalah ilmuwan Yunani yang terkenal dengan ucapannya “EUREKA”. Ia adalah penemu hukum Archimedes ketika disuruh untuk mencari tahu kandungan emas pada mahkota raja. Nah, untuk mengetahui lebih lanjut tentang hukum Archimedes, coba kalian lakukan Eksperimen berikut secara berkelompok.

Eksperimen

Membuktikan Hukum Archimedes

A. Dasar Teori

Suatu benda yang berada di udara akan mempunyai berat yang lebih besar dibandingkan bila berada di dalam suatu fluida. Ketika benda berada di dalam fluida, benda tersebut akan memperoleh gaya apung dari fluida. Gaya apung adalah gaya tekan ke atas fluida terhadap sebuah benda yang terdapat dalam fluida tersebut.

Gaya apung dapat terjadi karena tekanan pada fluida bertambah terhadap kedalaman. Akibatnya, tekanan ke atas pada permukaan bawah benda akan lebih besar daripada tekanan ke bawah pada permukaan atasnya.

Selain itu, gaya apung suatu benda akan sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Archimedes, ahli matematika Yunani, adalah orang yang menemukan kejadian tersebut, sehingga orang menamakannya Hukum Archimedes.

B. Tujuan Percobaan

Melalui eksperimen ini, kalian diharapkan mampu:

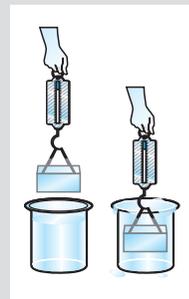
1. menemukan berat benda di fluida lebih kecil daripada berat benda di udara,
2. menemukan gaya apung ke atas sama dengan berat fluida yang dipindahkan,
3. membuktikan kebenaran Hukum Archimedes.

C. Alat dan Bahan

1. gelas beker besar
2. gelas ukur
3. neraca timbangan atau neraca pegas
4. air
5. beberapa balok kayu kecil dengan massa berbeda

D. Langkah Kerja

1. Isilah gelas beker besar dengan menggunakan air sampai penuh.
2. Letakkan gelas ukur di bawah moncong bibir dari gelas beker-besar. Pastikan pula jika ada air yang tumpah dari gelas beker besar dapat mengalir ke gelas ukur
3. Kemudian, ambillah satu balok kecil sebagai beban. Timbanglah beban tersebut di udara dengan menggunakan neraca pegas. Catat hasil yang kalian peroleh.
4. Masukkan beban yang masih terkait dengan neraca pegas ke dalam gelas beker yang berisi air. Amati dan catat skala yang ditunjukkan neraca pegas.
5. Amati dan ukurlah volume air yang tumpah/dipindahkan pada gelas ukur saat balok masuk ke dalam gelas beker besar.
6. Ulangi langkah 3 sampai 5 untuk balok/beban yang berbeda-beda. Amati dan catat hasilnya.



E. Pembahasan

1. Tulislah besaran-besaran yang kalian amati dan catat dalam tabel berikut. Kemudian, hitung beberapa besaran yang ada. Perlu diketahui jika massa jenis air $\rho_F = 1 \text{ kg/m}^3$ dan percepatan gravitasi (g) = $9,8 \text{ m/s}^2$.

No.	w_u (N)	w_a (N)	V' (m^3)	$w_1' = w_u - w_a$	$w_2' = \rho_F g V'$ (N)
1.					
2.					
3.					
dst.					

Keterangan:

w_u = berat balok di udara

w_a = berat balok di air

w_1' = selisih berat balok di udara dan di air

w_2' = berat air yang dipindahkan ke dalam gelas ukur

V' = volume air yang dipindahkan ke dalam gelas ukur = volume balok di dalam air

2. Bahaslah perbandingan selisih berat balok di udara dan berat balok di air (w_1') dengan berat air yang dipindahkan ke dalam gelas ukur (w_2').
3. Apa yang memengaruhi gaya apung balok ketika di dalam gelas beker besar?
4. Buat kesimpulan dari eksperimen yang kalian lakukan ini. Laporkan di depan teman dan guru kalian.

Apa hasil yang kalian peroleh pada *Eksperimen* di atas? Apabila kalian melakukannya dengan baik, kalian akan mendapatkan pengetahuan baru yang menakjubkan. Kalian dapat membuktikan Hukum Archimedes. Perhatikan uraian berikut.

Dari hasil percobaan, kalian mendapatkan bahwa berat benda di udara berbeda dengan berat benda di dalam fluida. Suatu benda yang diukur beratnya di dalam fluida lebih ringan daripada ketika diukur di udara. Ini disebabkan karena ketika di dalam fluida, benda mendapatkan gaya ke atas, yang disebut **gaya apung**. Sementara, jika benda yang diukur di udara hanya dipengaruhi oleh gaya gravitasi saja.

Hasil *Eksperimen* membuktikan bahwa, besarnya gaya apung merupakan selisih gaya yang disebabkan tekanan fluida dari bawah benda dengan tekanan fluida dari atas benda. Perhatikan Gambar 6.11.

Berdasarkan gambar tersebut, kita dapat merumuskan besarnya gaya apung sebagai berikut.

$$F_a = F_2 - F_1$$

$$F_a = \rho_f g A (h_2 - h_1)$$

$$F_a = \rho_f g A h$$

$$F_a = \rho_f g V_b$$

Keterangan:

F_a = gaya apung (N)

ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3)

V_b = volume benda di dalam fluida (m^3)

Dari persamaan tersebut, V_b adalah volume benda, sedangkan ρ_f adalah massa jenis fluida. Sementara itu, $\rho_f g V_b = m_f g$ yang tidak lain adalah berat fluida yang dipindahkan dengan volume sama dengan volume benda. Dengan demikian, dapat diambil kesimpulan bahwa:

Besarnya gaya apung yang bekerja pada benda yang dimasukkan ke dalam fluida, sama dengan berat fluida yang dipindahkannya.

Inilah yang telah ditemukan **Archimedes** (287-212 SM). Hukum tersebut kemudian disebut sebagai **Hukum Archimedes**.

Untuk mengetahui penerapan Hukum Archimedes, pahami contoh di bawah ini.

Contoh

Sebuah batu dimasukkan ke dalam bejana yang berisi penuh fluida. Jika fluida yang tumpah setelah batu dimasukkan sebesar $0,2 \text{ m}^3$ dan massa jenis fluida $1,5 \text{ kg/m}^3$ serta percepatan gravitasi bumi = $9,8 \text{ m/s}^2$, berapakah gaya apung yang dialami oleh batu?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$\rho = 1,5 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 0,2 \text{ m}^3$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Ditanyakan: F_a

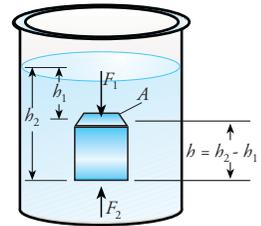
Jawab: Untuk mencari besar gaya apung yang dialami batu, gunakan persamaan:

$$F_a = \rho g V$$

$$= 1,5 \times 9,8 \times 0,2$$

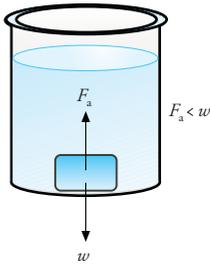
$$= 2,94 \text{ N}$$

Jadi, gaya apung yang dialami batu adalah $2,94 \text{ N}$.



Gambar 6.11 Di dalam fluida, selain mendapatkan gaya gravitasi ke bawah, benda juga mendapatkan gaya apung ke atas.

Ada beberapa kejadian yang berkaitan dengan Hukum Archimedes. Di depan telah disebutkan bahwa apabila benda dimasukkan ke dalam sebuah fluida, maka ada tiga keadaan yang mungkin, yakni terapung, melayang, atau tenggelam. Di depan kita telah membahas syarat sebuah benda dapat mengapung, melayang, atau tenggelam. Nah, sekarang kita akan meninjau syarat tersebut berdasarkan Hukum Archimedes.



Gambar 6.13 Benda tenggelam

a. Benda Tenggelam

Sebuah benda disebut **tenggelam** apabila seluruh bagian benda berada pada dasar fluida. Keadaan ini terjadi karena berat benda lebih besar daripada gaya apung fluida. Perhatikan Gambar 6.13.

Ketika berada di dasar fluida, selain mendapatkan gaya ke atas, benda juga mendapatkan gaya normal dari dasar wadah. Dengan menggunakan Hukum I Newton, kita mendapatkan persamaan:

$$F_B + N = w_b$$

$$\rho_f gV_b + N = \rho_b gV_b$$

$$N = gV_b (\rho_b - \rho_f)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, syarat benda agar tenggelam adalah:

$$\rho_b > \rho_f$$

Jadi, agar benda dapat tenggelam pada suatu fluida, maka massa jenisnya harus lebih besar daripada massa jenis fluida.

b. Benda Melayang

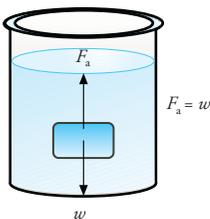
Sebuah benda dikatakan **melayang** bila posisi benda berada di tengah-tengah fluida atau benda tidak berada di dasar atau permukaan fluida. Perhatikan Gambar 6.13. Gambar tersebut memperlihatkan gaya-gaya yang bekerja pada benda yang melayang. Berdasarkan Hukum I Newton, kita mendapatkan persamaan:

$$F_a = w_b$$

$$\rho_f gV_b = \rho_b gV_b$$

$$\rho_f = \rho_b$$

Jadi, benda yang dimasukkan ke dalam fluida akan melayang apabila massa jenis benda sama dengan massa jenis fluida.



Gambar 6.13 Benda melayang

c. Benda Mengapung

Sebuah benda akan disebut **mengapung** jika seluruh atau sebagian benda berada pada permukaan fluida. Perhatikan Gambar 6.14.

Mozaik



Archimedes (287-212 SM) adalah ilmuwan Yunani yang tinggal di Syracuse, Sisilia. "Eureka" adalah kata yang pertama muncul ketika ia dapat memecahkan cara mengukur berat kandungan emas yang terdapat dalam mahkota rajanya.

www.inria.fr

Ketika sebuah benda terapung di permukaan fluida, maka ada bagian benda yang tercelup dan ada bagian yang di luar fluida. Kenyataan ini memberikan konsekuensi volume fluida yang dipindahkan tidak sama dengan volume benda. Volume fluida yang dipindahkan akan sama dengan volume benda yang tercelup.

Berdasarkan gambar tersebut, kita dapat menuliskan persamaan:

$$F_a = w_b$$

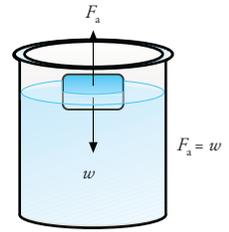
$$\rho_f g V_c = \rho_b g V_b$$

$$V_c = \frac{\rho_b}{\rho_f} V_b$$

Keterangan:

V_c = volume benda yang tercelup

V_b = volume total benda



Gambar 6.14 Benda mengapung

Dari persamaan tersebut, agar benda terapung maka volume benda yang tercelup lebih kecil daripada volume benda total. Ini memberikan konsekuensi massa jenis benda lebih kecil daripada massa jenis fluida, atau di tuliskan dalam bentuk

$$\rho_b < \rho_f$$

Demikianlah penerapan hukum Archimedes pada kejadian benda mengapung, melayang, dan tenggelam. Untuk mengetahui penerapan Hukum Archimedes dalam penyelesaian soal-soal, pelajarilah contoh berikut.

Contoh

- Sebuah benda dimasukkan ke dalam gelas ukur yang berisi air hingga tenggelam. Ketinggian air semula adalah 10 cm. Setelah benda dimasukkan, ketinggian air menjadi 12 cm. Jika luas alas gelas $7,2 \text{ cm}^2$, tentukan volume benda tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$h_1 = 10 \text{ cm}$$

$$h_2 = 12 \text{ cm}$$

$$A = 7,2 \text{ cm}^2$$

Ditanyakan: V_b

Jawab:

Untuk mencari volume benda, yang harus diingat adalah volume benda sama dengan volume air yang dipindahkan. Jadi:

$$V_b = A (h_2 - h_1)$$

$$= 7,2 \times (12 - 10)$$

$$= 14,4 \text{ cm}^3$$

Jadi, volume benda tersebut $14,4 \text{ cm}^3$.

- Sebuah balok kayu berukuran $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ mengapung di lautan dengan 50% volumenya tercelup dalam air. Jika massa jenis air laut $1,025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, tentukan massa jenis kayu.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V_b = 30 \times 30 \times 200 = 180.000 \text{ cm}^3$$

$$= 0,18 \text{ m}^3$$

$$V_c = 50\% \times 0,18$$

$$= 0,09 \text{ m}^3$$

$$\rho_f = 1,025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Ditanyakan: ρ_b

Jawab:

Untuk mencari massa jenis benda, kita dapat menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}\rho_f g V_c &= \rho_b g V_b \\ \rho_b &= \frac{V_c}{V_b} \rho_f \\ &= \frac{0,09}{0,18} \times 1,025 \times 10^3 \\ &= 5,125 \times 10^2 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Jadi, massa jenis kayu tersebut adalah $5,125 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$.

Mozaik

Kapal induk

Kapal induk amat terkenal dengan bentuknya yang sangat besar. Ada beberapa negara maju yang memilikinya, misalnya Amerika Serikat. Kapal ini biasanya digunakan untuk mengangkut armada militer. Di dalamnya bisa digunakan untuk menyimpan berbagai peralatan perang dan fasilitas yang lengkap dengan berat mencapai ribuan ton, bahkan beberapa pesawat dapat ditampung di kapal ini.

<http://encyclopedia.quickseek>

Hukum Archimedes banyak digunakan dalam teknologi, seperti kapal laut, kapal selam, galangan kapal, dan balon udara.

1) Kapal Laut

Di depan, kita sudah membahas sedikit mengenai kapal laut yang mengapung sekaligus bergerak leluasa di atas permukaan laut. Kita tahu bahwa massa jenis benda adalah perbandingan antara massa benda dengan volume benda. Kita juga telah mengetahui bahwa benda dapat mengapung, jika massa jenisnya lebih kecil daripada massa jenis fluida. Berdasarkan pengertian ini, supaya massa jenis total kapal lebih kecil dari massa jenis air laut, maka volumenya dibuat lebih besar dengan cara membuat badan kapal berongga besar.

Selain memengaruhi massa jenis kapal, rongga badan kapal yang besar akan mampu memindahkan air yang cukup besar. Ini berarti gaya apung yang diberikan air laut menjadi lebih besar dan kapal dapat mengapung sekaligus bergerak leluasa.

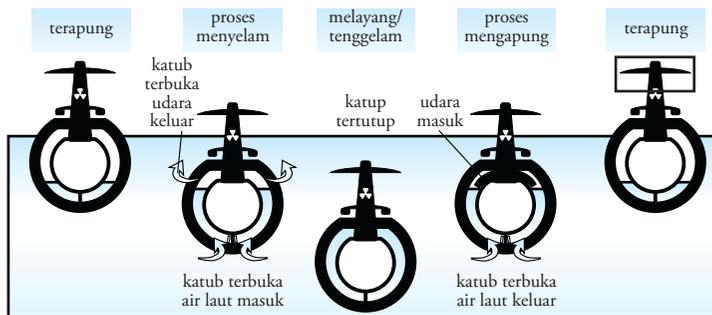
2) Kapal Selam

Salah satu penerapan Hukum Archimedes yang amat menarik adalah kapal selam. Kapal selam dapat bergerak di dalam air laut, sampai ratusan bahkan ribuan meter di bawah permukaan air laut. Namun demikian, kapal selam juga dapat memunculkan dirinya di permukaan laut.

Sekali lagi prinsip Archimedes tetap berlaku di sini. Perlu diketahui, kapal selam mempunyai dua rongga pada badannya. Rongga dalam, untuk menjalankan kapal sekaligus sebagai tempat awak kapal bekerja. Kemudian, rongga luar yang berfungsi sebagai tempat pengaturan volume air laut saat kapal selam ingin mengapung, melayang, atau tenggelam.

Sekarang perhatikan Gambar 6.15. Saat kapal selam akan tenggelam, air laut dipompa masuk ke dalam rongga. Banyaknya air laut yang dipompa masuk melewati katup disesuaikan dengan kedalaman kapal selam yang diinginkan. Akibatnya, berat kapal selam akan bertambah. Ini berarti gaya apung air laut lebih kecil daripada berat kapal selam ($w_b > F_a$), sehingga kapal dapat tenggelam.

Lalu, bagaimana cara kapal laut mengapung? Saat akan mengapung, air laut dalam rongga akan dipompa keluar dan digantikan dengan udara. Akibatnya, udara akan menekan air laut keluar melewati katup bagian bawah kapal. Dengan demikian, berat kapal selam akan lebih ringan, sehingga badan kapal dapat terapung.



Gambar 6.15 Mekanisme mengapung dan tenggelam pada kapal selam.

3) Galangan Kapal

Tidak berbeda dengan prinsip kerja kapal selam, pada galangan kapal juga berlaku Hukum Archimedes. Galangan kapal difungsikan untuk memperbaiki kapal yang rusak atau membuat kapal baru. Dalam hal ini, permukaan galangan kapal dibuat lebih luas sehingga volumenya lebih besar daripada kapal yang akan diangkat.

Saat kapal akan dimasukkan, galangan kapal diisi dengan air laut terlebih dahulu sehingga turun ke dalam laut. Setelah itu, kapal laut dapat masuk. Setelah kapal masuk, air laut yang masuk di dalam galangan kapal dipompa keluar. Dengan demikian, galangan kapal dapat naik kembali ke permukaan dengan kapal ada di atasnya. Untuk selanjutnya, kapal dapat diperbaiki.

4) Balon Udara

Telah kita ketahui jika udara juga termasuk fluida. Oleh karena itu, hukum-hukum yang terjadi pada fluida dapat pula terjadi pada udara. Dengan demikian, prinsip Archimedes dapat berlaku pula. Lalu, bagaimana kaitannya dengan balon udara? Balon udara biasanya diisi dengan gas Helium (He) yang mempunyai massa jenis lebih kecil dibandingkan massa jenis udara di sekeliling balon. Karenanya, gaya apung udara lebih besar daripada berat balon itu sendiri, sehingga balon udara dapat bergerak naik saat dilepaskan.

5) Hidrometer

Hidrometer merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur kerapatan zat cair atau massa jenis zat cair. Hidrometer ini terbuat dari tabung kaca berskala yang ujung bawahnya dibebani butiran timbal.

Keistimewaan Lumba-lumba

Apakah hal yang istimewa dari lumba-lumba? Ternyata, lumba-lumba menjadi inspirasi tersendiri bagi para insinyur kapal selam Jerman.

Para insinyur tersebut meniru desain kulit lumba-lumba untuk diterapkan pada lapisan luar kapal selam. Dengan lapisan yang sama seperti lumba-lumba, kapal selam dapat menaikkan kecepatan hingga 250% dari kecepatan asalnya.



Microsoft Encarta Premium 2006



a) Saat dinding rangkap masih berisi air



b) Saat dinding rangkap telah kosong

Gambar 6.18 Mekanisme kerja galangan kapal



hidrometer_static.
howstuffworks.com

Gambar 6.19 Hidrometer

Saat kita menggunakannya, hidrometer dapat langsung dimasukkan ke dalam zat cair yang akan dihitung massa jenisnya. Untuk mengetahui massa jenis zat cair yang kita ukur, terlebih dahulu kita lihat tinggi hidrometer yang tercelup pada zat cair tersebut. Caranya, dengan memerhatikan skala hidrometer yang setara dengan permukaan zat cair. Selanjutnya, kita dapat memasukkan nilai yang kita peroleh pada persamaan berikut.

$$h_{bf} = \frac{m}{A \rho_f}$$

Keterangan:

h_{bf} = tinggi hidrometer yang tercelup ke dalam zat cair (m)

m = massa hidrometer (kg)

A = luas penampang hidrometer (m^2)

ρ_f = massa jenis fluida yang diukur (kg/m^3)

V_{bf} = volume hidrometer yang tercelup dalam cairan (m)

Supaya kalian lebih mudah dalam memahami penjelasan yang diberikan mengerti, coba kalian perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah hidrometer mempunyai massa 35 gr, panjang tabungnya 10 cm, dan luas penampangnya 2 cm^2 . Saat hidrometer dimasukkan ke dalam zat cair, panjang tangkai yang menonjol di atas permukaan zat cair 5 cm. Hitunglah massa jenis zat cair tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$m = 35 \text{ gr} = 0,035 \text{ kg}$$

$$h = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

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

$$x = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

Ditanyakan: ρ_f

Jawab:

Tinggi hidrometer yang tercelup dalam zat cair adalah:

$$\begin{aligned} h_{bf} &= h - x \\ &= 0,1 \text{ m} - 0,05 \text{ m} \\ &= 0,05 \text{ m} \end{aligned}$$

Massa jenis zat cair dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} h_{bf} &= \frac{m}{A \rho_f} \\ \rho_f &= \frac{m}{A h_{bf}} \\ &= \frac{0,035}{(2 \times 10^{-4}) \times 0,05} \\ &= 3.500 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Jadi, massa jenis zat cair tersebut adalah 3.500 kg/m^3 .

Sebagai tugas proyek kalian di semester ini, kerjakan *Eureka* berikut bersama kelompok kalian.

Eureka

Kalian telah mempelajari Hukum Pascal dan Hukum Archimedes. Tugas kalian sekarang adalah merancang suatu alat yang dapat digunakan untuk membuktikan kebenaran Hukum Pascal dan Hukum Archimedes. Buatlah rancangan kalian sedemikian rupa sehingga layak disebut sebagai karya ilmiah. Kalian dapat menggunakan beberapa bahan yang ada di sekitar kalian, sehingga tidak perlu membeli. Lengkapi rancangan percobaan kalian dengan dasar teori yang kuat dan kerangka berpikir yang rasional. Setelah alat kalian jadi, ambillah data secukupnya untuk membuktikan bahwa alat kalian sudah sesuai dengan Hukum Pascal dan Hukum Archimedes. Jangan lupa untuk selalu mengonsultasikan setiap langkah yang ditempuh kepada guru kalian.

Kerjakan tugas ini selama kurang lebih tiga bulan. Kumpulkan hasil rancangan beserta laporan data percobaan kalian kepada guru. Guru akan menilai hasil atau produk kalian sebagai tugas proyek di semester ini.

Kalian telah mempelajari penjelasan mengenai hukum dasar fluida statis secara panjang lebar. Untuk menguji kompetensi yang kalian kuasai, kerjakan soal-soal pada *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Sebuah dongkrak hidrolis terdiri dari dua buah tabung yang saling berhubungan. Masing-masing tabung mempunyai sebuah penghisap. Diameter penghisap tabung pertama sebesar 7 cm dan diameter penghisap tabung kedua sebesar 42 cm. Bila sebuah mobil berbobot 2,4 ton berada di atas tabung kedua, berapa gaya yang diperlukan pada tabung pertama supaya mobil dapat terangkat? (diketahui: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)
2. Sebuah dongkrak hidrolis terdiri dari dua buah tabung yang saling berhubungan. Diameter tabung kedua dua kali lebih besar daripada tabung pertama. Jika sebuah mobil yang mempunyai bobot 2 ton berada di atas tabung kedua, berapa gaya yang diperlukan pada tabung pertama supaya mobil dapat terangkat? (percepatan gravitasi bumi (g) $9,8 \text{ m/s}^2$)
3. Sebuah tabung yang berdiameter 25 cm diisi dengan air. Kemudian, sebuah balok besi dimasukkan ke dalam tabung tersebut hingga tinggi airnya bertambah 2 cm. Hitunglah volume balok besi dan gaya apung yang dialami balok.
4. Sebuah balok kayu dimasukkan ke dalam air. Bila balok kayu mempunyai massa jenis $0,7 \text{ gr/cm}^3$ dan volumenya 12 cm^3 , apakah balok kayu tersebut mengapung, mengambang atau tenggelam? Berapa volume kayu yang berada di dalam air?

Fluida statis atau fluida yang diam, ternyata juga mempunyai gejala-gejala tertentu. Untuk mengenali gejala-gejala pada fluida statis, coba kalian diskusikan beberapa peristiwa pada *Eureka* berikut.

Eureka

Diskusikan beberapa peristiwa yang sering kita temukan dalam kehidupan sehari-hari berikut.

1. Ketika bermain balon sabun, kita dapat membuat lapisan tipis air sabun pada alat peniupnya. Menunjukkan apakah kejadian ini?
2. Pada saat menggunakan kompor, minyak yang berada di bawah dapat naik pada sumbu. Menurut kalian, bagaimanakah hal ini terjadi?
3. Ketika kita memasukkan benda tertentu ke dalam air, mungkin benda ini akan tenggelam. Akan tetapi, jika dimasukkan ke dalam oli atau cairan yang lebih kental, benda belum tenggelam. Faktor apakah yang menyebabkannya?

Konsultasikan hasil diskusi kalian kepada guru.

Beberapa peristiwa pada *Eureka* yang telah kalian diskusikan, merupakan beberapa contoh gejala pada fluida statis. Gejala tersebut antara lain tegangan permukaan, kapilaritas, dan kekentalan zat cair. Berikut akan kita bahas satu per satu gejala tersebut.

1. Tegangan Permukaan

Banyak kejadian sehari-hari yang menunjukkan tegangan permukaan. Nyamuk dapat berjalan di atas air merupakan salah satu contoh akibat adanya tegangan permukaan zat cair. Sebelum kita membahas tegangan permukaan lebih jauh, terlebih dahulu kita mendefinisikan pengertian **adhesi** dan **kohesi**.

Adhesi adalah gaya tarik-menarik antara partikel-partikel yang tidak sejenis. Sementara **kohesi** adalah gaya tarik-menarik antar partikel-partikel yang sejenis.

Contoh peristiwa adhesi adalah kapur tulis yang menempel di papan tulis. Dalam kejadian ini, partikel pada papan tulis menarik partikel kapur sehingga partikel kapur menempel di papan tulis. Contoh lainnya adalah menempelnya debu pada kaca. Sementara contoh kohesi adalah tarik-menarik antar partikel air atau partikel lainnya.

Seekor nyamuk atau benda-benda lain seperti silet, jarum yang mengapung di atas permukaan air disebabkan permukaan zat cair (fluida) itu seakan-akan berperilaku seperti membran yang teregang karena tegangan. Tegangan ini bekerja sejajar dengan permukaan sehingga memunculkan gaya tarik antar molekul (kohesi). Efek yang mempengaruhi kejadian ini disebut **tegangan permukaan**.

Tegangan permukaan didefinisikan sebagai gaya per satuan panjang yang bekerja pada arah tegak lurus dengan permukaan zat cair.

Perhatikan Gambar 6.18. Dari gambar tersebut, besarnya tegangan permukaan fluida dapat dicari dengan persamaan:

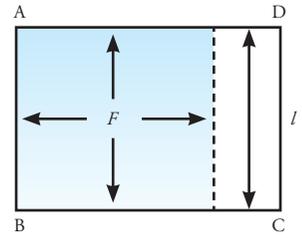
$$\gamma = \frac{F}{l}$$

Keterangan:

γ = tegangan permukaan (N/m)

F = gaya (N)

l = panjang permukaan (m)



Gambar 6.18 Selaput suatu fluida

Kemudian, apabila zat cair mempunyai dua permukaan yakni permukaan atas dan bawah ($2l$), tegangan permukaannya dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\gamma = \frac{F}{2l}$$

Untuk memperluas permukaan selaput fluida, maka ruas OP digeser dengan gaya sebesar F melawan gaya kohesi (F_k) fluida sepanjang x . Secara matematis, usaha (W) untuk memperluas permukaan selaput fluida adalah sebagai berikut.

$$W = \text{gaya } (F) \times \text{jarak perpindahan } (\Delta x) \\ = (\gamma l) \Delta x$$

$$W = \gamma \Delta A$$

Oleh karena itu, berdasarkan persamaan sebelumnya, kita memperoleh persamaan tegangan permukaan zat cair saat selaputnya diperluas sebagai berikut.

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A}$$

Keterangan:

γ = tegangan permukaan (N/m atau J/m²)

F = gaya tegangan permukaan (N)

l = panjang permukaan fluida (m)

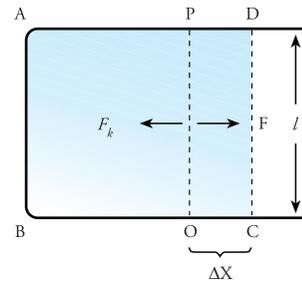
W = usaha untuk memperluas permukaan zat cair (J)

Δx = perubahan panjang permukaan fluida (m)

ΔA = perubahan luas permukaan fluida (m²)

Salah satu contoh bahan yang dapat menurunkan tegangan permukaan air adalah sabun dan deterjen. Zat-zat ini dinamakan dengan *surfactant*. Sabun dan deterjen ini akan mempermudah penghilangan kotoran pada serat-serat atau lekuk-lekuk kecil pada benda.

Untuk mempermudah pemahaman kalian, perhatikan contoh berikut ini.



Gambar 6.19 Usaha yang dilakukan untuk memperluas selaput suatu fluida

Contoh

1. Sebuah kawat berbentuk U dengan panjang 10 cm dicelupkan ke dalam air sabun. Untuk menarik air itu diperlukan gaya tambahan sebesar 0,015 N. Hitunglah tegangan permukaan cairan sabun.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$l = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$F = 0,015 \text{ N}$$

Ditanyakan: γ

Jawab:

Untuk mencari tegangan permukaan air sabun, kita dapat menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{F}{2l} \\ &= \frac{0,015}{2 \times 0,1} \\ &= \frac{0,015}{0,2} \\ &= 0,075 \text{ N/m}\end{aligned}$$

Jadi, tegangan permukaan cairan sabun itu adalah 0,075 N/m.

2. Suatu zat cair mempunyai tegangan permukaan dengan panjang permukaannya 20 cm. Apabila suatu usaha dilakukan untuk memperluas permukaan zat cair sebesar 0,04 joule, maka panjang permukaan zat cair berubah sebesar 2 cm. Tentukanlah tegangan permukaan zat cair tersebut sekarang.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$W = 0,04 \text{ J}$$

$$l = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$\Delta x = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

Ditanyakan: γ

Jawab:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{W}{\Delta A} \\ &= \frac{W}{l \times \Delta x} \\ &= \frac{0,04}{0,2 \times 0,02} \\ &= \frac{0,04}{0,004} \\ &= 10 \text{ J/m}^2\end{aligned}$$

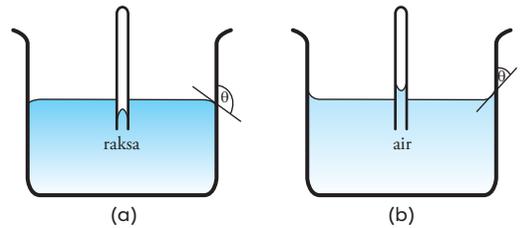
Jadi, besar tegangan permukaannya adalah 10 J/m².

2. Kapilaritas

Tegangan permukaan ternyata juga mempunyai peranan pada fenomena menarik lainnya, yaitu **kapilaritas**. Contoh peristiwa yang menunjukkan kapilaritas adalah minyak tanah yang dapat naik melalui sumbu kompor. Selain itu, dinding rumah kita pada musim penghujan dapat basah juga terjadi karena adanya gejala kapilaritas. Mengapa gejala kapilaritas ini dapat terjadi?

Untuk membahas kapilaritas, kita perhatikan sebuah pipa kaca dengan diameter kecil (pipa kapiler) yang ujungnya terbuka saat dimasukkan ke dalam bejana berisi air. Kita dapat menyaksikan bahwa permukaan air dalam pipa akan naik. Lain hasilnya jika kita mencelupkan pipa tersebut ke dalam bejana berisi air raksa. Permukaan air raksa dalam tabung akan turun atau lebih rendah daripada permukaan air raksa dalam bejana. Gejala inilah yang disebut dengan **gejala kapilaritas**.

Pada kejadian ini, pipa yang digunakan dinamakan **pipa kapiler**. Oleh karena itu, **gejala kapilaritas adalah gejala naik turunnya zat cair dalam pipa kapiler**. Perhatikan Gambar 6.20. Permukaan air dalam pipa kapiler akan berbeda dengan permukaan air raksa. Permukaan air dalam pipa kapiler berbentuk cembung, sedangkan permukaan air raksa berbentuk cekung. Permukaan zat cair yang berbentuk cekung atau cembung disebut **meniskus**. Permukaan air pada dinding kaca yang berbentuk cekung disebut **meniskus cekung**, sedangkan permukaan air raksa yang berbentuk cembung disebut **meniskus cembung**.



Gambar 6.20 (a) Permukaan air raksa pada pipa kapiler berbentuk cembung, (b) Permukaan air pada pipa kapiler berbentuk cekung.

Penyebab dari gejala kapiler adalah adanya adhesi dan kohesi. Pada gejala kapilaritas pada air, air dalam pipa kapiler naik karena adhesi antara partikel air dengan kaca lebih besar daripada kohesi antar partikel airnya. Sebaliknya, pada gejala kapilaritas air raksa, adhesi air raksa dengan kaca lebih kecil daripada kohesi antar partikel air raksa. Oleh karena itu, sudut kontak antara air raksa dengan dinding kaca akan lebih besar daripada sudut kontak air dengan dinding kaca.

Lalu, adakah cara untuk menentukan besarnya kenaikan atau penurunan permukaan zat cair dalam pipa kapiler? Kita dapat menghitungnya dengan menggunakan persamaan berikut.

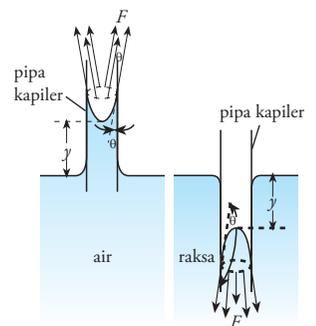
$$y = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

Keterangan:

- y = besar kenaikan atau penurunan zat cair dalam pipa kapiler (m)
- γ = tegangan permukaan (N/m)
- θ = sudut kontak
- ρ = massa jenis zat cair (fluida) (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- r = jari-jari pipa kapiler (m)

Sudut kontak pada persamaan tersebut sudut kontak menunjukkan sudut yang terbentuk oleh dinding bejana dengan garis singgung permukaan cairan. Perhatikan Gambar 6.21. Apabila sudut kontak lebih kecil atau sama dengan 90° ($\theta \leq 90^\circ$), maka permukaan cairan pada pipa kapiler lebih tinggi daripada permukaan air pada bejana. Dengan kata lain, permukaan cairan pada pipa kapiler akan naik. Sedangkan jika sudut kontak lebih besar dari 90° ($\theta > 90^\circ$), permukaan air pada pipa kapiler akan turun.

Perhatikan contoh cara menghitung besar kenaikan atau penurunan zat cair pada contoh soal berikut.



Gambar 6.21 Hubungan sudut kontak dengan permukaan air pada pipa kapiler

Contoh

1. Sebuah pipa kapiler berjari-jari 1 mm yang terbuat dari kaca dicelupkan dalam suatu cairan yang mempunyai massa jenis $0,67 \text{ gr/cm}^3$. Cairan tersebut naik ke dalam pipa kapiler dan permukaan atasnya membentuk sudut kontak 57° dengan permukaan gelas. Jika tegangan permukaan zat cair $6,6 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, tentukan tinggi cairan dalam pipa kapiler itu. Gunakan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ dan $\cos 57^\circ = 0,55$.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$r = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$$

$$\theta = 57^\circ$$

$$\rho = 0,67 \text{ gr/cm}^3 = 0,67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma = 6,6 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

Ditanyakan: y

Jawab:

Untuk mencari tinggi kenaikan permukaan pada pipa kapiler, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned} y &= \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \\ &= \frac{2 \times (6,6 \times 10^{-3}) \times \cos 57^\circ}{(0,67 \times 10^3) \times 9,8 \times 0,001} \\ &= \frac{7,26 \times 10^{-3}}{6,566} \\ &= 1,106 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, tinggi zat cair pada pipa kapiler adalah 1,106 mm.

2. Sebuah pipa kapiler berjari-jari 0,8 cm dimasukkan pada air raksa yang massa jenisnya $13,6 \text{ gr/cm}^3$. Apabila sudut kontaknya 98° dan tinggi permukaan zat cair dalam pipa kapilernya adalah 4 mm di bawah permukaan air raksa, tentukan tegangan permukaan air raksa tersebut. Diketahui $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ dan $\cos 98^\circ = -0,14$

Penyelesaian:

Diketahui:

$$r = 0,8 \text{ cm} = 0,008 \text{ m}$$

$$\rho = 13,6 \text{ gr/cm}^3 = 1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

$$\theta = 98^\circ$$

$$y = -4 \text{ mm} = -0,004 \text{ m}$$

Ditanyakan: γ

Jawab:

Untuk mencari tegangan permukaan air raksa, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned} y &= \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \\ \gamma &= \frac{y \rho g r}{2 \cos \theta} \\ &= \frac{(-0,004) \times (1,36 \times 10^4) \times 9,8 \times 0,008}{2 \times \cos 98^\circ} \\ &= \frac{-4,265}{-0,28} \\ &= 15,23 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Jadi, tegangan permukaan air raksa adalah 15,23 N/m.

3. Viskositas

Bila kita ingat minyak oli, maka yang teringat adalah cairannya yang cukup kental. Kekentalan yang dimiliki zat cair inilah yang disebut **viskositas**. Ketika kita menjatuhkan benda ke dalam fluida, maka benda tersebut akan mendapatkan gaya gesek yang diakibatkan oleh tingkat kekentalan zat cair tersebut. Semakin kental suatu zat cair, maka gaya gesek yang dirasakan benda semakin besar. Sebagai contoh, benda ketika dijatuhkan ke

oli akan mendapatkan gaya gesek yang lebih besar daripada ketika dijatuhkan ke dalam air. Ini terjadi karena oli lebih kental daripada air.

Sekarang, perhatikan Gambar 6.22. Misalkan sebuah bola besi di jatuhkan ke dalam fluida. Ketika baru dijatuhkan, bola besi mendapatkan gaya gravitasi ke bawah sehingga mempunyai percepatan sebesar g . Namun, gaya gesek yang ditimbulkan fluida akan mengurangi gaya gravitasi ini, sehingga suatu saat kecepatan benda akan konstan. Besarnya **gaya gesek** atau **gaya viskositas** (\vec{F}_v) pada benda berbanding lurus dengan kecepatan (\vec{v}), luas bidang (A) yang bersentuhan dengan fluida, dan jarak yang ditempuh benda. Hubungan ini diberikan dalam bentuk persamaan:

$$\vec{F}_v = \eta \frac{A\vec{v}}{b}$$

η (dibaca “eta”) merupakan **koefisien viskositas**. Koefisien viskositas inilah yang menyatakan kekentalan suatu fluida. Sebagai penghormatan kepada seorang ilmuwan Prancis, **J. L. Poiseulle** (1799-1869), satuan SI untuk koefisien viskositas adalah **Pascal.sekon (Pa s)** atau **Ns/m²**. Sementara, dalam sistem CGS, satuannya adalah **poise (P)**, di mana 1 poise setara dengan 1 dyne s/cm².

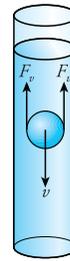
Untuk benda berbentuk bola, besar gaya viskositas yang dirasakan ketika bergerak pada suatu fluida diberikan dengan persamaan:

$$F_v = 6 \pi \eta r v$$

Keterangan:

- F_v = berat gaya viskositas (N)
- η = koefisien viskositas fluida (Pa s atau Ns/m²)
- r = jari-jari bola (m)
- v = kelajuan bola (m/s)

Persamaan inilah yang dinamakan dengan **Hukum Stokes**. Bagaimana -kah contoh penerapannya? Perhatikan contoh berikut.



Gambar 6.22 Bola besi di dalam cairan akan mendapatkan gaya gesek

Contoh

Sebuah kelereng dijatuhkan ke dalam tabung yang berisi metil alkohol. Jika koefisien viskositas metil alkohol $5,9 \times 10^{-4}$ Ns/m², jari-jari kelereng 0,3 cm, dan kecepatan kelereng dalam oli 0,2 m/s, tentukan gaya viskositasnya.

Penyelesaian:

Diketahui:
 $\eta = 5,9 \times 10^{-4}$ Ns/m²
 $r = 0,3$ cm = 3×10^{-3} m
 $v = 0,2$ m/s

Ditanyakan: F_v

Jawab: untuk mencari gaya viskositas, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned} \vec{F}_v &= \eta \frac{A\vec{v}}{b} \\ F_v &= 6\pi \eta r v \\ &= 6 \times 3,14 \times (5,9 \times 10^{-3}) \times (3 \times 10^{-3}) \times 0,2 \\ &= 6,7 \times 10^{-6} \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, gaya viskositas yang dialami kelereng adalah $0,67 \times 10^{-5}$ N.

Kita telah mempelajari gejala-gejala pada fluida statis. Untuk menguji kompetensi yang kalian miliki, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Sebuah pipa kapiler yang mempunyai diameter 2 mm, dimasukkan ke dalam air. Jika besar $\gamma = 1 \text{ N/m}$, tentukan kenaikan air jika sudut kontaknya 60° ?
2. Sebuah kawat yang berbentuk U diberi seutas kawat kecil AB yang mempunyai massa 0,2 gr seperti pada gambar di samping ini. Kemudian, kawat tersebut dicelupkan ke air sabun sehingga saat diangkat terbentang lapisan sabun. Karena pengaruh tegangan permukaan fluida, kawat kecil tersebut condong ke atas. Supaya tidak condong, kawat kecil tersebut diberi beban. Jika panjang AB 10 cm dan tegangan permukaan lapisan sabun $0,025 \text{ N/m}$, hitunglah beban yang diberikan supaya kawat kecil menjadi lurus atau seimbang.



3. Bola besi berjari-jari 2 cm dimasukkan ke dalam tabung yang berisi oli. Bila koefisien viskositas oli $3,0 \times 10^{-2} \text{ Pa s}$ dan kecepatan bola besi 0,3 m/s, tentukan gaya viskositasnya.

D Fluida Dinamis

Pada bab sebelumnya, kalian telah membahas bagian fluida yang tidak bergerak atau fluida statis. Pelbagai pengetahuan telah kalian dapatkan. Mulai dari pengertiannya, hukum-hukum yang berlaku, serta penerapan fluida statis dalam keseharian. Nah, subbab ini akan membahas berbagai pengertian yang berkaitan dengan fluida dinamis.

1. Fluida Ideal dan Fluida Sejati

Ada tiga syarat jika fluida ingin dikatakan **sempurna atau ideal**. **Pertama**, fluida tersebut **tidak kompresibel** atau tidak terpengaruh oleh tekanan. Artinya, jika fluida terkena tekanan, tidak terjadi perubahan volume. **Kedua**, saat fluida sedang bergerak **tidak mengalami gesekan** dengan zat di sekitarnya. **Ketiga**, fluida tersebut mengalir dengan kecepatan konstan atau **alirannya stasioner**.

Fluida yang sering kalian lihat di alam ini disebut **fluida sejati**. Fluida sejati ini mempunyai sifat-sifat tertentu, antara lain bila mendapatkan tekanan volumenya akan mengalami perubahan. Keadaan ini biasa disebut **kompresibel**. Selain itu, saat mengalir fluida **mengalami gesekan** dengan zat yang ada di sekitarnya. Misalnya, air yang mengalir di dalam tabung, tentu akan mengalami gesekan dengan dinding tabung. Inilah salah satu penyebab kecepatan fluida tidak konstan atau **tidak stasioner**. Jadi, kesimpulannya sifat fluida ini berkebalikan dengan fluida ideal.

2. Pelbagai Jenis Aliran Fluida

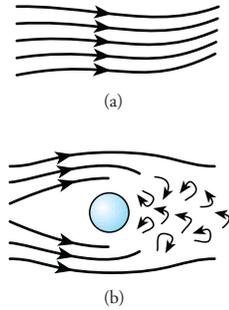
Saat mengalir, ternyata fluida tersebut tidak kategorikan pada satu jenis aliran saja. Akan tetapi, ada beberapa jenis aliran, yaitu: **aliran stasioner**, **aliran lurus** atau **laminer**, dan **aliran turbulen**. Kapan pelbagai jenis aliran fluida ini dapat terjadi? Perhatikan Gambar 6.23.

Aliran stasioner terjadi apabila suatu fluida melalui garis alir (*stream-line*) yang sama dengan garis alir fluida yang mengalir di depannya. **Garis alir** merupakan lintasan yang ditempuh fluida saat bergerak.

Kemudian, fluida akan mempunyai **aliran lurus atau laminer**, jika garis alir yang saling *bersebelahan* dilalui partikel fluida dengan mulus. Selain itu, garis alir ini juga tidak saling bersilangan, sehingga partikel fluida menuju arah yang sama.

Selanjutnya, fluida juga bisa mempunyai **aliran turbulen**. Biasanya aliran inilah yang sering terjadi. Fluida akan mengalaminya bila garis alir yang dilalui terdapat lingkaran-lingkaran yang tidak beraturan, bentuknya kecil dan menyerupai pusaran.

Nah, itulah jenis-jenis aliran yang dapat terjadi pada fluida. Kalian pasti sudah memahaminya. Baiklah, kita lanjutkan pada bahasan berikutnya.



Gambar 6.23 (a) Aliran lurus atau laminer, (b) aliran turbulen.

3. Persamaan Kontinuitas

Sebelum membahas Persamaan Kontinuitas, ada baiknya terlebih dahulu kita mengetahui definisi pengertian debit.

Debit aliran (Q) adalah besaran yang menunjukkan banyaknya volume fluida yang melewati suatu penampang dalam waktu tertentu.

Debit aliran dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Keterangan:

Q = debit aliran (m^3/s)

V = volume fluida yang mengalir (m^3)

t = selang waktu fluida mengalir (s)

Sementara itu, jika fluida mengalir pada suatu pipa, maka volume fluida yang mengalir merupakan perkalian luas penampang pipa dengan jarak yang ditempuh selama t detik, perhatikan gambar 6.24. Jadi, dengan mensubstitusikan persamaan $V = Ax$ dan $x = vt$, kita mendapatkan rumus untuk menghitung debit air sebagai berikut.

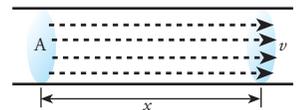
$$Q = Av$$

Keterangan:

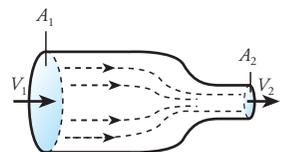
A = luas penampang tempat fluida mengalir (m^2)

v = laju aliran fluida (m/s)

Lalu, bagaimanakah dengan debit fluida yang mengalir melalui dua ujung dengan luas penampang berbeda? Perhatikan Gambar 6.25. Sesuai dengan kenyataan, ternyata debit fluida yang melalui penampang A_1 sama dengan debit yang melalui penampang A_2 . Untuk kejadian seperti pada Gambar 6.25, kita dapat menuliskan persamaan:



Gambar 6.24 Fluida mengalir dengan kecepatan v pada suatu penampang dengan luas A .



Gambar 6.25 Aliran fluida dengan luas penampang yang berbeda



Dok. PIM

Gambar 6.26 Dengan menutup sebagian mulut selang, air memancar lebih kencang.

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Persamaan di atas biasa disebut **persamaan kontinuitas**. Jadi, dapat kita simpulkan, bila suatu fluida yang mengalir melewati penampang dengan luas yang berbeda-beda akan mempunyai debit aliran sama. Hanya saja, pada penampang yang lebih kecil fluida akan mengalir lebih cepat. Sebaliknya, pada penampang yang lebih besar, fluida mengalir lebih lambat. Penerapan konsep ini dapat kalian perhatikan ketika mengalirkan air pada selang. Ketika lubang selang ditutup sebagian, air akan memancar lebih jauh dan lebih cepat dibandingkan ketika tidak ditutup.

Untuk mengetahui penerapan persamaan kontinuitas dalam menyelesaikan soal, pelajari contoh berikut.

Contoh

1. Seseorang mengalirkan air pada keran. Apabila volume yang keluar dari lubang keran adalah 2 liter, hitunglah debit aliran air yang keluar dalam waktu 1,5 menit.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V = 2,7 \text{ liter} = 2,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$t = 1,5 \text{ menit} = 90 \text{ sekon}$$

Ditanyakan: Q

Jawab:

Untuk mencari Q kita menggunakan persamaan:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$= \frac{2,7 \times 10^{-3}}{90}$$

$$= 3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Jadi, debit aliran air yang keluar adalah $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

2. Seorang petugas SPBU sedang melayani pembeli bensin. Apabila selang mengalirkan bensin $3,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ bensin tiap sekon dan luas penampang selangnya 16 cm^2 , hitung laju bensin yang keluar dari selang.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$Q = 3,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = 16 \text{ cm}^2 = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Ditanyakan: v

Jawab:

Untuk menghitung laju aliran, kita menggunakan persamaan:

$$Q = Av$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{3,2 \times 10^{-3}}{1,6 \times 10^{-3}}$$

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

Jadi, laju aliran bensin saat pengisian adalah 2 m/s .

3. Sebuah selang mempunyai dua ujung dengan luas penampang berbeda. Pada pangkalnya, selang mempunyai luas penampang 10 cm^2 dan ujungnya 8 cm^2 . Apabila kecepatan air pada pangkal selang 6 cm/s , hitung kecepatan air pada ujung selang tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$A_1 = 10 \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_2 = 8 \text{ cm}^2 = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v_1 = 6 \text{ cm/s} = 6 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

Ditanyakan: v_2

Jawab: Dengan menggunakan persamaan kontinuitas, kita mendapatkan:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\frac{10^{-3}}{8 \times 10^{-4}} = \frac{v_2}{6 \times 10^{-2}}$$

$$v_2 = \frac{6 \times 10^{-5}}{8 \times 10^{-4}}$$

$$= 0,075 \text{ m/s}$$

$$= 7,5 \text{ cm/s}$$

Jadi, kecepatan air pada ujung selang adalah $7,5 \text{ cm/s}$.

4. Prinsip Bernoulli

Mobil balap F-1 adalah mobil balap yang mampu bergerak dengan kelajuan tinggi. Pada moncong depannya terdapat sepasang sayap yang menjadikan mobil ini terkendali saat dikendarai dengan kecepatan tinggi. Selain di depan, desain sayap juga ada di bagian belakang mobil. Prinsip kerja sayap ini meniru seperti sayap pesawat terbang yang menggunakan Prinsip Bernoulli. Bedanya, sayap ini berfungsi memberikan tekanan pada mobil agar selalu di atas lintasan sehingga tidak terbang. Semakin kencang mobil bergerak akan semakin besar tekanan yang diberikan angin pada sayapnya.

Nah, teknologi di atas ternyata menggunakan konsep perbedaan tekanan pada kedua sisi sayapnya, yang merupakan salah satu penerapan prinsip Bernoulli. Perhatikan gambar 6.28. Gambar tersebut adalah rangkaian percobaan Bernoulli. Mekanisme percobaannya, yaitu suatu fluida ideal dialirkan melalui penampang A_1 . Akibatnya, fluida dapat mengalir dari 1 ke 1', sehingga bergerak sejauh Δl_1 . Kemudian, fluida juga mengalir dari 2 ke 2', sehingga bergerak juga sejauh Δl_2 . Dengan demikian, fluida mengalir dari 1 ke 2. Nah, pada saat ini akan terjadi perubahan kecepatan dari v_1 di titik 1 menjadi v_2 di titik 2.

Bernoulli berusaha membuktikan pengaruh kecepatan fluida terhadap tekanan di dalam fluida. Dari hasil percobaannya, ia berkesimpulan:

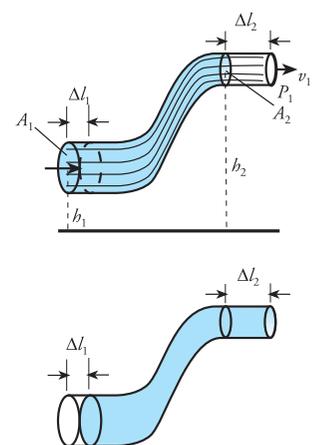
Di dalam fluida yang mengalir dengan kecepatan tinggi akan diperoleh tekanan yang lebih kecil. Sebaliknya, pada kecepatan yang rendah akan diperoleh tekanan yang lebih tinggi.

Jadi, tekanan di dalam fluida berbanding terbalik dengan kecepatan alirannya. Inilah yang kemudian dikenal dengan nama **Prinsip Bernoulli** atau **Hukum Bernoulli**.



formula1_media.rivals.net

Gambar 6.27 Salah satu bagian mobil F1 menggunakan hukum Bernoulli



Gambar 6.28 Skema percobaan Bernoulli



www.mathematik.ch

Daniel Bernoulli (1.700-1.782), adalah orang Swiss, yang berasal dari keluarga pakar matematika. Dia banyak membuat temuan-temuan yang sangat penting dalam ilmu ukur ruang. Selain itu, sumbangsih cemerlang yang memelopori penemuan pesawat yaitu tulisannya tentang hidrodinamika.

dari pelbagai sumber

Kita dapat melakukan penurunan untuk mendapatkan persamaan Bernoulli. Bagaimana caranya? Pada saat fluida mengalir di titik 1, usaha yang dilakukan oleh tekanan P_1 pada pipa dengan luas penampang A_1 adalah:

$$W_1 = F_1 \Delta l_1$$

$$W_1 = P_1 A_1 \Delta l_1$$

Sementara, usaha yang dilakukan oleh tekanan P_2 pada pipa dengan luas penampang A_2 adalah:

$$W_2 = -P_2 A_2 \Delta l_2$$

Tanda negatif ini muncul karena gaya yang diberikan fluida melawan arah gerak fluida. Usaha juga dilakukan oleh gaya gravitasi, yakni dari titik 1 ke titik 2 adalah sebagai berikut.

$$W_g = -mg (h_2 - h_1)$$

Persamaan ini bertanda negatif karena arah gerakan fluida ke atas melawan gaya gravitasi. Dengan demikian, kita akan memperoleh usaha total W yang dilakukan fluida sebagai berikut.

$$W_{\text{tot}} = W_1 + W_2 + W_g$$

$$W_{\text{tot}} = P_1 A_1 \Delta l - P_2 A_2 l_2 - mgh_2 + mgh_1$$

Menurut hukum Kekekalan Energi, usaha yang dilakukan fluida sama dengan perubahan energi kinetik benda, sehingga:

$$W = \Delta Ek$$

$$P_1 A_1 \Delta l - P_2 A_2 \Delta l_2 - mgh_2 + mgh_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

Dengan mensubstitusikan $A \Delta l = V = \frac{m}{\rho}$, kita mendapatkan persamaan:

$$P_1 \frac{m}{\rho} - P_2 \frac{m}{\rho} - mgh_2 + mgh_1 = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

Dengan mengalikan kedua ruas dengan faktor $\frac{\rho}{m}$, kita mendapatkan persamaan:

$$P_1 - P_2 - \rho gh_2 + \rho gh_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

Nah, persamaan di atas dapat kita ubah dalam bentuk:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2$$

Persamaan tersebut adalah **persamaan Bernoulli**. Karena titik 1 dan 2 diambil sembarang pada penampang, maka persamaan tersebut dapat dituliskan secara umum sebagai berikut.

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{tetap}$$

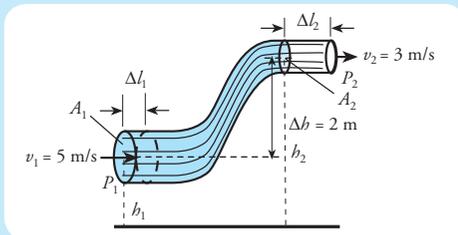
Keterangan: P = tekanan (N/m^2) g = percepatan gravitasi (m/s^2) ρ = massa jenis fluida (kg/m^3) h = tinggi pipa pada tanah (m) v = kecepatan aliran fluida (m/s^2)

Hukum Bernoulli hanya membahas tekanan fluida yang tidak kompresibel, viskositasnya diabaikan, dan alirannya stasioner. Tekanan di dalam fluida juga dipengaruhi oleh kecepatan fluida tersebut.

Kalian dapat memahami uraian materi dengan memerhatikan contoh berikut.

Contoh

1.



Pada pipa dengan luas penampang serba sama mengalir air dari bawah ke atas. Jika perbedaan ketinggian daerah alirannya adalah 2 meter dan besarnya laju aliran air tampak seperti pada gambar, tentukanlah perbedaan tekanan air di dalam pipa sehingga air dapat mengalir ke atas.

Penyelesaian:**Diketahui:**

$$\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad v_2 = 3 \text{ m/s}$$

$$v_1 = 5 \text{ m/s} \quad \Delta h = 2 \text{ m}$$

Ditanyakan: $P_1 - P_2$

Jawab: Untuk mencari selisih tekanan, kita dapat mempergunakan persamaan:

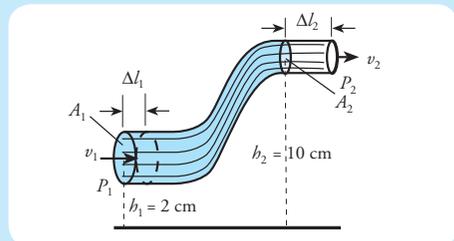
$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_2 - \rho g h_1$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (h_2 - h_1)$$

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= \frac{1}{2} \times (1 \cdot 10^3) \times (9 - 25) + (1 \cdot 10^3) \\ &\quad \times 10 \times 2 \\ &= (-8 \times 10^3) + (20 \times 10^3) \\ &= 12 \times 10^3 \\ &= 1,2 \times 10^4 \end{aligned}$$

Jadi, perbedaan tekanan air di dalam pipa adalah $1,2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$. Tekanan di bawah lebih besar daripada tekanan di atas, sehingga air dapat naik.

2.



Sebuah pipa silinder yang dialiri air diletakkan mendatar. Perhatikan gambar. Kecepatan aliran air pada penampang pertama yaitu 3 m/s. Sementara, pada penampang kedua kecepatan alirannya 9 m/s. Apabila tekanan pada penampang pertama adalah 4.000 N/m^2 , hitung tekanan di penampang kedua.

Penyelesaian:**Diketahui:**

$$v_1 = 3 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 9 \text{ m/s}$$

$$h_1 = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

$$h_2 = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$P_1 = 4.000 \text{ N/m}^2$$

Ditanyakan: P_2 **Jawab:**

Untuk mencari P_2 , gunakan persamaan:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$4.000 + (\frac{1}{2} \times (1 \times 10^3) \times 3^2) + (1 \times 10^3) \times 9,8 \times 0,02 = P_2 + (\frac{1}{2} \times (1 \cdot 10^3) \times 9^2) + (1 \times 10^3) \times 9,8 \times 0,1$$

$$8.696 = P_2 + 1.516$$

$$P_2 = 7.180 \text{ N/m}^2$$

Jadi, tekanan luas penampang kedua adalah 7.180 N/m^2 .

5. Penerapan Hukum Dasar Fluida Dinamis dalam Kehidupan Keseharian

Banyak sistem kerja suatu alat yang menggunakan prinsip hukum dasar fluida dinamis. Terutama, yang berkaitan dengan persamaan kontinuitas dan hukum/persamaan Bernoulli. Dapatkah kalian menyebutkan contohnya? Berikut akan dibahas beberapa penerapan hukum dasar fluida dinamis.

a. Penerapan Persamaan Kontinuitas

Ada beberapa penerapan persamaan kontinuitas dalam keseharian di sekitar kita. Misalnya, mekanisme aliran darah dalam sistem sirkulasi manusia. Kita dapat mengukur perbedaan kelajuan darah saat darah mengalir dari jantung ke aorta, kemudian ke arteri-arteri utama. Selanjutnya, ke arteri kecil dan diteruskan ke sejumlah pembuluh kapiler.

Selain itu, saluran pemanas ke ruangan juga menggunakan penerapan persamaan kontinuitas. Kita dapat menentukan besarnya saluran pemanas yang digunakan untuk menghangatkan ruangan dengan persamaan ini jika laju udara dan volume ruangan diketahui.

b. Penerapan Hukum/Persamaan Bernoulli dalam Berbagai Peralatan

Sayap mobil *F1* yang mengadopsi prinsip kerja daya angkat pesawat terbang merupakan salah satu penerapan Hukum Bernoulli. Selain itu, juga pada prinsip kerja karburator mobil atau motor, teorema Toricelli, tabung venturi, dan penyemprot nyamuk serta masih banyak yang lainnya.

Nah, kesemuanya bekerja berdasarkan perbedaan tekanan fluida. Maksudnya, pada daerah aliran fluida rendah akan memberikan tekanan yang lebih besar. Sementara, pada aliran fluida yang tinggi, tekanan pada daerah tersebut akan menjadi lebih rendah. Supaya lebih jelas, kalian dapat memerhatikan uraiannya sebagai berikut.

1) Teorema Toricelli

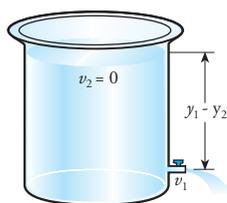
Bagaimana bentuk bak penampungan air di rumah kalian? Ketika keran dibuka, air dapat keluar dengan kelajuan tertentu yang dapat dihitung. Perhatikan Gambar 6.29.

Anggaplah luas penampang bak penampungan jauh lebih besar dibandingkan luas penampang keran. Ini berarti kecepatan air yang terdapat pada bak akan mendekati nol ($v_2 \approx 0$). Selanjutnya, karena permukaan bak terbuka terhadap atmosfer, maka tekanan pada bak dan kran sama besar ($P_1 = P_2$). Dengan demikian, berdasarkan persamaan Bernoulli, pernyataan di atas dapat kita tuliskan dalam bentuk persamaan berikut.

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = \rho g y_2$$

atau

$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)}$$



Gambar 6.29 Teorema Toricelli

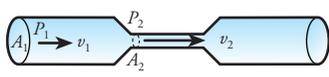
$$v_1 = \sqrt{2gh}$$

Persamaan inilah yang dinamakan **teorema Torricelli**. Penamaan teorema ini didasarkan pada nama orang yang menemukannya yakni **Evangelista Torricelli**, murid Galileo. Persamaan tersebut menunjukkan jika air yang keluar dari keran mempunyai kelajuan yang sama seperti laju benda yang jatuh bebas dengan ketinggian h . Untuk selanjutnya, laju air yang keluar dari keran ini dinamakan **laju efflux**.

2) Efek Venturi

Saat fluida mengalir melalui sebuah pipa dengan penyempitan mirip seperti kerongkongan, maka luas penampangnya menjadi kecil. Padahal luas penampang pipa sebelumnya berukuran besar. Akibatnya, laju fluida saat melalui pipa sempit akan semakin besar, sehingga tekanannya akan menjadi kecil. Inilah yang dimaksud **efek venturi**.

Efek venturi menyatakan bahwa “apabila laju fluida bertambah, tekanan fluidanya akan berkurang”.



Gambar 6.30 Tabung venturi

Kalian dapat memerhatikan ilustrasinya pada Gambar 6.30.

Karena kedua bagian pipa mempunyai ketinggian yang sama ($y_1 = y_2$), maka persamaan Bernoulli bisa kita tuliskan dengan bentuk persamaan berikut.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

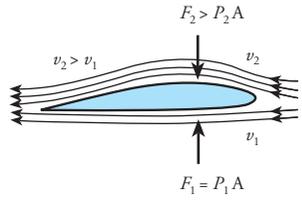
atau

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konstan}$$

3) Daya Angkat Pesawat Terbang

Mungkin kalian bertanya dalam hati, apakah yang membuat pesawat dapat terbang naik dan turun dengan nyaman? Ternyata, itu semua dapat terjadi karena pengaruh dari sayap pesawat. Mekanisme kerja sayap pesawat dapat kalian peajari dari gambar 6.31.

Udara yang meluncur di atas sayap yang melengkung harus menempuh jarak yang lebih jauh dibandingkan udara yang meluncur di bawah sayap. Karena itu, udara di atas sayap meluncur lebih cepat. Kecepatan yang bertambah ini menyebabkan tekanan udara di atas sayap menjadi lebih rendah. Tekanan bawah sayap yang lebih besar menyebabkan sayap terangkat.



Gambar 6.31 Sistem kerja sayap pesawat terbang.

Besar gaya angkat pada sayap pesawat terbang dapat kita hitung menggunakan persamaan berikut.



www.explore-st-andrews.com

Gambar 6.32 Sayap pesawat terbang menggunakan prinsip Bernoulli.

$$F_1 - F_2 = (P_1 - P_2)A$$

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)A$$

Keterangan:

F_1 = besar gaya pada sisi bagian bawah sayap (N)

F_2 = besar gaya pada sisi bagian atas sayap (N)

P_1 = tekanan pada sisi bagian bawah sayap (N/m²)

P_2 = tekanan pada sisi bagian atas sayap (N/m²)

v_1 = kelajuan aliran udara pada sisi bagian bawah sayap (m/s)

v_2 = kelajuan aliran udara pada sisi bagian atas sayap (m/s)

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

A = luas penampang total sayap (m²)

Contoh berikut akan memberikan pemahaman dari persamaan di depan. Mari kita perhatikan secara saksama.

Contoh

Sebuah pesawat terbang mempunyai luas penampang sayap 140 m². Pada suatu kecepatan tertentu, udara yang mengalir di atas permukaan sayap sisi atas mempunyai kelajuan 90 m/s. Sementara, udara yang mengalir pada permukaan sayap sisi bawah mempunyai kelajuan 60 m/s. Apabila massa jenis udara 1,3 kg/m³, hitung gaya angkat sayap pesawat tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$A = 140 \text{ m}^2$

$v_1 = 60 \text{ m/s}$

$v_2 = 90 \text{ m/s}$

$\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$

Ditanyakan:

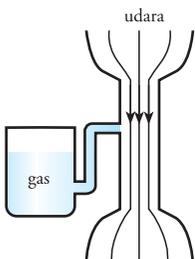
$F_1 - F_2$

Jawab:

Untuk mencari $F_1 - F_2$, gunakan persamaan:

$$\begin{aligned} F_1 - F_2 &= \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \\ &= \frac{1}{2} \times 1,3 \times (90^2 - 60^2) \\ &= 29.250 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, gaya angkat sayap pesawat terbang adalah 29.250 N.



Gambar 6.33 Tabung karburator

4) Karburator Mobil atau Motor

Fungsi karburator mobil atau motor adalah untuk menguapkan bensin menjadi gas sehingga mudah terbakar. Supaya mudah terbakar, bahan bakar yang sudah berbentuk uap atau gas tersebut harus dicampur dengan udara bersih. Sebagai gambaran terjadinya pencampuran udara dengan uap bahan bakar, kalian dapat memerhatikan Gambar 6.33.

Udara dilewatkan pada sebuah pipa venturi. Karena ada penyempitan luas penampang pipa, laju aliran udara akan menjadi besar dan tekanan pada daerah venturi itu akan mengecil. Akibatnya, bahan bakar yang ada pada bejana karburator akan tersedot ke luar bercampur dengan udara dan membentuk uap bahan bakar.

Kemudian, uap bahan bakar ini akan mengalir sampai pada tempat pembakaran yang merupakan sumber energi dari penggerak motor atau mobil. Jadi, prinsip kerja dari karburator adalah adanya perbedaan tekanan antara ruang venturi dengan bejana penampung tempat bensin.

5) Penyemprot Nyamuk atau Sejenisnya

Cara kerja penyemprot nyamuk atau parfum adalah jika pengisap pompa ditekan, udara yang melewati pipa venturi akan mempunyai kelajuan yang sangat besar, sehingga tekanannya menjadi rendah. Akibatnya, cairan obat nyamuk yang ada pada tabung akan naik dan ikut keluar bersama udara.

Semakin besar gaya yang diberikan pada pengisap, semakin besar pula laju udara pada venturi, sehingga semakin banyak pula cairan obat nyamuk yang keluar bersama udara. Ini menunjukkan bahwa alat penyemprot nyamuk atau alat yang sejenisnya bekerja berdasarkan prinsip Bernoulli.

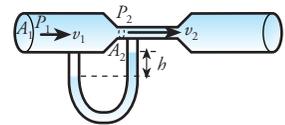


Gambar 6.34 Penyemprot nyamuk dan sejenisnya

6) Tabung Venturimeter

Salah satu penerapan efek venturi adalah tabung venturimeter. Venturimeter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kelajuan fluida. Bahkan, saat ini sudah dirancang untuk digunakan untuk mengukur kecepatan darah dalam arteri. Cara kerja venturimeter dapat dijelaskan sebagai berikut.

Suatu fluida bermassa jenis ρ mengalir di dalam tabung dengan luas penampang A_1 . Kemudian, masuk ke dalam tabung dengan luas penampang yang lebih sempit, A_2 . Kedua bagian tabung ini dihubungkan dengan manometer zat cair yang diisi air raksa dengan massa jenis ρ' . Selanjutnya, akan kita ketahui tinggi perbedaan air raksa di dalam manometer, sehingga kecepatan fluida di dalam tabung venturi dapat ditentukan. Perhatikan Gambar 6.35.



Gambar 6.35 Venturimeter dengan manometer.

Melalui prinsip Bernoulli pada efek venturi, tekanan hidrostatik di dua titik, dan persamaan kontinuitas, kita akan memperoleh persamaan berikut.

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}}$$

Keterangan:

- v_1 = kecepatan aliran fluida berpenampang besar (m/s)
- ρ = massa jenis fluida yang melewati tabung venturi (kg/m^3)
- ρ' = massa jenis fluida dalam manometer (kg/m^3)
- g = percepatan gaya gravitasi (m/s^2)
- A_1 = luas penampang tabung besar (m^2)
- A_2 = luas penampang tabung sempit (m^2)

Baiklah, untuk membantu kalian dalam memahami penggunaan persamaan di atas, simaklah contoh berikut ini.

Contoh

Sebuah tabung venturi dengan perbandingan luas penampang pipa besar dengan pipa kecil sama dengan 5 : 1. Sementara, perbedaan tinggi air raksa di dalam manometer adalah 4 cm. Andaikan massa jenis air 1 gr/cm³, massa jenis air raksa 13,6 gr/cm³, dan percepatan gravitasi 9,8 m/s², tentukan kecepatan aliran air pada tabung venturi dengan luas penampang sempit.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$A_1/A_2 = 5$$

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

$$\rho = 1 \text{ gr/cm}^3 = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho' = 13,6 \text{ gr/cm}^3 = 13,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Ditanyakan: v_2

Jawab:

Terlebih dahulu kita cari kecepatan aliran air pada tabung venturi penampang besar (v_1) dengan persamaan:

$$\begin{aligned} v_1 &= \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times (13,6 \times 10^3) - (1 \times 10^3) \times 9,8 \times (2 \times 10^{-2})}{(1 \times 10^3) \times (5^2 - 1)}} \\ &= 0,45 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Kita peroleh $v_1 = 0,45 \text{ m/s}$, sehingga dapat kita cari v_2 melalui persamaan kontinuitas sebagai berikut.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

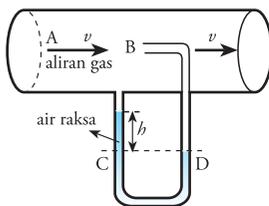
$$5 = \frac{v_2}{0,45}$$

$$v_2 = 2,25 \text{ m/s}$$

Jadi, kita peroleh kecepatan aliran air pada tabung venturi berpenampang besar adalah 2,25 m/s.

7) Tabung Pitot

Bentuk tabung pitot sebenarnya menyerupai bentuk tabung venturi dengan manometer. Akan tetapi, tabung pitot mempunyai penampang dengan luas yang sama. Selain itu, pada pipa manometer terdapat bagian yang menembus ke dalam tabung. Bagian ini menghadap ke arah datangnya fluida. Maksudnya, jika ada fluida yang mengalir, permukaan air raksa pada pipa kiri manometer dapat tertekan. Tabung pitot biasanya digunakan untuk mengukur kecepatan udara atau gas di dalam pipa tertutup. Lebih jelasnya kalian dapat memperhatikan Gambar 6.36.



Gambar 6.36 Tabung pitot

Dengan mengukur perbedaan tinggi permukaan air raksa di dalam manometer, kita dapat menentukan kelajuan udara atau gas di dalam tabung pitot. Kemudian, yang tidak kalah penting juga adanya efek venturi serta kecepatan udara atau gas di titik 2 yang sama dengan nol ($v_2 = 0$). Oleh karena itu, kita akan memperoleh persamaan berikut.

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

Pada tabung pitot berlaku persamaan tekanan hidrostatik. Persamaan tekanan hidrostatik pada titik 1 dan titik 2 adalah sebagai berikut.

$$P_2 - P_1 = \rho' gh$$

Nah, berdasarkan dua persamaan tersebut, kita akan memperoleh persamaan kelajuan gas atau udara dalam tabung pitot. Andaikan laju udara atau gas v_1 sama dengan v , maka akan diperoleh persamaan di bawah ini.

$$v = \sqrt{\frac{2\rho'gh}{\rho}}$$

Keterangan:

- v = kelajuan fluida yang mengalir (m/s)
- ρ = massa jenis fluida di dalam tabung pitot (kg/m^3)
- ρ' = massa jenis fluida pada manometer (kg/m^3)
- h = perbedaan tinggi fluida pada manometer (m)

Baiklah, supaya kalian mengerti penggunaan persamaan di atas, perhatikan contoh soal berikut.

Contoh

Gas dengan massa jenis $6,8 \text{ kg/m}^3$ mengalir di dalam sebuah pipa yang mempunyai luas penampang $0,02 \text{ m}^2$. Kelajuan aliran gas diukur dengan tabung pitot. Ternyata, dari hasil pengukuran diperoleh perbedaan tinggi air raksa di dalam manometer sebesar 4 cm . Bila massa jenis air raksa ρ' adalah $1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$, tentukan debit gas di dalam pipa.

Penyelesaian:

Diketahui:

- $\rho = 6,8 \text{ kg/m}^3$
- $\rho' = 1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$
- $A = 0,02 \text{ m}^2$
- $h = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$

Ditanyakan: Q

Jawab:

Sebelum mencari Q , kita mencari v terlebih dahulu dengan persamaan:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2\rho'gh}{\rho}} \\ v &= \sqrt{\frac{2 \times (1,36 \times 10^4) \times 10 \times 0,04}{6,8}} \\ &= \sqrt{\frac{1.600}{6,8}} \\ &= 40 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Debit aliran gas di dalam pipa dapat dicari dengan rumus:

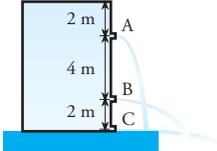
$$\begin{aligned} Q &= Av \\ &= 0,02 \times 40 \\ &= 0,8 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Jadi, debit aliran gas di dalam pipa adalah $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Itulah pelbagai contoh penerapan fluida dinamis dalam keseharian. Kalian tentunya tidak mengira, bila peralatan di sekitar kita banyak yang menggunakan persamaan kontinuitas maupun Hukum Bernoulli. Penerapan Hukum Bernoulli yang lain, misalnya untuk mendeteksi kebocoran pada pipa, layar penggerak perahu, asap ke atas cerobong, aliran udara di liang bawah tanah, dan pada penderita TIA (*Transient Ischemic Attack*) yaitu, terhentinya aliran darah ke otak.

Kita telah membahas panjang lebar mengenai fluida dinamis. Nah, untuk menguji kemampuan kalian, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

- Berapakah kecepatan air rata-rata dalam pipa yang berdiameter 5 cm dan menghasilkan air $2,5 \text{ m}^3$ setiap jam?
- Perhatikan gambar di samping. Air memancar dari lubang-lubang kecil pada dinding tabung. Berapakah perbandingan lokasi pancuran air mengenai tanah dari titik C untuk pancuran dari lubang A dan B?
 
- Sebuah pipa penyalur dengan diameter dalam 20 cm dihubungkan dengan kran berdiameter dalam 2 cm. Andaikan kecepatan rata-rata air pada kran adalah 4 m/s, tentukan kecepatan rata-rata air pada pipa penyalur utama yang ditimbulkannya.
- Sebuah pipa berdiameter 28 cm disambung dengan pipa lain yang berdiameter 10 cm. Kecepatan aliran air pada pipa besar adalah 1,2 m/s pada tekanan 10^5 N/m^2 . Kedua pipa dalam posisi horisontal dan massa jenis air 1 gr/cm^3 , berapa tekanan yang terjadi pada pipa kecil?
- Sebuah bak berbentuk silinder dengan penampang yang cukup besar berisi air setinggi 145 cm. Pada ketinggian 125 cm dari dasar bak terdapat lubang yang bocor.
 - Hitunglah kecepatan pancaran air yang keluar dari lubang yang bocor.
 - Apabila diameter lubang 4 cm, hitunglah debit air yang keluar dari lubang aliran pada lubang bocor tersebut.
- Sebuah pesawat terbang mempunyai luas penampang sayap 40 m^2 . Pada suatu kecepatan tertentu, udara yang mengalir di atas sayap mempunyai kecepatan 20 m/s. Sementara, udara yang mengalir di bawah sayap mempunyai kecepatan 35 m/s. Apabila massa jenis udara $1,3 \text{ kg/m}^3$, hitunglah besar gaya angkat sayap pesawat tersebut.
- Sebuah tabung venturi mempunyai perbandingan luas penampang pipa besar dengan pipa kecil sama dengan 4 : 1. Sementara, perbedaan tinggi air raksa di dalam manometer adalah 3 cm. Andaikan massa jenis air 1 gr/cm^3 , massa jenis air raksa $13,6 \text{ gr/cm}^3$, dan percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan kecepatan aliran air pada tabung venturi dengan luas penampang sempit.
- Tabung pitot digunakan untuk mengukur gas dengan massa jenis $0,0082 \text{ kg/m}^3$ yang mengalir di dalam sebuah pipa dengan luas penampang $0,024 \text{ m}^2$. Apabila perbedaan tinggi air raksa di dalam manometer sebesar 4,5 cm dan massa jenis air raksa sebesar $13,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, tentukan debit gas di dalam pipa.

Inti Sari

1. Massa jenis (*density*) didefinisikan sebagai massa per satuan volume.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

2. Tekanan (*P*) didefinisikan sebagai gaya (*F*) per satuan luas (*A*).

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

3. Tekanan yang diberikan fluida pada kedalaman tertentu dinamakan tekanan hidrostatika, yang dirumuskan:

$$P_h = \rho gh$$

4. Tegangan permukaan didefinisikan sebagai gaya per satuan panjang yang bekerja pada arah tegak lurus dengan permukaan zat cair, atau dituliskan dalam bentuk:

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

Apabila zat cairnya mempunyai dua permukaan (atas dan bawah), tegangan permukaannya adalah:

$$\gamma = \frac{F}{2l}$$

Usaha (*W*) untuk memperluas permukaan selaput fluida adalah sebagai berikut.

$$W = \gamma \Delta A$$

5. Gejala kapilaritas adalah gejala naik turunnya zat cair dalam pipa kapiler. Cara menentukan besarnya kenaikan atau penurunan permukaan zat cair dalam pipa kapiler di lakukan dengan persamaan:

$$y = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho gr}$$

6. Gaya gesek antar lapisan fluida saat fluida mengalir dalam suatu pipa dinamakan viskositas (kekentalan). Dirumuskan dengan persamaan:

$$F_v = \eta \frac{Av}{h}$$

Persamaan Hukum Stokes adalah:

$$F_v = 6 \pi \eta r v$$

7. Hukum Archimedes menyatakan besarnya gaya apung yang bekerja pada benda di dalam suatu fluida akan sama dengan berat fluida yang dipindahkannya. Besarnya gaya apung atau gaya Archimedes merupakan selisih gaya yang disebabkan tekanan fluida dari bawah benda dengan tekanan fluida dari atas benda dan dirumuskan:

$$F_a = \rho_f g V_b$$

8. Besarnya volume fluida yang melewati penampang dalam waktu tertentu disebut debit aliran (*Q*) yang dirumuskan:

$$Q = \frac{V}{t}$$

atau

$$Q = Av$$

9. Persamaan kontinuitas menyatakan bahwa suatu fluida yang mengalir melewati luas penampang yang berbeda mempunyai debit aliran sama besar. Pernyataan ini dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

10. Hukum Bernoulli dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{tetap}$$

11. Penerapan hukum Bernoulli dalam keseharian.
 - a. persamaan Toricelli untuk menghitung kecepatan dengan rumus:

$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)}$$
$$v_1 = \sqrt{2gh}$$

- b. Efek venturi, yang berbunyi apabila laju fluida bertambah, tekanan fluidanya akan berkurang dan dirumuskan:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstan}$$

- c. Daya angkat pesawat terbang ($F_1 - F_2$), yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$F_1 - F_2 = (P_1 - P_2)A$$

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)A$$

- d. Kelajuan gas pada tabung venturi dapat diukur dengan persamaan:

$$v_1 = \frac{\sqrt{2(\rho' - \rho)gh}}{\sqrt{\rho\left(\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1\right)}}$$

- e. Kelajuan fluida yang mengalir pada tabung pitot dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$v = \sqrt{\frac{2\rho'gh}{\rho}}$$

Telaah Istilah

Gaya Suatu besaran yang menyebabkan benda bergerak

Hidrolik Alat-alat yang bekerja berdasarkan tekanan hidrostatik

Kapilaritas Peristiwa naik atau turunnya permukaan zat cair melalui celah kecil

Meniskus Melengkungnya permukaan zat cair dalam pipa/tabung kapiler

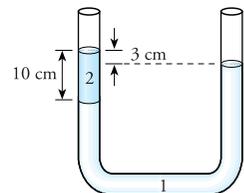
Molekul Partikel terkecil dari suatu zat yang terwujud secara alami

Surfactant Zat yang dapat menurunkan tegangan permukaan

Ulangan Harian

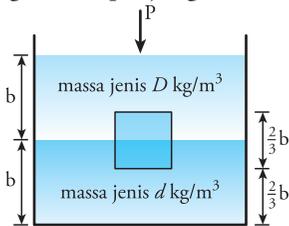
A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- Ilmu yang mempelajari fluida yang tidak bergerak dinamakan
 - kinematika
 - dinamika
 - hidrostatistika
 - hidrodinamika
 - statistika
- Sebuah balok apabila dicelupkan ke dalam zat cair akan berkurang beratnya seberat zat cair yang dipindahkannya adalah pernyataan dari Hukum
 - Gay Lussac
 - Termodinamika
 - Newton
 - Pascal
 - Archimedes
- Berat mobil ditumpu oleh keempat bannya. Tekanan udara dalam ban adalah 2 bar (1 bar = 10^5 Pa) dan luas tiap ban yang bersentuhan dengan jalan adalah 140 cm^2 . Massa mobil itu adalah...kg.
 - 280
 - 560
 - 840
 - 1.120
 - 1.400
- Perhatikan gambar di samping ini. Jika zat 1 adalah air dengan massa jenis 1.000 kg/m^3 , maka massa jenis zat 2 adalah...g/ cm^3 .



- a. 0,3 d. 1,2
 b. 0,7 e. 1,4
 c. 1,0

5. Kayu berbentuk kubus dengan sisi-sisi $\frac{2}{3} b$ melayang pada perbatasan dua zat cair seperti gambar (panjang b dalam m).

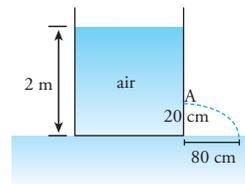


Jika tekanan atmosfer p , maka gaya yang bekerja pada bidang bawah kubus sama dengan

- a. $b^3 \left[(D+d)g + \frac{p}{b} \right]$
 b. $\frac{4}{27} b^3 \left[(3D+d)g + \frac{3p}{b} \right]$
 c. $b^3 \left[(D-d)g + \frac{3p}{b} \right]$
 d. $\frac{4}{27} b^3 \left[(3D-d)g + \frac{3p}{b} \right]$
 e. $\frac{4}{27} b^3 \left[(D+d)g + \frac{p}{b} \right]$
6. Sebuah balok kayu dengan volume 10^{-4} m^3 , dimasukkan ke dalam air. Jika 0,6 bagian muncul di atas air, maka besar gaya ke atas yang dimiliki balok adalah ...N.
- a. 5×10^5 d. 4×10^{-1}
 b. 4×10^5 e. 1×10^{-1}
 c. 1×10^5
7. Sebuah jarum yang panjangnya 5 cm diletakkan berlahan-lahan di atas permukaan air yang mempunyai tegangan permukaan sebesar $7,3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$. Berat jarum maksimum agar tidak tenggelam adalah
- a. $7,3 \times 10^{-2} \text{ N}$ d. $3,65 \times 10^{-3} \text{ N}$
 b. $3,65 \times 10^{-2} \text{ N}$ e. $3,65 \times 10^{-4} \text{ kg}$
 c. $7,3 \times 10^{-3} \text{ N}$

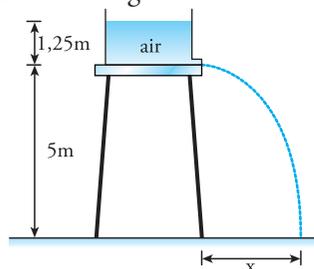
8. Pipa mendatar mempunyai ujung dengan luas penampang masing-masing 200 mm^2 dan 100 mm^2 . Jika air mengalir dari penampang besar dengan kecepatan 2 m/s, kecepatan air pada penampang kecil adalah...m/s.
- a. $\frac{1}{4}$ d. 2
 b. $\frac{1}{2}$ e. 4
 c. 1

9. Perhatikan gambar.



Kecepatan air yang keluar dari lubang A adalah ... m/s.

- a. 4 d. 10
 b. 6 e. 14
 c. 8
10. Sebuah pipa silinder lurus memiliki dua macam penampang. Diameter penampang kecil adalah setengah kali diameter penampang besar, dan diletakkan horizontal. Tekanan pada penampang kecil $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ dan kelajuannya 3 m/s. Tekanan air pada penampang besar adalah...N/m².
- a. $1,325 \times 10^5$ d. $2,750 \times 10^5$
 b. $1,500 \times 10^5$ e. $3,000 \times 10^5$
 c. $2,675 \times 10^5$
11. Sebuah pipa venturimeter mempunyai luas penampang $A_1 = 5 \text{ cm}^2$ dan $A_2 = 4 \text{ cm}^2$. Apabila $g = 10 \text{ m/s}^2$, kecepatan air (v) yang memasuki pipa venturimeter adalah...m/s.
- a. 3 d. 9
 b. 4 e. 25
 c. 5
12. Perhatikan gambar berikut ini.

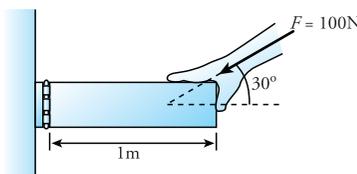


Latihan Ulangan Tengah Semester II

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. Besaran yang ditimbulkan oleh gaya di sekitar sumbu putar adalah
 - a. gaya sentripetal
 - b. momen gaya
 - c. momen inersia
 - d. momentum sudut
 - e. energi kinetik

2. Perhatikan gambar. Seseorang menekan sebatang besi bermassa 500 gram pada salah satu ujungnya dengan gaya 100 N. Ujung besi satunya terpasang pada engsel. Jika gaya diberikan membentuk sudut 30° , panjang besi 1 m, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka besar momen gaya yang bekerja pada engsel adalah



 - a. 55 Nm
 - b. 53,25 Nm
 - c. 52,5 Nm
 - d. 50,25 Nm
 - e. 40,5 Nm

3. Dua orang anak masing-masing bermassa 25 kg dan 30 kg sedang bermain jungkat-jungkit. Papan jungkat-jungkit yang digunakan mempunyai panjang 4 m dengan sumbu tepat di tengahnya. Jika anak dengan massa 25 kg duduk pada jarak 1,8 m dari sumbu, maka agar seimbang anak kedua harus duduk pada jarak . . . dari sumbu.

a. 1,5	d. 0,9
b. 1,4	e. 0,5
c. 1,2	

4. Seorang pemain akrobat memutar besi yang ujungnya diberi bola api padat bermassa 400 gram dan 500 gram. Orang tersebut memegang besi pada jarak 1 m dari bola 400 gram. Jika panjang besi 3 m dan massanya diabaikan, maka momen inersia sistem tersebut adalah . . . kgm.

a. 2,4	d. 1,2
b. 1,5	e. 0,9
c. 1,4	

5. Seorang pemain *ice skating* melakukan gerak memutar. Jika tangannya direntangkan ia mampu melakukan 2 putaran tiap detik. Namun, jika ia merapatkan tangannya di samping badan, ia mampu melakukan putaran 180 putaran tiap menit. Jika momen inersia ketika tangan direntangkan $12,5 \text{ kgm}^2$, momen inersia ketika tangannya dirapatkan sebesar

a. $12,5 \text{ kgm}^2$	d. $6,5 \text{ kgm}^2$
b. 10 kgm^2	e. $4,33 \text{ kgm}^2$
c. $8,33 \text{ kgm}^2$	

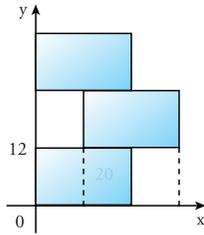
6. Seseorang menggunakan katrol berjejari 10 cm dan bermassa 1 kg untuk mengangkat beban seberat 40 N. Katrol yang digunakan berupa silinder pejal dengan $I = \frac{1}{2} mr^2$. Kecepatan sudut katrol adalah . . . rad/s^2 .
 - a. 80/7
 - b. 40/35
 - c. 8/7
 - d. -40/35
 - e. -80/7

7. Sebuah roda dengan jejari 10 cm dan bermassa 4,5 kg berputar dengan kecepatan 50 rad/s. Jika roda dianggap silinder tipis berongga dengan $I = mr^2$, maka energi kinetik roda tersebut adalah

a. 1.125 J	d. 56,25 J
b. 562,5 J	e. 11,25 J
c. 112,5 J	

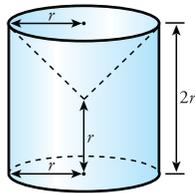
8. Sebuah bola pejal dengan massa 6 kg yang memiliki jari-jari 0,1 m bergerak dengan kelajuan 20 m/s sambil berotasi. Energi kinetik bola pejal tersebut adalah . . .
- 1.680
 - 1.200
 - 680
 - 480
 - 120

9. Tiga buah batu bata dengan massa 800 gram disusun seperti gambar. Jika panjang batu bata 20 cm dan lebarnya 12 cm, maka letak titik keseimbangan sistem tersebut berada pada koordinat . . .



- $(18, 13\frac{1}{3})$
- $(13\frac{1}{3}, 18)$
- $(13, 18\frac{1}{3})$
- $(3\frac{1}{3}, 24)$
- $(24, 3\frac{1}{3})$

10. Silinder pjal homogen dengan jejari r dan tinggi $2r$, dilubangi bagian atasnya. Lubang tersebut berbentuk kerucut dengan jejari alas r dan tinggi r . Letak titik berat silinder ini dari bidang alasnya adalah. . .



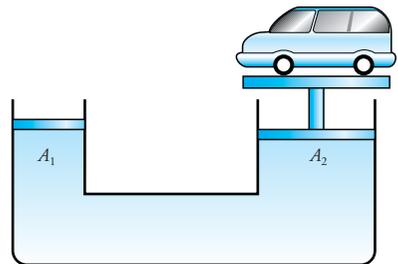
- 0,35 r
- 0,45 r
- 0,85 r
- 0,95 r
- 1,5 r

11. Sebuah bola besi dengan berat di udara 20 N diikat dengan tali dan dimasukkan ke dalam suatu fluida. Jika massa jenis fluida $0,8 \text{ g/cm}^3$, massa jenis besi 8 g/cm^3 , dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka besar tegangan talinya adalah . . .

- 22 N
- 20 N
- 18 N
- 16 N
- 14 N

12. Air laut mempunyai massa jenis $1,025 \text{ g/cm}^3$. Jika $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ dan tekanan udara luar 1 atm, maka tekanan hidrostatis pada kedalaman 50 m dari permukaan air laut sebesar . . . kPa.
- 502,25
 - 60,3
 - 50,25
 - 6,03
 - 5,025

13. Perhatikan gambar. Dari gambar diketahui luas permukaan piston pertama adalah 25 cm^2 dan luas permukaan piston kedua 40 cm^2 . Beban seberat 1.000 N diletakkan pada piston kedua. Agar piston pertama tidak naik, maka harus diletakkan beban seberat . . .



- 1.625 N
- 1.500 N
- 625 N
- 500 N
- 250 N

14. Sebuah benda akan melayang di dalam suatu cairan jika . . .

- $\rho_{\text{benda}} > \rho_{\text{cairan}}$
- $\rho_{\text{benda}} = \rho_{\text{cairan}}$
- $m_{\text{benda}} > m_{\text{cairan}}$
- $m_{\text{benda}} = m_{\text{cairan}}$
- $w_{\text{benda}} = w_{\text{cairan}}$

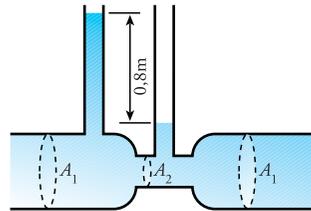
15. Sebuah jarum dengan panjang 5 cm diletakkan erlahan-lahan di atas permukaan air yang mempunyai tegangan permukaan sebesar $7,3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$. Berat jarum maksimum agar tidak tenggelam adalah

- $7,3 \times 10^{-2} \text{ N}$
- $3,65 \times 10^{-2} \text{ N}$

- c. $7,3 \times 10^{-3}$ N
 d. $3,65 \times 10^{-3}$ N
 e. $3,65 \times 10^{-4}$ N
16. Sebuah balok kayu berukuran $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ mengapung di lautan dengan 30% volumenya tercelup dalam air. Jika massa jenis air laut $1,025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, maka massa jenis kayu adalah ... kg/m^3 .
- a. $3,075 \times 10^3$
 b. $3,075 \times 10^2$
 c. 3,075
 d. $3,075 \times 10^{-2}$
 e. $3,075 \times 10^{-3}$
17. Sebuah drum dengan tinggi 1,5 m dan luas alasnya 3 m^2 diisi air melalui sebuah pipa. Waktu yang diperlukan untuk mengisi drum dari keadaan kosong hingga penuh adalah 5 menit. Debit air yang keluar dari pipa adalah ...
- a. $15 \text{ m}^3/\text{s}$
 b. $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$
 c. 15 liter/s
 d. 1,5 liter/s
 e. 0,015 liter/s
18. Pada sebuah pipa yang berdiameter A , air mengalir dengan kelajuan v . Jika kemudian air melewati pipa berdiameter $1/3 A$, maka kelajuan aliran air menjadi ...
- a. $\frac{1}{9}v$ d. $3v$
 b. $\frac{1}{3}v$ e. $9v$
 c. v
19. Sebuah pesawat terbang mempunyai luas penampang sayap masing-masing 140 m^2 . Pada suatu kecepatan tertentu, udara yang mengalir di permukaan sayap sisi atas mempunyai kecepatan 90 m/s . Sementara, udara yang mengalir pada permukaan sayap sisi bawah mempunyai kecepatan 60 m/s . Apabila massa jenis udara $1,3 \text{ kg/m}^3$, gaya angkat pada sayap pesawat tersebut sebesar ...

- a. 58.500 N d. 2.925 N
 b. 29.250 N e. 292,5 N
 c. 5.850 N

20. Perhatikan gambar. Jika $A_1 = 5 \text{ cm}^2$ dan $A_2 = 3 \text{ cm}^2$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$, maka kecepatan air yang masuk pipa besar adalah



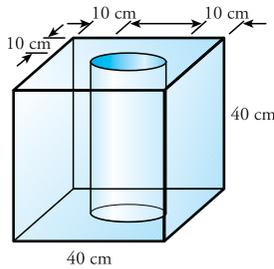
- a. 3 m/s d. 9 m/s
 b. 4 m/s e. 25 m/s
 c. 5 m/s

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

- Seorang anak memutar sebuah tongkat sepanjang 1 m dan bermassa 200 gram dengan sumbu putar di salah satu ujungnya. Tongkat tersebut dapat berputar sebanyak 3 putaran per detik. Jika anak memutar tongkat dengan sumbu di tengah, hitunglah jumlah putaran yang terjadi tiap 5 menit.
- Seorang pemain *ice skating* melakukan gerak memutar. Jika tangannya direntangkan ke samping, ia mampu melakukan 4 putaran tiap detik. Namun, jika ia merapatkan tangannya di samping badan, ia mampu melakukan 240 putaran tiap menit. Jika momen inersia ketika tangan direntangkan 15 kgm^2 , tentukan momen inersia ketika tangannya dirapatkan.
- Seseorang menendang bola yang diam dengan gaya 20 N. Akibatnya, bola menggelinding sejauh 30 m dalam waktu 5 detik. Jika bola mempunyai diameter 20 cm dan massanya 0,8 kg, tentukan:
 - momen inersia bola,
 - energi kinetik bola,
 - kecepatan bola pada saat $t = 3$ detik.

4. Sebuah silinder pejal menggelinding di bidang miring sepanjang 10 m dari ketinggian 4 meter. Silinder tersebut mempunyai diameter 35 cm, panjang 40 cm, dan massa 15 kg. Jika silinder menggelinding dengan kecepatan awal 0,5 m/s, tentukan:
- momen inersia silinder,
 - energi kinetik silinder,
 - kecepatan silinder ketika mencapai dasar bidang.

5. Sebuah kubus dengan sisi 40 cm diberi lubang berbentuk silinder dengan diameter 20 cm. Perhatikan gambar. Tentukan letak titik berat kubus tersebut dilihat dari titik A.



6. Sebuah kapal selam menyelam sampai kedalaman 5.000 meter. Anggaphlah massa jenis air laut uniform yakni sebesar $1,02 \text{ kg/m}^3$. Bila tekanan permukaan air laut 10^5 Pa dan percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$, berapa tekanan air laut (tekanan hidrostatis) yang pada kedalaman tersebut? Berapa pula tekanan total yang diterima kapal selam?

7. Sebuah dongkrak hidrolik terdiri dari dua buah tabung yang saling berhubungan. Masing-masing tabung mempunyai sebuah penghisap. Diameter penghisap tabung pertama sebesar 7 cm dan diameter penghisap tabung kedua sebesar 42 cm. Bila sebuah mobil berbobot 2,4 ton berada di atas tabung kedua, berapa gaya yang diperlukan pada tabung pertama supaya mobil dapat terangkat? (diketahui: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)
8. Sebuah balok kayu dimasukkan ke dalam air. Bila balok kayu mempunyai massa jenis $0,7 \text{ gr/cm}^3$ dan volumenya 12 cm^3 , apakah balok kayu tersebut mengapung, mengambang atau tenggelam? Berapa volume kayu yang berada di dalam air?
9. Sebuah pipa penyalur dengan diameter 20 cm dihubungkan dengan pipa keran dengan diameter 2 cm. Andaikan kecepatan rata-rata air dalam pipa keran adalah 4 m/s, tentukan kecepatan rata-rata air dalam pipa penyalur utama yang ditimbulkannya.
10. Sebuah tabung venturi mempunyai perbandingan luas penampang pipa besar dengan pipa kecil sama dengan 4 : 1. Sementara, perbedaan tinggi air raksa di dalam manometer adalah 3 cm. Andaikan massa jenis air 1 gr/cm^3 , massa jenis air raksa $13,6 \text{ gr/cm}^3$, dan percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan kecepatan aliran air pada tabung venturi dengan luas penampang sempit.

B a b VII

Teori Kinetik Gas



dok.PIM

Kompresor adalah alat yang digunakan untuk memompa ban, baik sepeda, sepeda motor, atau mobil. Tabung kompresor berisi udara bertekanan tinggi. Tabung ini terhubung dengan selang yang mempunyai kran di ujungnya. Untuk mengalirkan udara dari dalam tabung ke ban yang dipompa, kran harus dibuka. Ketika kran di buka, udara dari dalam tabung akan keluar dengan tekanan dan kecepatan tertentu. Dengan kata lain, udara yang berupa gas bergerak dari satu tempat ke tempat lain. Pergerakan udara ini dapat dijelaskan dengan Teori Kinetik Gas. Bagaimanakah penjelasannya? Pelajarilah bab berikut dengan sungguh-sungguh.

Kata Kunci

- Gas ideal
- Teori Kinetik Gas
- Derajat kebebasan
- Energi kinetik
- Energi dalam
- Equipartisi energi

Setiap benda, baik cairan, padatan, maupun gas tersusun atas atom-atom, molekul-molekul, atau partikel-partikel. Pada bab ini, kita akan mempelajari sifat-sifat gas secara keseluruhan sebagai hasil rata-rata kelakuan partikel-partikel penyusun gas. Sifat-sifat gas dapat dibedakan menjadi sifat makroskopis dan sifat mikroskopis. Sifat makroskopis gas dapat kita amati dan kita ukur, seperti temperatur, tekanan, dan volume. Sementara sifat mikroskopis tidak bisa diamati dan diukur, seperti kelajuan, massa tiap-tiap partikel penyusun inti, momentum, serta energi yang dikaitkan dengan tingkah laku partikel gas.

Dalam mempelajari sifat-sifat gas, kita akan bersinggungan dengan hukum-hukum gas ideal. Hukum-hukum ini meliputi energi kinetik gas, kecepatan rata-rata partikel gas ideal, dan asas equipartisi energi. Setelah menguasai materi tersebut, kalian diharapkan mampu menerapkan hukum-hukum gas ideal untuk menjelaskan persoalan fisika sehari-hari.

A Gas Ideal

Oksigen, nitrogen, hidrogen, uap air, bahkan udara di sekitar kita merupakan contoh gas. Gas-gas tersebut tersusun atas atom-atom, partikel-partikel, atau molekul yang sangat kecil. Gas merupakan keadaan benda atau zat yang mempunyai sifat unik. Salah satunya, partikel-partikel penyusunnya selalu bergerak acak (sangat bebas). Selain itu, gas juga dapat mengisi seluruh ruangan yang ditempatinya. Konsep yang mempelajari sifat-sifat gas berdasarkan kelakuan partikel/molekul penyusun gas yang bergerak acak disebut **Teori Kinetik Gas**.

Kompresor, pompa sepeda, air mendidih, dan beberapa peristiwa lainnya dapat dijelaskan dengan teori kinetik gas. Nah, sebelum melangkah lebih jauh, jawablah pertanyaan-pertanyaan pada *Eureka* di bawah ini.

Eureka

Diskusikan dengan teman sebangku kalian jawaban pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Bagaimanakah cara kerja kompresor?
2. Jika dipanaskan di tengah terik mentari, ban sepeda dapat meletus. Coba kalian jelaskan mengapa ini bisa terjadi?
3. Apakah yang akan terjadi jika kalian membuka botol minuman bersoda yang dikocok terlebih dahulu? Apakah yang menyebabkan kejadian itu?
4. Jika kita meniup balon karet, balon tersebut tidak bisa melayang di udara. Namun, jika kita mengisiskan gas tertentu, misalnya gas hidrogen, balon dapat melayang. Bagaimanakah ini terjadi?

Presentasikan hasil diskusi kalian di depan teman-teman yang lain.

Tingkah laku udara di dalam kompresor atau ban, gas karbondioksida di botol minuman bersoda, dan gas di dalam balon karet, dan masih banyak peristiwa lainnya merupakan sebagian contoh sifat-sifat gas. Sifat-sifat ini dapat dijelaskan dengan teori kinetik gas. Dalam mempelajari teori kinetik gas, kita mengasumsikan gas mempunyai sifat-sifat yang ideal (gas ideal). Bagaimanakah pengertian gas ideal? Pelajari dengan saksama uraian berikut.

1. Pengertian Gas Ideal

Dalam pembahasan teori kinetik gas, suatu gas digambarkan sebagai partikel-partikel (molekul-molekul) di dalam ruang tertutup yang selalu bergerak dari waktu ke waktu. Partikel-partikel ini menumbuk dinding ruangan dan memberikan tekanan. Pada pembahasan lebih lanjut, dibuat beberapa asumsi untuk menggambarkan model gas yang ideal sebagai berikut.

- a. Gas ideal terdiri dari partikel-partikel yang disebut molekul-molekul dalam jumlah besar. Molekul ini dapat berupa atom maupun kelompok atom.
- b. Ukuran partikel gas dapat diabaikan terhadap ukuran wadah.
- c. Setiap partikel gas selalu bergerak dengan arah sembarang (acak). Artinya, semua molekul bergerak ke segala arah dengan pelbagai kelajuan.
- d. Partikel gas terdistribusi merata pada seluruh ruangan dalam wadah.
- e. Partikel gas memenuhi hukum newton tentang gerak.
- f. Setiap tumbukan yang terjadi (baik tumbukan antar molekul maupun tumbukan molekul dengan dinding) adalah tumbukan lenting sempurna dan terjadi pada waktu yang sangat singkat.

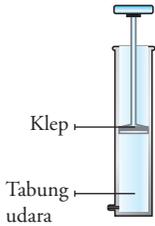
Sifat-sifat gas semacam ini tidak dapat kita temukan. Akan tetapi, model gas ideal dapat didekati dengan gas yang berada pada tekanan rendah dan temperatur kamar. Lalu, bagaimanakah persamaan-persamaan yang berlaku pada gas ideal?

2. Persamaan Umum Gas Ideal

Dalam pembahasan keadaan gas, ada tiga besaran yang saling berhubungan. Besaran-besaran tersebut adalah **tekanan** (P), **volume** (V), dan **temperatur mutlak** (T). Hubungan ketiga besaran ini telah dipelajari dan diteliti oleh para ilmuwan. Untuk mengetahui bagaimana hubungan ketiga variabel tersebut, mari kita pelajari beberapa hukum mengenai gas ideal.

a. Hukum Boyle

Hukum Boyle menjelaskan hubungan tekanan dengan volume. Contoh sederhana yang menggambarkan hubungan volume dengan tekanan adalah pompa sepeda. Pompa sepeda terdiri dari sebuah tabung, selang dan klep. Klep ini berfungsi mendorong udara keluar dari tabung, sekaligus menarik udara luar agar masuk tabung. Perhatikan Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Pompa sepeda terdiri atas tabung udara dan klep yang bisa digerakkan.

Ketika kalian menekan klep berarti memperbesar tekanan, yang mengakibatkan volume udara di dalam tabung mengecil. Sementara, jika menarik klep berarti mengurangi tekanan dan volume udara dalam tabung bertambah besar. Contoh ini menandakan adanya hubungan antara tekanan dan volume.

Seorang ilmuwan yang menyelidiki hubungan volume dengan tekanan gas adalah **Robert Boyle** (1627-1691). Boyle telah menyelidiki hubungan tekanan dan volume gas dalam wadah tertutup pada temperatur tetap.

Boyle menemukan bahwa hasil kali tekanan dan volume gas pada temperatur tetap adalah konstan.

Hukum ini kemudian dikenal sebagai **Hukum Boyle**. Secara matematis, Hukum Boyle dituliskan dalam bentuk,

$$PV = \text{konstan}$$

Atau,

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

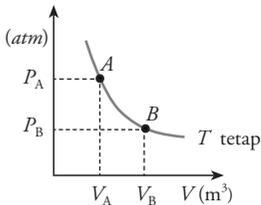
Keterangan:

P_1 = tekanan gas awal (N/m^2)

V_1 = volume gas awal (m^3)

P_2 = tekanan gas akhir

V_2 = volume akhir



Gambar 7.2 Grafik hubungan tekanan dan volume pada temperatur tetap.

Dari persamaan Hukum Boyle tersebut, hubungan tekanan dan volume pada temperatur tetap dapat digambarkan dalam bentuk grafik seperti Gambar 7.2. Berdasarkan grafik tersebut, ketika tekanan dinaikkan dua kali, volumenya akan turun setengah kali semula. Ini menandakan bahwa, jika salah satu variabel berubah, maka variabel lainnya ikut berubah. Perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah tabung dengan diameter 7 cm diberi klep yang dapat bergerak bebas. Perhatikan gambar. Jika klep ditekan dengan gaya 5 N, posisi piston berada 10 cm dari dasar tabung. Tentukan tekanan udara di dalam tabung, jika piston berada 5 cm dari dasar tabung.

Penyelesaian:

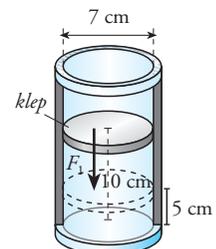
Diketahui: lihat gambar

$$F_1 = 5 \text{ N}$$

$$d = 7 \text{ cm}$$

$$h_1 = 10 \text{ cm}$$

$$h_2 = 5 \text{ cm}$$



$$A = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$= \frac{1}{4} \times \frac{22}{7} \times (7 \times 10^{-2})^2$$

$$= 3,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Ditanyakan: P_2

Jawab:

Persoalan tersebut dapat kita selesaikan dengan Hukum Boyle.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Kita tahu bahwa tekanan merupakan gaya per-satuan luas, sehingga:

$$P_1 = \frac{F_1}{A}$$

$$P_1 = \frac{5}{3,85 \times 10^{-3}}$$

$$= 1,3 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

Volume udara dalam tabung adalah luas alas kali tinggi kolom udara,

$$V = Ab$$

Sedangkan A tabung tetap, atau $A_1 = A_2$ sehingga kita mendapatkan persamaan berikut.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Ab_2}{Ab_1}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{b_2}{b_1}$$

$$P_2 = \frac{b_1}{b_2} P_1$$

$$= \frac{10}{5} \times 1,3 \times 10^3$$

$$= 2,6 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

Jadi, ketika piston berada 5 cm dari dasar tabung, tekanan udaranya adalah $2,6 \times 10^3 \text{ N/m}^2$.

Hukum Boyle hanya menjelaskan hubungan tekanan dan volume pada temperatur tetap. Padahal ketika temperatur gas bertambah, volumenya akan bertambah pula. Bagaimanakah hubungan temperatur dengan tekanan?

b. Hukum Charles

Sebenarnya, ketika Boyle mengemukakan hukumnya, telah disadari para ilmuwan bahwa temperatur gas juga memengaruhi volume. Namun, hubungan kuantitatif temperatur dengan volume tidak ditemukan. Hubungan kuantitatif temperatur dan volume baru ditemukan sekitar satu abad setelah Boyle mengemukakan hukumnya. Ilmuwan yang berjasa menemukan hubungan ini adalah **Jacques Charles** (1747-1823).

Berdasarkan penyelidikannya, Charles menemukan bahwa: **volume gas berbanding lurus dengan temperatur mutlaknya, jika tekanan gas di dalam ruang tertutup dijaga konstan.**

Pernyataan Charles ini dikenal sebagai **Hukum Charles** dan dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$V \propto T$$

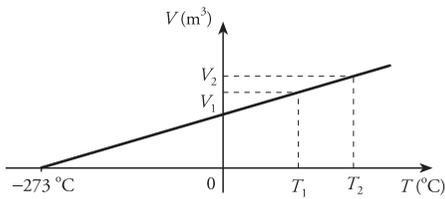
Atau dapat ditulis dalam bentuk, berikut

Mozaik



www.pilordundlufschiff.de

Jacques Charles (1747-1823) adalah ahli fisika asal Prancis. Ia adalah guru besar pada Conservatoire des Arts et Méitiers di Paris. Ia menyelidiki hubungan volume dan temperatur pada sebuah gas di ruangan tertutup. Ia merupakan orang pertama yang naik ke udara dalam sebuah balon raksasa.



Gambar 7.3 Grafik hubungan volume dan temperatur pada tekanan tetap.

$$\frac{V}{T} = \text{konstan}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Keterangan:

V_1 = volume gas awal (m^3)

V_2 = volume gas akhir (m^3)

T_1 = temperatur mutlak awal (K)

T_2 = temperatur mutlak akhir (K)

Hubungan temperatur dan volume menurut Hukum Charles tersebut dapat digambarkan dalam bentuk grafik, seperti Gambar 7.3. Grafik hubungan temperatur dengan volume berupa garis lurus dengan gradien tertentu. Jika digambarkan sampai temperatur rendah, grafik akan memotong sumbu di sekitar -273°C atau 0 K. Ini menunjukkan bahwa semua gas jika dapat didinginkan sampai volume -273° , maka volumenya akan nol.

Grafik ini dapat berlaku untuk semua jenis gas. Semua jenis gas tidak dapat didinginkan lagi, hingga temperaturnya kurang dari -273°C . Ini berarti temperatur -273°C atau 0 K merupakan suhu terendah yang dapat dicapai gas. Temperatur ini disebut temperatur **nol mutlak**. Nol mutlak merupakan dasar bagi skala temperatur yang dikenal sebagai **skala mutlak** atau **skala Kelvin**. Pada skala ini, temperatur dinyatakan dalam **kelvin** (K).

Bagaimanakah aplikasi Hukum Charles? Perhatikan contoh di bawah ini.

Teropong

Di kelas X, kalian telah mempelajari Suhu dan Kalor. Pada materi tersebut, temperatur dalam derajat Celcius dapat dikonversi ke skala Kelvin dengan persamaan,

$$T (\text{K}) = T (^\circ\text{C}) + 273$$

Contoh

Sebuah gas di dalam tabung yang dipasang piston yang dapat bergerak bebas tanpa mengurangi jumlah molekul di dalam tabung. Tabung tersebut mempunyai luas alas $15,4 \text{ cm}^2$. Ketika temperatur gas 27°C , piston berada pada ketinggian 4 cm dari alas. Namun, setelah tabung dipanaskan, piston perlahan naik hingga berada pada ketinggian 6 cm dari alas. Berapakah temperatur gas akhir?

Penyelesaian :

Diketahui:

$$A = 15,4 \text{ cm}^2 = 1,54 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$T_1 = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$$

$$h_1 = 4 \text{ cm} = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$h_2 = 6 \text{ cm} = 6 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Ditanya: T_2

Jawab: untuk mencari T_2 kita dapat menggunakan hukum Charles sebagai berikut.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{Ah_1}{T_1} = \frac{Ah_2}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{h_2}{h_1} T_1$$

$$= \frac{6 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{-2}} \times 300$$

$$= 450 \text{ K}$$

Jadi, temperatur akhir gas ketika piston berada pada ketinggian 6 cm dari alas adalah 450 K atau 177°C .

Kita telah mengetahui persamaan keadaan gas pada temperatur tetap dan pada tekanan tetap. Lalu, bagaimanakah persamaan gas jika volumenya dibuat tetap? Untuk mengetahuinya, simaklah penjelasan berikut.

c. Hukum Gay Lussac

Seorang ilmuwan bernama **Joseph Gay Lussac**, telah menyelidiki hubungan tekanan dan temperatur gas pada volume tetap. Gay Lussac menyatakan:

Jika volume gas pada ruang tertutup dibuat tetap, maka tekanan gas berbanding lurus dengan temperatur gas.

Pernyataan ini disebut **Hukum Gay Lussac** yang dituliskan dalam bentuk persamaan berikut.

$$P \propto T$$

Atau dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\frac{P}{T} = \text{konstan}$$

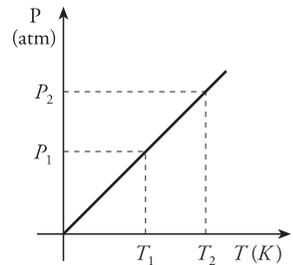
$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk grafik seperti Gambar 7.4.

Perhatikan contoh berikut.

Tips & Trik

Dalam menyelesaikan soal yang bersangkutan dengan gas, temperatur selalu dinyatakan dalam **Kelvin**, bukan celcius.



Gambar 7.4 Grafik hubungan tekanan dan temperatur pada volume tetap.

Contoh

Sebuah ban mobil pada temperatur 10°C dipompa hingga mencapai tekanan 20 kPa. Setelah 10 menit, suhunya menjadi 30°C . Tentukan tekanan ban pada temperatur tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$T_1 = 10^{\circ}\text{C} = 283 \text{ K}$$

$$P_1 = 20 \text{ kPa}$$

$$T_2 = 30^{\circ}\text{C} = 303 \text{ K}$$

Ditanyakan: P_2

Jawab: Karena volume ban tetap, maka untuk mencari P_2 kita dapat menggunakan hukum

Gay Lussac

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{T_1} T_2$$

$$= \frac{20 \text{ kPa}}{283} \times 303$$

$$= 21,41 \text{ kPa}$$

Jadi, tekanan ban pada temperatur 30°C adalah 21,41 kPa.

Kita telah mempelajari tiga hukum keadaan gas, yaitu keadaan gas pada temperatur tetap, keadaan gas pada tekanan tetap, dan keadaan gas pada volume tetap. Pertanyaannya sekarang adalah bisakah ketiga keadaan tersebut disatukan? Dapatkan jawabannya pada uraian selanjutnya.



wikimedia.org

Joseph Louis Gay Lussac

(1778-1850) adalah ahli fisika dan kimia dari Prancis. Ia melakukan pelbagai penelitian tentang sifat gas. Ia juga menyempurnakan hukum Boyle dan mengatakan bahwa untuk sejumlah gas tertentu, perbandingan antara tekanan dan suhu pada volume konstan akan selalu tetap.

Setyawan, Lilik H. 2004 hlm 66



dok. PIM

Gambar 7.5 Meniup balon berarti menambah jumlah molekul di dalam balon. Ini menyebabkan volume balon bertambah besar.

d. Hukum Boyle-Gay Lussac

Ketiga hukum keadaan gas yang telah kita pelajari, yaitu hukum Boyle, hukum Charles, dan hukum Gay Lussac dapat digabungkan menjadi satu persamaan. Hasil gabungan ketiga hukum tersebut dikenal sebagai **hukum Boyle-Gay Lussac**. Hukum ini dinyatakan dalam bentuk persamaan,

$$\frac{PV}{T} = \text{konstan}$$

Persamaan tersebut dapat dituliskan dalam bentuk lain sebagai berikut.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Berdasarkan persamaan tersebut, kita dapat mengatakan bahwa PV berbanding lurus dengan T, dan dituliskan:

$$PV \propto T$$

Untuk mengganti tanda kesebandingan pada persamaan tersebut, kita memerlukan suatu konstanta. Permasalahannya sekarang adalah berapa besar konstanta tersebut? Jika kita mempunyai gas di dalam ruang tertutup, jumlah molekul gas di ruang tersebut akan tetap, walaupun temperatur, volume, maupun tekanannya berubah. Ketika salah satu besaran tersebut berubah, besaran lain juga ikut berubah. Namun, jika kita menambahkan sejumlah molekul ke dalam ruang tersebut, tekanan gas akan bertambah besar. Seandainya dinding ruang bersifat elastis, maka volume gas juga bertambah. Hal ini dapat kalian lihat pada proses peniupan balon, seperti tampak pada Gambar 7.5

Berdasarkan keterangan tersebut, dapat disimpulkan? Bahwa, besar tekanan, volume, dan temperatur gas di dalam ruangan tertutup dipengaruhi oleh jumlah molekul gas. Jadi, persamaan di atas perlu ditambahkan faktor jumlah molekul gas (N).

$$PV \propto NT$$

Tekanan, volume, dan temperatur pada gas yang berbeda mempunyai karakteristik yang berbeda, walaupun jumlah molekulnya sama. Untuk itu diperlukan satu konstanta lagi yang dapat digunakan untuk semua jenis gas. Konstanta tersebut adalah **konstanta Boltzman** (k). Jadi, kesebandingan $PV \propto NT$ dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut.

$$PV = NkT$$

Dengan memasukkan nilai $N = n N_A$, didapatkan persamaan,

$$PV = nN_A kT$$

Keterangan:

N = jumlah molekul gas

N_A = bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ molekul/mol)

n = jumlah mol gas

k = konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

Pada persamaan tersebut, $N_A k$ disebut dengan **konstanta gas umum**

(R). Jadi, persamaan gas tersebut dapat diubah menjadi:

$$PV = nRT$$

Keterangan:

R = konstanta gas umum

= 8,314 J/mol K

= 0,082 L atm/mol K

Persamaan inilah yang disebut dengan **persamaan gas ideal**.

Perhatikan contoh di bawah ini.

Teropong

Dalam pelajaran kimia, jumlah molekul gas dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$N = n \times N_A$$

dengan,

$$n = \frac{M}{Mr}$$

Keterangan:

N = jumlah molekul

n = jumlah mol gas

N_A = bilangan Avogadro
= $6,02 \times 10^{23}$ partikel/
mol

M = massa gas (gram)

Mr = massa molekul
relatif (gram/mol)

Contoh

1. Hitunglah volume suatu gas sebanyak 2 mol pada keadaan STP.

Penyelesaian:

Diketahui:

$n = 2$ mol

$P = 1$ atm = 1×10^5 N/m²

(keadaan STP, $P = 1$ atm, $T = 0^\circ\text{C}$)

$T = 0^\circ\text{C} = 273$ K

Ditanyakan: V

Jawab:

Untuk mencari V , gunakan persamaan gas ideal.

$PV = nRT$

$1 \times 10^5 V = 2 \times 8,314 \times 273$

$V = 4,54 \times 10^{-2}$ m³

Jadi, volume 2 mol gas pada STP adalah $4,54 \times 10^{-2}$ m³.

2. Gas nitrogen berada di dalam ruangan tertutup dengan volume 83,14 cm³.

Tekanan di dalam ruangan tersebut 0,75 atm pada temperatur 27°C. Tentukan banyaknya molekul gas di dalam ruangan tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui:

$V = 83,14$ cm³ = $8,314 \times 10^{-2}$ m³

$P = 0,75$ atm = $7,5 \times 10^4$ N/m²

$T = 27^\circ\text{C} = 300$ K

Ditanyakan: N

Jawab:

Untuk mencari banyaknya molekul gas, terlebih dahulu kita harus mencari banyaknya mol gas (n). Berdasarkan hukum gas ideal:

$$\begin{aligned} n &= \frac{PV}{RT} \\ &= \frac{7,5 \times 10^4 \times 8,314 \times 10^{-2}}{8,314 \times 300} \\ &= 2,5 \text{ mol} \end{aligned}$$

Banyaknya molekul gas dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} N &= n N_A \\ &= 2,5 \times (6,02 \times 10^{23}) \\ &= 1,505 \times 10^{24} \text{ molekul.} \end{aligned}$$

Selain, menggunakan persamaan tersebut di atas, kita juga dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} PV &= NkT \\ N &= \frac{PV}{kT} \\ &= \frac{(7,5 \times 10^4) \times (8,314 \times 10^{-2})}{1,38 \times 10^{-23}} \\ &= 1,505 \times 10^{24} \text{ molekul} \end{aligned}$$

Jadi, gas nitrogen pada kondisi tersebut berjumlah $1,505 \times 10^{24}$ molekul.

Untuk menambah wawasan kalian, kerjakan *Eureka* berikut.

Eureka

Bersama dengan teman sekelompokmu, rancanglah sebuah alat percobaan untuk membuktikan kebenaran Hukum Boyle, Hukum Charles, dan Hukum Gay Lussac (satu kelompok dapat memilih salah satu dari ketiga hukum tersebut). Gunakan metode ilmiah dalam percobaan yang kalian lakukan. Kerjakan tugas ini dalam jangka waktu sekitar 4 bulan, sebagai proyek semester.

Untuk melakukan tugas ini, kalian dapat mengikuti langkah berikut.

1. Carilah literatur mengenai Hukum Boyle, Hukum Charles, dan Hukum Gay Lussac sebanyak-banyaknya.
2. Buatlah rancangan percobaan yang akan kalian laksanakan. Jangan lupa untuk mengonsultasikan rancangan tersebut kepada guru kalian.
3. Setelah rancangan kalian disetujui, buatlah alat sesuai dengan rancangan tersebut.
4. Ujilah alat buatan kalian untuk membuktikan kebenaran hukum gas ideal yang kalian pilih.
5. Presentasikan alat dan hasil percobaan kalian di depan kelompok lainnya untuk mendapatkan pelbagai masukan.
6. Buatlah karya tulis ilmiah dari hasil percobaan yang kalian rancang.

Tips & Trik

1. Dalam soal biasanya diketahui tekanan dan temperatur dalam keadaan STP (tepa tur dan tekanan stan dar). **Keadaan STP adalah keadaan pada temperatur 0°C atau 273 K, dan tekanan 1 atm.** Dengan rincian:

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 10^5 \text{ N/m}^2 \\ &= 10^5 \text{ pascal} \\ 1 \text{ atm} &= 76 \text{ cm Hg.} \end{aligned}$$

2. Jika diketahui tekanan dalam atm dan volume dalam liter, gunakan

$$R = 0,082 \text{ L atm/mol K}$$

3. Persamaan Gas Van Der Walls (Pengayaan)

Persamaan gas ideal yang telah dipelajari adalah persamaan gas yang tidak memperhatikan gaya ikat antarmolekulnya. Bagaimana jika gaya ikat antarmolekulnya diperhitungkan? Jika gaya ikat antarmolekul diperhitungkan, maka persamaan gas ideal tersebut memerlukan sebuah koreksi.

Persamaan yang digunakan sebagai hasil koreksi dari persamaan gas ideal adalah **persamaan Van Der Walls**, yang dirumuskan:

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V}\right)(V - nb) = nRT$$

Keterangan: P = tekanan gas (Pa) n = jumlah mol gas (mol) V = volume gas (m^3) $a = 0,364 \text{ Jm}^3/\text{mol}^2$ $b = 4,27 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$ a dan b adalah **tetapan Van Der Walls**.

Untuk menguji sejauh mana kalian menguasai materi di depan, kerjakan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Uji Kompetensi

1. Berikan 5 contoh kejadian sehari-hari yang dapat menjelaskan hukum Boyle, Hukum Charles, dan Hukum Gay Lussac.
2. Dua mol gas nitrogen pada tekanan 2×10^5 Pa, dan temperatur 27°C , mempunyai volume $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Berapakah volume gas nitrogen tersebut jika tekanannya menjadi 2 kali lipat tekanan semula, dan suhunya menjadi 310 K?
3. Volume suatu gas ideal pada tekanan 1×10^5 Pa adalah 2 dm^3 . Agar volumenya menjadi 2 kali lipat dari volume semula, sampai berapa atmosfer tekanan harus diberikan kepada gas tersebut pada temperatur 50°C ?
4. Sebuah balon karet berbentuk bola dengan jejari 14 cm diisi gas helium ($M_r \text{ He} = 2$). Jika tekanan gas 2 atm pada temperatur 25°C , berapakah jumlah molekul gas He yang berada di dalam balon?

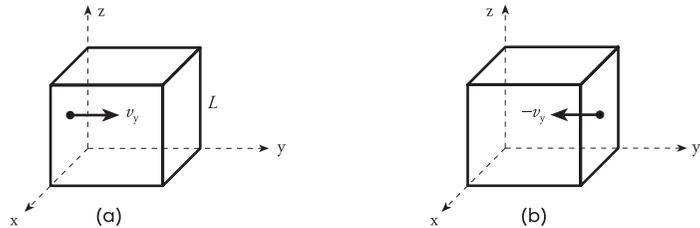
B Teori Kinetik Gas

Kita telah membahas pengertian dan beberapa hukum gas ideal. Salah satu sifat gas ideal adalah molekul-molekulnya dapat bergerak bebas (acak). Sekarang kita akan membahas pengaruh gerak molekul-molekul gas terhadap sifat gas secara umum dengan **Teori Kinetik Gas**. Beberapa konsep yang dibicarakan dalam teori kinetik gas antara lain tekanan akibat gerak molekul gas, kecepatan molekul gas, dan energi kinetik gas.

1. Tekanan Gas

Tekanan gas yang akan kita bahas adalah tekanan gas akibat gerak molekul. Telah dibahas di depan bahwa setiap molekul gas terus bergerak secara acak. Jika gas tersebut berada di dalam ruangan tertutup, molekul-molekulnya akan menumbuk dinding ruangan dengan kecepatan tertentu. Tekanan gas di dalam sebuah ruangan tertutup sama dengan tekanan gas pada dindingnya akibat ditumbuk molekul gas. Gaya tumbukan yang merupakan laju momentum terhadap dinding inilah yang memberikan tekanan gas.

Kita ambil contoh sejumlah molekul gas dengan massa tiap molekul m , berada dalam ruang tertutup berbentuk kubus dengan rusuk L . Molekul-molekul di dalam kubus akan bergerak ke segala arah dengan kelajuan berbeda. Sekarang kita tinjau salah satu gerak molekul yang searah dengan sumbu y . Perhatikan Gambar 7.6.



Gambar 7.6 (a) Sebuah molekul gas bergerak dari salah satu dinding kubus. (b) Setelah menumbuk dinding, molekul akan terpantul kembali dengan arah berlawanan dengan arah semula dengan kecepatan sama besar.

Gambar 7.6 memberikan gambaran gerak sebuah molekul di dalam ruang. Molekul yang semula berada di dinding sebelah kiri dengan luas A_1 bergerak ke arah sumbu y positif dengan kecepatan \vec{v}_y . Setelah beberapa saat, molekul menumbuk dinding sebelah kanan yang mempunyai luas A_2 . Karena tumbukan molekul dengan dinding adalah tumbukan lenting sempurna, maka kecepatan molekul setelah tumbukan sama dengan kecepatan semula, tetapi berlawanan arah ($-\vec{v}_y$). Setelah memantul, molekul akan menumbuk dinding A_1 dan kembali dipantulkan ke dinding A_2 . Peristiwa tumbukan molekul dengan dinding ini terjadi terus menerus.

Untuk satu kali gerak bolak-balik, perubahan momentum (Δp) molekul merupakan momentum akhir dikurangi momentum awal.

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$$

$$\Delta \vec{p} = m(-\vec{v}_y) - m\vec{v}_y$$

$$\Delta \vec{p} = -2m\vec{v}_y$$

Keterangan:

$\Delta \vec{p}$ = perubahan momentum

m = massa satu molekul gas (kg)

\vec{v}_y = kecepatan searah sumbu y (m/s)

Arah perubahan momentum ini tegak lurus bidang A_2 . Jadi, momentum yang diberikan molekul kepada dinding A_2 sama dengan $2m\vec{v}_y$. Kita tahu bahwa molekul akan bolak-balik menumbuk dinding yang saling berhadapan. Ini berarti, untuk kembali menumbuk dinding yang sama, molekul menempuh jarak $2L$ dengan kecepatan \vec{v}_y . Sehingga, selisih waktu yang diperlukan sebuah molekul untuk menumbuk satu dinding dua kali berturut-turut adalah:

Teropong

Di semester I, kita telah mempelajari materi Momentum dan Impuls yang dapat digunakan untuk menjelaskan tumbukan benda atau partikel. Momentum dirumuskan,

$$p = mv$$

Sementara impuls menyatakan perubahan momentum dalam selang waktu sangat pendek. Impuls dinyatakan dalam bentuk persamaan,

$$I = \Delta p$$

$$I = F \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{2L}{\bar{v}_y}$$

Sementara banyaknya tumbukan atau frekuensi tumbukan yang terjadi pada selang waktu tertentu dinyatakan dengan persamaan,

$$\text{Jumlah tumbukan} = \frac{1}{\frac{2L}{\bar{v}_y}} \text{ kali.}$$

$$\text{Jumlah tumbukan} = \frac{\bar{v}_y}{2L} \text{ kali}$$

Suatu besaran yang berhubungan erat dengan perubahan momentum adalah impuls. Impuls atau perubahan momentum diartikan sebagai hasil perkalian gaya dengan selang waktu yang sangat pendek. Jadi, impuls yang diterima dinding saat bertumbukan dengan molekul adalah:

$$\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}$$

$$\vec{F} \Delta t = 2 m \bar{v}_y$$

Dari persamaan tersebut, gaya yang diterima dinding akibat tumbukan sebuah molekul adalah:

$$\vec{F} = \frac{2 m \bar{v}_y}{\Delta t}$$

Dengan memasukkan nilai $\Delta t = \frac{\bar{v}_y}{2L}$, kita mendapatkan persamaan,

$$\vec{F} = \frac{m \bar{v}_y^2}{L}$$

Keterangan:

\vec{F} = gaya pada dinding (N)

m = massa sebuah molekul (kg)

\bar{v}_y = kecepatan gerak molekul (m/s)

L = panjang rusuk kubus.

Dengan adanya gaya yang bekerja pada dinding, berarti dinding mendapat tekanan dari molekul-molekul gas. Tekanan yang dialami dinding dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\bar{P}_y = \frac{\vec{F}}{A}$$

$$\bar{P}_y = \frac{m \bar{v}_y^2}{AL}$$

Mozaik

Balon udara memanfaatkan gas sebagai bahan bakar. Ketika bahan bakar dinyalakan, temperatur udara di dalam kantong naik. Kenaikan temperatur udara ini memaksa sebagian udara keluar, yang berarti massa udara di kantong mengecil sementara volumenya membesar. Ini mengakibatkan massa jenis udara di dalam balon lebih kecil dari massa jenis udara di luar. Inilah yang menyebabkan balon dapat terbang di udara.



Dok. PIM

Kita tahu bahwa AL adalah volume kubus (V). Jadi,

$$\vec{P}_y = \frac{m\vec{v}_y^2}{V}$$

Tekanan P_y tersebut adalah tekanan pada dinding yang diakibatkan oleh satu molekul. Padahal kita tahu, gas terdiri atas N molekul yang dapat dianggap mempunyai kecepatan gerak yang sama. Sehingga tekanan total pada salah satu dinding merupakan N kali tekanan yang diberikan satu molekul. Jadi, tekanan pada dinding ruangan yang berisi N molekul gas dinyatakan dengan persamaan:

$$\vec{P}_y = \frac{Nm\vec{v}_y^2}{V}$$

Persamaan P_y tersebut adalah tekanan pada dinding sepanjang sumbu y (dinding kanan dan kiri). Padahal kita tahu, kubus merupakan bidang tiga dimensi yang mempunyai sumbu x , sumbu y , dan sumbu z . Lalu, bagaimanakah tekanan dinding sepanjang sumbu z (dinding atas dan bawah), dan tekanan sepanjang sumbu x (dinding depan dan belakang)? Tekanan pada dinding-dinding tersebut, identik dengan persamaan P_y . Jadi:

$$\vec{P}_x = \frac{Nm\vec{v}_x^2}{V}$$

$$\vec{P}_z = \frac{Nm\vec{v}_z^2}{V}$$

Keterangan:

\vec{P}_x = tekanan pada dinding dalam arah sumbu x

\vec{P}_z = tekanan pada dinding dalam arah sumbu z

Pada penjelasan sebelumnya, kita tahu bahwa tekanan gas sama dengan tekanan pada dinding. Jadi, besar tekanan gas pada dinding adalah:

$$\vec{P} = \vec{P}_x = \vec{P}_y = \vec{P}_z$$

Namun, perlu diingat bahwa molekul gas bergerak ke segala arah, dalam hal ini pada arah x , y , dan z dengan kecepatan \vec{v}_x , \vec{v}_y , dan \vec{v}_z . Untuk itu, kita perlu mencari kecepatan molekul yang sesungguhnya. Dengan aturan vektor, kecepatan molekul yang sesungguhnya dapat dicari dengan persamaan:

$$\vec{v}^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Teropong

Di kelas X, kalian telah mengenal penguraian vektor pada koordinat tiga dimensi. Jika kita mempunyai vektor v , maka vektor tersebut dapat diuraikan menjadi v_x , v_y , dan v_z . Hubungan v , v_x , v_y , dan v_z diberikan dengan persamaan:

$$\vec{v}^2 = \vec{v}_x^2 + \vec{v}_y^2 + \vec{v}_z^2$$

Walaupun arah kecepatan molekul tidak sama, namun besar kecepatan (kelajuan) molekul gas ke semua arah dapat dianggap sama ($v_x = v_y = v_z$). Jadi, tanpa menghiraukan arah gerak molekul, kita mendapatkan persamaan **rata-rata kuadrat kelajuan** setiap molekul sebagai berikut.

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2} = 3\overline{v_y^2} = 3\overline{v_z^2}$$

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$$

Atau, berdasarkan persamaan kecepatan ini, besar tekanan gas dinyatakan dengan rumus:

$$P = \frac{Nm(\frac{1}{3}\overline{v^2})}{V}$$

atau dapat dituliskan dalam bentuk:

$$P = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{v^2}}{V} \quad \text{atau,} \quad PV = \frac{1}{3} Nm\overline{v^2}$$

Mengingat bahwa Nm tidak lain adalah massa gas (M) dan $\frac{M}{V} = \rho$ (massa jenis), maka tekanan dapat dicari dengan persamaan:

$$P = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$$

Keterangan:

P = tekanan gas ($N/m^2 = Pa$)

N = jumlah molekul

m = massa satu molekul gas (kg)

$\overline{v^2}$ = rata-rata kuadrat kelajuan molekul (m/s)

ρ = massa jenis gas (kg/m^3)

Persamaan tersebut merupakan persamaan tekanan gas ditinjau dari teori kinetik. Dari persamaan tersebut, kita dapat melihat bahwa besar tekanan gas sebanding dengan jumlah molekul.

Perhatikan contoh berikut.

Contoh

1. Di dalam sebuah ruang berbentuk kubus yang panjang rusuknya 10 cm terdapat gas CO_2 dengan $Mr = 44$. Molekul-molekul gas bergerak dengan kelajuan

pada arah x , y , dan z sebesar 220 m/s. Apabila gas di dalam kubus bermassa 2,2 gram, tentukan tekanan gas pada dinding kubus tersebut.

Teropong

Massa yang dipakai dalam pembahasan kinetik gas adalah massa molekul (m), bukan massa gas (M). Jika gas terdiri atas N molekul, maka

$$M = N \times m$$

(massa gas = jumlah molekul \times massa molekul)

Penyelesaian :

Diketahui:

$$M_r = 44$$

$$m = 2,2 \text{ gr} = 2,2 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$v_x = 220 \text{ m/s}$$

$$r = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$$

Ditanyakan: P_x , P_y , dan P_z

Jawab:

Tekanan gas pada dinding dicari dengan persamaan:

$$P_x = \frac{Nmv_x^2}{V}$$

Kita ingat bahwa $Nm = M$ sehingga persamaan tersebut menjadi:

$$P_x = \frac{Mv_x^2}{r^3}$$

$$P_x = \frac{(2,2 \times 10^{-3}) (220)^2}{(10^{-1})^3}$$
$$= 1,06 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Karena kelajuan pada arah sumbu x, y, dan z sama besar, maka tekanan pada setiap dinding (P_x , P_y , dan P_z) adalah $1,06 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

- Sejumlah gas hidrogen ($M_r = 2$) ditiupkan ke dalam sebuah balon. Akibatnya balon mengembang seperti bola berjejari 4 cm. Jika massa balon bertambah 187,6 gram dan tekanan di dalam balon 1,2 atm, tentukan rata-rata kuadrat kelajuan molekul gas hidrogen.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$M_r H = 2$$

$$r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$M = 0,8 \text{ gr}$$

(pertambahan massa balon adalah massa hidrogen)

$$P = 1,2 \text{ atm} = 1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Ditanyakan: $\overline{v^2}$

Jawab:

Untuk mencari kelajuan rata-rata molekul gas, kita perlu massa jenis gas hidrogen.

$$\rho = \frac{M}{V}$$
$$= \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$
$$= \frac{18,76}{\frac{4}{3} \times 3,14 \times 4^3}$$
$$= 0,07 \text{ gr/cm}^3$$

Dengan persamaan tekanan:

$$P = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}$$
$$\overline{v^2} = \frac{3P}{\rho}$$
$$= \frac{3 \times (1,02 \times 10^5)}{0,07}$$
$$= 4,37 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Jadi, rata-rata kuadrat kelajuan molekulnya adalah $4,37 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

2. Energi Kinetik sebagai Fungsi Temperatur

Kalian telah mengetahui bahwa sebuah benda yang bergerak akan mempunyai energi kinetik. Begitu pula molekul gas yang bergerak juga mempunyai energi kinetik. Sekarang mari kita lihat kembali persamaan tekanan sebagai fungsi rata-rata kuadrat kelajuan di depan yang dinyatakan dengan persamaan:

$$PV = \frac{1}{3} N m \overline{v^2}$$

Persamaan ini berlaku jika gas terdiri dari N buah molekul. Untuk satu buah molekul, persamaan tersebut menjadi:

$$PV = \frac{1}{3} m \overline{v^2}$$

Persamaan tersebut dapat dituliskan dalam bentuk lain sebagai berikut.

$$PV = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right)$$

Faktor $\frac{1}{2} m \overline{v^2}$ tidak lain adalah energi kinetik. Karena kelajuannya merupakan kelajuan rata-rata dan gerakannya gerak translasi, maka energi kinetiknya juga merupakan **energi kinetik translasi rata-rata** (\overline{E}_k). Jadi, persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk:

$$PV = \frac{2}{3} \overline{E}_k$$

Dari persamaan tersebut, energi kinetik translasi rata-rata (\overline{E}_k) dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} PV$$

Pada subbab A, kita telah mendapatkan persamaan $PV = NkT$ dan $PV = nRT$. Dengan mensubstitusikan nilai PV tersebut, persamaan energi kinetik translasi rata-rata molekul gas dapat dicari dengan rumus:

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} NkT$$

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} nRT$$

Keterangan:

\overline{E}_k = energi kinetik translasi rata-rata gas (J)
 k = tetapan Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
 T = temperatur mutlak gas (K)
 n = jumlah mol gas

Persamaan energi kinetik tersebut berlaku untuk N buah molekul gas. Jika hanya terdapat sebuah molekul, energi kinetik gas di dalam ruang tertutup dinyatakan dengan persamaan:

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} kT$$

T eropong

Pada bab Usaha dan Energi di semester 1, kita telah mengetahui persamaan energi kinetik sebagai berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Jika jumlah mol gasnya sama dengan satu mol, maka energi kinetiknya:

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} RT$$

Persamaan ini menyatakan hubungan antara energi kinetik gas dengan temperatur mutlaknya. Semakin tinggi temperatur gas, energi yang dimilikinya semakin besar. Akibatnya, gerak molekul gas di dalam kotak semakin cepat.

Bagaimanakah penerapan persamaan tersebut? Perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

Hitunglah energi kinetik translasi rata-rata molekul gas pada temperatur 37°C.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$T = 37^\circ\text{C} = 310 \text{ K}$$

Ditanyakan:

$$\overline{E_k}$$

Jawab:

Untuk mencari E_k , kita bisa menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \overline{E_k} &= \frac{3}{2} kT \\ &= \frac{3}{2} (1,38 \times 10^{-23}) \times 310 \\ &= 6,42 \times 10^{-21} \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, besar energi kinetik translasi rata-rata molekul gas pada temperatur 37°C adalah $6,42 \times 10^{-21} \text{ J}$.

3. Kelajuan rms

Dari keterangan sebelumnya, kalian telah mengetahui bahwa semakin besar temperatur gas, semakin besar pula kecepatan gerak molekul gas. Ketika membahas tekanan, kita mengenal besaran rata-rata kuadrat kelajuan molekul gas (disimbolkan dengan $\overline{v^2}$). Lalu, berapakah kelajuan gerak molekul yang sesungguhnya?

Berdasarkan persamaan energi kinetik sebagai fungsi temperatur yang dituliskan dalam bentuk rumusan

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT$$

kita dapat mencari persamaan rata-rata kuadrat kelajuan.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m \overline{v^2} &= \frac{3}{2} kT \\ \overline{v^2} &= \frac{3kT}{m} \end{aligned}$$

Kelajuan molekul gas sesungguhnya dinyatakan sebagai **akar rata-rata kuadrat kelajuan** (*root mean square* = rms). Jadi, kelajuan molekul gas dinyatakan sebagai kelajuan rms yang dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{v^2}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Keterangan:

v_{rms} = kelajuan molekul gas (m/s)

k = konstanta Boltzman

m = massa satu molekul gas (kg)

Dengan mensubstitusikan persamaan $Mr = mN_A$ dan $k = \frac{R}{N_A}$ ke dalam persamaan tersebut, kita mendapatkan persamaan:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3\left(\frac{R}{N_A}\right)T}{\left(\frac{Mr}{N_A}\right)}}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{Mr}}$$

Untuk menambah wawasan kalian, kerjakan *Ekspedisi* di bawah ini.

Ekspedisi

Dengan mensubstitusikan persamaan massa jenis

gas ($\rho = \frac{M}{V}$) dengan $M = Nm$ (M = massa gas,

m = massa satu molekul gas), dan $n = \frac{M}{Mr}$ pada

persamaan-persamaan yang telah kalian pelajari, selidikilah kebenaran persamaan-persamaan berikut.

$$1. \quad P = \frac{RT}{Mr} \rho$$

$$2. \quad v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$

Konsultasikan hasil pekerjaan kalian kepada Bapak atau Ibu Guru.

Untuk mengetahui penggunaan persamaan-persamaan di depan, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Hitunglah kelajuan rms molekul gas nitrogen ($M_r N_2 = 28$ gr/mol) pada temperatur 20°C .

Penyelesaian:

Diketahui:

$$M_r = 28$$

$$T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

Ditanyakan: v_{rms}

Jawab:

Untuk mencari v_{rms} terlebih dahulu kita mencari massa satu molekul gas nitrogen dengan persamaan:

$$\begin{aligned} m &= \frac{M_r}{N_A} \\ &= \frac{28}{6,02 \times 10^{23}} \\ &= 4,65 \times 10^{-23} \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3kT}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{3 \times (1,38 \times 10^{-23}) \times 293}{4,65 \cdot 10^{-26}}} \\ &= 511 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Selain menggunakan persamaan tersebut, kita juga dapat menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3RT}{M_r}} \\ &= \sqrt{\frac{3 \times (8,314 \times 10^3) \times 293}{28}} \\ &= 511 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan molekul gas nitrogen pada temperatur 20°C adalah 511 m/s.

Untuk menambah wawasan kalian, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

- Di dalam sebuah tabung bervolume 1 m^3 , terdapat 2 mol gas oksigen ($M_r O_2 = 32$). Jika rata-rata kuadrat kelajuan molekul gas oksigen $480 \text{ m}^2/\text{s}^2$, tentukan tekanan gas oksigen di dalam tabung.
- Tentukan perbandingan kelajuan rms dan energi kinetik rata-rata antara gas helium ($M_r = 4$) dengan gas nitrogen ($M_r = 28$) pada temperatur 27°C .
- Sebuah lampu neon dengan panjang 1 m dan diameter 3 cm berisi gas neon ($M_r = 20$) yang mempunyai massa jenis $1,21 \text{ gr/cm}^3$ pada suhu 25°C . Tentukan:
 - massa neon di dalam lampu,
 - jumlah atom neon,
 - tekanan gas di dalam lampu,
 - kelajuan rms,
 - energi kinetik gas pada temperatur 67°C .
- Sebuah tangki penyelam berisi 0,4 kg gas oksigen (O_2) yang dimampatkan dalam volume 2,4 L. Jika temperatur gas di dalam tangki 20°C , tentukan:
 - jumlah mol dan jumlah molekul gas oksigen,
 - tekanan gas oksigen,

Kita telah mempelajari teori kinetik gas yang meliputi tekanan, energi kinetik, dan kecepatan molekul gas. Energi kinetik yang telah kita pelajari di depan berlaku pada gas yang terdiri dari satu macam atom (gas monoatomik). Bagaimanakah jika di dalam ruangan tertutup terdapat gas yang terdiri dari dua atom (gas diatomik)? Kalian akan mengetahuinya dengan mempelajari uraian di bawah ini.

C Teori Ekuipartisi dan Energi dalam Gas

Kalian tentunya mengetahui bahwa di udara terdapat pelbagai macam gas. Gas-gas di udara ada yang berupa atom yang berdiri sendiri atau gas-gas yang merupakan senyawa, yang terdiri dari dua atom atau lebih. Gas yang terdiri dari satu macam atom disebut **gas monoatomik**, seperti gas helium (He). Sementara gas yang terdiri dari dua atom disebut **gas diatomik**, seperti gas oksigen (O_2), gas nitrogen (N_2), dan gas hidrogen (H_2). Sedangkan gas yang terdiri dari tiga atom atau lebih disebut gas poliatomik, seperti uap air (H_2O), gas karbondioksida (CO_2), dan gas etana (C_2H_6).

Energi kinetik yang telah kita bahas di depan berlaku untuk gas monoatomik. Lalu, bagaimanakah persamaan energi kinetik untuk gas-gas diatomik atau gas poliatomik? Ikuti terus keterangan selanjutnya.

1. Teori Ekuipartisi

Sesuai anggapan dasar teori kinetik gas, partikel-partikel gas senantiasa bergerak. Pada gas monoatomik, molekul gas bergerak secara translasi dengan arah gerak pada sumbu x , y , dan z . Dari penjelasan di depan, persamaan energi kinetik gas monoatomik dituliskan dalam bentuk

$$E_K = \frac{3}{2}kT$$

Angka 3 pada persamaan energi kinetik tersebut sebenarnya merupakan jumlah energi kinetik akibat gerak molekul pada sumbu x , sumbu y , dan sumbu z , dengan kecepatan v_x , v_y , dan v_z . Jadi:

$$E_K = E_{Kx} + E_{Ky} + E_{Kz}$$

$$E_K = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2$$

Dari persamaan tersebut dapat dikatakan bahwa gas monoatomik menyerap energi dari tiga arah, yaitu arah x , arah y , dan arah z . Dari keadaan ini, dapat dikatakan bahwa **gas monoatomik mempunyai tiga derajat kebebasan**. Tiga derajat kebebasan ini disebabkan gerak translasi molekul gas. Lalu, bagaimanakah dengan gas diatomik?

Gas diatomik mempunyai dua atom yang saling berikatan. Akibatnya, setiap atom akan berputar mengelilingi atom lainnya. Gerak berputar ini disebut gerak rotasi. Karena setiap atom berputar mengelilingi atom lainnya, maka ada dua gerak rotasi. Selain melakukan gerak rotasi, kedua atom juga melakukan gerak translasi, seperti gas monoatomik. Jadi, gas diatomik melakukan 5 gerak yaitu, 3 gerak translasi dan 2 gerak rotasi. Apakah akibat dari 5 macam gerak yang dilakukan gas diatomik?

Dengan adanya 5 macam gerak, berarti gas diatomik menyerap energi dari 5 arah. Ini berarti **gas diatomik mempunyai 5 derajat kebebasan**. Lalu, berapakah energi yang dimiliki gas diatomik? Untuk mencari besar energi kinetik gas diatomik, kita dapat menggunakan teori ekuipartisi energi.

Teori ekuipartisi menyebutkan bahwa Suatu sistem molekul-molekul gas pada temperatur mutlak T dengan tiap molekul memiliki f derajat kebebasan, maka rata-rata energi mekanik per molekul (\bar{E}_M) dan rata-rata energi kinetik permolekul (\bar{E}_K) adalah sama, yaitu sebesar $f(\frac{1}{2}kT)$.

Nah, berdasarkan teori ekuipartisi energi tersebut, maka energi kinetik pada gas diatomik adalah sebesar:

$$E_K = f\left(\frac{1}{2} kT\right)$$

Keterangan:

f = derajat kebebasan

Untuk gas diatomik,

$$E_K = 5 \left(\frac{1}{2} kT\right)$$

$$E_K = \frac{5}{2} kT$$

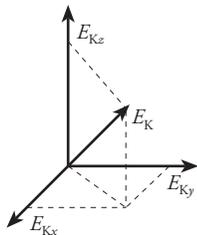
Teori ekuipartisi energi dapat dijelaskan sebagai berikut.

Energi kinetik rata-rata setiap molekul gas adalah sebesar $\frac{1}{2} kT$ yang berhubungan dengan derajat kebebasan yang dimiliki sebuah molekul. Tiap derajat kebebasan memperlihatkan cara molekul memanfaatkan energi.

Energi sebuah molekul yang bergerak secara translasi akan bertambah dalam sekejap. Ini disebabkan tumbukan molekul dengan molekul lain. Tumbukan ini akan mendistribusikan ulang energi tambahan agar keadaan gas kembali seimbang. Energi ini terbagi rata di antara energi kinetik translasi dalam arah x , y dan z . Sesuai dengan teori ekuipartisi di atas, energi kinetik translasi yang terdistribusi adalah:

$$E_K = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2$$

Distribusi energi kinetik pada arah x , y , z dapat dilihat pada gambar 7.7.



Gambar 7.7 Komponen energi kinetik pada gerak translasi.

Untuk gas diatomik, selain melakukan gerak translasi, tiap molekul berinteraksi dengan molekul lain. Interaksi ini menyebabkan gerak rotasi ataupun vibrasi. Untuk gas diatomik pada temperatur sedang (± 500 K), memiliki lima derajat kebebasan, yaitu tiga dari gerak translasi dan dua dari gerak rotasi. Energi kinetik gas diatomik karena gerak translasi dan rotasi dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$E_K = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2 + \frac{1}{2}I_x\omega_x^2 + \frac{1}{2}I_y\omega_y^2$$

Jika molekul gas melakukan gerak vibrasi, maka energinya sebesar:

$$E_K = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2 + \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{2}Ky^2$$

Dengan, K adalah konstanta gaya efektif dari pegas khayal.

Kalian mungkin pernah mendengar istilah tenaga dalam atau energi dalam. Dengan energi dalam, orang bisa melemparkan benda dari jarak jauh. Namun, samakah pengertian energi dalam ini dengan energi dalam yang akan kita bahas selanjutnya? Mari kita ikuti uraian berikutnya.

2. Energi Dalam Gas

Kita telah mempelajari teori ekuipartisi energi. Energi kinetik yang dihasilkan gas tersebut berasal dari gerak molekul. Selain energi tersebut, gas tidak memiliki energi lain. Energi kinetik inilah yang disebut dengan **energi dalam** (U). Jika di dalam ruang tertutup terdapat sejumlah molekul gas, maka **besar energi dalam** merupakan jumlah energi kinetik seluruh molekul gas yang terdapat dalam ruang tersebut. Jadi, berapakah besar energi dalam yang dimiliki gas pada ruang tertutup?

Kita tahu bahwa satu buah molekul gas akan menghasilkan energi kinetik sebesar $\frac{3}{2}kT$.

Jika gas terdiri dari N molekul, maka besar energi dalam gas adalah N kali energi kinetik molekul gas. Jadi, besar energi dalam gas pada keadaan tertentu dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$U = N E_k$$

$$U = N f \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

Keterangan:

U = Energi dalam gas (J)

Dalam persamaan tersebut, f menyatakan derajat kebebasan molekul gas. Berdasarkan derajat kebebasannya, rumusan energi dalam pada gas adalah sebagai berikut.

- 1) Untuk gas monoatomik ($f = 3$), sebagai contoh gas helium (He), gas neon (Ne), dan gas argon (Ar), energi dalam gas dinyatakan dengan rumus:

$$U = \frac{3}{2} NkT$$

$$U = \frac{3}{2} nRT$$

- 2) Untuk gas diatomik ($f = 5$), sebagai contoh gas hidrogen (H_2), gas nitrogen (N_2), dan gas oksigen (O_2), energi dalam gas dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$U = \frac{5}{2} NkT$$

$$U = \frac{5}{2} nRT$$

Bagaimanakah persamaan tersebut diterapkan untuk menyelesaikan soal-soal? Perhatikan contoh berikut.

Contoh

1. Tentukan energi kinetik rata-rata molekul dan energi dalam 5 mol gas ideal pada temperatur 800 K, jika gas tersebut adalah:
 - a) gas monoatomik
 - b) gas diatomik

Penyelesaian:

Diketahui:

$$T = 800 \text{ K}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$n = 5 \text{ mol}$$

$$N = n N_A$$

$$= 5 (6,02 \times 10^{23}) = 3,01 \times 10^{24} \text{ molekul}$$

Ditanyakan:

- a) \bar{E}_k dan U untuk gas monoatomik
- b) \bar{E}_k dan U untuk gas diatomik

Jawab:

- a) Gas monoatomik memiliki 3 derajat kebebasan, sehingga energi kinetik rata-rata molekulnya:

$$\bar{E}_k = 3 \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

$$= \frac{3}{2} \times (1,38 \times 10^{-23}) \times 800$$

$$= 1,66 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Energi dalam,

$$U = N \overline{E_k}$$
$$= (3,01 \times 10^{24}) \times (1,66 \times 10^{-20})$$
$$= 4,997 \times 10^4 \text{ J}$$

Jadi, energi kinetik rata-rata gas monoatomik tersebut adalah $1,66 \cdot 10^{-20}$ J dan energi dalamnya sekita $5,00 \cdot 10^4$ J atau 50 kJ.

- b) gas diatomik memiliki 5 derajat kebebasan, sehingga:

$$\overline{E_k} = 5 \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

$$= \frac{5}{2} \times (1,38 \times 10^{-23}) \times 800$$
$$= 2,76 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Energi dalam

$$U = N \overline{E_k}$$
$$= (3,01 \times 10^{24}) \times (2,76 \times 10^{-20})$$
$$= 8,31 \times 10^4 \text{ J}$$

Jadi, energi kinetik gas diatomik tersebut sebesar $2,76 \times 10^{-20}$ J dan energi dalamnya sebesar $8,31 \times 10^4$ J atau 8,31 kJ.

Pada *Uji Kompetensi* berikut disajikan beberapa soal sebagai ajang latihan bagi kalian

Uji Kompetensi

1. Berapakah kecepatan rata-rata molekul oksigen ($M_r \text{O}_2 = 32 \text{ kg/kmol}$) dalam udara bersuhu 30°C ?
2. Suatu gas pada sebuah ruangan mempunyai massa jenis $0,5 \text{ kg/m}^3$. Temperatur ruangan tersebut 27°C , dan tekanannya 1 atm. Berapakah kecepatan rata-rata gas tersebut?
3. Berapakah energi kinetik rata-rata dari $0,16 \text{ g}$ gas oksigen pada temperatur 300 K ? Tentukan pula energi dalam gas tersebut. (anggap oksigen merupakan gas poliatomik dan $M_r \text{O}_2 = 16$)

D Penerapan Teori Kinetik Gas

1. Gerak Brown

Pada tahun 1827, **Robert Brown** menemukan gejala gerak sembarang yang terus-menerus dari tepung sari yang tergantung di dalam air. Gerakan partikel tepung tersebut di dalam air kemudian dikenal sebagai **gerak Brown**. Sebelum ditemukan teori kinetik, gerakan ini belum dapat dijelaskan. Pada tahun 1905, **Albert Einstein** mengembangkan teori gerak Brown.

Anggapan dasar yang dikemukakan Einstein tentang fenomena tersebut adalah bahwa partikel-partikel yang tergantung bebas di dalam suatu fluida (cairan atau gas) bergerak karena temperatur (disebut gerak termal) medium. Energi kinetik translasi rata-rata dari setiap partikel adalah $\frac{2}{3} kT$, sesuai dengan prinsip ekuipartisi energi.

Mozaik



www.anbg.gov.au/biography/biog-pics/brown.robert.com

Robert Brown (1773-1858)

adalah ahli botani yang berpengaruh asal Inggris. Lahir di Montrose, Skotlandia, ia belajar tentang ilmu obat dan ilmu alam di Universitas Edinburgh. Pada tahun 1800 ia diundang oleh ilmuwan Inggris Sir Joseph Banks untuk bergabung dalam sebuah survei di pesisir Australia. Sekembalinya dari sana 5 tahun kemudian, Brown membawa hampir 4000 spesies tumbuhan asal Australian.

Selain penemuannya tentang Gerak Brown, ia menemukan perbedaan antara gimnospermeae and angiospermeae.

Microsoft Encarta Premium 2006

Berdasarkan prinsip ini, gerak Brown berasal dari tumbukan molekul-molekul fluida. Sementara partikel-partikel yang tergantung mendapatkan tenaga kinetik rata-rata yang sama seperti molekul-molekul fluida tersebut. Ukuran partikel-partikel yang tergantung tersebut adalah sangat besar bila dibandingkan dengan molekul fluida. Akibat adanya partikel yang cukup besar dan banyaknya molekul, maka tumbukan dengan partikel dapat terjadi setiap saat.

2. Penguapan



dok. PIM

Gambar 7.8 Akibat pemanasan, sebagian air berubah menjadi uap air.

Coba kalian memanaskan beberapa liter air di sebuah wadah menggunakan kompor atau heater. Sebelumnya, tandai ketinggian air pada gelas menggunakan spidol. Tunggulah sampai mendidih dan biarkan beberapa menit. Setelah itu, lihatlah ketinggian air di dalam wadah tersebut. Apa yang terjadi? Ternyata ketinggian air berkurang. Ini disebabkan terjadi penguapan, yang berarti ada sebagian air yang berubah dari fase cair menjadi fase gas (uap air).

Proses penguapan dapat dijelaskan dengan dasar teori kinetik. Molekul-molekul air tarik-menarik satu sama lain. Gaya tarik-menarik ini membuat molekul air berdekatan pada fase cair. Jika terjadi kenaikan temperatur, molekul-molekul air akan bergerak lebih cepat yang berarti energi kinetiknya tinggi. Molekul air yang mempunyai energi kinetik tinggi mampu melawan gaya tarik molekul lain. Akibatnya, molekul dengan energi kinetik tinggi dapat terlepas dari ikatan molekul lain, dan berubah ke fase gas. Akan tetapi, jika molekul tidak memiliki kecepatan yang memadai untuk berubah ke fase gas, maka ia akan tertarik kembali ke permukaan air.

3. Kelembaban

Dalam kehidupan sehari-hari, kita kadang mengatakan bahwa udara di sekitar kita kering atau lembab. Keadaan ini disebut kelembaban udara. Ketika kelembaban udara ini disebabkan oleh kandungan uap air di udara. Semakin banyak uap air di suatu tempat, semakin lembab udara di tempat tersebut.

Kelembaban udara ini biasanya dinyatakan dengan kelembaban relatif. Bagaimanakah cara menghitung kelembaban relatif? Kelembaban relatif merupakan perbandingan tekanan parsial air terhadap tekanan uap jenuh pada temperatur tertentu.

$$\text{Kelembaban relatif} = \frac{\text{tekanan parsial dari H}_2\text{O}}{\text{tekanan uap jenuh dari H}_2\text{O}} \times 100 \%$$

Kelembaban relatif sebesar 40–50 persen merupakan kelembaban optimum untuk kesehatan dan kenyamanan. Jika kita berada di suatu ruangan yang mempunyai kelembaban tinggi, biasanya pada hari yang panas, akan memperkecil penguapan cairan tubuh. Sementara kelembaban yang rendah dapat menyebabkan efek kekeringan pada kulit dan selaput lendir.

4. Difusi pada Organisme Hidup

Apakah yang dimaksud dengan difusi? **Difusi** merupakan peristiwa Bergeraknya suatu zat dari konsentrasi tinggi menuju konsentrasi rendah. Peristiwa difusi dapat kalian perhatikan ketika meneteskan zat pewarna ke dalam gelas berisi air. Zat pewarna yang mempunyai konsentrasi lebih tinggi daripada konsentrasi air, akan menyebar ke seluruh air, walaupun kalian tidak mengaduk air. Pencampuran ini disebabkan oleh gerakan molekul yang acak.

Difusi dapat juga terjadi dalam gas. Sebagai contoh, asap hasil pembakaran akan menyebar di udara. Jika kita mempunyai ruang tertutup yang berisi gas, maka molekul gas yang mempunyai konsentrasi tinggi akan bergerak menuju konsentrasi rendah. Gerak molekul gas akan berhenti jika konsentrasi di setiap bagian seimbang.

Difusi sangat penting bagi organisme hidup. Misalnya, difusi gas karbon dioksida (CO_2) pada tumbuhan. Kita tahu bahwa tumbuhan membutuhkan CO_2 untuk proses fotosintesis. CO_2 dari luar ini akan berdifusi dari luar daun ke dalam melalui *stomata*. Selain tumbuhan, pada hewan juga terjadi difusi, yakni pertukaran gas oksigen dan gas karbondioksida. Pada proses pernapasan manusia, oksigen dimasukkan ke paru-paru. Oksigen ini berdifusi melintasi jaringan paru-paru dan pembuluh darah.

Peristiwa-peristiwa yang telah dijelaskan di atas, melibatkan gerak molekul gas. Ini berarti, peristiwa tersebut dapat dijelaskan dengan teori kinetik gas.



secure.edventures.com

Gambar 7.9 Pewarna yang diteteskan ke air akan menyebar secara difusi.



photoart 3

Gambar 7.10 Asap hasil pembakaran menyebar di udara.

Uji Kompetensi

1. Berikan contoh peristiwa difusi di sekitar kalian.
2. Jelaskan peristiwa difusi gas karbondioksida dari udara sehingga dapat dimanfaatkan untuk proses fotosintesis.
3. Jelaskan menggunakan teori kinetik gas terjadinya peristiwa-peristiwa berikut.
 - a. Ketika udara dingin, tenggorokan kita terasa kering.
 - b. Ban yang dibiarkan di bawah terik matahari akan meletus.
 - c. Air akan mendidih pada temperatur 100°C jika tekanan udara luar 1 atm. Akan tetapi, di daerah pegunungan, air akan mendidih di bawah temperatur 100°C .
 - d. Air yang dimasak akan lebih cepat mendidih jika panci ditutup rapat, daripada jika dibiarkan terbuka.

Inti Sari

1. Gas ideal adalah gas yang memiliki asumsi-asumsi sebagai berikut.
 - a. Gas ideal terdiri atas partikel-partikel (atom-atom maupun molekul-molekul) dalam jumlah yang besar.
 - b. Ukuran partikel gas dapat diabaikan terhadap ukuran wadah.
 - c. Setiap partikel gas selalu bergerak dengan arah sembarang (acak)

- d. Partikel gas terdistribusi merata pada seluruh ruangan dalam wadah.
 - e. Partikel gas memenuhi Hukum Newton tentang gerak
 - f. Setiap tumbukan yang terjadi adalah lenting sempurna.
2. Besar tekanan gas pada ruang tertutup adalah:

$$P = \frac{Nmv^2}{V}$$

3. Hubungan antara tekanan (P), volume (V), dan temperatur mutlak (T) suatu gas menurut Hukum Boyle-Gay Lussac memenuhi persamaan:

$$PV = NkT \quad \text{atau} \quad PV = nRT$$

4. Kelajuan efektif gas ideal :

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$

5. Teorema Ekuipartisi menyatakan:

“Suatu sistem molekul-molekul gas pada temperatur mutlak T dengan tiap molekul memiliki f derajat kebebasan, rata-rata energi mekanik per molekul \bar{E}_m atau rata-rata energi kinetik permolekul \bar{E}_k adalah

$$\bar{E}_m = \bar{E}_k = f\left(\frac{1}{2}kT\right).”$$

6. Besar energi dalam untuk gas monoatomik ($f = 3$), contohnya: He, Ne, Ar adalah:

$$U = N \bar{E}_k = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT$$

7. Besar energi dalam untuk gas diatomik, seperti H_2 , N_2 , dan O_2 adalah:

$$U = N \bar{E}_k = \frac{5}{2} NkT = \frac{5}{2} nRT$$

Telaah Istilah

Derajat kebebasan Kemampuan molekul untuk memanfaatkan energi

Energi dalam Jumlah energi kinetik seluruh molekul gas yang terdapat dalam wadah tertutup

Energi kinetik Energi yang dimiliki benda karena geraknya

Kelajuan rms Ukuran kelajuan khas dari molekul

Massa atom relatif (Mr) Massa atom yang diukur pada skala relatif dengan rujukan massa atom C^{12} sama dengan 12

Prinsip ekuipartisi energi Prinsip yang menjelaskan

hubungan energi kinetik molekul atau atom dengan derajat kebebasannya

Root means square (rms) Akar rata-rata kuadrat kecepatan

Standard temperatur and pressure (STP) Kondisi pada temperatur $0^\circ C$ dan tekanan 1 atmosfer

Teori kinetik gas Model untuk menggambarkan sifat-sifat gas berdasarkan distribusi kelajuan molekulnya

Tekanan Gaya yang bekerja per satuan luas penampang

Ulangan Harian

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

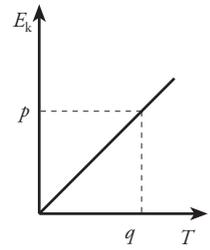
1. Molekul gas nitrogen mempunyai massa empat belas kali massa satu molekul gas hidrogen pada temperatur 322K. Gas nitro-

gen memiliki kecepatan yang sama dengan gas hidrogen pada temperatur. . . .

- a. 4.508 K
- b. 2.254 K
- c. 161 K
- d. 46 K
- e. 23 K

2. Massa jenis suatu gas ideal pada temperatur T dan tekanan P adalah ρ . Apabila tekanan gas tersebut dinaikkan menjadi $2P$ sedangkan suhunya diturunkan menjadi $0,5T$, maka massa jenis gas tersebut menjadi....
- $0,5\rho$
 - ρ
 - 2ρ
 - 4ρ
 - 8ρ
3. Suatu gas ideal dalam ruang tertutup mempunyai suhu 39°C . Energi kinetik partikelnya E_{K0} . Bila energi kinetiknya naik menjadi $3 E_{K0}$, suhunya menjadi....
- 780°C
 - 507°C
 - 234°C
 - 169°C
 - $97,5^\circ\text{C}$
4. Dua buah tabung A dan tabung B berisi gas ideal dan dihubungkan dengan pipa. Volume tabung penghubung dapat diabaikan. Gas A berada pada temperatur 450°C dan gas B berada pada temperatur 150°C . Bila di dalam tabung A terdapat N molekul, dan di dalam tabung B terdapat $3N$ molekul, maka volume gas B adalah
- $0,5 V_A$
 - V_A
 - $2 V_A$
 - $4 V_A$
 - $6 V_A$
5. Molekul suatu gas ideal pada temperatur tertentu mempunyai kelajuan $v_{rms} = v$. Gas tersebut dipanaskan sehingga tekanannya meningkat menjadi enam kali tekanan semula dan volumenya bertambah menjadi dua kali volume semula. Dengan demikian, kelajuan rms molekul-molekul gas menjadi....
- $12v$
 - $6v$
 - $3v$
 - $\sqrt{3}v$
 - $\sqrt{6}v$
6. Balon berbentuk bola dengan volume 4.000 cm^3 , berisi gas helium. Jika tekanan gas Helium $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, dan energi kinetik rata-rata tiap molekul (atom) adalah 4×10^{22} joule, maka di dalam balon terdapat ... partikel Helium.
- 4×10^{24}
 - 3×10^{24}
 - 2×10^{24}
 - $1,33 \times 10^{24}$
 - $0,75 \times 10^{24}$

7. Di samping adalah grafik hubungan energi kinetik rata-rata (E_k) satu molekul gas monoatomik pada temperatur mutlak (T). Berdasarkan grafik tersebut, besar konstanta Boltzman adalah....



- $\frac{2p}{3q}$
 - $\frac{3p}{2q}$
 - $\frac{2q}{3p}$
 - $\frac{3q}{2p}$
 - $\frac{p}{q}$
8. Bila massa jenis suatu gas adalah 2 kg/m^3 dan tekanannya $24 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, kecepatan rata-rata molekul gas tersebut adalah
- 20 m/s
 - 30 m/s
 - 40 m/s
 - 50 m/s
 - 60 m/s
9. Besar energi dalam satu mol gas pada temperatur -73°C adalah
- $2,5 \text{ J}$
 - 25 J
 - $2,5 \times 10^2 \text{ J}$
 - $2,5 \times 10^3 \text{ J}$
 - $25 \times 10^3 \text{ J}$
10. Sebuah tabung berisi 1 mol gas oksigen pada temperatur 427°C . Jika pada temperatur itu oksigen memiliki 7 derajat kebebasan, energi dalam 1 mol gas oksigen adalah.... ($k= 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
- $2,04 \times 10^4 \text{ J}$
 - $20,4 \times 10^4 \text{ J}$
 - $2,04 \times 10^3 \text{ J}$
 - $20,4 \times 10^3 \text{ J}$
 - 204 J
11. Gas hidrogen berada pada temperatur 25°C . Jika diketahui konstanta Boltzman $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ dan massa molekul hidrogen $2,106 \text{ sma}$ ($1 \text{ sma} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$), maka besar energi total rata-rata molekul gas hidrogen tersebut adalah ... J.
- $1,239 \times 10^{-20}$
 - $1,870 \times 10^{-20}$
 - $3,740 \times 10^{-20}$
 - $5,540 \times 10^{-20}$
 - $6,240 \times 10^{-20}$

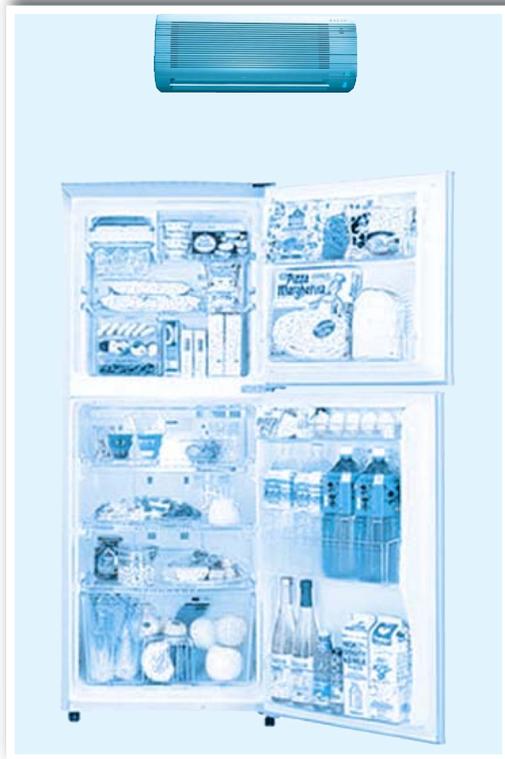
12. Energi dalam dari 0,2 mol gas oksigen di dalam ruangan tertutup yang suhunya 400 K adalah. . . .
 - a. 166,29 J
 - b. 1662,9 J
 - c. 332,5 J
 - d. 4.958,7 J
 - e. 3.325 J
13. Energi dalam dari gas diatomik yang memiliki derajat kebebasan 7 pada temperatur 700 K adalah 34,9 kJ. Jumlah mol gas tersebut adalah. . . .
 - a. 1 mol
 - b. 2 mol
 - c. 3 mol
 - d. 4 mol
 - e. 5 mol
14. Energi kinetik rata-rata suatu gas monoatomik adalah $6,62 \times 10^{-21}$ J, temperatur gas tersebut adalah ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ J)
 - a. 27°C
 - b. 47°C
 - c. 52°C
 - d. 57°C
 - e. 62°C
15. 20 gram gas monoatomik bersuhu 227°C. Diketahui massa molekul relatif gas tersebut 14,01 gram/mol dan $R = 8,314$ J/mol K. Energi total molekul-molekul gas tersebut sebesar
 - a. 89.014 J
 - b. 59.343 J
 - c. 35.901 J
 - d. 8.901,4 J
 - e. 5.934,3 J
5. Gas berada di dalam sebuah ruangan tertutup dengan volume 9 L, suhu 36°C, dan tekanan 5 atm. Kemudian gas dipanasi sampai suhu 76°C, ternyata volumenya berkurang 3 L. Berapa persen pertambahan/pengurangan tekanan gas tersebut?
6. Tentukan besar energi dalam dari 5 mol gas hidrogen (H_2) pada temperatur 700K.
7. Gas hidrogen semula bertekanan 8 atm. Jika $\frac{1}{4}$ bagian massa gas hidrogen keluar, tentukan besar tekanan gas sekarang.
8. Dalam suatu campuran gas pada temperatur 20°C, tekanan masing-masing gas sebagai berikut. Hidrogen 100 mmHg, metana 200 mmHg, karbondioksida 360 mmHg, dan etana 90 mmHg. ($Mr H_2 = 2$; $Mr CO_2 = 44$; Mr metana =16; dan Mr etana = 30). Tentukan tekanan total campuran, dan persentase massa karbon dioksida.
9. Bejana bervolume 2 liter yang dilengkapi kran di tengah-tengah, berisi gas oksigen pada temperatur 300K dan tekanan 1 atm. Sistem dipanasi hingga suhunya menjadi 400K dengan kran terbuka. Kran lalu ditutup dan bejana dibiarkan mendingin kembali sampai temperatur semula. (a) Berapakah tekanan akhir? (b) Berapa gram oksigen yang masih terdapat dalam bejana tersebut?

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

1. Jelaskan karakteristik gas ideal.
2. Sebutkan dan jelaskan hukum-hukum gas ideal.
3. Sebuah tangki berisi gas oksigen dengan massa atom relatif 16 gr/mol. Jika temperatur gas 20°C, tentukan (a) energi kinetik translasi rata-rata setiap molekul, dan (b) kecepatan efektif setiap molekul.
4. Molekul gas argon pada temperatur 10°C mempunyai energi kinetik rata-rata 5.200 joule. Apabila suhunya dinaikkan menjadi 4 kali temperatur semula, hitunglah kenaikan energi rata-ratanya.
10. Sebuah gelembung udara, dengan jari-jari 5 mm terbentuk di dasar telaga pada kedalaman 2 m. Temperatur gelembung tersebut 4°C dan naik ke permukaan air yang suhunya 27°C. Jika temperatur gelembung selalu sama dengan temperatur di sekitarnya, berapakah jari-jari gelembung udara ketika sampai dipermukaan air? (Diketahui tekanan udara luar 1 atm).

B a b VIII

Termodinamika



dok. PIM

AC (*air conditioner*) merupakan alat yang digunakan untuk mengatur suhu ruangan. Dengan menggunakan AC, kita dapat membuat ruangan yang panas menjadi dingin. Alat lain yang serupa dengan cara kerja AC adalah kulkas atau lemari es. Walaupun antara AC dan lemari es memiliki rancangan yang berbeda, namun prinsip kerja keduanya sama. Bagaimanakah prinsip kerja kedua alat tersebut? Dapatkan jawabannya dari uraian materi di bab ini.

Kata Kunci

- Termodinamika
- Kalor
- Sistem
- Kapasitas kalor
- Kalor jenis
- Proses termodinamika
- Energi dalam
- Mesin kalor
- Siklus Carnot

Di kelas X semester 2, kalian telah mempelajari materi Suhu dan Kalor. Sementara pada bab sebelumnya, kalian telah mempelajari materi Usaha dan Energi dan materi Teori Kinetik Gas. Nah, pada di bab ini kita akan mempelajari keterkaitan antara ketiga materi yang telah kita pelajari tersebut, yaitu hubungan suhu atau temperatur gas dengan usaha atau energi.

Dengan mempelajari materi di bab ini, kalian diharapkan mampu menggambarkan perubahan keadaan gas dalam diagram $P - V$. Selain itu, kalian juga mampu memformulasikan Hukum I Termodinamika dan Hukum II Termodinamika, serta mengaplikasikannya pada masalah fisika sehari-hari. Dengan pemahaman terhadap hukum-hukum termodinamika, kalian akan mampu menggambarkan aliran energi pada beberapa alat, yang disebut mesin kalor seperti AC dan lemari es serta beberapa alat lainnya. Selain mesin kalor, kalian juga mengenal mesin Carnot yang bekerja berdasarkan Hukum Termodinamika.

A Kalor, Usaha, dan Hukum I Termodinamika

Sebelum mempelajari materi di bab ini, ada baiknya kalian membuka kembali materi Usaha dan Energi, Teori Kinetik Gas pada bab sebelumnya, dan materi Suhu dan Kalor di kelas X. Untuk membantu kalian dalam mengingat materi tersebut, coba kerjakan *Eureka* berikut.

Eureka

Berdiskusilah dengan teman di samping kalian untuk menemukan jawaban dari pertanyaan-pertanyaan berikut.

1. Adakah perbedaan suhu dan panas (kalor)? Jika ada, dimanakah letak perbedaannya?
2. Bagaimanakah penjelasan Hukum Boyle, Hukum Charles, dan Hukum Gay Lussac tentang gas ideal?
3. Ketika mempelajari teori kinetik gas, kalian telah mengetahui adanya hubungan antara suhu dan energi kinetik gas. Coba kalian jelaskan.
4. Dari materi yang telah dipelajari diketahui bahwa suhu berhubungan dengan energi dan energi berhubungan dengan usaha. Coba jelaskan dengan kata-katamu sendiri hubungan suhu dan usaha.

Konsultasikan hasil diskusi kalian kepada bapak/ibu guru.

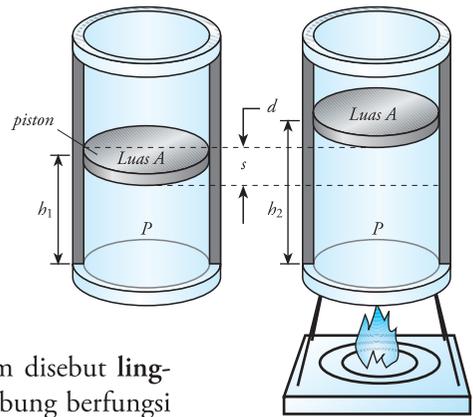
Berdasarkan hasil diskusi yang kalian lakukan, bagaimanakah hubungan suhu/temperatur dan usaha? Untuk mengetahui keterkaitan suhu dan usaha, kita perlu mempelajari Termodinamika yaitu **ilmu yang mempelajari hubungan antara kalor (panas) dengan usaha.**

Ketika mempelajari materi Suhu dan Kalor, kalian telah mengetahui bahwa kalor (panas) disebabkan adanya perbedaan suhu. Kalor akan berpindah dari tempat bersuhu tinggi menuju tempat yang bersuhu rendah. Dengan kata lain, **kalor** merupakan salah satu bentuk perpindahan (transfer) energi.

Ketika mempelajari Usaha dan Energi, kalian mengetahui bahwa usaha merupakan perpindahan energi. Jadi, kalor dan usaha sama-sama menunjukkan perpindahan energi. Bagaimanakah konsep kalor dan usaha menjelaskan perilaku gas? Coba kalian perhatikan Gambar 8.1.

Gambar 8.1 menggambarkan suatu gas yang berada di dalam tabung yang dilengkapi dengan sebuah piston. Sekarang kita tinjau gas di bawah piston, yang kita sebut **sistem**. Dalam termodinamika, **sistem didefinisikan sebagai segala sesuatu atau kumpulan benda yang ditinjau dan diperhatikan**. Sementara segala sesuatu di luar sistem disebut **lingkungan**. Jadi, dari gambar tersebut piston dan dinding tabung berfungsi memisahkan sistem dengan lingkungan.

Ketika tabung dipanaskan sedangkan tekanan udara dijaga tetap, gas akan memuai dan mendorong piston. Ini berarti gas melakukan usaha untuk memindahkan piston. Berapakah usaha yang dilakukan sistem? Simaklah penjelasan selanjutnya.



Gambar 8.1 Kenaikan suhu menyebabkan gas memuai dan piston bergerak ke atas.

1. Hubungan Usaha dan Tekanan

Perhatikan kembali Gambar 8.1. Dalam keadaan normal, piston akan diam pada ketinggian h_1 . Ketika suhu gas di dalam tabung bertambah tinggi, gas akan memuai. Jika tekanan udara luar tetap (tekanan dari atas piston), maka piston akan bergerak akibat pemuaiannya gas, dan piston berada pada ketinggian h_2 . Apakah yang menyebabkan piston bergerak? Jika suhu gas meningkat maka tekanannya pun meningkat. Gerakan piston ini disebabkan oleh gaya tekan gas terhadap piston. Besarnya gaya yang dilakukan gas pada piston dinyatakan dengan persamaan:

$$F = P \times A$$

Keterangan:

P = tekanan gas (N/m^2)

A = luas penampang piston (m^2)

F = besar gaya (N)

Akibat gaya tekan gas, piston bergerak dari posisi h_1 ke posisi h_2 . Ini berarti piston mengalami perpindahan sejauh $h_2 - h_1$. Berdasarkan konsep usaha yang telah kita pelajari, maka besar usaha yang dilakukan gas terhadap piston adalah:

Teropong

Dari bab sebelumnya, kalian telah mempelajari hubungan tekanan dan gaya yang diberikan dengan persamaan

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

$$W = F \cdot s$$

Keterangan:

W = usaha (J)

s = perpindahan piston (m)

$s = h_2 - h_1$

F = gaya tekan pada piston (N)

Dengan mensubstitusikan $s = h_2 - h_1$, kita mendapatkan persamaan:

$$W = F (h_2 - h_1)$$

$$W = PA (h_2 - h_1)$$

Kalian tahu bahwa luas alas (A) dikalian tinggi tabung (h) adalah volume tabung (V). Jadi:

$$W = P (V_2 - V_1)$$

$$W = P \Delta V$$

Keterangan:

P = tekanan gas (N/m^2)

V_2 = volume gas akhir (m^3)

V_1 = volume gas awal (m^3)

Berdasarkan persamaan tersebut, jika $V_2 > V_1$, maka W bernilai positif (+) yang berarti gas (sistem) melakukan usaha terhadap lingkungan. Namun, jika $V_2 < V_1$, maka W bernilai negatif (-) yang berarti pada gas (sistem) dilakukan usaha. Dengan kata lain, jika W negatif berarti sistem menerima usaha dari lingkungan.

Berdasarkan perjanjian tersebut, jika pada gas dilakukan usaha (gas menerima usaha), maka besar usaha yang dilakukan pada gas adalah:

$$W = -P \Delta V$$

Persamaan tersebut adalah persamaan usaha jika tekanan di dalam sistem tidak berubah atau tetap. Akan tetapi, ketika volume sistem berubah, maka tekanannya juga berubah. Pada keadaan seperti ini, kita dapat mencari usaha yang dilakukan pada perubahan volume sangat kecil (dV). Besarnya usaha yang dilakukan sistem untuk mengubah volume sebesar dV adalah:

$$dW = P dV$$

Teropong

Untuk menyelesaikan integral, kita bisa menggunakan persamaan berikut.

$$\int (p t^n) dt = \frac{1}{n+1} p t^{n+1} + C$$

Jika integral dibatasi, maka berlaku persamaan berikut.

$$\int_a^b (p t^n) dt = \frac{1}{n+1} p (b^{n+1} - a^{n+1})$$

Sehingga, usaha yang dilakukan sistem selama proses berlangsung adalah:

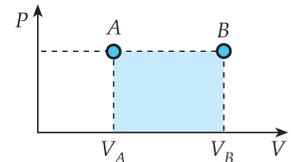
$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Sedangkan usaha yang dilakukan lingkungan pada sistem adalah:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Berdasarkan hubungan tersebut, kita dapat menggambarkan grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V) seperti gambar 8.2. Pada grafik tersebut, usaha pada sistem dinyatakan dengan luas daerah di bawah grafik (daerah yang diarsir).

Perhatikan contoh berikut



Gambar 8.2 Grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V).

Contoh

Gas oksigen sebanyak 0,25 liter di dalam tabung dipanaskan hingga memuai menjadi 0,3 liter. Jika tekanan gas 1 atm, berapakah usaha yang dilakukan gas oksigen tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V_1 = 0,25 \text{ liter} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,3 \text{ liter} = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$P = 1 \text{ atm} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Ditanyakan: W

Jawab:

Untuk menghitung usaha yang dilakukan gas, kita dapat menggunakan persamaan berikut.

$$W = P \Delta V$$

$$W = P (V_2 - V_1)$$

$$= (1 \times 10^5) (3 \times 10^{-4} - 2,5 \times 10^{-4})$$

$$= 5 \text{ J}$$

Jadi, usaha yang dilakukan gas adalah 5 J

Kita telah membahas usaha yang dilakukan sebuah sistem. Lalu, bagaimanakah hubungan usaha dengan kalor?

2. Hukum I Termodinamika

Pada saat membicarakan teori kinetik gas, kalian telah mengenal konsep energi dalam suatu gas yang dipengaruhi suhu gas. Karena dipengaruhi oleh suhu, energi dalam gas disebut juga **energi termal**. Ketika suhu bertambah, energi dalam gas juga bertambah. Bisakah kalian menjelaskan alasannya?

Jika suatu gas dengan volume tetap dipanaskan, maka suhu gas bertambah. Akibat kenaikan suhu ini, molekul-molekul gas bergerak lebih cepat yang mengakibatkan tumbukan antara molekul dengan dinding lebih banyak. Tumbukan ini menyebabkan tekanan gas bertambah. Selain tekanan yang bertambah besar, energi kinetik gas juga meningkat. Dengan pertambahan energi kinetik berarti energi dalam gas juga bertambah.

Mozaiik

Pada abad XIX, seorang saintis, James Prescott Joule menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Energi hanya dapat berubah dari bentuk energi satu ke bentuk energi lainnya. Para saintis menyebutnya sebagai Hukum Kekekalan Energi. Sementara perubahan bentuk energi disebut transformasi energi.

Mozaik

Matahari atau surya dapat dijadikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Karena suhunya yang sangat tinggi, sinar matahari mengandung energi yang besar. Untuk memanfaatkan sinar matahari diperlukan sel surya atau panel surya. Sel surya ini berfungsi menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik, lalu digunakan untuk mengisi baterai.



Microsoft Encarta Premium 2006

Teropong

Dalam soal, jumlah kalor yang diserap terkadang menggunakan satuan kalori. Untuk menyelesaikan soal, kita harus mengubah satuan kalori menjadi Joule.

$$\begin{aligned} 1 \text{ joule} &= 0,24 \text{ kal} \\ 1 \text{ kal} &= 4,2 \text{ Joule} \end{aligned}$$

Untuk menaikkan suhu gas, sehingga mempunyai suhu tertentu, diperlukan sejumlah kalor (Q). Jika sejumlah kalor ditambahkan pada sistem, maka energi kalor akan digunakan untuk melakukan usaha. Namun, tidak semua energi kalor digunakan untuk usaha. Jadi, jumlah kalor yang diterima sistem digunakan untuk menambah energi dalam sistem dan untuk melakukan usaha. **Pemberian kalor pada suatu sistem, akan menambah energi dalam sistem (U).** Banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan energi dalam sebesar ΔU dan melakukan usaha sebesar W dapat dicari dengan persamaan,

$$Q = \Delta U + W$$

Keterangan:

ΔU = perubahan energi dalam sistem (J)

Q = jumlah kalor yang ditambahkan (J)

W = usaha yang dilakukan sistem (J)

Persamaan tersebut merupakan rumusan **Hukum I Termodinamika** yang digunakan **apabila sistem menerima kalor dari lingkungan (Q bernilai positif) dan sistem melakukan usaha (W bernilai positif)**. Namun, bagaimanakah jika sistem memberikan kalor kepada lingkungan dan pada sistem dilakukan usaha (sistem menerima usaha dari lingkungan)? Untuk mencari energi dalam sistem menggunakan hukum termodinamika I, kita mengikuti perjanjian sebagai berikut.

- Jika sejumlah kalor **ditambahkan** pada sistem (kalor **memasuki** sistem), maka Q bernilai **positif** ($+Q$). Sementara, jika sejumlah kalor **dikurangi** (kalor **keluar** dari sistem), maka Q bernilai **negatif** ($-Q$).
- Jika sistem **melakukan usaha**, W bernilai **positif** ($+W$). Sementara jika pada sistem **dilakukan usaha** (sistem **menerima usaha**), W bernilai **negatif** ($-W$).

Perjanjian di atas sangat penting untuk mengerjakan soal yang berkaitan dengan energi dalam suatu sistem. **Berdasarkan persamaan di atas, perubahan energi dalam sistem (ΔU) dinyatakan dengan persamaan berikut.**

$$\Delta U = Q - W$$

Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

1. Suatu gas di dalam ruang tertutup dipanasi sehingga memuai. Akibatnya, gas tersebut melakukan usaha sebesar 200

J. Selama pemuain, gas menyerap kalor sebanyak 300 J. Tentukan kenaikan energi dalam gas.

Penyelesaian:

Diketahui:

$W = 200 \text{ J}$ (melakukan usaha)

$Q = 300 \text{ J}$ (kalor ditambahkan)

Ditanyakan: ΔU

Jawab:

Untuk mencari perubahan energi dalam, gunakan Hukum I Termodinamika.

$$Q = \Delta U + W$$

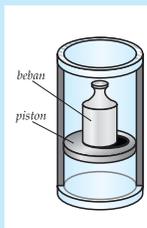
$$\Delta U = Q - W$$

$$= 300 \text{ J} - 200 \text{ J}$$

$$\Delta U = 100 \text{ J}$$

Jadi, energi dalam gas tersebut bertambah sebesar 100 J.

2. Perhatikan gambar di samping. Sebelum piston diberi beban, volume awal gas di dalam tabung adalah 400 cm^3 . Namun, setelah piston diberi beban sebesar 1 kg, volume gas menjadi 300 cm^3 . Jika selama penyusutan dibebaskan kalor sebanyak 2 kalori, dan luas permukaan piston 15 cm^2 , tentukan perubahan energi dalam gas.



Penyelesaian:

Diketahui:

$$V_1 = 40 \text{ cm}^3 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 30 \text{ cm}^3 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m_{\text{beban}} = 1 \text{ kg}$$

$$Q = -2 \text{ kal} = -8,4 \text{ J (kalor keluar)}$$

$$A = 15 \text{ cm}^2 = 1,5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

Ditanyakan: ΔU

Jawab:

Untuk mencari ΔU , terlebih dahulu kita cari usaha pada sistem.

$$W = P \Delta V$$

Besar tekanan (P) dapat dicari dengan persamaan,

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

$$P = \frac{m g}{A}$$

$$= \frac{1 \times 10}{15 \times 10^{-2}}$$

$$= 66,7 \text{ N/m}$$

Jadi,

$$W = P (V_2 - V_1)$$

$$= 66,7(3 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3})$$

$$= -6,67 \times 10^{-2} \text{ J}$$

(tanda negatif menunjukkan sistem menerima usaha)

Perubahan energi dalam gas dicari dengan persamaan:

$$Q = \Delta U + W$$

$$\Delta U = Q - W$$

$$= -8,4 - (-0,667)$$

$$= -9,067 \text{ J}$$

Jadi, perubahan energi dalamnya adalah 9,067 J.

Kalian telah mengetahui bahwa kenaikan suhu memengaruhi tekanan gas (sistem). Untuk menaikkan suhu sistem, kita melibatkan sejumlah kalor. Pertanyaannya sekarang adalah berapa jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu sistem? Kalian akan menemukan jawabannya setelah mempelajari uraian berikut.

3. Kapasitas Kalor dan Kalor Jenis

Banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu gas sebesar satu Kelvin disebut **kapasitas kalor**. Kapasitas kalor disimbolkan dengan huruf C dan mempunyai satuan joule per kelvin (J/K). Kapasitas kalor dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Keterangan:

Q = jumlah kalor yang diterima (J)

ΔT = perubahan suhu gas (K)

C = kapasitas kalor gas (JK^{-1})

Pada bab Teori Kinetik Gas, kalian telah memahami bahwa suhu bergantung pada volume dan tekanan. Artinya, untuk menaikkan suhu pada volume sedikit lebih mudah daripada volume banyak. Demikian juga dengan tekanan. Untuk menaikkan suhu pada tekanan tinggi lebih mudah daripada menaikkan suhu pada tekanan rendah. Hal yang perlu kalian pahami juga bahwa kita bisa membuat salah satu variabel dari tiga variabel (suhu, volume, dan tekanan) tetap. Tetapi kita tidak bisa membuat dua variabel tetap sekaligus.

Ketika kita membuat volume tetap, perubahan suhu akan menyebabkan perubahan tekanan gas. Sementara jika kita mempertahankan tekanan gas agar tetap, kenaikan suhu akan memperbesar volume. Perubahan tekanan dan volume ini menyebabkan kalor yang digunakan untuk menaikkan suhu gas sebesar 1 K juga berubah. Untuk ini didefinisikan dua macam kapasitas kalor sebagai berikut.

a. Kapasitas Kalor pada Volume Tetap (C_v)

Kapasitas kalor pada volume tetap dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta T}$$

Keterangan:

C_v = kapasitas kalor pada volume tetap.

Q_v = jumlah kalor yang ditambahkan

ΔT = perubahan suhu (K)

Kalian telah mengetahui bahwa sistem melakukan usaha jika ada perubahan volume (ΔV). Namun, pada keadaan volume tetap, tidak terjadi perubahan volume ($\Delta V = 0$). Ini berarti usaha yang dilakukan gas sama dengan nol ($W = 0$). Akibatnya, kalor yang diberikan pada sistem (diterima sistem) digunakan untuk menaikkan energi dalam sistem. Jadi, jika volume tetap berlaku persamaan:

$$Q_v = \Delta U$$

Untuk gas monoatomik, perubahan energi dalam gas dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T$$

Sehingga, $Q_v = \frac{3}{2} nR \Delta T$

Berdasarkan persamaan tersebut, kapasitas kalor pada volume tetap (C_v) dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta t}$$

$$C_v = \frac{3}{2} nR$$

b. Kapasitas Kalor pada Tekanan Tetap (C_p)

Kapasitas kalor pada tekanan tetap dirumuskan:

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T}$$

Keterangan:

C_p = kapasitas kalor pada tekanan tetap.

Q_p = jumlah kalor yang ditambahkan

ΔT = perubahan suhu (K)

Jika suatu gas dengan tekanan tetap dipanaskan, volumenya akan bertambah. Ini berarti terjadi perubahan volume, sehingga gas melakukan usaha sebesar W . Jadi, pada gas dengan tekanan tetap, kalor yang diterima digunakan untuk melakukan usaha dan menambah energi dalam gas. Berdasarkan Hukum I Termodinamika, untuk tekanan tetap berlaku persamaan:

$$Q_p = \Delta U + W$$

Untuk gas monoatomik, berlaku persamaan,

$$Q_p = p \Delta V + \frac{3}{2} nR \Delta T$$

$$= nR \Delta T + \frac{3}{2} nR \Delta T$$

Keterangan: Q_p = kalor pada tekanan tetap

T eropong

Pada bab sebelumnya, energi dalam beberapa gas dirumuskan sebagai berikut.

1. Pada gas monoatomik.

$$U = \frac{3}{2} NkT, \text{ sehingga}$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} Nk \Delta T$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T$$

2. Pada gas diatomik (pada suhu sedang 100 K – 5.000 K).

$$U = \frac{5}{2} NkT, \text{ sehingga}$$

$$\Delta U = \frac{5}{2} Nk \Delta T$$

$$\Delta U = \frac{5}{2} nR \Delta T$$

Besar kapasitas kalor pada tekanan tetap, dapat dicari dengan persamaan:

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T}$$
$$C_p = \frac{5}{2}nR$$

Berdasarkan persamaan kapasitas kalor pada volume tetap (C_v) dan kapasitas kalor pada tekanan tetap (C_p), kita mendapatkan persamaan,

$$C_p - C_v = \frac{5}{2}nR - \frac{3}{2}nR$$
$$C_p - C_v = nR$$

Untuk 1 mol gas ($n = 1$) berlaku persamaan:

$$C_p - C_v = R$$

Selain kapasitas kalor, terdapat besaran lain yaitu **kalor jenis**. Kalor jenis didefinisikan sebagai kapasitas kalor per satuan massa. Definisi lainnya kalor jenis diartikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 gram zat sebesar 1 K. **Kalor jenis** disimbolkan dengan huruf c (c kecil), dan mempunyai satuan J/kg K. Secara matematis, kalor jenis dituliskan dalam bentuk:

$$c = \frac{C}{m}$$

Keterangan:

c = kalor jenis (J/kg K)

C = kapasitas kalor (J/K)

m = massa gas (kg)

Dalam membahas gas, satuan massa jarang dipakai. Sebagai gantinya digunakan satuan mol. Untuk itu didefinisikan juga satuan **kalor jenis molar** yang diartikan sebagai **kapasitas kalor tiap mol gas**. Dalam definisi lain, kalor jenis molar didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 mol zat sebesar 1 K. **Kalor jenis molar** disimbolkan dengan c^* (c bintang) dan mempunyai satuan **joule per mol kelvin** (J/mol K). Kalor jenis molar dinyatakan dalam persamaan,

$$c^* = \frac{C}{n}$$

Keterangan:

c^* = kalor jenis molar (J/mol K)

C = kapasitas kalor (J/kg)

n = jumlah mol (mol)

Kalian telah mengetahui bahwa kapasitas kalor ada dua macam yaitu C_v dan C_p . Ini berarti kalor jenis dan kalor jenis molar juga ada dua macam, yaitu **kalor jenis pada volume tetap** (c_v) dan **kalor jenis pada tekanan tetap** (c_p). Demikian juga dengan kalor jenis molar, ada kalor jenis molar pada volume tetap (c_v^*) dan kalor jenis molar pada tekanan tetap (c_p^*). Keempat macam kalor jenis tersebut dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{array}{l} c_v = \frac{C_v}{m} \\ c_p = \frac{C_p}{m} \end{array} \quad \text{dan} \quad \begin{array}{l} c_v^* = \frac{C_v}{n} \\ c_p^* = \frac{C_p}{n} \end{array}$$

Keterangan:

- c_v = kalor jenis pada volume tetap
- C_v = kapasitas kalor pada volume tetap
- c_v^* = kalor jenis molar pada volume tetap
- c_p = kalor jenis pada tekanan tetap
- C_p = kapasitas kalor pada tekanan tetap
- c_p^* = kalor jenis molar pada tekanan tetap

Untuk mempermudah kalian dalam memahami uraian tersebut di atas, perhatikan contoh berikut.

Contoh

Gas N_2 pada suhu rendah mempunyai kapasitas kalor pada tekanan tetap sebesar 1.235 J K^{-1} . Berapakah kapasitas kalor N_2 pada volume tetap?

Penyelesaian:

Diketahui: $C_p = 1235 \text{ J K}^{-1}$

Ditanyakan: C_v

Jawab:

Untuk mencari C_v kita dapat menggunakan persamaan

$$C_p = \frac{5}{2} nR$$

$$nR = \frac{2}{5} C_p$$

$$C_v = \frac{3}{2} nR$$

$$= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{2}{5} C_p\right)$$

$$= \frac{6}{10} (1235 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$$

$$C_v = 741 \text{ J/kgK}$$

Jadi, kapasitas kalor pada volume tetap adalah 741 J/kgK .

Teropong

Di kelas X, kalian telah melakukan percobaan untuk mencari kalor jenis berbagai zat. Alat yang dapat digunakan untuk mencari kalor jenis zat adalah kalorimeter. Cara kerja kalorimeter sesuai dengan asa Black, yang menyatakan bahwa kalor yang dilepas sama dengan kalor yang diterima.

Pada pembahasan subbab sebelumnya, kita telah mempelajari keadaan gas pada volume tetap dan keadaan gas pada tekanan tetap. Selain itu, pada pembahasan gas ideal, kita juga mengenal keadaan gas pada suhu tetap (ingat Hukum Boyle). Keadaan-keadaan tersebut termasuk dalam proses termodinamika. Disebut apakah setiap proses tersebut? Kalian akan mengetahuinya dengan mempelajari materi berikutnya.

4. Proses-proses Termodinamika

Kalian masih ingat persamaan gas menurut Hukum Boyle, Hukum Charles, dan Hukum Gay Lussac? Coba kalian buka kembali materi Teori Kinetik Gas di bab sebelumnya. Boyle, Charles, dan Gay Lussac menyelidiki perilaku gas jika salah satu variabel dibuat tetap. Boyle menyelidiki perilaku gas jika suhunya dibuat tetap. Charles menyelidiki perilaku gas jika tekanan dibuat tetap. Sementara Gay Lussac menyelidiki perilaku gas jika volume dibuat tetap. Untuk mengingat kembali materi pada bab sebelumnya, kerjakan *Ekspedisi* berikut.

Ekspedisi

Kalian telah mempelajari hukum-hukum yang berlaku pada gas ideal di bab sebelumnya. Gambarkan grafik hubungan tekanan (p) dan

volume (V) untuk setiap hukum yang berlaku pada gas ideal. Cocokkan hasilnya dengan hasil teman lain.

Keadaan-keadaan yang dibuat oleh Boyle, Charles, dan Gay Lussac tersebut dapat terjadi dalam proses termodinamika. Secara garis besar, proses-proses termodinamika dibagi menjadi 4 macam, yaitu isotermik, isokhorik, isobarik, dan adiabatik. Bagaimanakah karakteristik keempat proses termodinamika tersebut? Mari kita bahas satu per satu keempat proses tersebut.

a. Proses Isotermik

Kalian masih ingat bunyi Hukum Boyle? Hukum Boyle menyatakan bahwa pada suhu konstan tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya. Keadaan yang sesuai dengan Hukum Boyle disebut isotermik. (Isotermal). Jadi, **proses isotermik adalah proses perubahan keadaan sistem pada suhu tetap**. Menurut Hukum Boyle, pada proses ini berlaku persamaan berikut.

$$P V = \text{konstan}$$

Suhu pada proses isotermik dipertahankan tetap, sehingga $\Delta T = 0$. Dari persamaan $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$, didapatkan $\Delta U = 0$. Berdasarkan persamaan perubahan energi dalam ($\Delta U = Q - W$), didapatkan bahwa usaha yang dilakukan sama dengan jumlah kalor yang diberikan. Jadi, pada proses isotermik berlaku persamaan berikut.

$$\Delta U = 0$$

dan

$$Q = W$$

Jika suhu sistem dijaga konstan, berapa besar usaha yang dilakukan? Pada penjelasan sebelumnya, kita telah mendapatkan persamaan usaha yang dilakukan sistem jika tekanan (P) dan volume (V) berubah setiap saat. Usaha pada keadaan ini dinyatakan dengan persamaan berikut.

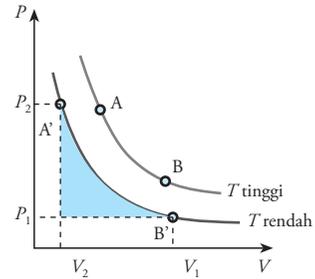
$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Dengan mensubstitusikan persamaan $P = \frac{nRT}{V}$, didapatkan persamaan berikut.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV$$

$$W = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$



Gambar 8.3 Grafik hubungan tekanan dan volume pada proses isothermal.

Grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V) pada proses isotermik dapat kalian lihat pada Gambar 8.3. Dari grafik tersebut, usaha yang dilakukan sistem dinyatakan dengan luas daerah di bawah kurva (daerah yang diarsir).

b. Proses Isokhorik

Setelah membahas proses termodinamika pada suhu tetap, sekarang kita akan membahas proses pada volume tetap. Hukum yang menjelaskan perilaku gas pada volume tetap adalah Hukum Gay Lussac. Menurut hukum Gay Lussac, jika volume dijaga konstan, maka tekanan gas akan berbanding lurus dengan suhu gas. Keadaan gas jika volumenya dibuat tetap disebut **keadaan isokhorik**. Sementara proses perubahan sistem pada volume tetap disebut **proses isokhorik**.

Pada proses isokhorik, sistem tidak mengalami perubahan volume, walaupun sejumlah kalor memasuki atau keluar sistem. Ini memberikan pengertian bahwa sistem tidak melakukan atau menerima usaha. Dengan kata lain, usaha yang dilakukan sistem atau yang dilakukan lingkungan pada sistem sama dengan nol ($W = 0$). Grafik hubungan tekanan dengan volume untuk proses isokhorik dapat kalian lihat pada Gambar 8.4.

Jadi, pada proses isokhorik berlaku persamaan:

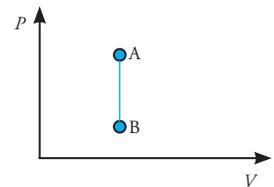
$$W = 0 \quad \text{dan} \quad \Delta U = Q$$

c. Proses Isobarik

Proses isobarik merupakan proses perubahan sistem pada tekanan tetap. Jika sejumlah kalor diberikan kepada sistem dengan tekanan tetap, volumenya akan bertambah seiring pertambahan kalor yang masuk. Ini berarti sistem melakukan usaha. Berdasarkan uraian tersebut, pada proses isobarik berlaku persamaan:

$$W = P \Delta V$$

$$W = P (V_2 - V_1)$$



Gambar 8.4 Grafik hubungan tekanan dan volume pada proses isokhorik

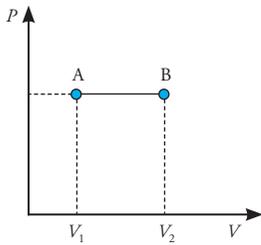
Mozaiik




Upload.wikimedia.org

Boyle dan Gay Lussac adalah ilmuwan fisika yang memberikan gagasan-gagasan dalam teori Termodinamika. Keduanya berhasil merumuskan hukum-hukum yang berkaitan dengan masalah termodinamika.

pelbagai sumber



Gambar 8.5 Grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V) pada proses isobarik.

Perubahan energi dalam sistem dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\Delta U = Q - W$$

Menurut hukum Gay Lussac, pada proses isobarik berlaku

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Berdasarkan persamaan ini, grafik hubungan tekanan dan volume untuk proses isobarik dapat kalian lihat pada Gambar 8.5.

d. Proses Adiabatik

Proses termodinamika selain proses isotermik, isokhorik, dan isobarik adalah proses adiabatik. **Proses adiabatik** adalah proses perubahan sistem tanpa ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem. Walaupun tidak ada kalor yang masuk atau keluar, tetapi suhunya tidak tetap. Proses adiabatik dapat dilakukan dengan cara menutup sistem serapat-rapatnya, sehingga tidak ada pertukaran kalor dengan lingkungan.

Contoh alat yang dapat menjelaskan proses adiabatik adalah termos. Bagian dalam termos terbuat dari selubung kaca yang bagian dalamnya hampa udara. Selubung kaca ini dilapisi dengan lapisan logam yang tipis dengan tujuan untuk memantulkan panas. Dengan konstruksi seperti ini, tidak terjadi pertukaran kalor dengan lingkungan.

Pada proses adiabatik berlaku persamaan:

$$P V^\gamma = C$$

Atau,

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

Selain itu, juga berlaku:

$$\begin{aligned} P_1 V_1^\gamma &= P_2 V_2^\gamma \\ T V^{\gamma-1} &= \text{konstan} \\ T_1 V_1^{\gamma-1} &= T_2 V_2^{\gamma-1} \end{aligned}$$

Dengan,

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Keterangan:

γ = konstanta la place

c_p = kalor jenis pada tekanan konstan

c_v = kalor jenis pada volume konstan

Pada proses adiabatik, tidak ada kalor yang masuk atau keluar. Jadi, pada proses adiabatik berlaku persamaan berikut.



Gambar 8.6 Termos dibuat sedemikian rupa agar tidak terjadi pertukaran kalor antara lingkungan dengan bagian dalam termos.

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -W \quad (\text{sistem melakukan usaha})$$

Besar usaha yang dilakukan sistem dinyatakan dengan persamaan,

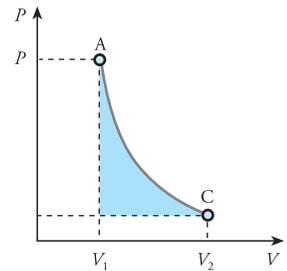
$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (p_1 V_1 - p_2 V_2)$$

$$W = n c_v (T_2 - T_1)$$

$$W = -n c_v (T_1 - T_2)$$

Grafik hubungan tekanan dan volume pada proses adiabatik dapat kalian lihat pada Gambar 8.7. Grafik pada proses adiabatik hampir sama dengan proses isotermik. Hanya saja, pada proses adiabatik grafiknya lebih curam.

Untuk mengenal lebih jauh tentang keempat proses termodinamika tersebut, perhatikan contoh di bawah ini.



Gambar 8.7 Grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V) pada proses adiabatik.

Contoh

1. Pada suatu proses isobarik, 1 mol nitrogen mengalami pemampatan dari 2 liter menjadi 1 liter pada tekanan $2 \cdot 10^5$ Pa. Tentukan usaha yang dilakukan lingkungan pada nitrogen.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V_1 = 2 \text{ liter} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 1 \text{ liter} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Ditanyakan: W

Jawab:

Pada proses isobarik, tekanan gas tetap.

$$W = P \Delta V$$

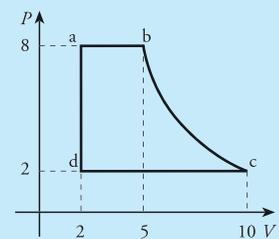
$$= P(V_2 - V_1)$$

$$= 2 \cdot 10^5 (1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3})$$

$$= -2 \cdot 10^2 \text{ J}$$

Jadi, usaha yang dilakukan pada nitrogen adalah 200 J.

2. Perhatikan grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V) di samping. Gambar di samping merupakan proses yang dialami 2 mol gas. Berdasarkan gambar tersebut, hitunglah besar usaha pada setiap proses yang terjadi. Kemudian, tentukan apakah sistem melakukan usaha atau menerima usaha?



Penyelesaian:

Diketahui: lihat gambar

Ditanyakan:

$$W_{ab}, W_{bc}, W_{cd}, \text{ dan } W_{da}$$

Jawab:

Untuk mencari besar W pada setiap proses, kita harus tahu terlebih dahulu proses yang terjadi.

- a. Proses dari a ke b adalah proses isobarik, sehingga W_{ab} dicari dengan persamaan,

$$\begin{aligned}
 W_{ab} &= P \times \Delta V \\
 &= P_2 (V_2 - V_1) \\
 &= 8 (5 - 2) \\
 &= 24 \text{ J}
 \end{aligned}$$

Jadi, pada proses a-b, sistem melakukan usaha sebesar 24 joule.

- b. Proses dari b ke c adalah proses isotermik, sehingga W_{bc} dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 W &= nRT \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) \\
 &= (2 \times (8,314 \times 10^3) \times 300) \ln\left(\frac{10}{5}\right) \\
 &= (4,99 \times 10^6) \times 0,693 \\
 &= 3,46 \times 10^6 \text{ J}
 \end{aligned}$$

Jadi, pada proses b-c, gas melakukan usaha sebesar $3,46 \times 10^6 \text{ J}$.

- c. Proses dari c ke d adalah proses isobarik, sehingga usaha pada sistem dicari dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 W_{cd} &= P \times \Delta V \\
 &= P_1 (V_1 - V_3) \\
 &= 2 (2 - 10) \\
 &= -16 \text{ J}
 \end{aligned}$$

Jadi, pada proses c-d, gas menerima usaha sebesar 16 J.

- d. Proses dari d ke a adalah proses isokhorik. Karena pada gas tidak terjadi perubahan volume, maka usaha pada proses ini adalah nol.

$$W_{da} = 0$$

Nah, mudah kan? Untuk menambah keterampilan kalian, kerjakan Uji Kompetensi di bawah ini.

Uji Kompetensi

- Sebuah piston mempunyai luas penampang $0,2 \text{ m}^2$. Tekanan gas dalam silinder adalah $2 \times 10^5 \text{ Pa}$. Tentukan gaya yang dilakukan gas pada piston.
- Gas oksigen mengalami pemuaian dari 2 liter menjadi 5 liter pada tekanan $1 \times 10^5 \text{ Pa}$. Berapakah usaha yang dilakukan lingkungan pada gas?
- Tentukan besar perubahan energi dalam pada proses berikut.
 - Sistem menyerap kalor sebanyak 200 kalori dan pada saat yang sama melakukan usaha sebesar 400 J.
 - Sistem menyerap kalor sebesar 1.000 joule dan pada saat yang sama, sistem menerima usaha sebesar 450 kalori.
 - Sistem mengeluarkan kalor sebanyak 2.000 kalori pada volume tetap.
- Suatu gas dipanasi sehingga melakukan usaha sebesar 3.000 J. Jika kenaikan energi dalam gas 600 J, tentukan jumlah kalor yang diserap gas.
- Suatu gas mempunyai kapasitas kalor sebesar 60 JK^{-1} . Suhu awal gas tersebut adalah 50°C . Tentukanlah suhu gas tersebut setelah menerima kalor sebesar 360 J.

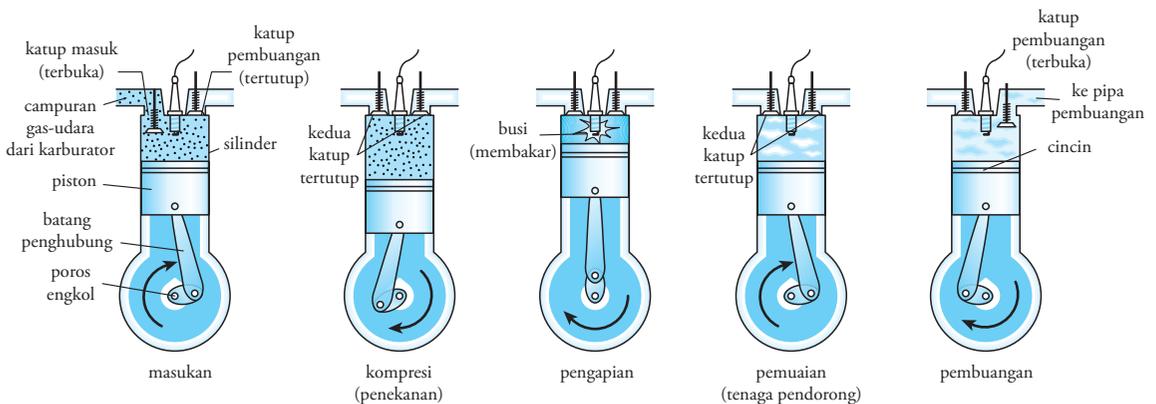
6. Suatu sistem yang terdiri dari 2 mol gas pada tekanan tetap, mengalami kenaikan suhu 30 K. Tentukan:
 - a. kapasitas kalor sistem tersebut pada tekanan tetap,
 - b. usaha yang dilakukan sistem,
 - c. perubahan energi dalam sistem,
 - d. kapasitas kalor sistem pada volume tetap
 - e. kapasitas kalor molar sistem.
7. Tentukan kapasitas kalor molar 16 g oksigen pada tekanan tetap. ($M_r O_2 = 16$)

Kita telah mempelajari proses-proses termodinamika. Suatu sistem dapat mengalami proses-proses termodinamika yang berlangsung secara berurutan dan dapat kembali ke keadaan awalnya. Kejadian ini disebut siklus termodinamika.

B Siklus Termodinamika

Untuk membahas siklus termodinamika, marilah kita tinjau sebuah sistem gas di dalam silinder yang dilengkapi piston. Piston ini dibuat sedemikian rupa, sehingga tidak ada molekul gas yang dapat masuk atau keluar sistem. Jika kita melakukan perubahan pada variabel tekanan, volume, atau suhu, maka keadaan sistem akan berubah. Perubahan keadaan sistem disebabkan oleh usaha yang dilakukan atau diterima sistem. Besar usaha yang dilakukan tergantung pada urutan proses yang dilakukan.

Kalian mungkin pernah mendengar istilah sepeda motor dengan mesin dua langkah atau mesin empat langkah. Langkah-langkah pada mesin tersebut merupakan serangkaian proses termodinamika. Bagaimanakah mesin empat langkah bekerja? Coba kalian perhatikan Gambar 8.8. Cara kerja mesin empat langkah seperti yang ditunjukkan pada gambar tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.



Hewitt, Paul G, 2002, hlm 350

Gambar 8.8 Skema cara kerja mesin empat langkah.

Gambar (a). Bahan bakar dari karburator masuk ke dalam silinder ketika piston turun, yang menyebabkan volume bertambah. Proses ini adalah proses **pemuaian isothermal**. Gambar (b), silinder penuh berisi bahan bakar. Kemudian piston bergerak naik. Karena tidak ada kalor yang masuk atau keluar, maka proses ini termasuk proses **penyusutan adiabatik**. Gambar (c), terjadi penyusutan isothermal, sampai piston menumbuk busi, dan terjadi percikan api. Gambar (d), setelah piston menumbuk busi (pemantik api), terjadi pembakaran bahan bakar. Ini menyebabkan suhu sistem naik. Akibatnya, di dalam silinder terjadi **pemuaian adiabatik**. Gambar (e), terjadi **penyusutan isothermik** dan pembuangan gas dari silinder. Setelah itu, keadaan gas di dalam silinder kembali ke keadaan semula, yaitu gambar (a).

Proses yang terjadi pada mesin empat langkah merupakan salah satu contoh siklus termodinamika. Untuk mencari besar usaha yang terlibat pada siklus termodinamika, marilah kita ambil contoh sederhana.

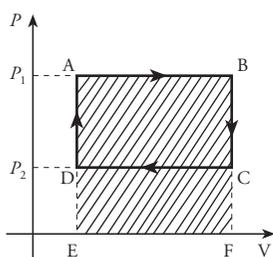
Jika sistem melakukan serangkaian proses, maka usaha yang dihasilkan merupakan jumlah usaha dari beberapa proses yang dilakukan. Perhatikanlah diagram P versus V pada Gambar 8.9. Gambar tersebut merupakan grafik hubungan tekanan dan volume pada suatu siklus termodinamika. Berdasarkan grafik, siklus termodinamika yang terjadi terdiri dari empat proses. Keempat proses tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

Proses I. Proses pemuaian dari A ke B secara isobarik. Pada proses ini, sistem menyerap kalor dari lingkungan sebesar Q_{AB} dan melakukan usaha sebesar W_{AB} . Besarnya usaha ditunjukkan oleh luas daerah ABFE. Sebagian kalor yang diserap digunakan untuk menambah energi dalam sistem, sehingga suhu sistem bertambah. Penambahan suhu ini menyebabkan volume berubah dari V_1 menjadi V_2 . Setelah volume gas mencapai titik maksimal, terjadilah proses II.

Proses II. Akibat penambahan volume, terjadi penurunan tekanan sistem. Jadi proses II merupakan proses penurunan tekanan dari B ke C secara isokhorik. Proses ini berlangsung beberapa saat sehingga suhu sistem menurun. Pada proses ini tidak ada usaha yang terlibat.

Proses III. Akibat penurunan suhu, terjadi proses pemampatan sistem dari C ke D secara isobarik. Pada proses ini, sistem melepas kalor sebesar Q_{CD} dan sistem menerima usaha dari lingkungan (W bernilai negatif) sebesar W_{CD} . Besar W_{CD} dinyatakan oleh luas daerah CDEF. Akibat pelepasan kalor oleh sistem, energi dalam sistem berkurang sehingga suhunya turun.

Proses IV. Penurunan suhu pada proses III akan berhenti sampai sistem mempunyai volume tertentu. Volume ini akan bertahan beberapa saat (isokhorik). Akibat penurunan pada proses III, tekanan sistem akan naik. Jadi, proses IV merupakan proses kenaikan tekanan dari D ke A secara isokhorik. Pada proses ini, sistem tidak melakukan usaha atau menerima usaha ($W = 0$). Kemudian, sistem kembali ke kedudukan semula sambil menyerap kalor dari lingkungan.



Gambar 8.9 Grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V) pada siklus termodinamika.

Serangkaian proses di atas disebut siklus termodinamika.

Siklus termodinamika yaitu serangkaian proses yang membawa sistem kembali ke keadaan semula (keadaan awal).

Berapakah besar usaha yang terlibat pada siklus ini? Usaha yang terlibat dalam satu siklus merupakan jumlah dari usaha pada tiap proses. Jadi usaha total dalam siklus tersebut dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} W_{\text{tot}} &= W_{AB} + W_{BC} + (-W_{CD}) + W_{DC} \\ W_{\text{tot}} &= L_{ABFE} + 0 - L_{CDEF} + 0 \\ W_{\text{tot}} &= L_{ABCD} \\ W_{\text{tot}} &= (P_2 - P_1) (V_2 - V_1) \end{aligned}$$

Berdasarkan penjelasan tersebut, kita tahu bahwa sistem menyerap kalor pada proses I dan proses IV, dan mengeluarkan kalor pada proses II dan III. Jadi:

Jumlah kalor yang masuk sistem adalah

$$Q_{\text{masuk}} = Q_{AB} + Q_{DA}$$

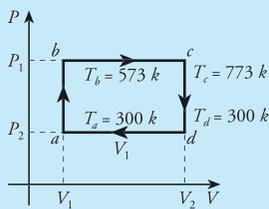
Jumlah kalor yang keluar sistem adalah

$$Q_{\text{keluar}} = Q_{BC} + Q_{CD}$$

Untuk membantu kalian memahami uraian tersebut, perhatikan contoh di bawah ini.

Contoh

Suatu sistem melakukan proses siklus reversibel a-b-c-d-a seperti pada gambar. Jika $C_v = 10 \text{ JK}^{-1}$ dan $C_p = 15 \text{ JK}^{-1}$, tentukan kalor yang masuk ke dalam sistem pada tiap bagian siklus.



Penyelesaian:

Diketahui:

$$C_v = 10 \text{ JK}^{-1}$$

$$C_p = 15 \text{ JK}^{-1}$$

Ditanyakan:

Kalor yang masuk ke dalam sistem (Q) pada tiap bagian siklus

Jawab:

a. Proses a-b merupakan proses isokhorik

$$Q_{ab} = C_v \Delta T_{ab}$$

$$\begin{aligned} &= C_v (T_b - T_a) \\ &= 10 (573 - 300) \\ &= 2.730 \text{ J} \end{aligned}$$

b. Proses b-c merupakan proses isobarik

$$\begin{aligned} Q_{bc} &= C_p \Delta T_{bc} \\ &= C_p (T_c - T_b) \\ &= 15 (773 - 573) \\ &= 3.000 \text{ J} \end{aligned}$$

c. Proses c-d merupakan proses isokhorik

$$\begin{aligned} Q_{cd} &= C_v \Delta T_{cd} \\ &= C_v (T_c - T_d) \\ &= 10 (723 - 773) \\ &= -500 \text{ J} \end{aligned}$$

d. Proses d-a merupakan proses isobarik

$$\begin{aligned} Q_{da} &= C_p \Delta T_{da} \\ &= C_p (T_a - T_d) \\ &= 15 (300 - 723) \\ &= -6.345 \text{ J} \end{aligned}$$

Kalian telah mengetahui bahwa kalor yang masuk ke sistem hanya sebagian yang digunakan untuk melakukan usaha. Sementara sebagian lagi digunakan untuk menambah energi dalam sistem. Sebuah mesin (bisa dianggap sebagai sistem) akan sangat baik jika mampu mengubah semua kalor menjadi usaha. Akan tetapi hal ini sangat sulit dicapai. Perbandingan antara jumlah kalor yang masuk dan usaha yang dilakukan mesin dinyatakan sebagai **efisiensi mesin**.

Bila sistem dianggap sebagai suatu mesin yang mengubah kalor menjadi usaha, efisiensi mesin (η) dinyatakan sebagai perbandingan antara usaha yang dihasilkan mesin dengan jumlah kalor yang diserapnya. Jadi, efisiensi mesin dirumuskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W}{Q} \times 100\%$$

Keterangan:

η = efisiensi mesin (%)

W = Usaha yang dilakukan sistem dalam satu siklus (J)

Q = kalor yang diserap sistem (J)

Kita telah mempelajari hubungan antara kalor, usaha, dan hukum termodinamika. Bagaimanakah penerapan materi yang tersebut dalam kehidupan sehari-hari? Kalian akan mendapatkan jawabannya setelah mempelajari uraian di bawah ini.

C Penerapan Hukum I Termodinamika

1. Mesin Kalor/Mesin Bahang (*Heat Engine*)

Jika kalor yang masuk ke dalam sistem lebih besar daripada kalor yang keluar sistem dan usaha yang dilakukan sistem, maka sistem itu disebut **mesin kalor** (*heat engine*). Mesin ini digunakan untuk menghasilkan usaha yang keluar secara kontinu dengan cara melakukan siklus secara berulang-ulang. Jika Q_1 adalah kalor yang diserap sistem, Q_2 adalah kalor yang dilepas sistem, dan W adalah usaha yang dilakukan sistem (mesin), maka efisiensi mesin dinyatakan dengan persamaan

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{masuk}}} \times 100\%$$

Karena proses ini adalah siklik (proses siklus), maka $\Delta U = 0$. Sesuai dengan hukum I Termodinamika

$$\Delta U = \Delta Q - W$$

$$\text{Dengan, } \Delta Q = Q_{\text{masuk}} - Q_{\text{keluar}}$$

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2$$

$$W = Q_1 - Q_2$$

Sehingga,

$$\eta = \left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

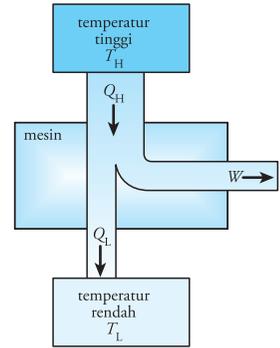
η = efisiensi mesin

Q_1 = jumlah kalor yang masuk (J)

Q_2 = jumlah kalor yang keluar (J)

Prinsip kerja mesin kalor dapat digambarkan seperti gambar 8.10. Dari gambar tersebut, kalor Q_1 yang masuk mesin digunakan untuk melakukan usaha dan menambah energi dalam sistem. Akan tetapi, tidak semua kalor digunakan. Ada sebagian kalor yang dikeluarkan yakni Q_2 .

Transformasi kalor menjadi usaha dapat diperoleh dari dua macam mesin, yaitu mesin bakar eksternal (*external combustion engine*) seperti mesin *Stirling* dan mesin uap, serta mesin bakar internal (*internal combustion engine*) seperti mesin bensin dan mesin diesel.

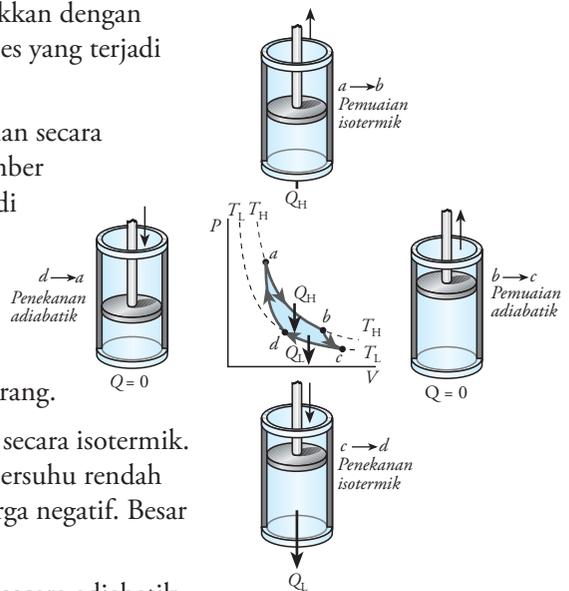


Gambar 8.10 Diagram skematis aliran energi pada mesin kalor.

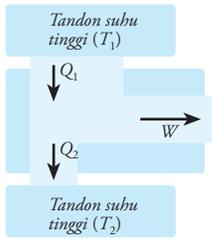
2. Mesin Carnot (Siklus Carnot)

Siklus Carnot merupakan Siklus Carnot ditunjukkan dengan diagram P versus V pada gambar 8.12 di bawah. Proses yang terjadi pada siklus Carnot dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 1) Proses 1, proses dari A ke B, yaitu proses pemuaian secara isotermik. Proses ini menyerap kalor Q_1 dari sumber bersuhu tinggi T_1 dan seluruhnya diubah menjadi usaha sebesar W_1 .
- 2) Proses 2, proses dari B ke C, yaitu pemuaian secara adiabatik. Pada proses ini, sistem tidak menyerap atau melepas kalor, tetapi melakukan usaha sebesar W_1 dan suhunya berkurang.
- 3) Proses 3, proses dari C ke D, yaitu pemampatan secara isotermik. Pada proses ini sistem melepas kalor ke tempat bersuhu rendah T_2 sebesar Q_2 dan melakukan usaha yang berharga negatif. Besar usaha itu W_3 .
- 4) Proses 4, proses dari D ke A, yaitu pemampatan secara adiabatik. Pada proses ini, sistem tidak menyerap atau melepas kalor, tetapi melakukan usaha yang berharga negatif, besarnya W_4 , serta suhu sistem naik.



Gambar 8.11 Grafik hubungan tekanan dan volume pada siklus Carnot.



Gambar 8.12 Diagram aliran energi sistem pada siklus Carnot.

Diagram aliran arus pada sistem ini dapat ditunjukkan seperti Gambar 8.12. Usaha total yang dihasilkan mesin dalam satu siklus adalah

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$$

$$W = Q_1 - Q_2$$

Keterangan:

Q_1 = kalor yang diserap mesin

Q_2 = kalor yang dilepas mesin

Efisiensi mesin Carnot dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\eta = \left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\%$$

Karena besar Q sebanding dengan suhu, maka efisiensi mesin Carnot dapat dicari dengan persamaan,

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

T_1 = suhu pada tandon (reservoir) tinggi

T_2 = suhu pada tandon (reservoir) rendah

Perhatikan contoh berikut.

Mozaik

www.nnbb.com

Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832) seorang ilmuwan Perancis, pada tahun 1824 mengemukakan gagasan tentang mesin ideal secara teori. Mesin ini berdasarkan suatu proses siklik sederhana termodinamika. Gagasan Carnot ini dikenal sebagai siklus Carnot.

Setyawan, Lilik Hidayat, 2004, hlm. 28

Contoh

- Sebuah mesin melakukan usaha sebesar 6.000 J. Kalor yang dibuang mesin ke tandon suhu rendah sebesar 2.000 J. Tentukan:

- kalor yang diserap mesin dari tandon suhu tinggi,
- efisiensi mesin.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$Q_2 = 2.000 \text{ J}$$

$$W = 6.000 \text{ J}$$

Ditanyakan

- Q_1
- η

Jawab:

- Kalor yang diserap mesin dari tandon suhu tinggi di cari dari persamaan:

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$Q_1 = W + Q_2$$

$$Q_1 = 6.000 \text{ J} + 2.000 \text{ J}$$

$$= 8.000 \text{ J}$$

b. Efisiensi mesin di hitung rumus;

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{W}{Q_1} \times 100\% \\ &= \frac{6.000}{8.000} \times 100\% \\ &= 75\%\end{aligned}$$

2. Mesin Carnot bekerja di antara suhu 2.000 K dan 500 K. Jika 1,5 kJ kalor diberikan pada mesin dari tandon bersuhu 2.000 K dalam 1 siklus, tentukan:

- efisiensi mesin
- kalor yang dibebaskan mesin pada saat tandon bersuhu 500 K dalam satu 1 siklus.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$T_1 = 2.000 \text{ K}$$

$$T_2 = 500 \text{ K}$$

$$Q_1 = 1,5 \text{ kJ} = 1.500 \text{ J}$$

Ditanyakan:

- η
- Q_2

Jawab:

a. Efisiensi mesin (η)

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\%$$

$$\begin{aligned}\eta &= \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{500}{2.000}\right) \times 100\% \\ \eta &= 75\%\end{aligned}$$

Jadi, efisiensi mesin Carnot tersebut adalah 75%.

b. Untuk mencari kalor yang dibebaskan mesin, terlebih dahulu kita cari usaha dari persamaan:

$$\eta = \left(\frac{W}{Q_1}\right) \times 100\%$$

$$W = \frac{\eta Q_1}{100\%}$$

$$\begin{aligned}W &= \frac{75}{100} \times 1.500 \text{ J} \\ &= 1.125 \text{ J}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_2 &= Q_1 - W \\ &= 1.500 \text{ J} - 1.125 \text{ J}\end{aligned}$$

$$Q_2 = 375 \text{ J}$$

Jadi, kalor yang dibebaskan mesin adalah 375 J.

3. Mesin Uap

Cara kerja mesin uap didasarkan pada prinsip termodinamika. Prinsip ini menyatakan bahwa ketika uap mengembang (berekspansi), temperturnya menurun dan energi dalamnya berkurang. Pengurangan energi dalam ini disebabkan sebagian diubah menjadi energi gerak dalam bentuk penambahan kecepatan gerak partikel uap yang berarti uap melakukan usaha. Ketika uap berekspansi, pengurangan energi dalam sekitar 1,05 kJ menyebabkan kecepatan partikel uap meningkat sampai 2.900 km/jam. Dengan kecepatan sebesar ini, menyebabkan mesin uap menghasilkan energi yang sangat besar.



Microsoft Encarta Premium 2006

Gambar 8.13 Kereta uap bekerja berdasarkan prinsip termodinamika.

Ketika melakukan kegiatan berarti kita membakar, sejumlah energi di dalam tubuh yang tersimpan dalam timbunan lemak dan otot tubuh. Energi yang dilepaskan ini diubah menjadi panas atau kalor. Sebagian kalor berfungsi untuk menjaga keseimbangan suhu tubuh sehingga dapat bekerja pada suhu yang tepat. Sedang sebagian lagi dibuang.

dari pelbagai sumber

4. Metabolisme Manusia

Manusia dan hewan melakukan kerja. Kerja dilakukan dalam hampir seluruh aktivitas manusia dan hewan. Kerja membutuhkan energi. di dalam tubuh manusia dan hewan terjadi proses perubahan energi. Proses ini disebut metabolisme. Untuk lebih mudahnya kita pakai diri kita, yaitu manusia. Kita dapat menggunakan Hukum I Termodinamika, $\Delta U = Q - W$.

Jika kita melakukan kerja terus-menerus, semakin lama tubuh kita akan lelah. Karena itu perlu tambahan energi agar stamina kita bisa pulih. yang menjadi sumber energi bagi tubuh kita adalah makanan. Akan tetapi energi dalam tubuh kita tidak dipertahankan oleh aliran kalor ke dalam tubuh kita. Pada suatu sistem tertutup, energi dalam berubah sebagai hasil aliran kalor atau usaha yang dilakukan. Pada sistem terbuka, seperti pada hewan, energi dalam dapat mengalir secara bebas, baik ke dalam maupun keluar. Karena itu, ketika suhu lingkungan lebih tinggi dari tubuh, tubuh menyerap kalor dari lingkungan, akan tetapi tubuh tidak menggunakan kalor yang diserap tersebut untuk menunjang proses vitalnya.

Pada saat menyantap makanan, berarti kita memasukkan membawa energi masuk ke dalam tubuh kita, yang kemudian menaikkan energi dalam U pada tubuh. Energi ini digunakan untuk melakukan kerja atau usaha.

Untuk mengetahui sejauh mana kalian menguasai materi di depan, kerjakan *Uji Kompetensi* berikut.

Uji Kompetensi

1. Jelaskan proses-proses yang terjadi pada siklus Carnot.
2. Sebutkan dan jelaskan penerapan Hukum I Termodinamika dalam kehidupan sehari-hari.
3. Jelaskan proses yang terjadi pada mesin empat langkah atau mesin empat tak?
4. Suatu mesin Carnot mempunyai efisiensi 40% jika dipasang pada suhu reservoir tinggi 700 K. Tentukan efisiensi mesin Carnot jika dipasang pada reservoir tinggi 900 K.
5. Sebuah mesin melakukan usaha sebesar 700 kJ. Kalor yang dibuang mesin ke tandon suhu tinggi sebesar 300 kJ. Tentukan:
 - a. kalor yang diserap mesin dari tandon suhu tinggi
 - b. efisiensi mesin.

Hukum I Termodinamika telah kita pelajari. Sekarang marilah kita pelajari Hukum II Termodinamika pada uraian di berikut ini.

D Hukum II Termodinamika

Ketika memegang ujung besi sementara ujung satunya dipanaskan, tangan kita akan terasa panas. Kejadian ini menunjukkan adanya aliran kalor dari ujung besi yang dipanaskan ke ujung besi yang dipegang. Jadi, kalor mengalir dari sistem yang bersuhu tinggi ke sistem yang bersuhu

rendah. Sekarang, ketika kalian memegang salah satu ujung besi sementara ujung satunya dimasukkan ke dalam air es, tangan kita tidak merasa dingin. Kejadian ini menunjukkan bahwa kalor tidak dapat mengalir dari sistem bersuhu rendah menuju sistem bersuhu tinggi. Dua kenyataan ini merupakan salah satu rumusan Hukum II Termodinamika. Untuk mengetahui lebih jauh tentang Hukum II Termodinamika, simaklah penjelasan berikutnya.



Gambar 8.14 Kalor dapat mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah.

1. Hukum II Termodinamika

Di kelas X semester II, kalian telah mempelajari materi Suhu dan Kalor. Salah satu materi yang dipelajari pada bab tersebut adalah **Asas Black**. Menurut Asas Black, kalor berpindah dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu lebih rendah. Ini dapat kita lihat pada kejadian yang telah diterangkan di muka. Asas Black ini sesuai dengan Hukum II Termodinamika.

Hukum II Termodinamika menjelaskan tiga rumusan mengenai perpindahan kalor sebagai berikut.

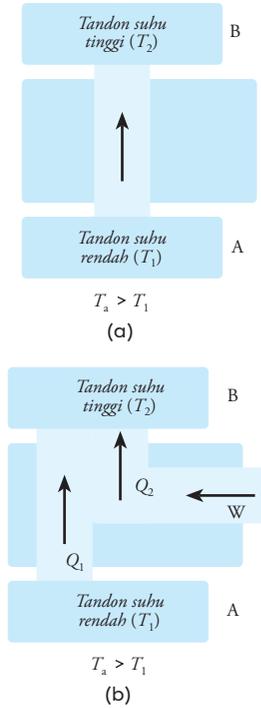
a. Kalor tidak mungkin berpindah dari sistem bersuhu rendah ke sistem bersuhu tinggi secara spontan.

Clausius mempunyai perumusan bahwa tidaklah mungkin memindahkan kalor dari tandon yang bersuhu rendah ke tandon yang bersuhu lebih tinggi tanpa dilakukan usaha.

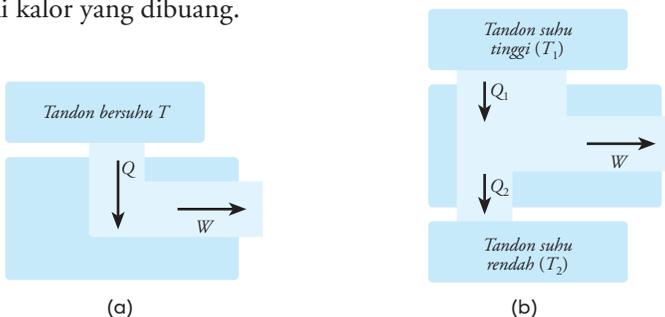
Berdasarkan Gambar 8.15 (a), kalor tidak mungkin pindah dari A ke B tanpa usaha. Jadi untuk memindahkan kalor dari A ke B harus disertai adanya usaha dari luar (Gambar 4.15(b)).

b. Tidak ada mesin yang mengubah seluruh kalor yang masuk menjadi usaha.

Hukum II Termodinamika menurut Kelvin Planck adalah tidak ada mesin yang bekerja dalam satu siklus dapat mengubah kalor menjadi usaha seluruhnya. Gambar 8.16(a) menunjukkan proses yang tidak mungkin terjadi. Sedangkan Gambar 8.16(b) menunjukkan proses mesin mengubah kalor menjadi usaha. Kalor Q_1 sebagian menjadi usaha W dan sisanya Q_2 sebagai kalor yang dibuang.



Gambar 8.15 (a) Tanpa usaha, kalor tidak mungkin berpindah dari tandon suhu rendah ke tandon suhu tinggi. (b) Kalor dapat berpindah dari tandon suhu rendah ke tandon suhu tinggi jika sistem dikenai usaha (sistem menerima usaha).



Gambar 8.16 (a) Keadaan mesin yang tidak mungkin terjadi. (b) keadaan mesin yang dapat terjadi yaitu mengambil kalor dari tandon bersuhu tinggi dan digunakan sebagian untuk usaha, dan sebagian lagi dilepaskan ke tandon bersuhu rendah

Mesin yang bekerja di antara tandon suhu tinggi T_1 dan tandon suhu rendah T_2 mempunyai efisiensi:

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\%$$

- c. **Jika suatu sistem mengalami perubahan secara spontan, maka perubahan akan berarah sedemikian rupa sehingga entropi sistem akan bertambah, atau akan tetap nilainya.**

Entropi (s) merupakan perubahan keadaan pada sistem yang seimbang. Perubahan entropi (Δs) dalam suatu sistem dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta s = \frac{\Delta Q}{T}$$

Mengenai entropi, akan kita bahas lebih jauh pada materi kemudian. Sebelum kita masuk materi entropi, marilah kita bahas terlebih dahulu materi berikut ini.

2. Proses Reversibel dan Irreversibel

Proses *reversibel* disebut pula proses terbalikan. Sementara proses *irreversibel* disebut proses **tak terbalikan**. Untuk memahami arti proses reversibel dan ireversibel, marilah bahas contoh berikut.

Menurut Hukum I Termodinamika, energi bersifat kekal. Dari proses-proses yang telah kita pelajari, ada suatu proses yang memungkinkan suatu sistem mengubah kalor yang diterimanya menjadi usaha seluruhnya. Karena energi bersifat kekal, maka besar Q dapat berubah seluruhnya menjadi usaha W , atau sebaliknya seluruh usaha W dapat berubah menjadi kalor Q . Atau berlaku persamaan

$$\begin{aligned} Q &= W \\ W &= Q \end{aligned}$$

Keterangan:

Δs = perubahan entropi (JK^{-1})

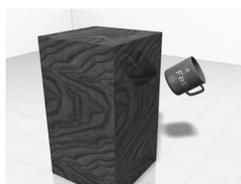
ΔQ = perubahan besar kalor (J)

Namun, menurut Hukum II Termodinamika, kejadian berubahnya usaha oleh sistem menjadi kalor tidak mungkin terjadi. Jadi, kalor dapat berubah menjadi usaha adalah mungkin. Akan tetapi, proses sebaliknya, usaha berubah menjadi kalor tidaklah mungkin terjadi. Kejadian ini merupakan proses *irreversibel*.

Contoh konkret, sebuah gelas jatuh dari atas meja kemudian pecah. Kejadian ini sangat mungkin terjadi. Akan tetapi, kejadian sebaliknya, yaitu pecahan gelas akan bersatu membentuk gelas dan berada di atas meja lagi tidak mungkin terjadi. Inilah contoh proses *irreversibel*. Contoh lain dari proses *irreversibel* adalah jika air panas dicampur dengan air es. Pada



(a)



(b)



(c)

Gambar 8.17 Proses dari a sampai c sangat mungkin terjadi. Akan tetapi, proses sebaliknya dari c ke a tidak pernah terjadi.

peristiwa ini, kalor akan mengalir dari air panas ke air dingin. Akan tetapi proses sebaliknya, kalor mengalir dari air es ke air panas tidak pernah terjadi. Berdasarkan contoh tersebut, apakah pengertian proses *reversibel* dan proses *irreversibel*?

Sekarang, kita tinjau suatu sistem yang terisolasi. Berdasarkan Hukum II Termodinamika, tidaklah mungkin terjadi suatu proses yang akan mengurangi entropi. Misalnya, sistem mengalami proses dengan arah ke kanan. Jika proses itu terjadi disertai kenaikan entropi, maka sesuai dengan hukum I termodinamika, jika terjadi proses sebaliknya (ke kiri) pastilah disertai penurunan entropi. Akan tetapi, menurut hukum II termodinamika, ini tidak mungkin terjadi. Maka proses yang terjadi ke arah kanan adalah proses *irreversibel*. Lain halnya bila pada proses ke kanan itu tidak terjadi perubahan entropi, maka pada proses sebaliknya juga tidak akan terjadi perubahan entropi. Dengan demikian, proses dapat berlangsung ke arah manapun tanpa menyalahi Hukum II Termodinamika. Proses ini disebut *proses reversibel*. Proses *reversibel* adalah proses yang tidak menghasilkan entropi.

3. Perubahan Entropi dalam Proses Reversibel (Pengayaan)

Kalian masih ingat proses adiabatik? Kita tahu bahwa dalam proses adiabatik, $\Delta Q = 0$. Jika proses adiabatik tersebut reversibel, maka perubahan kalor adiabatik reversibel juga nol ($\Delta Q_r = 0$). Oleh karena itu, dalam setiap proses adiabatik reversibel tidak terjadi perubahan entropi ($\Delta S = 0$). Dengan kata lain, entropi tetap.

Sementara itu, dalam proses isothermal reversibel (T konstan), perubahan entropinya dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\Delta S = \int \frac{dQ_r}{T}$$

$$\Delta S = \frac{Q_r}{T}$$

Jika proses terjadi pada volume tetap (C_v), dengan $\Delta Q = C_v \Delta T$, maka perubahan entropinya dinyatakan dengan persamaan,

$$(S_2 - S_1)_v = \int_{T_1}^{T_2} C_v \frac{dT}{T}$$

Jika C_v dianggap tetap, maka:

$$(S_2 - S_1)_v = \Delta S = C_v \ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right|$$

Keterangan:

T_1 = suhu sistem

T_2 = suhu reservoir

Reservoir adalah benda yang suhunya tidak akan berubah walaupun sejumlah kalor mengalir keluar atau masuk ke dalam benda tersebut. Lalu, bagaimanakah perubahan entropi, jika proses terjadi pada tekanan tetap (C_p), dengan $\Delta Q = C_p \Delta T$?

Tips & Trik

- Reversibel: dapat di balik
- Irreversibel: tidak dapat balik.
- Jika entropi (S) dibagi dengan massa m atau jumlah mol (n), menjadi entropi jenis (s)

$$s = \frac{S}{m} \quad \text{atau} \quad s = \frac{S}{n}$$

Jika proses reversibel terjadi pada tekanan tetap, perubahan entropinya adalah sebagai berikut.

$$(S_2 - S_1)_v = \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T}$$

Jika C_p dianggap tetap, maka:

$$(S_2 - S_1)_v = \Delta S = C_p \ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right|$$

4. Perubahan Entropi dalam Proses Ireversibel (Pengayaan)

Perubahan entropi, seperti yang dirumuskan dalam persamaan di depan, $\Delta s = \frac{\Delta Q}{T}$ berlaku untuk proses reversibel. Namun, karena entropi S adalah variabel keadaan, maka nilai perubahannya hanya ditentukan oleh keadaan awal dan akhir proses. Jadi, pada proses ireversibel boleh menggunakan rumus entropi pada proses reversibel, asalkan keadaan awal dan akhir proses ini sama.

Jika proses terjadi pada tekanan tetap C_p , maka:

$$\Delta S_{\text{benda}} = S_2 - S_1 = C_p \ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right|$$

Karena $T_2 > T_1$, maka kalor masuk ke dalam benda, dan $\ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right|$ bernilai positif. Dalam keadaan ini, entropi naik.

Suhu reservoir tetap (T_2), karena itu perubahan entropinya sama dengan perubahan entropi pada proses isotermik reversibel.

$$\Delta S_{\text{reservoir}} = \int \frac{dt}{T_2}$$

$dQ = C_p dT$, sehingga:

$$\Delta S_{\text{reservoir}} = \frac{1}{T_2} C_p \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\Delta S_{\text{reservoir}} = C_p \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Karena kalor keluar dari reservoir, maka:

$$\Delta S_{\text{reservoir}} = -C_p \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Perubahan entropi total adalah:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{benda}} + \Delta S_{\text{reservoir}} = C_p \left(\ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right| - \frac{T_2 - T_1}{T_2} \right)$$

Bagaimanakah Hukum II Termodinamika diterapkan dalam kehidupan sehari-hari? Untuk mengetahuinya, pelajari uraian di bawah ini.

5. Penerapan Hukum II Termodinamika

Penerapan Hukum II Termodinamika dapat kita lihat pada pelbagai produk teknologi, antara lain lemari es dan penyejuk udara (AC). Bagaimanakah Hukum II Termodinamika diterapkan dalam alat-alat tersebut? Mari kita bahas satu per satu.

a. Lemari Es

Salah satu penerapan Hukum II Termodinamika adalah lemari es (*refrigerator*). Prinsip kerja lemari es berdasarkan rumusan Clausius yang menyatakan bahwa untuk memindahkan kalor (Q_1) dari dalam refrigerator yang bersuhu rendah ke refrigerator bersuhu lebih tinggi diperlukan usaha.

Kalian mungkin bertanya-tanya mengapa bagian luar lemari es terasa hangat, padahal di dalamnya dingin. Prinsip kerja lemari es adalah mengambil kalor dari daerah bersuhu dingin (bagian dalam lemari es) dan mengeluarkannya pada daerah bersuhu tinggi (bagian luar lemari es). Untuk mengeluarkan kalor dari tempat bersuhu rendah ke tempat bersuhu tinggi diperlukan usaha (W). Karena bagian dalam kekurangan kalor, maka suhunya akan rendah, sebaiknya bagian luar terasa hangat karena menerima kalor dari dalam. Bagian-bagian lemari es dan skema prinsip kerja lemari es dapat kalian lihat pada Gambar 8.18.

Untuk lemari es atau mesin yang serupa, efisiensi dinyatakan dengan koefisien pendingin (w). Koefisien pendingin dirumuskan sebagai:

$$\eta = \frac{Q_1}{W} \times 100\%$$

Berdasarkan hukum termodinamika, $Q_2 = W + Q_1$, atau

$W = Q_2 - Q_1$. Jadi:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} \times 100\%$$

$$\eta = \left(\frac{Q_1}{Q_2} - 1 \right) \times 100\%$$

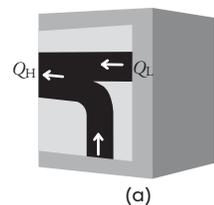
Keterangan:

η = koefisien pendingin

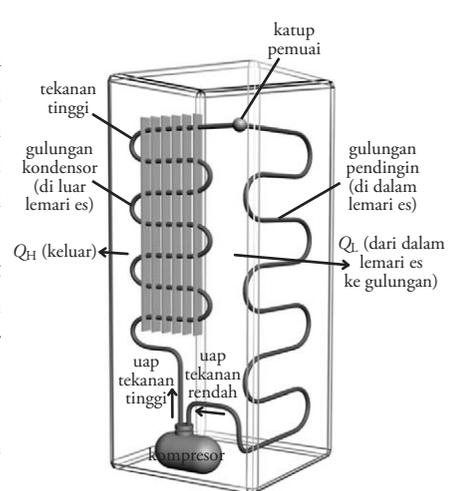
W = usaha luar yang dilakukan pada mesin

Q_1 = jumlah kalor yang diserap dari tandon suhu rendah

Q_2 = jumlah kalor yang dikeluarkan padatandon suhu tinggi



(a)



(b)

Gambar 8.18 (a) Diagram pertukaran kalor pada lemari es. (b) Bagian-bagian lemari es.

Perhatikan contoh berikut.

Contoh

Sebuah refrigerator mempunyai daya 350 W. Jumlah total kalor yang diterima lingkungan $2,5 \times 10^5$ J. Jika koefisien pendingin 40%, tentukan jumlah kalor yang dipindahkan dari dalam refrigerator selama 1 jam.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$P = 350 \text{ W}$$

$$t = 1 \text{ jam} = 3.600 \text{ s}$$

$$Q_2 = 2,5 \times 10^5 \text{ J}$$

Ditanyakan: Q_1

Jawab: Untuk mencari Q_1 kita mencari W terlebih dahulu menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} W &= P \cdot t \\ &= 350 \times 3.600 \\ &= 1,26 \times 10^6 \text{ J} \end{aligned}$$

dari persamaan efisiensi, kita dapat mencari Q_1 dengan rumus:

$$w = \frac{Q_1}{W} \times 100 \%$$

$$40\% = \frac{Q_1}{1,26 \times 10^6} \times 100\%$$

$$Q_1 = 5,04 \times 10^5 \text{ J}$$

Jadi, jumlah kalor yang dipindahkan adalah $5,04 \times 10^5$ J.



Gambar 8.19 Penyejuk ruangan (AC) mengambil kalor dari ruangan bersuhu rendah dan mengeluarkannya pada ruangan bersuhu tinggi.

b. Penyejuk Udara (*Air Conditioner* = AC)

Walaupun bentuk rancangan AC dan lemari es berbeda, namun penyejuk udara atau AC (*air conditioner*) mempunyai cara kerja yang mirip dengan lemari es. AC mengambil kalor dari ruang yang bersuhu rendah untuk dibuang ke lingkungan yang bersuhu lebih tinggi. Rumusan koefisien pendingin pada lemari es di atas juga berlaku untuk AC.

Untuk menambah wawasan kalian tentang hukum-hukum termodinamika, kerjakan *Ekspedisi* dan *Uji Kompetensi* di bawah ini.

Ekspedisi

Dari pelbagai referensi, baik internet, media cetak, atau media lainnya, carilah keterangan sebanyak-banyaknya tentang aplikasi Hukum-hukum Termodinamika dalam pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik

tenaga nuklir (PLTN), pembangkit listrik tenaga panas bumi, pembangkit listrik tenaga pasang surut, dan pembangkit listrik tenaga angin.

Tuliskan hasil penelusuran kalian pada selembar kertas, dan bacakan di depan kelas.

Uji Kompetensi

1. Sebuah sistem menyerap kalor sebesar 5 J pada proses isothermal dengan suhu 27°C . Tentukan perubahan entropi sistem tersebut.
2. Suatu gas mengalami proses isokhorik. Suhu awal gas tersebut 50°C . Setelah menyerap sebesar 100 J suhunya menjadi 55°C . Tentukan perubahan entropi gas tersebut jika jumlah mol gas tersebut adalah 2 mol. Bagaimanakah jika gas tersebut mengalami proses isobarik?

- Tentukan perubahan entropi dari 100 g es batu pada suhu 0°C, jika setelah 15 menit, setengah massa es melebur. Diketahui kalor lebur es 80 kal/g.
- Sebuah refrigerator mempunyai daya sebesar 300 W. Dalam waktu sehari, mesin memindahkan kalor sebesar $3 \cdot 10^8$ J dari dalam refrigerator keluar lingkungan. Hitunglah:
 - jumlah total kalor yang diterima lingkungan,
 - koefisien pendingin refrigerator tersebut.

Inti Sari

- Usaha yang dilakukan gas dinyatakan dengan persamaan:

$$W = P \Delta V$$

- Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa sejumlah kalor yang diterima sistem digunakan untuk menambah energi dalam sistem dan melakukan usaha. Menurut Hukum I termodinamika berlaku persamaan:

$$Q = \Delta U + W$$

- Kapasitas kalor didefinisikan sebagai jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu gas sebesar satu Kelvin.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Kapasitas kalor ada dua macam yaitu:

- Kapasitas kalor pada volume tetap (C_v) yang dirumuskan:

$$C_v = \frac{3}{2} nR$$

- Kapasitas kalor pada tekanan tetap (C_p) yang dirumuskan dengan:

$$C_p = \frac{5}{2} nR$$

- Sebuah mesin kalor mempunyai efisiensi sebesar:

$$\eta = \frac{W}{Q} \times 100\%$$

- Efisiensi mesin Carnot dirumuskan sebagai berikut.

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \times 100\%$$

- Perubahan entropi dalam proses reversibel
 - Jika proses terjadi pada volume tetap (C_v) dan C_v dianggap tetap

$$(S_2 - S_1)_v = \Delta S = C_v \ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right|$$

- Jika proses terjadi pada tekanan tetap (C_p) dan C_p dianggap tetap

$$(S_2 - S_1)_p = \Delta S = C_p \ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right|$$

- Untuk proses irreversibel boleh digunakan rumus untuk proses reversibel, asalkan keadaan awal dan akhir proses ini sama.

Perubahan entropi dalam proses ireversibel.

$$\Delta S_{\text{benda}} = S_2 - S_1 = C_p \ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right|$$

- Perubahan entropi total

$$\Delta S = \Delta S_{\text{benda}} + \Delta S_{\text{reservoir}} = C_p \left(\ln \left| \frac{T_2}{T_1} \right| - \frac{T_2 - T_1}{T_2} \right)$$

Telaah Istilah

Efisiensi mesin Perbandingan antara usaha yang dihasilkan mesin dengan jumlah kalor yang diserapnya

Entropi Perubahan keadaan pada sistem yang seimbang

Kapasitas kalor Jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu gas satu Kelvin

Proses adiabatik Proses perubahan keadaan sistem tanpa ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem

Proses isothermal Proses perubahan keadaan sistem pada suhu tetap

Proses isokhorik Proses perubahan keadaan sistem pada volume tetap

Proses isobarik Proses perubahan keadaan sistem pada tekanan tetap

Proses irreversibel Suatu proses yang tidak dapat balik keadaan awalnya

Proses reversibel Proses yang tidak menghasilkan entropi

Reservoir Benda yang suhunya tidak berubah walaupun sejumlah kalor mengalir keluar atau masuk ke dalamnya

Siklus Proses yang membawa sistem kembali ke keadaan semula (awal)

Termodinamika Ilmu yang mempelajari hubungan antara kalor dengan usaha dan energi

Ulangan Harian

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

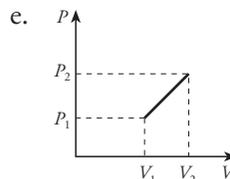
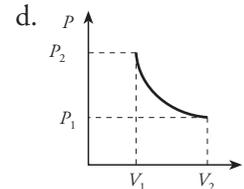
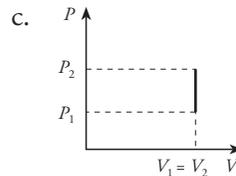
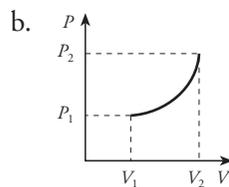
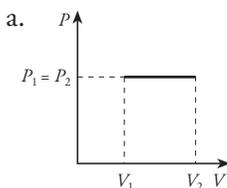
1. Suatu gas ideal yang mengalami proses isobarik, maka:

- (1) suhu gas berubah
- (2) jumlah partikel gas tetap
- (3) tekanan gas tetap

Jawaban yang benar adalah

- a. (1) dan (2)
- b. (1) dan (3)
- c. (2) dan (3)
- d. (2) saja
- e. (1), (2), dan (3)

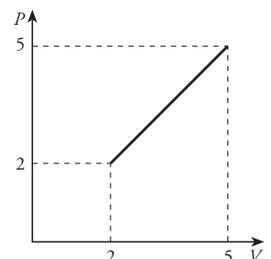
2. Dari diagram-diagram hubungan tekanan P terhadap volume V berikut, proses yang menghasilkan kerja ditunjukkan oleh diagram



3. Untuk menaikkan suhu 3 mol helium sebesar 2°C pada tekanan tetap, diperlukan usaha sebesar ... J. ($R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

- a. 8,310
- b. 16,62
- c. 24,93
- d. 33,24
- e. 49,86

4. Dari diagram hubungan P terhadap V di bawah ini, besar usaha yang dilakukan gas selama proses adalah ... J



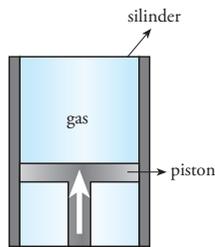
13. Usaha yang dilakukan lingkungan pada suatu gas yang mengalami pemampatan dari 20 m^3 menjadi 15 m^3 pada tekanan 2 atm adalah ... J.

- a. $2,0 \times 10^5$ d. $1,5 \times 10^6$
 b. $2,5 \times 10^5$ e. $2,5 \times 10^6$
 c. $1,0 \times 10^6$

14. Mesin Carnot bekerja di antara suhu 527°C dan 277°C . Jika kalor yang diberikan dari tandon suhu tinggi sebesar 2 kJ, efisiensi mesin adalah ...

- a. 30 % d. 31,25 %
 b. 30,25 % e. 35,01 %
 c. 31,15 %

15. Suatu gas ditekan ke atas sehingga suhunya tetap, sebesar 27°C , seperti ditunjukkan pada gambar. Selama kompresi pada gas telah dilakukan usaha sebesar 650 J. Perubahan entropi yang dialami gas adalah ... J/K



- a. 2,72 d. -2,40
 b. 2,20 e. -2,72
 c. -2,20

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

1. Jelaskan pengertian dari istilah-istilah berikut.

- a. proses isotermik
 b. proses isobarik
 c. proses isokhorik
 d. proses adiabatik

2. Sebutkan dan jelaskan aplikasi Hukum-hukum Termodinamika.

3. Hitunglah usaha yang dilakukan oleh gas yang memuai dari 2 m^3 menjadi 5 m^3 pada tekanan 2 atm.

4. Sebuah piston mempunyai jarak 15 cm dari dasar tabung yang diameternya 6,5 cm. Jika tekanan efektif dalam silinder $0,5 \times 10^6 \text{ Pa}$, berapakah usaha yang di-

lakukan piston sewaktu piston mengalami kompresi sehingga jaraknya menjadi 12,5 cm dari dasar tabung?

5. Gas oksigen bersuhu 37°C dipanaskan secara isobarik sampai suhunya menjadi 370 K pada tekanan 2 atm. Jika diketahui volume gas 2 liter, tentukan usaha luar yang dilakukan gas oksigen tersebut.

6. Sejumlah gas pada tekanan 3 atm dimampatkan secara isotermik pada suhu 25°C sehingga volumenya menjadi 0,25 kali volume semula. Hitunglah tekanan akhir gas.

7. Dalam suatu siklus, sebuah mesin mengambil kalor sebanyak 350 J dari reservoir bersuhu 327°C dan memindahkannya ke reservoir bersuhu 127°C .

- a. Hitunglah efisiensi mesin tersebut.
 b. Usaha yang dilakukan mesin pada satu siklus.

8. Sebuah mesin membakar bensin pada suhu 500 K. Mesin tersebut mempunyai suhu rendah 77°C . Hitunglah efisiensi maksimum mesin tersebut.

9. Sebuah mesin menghasilkan energi sebesar 3.000 J. Dari energi tersebut, seperempatnya dibuang ke berbagai bagan mesin dan sistem pendinginnya. Tentukan:

- a. besar usaha yang dilakukan mesin.
 b. efisiensi mesin.

10.



Gambar di atas menunjukkan bejana yang dibagi 2 bagian dengan volume sama. Kedua bagian tersebut berisi gas yang sama dengan jumlah massa yang sama (1 g). Suhu gas pada bejana panas 77°C , dan bejana yang dingin 10°C . Jika gas di dalam bejana panas suhunya berkurang menjadi 70°C , tentukan perubahan entropi pada gas di dalam bejana panas. (Diketahui: $c_{v(\text{gas})} = 745 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Latihan Ulangan Kenaikan Kelas

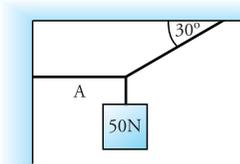
A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- Perbandingan jarak yang ditempuh dengan selang waktu yang dibutuhkan disebut . . .
 - jarak
 - perpindahan
 - kecepatan
 - kelajuan
 - percepatan
- Roni berjalan ke selatan sejauh 30 m, lalu ke timur sejauh 40 m. Perpindahan yang dialaminya adalah . . . m.
 - 30
 - 40
 - 50
 - 60
 - 70
- Seorang tentara meluncurkan roket jarak dekat dari atas tebing dengan ketinggian 125 m pada arah horizontal. Rudal itu meluncur dengan kecepatan awal 50 m/s. Jika percepatan gravitasi sebesar 10 m/s^2 , jarak yang ditempuh rudal dihitung dari dasar tebing adalah . . . m
 - 175
 - 200
 - 250
 - 275
 - 300
- Sebuah yoyo yang dimainkan seorang anak menghasilkan 180 putaran/menit. Frekuensi putaran yoyo sebesar . . . Hz.
 - 180
 - 90
 - 60
 - 20
 - 3
- Sebuah batu di bumi bermassa 1 kg. Jika batu tersebut dibawa ke sebuah planet yang massanya 5 kali massa bumi dan jari-jarinya 2 kali jari-jari bumi, maka berat batu menjadi . . . N
 - 12,5
 - 11,5
 - 10,5
 - 9,5
 - 8,5
- Satuan usaha menurut sistem SI adalah . . .
 - joule
 - newton
 - meter
 - watt
 - hooke
- Seekor kerbau menarik pedati dengan gaya 100 N. Usaha yang dilakukan kerbau saat pedati bergerak sejauh 10 m adalah . . . kJ
 - 1
 - 10
 - 100
 - 1.000
 - 10.000
- Sumber energi yang menghasilkan energi dalam jumlah besar adalah . . .
 - air
 - nuklir
 - cahaya
 - angin
 - panas bumi
- Besarnya energi potensial suatu benda dipengaruhi oleh . . .
 - massa, posisi, dan gravitasi
 - massa, kecepatan, dan gravitasi
 - massa, kecepatan, dan posisi
 - massa, ketinggian posisi, dan kecepatan
 - kecepatan dan massa
- David Beckham menendang bola yang diam, sehingga bergerak dengan kecepatan 20 m/s. Jika massa bola 0,5 kg, besar impuls saat kaki menyentuh bola adalah . . . kg m/s.
 - 40
 - 30
 - 20
 - 10
 - 5
- Pemburu menembak burung dengan senapan seberat 4 kg. Peluru bermassa 25 g dengan kecepatan 50 m/s, kecepatan senapan setelah menembakkan peluru adalah . . .
 - 2 m/s ke belakang
 - 3 m/s ke belakang
 - 2 m/s ke depan
 - 3 m/s ke depan
 - 4 m/s ke depan
- Tumbukan lenting sempurna bila . . .
 - $e = 1$
 - $e < 1$
 - $e > 1$
 - $0 < e < 1$
 - $e = 0$
- Jarak sumbu roda belakang dan roda depan sebuah sepeda motor adalah 1,2 m. Motor tersebut mempunyai massa 150 kg. Jika pusat massa sepeda motor terletak ditengah-tengah antara roda depan dan belakang, beban yang diterima kedua roda adalah . . . N.
 - 1.500
 - 1.200
 - 750
 - 600
 - 300
- Sebuah roda bergigi dengan jari 25 cm dan massa 1 kg berputar dengan kecepatan 300 rpm. Momen inersia roda gigi tersebut adalah . . . kgm^2 .
 - 0,05
 - 0,04
 - 0,03
 - 0,02
 - 0,01

15. Sebuah bola pejal bermassa 0,5 kg dan jari-jarinya 15 cm ditendang hingga berputar dengan kecepatan 60 rpm. Momentum sudut bola tersebut adalah . . . kg rad/s.
- 0,05
 - 0,04
 - 0,03
 - 0,02
 - 0,01
16. Budi mempunyai massa 50 kg dan luas telapak kaki 200 cm^2 . Jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 , tekanan yang diterima lantai di tempat Budi berpijak adalah . . . N/m^2
- 25.000
 - 24.000
 - 23.000
 - 22.000
 - 21.000
17. Jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 dan massa jenis air 1 gram/cm^3 , maka tekanan hidrostatis pada kedalaman 2 m dari permukaan air adalah . . . Pa.
- 5
 - 4
 - 3
 - 2
 - 1
18. Sebuah dongkrak hidrolik terdiri atas dua buah tabung yang saling berhubungan. Diameter salah satu tabung dua kali lebih besar dari tabung lainnya. Perbandingan gaya pada tabung pertama dengan tabung kedua adalah
- 1 : 4
 - 3 : 4
 - 1 : 2
 - 2 : 1
 - 3 : 4
19. Sebuah batu dimasukkan ke dalam gelas yang penuh berisi air. Jika volume air yang tumpah sebesar $0,5 \text{ m}^3$, gaya tekan ke atas yang dialami batu adalah . . . N.
- 4,5
 - 5
 - 5,3
 - 6
 - 7
20. Sebuah batu akan tenggelam jika dimasukkan ke dalam air. Hal ini disebabkan
- $W_{\text{batu}} > F_{\text{atas}}$
 - $W_{\text{batu}} < W_{\text{air}}$
 - $V\rho_{\text{batu}}g = V\rho_{\text{air}}g$
 - $\rho_{\text{batu}} < \rho_{\text{air}}$
 - massa batu < massa air
21. Gaya tarik-menarik antara molekul-molekul yang tidak sejenis disebut
- kohesi
 - adesi
 - radisai
 - ikatan
 - ion
22. Sifat fluida ideal adalah
- volume dapat berubah karena pengaruh tekanan
 - massa jenis dapat berubah karena pengaruh tekanan
 - dapat berpindah tanpa ada gesekan
 - mengalami gesekan saat berpindah
 - garis alir bebas
23. Berat molekul karbon adalah 12 g/mol . Jika bilangan Avogadro (N_A) adalah $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, massa molekul karbon adalah . . . kg.
- 2×10^{-26}
 - 2×10^{-27}
 - 5×10^{-23}
 - 5×10^{-26}
 - 5×10^{-27}
24. Di dalam 8 gram oksigen ($M_{\text{oksigen}} = 16 \text{ g/mol}$) terdapat jumlah atom sebanyak . . . atom
- 12×10^{23}
 - 8×10^{23}
 - 6×10^{23}
 - 3×10^{23}
 - 5×10^{22}
25. Kelajuan rms dari molekul oksigen dalam udara bersuhu 0°C adalah . . . m/s. ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
- 650
 - 651
 - 652
 - 653
 - 654
26. Energi kinetik translasi rata-rata dari suatu molekul gas bermassa m pada suhu T , dan tetapan Boltzmann k adalah
- $\frac{3}{2}kT$
 - $\frac{3}{2m}kT$
 - $\frac{1}{2}mk^2$
 - $\frac{2}{3k}mv^2$
 - $\sqrt{\frac{3kT}{m}}$
27. Suatu gas mempunyai massa jenis sebesar $1,5 \text{ kg/m}^3$ pada temperatur kamar. Laju rms molekul-molekul gas tersebut adalah . . . m/s.
- 459
 - 456
 - 453
 - 450
 - 447
28. Energi kinetik translasi 2 mol gas ideal pada suhu 0°C adalah . . . kJ. ($R = 8,314 \text{ kJ/kmol K}$)
- 7,1
 - 7,0
 - 6,8
 - 6,6
 - 6,0

29. Suatu gas ideal mempunyai massa jenis ρ dan laju rms sebesar v . Tekanan gas tersebut adalah
- a. $\frac{1}{2} \rho v^2$ d. $\frac{1}{3} \rho v^2$
 b. $\frac{1}{3} \rho m v^2$ e. $\frac{1}{3} \rho m v^2$
 c. $\frac{1}{2} \rho v^2$
30. Pada suatu ruang pendingin terdapat 1 atom hidrogen tiap 1 cm^3 udara. Temperatur ruangan tersebut 73°C di bawah nol. Laju rms atom-atom hidrogen yang terdapat dalam ruangan tersebut adalah . . . m/s.
 ($R = 8,314 \text{ kJ/kmol K}$; Ar hidrogen 1 kg/kmol)
- a. $2,2 \times 10^3$ d. $2,5 \times 10^3$
 b. $2,3 \times 10^3$ e. $2,6 \times 10^3$
 c. $2,4 \times 10^3$
31. Pada soal nomor 36, tekanan yang dihasilkan atom hidrogen sebesar
- a. $2,6 \times 10^{-15} \text{ Pa}$ d. $2,7 \times 10^{-15} \text{ Pa}$
 b. $2,6 \times 10^{-16} \text{ Pa}$ e. $2,7 \times 10^{-16} \text{ Pa}$
 c. $2,6 \times 10^{-17} \text{ Pa}$
32. Gas oksigen yang mempunyai Ar = 16 kg/kmol dan gas karbon dengan Ar = 12 kg/kmol berada pada suhu yang sama. Perbandingan energi kinetik oksigen dan karbon adalah
- a. 1,33 d. 0,45
 b. 0,90 e. 1
 c. 0,75
33. Besar usaha yang dilakukan lingkungan terhadap 32 g oksigen ($Mr \text{ O} = 16$) yang mengalami pemampatan dari 30 liter menjadi 20 liter pada tekanan 2 atm adalah . . . kJ.
- a. 2×10^6 d. 1×10^4
 b. 1×10^6 e. 2×10^3
 c. 2×10^4
34. Hukum I Termodinamika menyatakan
- a. kalor yang diterima gas digunakan untuk menambah energi dalamnya
 b. kalor yang dilepas sama dengan kalor yang diterima
 c. usaha yang dilakukan gas digunakan untuk menyerap kalor dari luar
 d. tidak mungkin dibuat mesin yang dapat mengubah seluruh kalor menjadi usaha
 e. seluruh kalor yang masuk ke mesin dapat diubah seluruhnya menjadi usaha
35. Suatu gas di dalam tabung tertutup yang dipanasi mengalami kenaikan energi sebesar 1.000 J. Selama pemuaiian, gas menyerap kalor sebanyak 2.500 J. Usaha luar yang dilakukan gas adalah . . . J
- a. 1.500 d. 4.567
 b. 3.500 e. 5.500
 c. 4.500
36. Kapasitas kalor suatu gas yang mengalami proses isokhorik adalah . . . nR.
- a. $\frac{2}{3}$ d. $\frac{5}{2}$
 b. $\frac{3}{2}$ e. $\frac{3}{5}$
 c. $\frac{2}{5}$
37. Suatu gas memiliki kapasitas kalor pada tekanan tetap sebesar 650 J/kg K . Kapasitas kalor gas pada volume tetap adalah . . . J/kg K.
- a. 370 d. 400
 b. 380 e. 410
 c. 390
38. Mesin carnot bekerja dengan suhu tinggi 60°C dan suhu rendah 30°C . Efisiensi mesin tersebut adalah . . . %.
- a. 60 d. 20
 b. 50 e. 0,5
 c. 30
39. Sebuah mesin menyerap kalor dari tandon suhu tinggi sebesar 26 kJ. Sedangkan kalor yang dibuang ke tandon suhu rendah sebesar 20 kJ. Usaha yang dilakukan mesin dan efisiensi mesin adalah
- a. 8 kJ dan 53 % d. 4 kJ dan 43 %
 b. 6 kJ dan 43 % e. 4 kJ dan 33 %
 c. 6 kJ dan 33 %
40. Sebuah lemari es mempunyai daya sebesar 350 watt. Jika dalam 1 menit, mesin memindahkan kalor sebesar 5 kJ dari dalam lemari es ke lingkungan, berapakah jumlah total kalor yang diterima lingkungan dalam waktu 1 hari?
- a. 507,2 kJ. d. 610,2 kJ.
 b. 508,2 kJ. e. 611,2 kJ.
 c. 509,2 kJ.

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar

- Posisi mobil yang sedang melaju setiap saat ditinjau dari awal gerakannya diberikan dengan persamaan $\vec{r} = (2t^3 + t)\hat{i} + t^3\hat{j}$. Tentukan:
 - persamaan kecepatan dan percepatan mobil.
 - kecepatan dan percepatan mobil saat $t = 2$ s
- Sebuah piringan hitam berputar sebanyak 2 kali tiap detik. Tentukan (a) frekuensi putaran, (b) kecepatan sudut, (c) periode, dan (d) sudut yang ditempuh selama 1 menit.
- Tentukan besar gaya gravitasi bumi dan medan gravitasi bumi yang dialami pesawat bermassa 500.000 ton jika:
 - pesawat berada di permukaan bumi.
 - pesawat berada pada ketinggian 1 kali jejari bumi dari permukaan bumi.
 - pesawat berada pada ketinggian 2 kali jejari bumi dari permukaan bumi. (diketahui jejari bumi = $6,4 \times 10^6$ m dan massa bumi = $5,98 \times 10^{24}$ kg).
- Sebuah benda bermassa 500 gram dijatuhkan dari ketinggian 10 m di atas pegas yang mempunyai konstanta 500 N/m. Jika percepatan gravitasi di tempat tersebut 10 m/s^2 , tentukan:
 - energi potensial gravitasi yang dimiliki benda pada kedudukan semula.
 - pemendekan yang dialami pegas.
 - kecepatan benda saat menyentuh pegas.
 - energi potensial pegas.
- Seorang pemain biliar membidik bola nomor 5. Saat dipukul, bola putih bergerak dengan kecepatan 2 m/s. Jika tumbukan bola putih dengan bola nomor 5 berupa tumbukan lenting sempurna, tentukan kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan.
- Dua orang pesumo mendorong kotak dari arah berlawanan. Pesumo I mendorong ke kanan dengan gaya 350 N, sedangkan pesumo II mendorong kotak ke kiri dengan gaya 360 N, sehingga kotak berpindah 2 m ke kiri. Berapa usaha pesumo I dan II? Berapa pula usaha totalnya?
- Sebuah benda dengan berat 50 N digantung pada tali (lihat gambar di samping). Hitunglah tegangan tali A.
- Jelaskan pengertian dari istilah-istilah berikut.
 - Proses isobarik
 - Proses isokhorik
 - Proses isotermik
 - Siklus carnot
- Afif dan Munir akan menaikkan masing-masing satu kardus buku bermassa 20 kg ke atas mobil bak terbuka. Afif menaikkan kotak ke atas mobil tanpa perantara alat, sedangkan Munir menaikkan kotak dengan papan miring sepanjang 2 m. Apabila ketinggian bak mobil dari tanah adalah 1 m, hitunglah perbandingan usaha yang dilakukan keduanya. ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
- Sebuah beban bermassa 100 gram digantungkan pada pegas. Akibatnya, pegas yang semula mempunyai panjang 5 cm bertambah menjadi 7,5 cm. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan (a) konstanta pegas, (b) usaha yang dilakukan beban, dan (c) energi potensial pegas.
- Di dalam pipa minyak bumi berdiameter 30 cm, minyak bergerak dengan kelajuan 3 m/s. Hitunglah debit minyak yang mengalir tiap detik.
- Gas oksigen ($M_r = 32 \text{ kg/kmol}$) dan gas nitrogen ($M_r = 28 \text{ kg/kmol}$) berada pada temperatur yang sama. Tentukan (a) perbandingan energi kinetik oksigen dengan nitrogen dan (b) perbandingan laju rata-rata oksigen dengan nitrogen.
- Mobil bermassa 1.000 kg bergerak dengan kecepatan 10 m/s. Dari arah berlawanan, mobil bermassa 1.500 kg bergerak dengan kecepatan 8 m/s, sehingga terjadi tabrakan dan kedua mobil bergerak menjadi satu. Tentukan kecepatan kedua mobil setelah tabrakan.
- Jelaskan prinsip Hukum I Termodinamika dan Hukum II Termodinamika.
- Suatu gas ideal berekspansi secara isotermik hingga volumenya menjadi 20 liter. Berapakah usaha yang dilakukan gas tersebut jika volume awal 5 liter dan tekanan awal 2 atm?

Kunci Jawaban

Ulangan Harian Bab I

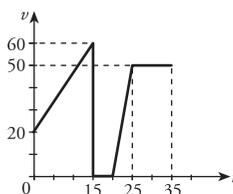
A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. D 9. B 15. C
 3. E 11. E 17. A
 5. D 13. B 19. A
 7. C

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. a. $\vec{r}_0 = -4\hat{i} + 5\hat{j}$ c. $\vec{v} = 4\hat{i} - \frac{10}{3}\hat{j}$
 $\vec{r}_t = 8\hat{i} - 5\hat{j}$ $|v| = \frac{2}{3}\sqrt{61}$

b. $\vec{s} = 12\hat{i} - 10\hat{j}$ d. $v = 0,61 \text{ m/s}$
 $s = 2\sqrt{61}$

3. a.  b. 15.50 WIB
 c. 8,75 km

5. terbukti
 8. a. 6 rad/s^2 d. $t^3 + t^2 + 5t$
 b. 2 rad/s^2 e. 175 rad
 c. 32 rad/s^2
 9. a. $1,08 \pi \text{ rad/s}^2$ c. $10,07 \pi \text{ rad/s}$
 b. $\frac{65}{12} \pi \text{ rad/s}$

Ulangan Harian Bab II

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. A 5. A 9. A 13. C
 3. E 7. C 11. A 15. B

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. $g_{\text{bln}} = 1,63 \text{ m/s}^2 = \frac{1}{6} g_{\text{bumi}}$
 3. $5,147 \times 10^{-10} \text{ N}$
 5. a. $5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
 b. $1,8 \times 10^{-3}$
 c. $2,8 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 7. a. 1 N b. 2 mm

9. a. 0,05 m
 b. 0
 c. 4 detik
 d. $0,025 \pi \cos \frac{1}{2} \pi t$
 e. $-0,0125 \pi^2 \sin \frac{1}{2} \pi t$
 f. 0,986 N/m

Latihan Ulangan Tengah Semester I

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. D 7. D 13. A 17. A
 3. C 9. B 15. C 19. A
 5. D 11. E

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. 52,5 m/s
 3. a. $\sqrt{26} \text{ km/jam}$
 b. 2 km/jam^2
 c. $(2\sqrt{26} - 2\sqrt{5}) \text{ km/jam}$
 d. 2 km/jam^2
 5. a. 33,32 m
 b. 4 detik
 7. a. $4,87 \times 10^6 \text{ N}$ c. $1,09 \times 10^5 \text{ N}$
 b. $3,04 \times 10^5 \text{ N}$
 9. a. $4,8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ c. $4,98 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
 b. 10^{-3}

Ulangan Harian Bab III

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. D 5. A 9. E 13. D
 3. D 7. E 11. E 15. D

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. 0 J
 3. a. 250 N b. $125\sqrt{2} \text{ N}$
 5. a. 1 joule b. 1,25 N/m
 7. Energi tiap bulan = 1,35 kWh
 Biaya 1 bulan = Rp 675,00

9. a. 20 joule c. 20 joule
b. $10\sqrt{2}$ m/s

Ulangan Harian Bab IV

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. C 5. D 9. A 13. E
3. A 7. E 11. B 15. C

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. a. 900 Nm/s c. 900 N/s
b. 450 N
3. a. 1,6 Ns b. 0,064 m/s
5. 0,47 m/s
7. v untuk benda 1 kg = -1,5 m/s
 v untuk benda 2 kg = 2 m/s
9. 19,2 kal

Latihan Ulangan Akhir Semester I

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. C 11. C 21. E 31. D
3. D 13. E 23. C 33. D
5. D 15. B 25. E 35. C
7. A 17. E 27. B 37. C
9. B 19. A 29. A 39. D

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. a. $\vec{v} = 3 + 4t + 15t^2$ c. 4 m/s^2
b. $\vec{a} = 4 + 30t$ d. 64 m/s^2
3. 32 m/s
5. 0,19 N
7. Pegas 1
9. 400 N/m
11. 0,2 m/s
13. $v_1' = 0$
 $v_2' = 2 \text{ m/s}$ searah dengan v_1
15. $v_1' = 60,1 \text{ km/jam}$
 $v_2' = 69,01 \text{ km/jam}$

Ulangan Harian Bab V

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. C 5. E 9. B 13. A
3. C 7. A 11. E 15. D

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. 0,215 m/s
3. 22,5 Nm
5. 5,16 m/s
7. $v_{\text{trans}} = \sqrt{2gh}$
 $v_{\text{gelinding}} = \sqrt{\frac{4}{3}gh}$

Bola yang bertranslasi sampai terlebih dahulu

9. (10 ; 13,82)

Ulangan Harian Bab VI

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. C 5. D 9. A 13. C
3. E 7. C 11. A 15. C

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. Tidak. Semakin ke atas massa jenis udara semakin kecil. Ketika massa jenis udara sama dengan massa jenis balon maka balon tidak bisa naik.
3. 5.115 N/m^2
5. 15 N/m
7. $7,7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$
9. $2,011 \times 10^4 \text{ N/m}$

Latihan Ulangan Tengah Semester II

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. B 7. D 13. C 17. C
3. A 9. A 15. D 19. B
5. C 11. C

B. Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. 3.600 putaran
3. a. $0,02 \text{ kgm}^2$ c. 1,8 m/s
b. 23,4 joule

5. $Z_0(20,20,20)$
7. $3,92 \times 10^3 \text{ N}$
9. $0,4 \text{ m/s}$

● Ulangan Harian Bab VII

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- | | | | |
|------|------|-------|-------|
| 1. C | 5. D | 9. B | 13. D |
| 3. E | 7. D | 11. D | 15. E |

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. a. Gas ideal terdiri dari partikel-partikel yang disebut molekul-molekul dalam jumlah besar.
b. Ukuran partikel gas dapat diabaikan terhadap ukuran wadah.
c. Setiap partikel gas selalu bergerak dengan arah sembarang (acak).
d. Partikel gas terdistribusi merata pada seluruh ruangan dalam wadah.
e. Partikel gas memenuhi hukum newton tentang gerak.
f. Setiap tumbukan yang terjadi (baik tumbukan antar molekul maupun tumbukan molekul dengan dinding) adalah tumbukan lenting sempurna dan terjadi pada waktu yang sangat singkat.
3. a. $6,069 \times 10^{-21} \text{ joule}$
b. $v_{\text{trans}} = 478,54 \text{ m/s}$
5. $69,2 \%$
7. 6 atm
9. a. $1,3 \text{ atm}$
b. $1,5 \text{ liter}$

● Ulangan Harian Bab VIII

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- | | | | |
|------|------|-------|-------|
| 1. E | 5. C | 9. B | 13. C |
| 3. C | 7. C | 11. A | 15. A |

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. a. proses perubahan keadaan sistem pada suhu tetap.

- b. proses perubahan keadaan sistem pada tekanan tetap.
- c. proses perubahan keadaan sistem pada volume tetap.
- d. proses perubahan keadaan sistem tanpa ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem.

3. 600 kJ
5. 30 kJ
7. a. 63%
b. $220,5 \text{ joule}$
9. a. 2.250 joule
b. 75%

● Latihan Ulangan Kenaikan Kelas

A Pilihlah jawaban yang paling tepat.

- | | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 1. D | 11. B | 21. B | 31. A |
| 3. C | 13. C | 23. A | 33. A |
| 5. A | 15. C | 25. A | 35. A |
| 7. A | 17. D | 27. E | 37. C |
| 9. A | 19. B | 29. D | 39. C |

B Jawablah pertanyaan berikut dengan benar.

1. a. $\vec{v} = (4t + 1)\hat{i} + 3t^2\hat{j}$
 $\vec{a} = 4 + 6t$
b. $v = 15 \text{ m/s}$
 $a = 12,65 \text{ m/s}^2$
3. a. $F_g = 4,87 \times 10^9 \text{ N}$
 $g = 9,74 \text{ m/s}^2$
b. $F_g = 1,22 \times 10^9 \text{ N}$
 $g = 2,435 \text{ m/s}^2$
c. $F_g = 5,41 \times 10^8 \text{ N}$
 $g = 1,082 \text{ m/s}^2$
5. $v_{\text{putih}} = 0 \text{ m/s}$
 $v_5 = 2 \text{ m/s}$
7. 500 N
9. $1 : 1$ atau $w_{\text{Afif}} = w_{\text{Munir}}$
11. $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$
13. $8,8 \text{ m/s}$
15. $3,0 \times 10^6 \text{ Ns}$

Indeks

A

Archimedes 208, 215
Hukum Archimedes 198, 208, 214

B

benda tegar 158, 182
Bernoulli, Daniel 226
 asas Bernoulli 198
Boyle 279, 280, 281
 Boyle, Robert 242
Brown, Robert 263

C

Carnot 270, 289, 290, 291, 292, 301, 302
 siklus Carnot 270, 289, 290, 292
Charles 270, 280
 Charles, Jacques 243

D

derajat kebebasan 259, 260, 261, 262, 267, 268
daya 120, 123, 125, 126
Descartes 55

E

Einstein, Albert 263
elastisitas 44, 59, 60, 78, 79
energi 89, 90, 91, 95, 98, 99, 101, 104, 105, 106, 110, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 123, 126
 energi dalam 90
 energi kinetik 95, 101, 105, 106, 110, 113, 114, 123, 124, 126
 energi potensial 95, 98, 99, 101, 105, 106, 110, 113, 114, 120, 123, 125
 equipartisi energi 271
 Hukum Kekekalan Energi 105, 106, 113, 115, 116, 118

F

Faucoult, Leon 76
fluida dinamis 198, 223, 229, 235
 fluida Statis 198, 199, 200, 206, 215, 216, 217, 223

G

gas ideal 240, 247, 248, 249, 262, 267, 268
Gay Lussac 245, 246, 248, 249, 266, 270, 280, 281, 282
 Joseph Louis 246
gerak 2, 3, 10, 11, 13, 16, 19, 22, 23, 24, 28, 30, 31, 32, 40, 41, 42
 gerak harmonis sederhana 75, 76, 77
grafik sinusoidal 71
gravitasi 44, 45, 48, 54, 55, 80
 medan gravitasi 44, 48, 78, 80,

H

Hukum Kontinuitas 198
Hukum Hooke 62
Huygen, Cristian 55

I

impuls 128, 129, 130, 131, 136, 148, 149, 150,

J

Joule, James Prescott 273

K

kalor 244, 270, 271, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 282, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 301
 kalor jenis 270, 275, 278, 279, 282
 kapasitas kalor 275, 276, 277, 278, 279, 284, 285, 299, 300
kecepatan 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 28, 29, 32, 33, 334, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 58, 71, 80
 kecepatan sudut 2, 31, 32, 33, 34, 35, 40, 41, 42, 71, 80

Kepler, Johannes 50

 Hukum Kepler 50

koefisien restitusi 140, 148, 150,

L

lengan gaya 159, 160, 161,

M

mesin kalor 270, 288, 290, 299
modulus elastisitas 44, 59, 60, 79
momentum 128, 129, 132, 133, 134, 137, 144, 148, 149,
 momentum sudut 158, 170, 188, 190, 192
 Hukum Kekekalan Momentum 128, 132, 133, 134, 137, 144
momen gaya 158, 172, 175, 182, 184, 190
momen inersia 158, 170, 178, 188, 190, 192

N

Newton, Sir Isaac 44, 46, 49, 51

P

Pascal, Blaise 206
 Hukum Pascal 198, 199, 206, 207
percepatan 2, 18, 19, 22, 24, 40, 41, 42, 45, 48, 54, 55, 58, 69, 73, 76, 77, 78, 79, 80
 percepatan sudut 30, 31, 35, 40, 41, 42
perpindahan 2, 18, 19, 31, 39
posisi sudut 2, 31, 35, 40, 41, 42

R

rotasi 260, 261

S

sistem 271, 272, 273, 274, 275, 276, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 293, 294, 295, 302

T

tekanan hidrostatik 201, 202, 203, 206, 236,
 teori kinetik gas 270, 273, 276,
 termodinamika 269, 270, 281, 287, 288, 290, 291, 292, 298, 299, 300
 proses termodinamika 270, 279, 280, 281, 283, 285
Torricelli, Evangelista 230
torsi 158, 159, 191, 192
translasi 158, 172, 175, 178, 182, 192
tumbukan 128, 132, 133, 136, 137, 140, 149, 150
 tumbukan lenting sempurna 128, 137, 140
 tumbukan tidak lenting 128, 140

U

usaha 87, 89, 95, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 115, 120, 123, 124

V

vektor posisi 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 34, 39, 41

Daftar Pustaka

- Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP). 2006. *Standar Kompetensi dan Kompetensi Dasar: Mata Pelajaran Fisika Untuk SMA/MA*. Jakarta: BSNP.
- Basar, Khairul dan Novitrian. 2005. *Soal Jawab Fisika Dasar: Mekanika dan Thermofisika*, jilid 1. Jakarta: Salemba Teknika.
- Bridgman, Roger. 2000. *Jendela Iptek: Teknologi*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Bueche, Frederik J. 2005. *Seri Buku Schaum: Teori dan Soal-Soal Fisika*, edisi ke-8. Jakarta: Erlangga.
- Challoner, Jack. 2000. *Jendela Iptek: Energi*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Chew, Charles dan Leong See Cheng. 2001. *Comprehensive Physics For 'O' Level Science*. Singapore: Federal Publication, Ministry of Education.
- Farndon, John dan Ian Graham. 2005. *Seri Pustaka Sains: Menemukan Sains*. Bandung: Pakar Raya.
- Farndon, John. 2005. *Seri Pustaka Sains: Ilmuwan Besar*. Bandung: Pakar Raya.
- Giancoli, Douglas C. 2001. *Fisika*, jilid 1, edisi ke-5. Jakarta: Erlangga.
- _____. 2001. *Fisika*, jilid 2, edisi ke-5. Jakarta: Erlangga.
- Halliday, David dan Robert Resnick. 1995. *Fisika*, jilid 1, edisi ke-3. Jakarta: Erlangga.
- _____. 1995. *Fisika*, jilid 2, edisi ke-3. Jakarta: Erlangga.
- Harian *Kompas*, 27 Agustus 2006.
- Hemera Technologies Inc. 2005. *50,000 Photo Art* (CD). Cambridgeshire: Global Software Publishing Ltd. Program.
- Hewitt, Paul G. 2002. *Conceptual Physics, Ninth Edition*. San Fransisco: Addicon Wesley.
- Jargodzki, Cristopher P dan Franklin Potter. 2005. *Mania Fisika*. Bandung: Pakar Raya.
- Lafferty, Peter. 2000. *Jendela Iptek: Gaya dan Gerak*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Microsoft Encarta Premium 2006 (DVD).
- Oxtoby. 2001. *Prinsip-prinsip Kimia Modern*, jilid 1, edisi ke-4, cet. ke-1. Jakarta: Erlangga.
- Parker, Steve. 2005. *Tanya & Jawab Ensiklopedi Sains & Teknologi*, cet. ke-1. Bandung: Pakar Raya.
- Setyawan, Lilik Hidayat. 2004. *Kamus Fisika Bergambar*. Bandung: Pakar Raya.
- Tong, Chung Kam, dkk. 2001. *Manhattan Physics 2*. Hong Kong: SNP Manhattan Press.
- _____. 2001. *Manhattan Physics 3*. Hong Kong: SNP Manhattan Press.
- Van Cleave, Janice. 2004. *A+ Proyek-Proyek Fisika*. Bandung: Pakar Raya.

- Wiese, Jim. 2004. *Ilmu Pengetahuan Kuno*. Bandung: Pakar Raya.
- _____. 2005. *Sains di Taman Bermain*. Bandung: Pakar Raya.
- _____. 2005. *Sains dalam Sulap*. Bandung: Pakar Raya.
- _____. 2005. *Sains Detektif*. Bandung: Pakar Raya.
- Woodford, Chris. 2006. *Jejak Sejarah Sains: Cahaya*, cet. ke-1. Bandung: Pakar Raya.
- Yahya, Harun. 2003. *Keajaiban Desain di Alam*. Jakarta: Global Media.
- _____. 2003. *Penciptaan Alam Raya*. Jakarta: Global Media.
- Young, Loo Wan, dkk. 2001. *Science in Focus Physics for GCE 'N' Level*. Singapore: Longman.

Sumber Situs Web:

- <http://campus.umr.edu>, 20/08/2006, 09.05 WIB.
- <http://craters.gsfc.nasa.gov>, 18/10/2006, 14.10 WIB.
- <http://encyclopedia.quicksek>, 10/11/2006, 10.05 WIB.
- http://formula1_media.rivals.net, 12/07/2006, 10.10 WIB.
- http://hidrometer_static.howstuffworks.com, 20/10/2006, 08.50 WIB.
- http://joule_th.physik.unifrankfurt.de, 15/09/2006, 09.50 WIB.
- <http://members.aol.com>, 25/08/2006, 11.20 WIB.
- <http://secure.edventures.com>, 21/10/2006, 09.15 WIB.
- <http://upload.wikimedia.org>, 16/09/2006, 11.10 WIB.
- <http://wikimedia.org>, 27/08/2006, 10.45 WIB.
- <http://www.allied2.com>, 10/11/2006, 08.50 WIB.
- <http://www.anbg.gov.au/biography/biog-pics/brown.robert.com>, 21/10/2006, 10.30 WIB.
- <http://www.annekaringlass.com>, 10/09/2006, 08.50 WIB.
- <http://www.canterbury.ac.ne>, 10/11/2006, 09.30 WIB.
- <http://www.explore-st-andrews.com>, 12/09/2006, 10.25 WIB.
- <http://www.gym.vrcz>, 03/11/2006, 11.45 WIB.
- <http://www.honolulumagazine.com>, 10/09/2006, 09.10 WIB.
- <http://www.horaz.com>, 07/11/2006, 10.15 WIB.
- <http://www.indopos.co.id>, 31/10/2006, 11.35 WIB.
- <http://www.inria.fr>, 05/11/2006, 09.30 WIB.
- <http://www.ioncmaste.ca>, 14/09/2006, 13.50 WIB.
- <http://www.kimpraswil.go.id>, 01/11/2006, 08.30 WIB.
- <http://www.mathematik.ch>, 12/11/2006, 09.15 WIB.
- <http://www.moc.noaa.gov>, 14/09/2006, 14.10 WIB.
- <http://www.nnbb.com>, 01/11/2006, 09.05 WIB.
- <http://www.nolimitscoaster.com>, 10/10/2006, 09.30 WIB.
- <http://www.philothek.de>, 02/11/2006, 13.20 WIB.
- <http://www.photo.net>, 12/10/2006, 09.45 WIB.
- <http://www.pilotundluftschiff.de>, 05/11/2006, 10.15 WIB.
- <http://www.pogo.org.uk>, 08/11/2006, 11.20 WIB.
- <http://www.redbrush.org>, 13/10/2006, 11.25 WIB.
- <http://www.sovereign-publications.com>, 07/11/2006, 09.20 WIB.
- <http://www.sportrider.com>, 19/10/2006, 08.40 WIB.
- <http://www.usatoday.com>, 05/11/2006, 09.35 WIB.
- <http://www.weight-lifting-world.com>, 13/10/2006, 10.30 WIB.
- <http://www.wikimedia.org>, 03/11/2006, 10.30 WIB.

Lampiran

Apendiks C

DATA MATAHARI, BUMI, DAN BULAN

Matahari

Massa	$1,99 \times 10^{30}$ kg
Jari-jari	$6,96 \times 10^5$ km
Massa jenis rata-rata	$1,410$ kg/m ³
Gravitasi permukaan	274 m/s ²
Temperatur permukaan	6000 K
Kecepatan radiasi seluruhnya	$3,92 \times 10^{26}$ W

Bumi

Massa	$5,98 \times 10^{24}$ kg
Jari-jari khatulistiwa	$6,378 \times 10^6$ m
	3963 mi
Jari-jari kutub	$6,357 \times 10^6$ m
	3950 mi
Jari-jari sebuah bola yang volumenya sama	3600 mi
Massa jenis rata-rata	5522 kg/m ³
Percepatan gravitasi ^a	$9,80665$ m/s ²

Bulan

	$32,1740$ ft/s ²
Laju lintasan rata-rata	$29,770$ m/s
	$18,50$ mi/s
Laju sudut	$7,29 \times 10^{-5}$ rad/s
Konstanta matahari ^b	1340 W/m ²
Medan magnet (Washington D.C.)	$5,7 \times 10^{-5}$ T
Momen dipol magnet	$8,1 \times 10^{22}$ A.m ²
Atmosfer standar	$1,013 \times 10^5$ Pa
	$14,70$ lb/in. ²
	$760,0$ mm-Hg
Massa jenis udara kering pada STP ^c	$1,29$ kg/m ³
Laju bunyi dalam udara	$331,4$ m/s
Kering pada STP	1089 ft/s
	$742,5$ mi/h

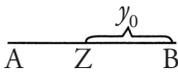
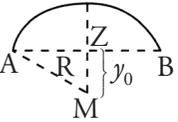
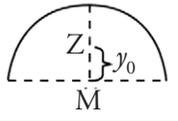
^a Nilai ini, yang disetujui oleh Komite umum mengenai Berat dan Ukuran dalam tahun 1901, mengaproksimasi nilai pada garis lintang 45° di permukaan laut.

^b Ini adalah kecepatan per satuan luas pada mana tenaga surya jatuh, pada arah masuk normal, persis di luar atmosfer bumi.

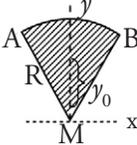
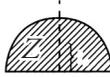
^c STP = temperatur dan tekanan standar (standard temperature)

Tabel Titik Berat Beberapa Benda

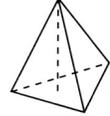
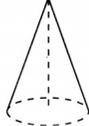
Benda Berbentuk Garis/Busur

Gambar	Nama	Letak titik berat	Keterangan
	Garis lurus	$y_0 = \frac{1}{2} AB$	Z = di tengah-tengah AB
	Busur lingkaran	$y_0 = \frac{\overline{AB}}{\widehat{AB}} \cdot R$	\widehat{AB} = tali busur AB \overline{AB} = busur AB R = jari-jari lingkaran
	Busur setengah lingkaran	$y_0 = \frac{2R}{\pi}$	R = jari-jari lingkaran

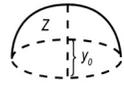
Benda Berbentuk Bidang Homogen

Gambar	Nama	Letak titik berat	Keterangan
	Jaring lingkaran	$y_0 = \frac{\overline{AB}}{AB} \times \frac{2}{3} R$	\overline{AB} = tali busur AB \widehat{AB} = busur AB R = jari-jari lingkaran
	Setengah lingkaran	$y_0 = \frac{4R}{3\pi}$	R = jari-jari lingkaran

Benda Berbentuk Ruang Homogen

Gambar	Nama	Letak titik berat	Keterangan
	Selimut setengah bola	$y_0 = \frac{1}{2} R$	R = jari-jari lingkaran
	Selimut limas	$y_0 = \frac{1}{3} t$	t = tinggi limas
	Selimut kerucut	$y_0 = \frac{1}{3} t$	t = tinggi kerucut

Benda Berbentuk Padat Homogen

Gambar	Nama	Letak titik berat	Keterangan
	Setengah bola	$y_0 = \frac{1}{2} R$	R = jari-jari lingkaran
	Setengah bola	$y_0 = \frac{1}{4} t$	t = tinggi limas
	Kerucut	$y_0 = \frac{1}{4} t$	t = tinggi kerucut

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2007 tanggal 25 Juli 2007 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk Digunakan dalam Proses Pembelajaran.

● Abdul Haris Humaidi
● Maksu

FISIKA

SMAMMA Kelas XI

Phenomenon. Perhatikan alam sekitar. Begitu indah dan teratur. Hukum-hukum fisika mampu menjelaskan fenomena-fenomena itu dengan akurat.

Happen. Setelah memerhatikan alam, biasakan untuk selalu bertanya, *How could it happen?* Bagaimana semua itu terjadi? Pupuklah sikap kritis dengan tak henti bertanya.

Yeach!! Ya, berteriaklah! Ekspresikan kegembiraan kalian, begitu menemukan jawaban atas pertanyaan-pertanyaan yang bergolok dalam pikiran.

Scientific. Peganglah teguh sikap ilmiah, karena dengannya kalian akan menjadi pribadi yang jujur dan adil dalam proses panjang meraih pengetahuan.

Implementation. Implementasikan pengetahuan kalian dalam aktivitas sehari-hari. Dengan demikian, kalian berusaha menempatkan fisika bukan hanya sebagai mata pelajaran sekolah, namun juga sebagai ilmu yang bermanfaat besar bagi kehidupan.

Combat. Bertempurlah! Biasakan diri dengan iklim kompetisi. Dengan begitu, semangat kalian akan senantiasa utuh, tak mudah puas dengan hasil yang telah tercapai.

Scholar. dengan menguasai ilmu pengetahuan dan berpegang teguh pada sikap ilmiah, jadilah *the real scholar*, seorang terpelajar sejati.

ISBN: 978-979-068-802-5 (no jilid lengkap)

ISBN: 978-979-068-806-3

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp16.373,-