Cari

Cari

Aktif Belajar Fisika XI SMA & MA



Aktif Belajar Fisika

Untuk SMA & MA Kelas XI

PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Cari



Panduan Pembelajaran

Fisika

Untuk SMA & MA

Kelas XI

PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta Pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi oleh Undang-Undang

Aktif Belajar Fisika

Untuk SMA & MA

Penulis:
Cari

Editor Ahli:
Suparmi

Editor:
Indah Nugrahaningsih

Setting/Lay Out:
Agung Wigutomo/Sudaryanto

Perwajahan:
Wahyudin Miftakhul Anwar

Ilustrator:
Adi Wahyono

530.07
CAR CARI
a Aktif Belajar Fisika : untuk SMA & MA Kelas XII / penulis, Cari ; editor, Suparmi ; illustrator, Adi Wahyono. — Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
vii, 338 hlm, : ilus. ; 25 cm

Bibliografi : hlm. 331
Indeks
ISBN 978-979-068-798-1 (no jilid lengkap)
ISBN 978-979-068-800-1
1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul
II. Suparmi III. Adi Wahyono

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari Penerbit : CV. Mediatama

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 9 Tahun 2009 tanggal 12 Februari 2009.

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

Buku ini diperuntukkan bagi kalian, siswa SMA/MA agar dapat memahami gejala-gejala fisika. Fisika yang mempelajari gejala-gejala alam selalu berkembang sejalan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Materi fisika disajikan dalam bentuk dialog tentang gejala-gejala fisika, sehingga mendorong kalian untuk melakukan tugas yang mencakup penemuan, dan penyelesaian yang dipesankan dari dialog. Belajar fisika dengan metode ini diharapkan mempermudah memahami konsep fisika dan menghapuskannya dalam kehidupan sehari-hari.

Tujuan utama buku ini adalah agar kalian mengembangkan penalaran melalui situasi yang menantang, dari prinsip yang mendasar menuju ke penyelesaian situasi. Penyelesaian contoh soal disajikan tahap demi tahap, dimulai dari ide utama sampai diperoleh jawaban.

Dalam bab terdapat **kalimat pembuka** yang dapat memotivasi kalian untuk mempelajari materi selanjutnya. **Kegiatan siswa**, sebagai pengantar penemuan konsep atau pembuktian konsep yang ada. **Kisi,** merupakan *fitur* yang menyajikan tentang gejala-gejala, penemuan konsep/teknologi dan ilmuwan fisika. **Kreasi fisika,** merupakan *fitur* yang "menghasilkan" sesuatu berdasar hukum fisika. **Brilian** menghantarkan kalian membuktikan hukum-hukum fisika yang ada dan memotivasi kalian untuk menerapkan hukum-hukum tersebut. **Gambar ilustrasi** yang memudahkan kalian mempelajari konsep-konsep fisika. Pada akhir bab terdapat uji kompetensi untuk melatih kemampuan akademik dan personal kalian.

Ucapan terima kasih yang sebesar-sebesarnya ditujukan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian buku ini. Kepada guru-guru fisika, senantiasalah menyampaikan materi dengan melibatkan siswa secara aktif.

Kritik dan saran sangat kami nantikan dalam upaya perbaikan buku ini pada edisi mendatang.

Surakarta, Mei 2007

Penulis

Daftar Isi

Katalog dalam Terbitan (KTD) ii
Kata Sambutan iii
Kata Pengantar iv
Daftar Isi v

Bab I Analisis Gerak dengan Vektor 1

A. Review Gerak dalam Satu Dimensi 2
B. Gerak dalam Dua atau Tiga Dimensi 12
C. Gerak Peluru 19
D. Gerak Melingkar Beraturan 25
Uji Kompetensi 34

Bab II Gerak Planet 39

A. Kehebatan Teori Kosmologi Klasik 40
B. Aplikasi Hukum Newton (Hukum Gravitasi) 44
C. Peluncuran Roket 49
D. Sistem Tata Surya 53
Uji Kompetensi 67

Bab III Hukum Hooke dan Elastisitas 73

A. Modulus Young (Tegangan dan Regangan) 77
B. Hubungan Tegangan dan Regangan 81
C. Kompresi 82
D. Gaya Geser (*Shear*) dan Gaya Torsi 82
E. Modulus Bulk 84
F. Susunan Pegas 84
Uji Kompetensi 89

Bab IV Gerak Osilasi 93

A. Gerak Harmonik Sederhana 96
B. Energi Gerak Harmonik Sederhana 104
C. Ayunan Sederhana (Bandul Matematis) 109
D. Gerak Osilasi Teredam 111
E. Resonansi 116
Uji Kompetensi 114

Bab V Kerja dan Energi 123

A. Kerja dengan Gaya Konstan 124
B. Kerja yang Dilakukan oleh Sebuah Gaya yang Berubah-ubah 128

C. Kerja dan Energi Kinetik 131
D. Daya 133
E. Kerja dan Energi Potensial 135
F. Energi Potensial Gravitasi menurut Hukum Gravitasi Newton 138
G. Gaya Konservatif dan Gaya Nonkonservatif 139
H. Hukum Kekekalan Energi 141
I. Hubungan Usaha, Energi Kinetik dan Energi Potensial Benda yang Dipengaruhi Gaya Gesek 153
Uji Kompetensi 157

Bab VI Momentum dan Tumbukan 163

A. Gaya dan Momentum 166
B. Impuls 169
C. Kekekalan Momentum Linier 172
D. Hukum Kekekalan Momentum pada Tumbukan 175
E. Tumbukan Elastis dan Tidak Elastis 175
F. Energi dan Momentum pada Tumbukan Elastis 176
G. Energi dan Momentum pada Tumbukan Tidak Elastis 180
H. Tumbukan dalam Dua Dimensi 182
I. Pusat Massa 184
J. Gerak Sistem Partikel 188
Uji Kompetensi 192

Latihan Ulangan Semester I 199

Bab VII Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar . 207

A. Rotasi dan Translasi Benda Tegar 208
B. Torsi, Kesetimbangan, dan Stabilitas 209
C. Dinamika Rotasi 220
D. Energi Kinentik dan Kerja pada Gerak Rotasi .. 229
E. Momentum Sudut 230
Uji Kompetensi 239

Bab VIII Fluida 245

A. Tekanan dan Prinsip Pascal 246
B. Prinsip Archimedes 254
C. Tegangan Permukaan dan Kapilaritas 259
D. Adhesi dan Kohesi 262
E. Dinamika Fluida dan Persamaan Bernoulli 266

F. Viskositas, Hukum Poiseuille, dan Bilangan Reynolds 274
Uji Kompetensi 282

Bab IX Teori Kinetik Gas 289

A. Ciri-ciri Gas Ideal 290
B. Tinjauan Suhu secara Molekuler 294
C. Hukum Pertama Termodinamika 296
D. Aplikasi Hukum I Termodinamika 296
E. Mesin Panas dan Mesin Pendingin 300
F. Siklus Carnot 305
G. Kapasitas Panas untuk Gas Ideal 308
H. Proses Adibatik untuk Gas Ideal 311
Uji Kompetensi 314

Latihan Ulangan Semester II 319
Glosarium 329
Daftar Pustaka 329
Indeks 331
Lampiran 335
Kunci 337

Bab I

Analisis Gerak dengan Vektor

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menganalisis gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola dengan menggunakan vektor.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Kecepatan
2. Percepatan
3. Waktu
4. Vektor

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:

1. Gerak lurus
2. Gerak melingkar
3. Gerak parabola

Dunia yang kita tempati dan sesuatu yang ada di dalamnya selalu bergerak. Bahkan benda-benda yang ada di sekitar kita yang tampak diam/stasioner, sebenarnya bergerak bersama-sama bumi yang berotasi terhadap sumbunya. Bumi mengorbit Matahari, Matahari mengorbit pusat galaksi Bima Sakti, dan Galaksi Bima Sakti bermigrasi terhadap galaksi yang lain.

Kinematika adalah cabang ilmu pengetahuan dari gerak tanpa meninjau penyebab terjadinya gerak tersebut, oleh karena itu tidak tergantung pada massa dan gaya. Secara umum kinematika adalah sebuah studi dari geometri gerak dari satu dimensi sampai empat dimensi yang terdiri dari tiga dimensi ruang ditambah satu dimensi waktu. Jika suatu gerak dibatasi pada sebuah bidang, dimensinya jadi tiga, yaitu x, y, dan t. Kinematika menyangkut konsep dasar tentang perpindahan, kecepatan, dan percepatan.

Elemen-elemen kinematika terdiri dari ruang dan waktu. Dalam analisa ini akan dimulai dengan definisi perpindahan, kecepatan dan percepatan yang dinyatakan dalam elemen-elemen tersebut. Untuk menurunkan suatu persamaan kinematika, pertama-tama perlu dipilih seperangkat sistem koordinat agar dapat digunakan untuk mendeskripsikan gerak secara lebih mudah. Seperti yang sudah kalian pelajari di buku I, koordinat kartesius dan polar sering digunakan sebagai kerangka acuan untuk menganalisa gerak dalam dua dimensi.

Gerakan benda yang terlihat dalam kehidupan sehari-hari secara umum sangat kompleks, maka perlu adanya pembatasan tentang pengertian gerak seperti berikut ini:

1. Gerak yang mempunyai lintasan garis lurus disebut gerak lurus. Arah gerak lurus bisa horizontal, vertikal atau gerak miring (gerak ini juga mempunyai lintasan garis lurus).
2. Gaya (tarik atau dorong) menyebabkan benda bergerak. Namun dalam bab ini tidak masuk dalam pembahasan. Gerak yang tidak memperhatikan gaya penyebabnya disebut kinematika.
3. Benda yang bergerak dianggap sebagai benda titik atau sebuah partikel.

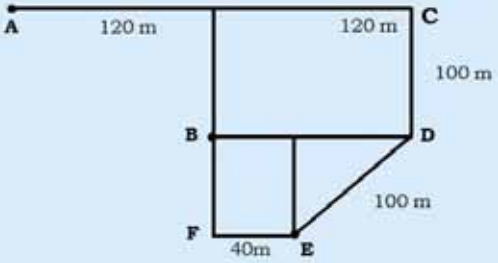
A. Review Gerak dalam Satu Dimensi

Kalian telah mempelajari gerak lurus pada kelas X. Coba kalian ingat lagi konsep-konsep apa saja yang kalian pelajari pada gerak lurus? Bagaimanakah perbedaan antara kecepatan dan kelajuan untuk sebuah partikel yang bergerak pada garis lurus? Bagaimanakah perbedaan antara kecepatan rata-rata dengan kelajuan rata-rata?

Kerjakan tugas 1.1 agar kalian dapat **meningkatkan etos kerja** dan **ingat** kembali materi kecepatan dan kelajuan.

Tugas 1.1

Tentukan kecepatan rata-rata dan kelajuan rata-rata untuk sebuah partikel yang mengalami perpindahan dari titik A ke titik B lewat lintasan A-C-D-E-F-B pada gambar di bawah, bila masing-masing lintasan memerlukan waktu:



t_{AC} = 12 menit!
t_{CD} = 4 menit!
t_{DE} = 5 menit!
t_{EF} = 3 menit!
t_{FB} = 3 menit!

Gambar 1.1 *Perpindahan partikel*

Setelah kalian menyelesaikan tugas 1.1 cobalah kalian mengingat kembali konsep-konsep yang terkait dengan gerak lurus sebagai berikut:

Bila sebuah partikel mengalami perpindahan pada garis lurus posisi awal x_1, ke posisi akhir, x_2, dalam waktu Δt, maka:



1. Vektor perpindahan partikel didefinisikan sebagai:

$$\Delta \vec{x} = \vec{x_2} - \vec{x_1} \qquad (1.1)$$

2. Vektor kecepatan rata-rata:

$$\vec{v_{rt}} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \qquad (1.2)$$

3. Kelajuan rata-rata didefinisikan sebagai $v_{rt} = \frac{\text{jarak total}}{\Delta t}$. Untuk gerak partikel hanya pada satu garis lurus dan hanya satu arah saja maka besarnya kecepatan rata-rata = kelajuan rata-rata.

$$|\vec{v_{rt}}| = \bar{v} \qquad (1.3)$$

4. Bila selama Δt, kecepatan partikel selalu berubah, maka kecepatan sesaat pertikel dapat diperoleh dari kecepatan rata-rata dengan mengambil harga limit kecepatan rata-rata untuk $\Delta t \to 0$,

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{v_{rt}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{d\vec{x}}{dt} \qquad (1.4)$$

5. Kelajuan sesaat adalah besarnya kecepatan sesaat untuk gerak lurus beraturan, partikel yang bergerak pada garis lurus dengan kecepatan konstan, maka:

$$v = \vec{v} \qquad (1.5)$$

6. Gerak lurus berubah beraturan adalah gerak lurus dengan perubahan kecepatan persatuan waktu adalah konstan, maka didefinisikan percepatan rata-rata $\bar{a}$, adalah:

$$\bar{a} = \frac{\vec{v_2} - \vec{v_1}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \qquad (1.6)$$

di mana $\vec{v_2}$ adalah kecepatan sesaat pada posisi $\vec{x_2}$ dan $\vec{v_1}$ adalah kecepatan sesaat pada posisi $\vec{x_1}$

sedangkan percepatan sesaat $\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{a}_{rt}$

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \qquad (1.7)$$

Jadi, pada gerak lurus berubah beraturan $\vec{a}_{rt} = \vec{a}$

7. Persamaan gerak pada GLBB:

a. $v = v_0 + at$
b. $x - x_0 = v_{ot} + \frac{1}{2} at^2$
c. $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$ (1.8)
d. $v_{rt} = \frac{1}{2}(v_0 + v)$

8. Dengan menggunakan grafik lintasan fungsi waktu, kecepatan sesaat adalah slope pada titik yang terletak pada kurva lintasan pada saat t tertentu.

KISI



Sumber: Jendela Iptek 3

Principia. Ini adalah halaman judul dari Newton yang paling penting. Newton mengikuti jejak Galileo, yaitu menjelaskan alam ini secara matematis. Bagian pertama Principia menjelaskan bahwa ada tiga hukum dasar (hlm 30) yang mengatur gerak benda-benda. Setelah itu Newton memberikan teorinya mengenai gravitasi, yaitu gaya menarik turun benda-benda yang jatuh. Dengan menggunakan hukum-hukumnya, Newton menunjukkan bahwa gaya gravitasilah yang membuat planet-planet bergerak pada orbitnya mengelilingi matahari (hlm 32). Akhirnya, Newton menggunakan hukum-hukumnya untuk meramalkan bahwa dunia ini tentunya berupa buatan yang sedikit pipih pada dua ujungnya dan bahwa komet mengelilingi matahari melalui jalur oval panjang. Ramalan-ramalan itu kemudian ternyata dapat dibenarkan.

9. Dengan menggunakan kurva grafik kecepatan sebagai fungsi waktu, percepatan sesaat adalah slope pada titik tertentu yang terletak pada kurva $\vec{v}$ pada saat t tertentu.

Contoh Soal 1.1

1. Kalian mengendarai sebuah sepeda motor sepanjang jalan bebas hambatan dengan kecepatan 70 km/jam pada jarak 15,5 km. Namun, di tengah jalan motor kalian kehabisan bensin sehingga terpaksa harus jalan sepanjang 2 km untuk mendapatkan bensin di SPBU dalam waktu 30 menit.
   a. Berapa perpindahan total yang kalian lakukan dari awal mengendari motor sampai di SPBU untuk mendapatkan bensin?
   b. Berapa waktu yang diperlukan dari awal mengendari motor sampai ke SPBU untuk mendapatkan bensin?
   c. Berapa kecepatan rata-ratanya dari awal mengendarai motor sampai ke SPBU? (Gunakan perhitungan secara numerik dan grafik)!
   d. Anggaplah bahwa kalian berjalan untuk beli bensin di SPBU selama 30 menit dan pulang kembali ke motor kalian yang ditinggalkan selama 45 menit. Berapa kecepatan dan kelajuan rata-rata yang kalian tempuh dari awal mengendarai motor, berjalan ke SPBU dan kembali ke motor untuk mengisi bensinnya? Titik awal, titik tempat kehabisan bensin dan SPBU terletak pada satu garis lurus!

   Penyelesaian:

   Berdasarkan soal didapatkan beberapa data yang bisa digunakan sebagai acuan dalam penyelesaian soal ini. Hal yang perlu diperhatikan dan untuk mempermudah analisa adalah:
   a. Kalian mengendarai motor ke arah sumbu x positif dari posisi awal $x_1 = 0$, ke posisi akhir (SPBU) adalah x_2.
   b. Waktu yang diperlukan untuk berjalan Δt_{jln} adalah 30 menit = 0,5 jam, sehingga waktu keseluruhan yang diperlukan adalah waktu rata-rata salama mengendarai motor Δt_{motor} ditambah dengan Δt_{jln}
   c. Kecepatan rata-rata yang didasarkan pada persamaan 1.1 jarak perpindahan dibagi dengan waktu secara keseluruhan.

d. Untuk mendapatkan kelajuan rata-rata kalian harus menentukan jarak total dan waktu total yang ditempuh selama perjalanan.

Jawab:

a. Panjang perpindahan total dari posisi awal sampai akhir adalah:

$\Delta\vec{x} = \vec{x}_2 - \vec{x}_1 = (15{,}5 + 2)\text{ km} - 0\text{ km} = 17{,}5\text{ km}$

Jadi, jumlah perpindahan total yang kalian lakukan adalah 17,5 km.

b. Waktu total yang diperlukan adalah:

$\Delta t_{tot} = \Delta t_{motor} + \Delta t_{jln}$,

Untuk mendapatkan Δt_{motor} adalah:

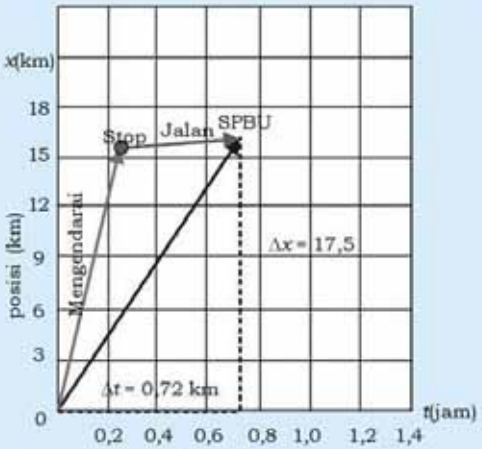
$$\Delta t_{motor} = \frac{\Delta\vec{x}}{\overrightarrow{v_{rt}}} = \frac{15{,}5\text{ km}}{70\text{ km/jam}} = 0{,}22\text{ jam}$$

Jadi, waktu keseluruhannya, $\Delta t_{tot} = 0{,}22\text{ jam} + 0{,}5\text{ jam} = 0{,}72\text{ jam}$

c. Kecepatan rata-ratanya adalah:

$$\overrightarrow{v_{rt}} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t_{tot}} = \frac{17{,}5\text{ km}}{0{,}72\text{ jam}} = 23{,}31\text{ km/jam}$$

Secara grafik bisa dilihat pada gambar 1.2.



Gambar 1.2 *Perhitungan kecepatan rata-rata*

d. Kecepatan rata-rata kalian dari posisi awal-SPBU-titik kehabisan bensin adalah

$$v_{rt} = \frac{\Delta x}{\Delta t_{tot}} = \frac{15{,}5\ \text{km}}{1{,}47\ \text{jam}} = 10{,}54\ \text{km/jam}$$

Kelajuan rata-rata adalah jarak total dari posisi awal-SPBU-kehabisan bensin, Δx = 15,5 km + 2 km + 2 km = 19,5 km, yang dibagi dengan waktu total Dt = 0,22 jam + 0,50 jam + 0,75 jam = 1, 47 jam yang dituliskan sebagai:

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t_{tot}} = \frac{19{,}5\ \text{km}}{1{,}47\ \text{jam}} = 13{,}27\ \text{km/jam}$$

Dari dua perhitungan di atas menunjukkan bahwa kecepatan rata-rata nilainya berbeda dengan kelajuan rata-rata bila benda bergerak lebih dari satu arah.

2. Posisi sebuah partikel yang bergerak pada sumbu x diberikan oleh persamaan $x\,(t) = 7{,}5 + 12{,}5t - 5t^3$ dengan x dinyatakan dalam meter dan t dalam sekon.
   a. Berapa kelajuan rata-rata partikel dalam interval waktu $t\,(t) = 2$ sampai $t = 4$ s?
   b. Berapa kecepatan dan kelajuan partikel tersebut untuk $t = 4{,}0$ s?
   c. Apakah kecepatannya bersifat konstan atau secara kontinu berubah?

Penyelesaian:

Untuk menyederhanakan perhitungan satuan, kita bisa memasukkan satuan tersebut ke dalam persamaan gerak, yaitu $x\,(t) = 7{,}5\ \text{m} + 12{,}5t\ \text{m} - 5t^3\ \text{m}$.

a. Kelajuan rata-rata dalam interval waktu 2 s adalah beda posisi antara $t = 4$ s.
b. Kecepatan merupakan turunan pertama dari x terhadap t.
c. Kecepatan tergantung pada waktu

Jawab:

a. $x(4) = 7{,}5\ \text{m} + 50\ \text{m} - 320\ \text{m} = -262{,}5\ \text{m}$, dan
$x(2) = 7{,}5\ \text{m} + 25\ \text{m} - 40\ \text{m} = -7{,}5\ \text{m}$

$$\bar{v}_x = \frac{x(4)\ \text{m} - x(2)\ \text{m}}{2\ \text{s}} = \frac{(-262{,}5\ \text{m}) - (-7{,}5\ \text{m})}{2\ \text{s}} = -127{,}5\ \text{m/s}$$

Karena kelajuan rata-ratanya negatif, maka partikel bergerak sepanjang sumbu x arah negatif.

b. $\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt} = \frac{d}{dt}(7{,}5 + 12{,}5t - 5t^3) = 0 + 12{,}5 - 15t^2$

Untuk $t = 4$s maka didapatkan:

$\vec{v} = 12{,}5 - 15(4^2) = -227{,}5$ m/s

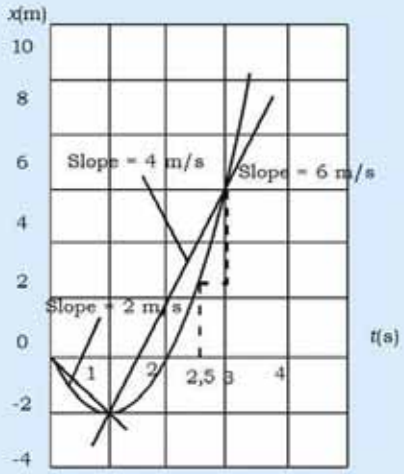
Pada $t = 4{,}0$ s partikel bergerak pada arah sumbu x negatif dengan kelajuan 227,5 m/s.

c. Karena kecepatan masih tergantung pada waktu, maka kecepatannya berubah secara kontinu.

3. Sebuah partikel bergerak sepanjang sumbu x dan posisinya pada setiap saat dinyatakan sebagai $x = -4t + 2t^2$ di mana x dalam meter dan t dalam sekon.
   a. Gambar grafik posisi partikel sebagai fungsi waktu untuk t dari 0 s sampai $t = 3$ s!
   b. Hitung kelajuan rata-ratanya untuk t dari 0s sampai 1 s dan untuk t dari 1 s sampai 3 s dengan perhitungan dan dengan menggunakan slope!
   c. Hitung kecepatan sesaat pada saat $t = 2{,}5$ s dengan perhitungan dan dengan menggunakan grafik!

Penyelesaian:

a.



Gambar 1.3 *Grafik x sebagai fungsi t pada contoh nomor 3*

b. Kelajuan rata-rata dari $t = 0$ s sampai $t = 1$ s adalah $= -2$ m/s.
Kelajuan rata-rata besarnya sama dengan slope dari garis yang menghubungkan $x(0)$ dengan $x(1)$ yang ditunjukkan oleh garis hijau yaitu sebesar -2 m/s. Dan dari $t = 1$s sampai $t = 3$s adalah $\bar{v} = \frac{x(3)\,\text{m} - x(1)\,\text{m}}{2\,\text{s}} = \frac{6\,\text{m} - (-2)\,\text{m}}{2\,\text{s}} = 4\,\text{m/s}$ adalah sama dengan slope dari garis yang menghubungkan titik $x(1)$ dengan titik $x(3)$ yang ditunjukkan oleh garis merah yang mana slopenya sebesar 4 m/s.

c. $\bar{v} = \frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{d}{dt}(-4t + 2t^2) = -4 + 4t$, maka $\bar{v}(2,5) = 6$ m/s.
Dari grafik posisi sebagai fungsi waktu besarnya slope garis singgung (garis warna biru) dititik untuk $t = 2,5$ s adalah $\frac{3}{\frac{1}{2}} = 6$, maka kecepatan sesaat pada saat $t = 2,5$ s adalah 6 m/s.

Contoh di atas apabila dicermati, diharapkan dapat **meningkatkan kecakapan vokasional (psikomotor) dan kemampuan akademik** kalian dalam memahami konsep gerak.

Brilian

Contoh soal di atas merupakan **contoh penggunaan fisika dalam kehidupan sehari-hari**. Dengan contoh tersebut, diharapkan dapat menumbuhkan rasa ingin tahu kalian pada setiap fenomena sehari-hari. Untuk itu, carilah contoh aplikasi hukum-hukum fisika tentang gerak dalam kehidupan sehari-hari.

Untuk **mengembangkan kecakapan akademik dan personal** kalian, perhatikanlah contoh soal 1.2!

Contoh Soal 1.2

1. Sebuah partikel bergerak sepanjang sumbu x dan posisi sesaatnya sebagai fungsi waktu dinyatakan sebagai $x = (40t - (5/3)t^3)$ m di mana t dalam sekon.
   a. Tentukan kelajuan rata-ratanya dalam interval waktu $t = 0$ s sampai $t = 3$ s!
   b. Tentukan percepatan rata-ratanya dalam interval waktu $t = 0$ s sampai $t = 3$ s!.
   c. Tentukan kecepatan dan percepatan sesaat pada saat $t = 3$ s!

   Penyelesaian:

   a. Untuk menentukan kecepatan rata-rata, kita harus menghitung lebih dahulu posisi pada saat $t = 0$ s dan pada saat $t = 3$ s : $x(0) = 0$ m, $x(3) = 75$ m, maka

   $$\bar{v} = \frac{x(3)\text{m} - x(0)\text{m}}{3\text{ s}} = 25\text{ m/s}$$

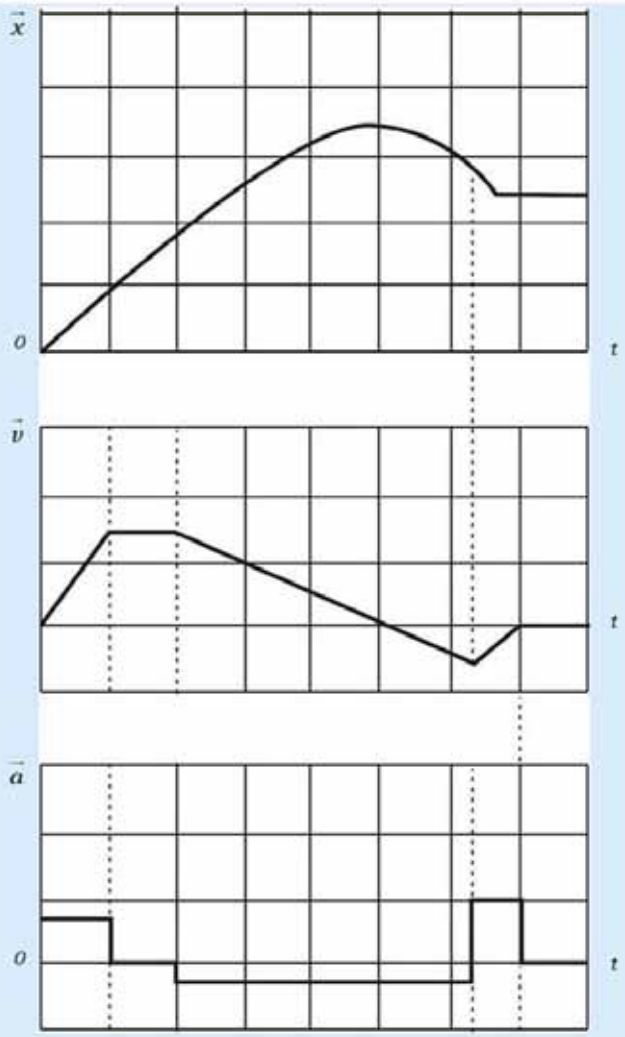
   b. $v = \frac{dx}{dt} = (40 - 5t^2)$ m/s. Maka percepatan rata-rata dalam interval waktu dari $t = 0$ s sampai $t = 3$ s adalah

   $$\bar{a} = \frac{v(3)\text{m} - v(0)\text{m}}{3\text{ s}} = \frac{(-5 - 40)\text{m/s}}{3\text{ s}} = -15\text{ m/s}^2$$

   c. Kecepatan sesaat pada $t = 3$ s, $v(3) = -5$ m/s dan besarnya percepatan sesaat yang diperoleh dengan menggunakan persamaan 1.7 adalah $a(3) = -30$ m/s^2.

2. Tunjukkan dalam bentuk grafik hubungan antara perpindahan, kecepatan dan percepatan sebuah partikel yang bergerak sepanjang sumbu x!

   Penyelesaian hubungan antara perpindahan, kecepatan dan percepatan secara grafik untuk partikel yang bergerak sepanjang sumbu x ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 1.4 *Hubungan antara grafik* $\vec{x}$ *vs t,* $\vec{v}$ *Vs t*

B. Gerak dalam Dua atau Tiga Dimensi

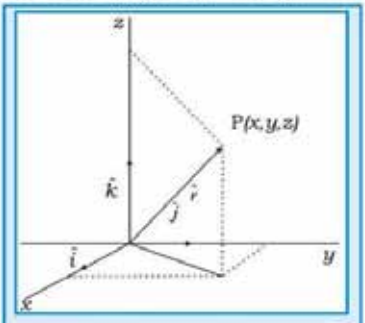
Pada subbab ini kita akan mempelajari gerak suatu benda dalam dua atau tiga dimensi. Pada subbab sebelumnya kita telah membahas posisi, kecepatan, dan percepatan benda yang bergerak dalam satu dimensi. Oleh karena itu, kita akan membahas konsep posisi, kecepatan, dan percepatan untuk partikel yang bergerak dalam bidang dua dimensi atau ruang tiga dimensi. Untuk memudahkan analisisnya kita menggunakan simbol-simbol yang berkaitan dengan notasi vektor.

1. Posisi dan Perpindahan

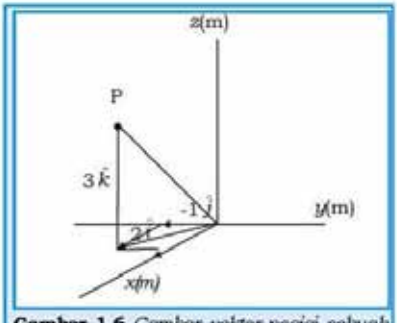
Posisi suatu partikel yang disajikan dengan notasi vektor biasanya dituliskan sebagai vektor posisi $\vec{r}$, yaitu sebuah vektor berupa garis lurus yang ditarik dari titik referensi (biasanya berasal dari titik asal sistem koordinat) terhadap titik posisi partikel tersebut. Dalam notasi vektor satuan dapat ditulis:

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \qquad (1.9)$$

di mana $\vec{r} = x\hat{i}, y\hat{j}, dan\ z\hat{k}$ adalah komponen-komponen vektor $\vec{r}$ dan koefisien x, y, z adalah komponen skalarnya dan $\hat{i}$, $\hat{j}$, dan $\hat{k}$ masing-masing adalah vektor satuan pada sumbu x, y, dan z, seperti terlihat pada gambar 1.5. Koefisien x, y, z menunjukkan posisi partikel sepanjang sumbu koordinat relatif terhadap titik asal koordinat, maka dapat dikatakan bahwa partikel mempunyai koordinat (x, y, z), lihat gambar!



Gambar 1.5 *Sebuah vektor posisi* $\vec{r}$ *dalam ruang tiga*



Gambar 1.6 *Gambar vektor posisi sebuah* $\vec{r} = 2\hat{i}$ m $- 1\hat{j}$ m $+ 3\hat{k}$ m

Sejalan dengan gerak partikel, vektor posisi juga selalu berubah dan merupakan garis hubung antara titik asal dengan titik posisi partikel pada setiap saat. Jika vektor posisi berubah dari $\vec{r}_1$ ke $\vec{r}_2$ dalam interval waktu tertentu maka partikel tersebut dikatakan mengalami perpindahan sebesar dalam interval waktu tersebut di mana

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \qquad (1.10)$$

Dengan menggunakan notasi vektor satuan pada persamaan. 1.9, maka persamaan. 1.10 dapat ditulis menjadi:

$$\Delta\vec{r} = (x_2\hat{i} + y_2\hat{j} + z_2\hat{k}) - (x_1\hat{i} + y_1\hat{j} + z_1\hat{k})$$

atau

$$\Delta\vec{r} = (x_2 - x_1)\hat{i} + (y_2 - y_1)\hat{j} + (z_2 - z_1)\hat{k} \qquad (1.11)$$

di mana koordinat (x_1, y_1, z_1) adalah koordinat posisi vektor $\vec{r}_1$ dan koordinat (x_2, y_2, z_2) adalah koordinat posisi vektor $\vec{r}_2$. Dengan menggunakan $\Delta x = (x_2 - x_1)$, $\Delta y = (y_2 - y_1)$, dan $\Delta z = (z_2 - z_1)$, maka persamaan 1.11 menjadi:

$$\Delta\vec{r} = \Delta x\hat{i} + \Delta y\hat{j} + \Delta z\hat{k} \qquad (1.12)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik** kalian, cermatilah contoh soal berikut!

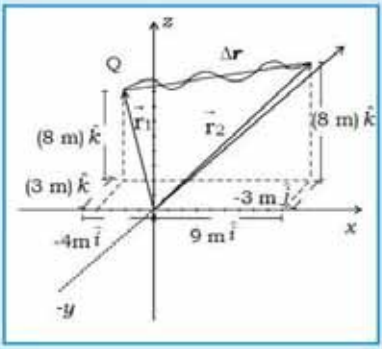
Contoh Soal 1.3

Seperti ditunjukkan pada gambar 1.7 vektor posisi mula-mula adalah: $\vec{r}_1 = (-4\text{m})\hat{i} + (3\text{m})\hat{j} + (6\text{m})\hat{k}$ dan berubah menjadi: $\vec{r}_2 = (9\text{m})\hat{i} + (3\text{m})\hat{j} + (8\text{m})\hat{k}$.

Berapa perpindahan partikel dari $\vec{r}_1$ ke $\vec{r}_2$?

Penyelesaian:

Perpindahan $\Delta\vec{r}$ adalah pengurangan vektor posisi $\vec{r}_2$ dengan $\vec{r}_1$ yaitu $\Delta r = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$



Gambar 1.7 *Perubahan vektor posisi dari $\vec{r}_1$ ke $\vec{r}_2$.*

Jawab:

Berdasarkan persamaan 1.10 yaitu $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$

$\Delta\vec{r} = (9\text{ m} - (-4\text{ m})\hat{i} + (3\text{ m} - 3\text{ m})\hat{j} + (8\text{ m} - 6\text{ m})\hat{k}$

$= 13\text{ m}\hat{i} + 2\text{ m}\hat{k}$

Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa vektor perpindahan $\Delta\vec{r}$ terletak pada bidang *xz*.

2. Kecepatan Rata-rata dan Kecepatan Sesaat

Jika sebuah partikel yang bergerak mengalami perpindahan $\Delta\vec{r}$ dalam interval waktu Δt, maka kecepatan rata-rata, $\vec{v}_{rt}$ adalah:

$$\vec{v}_{rt} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \qquad (1.13)$$

Persamaan 1.13 menunjukkan bahwa arah $\vec{v}$ sama dengan arah perpindahan, $\Delta\vec{r}$, sehingga $\vec{v}$ dapat ditulis dalam bentuk komponen-komponen vektornya dengan mensubstitusikan persamaan 1.12 ke dalam persamaan 1.13 sebagai:

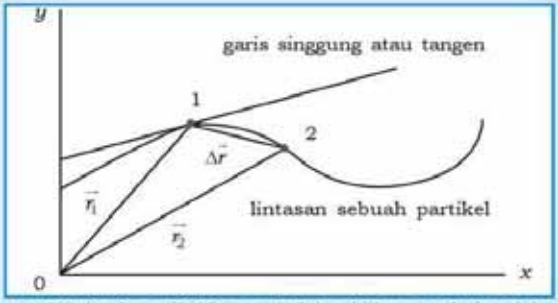
$$\vec{v}_{rt} = \frac{\Delta x\hat{i} + \Delta y\hat{j} + \Delta z\hat{k}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\hat{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\hat{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t}\hat{k} \qquad (1.14)$$

Tugas 1.2

Hitung kecepatan rata-rata dalam interval waktu 2 s untuk soal pada contoh 1.3!

Seperti diutarakan pada subbab sebelumnya, kecepatan sesaat dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \qquad (1.15)$$



Gambar 1.8 *Sebuah partikel bergerak dalam bidang xy dari posisi 1 dengan vektor posisi $\vec{r}_1$ ke posisi 2 dengan vektor posisi $\vec{r}_2$ dalam interval waktu $\Delta t = t_2 - t_1$, maka perpindahan partikel adalah Δr dan kecepatan rata-rata partikel adalah $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$*

Gambar 1.8 menunjukkan sebuah partikel yang bergerak pada ..... x – y. Karena partikel bergerak pada lintasan kurva ke arah kanan maka vektor posisi menyapu arah kanan (bergerak ke kanan melewati luasan di bawah kurva).

Dari gambar 1.8 dapat ditunjukkan bahwa kecepatan sesaat ..... $t = t_1$ diperoleh dengan cara menggerakkan vektor posisi $\vec{r}_2$ mendekati vektor posisi $\vec{r}_1$. Dengan demikian interval waktu menjadi sangat kecil atau mendekati nol, sehingga vektor perpindahan berubah menjadi garis singgung di koordinat posisi (x_1, y_1).

Untuk partikel yang bergerak dalam bidang dua dimensi, persamaan 1.15 yang diperoleh dari harga limit persamaan 1.14 dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \hat{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \hat{j} = \frac{dx}{dt} \hat{i} + \frac{dy}{dt} \hat{j} \qquad (1.16)$$

Untuk gerak partikel dalam bidang tiga dimensi, maka kecepatan sesaat pada saat t dapat diperoleh dengan cara yang sama dengan kecepatan sesaat partikel yang bergerak dalam bidang dua dimensi dengan hanya menambahkan komponen searah sumbu z, persamaan 1.16 dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{v} = \frac{d}{dt}\left(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}\right) = \frac{dx}{dt} \hat{i} + \frac{dy}{dt} \hat{j} + \frac{dz}{dt} \hat{k} \qquad (1.17)$$

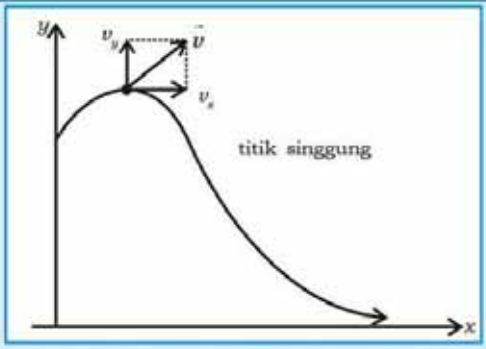
Persamaan1.17 dapat ditulis kembali dalam bentuk komponen vektor kecepatan sebagai:

$$\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k} \qquad (1.18)$$

di mana komponen skalar dari $\vec{v}$ adalah:

$$v_x = \frac{dx}{dt}; v_y = \frac{dy}{dt} \text{ dan } v_z = \frac{dz}{dt} \qquad (1.19)$$

Jadi, kita dapat menemukan komponen skalar $\vec{v}$ dengan mendiferensialkan komponen skalar dari $\vec{r}$.



Gambar 1.9 *Kecepatan partikel $\vec{v}$ diuraikan ke dalam komponen v_x dan v_y*

Gambar 1.9 menunjukkan vektor kecepatan $\vec{v}$ untuk sebuah partikel yang bergerak pada bidang $x - y$ yang diuraikan ke dalam komponen-komponen v_x dan v_y.

Untuk meningkatkan **kecakapan akademik dan personal kalian**, perhatikan contoh soal berikut ini!

Contoh Soal 1.4

Vektor posisi sebuah partikel yang bergerak dalam bidang dua dimensi dinyatakan sebagai $f(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j}$ di mana $x(t) = t + 1$ dan $y(t) = (1/4)t^2 + 1$.

a. Tentukan kecepatan dan kelajuan rata-rata partikel dalam interval waktu dari $t = 0$ s sampai $t = 4$ s dan dari $t = 4$ s sampai $t = 6$ s!
b. Tentukan kecepatan kelajuan sesaat pada saat $t = 2$ s!

Penyelesaian:

a. Untuk menghitung kecepatan rata-rata, maka kita hitung posisi partikel pada saat t = 0 s, 4 s, dan 6 s sebagai berikut:

$\vec{r}(0) = (0 + 1)\hat{i} + \{(0 + 1)\hat{j} = 1\,\text{m}\hat{i} + 1\,\text{m}\hat{j}$,

$\vec{r}(4) = (4 + 1)\hat{i} + \{(1/4)(16) + 1\}\hat{j} = 5\,\text{m}\hat{i} + 5\,\text{m}\hat{j}$

$\vec{r}(6) = (6 + 1)\hat{i} + \{(1/4)(36) + 1\}\hat{j} = 7\,\text{m}\hat{i} + 10\,\text{m}\hat{j}$

Dalam interval waktu t = 0 – 4 s, $\bar{v}$ adalah:

$\vec{v}_{rr} = \dfrac{(5\,\text{m} - 1\,\text{m})\hat{i} + (5\,\text{m} - 1\,\text{m})\hat{j}}{4\,\text{s}} = 1\dfrac{\text{m}}{\text{s}}\hat{i} + 1\dfrac{\text{m}}{\text{s}}\hat{j}$ dan kelajuan rata-ratanya:

$\bar{v} = \sqrt{1+1} = \sqrt{2}\,\text{m/s}$

$\bar{v} = \dfrac{(7\,\text{m} - 5\,\text{m})\hat{i} + (10\,\text{m} - 5\,\text{m})\hat{j}}{4\,\text{s}} = 1\dfrac{\text{m}}{\text{s}}\hat{i} + 2{,}5\dfrac{\text{m}}{\text{s}}\hat{j}$ dan kelajuan rata-ratanya adalah $\bar{v} = \sqrt{1 + 6{,}25} = 0{,}5\sqrt{29}\,\text{m/s}$.

b. Dengan menggunakan persamaan 1.7 kecepatan sesaat partikel adalah $\vec{v} = \dfrac{d}{dt}\left(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}\right) = 1\hat{i} + \dfrac{1}{2}t\hat{j} = 1\hat{i} + 1\hat{j}$ untuk t = 2 s, maka besarnya kelajuan pada t yang sama adalah $v = \sqrt{2}\,\text{m/s}$.

3. Percepatan Rata-rata dan Percepatan Sesaat

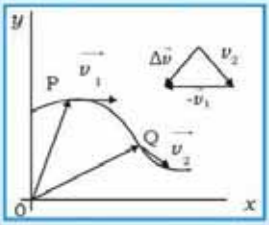
Ketika sebuah benda mengalami perubahan kecepatan dari v_1 ke v_2 dalam interval Δt, lihat gambar 1.10, maka percepatan rata-ratanya $\bar{a}$ selama Δt adalah:

percepatan rata-rata = $\dfrac{\text{perubahan kecepatan}}{\text{interval waktu}}$ atau secara matematik dapat ditulis:

$$\bar{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \qquad (1.20)$$

Arah percepatan rata-rata searah dengan arah perubahan kecepatan. Sedang percepatan sesaat a adalah harga limit dari harga $\bar{a}$ untuk Δt mendekati nol dan dituliskan sebagai:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \qquad (1.21)$$



Gambar 1.10 *Vektor percepatan rata-rata, $\vec{a}$, dari sebuah partikel yang mempunyai kecepatan $\vec{v}_1$ di titik P bergerak ke titik Q dalam interval waktu $\Delta t = t_2 - t_1$ sehingga kecepatannya menjadi $\vec{v}_2$ adalah $\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$*

Berdasarkan persamaan 1.20 atau 1.21, maka dapat dikatakan bahwa percepatan rata-rata maupun percepatan sesaat merupakan besaran vektor yang mempunyai besar dan arah. Oleh karena itu, dengan menyubstitusikan persamaan 1.19 ke dalam persamaan 1.21 diperoleh:

$$\vec{a} = \frac{d}{dt}\left(v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k}\right) = \frac{dv_x}{dt}\vec{i} + \frac{dv_y}{dt}\vec{j} + \frac{dv_z}{dt}\vec{k} \qquad (1.22)$$

atau dapat ditulis kembali dalam bentuk:

$$\vec{a} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k}) \qquad (1.23)$$

di mana komponen skalar dari $\vec{a}$ adalah:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}; a_y = \frac{dv_y}{dt} \text{ dan } a_z = \frac{dv_z}{dt} \qquad (1.24)$$

Persamaan 1.24 menunjukkan bahwa komponen skalar dari $\vec{a}$ adalah turunan dari komponen skalar kecepatan $\vec{v}$ terhadap waktu.

Tugas 1.3

Berdasarkan grafik pada gambar 1.10, kerjakan soal-soal di bawah ini!

1. Jelaskan, apakah sebuah benda mempunyai percepatan bila benda bergerak dengan kelajuan tetap!
2. Jelaskan, apakah sebuah benda mempunyai percepatan bila kecepatannya konstan!

C. Gerak Peluru

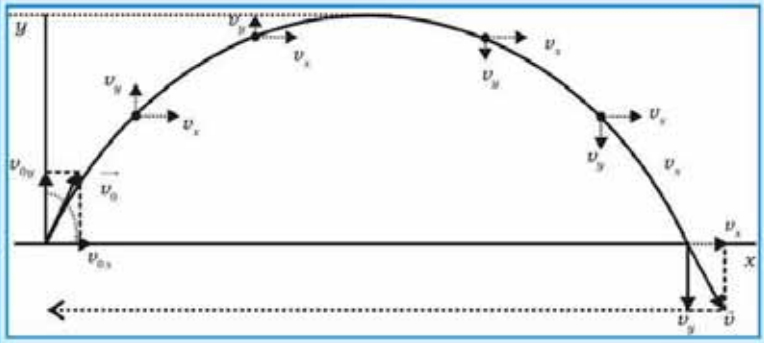
Gerak peluru adalah perpaduan antara dua gerak yang arahnya saling tegak lurus, yaitu gerak arah horizontal *x(t)* dengan kecepatan konstan dan gerak arah vertikal *y(t)* yang mempunyai percepatan konstan yaitu percepatan gravitasi. Walaupun sebenarnya sebuah benda yang melambung di udara mengalami gaya gesek udara, namun gaya gesek tersebut diabaikan maka selama gerak lintasan benda yang dilempar ke udara tersebut berbentuk parabola.

Gerak peluru juga disebut gerak proyektil (berarti diproyeksikan atau dilepas). Sebuah proyektil bisa berupa sebuah bola golf, baseball, batu kecil, atau pasir yang ditendang/dilempar tetapi bukan sebuah pesawat terbang atau seekor burung yang sedang terbang. Bila sebuah proyektil ditembakkan dengan kecepatan awal $\vec{v_0}$ dan dengan sudut elevasi θ_0, maka kecepatan awal dapat ditulis sebagai:

$$\vec{v_0} = v_{0x}\hat{i} + v_{0y}\hat{j} \qquad (1.25)$$

di mana $v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$ dan $v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$ (1.26)

Komponen-komponen seperti v_{0x} dan v_{0y} dari persamaan 1.25 masing-masing dapat ditentukan jika sudut elevasi θ_0 yaitu sudut yang dibentuk antara $\vec{v_0}$ dengan sumbu x arah positif diketahui.



Gambar 1.11 *Grafik komponen kecepatan pada titik-titik istimewa dan beberapa titik yang lain pada lintasan benda yang melakukan gerak peluru/ proyektil dengan kecepatan awal $\vec{v_0}$ dan sudut elevasi θ_0*

Selama proyektil bergerak dalam bidang dua dimensi, vektor posisi $\vec{r}$ dan vektor kecepatan $\vec{v}$ secara kontinu berubah. Tetapi vektor percepatan $\vec{a}$ dari benda tersebut konstan dan besarnya sama dengan percepatan gravitasi yang selalu mempunyai arah vertikal ke bawah, lihat gambar 1.11. Untuk arah horizontal atau arah sumbu x, proyektil tidak mempunyai percepatan. Arah gerak horizontal dan gerak vertikal pada gerak proyektil tidak saling tergantung satu sama lainnya. Oleh karena itu, masing-masing komponen gerak arah horizontal dan arah vertikal dapat diselesaikan secara terpisah tetapi interval waktunya sama.

Vektor posisi gerak proyektil pada setiap saat dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} \qquad (1.27)$$

di mana $x(t)$ adalah komponen gerak arah horizontal dan $y(t)$ adalah komponen gerak arah vertikal.

1. Gerak Proyektil Arah Horizontal

Arah horizontal gerak benda tidak mempunyai percepatan, maka komponen kecepatan v_x tidak mengalami perubahan dari keadaan awal sampai akhir gerak, yaitu sebesar v_{0x}. Untuk sembarang waktu t gerak benda arah horizontal mengalami perpindahan $x - x_0$ dari posisi awal x_0, maka persamaan geraknya dapat dituliskan sebagai $x - x_0 = v_{0x}t$.

Karena $v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$, maka persamaan gerak arah horizontal dan kecepatan sesaatnya adalah $x - x_0 = (v_0 \cos \theta_0)t$

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cos \theta_0 \qquad (1.28)$$

2. Gerak Arah Vertikal

Komponen gerak arah vertikal dari gerak proyektil merupakan gerak jatuh bebas. Gerak ini hanya dipengaruhi oleh percepatan gravitasi, g, yang besarnya konstan untuk jangkauan jarak tertentu. Dengan demikian, arah gerak vertikal adalah gerak lurus berubah beraturan dengan percepatan $\vec{a}$ diganti dengan nilai $-g$ (tanda – menunjukkan arah percepatan ke bawah (ke pusat bumi)). Dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} y - y_0 &= v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \\ y - y_0 &= (v_0 \sin \theta_0)t - \frac{1}{2}gt^2 \\ v_y &= v_0 \sin \theta_0 - gt \end{aligned} \qquad (1.29)$$

$v_y^2 = (v_0 \sin \theta_0)^2 - 2g(y - y_0)$

di mana y_0 adalah posisi awal pada saat $t = 0$

Persamaan 1.29 menunjukkan bahwa gerak arah vertikal sama dengan gerak benda yang ditembakkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal $v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$. Pada saat proyektil mencapai titik tertinggi, kecepatan sesaat arah vertikal nol. Kondisi ini dapat dijelaskan bahwa titik tertinggi merupakan titik balik yaitu gerak proyektil membalik arah dan besarnya kecepatan menjadi semakin besar pada saat proyektil bergerak semakin ke bawah.

3. Persamaan Lintasan

Persamaan lintasan dari gerak peluru adalah persamaan yang menunjukkan hubungan antara simpangan horizontal $x(t)$ dengan simpangan vertikal $y(t)$ dapat diturunkan dengan cara mengeliminasi t dari persamaan 1.28 dengan persamaan 1.29 dan dengan kondisi awal $x_0 = y_0 = 0$, maka:

$$y = (\tan\theta_0)x - \frac{gx^2}{2(v_0 \cos\theta_0)^2} = (\tan\theta_0)x - \left(\frac{1}{2}\right)gt^2 \qquad (1.30)$$

Persamaan 1.30 menunjukkan bentuk lintasan gerak proyektil berbentuk parabola, di mana nilai g, θ_0, dan v_0 adalah konstan, sehingga secara umum dapat ditulis dalam bentuk persamaan,

$y = ax + bx^2$ di mana a dan b adalah konstan.

Kecepatan sesaat proyektil pada saat t dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} = v_0 \cos\theta_0\vec{i} + (v_0 \sin\theta_0 - gt)\vec{j}$$

sedangkan besarnya kelajuan proyektil pada setiap saat adalah besarnya kecepatan sesaat yaitu:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(v_0 \cos\theta_0)^2 + (v_0 \sin\theta_0 - gt)^2}$$

Arah kecepatan sesaat ditentukan oleh $\tan\theta = \frac{v_y}{v_x}$ di mana θ adalah sudut antara vektor kecepatan $\vec{v}$ dengan arah mendatar dan kecepatan sesaat peluru besarnya sama dengan slope garis singgung pada titik tertentu pada saat t.

Jarak mendatar jangkauan R yang ditempuh oleh proyektil pada saat proyektil jatuh kembali ke tanah dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 1.27 di mana $x - x_0 = R$ yang diperoleh dengan menggunakan harga t dari persamaan 1.28 di mana $y - y_0 = 0$ sehingga:

$R = (v_0 \cos \theta_0)t$ dan

$0 = (v_0 \sin \theta_0)t - \frac{1}{2}gt^2$

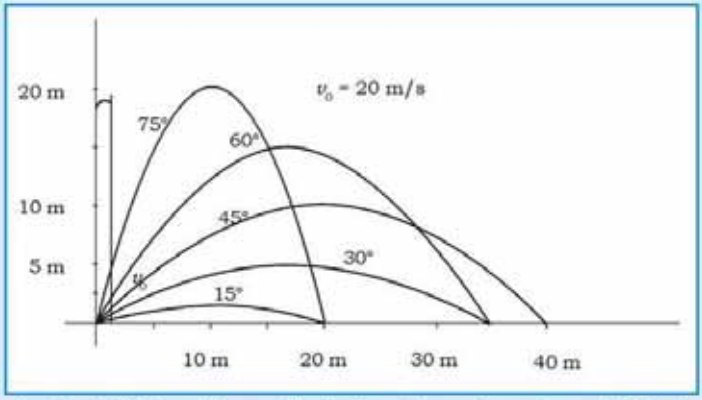
Mengeliminasi nilai t dari kedua persamaan didapatkan:

$$R = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta_0 \qquad (1.31)$$

Dari persamaan 1.31 dapat ditunjukkan bahwa jarak jangkauan terjauh proyektil tercapai jika sudut $\theta_0 = 45°$.

Jarak tertinggi yang dicapai proyektil dapat ditentukan dari kondisi bahwa di titik tertinggi kecepatan sesaat arah vertikal nol, maka: $v_y = v_0 \sin \theta_0 - gt = 0$, sehingga diperoleh $t = \frac{v_0 \sin \theta_0}{g}$, yaitu waktu yang diperlukan oleh peluru untuk bergerak dari tempat ditembakkan sampai titik tertinggi. Dari kondisi ini diperoleh bahwa jarak tertinggi yang dicapai peluru adalah $y_{max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta_0}{2g}$.

Gambar 1.12 menunjukkan sebuah proyektil yang ditembakkan dari titik awal dengan kecepatan awal 20 m/s dengan sudut tembak yang bervariasi.

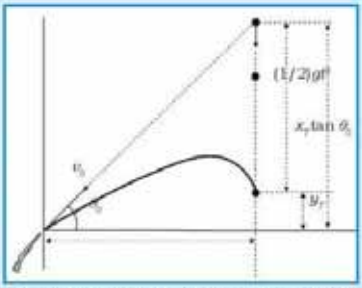


Gambar 1.12 *Proyektil yang ditembakkan dengan kecepatan awal 20 m/s dengan sudut elevasi yang bervariasi sehingga diperoleh lintasan yang bervariasi. Dari gambar ditunjukkan bahwa jangkauan maksimum dicapai bila sudut elevasinya 45° dan tinggi maksimum dicapai bila sudut elevasinya 90°*

Perhatikan contoh soal berikut yang merupakan **aplikasi fisika dalam kehidupan sehari-hari!**

Contoh Soal 1.5

1. Sebuah senapan digunakan untuk menembak tupai yang bertengger di atas pohon kelapa, senapan diarahkan ke tempat tupai. Bersamaan dengan lepasnya peluru dari senapan, tupai juga jatuh ke bawah. Tunjukkan bahwa peluru mengenai tupai!



Gambar 1.13 *Grafik lintasan contoh soal*

Penyelesaian:

Peluru mengenai tupai setelah keduanya bergerak selama t sekon di mana jarak mendatar peluru sebesar x_T dan jarak vertikalnya sebesar y_T, lihat gambar!

Pada saat bersamaan, tupai telah menempuh jarak sebesar $y = (1/2)gt^2$. Dari gambar dapat dilihat bahwa besarnya $y + y_T = x_T \tan \theta_0$, maka $y_T = x_T - (1/2)gt^2$

Dengan menggunakan persamaan 1.28 dan 1.30 untuk persamaan lintasan gerak peluru diperoleh:

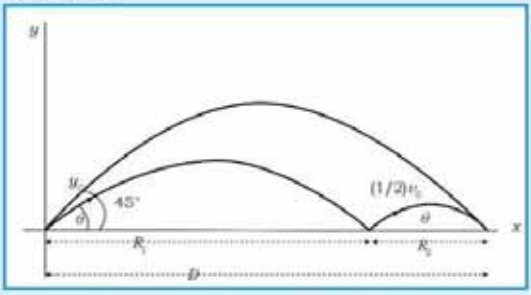
$y_P = x_P - (1/2)gt^2$

Kedua persamaan tersebut menunjukkan persamaan yang sama, maka dapat disimpulkan bahwa peluru mengenai tupai.

2. Pemain *baseball* melemparkan bola dari luar lapangan kepada temannya. Agar bola sampai ke temannya lebih cepat maka bola yang dilemparkan menumbuk tanah lebih dulu dan baru terpantul sampai ke temannya. Bola mula-mula dilemparkan dengan kecepatan awal v_0 dan dengan sudut elevasi θ dan juga dipantulkan dengan sudut elevasi yang sama tetapi kecepatan pada saat memantul adalah setengah dari kecepatan awal saat mula-mula dilemparkan. Pada posisi yang sama sebuah bola dilemparkan dengan kecepatan awal yang sama v_0 tetapi dengan sudut elevasi 45° mempunyai jangkauan $R = D$.

a. Berapakah besar sudut θ agar jangkauan bola yang mengalami pemantulan tersebut juga sebesar D?
b. Tentukan perbandingan waktu yang diperlukan untuk bola sampai ke target antara yang mengalami pemantulan dan yang tidak mengalami pemantulan?

Penyelesaian:



Gambar 1.14 *Grafik gerak peluru contoh soal*

a. Besarnya jangkauan untuk peluru yang ditembakkan dengan sudut elevasi 45° adalah:

$$R = D = \frac{v_0^2}{g}\sin 2\theta_0 = \frac{v_0^2}{g}\sin 90^\circ = \frac{v_0^2}{g}$$

Sedangkan besarnya jangkauan untuk peluru yang mengalami pemantulan adalah R_1 dan R_2, seperti terlihat pada gambar.

Besarnya $R_1 = \frac{v_0^2}{g}\sin 2\theta$ dan $R_2 = \frac{\left(\frac{1}{2}v_0\right)^2}{g}\sin 2\theta = \frac{v_0^2}{4g}\sin 2\theta$

Karena $R_1 + R_2 = D$ maka,

$\frac{v_0^2}{g}\sin 2\theta + \frac{v_0^2}{4g}\sin 2\theta = \frac{v_0^2}{g}$, atau $\frac{5v_0^2}{4g}\sin 2\theta = \frac{v_0^2}{g}$,

sehingga $\sin 2\theta = 4/5$ atau $2\theta = 53^\circ$ $\theta = 26{,}5^\circ$.

b. Waktu yang diperlukan oleh peluru yang tanpa mengalami pemantulan adalah:

$$t_{45^\circ} = \frac{2v_0}{g}\sin\theta_0 = \frac{2v_0}{g}\sin 45^\circ = \frac{v_0\sqrt{2}}{g}$$

untuk peluru yang mengalami pemantulan, waktu total yang diperlukan untuk menempuh sejauh D adalah $t_P = t_1 + t_2$
di mana

$$t_1 = \frac{2v_0}{g}\sin\theta \text{ dan } t_2 = \frac{2\frac{v_0}{2}}{g}\sin\theta = \frac{v_0}{g}\sin\theta$$

$$t_P = \frac{2v_0}{g}\sin\theta + \frac{v_0}{g}\sin\theta = \frac{3v_0}{g}\sin\theta = \frac{3v_0}{g\sqrt{5}}$$

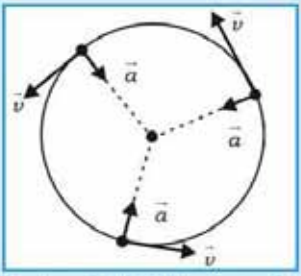
Maka

$$\left(\frac{t_P}{t_{45^\circ}}\right) = \frac{\left(\frac{3v_0}{g\sqrt{5}}\right)}{\left(\frac{v_0\sqrt{2}}{g}\right)} = \frac{3}{\sqrt{10}},$$

yang menunjukkan bahwa rasio tersebut lebih kecil dari satu, sehingga dapat disimpulkan bahwa bola yang dilempar dengan sudut elevasi 26,50 ° memberikan jangkauan maksimum dalam waktu yang lebih cepat.

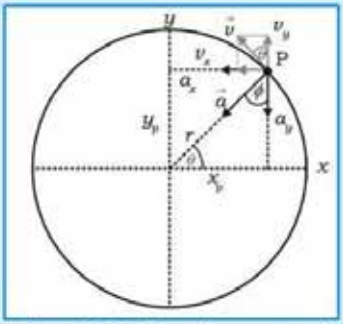
D. Gerak Melingkar Beraturan

Benda mengalami gerak melingkar beraturan jika benda tersebut melakukan gerak dengan lintasan berbentuk lingkaran dan kelajuan konstan. Walaupun kelajuannya konstan namun benda dipercepat karena arah kecepatan selalu berubah, yang merupakan garis singgung pada titik-titik di sepanjang lingkaran. Jadi, walaupun yang mengalami perubahan hanya arah kecepatan, namun benda tersebut tetap mengalami percepatan. Kondisi ini adalah hal yang menarik pada gerak melingkar beraturan.



Gambar 1.15 *Vektor kecepatan dan percepatan pada gerak melingkar beraturan*

Pada gambar 1.15 ditunjukkan bahwa vektor kecepatan sesaat selalu merupakan garis singgung pada sebuah titik di lingkaran dan percepatannya selalu tegak lurus pada vektor kecepatan sesaatnya. Kedua vektor mempunyai besaran yang konstan, namun mempunyai arah yang berubah-ubah. Percepatan selalu terarah ke pusat secara radial, maka disebut percepatan sentripetal (yang berarti menuju pusat).



Gambar 1.16 *Vektor kecepatan dan percepatan pada benda yang bergerak melingkar beraturan.*

Untuk menentukan besar dan arah percepatan pada gerak melingkar beraturan, kita perhatikan gambar 1.16. Pada gambar 1.16 dapat dilihat bahwa sebuah benda bermassa m melakukan gerak melingkar dengan jari-jari r dan dengan kelajuan konstan. Pada sistem koordinat kartesian maka posisi benda yang berada di titik P bisa diuraikan ke sumbu x (x_p) dan sumbu y (y_p).

Komponen skalar kecepatan yang ditunjukkan pada gambar 1.16 adalah:

$$\vec{v} = v_x\hat{i} + v_y\hat{j} = (-v\sin\theta)\hat{i} + (v\cos\theta)\hat{j} \qquad (1.32)$$

Dari gambar 1.16 tampak bahwa sin $\theta = y_p/r$ dan cos $\theta = x_p/r$, sehingga persamaan 1.32 dapat ditulis kembali menjadi:

$$\vec{v} = \left(-v\frac{y_p}{r}\right)\hat{i} + \left(v\frac{x_p}{r}\right)\hat{j} \qquad (1.33)$$

Bila persamaan 1.33 didiferensialkan terhadap fungsi waktu maka didapatkan,

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a} = \left(-v\frac{dy_p}{rdt}\right)\hat{i} + \left(v\frac{dx_p}{rdt}\right)\hat{j} \qquad (1.34)$$

Persamaan 1.34 dapat ditulis kembali dalam bentuk persamaan,

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a} = \left(-\frac{v}{r}v_y\right)\hat{i} + \left(\frac{v}{r}v_x\right)\hat{j} \qquad (1.35)$$

di mana $v_y = \dfrac{dy_p}{dt}, v_x = \dfrac{dx_p}{dt}$

Substitusi persamaan 1.32 ke persamaan 1.35 didapatkan:

$$\vec{a}=\left(-\frac{v^2}{r}\cos\theta\right)\hat{i}+\left(-\frac{v^2}{r}\sin\theta\right)\hat{j} \qquad (1.36)$$

Dari persamaan1.36 didapatkan besarnya percepatan sentripetal sebagai:

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2}=\sqrt{\left(-\frac{v^2}{r}\cos\theta\right)^2+\left(-\frac{v^2}{r}\sin\theta\right)^2}=\frac{v^2}{r}\sqrt{\cos\theta^2+\sin\theta^2}=\frac{v^2}{r} \qquad (1.37)$$

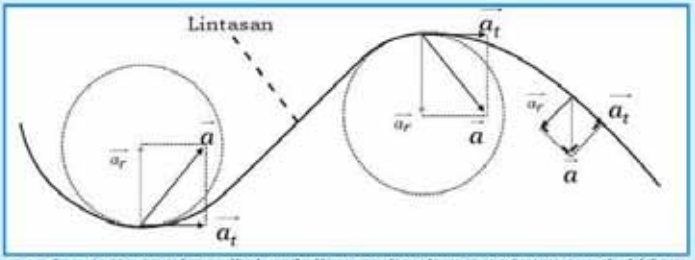
Untuk mengetahui arah percepatan $\vec{a}$, berdasarkan gambar 1.11 didapatkan:

$$\tan\phi=\frac{\left[-\frac{v^2}{r}\right](\sin\theta)}{\left[-\frac{v^2}{r}\right](\cos\theta)}=\tan\theta \qquad (1.38)$$

Persamaan 1.38 menunjukkan bahwa $\phi=\theta$ yang berarti percepatan sentripetal searah dengan r dan selalu menuju pusat lingkaran.

Percepatan Radial dan Tangensial

Sekarang marilah kita tinjau gerak sebuah partikel pada lintasan lengkung/kurva yang kecepatannya berubah baik besarnya maupun arahnya, seperti diperlihatkan pada gambar 1.17. Gambar 1.17 memperlihatkan partikel yang bergerak sepanjang lintasan lengkung, baik besar maupun arah percepatannya berubah-ubah dari satu titik ke titik yang lain.



Gambar 1.17 *Gerak partikel pada lintasan lengkung sembarang pada bidang xy. Bila vektor kecepatan yang merupakan garis singgung kurva berubah arah dan besarnya, maka percepatan yang menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan tersebut mempunyai dua komponen yaitu komponen tangensial, $\vec{a}_t$ yang arahnya selalu menyinggung kurva dan percepatan radial, a_r yang selalu menuju ke pusat lengkungan*

Vektor percepatan ini dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu percepatan tangensial $\vec{a_t}$ yang menyebabkan terjadinya perubahan besar kecepatan linier dan percepatan radial $\vec{a_r}$ yang selalu menuju pusat kelengkungan dan menyebabkan terjadinya perubahan arah kecepatan. Secara matematik vektor percepatan total $\vec{a}$ dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{a} = \vec{a_t} + \vec{a_r} \qquad (1.39)$$

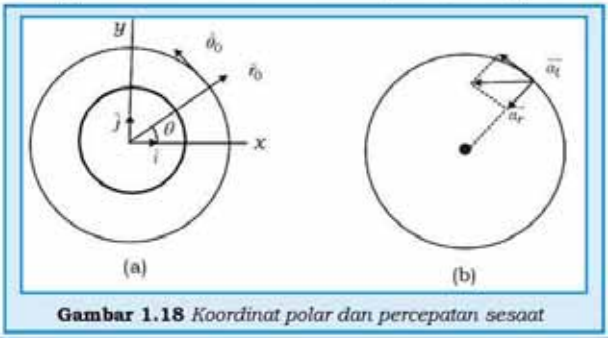
di mana $\vec{a}_t = \frac{d|\vec{v}|}{dt}$ adalah komponen percepatan tangensial

dan $\vec{a}_r = \frac{\vec{v}^2}{r}$ adalah komponen percepatan radial.

Seperti biasanya $\vec{r}$ adalah jari-jari kelengkungan.

Besarnya percepatan total adalah $a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2}$. Seperti ditunjukkan pada gambar 1.18(b), percepatan radial mempunyai harga yang besar bila jari-jari kelengkungan kurva kecil dan harga $\vec{a_r}$ kecil bila jari-jari kelengkungan kurva besar. Percepatan tangensial arahnya sama dengan arah $\vec{v}$ bila kecepatan membesar dan berlawanan dengan arah $\vec{v}$ bila kecepatan berubah mengecil. Gerak melingkar beraturan (GMB) adalah kasus khusus dari gerak benda pada lintasan lengkung, karena pada GMB besarnya $\vec{v}$ konstan maka percepatan tangensialnya $\vec{a_t} = 0$.

Untuk mendeskripsikan partikel yang bergerak pada lintasan lengkung atau lintasan lingkaran, lebih mudah dan representatif, maka perlu digunakan sistem koordinat polar, lihat gambar 1.18(b).



Gambar 1.18 *Koordinat polar dan percepatan sesaat*

Pada gambar 1.18(a) ditunjukkan bahwa partikel bergerak dalam lintasan berbentuk lingkaran, percepatan partikel dapat dinyatakan dalam vektor satuan. Seperti pada koordinat kartesius, masing-masing vektor satuan searah dengan arah positif masing-masing sumbu. Pada gambar 1.18(a) ditunjukkan bahwa vektor satuan $\vec{i}$ searah dengan arah sumbu x positif dan vektor satuan $\vec{j}$ searah dengan sumbu y positif. Maka dengan cara yang sama vektor satuan $\hat{r}_0$ searah dengan jari-jari lingkaran yang arahnya keluar, sedang vektor satuan $\hat{\theta}_0$ yang arahnya sama dengan arah garis singgung di suatu titik pada lingkaran dan arahnya positif bila berlawanan arah dengan arah jarum jam.

Karena partikel bergerak sepanjang lintasan lingkaran, maka vektor satuan $\hat{r}_0$ dan $\hat{\theta}_0$ selalu bergerak bersama partikel, sehingga bagi pengamat yang diam, vektor satuan $\hat{r}_0$ dan $\hat{\theta}_0$ selalu berubah. Secara vektor, percepatan total bagi partikel yang bergerak dalam lintasan lingkaran dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_r = \frac{d|v|}{dt}\hat{\theta}_0 + \frac{v_2}{r}\hat{r}_0 \qquad (1.40)$$

Percepatan sentripetal pada gambar 1.18(b) adalah percepatan radial yang bertanda negatif karena arahnya menuju ke pusat lingkaran.

Untuk meningkatkan kemampuan akademik dan personal kalian, perhatikan contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal 1.6

Sebuah bola terikat pada ujung tali yang panjangnya 1 m dan ujung tali yang lain diikatkan pada paku, sehingga bola bergerak dalam lintasan berbentuk lingkaran vertikal dengan jari-jari 1 m (panjang tali penggantung bola) karena dipengaruhi oleh percepatan gravitasi. Pada saat tali membentuk sudut 15° dengan garis vertikal, kelajuan bola sebesar 2 m/s, percepatan gravitasi diambil 10 m/s².

a. Tentukan percepatan radial pada saat tersebut!



Gambar 1.19 *Skema bola yang tergantung pada tali bergerak pada lintasan vertikal*

b. Tentukan besar dan arah percepatan total pada saat tersebut!

Penyelesaian:

a. Besarnya percepatan radial pada saat kelajuan $v = 2$ m/s untuk bola yang berotasi dengan jari-jari 1 m adalah:

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \frac{2^2}{1} = 4\,m/s^2$$

b. Karena bola yang berotasi pada lingkaran vertikal dipengaruhi percepatan gravitasi, maka percepatan tangensial bola adalah komponen percepatan gravitasi yang menyinggung lintasan lingkaran,
$a_t = g \sin \theta = 10 \sin 15^\circ = 2{,}6$ m/s^2.
Jadi, besarnya percepatan total a adalah:

$a = \sqrt{(16+6{,}76)} = 4{,}77\,\text{m/s}^2$ dan arah percepatan totalnya adalah: $\tan \phi = \frac{a_t}{a_r} = \frac{2{,}6}{4} = 0{,}65$

Contoh Soal 1.7

Bulan mengelilingi bumi dengan orbit yang hampir berbentuk lingkaran dengan jari-jari sekitar 394000 km dan periode T selama 28,3 hari.

Tentukan besarnya percepatan bulan menuju bumi

Penyelesaian:

Dalam mengorbit bumi, bulan menempuh jarak $2\pi r$, dengan $r = 3{,}94 \times 10^8$ m yang merupakan jari-jari lintasan melingkarnya. Laju bulan dalam orbitnya mengitari bumi adalah:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2(3{,}14)(3{,}94\times10^8\,\text{m})}{(28{,}3\,\text{hari})(24\,^{\text{jam}}/_{\text{hari}})(3600\,^{\text{s}}/_{\text{jam}})}$$

$$= 1{,}01 \times 10^3\ \text{m/s}$$

Oleh karena itu

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \frac{(1{,}02 \times 10^3 \text{ m/s})^2}{(3{,}94 \times 10^8 \text{ m})} = 0{,}00272 \text{ m/s}^2$$

$$= 2{,}72 \times 10^{-3}$$

atau kira-kira $2{,}78 \times 10^{-4}$ g, dengan g = 9,8 m/s² adalah percepatan gravitasi pada permikaan bumi.

Rangkuman

1. Kecepatan dan kelajuan rata-rata partikel dirumuskan:

   $\vec{v}_{rt} = \frac{\vec{x}_2 - \vec{x}_1}{t_2 - t_1}$ dan $\bar{v} = \frac{\text{jarak total}}{\Delta t}$

2. Kecepatan sesaat partikel diperoleh dengan mengambil harga limit dari kecepatan rata-rata untuk Δt mendekati nol, yaitu: $\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{d\vec{x}}{dt}$

3. Kelajuan sesaat adalah harga magnitude/mutlak dari kecepatan sesaat, yaitu: $v = |\vec{v}|$

4. Percepatan rata-rata sebuah partikel yang bergerak dengan kecepatan berubah dari $\vec{v_1}$ pada saat t_1 menjadi $\vec{v_2}$ pada saat t_2 adalah: $\bar{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1}$

5. Percepatan sesaat adalah harga limit percepatan rata-rata untuk Δt mendekati nol, yaitu:

   $\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{x}}{dt^2}$

6. Lokasi sebuah partikel relatif terhadap titik asal sistem koordinat disebut vektor posisi yang dapat dinyatakan sebagai: $\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$

7. Vektor perpindahan partikel dirumuskan:

   $\Delta\vec{r} = \vec{r_2} - \vec{r_1}$

   $\Delta\vec{r} = (x_2 - x_1)\hat{i} + (y_2 - y_1)\hat{j} + (z_2 - z_1)\hat{k}$

8. Kecepatan rata-rata, $\vec{v_r}$ dirumuskan:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\vec{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\vec{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t}\vec{k}$$

9. Kecepatan sesaat yang diperoleh dari harga limit kecepatan rata-rata untuk Δt mendekati nol adalah:

$$\vec{v} = \frac{d}{dt}\left(x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}\right) = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k} \text{ atau } \vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k}$$

10. Bila sebuah benda yang bergerak mengalami perubahan kecepatan dari $\vec{v_1}$ ke $\vec{v_2}$ dalam interval Δt, maka percepatan rata-ratanya $\bar{a}$ selama Δt adalah:

$$\bar{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

dan percepatan sesaatnya adalah: $\vec{a} = \frac{dv_x}{dt}\vec{i} + \frac{dv_y}{dt}\vec{j} + \frac{dv_z}{dt}\vec{k}$

atau $\vec{a} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k}$

11. Dengan menggunakan notasi vektor-vektor posisi dan vektor kecepatan gerak peluru dinyatakan sebagai:

$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j}$ dan $\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j}$

12. Bila peluru ditembakkan dengan kecepatan awal v_0 dan dengan sudut elevasi θ_0 dari titik dengan koordinat (x_0, y_0) pada saat $t = 0$ s maka pada saat t komponen skalar vektor posisi dan kecepatannya adalah:

$x - x_0 = (v_0 \cos \theta_0)t$

$v_x = v_0 \cos \theta_0$

$y - y_0 = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$

$y - y_0 = (v_0 \sin \theta_0)t - \frac{1}{2}gt^2$

$v_y = v_0 \sin \theta_0 - gt$

$v_y^2 = (v_0 \sin \theta_0)^2 - 2g(y - y_0)$

13. Persamaan lintasan peluru dinyatakan sebagai:

$$y=(\tan\theta_0)x-\frac{gx^2}{2(v_0\cos\theta_0)^2}$$

14. Kecepatan sesaat peluru pada saat t dapat dituliskan sebagai: $\vec{v}=v_x\vec{i}+v_y\vec{j}=v_0\cos\theta_0\vec{i}+(v_0\sin\theta_0-gt)\vec{j}$

15. Besarnya kelajuan proyektil pada setiap saat adalah besarnya magnitude kecepatan sesaat, yaitu:

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=\sqrt{(v_0\cos\theta_0)^2+(v_0\sin\theta_0-gt)^2}$$

16. Arah kecepatan sesaat ditentukan oleh: $\theta=\frac{v_y}{v_x}$

17. Jarak tembak peluru/jangkauan horizontal peluru diperoleh dari $y = 0$, diperoleh:

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

18. Titik tertinggi yang dapat dicapai peluru diperoleh dari kondisi $v_y = 0$, dinyatakan sebagai:

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

19. Kecepatan sesaat partikel di titik P yang terletak pada lingkaran

$$\vec{v}=(-v\sin\theta)\vec{i}+(v\cos\theta)\vec{j}=\left(-v\frac{y_p}{r}\right)\vec{i}+\left(v\frac{x_p}{r}\right)\vec{j}$$

20. Percepatan sesaat di titik P:

$$\vec{a}=\left(-v\frac{dy_p}{rdt}\right)\vec{i}+\left(v\frac{dx_p}{rdt}\right)\vec{j}=\left(-\frac{v^2}{r}\cos\theta\right)\vec{i}+\left(-\frac{v^2}{r}\sin\theta\right)\vec{j}$$

besarnya $\vec{a}$ adalah:

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2}=\frac{v^2}{r}$$

arah percepatan $\vec{a}$ adalah $\phi=\frac{a_y}{a_x}=\tan\theta$

21. Vektor percepatan total $\vec{a}$ sebuah partikel yang bergerak pada lintasan lingkaran dinyatakan sebagai:

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_r = \frac{d|v|}{dt}\hat{\theta}_0 + \frac{v^2}{r}\hat{r}_0$$

22. Besarnya percepatan total adalah $a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2}$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Sebuah benda bergerak lurus dengan persamaan $x = 3t^3 + 4t^2 + 6$. x dalam m, t dalam s. Kecepatan partikel pada $t = 2$ s adalah . . . .
   a. 20 m/s
   b. 36 m/s
   c. 48 m/s
   d. 52 m/s
   e. 64 m/s

2. Sebuah partikel bergerak dengan rumus perpindahan: $s = 5t^2 + 10$. s dalam meter, t dalam sekon.
   (1) Besar jarak tempuh pada t = 2 sekon adalah 20 m/s.
   (2) Besarnya kecepatan partikel pada t = 2 sekon adalah 20 m/s.
   (3) Besarnya percepatan partikel pada saat t =2 sekon adalah . . . . ^{2}.
   (4) Partikel melakukan gerak lurus beraturan

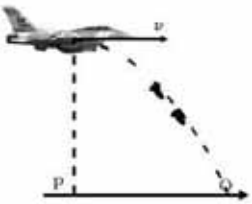
   Pernyataan yang benar adalah . . . .
   a. 1,2,3
   b. 1,3
   c. 2,4
   d. 4 saja
   e. semua benar

3. Mobil bergerak dengan percepatan $a = 2t$. a dinyatakan dalam m/s^2 dan t dalam sekon. Ketika mobil bergerak 3 sekon, kecepatan mobil sebesar 13 m/s dan menempuh jarak 23 m.

(1) Persamaan percepatan mobil dinyatakan: $v = t^2 + 2$
(2) Kecepatan rata-rata mobil pada $t = 2$ s sampai $t = 5$ s adalah 14,78 m/s
(3) Persamaan posisi yang ditempuh mobil adalah: $s = \frac{1}{3}t^3 + 4t$
(4) Setelah bergerak selama 9 sekon mobil menempuh jarak 281 meter.

Pernyataan benar adalah . . . .

a. 1,2,3
b. 1,3
c. 2,4
d. 4
e. 1,2,3,4

4. 

Sebuah pesawat terbang bergerak mendatar dengan kecepatan 200m/s melepaskan bom dari ketinggian 500 m. Jika bom jatuh di Q dan $g = 10$ m/s^2, maka jarak PQ adalah . . . .

a. 500 m
b. 1.000 m
c. 1.500 m
d. 1.750 m
e. 2.000 m

5. Peluru ditembakkan condong ke atas dengan kecepatan awal $v = 1{,}4 \times 10^3$ m/s dan mengenai sasaran yang jarak mendatarnya 2×10^5 m. Bila percepatan gravitasi = 9,8 m/s^2, maka sudut elevasinya n derajat, n adalah . . . .

a. 10
b. 30
c. 45
d. 60
e. 75

6. Partikel bergerak pada bilangan xy dengan persamaan
$x = (4t^2 + 4t)$
$y = (28\ t^2 + 2)$
satuan dalam SI. Bila kecepatan benda pada saat $t = 2$ s adalah $\left(20\hat{i} + 32\hat{j}\right)$ m/s.
Maka besar percepatan pada saat $t = 4$ s adalah . . . .
a. $4\ m/s^2$
b. $4\sqrt{2}\ m/s^2$
c. $8\ m/s^2$
d. $8\sqrt{5}\ m/s^2$
e. $16\sqrt{2}\ m/s^2$

7. Partikel berotasi dengan posisi sudut $\theta = (2t^2 - 2t)$ rad. Bila kecepatan sudut partikel pada saat $t = 2$ s adalah 14 rad/s, maka kecepatan sudut rata-rata untuk interval $t = 1$ sampai $t = 3$ s adalah . . . .
a. 12 rad/s
b. 14 rad/s
c. 16 rad/s
d. 18 rad/s
e. 220 rad/s

8. Sebuah bandul besi yang massanya 100 gram diikat dengan tali yang panjangnya 50 cm. Ke bandul tersebut diputar di atas meja licin dengan ujung tali sebagai pusatnya. Jika percepatan tangensial bandul 0,5 m/s^2 dan berputar selama 4 detik, maka
(1) Besarnya kecepatan sudut bandul adalah 8 rad
(2) Besarnya sudut yang ditempuh bandul adalah 8 rad
(3) Bandul mengalami percepatan sudut sebesar $0{,}5\sqrt{2571}\ m/s^2$
(4) Gaya tegangan tali bandul pada saat $t = 4$ s sebesar 0,8 N
Pernyataan yang benar adalah . . . .
a. 1,2,3
b. 1,3
c. 2,4
d. 4
e. semua benar

9. Sebuah mobil melaju pada lintasan lingkaran berjari-jari b. Kelajuan mobil (v) bergantung waktu (t), dinyatakan $v = c.t$, di mana c adalah tetapan positif sudut yang dibentuk antara kecepatan dan percepatan pada saat $t = \sqrt{\frac{b}{c}}$ adalah . . . .

a. 30°
b. 45°
c. 60°
d. 53°
e. 90°

10. Posisi sudut suatu partikel yang bergerak melingkar dengan jari-jari 10 cm adalah $\theta = \frac{3}{2}t^2 - t$, dengan θ dinyatakan dalam radian dan t dalam detik. Besarnya percepatan tangensial, percepatan normal/linear dan percepatan total partikel tersebut setelah 1 sekon . . . .

a. 0,3 m/s² ; 0,4 m/s² ; 0,8 m/s²
b. 0,6 m/s² ; 0,8 m/s² ; 1,0 m/s²
c. 0,4 m/s² ; 0,3 m/s² ; 0,5 m/s²
d. 0,8 m/s² ; 0,6 m/s² ; 1,0 m/s²
e. 0,3 m/s² ; 0,4 m/s² ; 0,5 m/s²

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Vektor posisi sebuah partikel ($\vec{r}$) sebagai fungsi waktu (t) dinyatakan $\vec{r} = (6 + 2t^2)\,2\hat{i} + (3 - 2t + 3t^2)\,\hat{j}$, di mana $\vec{r}$ dinyatakan dalam meter dan t dalam sekon.
   a. Tentukan kecepatan partikel pada saat $t = 2$ s! Berapa kelajuan partikel saat itu?
   b. Tentukan pula percepatannya pada saat $t = 2$ s? Berapa pula perlajuannya?
2. Sebuah benda dilempar dari menara setinggi 20 m, kelajuan awalnya 100 m/s, terjadi pada sudut elevasi 30°, dan percepatan gravitasi bumi $g = 10$ m/s².
   a. Tentukanlah dimanakah benda jatuh, dan berapa lama benda itu melayang!
   b. Jelaskan pula, seandainya benda itu dilempar dari ketinggian nol, dan lintasan benda setelah berketinggian 20 meter. Berkondisi serupa dengan hasil pelemparan dari ketinggian 20 meter pada persoalan itu. Tentukan pula sudut elevasi peluru (β) ketika di B'!

3. Sebuah pertikel bergerak di bidang datar berkoordinat kartesian, dengan kecepatan ($\vec{v}$) tergantung waktu (t), dinyatakan: $\vec{v} = (5\vec{i} + (12 - 10\ t)\vec{j})$ m/s. Diketahui pada saat awal ($t = 0$), partikel berada di koordinat (0,0). Hitunglah komponen kecepatan di sumbu y pada saat:
   a. $y = 7{,}2$ m!
   b. $y = 3{,}6$ m!
4. Sebuah partikel bergerak lurus dengan percepatan $a = 25 - 5\ v$ dengan a dinyatakan dalam m/s^2 dan v dalam m/s. Turunkan rumus perpindahan dan kecepatan sebagai fungsi waktu!
5. Sebuah benda mula-mula diam ($\theta_0 = 0^\circ$ dan $\omega_0 = 0$ ketika $t = 0$). Benda ini dipercepat dalam suatu lintasan melingkar berjari-jari 4 m menurut persamaan $\alpha = 24t^2 - 18t$. Hitung:
   a. Posisi sudut sebagai fungsi waktu!
   b. Kecepatan sudut sebagai fungsi waktu!
   c. Percepatan tangensial!
   d. Percepatan sentripetal!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawabanmu dengan teman-temanmu. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab II



Gerak Planet

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menganalisis keteraturan gerak planet dalam tata surya berdasarkan hukum-hukum newton.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

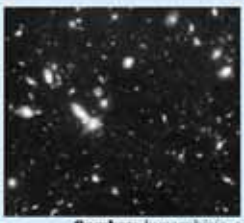
1. Planet
2. Periode
3. Massa
4. Jari-jari orbit

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:

1. Kehebatan teori kosmologi klasik
2. Aplikasi Hukum Newton (hukum gravitasi)
3. Persamaan untuk peluncuran roket
4. Sistem tata surya

Lagu bintang kecil yang biasa dinyanyikan oleh anak-anak TK mengingatkan kita betapa indahnya cahaya bintang yang menghiasi langit yang cerah di waktu malam, lihat gambar 2.1. Fenomena tersebut adalah salah satu contoh peristiwa semesta yang dipelajari dalam fisika. Cahaya bintang cemerlan membawa daya tarik tersendiri untuk mengetahui misteri di balik semua itu. Bulan purnama memberi keindahan tersendiri di waktu malam, namun apa yang sebenarnya terjadi di balik gerhana bulan tersebut? Banyak cerita dan legenda yang menyajikan versi tersendiri untuk mengungkap rahasia alam semesta.

Banyak orang yang percaya bahwa astronomi adalah ilmu yang didasarkan pada aktivitas seseorang dalam melakukan pengamatan secara murni terhadap fenomena alam. Mereka tidak perlu menjelaskan bagaimana dan mengapa bisa terjadi. Namun untuk perkembangan selanjutnya, semua fenomena alam semesta yang teramati tersebut dapat dijelaskan dengan menggunakan konsep fisika, sehingga muncullah cabang ilmu baru dalam fisika yang disebut astrofisika. Jadi, astrofisika adalah ilmu fisika yang diterapkan untuk menganalisis fenomena alam semesta secara luas, termasuk fenomena yang terjadi dalam jagad raya. Ilmu yang khusus mempelajari asal-usul alam semesta dan karakteristiknya disebut kosmologi. Renungkan, bagaimana kita semua berada di dalam alam semesta ini?



Sumber: *hyperphisic.com*

Gambar 2.1 *Cahaya bintang-bintang di waktu malam.*

Kemajuan dalam kosmologi di zaman dulu mengalami berbagai kendala. Kendala ini dipengaruhi berbagai faktor di antaranya, kepercayaan terhadap Tuhan dan pengamatan yang tidak didukung oleh peralatan modern. Akibatnya data yang diperoleh kurang akurat dan masih bersifat spekulasi, demikian pula dalam menganalisisnya. Spekulasi muncul karena kita tidak bisa langsung terbang ke sana, bukan? Seiring dengan perkembangan pengetahuan dan teknologi, berbagai usaha untuk mendapatkan peralatan modern untuk pengamatan dan pengumpulan data terus dilakukan.

A. Kehebatan Teori Kosmologi Klasik

Ahli astronomi pertama yang sangat terkenal ialah **Thales** dari Yunani. Ia meramalkan gerhana Matahari yang terjadi tahun 585 SM dengan mengembangkan karya ahli astronomi Mesir dan Babylonia yang dapat meramalkan gerhana Bulan. Thales adalah orang Yunani pertama yang meletakkan dasar ilmu astronomi yang dikembangkan selama empat abad berikutnya. Kemudian Anaksimander, salah seorang muridnya menyadari bahwa permukaan Bumi itu lengkung.



Sumber: *Dok. Penerbit*

Gambar 2.2 *Teori Phytagoras tentang alam semesta*

Pythagoras (580-500 SM) menyatakan bahwa bumi itu suatu bola bundar dan berotasi pada sumbunya. Matahari, bulan, bintang dan planet-planet berevolusi mengitari pusat api (bukan matahari), yang berbentuk bola dan berisi udara, lihat gambar 2.2. Kehebatan Pythagoras adalah peletakan dasar yang sangat fundamental bahwa bumi berputar dan bukan pusat alam semesta.

Aritarkhus menyatakan bahwa Bumi dan planet yang lain bergerak mengelilingi Matahari, **Eratosthens** menghitung besarnya Bumi. Astronomer Yunani yaitu **Aristoteles** (384-322SM) dan **Plato** (427-367SM), pada waktu itu, kedua ilmuwan tersebut mendominasi cara berpikir ilmiah, dan berpendapat bahwa bumi adalah pusat Alam Semesta dan semua benda yang lain bergerak mengelilinginya. Plato berpedoman bahwa lingkaran yang tidak berawal dan berujung merupakan bentuk yang sangat sempurna. Oleh karena itu, benda-benda langit harus bergerak dalam lingkaran, dan alam semesta yang sangat sempurna ini di ciptakan oleh Tuhan. Bumi juga seharusnya diciptakan dalam bentuk bola, alam semesta juga. Planet-planet bergerak dalam orbit lingkaran dengan kecepatan yang berbeda. Venus dan Merkurius bergerak dari arah barat ke timur, tetapi benda-benda langit yang lain bergerak dalam arah yang sama seperti pergerakan arah matahari yaitu dari timur ke barat.

Plato sedikit memperhatikan tentang gerak benda-benda langit, dia tidak memberitahukan bahwa gerak yang nampak ke arah barat dari Merkurius dan Venus terjadi hanya selama bagian dari orbitnya (ketika planet tersebut nampak cemerlang). Plato telah memberikan suatu konstribusi yang dijabarkan oleh Phytagoras yaitu bahwa bumi berbentuk bola dan bergerak melingkar dari planet-planet.

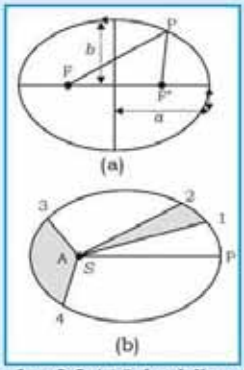
Kenyataan yang terjadi bahwa gerakan planet-planet tidak semudah yang digambarkan oleh Plato. Planet luar sebagian besar bergerak dari timur ke barat, tetapi kadang-kadang nampak bergerak membalik atau mundur (*retrograte).* Pergerakan ini mudah untuk dipahami jika matahari sebagai pusatnya, lihat gambar 2.3, tetapi dengan memperkenalkan matahari sebagai pusatnya (heliosentris) yang pada waktu itu merupakan hal yang aneh bagi perkembangan ahli kosmologi.

Dalam model heliosentris urutan planet terdekat dari Matahari adalah Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus. Planet paling dekat dengan matahari daripada Bumi yaitu Merkurius dan Venus disebut planet dalam (inferior). Planet-planet yang jarak orbitnya jauh dari Matahari daripada Bumi yaitu Mars sampai Neptunus disebut planet luar (superior).

Tycho Brahe (1546-1601) adalah seorang astronomer dari Denmark yang berpandangan bahwa alam semesta menggunakan sistem geosentrik, menolak sistem Copernicus yang menyatakan bahwa bumi bukanlah pusat tata surya, tapi Mataharilah pusat tata surya, sedang planet-planet berevolusi mengelilinginya, tetapi menyarankan sebuah sistem tata surya yang mana planet-planet berevolusi sekitar Matahari. Namun, mereka telah meletakkan dasar yang fundamental dengan menyintesiskan model Copernicus.

Pengamatan yang dilakukan oleh Brahe mengilhami asistennya yaitu Johanes Kepler (1571-1630) yang menemukan bahwa:

1. Planet-planet secara nyata bergerak dalam orbit ellips dimana matahari terletak di salah satu titik fokusnya, pernyataan ini disebut hukum I Kepler. Kecepatan planet bertambah pada waktu mendekati matahari dan kecepatan berkurang pada saat menjahuinya, lihat gambar 2.3! Pada gambar 2.3 ditunjukkan bahwa matahari (S) berada di salah satu titik fokus (F) lintasan ellips, a adalah sumbu semimayor dan b adalah sumbu semiminor.

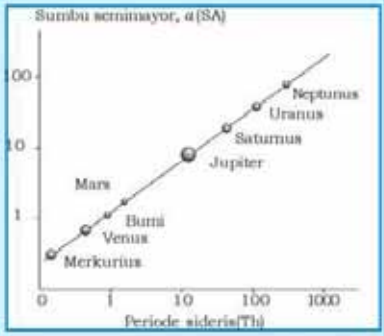


Gambar 2.3 *(a) Sebuah lintasan ellips, (b) Analisa hukum luasan dari Kepler*

2. Kepler mampu menunjukkan bahwa perubahan kecepatan berkaitan dengan garis kerja khayal antara planet-planet dengan matahari yang melingkupi luasan tertentu *(A)* dalam waktu yang sama, pernyataan ini disebut hukum II Kepler, gambar 2.3(b). Apabila waktu planet ketika bergerak dari titik 1 ke titik 2 sama dengan waktu planet ketika bergerak dari titik 3 ke titik 4 maka planet tersebut akan menyapu luasan yang sama, *A*.
3. Kuadratnya periode *(T)* Revolusi planet berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak rata-rata *(r)* terhadap matahari, pernyataan ini disebut hukum III Kepler, gambar 2.3. Pernyataan tersebut dapat dituliskan secara matematis:

$$\frac{T^2}{r^3} = K$$

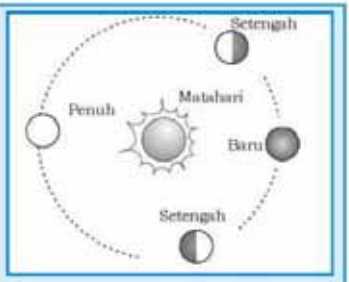
Di Italia tahun 1633, Galileo, sebagai ilmuwan, merupakan pionir dalam mengembangkan inovasi untuk menyelidiki benda-benda langit dengan menggunakan metode peng-amatan dan eksperimen. Dengan mengembangkan teleskop beliau telah berhasil menemukan 4 satelit besar dari Yupiter, dan dianalogikan seperti sistem bumi-bulan dan benda-benda langit yang lain. Penemuan fase Venus telah membantu teori heliosentris di mana Venus berevolusi mengitari matahari, lihat gambar 2.4! Penemuan bintik-bintik hitam pada Matahari (sunspot) telah menghancurkan doktrin Aristotelian. Akibat teorinya ini, Galileo memperoleh tuntutan hukum yang berat.



Sumber: *Dok. Penerbit*

Gambar 2.4 *Hukum III Kepler*

Kemajuan astronomi kemudian berpindah ke Inggris. Teori yang sejak lama dirintis di Yunani kuno, akhirnya secara gemilang berpuncak pada penemuan oleh Isaac Newton yang lahir pada tahun kematian Galileo, yaitu 1642. Newton mampu menjelaskan misteri siapa penyebab gerak planet-planet tersebut. Dengan memperhatikan gaya yang diperlukan untuk mempertahankan bulan dalam mengorbit bumi, Newton mendemonstrasikan bahwa gaya tarik gravitasi antara dua benda yang massanya berbeda besarnya berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pisah dan berbanding lurus dengan massanya. Hal yang menarik adalah bahwa Newton sudah mulai mengembangkan bentuk matematika dan kalkulus untuk menjelaskan hipotesisnya dan menempatkan gaya dari dua benda tersebut dihitung dari pusat massa tiap benda. Kehebatan Newton tidak terbatas pada hipotesis tentang gaya gravitasi, namun dapat menjelaskan hukum-hukum Kepler dan interaksi antara pasangan partikel dalam alam semesta.



Sumber: *Dok. Penerbit*

Gambar 2.5 *Fase Venus*

Pada tahun 1920 astronomer dari Amerika, Edwin Hubble mampu memecahkan permasalahan ini. Hubble mengisolasi nebula yang merupakan tipe dari variabel bintang yang kelihatannya identik

satu sama lain relatif dengan bintang terdekat. Jika jarak bintang terdekat bisa ditemukan maka dapat menentukan jarak ke nebula. Perhitungan jarak yang ditunjukkan oleh persamaan Hubble adalah:

$$v = H_0 r \quad (2.1)$$

di mana v adalah kecepatan menjauh, H_0 adalah konstanta Hubble yang besarnya $H_0 = \frac{50 \text{ km/s}}{\text{Mpc}}$, di mana Mpc adalah mega parsec (1pc = 3,086 × 10^{16} m) dan r adalah jarak.

Persamaan 2.1 memberikan inspirasi tentang umur alam semesta (t), di mana r adalah vt dikarenakan alam semesta selalu mengembang (teori big bang), sehingga persamaan 2.1 dapat ditulis:

$$v = H_0 vt \rightarrow t = \frac{1}{H_0} \quad (2.2)$$

di mana t adalah waktu awal sejak ekspansi dimulai, "umur" alam semesta dan disebut waktu Hubble. Dengan memasukkan harga H_0 kalian bisa menentukan nilai t yaitu t = 2 × 10^{10} tahun.

Seluruh Alam semesta mengembang dan dimulai 2 juta tahun yang lalu. Sedang umur bumi diketahui melebihi 4 juta tahun yang lalu. Ketidaksesuaian ini yang menjadikan perdebatan menarik. *Steady state* adalah suatu teori yang menyatakan bahwa tidak ada awal mengembang dan umur alam semesta adalah tak terhingga. Kontraversi ini terus dilakukan perbaikan untuk membongkar kerahasian alam semesta ini.

B. Aplikasi Hukum Newton (Hukum Gravitasi)

Di kelas X kalian pernah mempelajari tentang gerak melingkar, bukan? Hukum II Newton tentang gaya sentripetal dituliskan:

$$\vec{F}_{cent} = m\vec{a} = \frac{m\vec{v}^2}{R} \quad (2.3)$$

Jika T adalah periode benda yang berotasi, maka kecepatan:

$$\vec{v} = \frac{2\pi R}{T} \quad (2.4)$$

di mana: v = kecepatan benda berotasi (m/s)
R = jari-jari benda berotasi (m)
T = periode rotasi benda (s)

Tetapi hukum III Kepler yang berkaitan dengan periode dan jari-jari orbit:

$$T \propto R^{3/2} \rightarrow T^2 = kR^3 \qquad (2.5)$$

di mana k adalah konstanta pembanding.

Substitusi beberapa persamaan di atas didapatkan persamaan:

$$\vec{F}_{cent} = \frac{4\pi^2 m}{kR^2} \qquad (2.6)$$

Persamaan 2.6 adalah gaya yang dapat mempertahankan benda mengorbit terhadap benda lain yang besarnya berbanding terbalik kuadrat jarak (jari-jari orbit). Menurut hukum III Newton, benda yang bermassa M di pusat orbit merasakan gaya yang sama tetapi berlawanan arah. Karena gaya sentripetal bekerja pada pusat benda yang sebanding dengan massa M, sedangkan gaya gravitasi berbanding lurus dari perkalian kedua massa tersebut. Secara matematis dapat dituliskan:

$$\vec{F}_{grav} = G\frac{mM}{R^2} \qquad (2.7)$$

di mana G adalah konstanta pembanding yang disebut konstanta gravitasi dan besarnya dalam satuan SI adalah $6{,}67\times10^{-11}$ m^3/kg s^2. Gaya gravitasi adalah gaya tarik-menarik, maka dalam rotasi vektor dituliskan sebagai: $\vec{F} = -\frac{GmM}{R^2}\vec{R}_0$, $\vec{R}_0$ = vektor satuan searah R.

Untuk sistem tata surya, planet-planet bergerak menengelilingi Matahari, maka, besarnya gaya sentripetal sama dengan gaya gravitasi, dari persamaan 2.6 dan 2.7 didapatkan persamaan untuk nilai k_p:

$$\frac{4\pi^2 m}{kR^2} = G\frac{mM}{R^2} \rightarrow k = \frac{4\pi^2}{GM} \qquad (2.8)$$

KISI

Selama "Massa Kelam" di Eropa peradaban Islam terus mengembangkan ilmu astronomi. Ulugh Beigh (abad ke-15) membangun observatorium di Samarkand, Asia tengah, dimana dilakukan pengukuran dengan mata telanjang.



Dari informasi di atas maka kita juga dapat mengamati keadaan alam semesta dengan mata telanjang, asalkan mengetahui cara dan metode yang digunakan. Cobalah kalian mencari teori tentang pengukuran jarak planet-planet ke matahari kemudian praktekkan teori tersebut! Hal ini di maksudkan untuk mengembangkan etos kerja dan semangat kreatifitas kalian!

Persamaan 2.8 menunjukkan bahwa nilai k hanya tergantung pada massa primernya, yaitu massa benda yang dijadikan pusat orbit. Oleh karena, itu kedelapan planet dalam tata surya kita mempunyai nilai k yang sama. Sebaliknya, untuk bulan atau satelit buatan, maka harga k akan berbeda (tergantung pada massa pusat orbit (massa primer) misalkan bulan terhadap bumi maka harga k adalah:

$$k = \frac{4\pi^2}{GM_{\oplus}} \qquad (2.9)$$

di mana $M_{\oplus}$ adalah massa bumi.

Kelajuan planet dalam mengelilingi matahari dinyatakan dalam:

$$v^2 = \left(\frac{2\pi a}{T}\right)^2 \qquad (2.10)$$

Persamaan 2.5 dimasukan ke persamaan 2.10 didapatkan persamaan Newton-Kepler, yaitu:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \qquad (2.11)$$

Persamaan 2.11 menunjukkan bahwa hukum III Kepler adalah hukum yang menggambarkan pengaruh gravitasi, yang pada awalnya Kepler tidak mengungkapkan secara khusus tentang pengaruh gaya ini.

Untuk planet bumi yang mengitari Matahari:

$$M_{\odot} = \frac{4\pi r^2}{GT_{bm}^2} r_{bm\text{-}mth}^3 \qquad (2.12)$$

Hal yang serupa untuk sistem bumi-bulan maka untuk menentukan massa bumi:

$$M_{\oplus} = \frac{4\pi^2}{GT_{bl}^2} r_{bl\text{-}bm}^3 \qquad (2.13)$$

di mana T_{bl} adalah periode bulan terhadap bumi dan $r_{bl\text{-}bm}$ adalah jarak rerata orbit bulan-bumi.

Contoh Soal 2.1

Tentukan massa planet Uranus (M_u) yang dinyatakan dalam massa bumi. Miranda adalah salah satu bulan Uranus yang mengorbit planet Uranus selama 1,4 hari dengan jarak reratanya adalah 128.000 km. Dengan menggunakan sistem standar bulan-bumi, maka kita bisa menentukan massa panet dengan persamaan 2.12 dan 2.13, di mana massa Miranda diabaikan terhadap Uranus dan massa bulan diabaikan terhadap massa Bumi.

Persamaan 2.12 dan 2.13 dapat dituliskan kembali dalam bentuk:

$$\left(\frac{M_U}{M_\oplus}\right)\left(\frac{T_m}{T_{bl}}\right)=\left(\frac{r_{m\text{-}u}}{r_{bl\text{-}bm}}\right)^3 \Rightarrow M_U \approx \left(\frac{27{,}3hr}{1{,}4hr}\right)^2\left(\frac{128.000km}{384.000km}\right)^3 M_\oplus \approx 14M_\oplus$$

Hukum gravitasi yang bersifat universal akhirnya didemonstrasikan oleh astronomer abad ke-18 yaitu William Herschels (1738-1822). Dia telah menemukan bintang kembar yang mengorbit satu sama lainnya dan memenuhi hukum gravitasi yang diterapkan pada sistem tata surya yaitu:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M+m)}r^3 \text{ (buktikan)} \qquad (2.14)$$

di mana massa m tidak bisa diabaikan terhadap M.

Untuk meningkatkan **kemampuan personal dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Diskusikan dengan temanmu untuk membuktikan persamaan 2.14!

Persamaan 2.7 menjelaskan gaya tarik menarik antara dua titik massa. Mengapa benda bisa jatuh? Hal ini bisa diterangkan lewat konsep bahwa benda jatuh karena mempunyai gaya berat sebesar:

$$\vec{F}_{berat} = W = mg \qquad (2.15)$$

di mana g adalah percepatan gravitasi dari suatu planet tempat benda tersebut jatuh. Karena benda jatuh juga dipengaruhi oleh gaya gravitasi, maka besarnya harga g bisa ditentukan dari hasil substitusi persamaan 2.7 sama dengan persamaan 2.15.

$$G\frac{mM}{r^2} = mg \Rightarrow g = G\frac{M}{r^2} \qquad (2.16)$$

Persamaan 2.16 menunjukkan bahwa benda jatuh tidak dipengaruhi oleh massa benda yang jatuh.

Gaya gravitasi antara dua massa dapat dipandang sebagai gaya aksi pada jarak tertentu karena kedua massa tidak saling sentuh. Setiap partikel pada titik di sekitar benda bermassa mengalami gaya gravitasi karena di setiap titik di sekitar benda yang bermassa mendapat medan gravitasi dari massa tersebut. Pada semua titik

yang berjarak sama dari pusat massa ini akan mengalami medan gravitasi yang sama yang disebut sebagai g. Bila sebuah partikel di letakkan di titik yang medan gravitasinya g, maka partikel tersebut akan mengalami gaya sebesar $\vec{F} = mg$. Jadi medan gravitasi g dapat didefinisikan sebagai gaya gravitasi persatuan massa.

Contoh: untuk benda-benda yang dekat permukaan bumi mengalami gaya gravitasi yang arahnya menuju pusat bumi, maka medan gravitasi yang dialami benda-benda tersebut sama dengan percepatan gravitasi bumi, $g = \frac{\vec{F}_g}{M}$ sedangkan untuk benda-benda yang berjarak r dari pusat bumi maka besarnya medan gravitasi yang dialami benda tersebut adalah:

$$g = \frac{\vec{F}}{M} = \frac{GM_B}{r^2} \qquad (2.17)$$

yang tidak lain adalah sama dengan persamaan medan gravitasi dari yang dialami planet-planet arahnya selalu menuju pusat matahari dan besarnya adalah,

$$g = \frac{GM_{Matahari}}{r_{p\text{-}m}^2} \qquad (2.18)$$

Persamaan 2.18 hanya berlaku untuk benda-benda jauh di atas permukaan planet, sedangkan untuk benda-benda di permukaan planet, misalnya bumi $g = 9{,}8\ m/s^2$.

Energi potensial gravitasi untuk sistem partikel atau planet seperti telah didiskusikan pada bab usaha dan energi, besarnya energi potensial gravitasi yang dialami benda yang mengalami gaya tarik-menarik adalah negatif dan disajikan sebagai:

$$E_p = -\frac{GMm}{r} \qquad (2.19)$$

di mana r = jarak antara pusat massa M dari m

Bila terdapat tiga buah massa atau lebih yang masing-masing massa m_1, m_2, m_3, ... m_n maka masing-masing massa akan mempunyai energi potensial sebagai:

$$E_{pm1} = -\frac{Gm_1m_2}{r_{12}} - \frac{Gm_1m_3}{r_{13}} - \frac{Gm_1m_4}{r_{14}} \qquad (2.20)$$

Seperti terlihat pada persamaan 2.20 bahwa energi potensial pada massa tertentu sama dengan jumlah skalar energi potensial yang dihasilkan oleh interaksi massa tersebut dengan massa-massa yang lain.

Contoh: bulan mempunyai energi potensial sebagai hasil inetraksi bulan dengan bumi dan dengan matahari:

$$E_p = -\frac{GM_{\oplus}m_{bln}}{r_{\oplus-bln}} - \frac{GM_{\odot}m_{bln}}{r_{\odot-bln}} \qquad (2.21)$$

di mana $M_{\odot}$ = massa matahari, $M_{\oplus}$ = massa bumi, $r_{\odot-bln}$ = jarak matahari ke bulan, $r_{\oplus-bln}$ = jarak bumi bulan

C. Peluncuran Roket

Perhatikan sebuah benda yang dilempar vertikal ke atas dari permukaan Bumi. Dengan mengabaikan gaya gesek dari udara, maka semakin tinggi posisi benda, kecepatannya semakin berkurang sehingga pada saat mencapai ketinggian maksimum untuk $\vec{v} = 0$. Kita dapat menggunakan hukum kekekalan energi untuk menentukan ketinggian benda tersebut, yaitu h sebagai:

$$h = \frac{v^2}{2g} \qquad (2.22)$$

Dengan $g = 9{,}8\ m/s^2$, sebuah batu yang dilempar ke atas dengan kecepatan 14 m/s didapatkan harga $h = 10$ m dari permukaan bumi sebelum turun kembali ke bumi *(ground)*.

Apa yang terjadi jika ketinggian benda mencapai $h \geq R_{\oplus}$. Hukum kekekalan energi untuk roket yang ditembakkan ke atas dari permukaan bumi dengan kecepatan tembak:

$$\vec{v} = \frac{\vec{v}^2}{2} - \frac{GM_{\oplus}m}{R_{\oplus}} = -\frac{GM_{\oplus}m}{(R_{\oplus}+h)} \qquad (2.23)$$

di mana $(R_{\oplus}+h)$ adalah titik tertinggi yang dicapai roket

Etos kerja dapat ditingkatkan, salah satunya dengan mengerjakan kegiatan maupun soal-soal. Untuk itu, cobalah kalian kerjakan tugas di bawah ini!

Tugas 2.1

Persamaan 2.22 dapat disederhanakan secara aljabar dan dengan menggunakan deret didapatkan $g = \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$, diperoleh:

$$h = \frac{v^2}{2g}\left(\frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} - \frac{v^2}{2g}}\right) \qquad (2.24)$$

Tunjukkan persamaan 2.24!

Untuk $\frac{v^2}{2g} = h << R_\oplus$ sehingga persamaan 2.24 kembali ke persamaan 2.22. Jika $\frac{v^2}{2g} = R_\oplus \rightarrow v^2 = 2gR_\oplus$ maka benda mencapai ketinggian di tak terhingga. Oleh sebab itu, persamaan $v^2 = 2gR_\oplus$ disebut kelajuan kritis atau kelajuan lolos.

Roket lolos dari permukaan bumi berarti roket tidak dipengaruhi oleh medan gravitasi bumi. Untuk roket yang lolos maka $h >> R_\oplus$, $h \rightarrow \infty$ untuk persamaan 2.24 bila:

$h \rightarrow \quad R_\oplus - \frac{v^2}{2g} = 0$, $v_{lolos} = \sqrt{2gR_\oplus} = v_0\sqrt{2}$

Peluncuran satelit

Untuk sistem komunikasi dan penginderaan jarak jauh diperlukan satelit-satelit yang mengorbit bumi yang biasanya ditempatkan dalam orbit bumi, untuk mengorbitkan satelit, satelit harus diluncurkan dari permukaan bumi dengan kecepatan tertentu untuk mencapai posisi orbit yang diinginkan. Kecepatan peluncuran ditentukan dengan menggunakan hukum kekekalan energi mekanik yaitu:

$$\frac{1}{2}m\vec{v}_C^{\,2} - \frac{GMm_s}{R_\oplus} = \frac{1}{2}mv_{OR}^2 - \frac{GMm_s}{(R_\oplus + h)} \qquad (2.25)$$

di mana $\vec{v}_C$ = kecepatan luncur dari permukaan bumi, $\vec{v}_{OR}$ = kecepatan mengorbit, karena satelit mengorbit bumi, maka $\frac{GM_\oplus M_S}{(R_\oplus + h)^2} = \frac{m_s \vec{v}_{OR}^{\,2}}{(R_\oplus + h)}$ maka:

$$\frac{1}{2}m_s\vec{v}_{OR}^{\,2} = \frac{GM_\oplus m_s}{2(R_\oplus + h)} \qquad (2.26)$$

Persamaan 2.26 masuk ke persamaan 2.25 diperoleh:

$$m_g\vec{v}_C^{\,2} = \frac{GM_\oplus m_s}{R_\oplus}\left(2 - \frac{1}{\left(1 + \frac{h}{R_\oplus}\right)}\right), \text{untuk } h < R_\oplus, \text{Suku } \frac{1}{\left(1 + \frac{h}{R_\oplus}\right)} = 1 - \frac{h}{R_\oplus}$$

Tugas 2.2

Cek hasil ini dengan ekspansi binomial di pelajaran matematika

Jadi $v_C = \sqrt{\frac{GM_\oplus}{R_\oplus}} \cdot \sqrt{1+\frac{h}{R_\oplus}}$

Bila satelit mengorbit di dekat permukaan bumi, $h = 0$ maka

$v_C = v_0 = \sqrt{\frac{GM_\oplus}{R_\oplus}}$

Persamaan 2.27 dapat ditulis kembali menjadi $v_C = v_0\sqrt{1+\frac{h}{R_\oplus}}$

Bila satelit mengorbit bumi dalam lintasan ellips, maka kecepatan satelit dinyatakan sebagai $\vec{v_r}$

$v_r = \frac{2\pi a}{T}(e \sin \theta)\left(1-e^2\right)-½$

Gunakan persamaan 2.24 dan persamaan 2.25 untuk menunjukkan bahwa:

$$v_{lepas} = 2^{½} v_o \left(\frac{R_\oplus}{h+1}\right)^{-½} \qquad (2.27)$$

Sehingga untuk $h \to \infty$ kelajuan lepasnya adalah $v_{lepas} = 2½ v_o$. Perhatikan kelajuan lepas ini berasal dari Bumi bukan dari orbit satelit.

Orbit sebuah satelit buatan tergantung pada kecepatan yang dihasilkan oleh bahan bakar yang digunakan.

Besarnya kecepatan benda dalam mengorbit dengan lintasan berupa ellips adalah:

$$\vec{v_r} = \frac{2\pi a}{T}(e \sin \theta)(1-e^2)^{-1/2} \qquad (2.28)$$

Peramaan 2.14 disubstitusikan ke persamaan 2.26 didapatkan $(r = a)$ $v^2 = G(m_1 + m_2)[(2/r) - (1/a)$ dan persamaan ini disubstitusi dengan persamaan 2.28 sehingga didapatkan,

$$a = \frac{r}{\left[2-(v/v_c)^2\right]} \qquad (2.29)$$

di mana $m_1 = M_\oplus >> m_2 = M_{satelit}$

Persamaan 2.28 dapat ditulis dalam bentuk persamaan untuk injeksi kelajuan v :

$$v = (2 - r/a)^{1/2} \qquad (2.30)$$

Untuk ($r = a$) persamaan 2.29 menghasilkan $v = v_e$ dan jika $r << a$ maka peramaan 2.29 menjadi $v = 2^{1/2} v_e$ yaitu sebuah satelit yang mempunyai lintasan parabola di mana sumbu semi mayornya di tak terhingga. Untuk $v > 2^{1/2} v_e$ satelit mengorbit dengan lintasan hyperbola dan $v < 2^{1/2} v_e$ satelit kembali mengorbit dengan lintasan ellips.

Brilian

Berosilasi dalam terowongan bumi

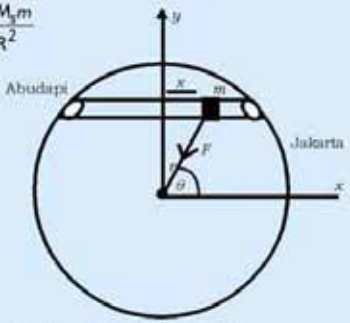
Bila kalian meletakkan bola di dalam sumur yang sangat dalam, gaya gravitasi bumi yang bekerja pada bola tersebut hanya ditentukan oleh massa bumi dan jari-jarinya adalah jari-jari bumi pada sumur tersebut. Dari gambar (2.6) terlihat dalamnya sumur $d = d = (R_\oplus - r)$,

maka berat bola dalam sumur, $W = \overline{F_B} = \dfrac{GM_s m}{R^2}$

M_s = massa bumi dengan jari-jari R_s

$$Ms = \left.\begin{matrix} M_s = \rho \frac{4}{3}\pi R_s^3 \\ M_\oplus = \rho \frac{4}{3}\pi R_\oplus^3 \end{matrix}\right\} M_s = \frac{R_s^3}{R_\oplus^3} M_\oplus$$

$$\overline{F_s} = \frac{Gm}{R_s^2} \cdot \frac{R_s^3}{R_\oplus^3} M_\oplus \rightarrow \overline{F_s} = \frac{GM_\oplus m}{R_\oplus^3} R_s$$



Gambar 2.6 *Gerak harmonik dalam terowongan*

1. Tunjukkan partikel m bergerak harmonik dalam terowongan!
2. Hitung periodenya!

Petunjuk

1. Gunakan persamaan di atas dengan $R_s = r$
2. Tentukan komponen gaya yang searah sumbu x
3. Tunjukkan bahwa F_x adalah komponen F yang searah x ; $F_x = -\dfrac{GmM_\oplus}{R_\oplus^3}\hat{x}$

D. Sistem Tata Surya

Sistem tata surya kita terdiri dari Matahari sebagai pusat orbit, 8 planet, asteroid, komet, dan debu angkasa. Ke-8 planet tersebut adalah Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, dan Neptunus. Keempat dari yang pertama disebut sebagai *planet terrestrial* (terra adalah bahasa latin yang berarti bumi) dikarenakan memiliki sifat kebumian.

Matahari memiliki keluarga besar yaitu planet-planet beserta bulan, asteroid, komet, yang puing-puingnya bisa dilihat sebagai meteor. Kesemuanya itu ada dalam pengaruh medan gravitasi Matahari, dan besarnya gravitasi di permukaan Matahari $(g_{\odot})$ secara matematis dituliskan:

$$g_{\odot} = G\frac{M_{\odot}}{R^2} \qquad (2.31)$$

di mana R adalah jari-jari matahari.

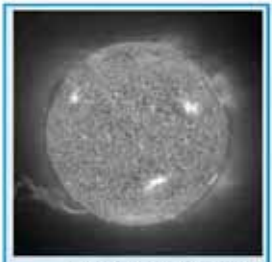


Sumber: *Jendela Iptek 14*

Gambar 2.7 *Gerak retrograte planet*

Akibat adanya pengaruh gravitasi Matahari maka secara keseluruhan dalam sistem tata surya kita bergerak sesuai dengan garis edarnya. Planet juga memiliki bulan yang mengitari mereka, seraya mereka mengitari matahari. Asteroid, komet dan meteor dan kesembilan planet semua bergerak mengitari Matahari dalam arah yang sama. Jika dipandang dari sebuah titik dalam antariksa jauh di atas kutub utara bumi, gerakan tersebut tampak melawan arah jarum jam. Semua planet juga berputar pada porosnya (berotasi) dalam arah lawan jarum jam, kecuali Venus dan Uranus. Sebagian besar (ada kecuali) sumbu rotasi planet hampir tegak lurus pada bidang ekliptik. Jika sudut inklinasi lebih kecil 90° planet berotasi dalam arah yang sama seperti planet mengorbit matahari dan dikatakan rotasi normal atau prograde (maju). Jika sudut inklinasi lebih besar dari 90° maka rotasi berlawanan terhadap arah orbitnya, dikatakan rotasi retrograde (mundur) dan sama seperti orbit pesawat ruang angkasa. Hanya Venus dan Uranus yang mempunyai orbit retrograde.

Berbagai bulan mengitari sebagian besar planet, jumlahnya berbeda-beda dari bulan tunggal untuk bumi hingga 14 bulan untuk Yupiter. Hanya Merkurius, Venus, dan Pluto tanpa bulan. Sebagian besar bulan mengorbit planetnya dalam arah lawan jarum jam, bergerak dalam suatu bidang sekitar katulistiwa planet (tegak lurus atas sumbunya). Bulan adalah satelit alamiah planet.



Sumber: *Jendela Iptek 14*
Gambar 2.8 *Matahari*

1. Matahari

Matahari adalah salah satu bintang terdekat dengan bumi kita, lihat gambar 2.8. Massa Matahari adalah $1{,}989\times10^{30}$ kg di mana hampir 99,8% dari massa keseluruhan dalam sistem tata surya, dan jari-jari reratanya adalah $6{,}96\times10^{8}$ meter atau sekitar 109×jari-jari bumi, lihat tabel 2.1. Energi Matahari sampai ke permukaan bumi dengan cara radiasi yang besarnya energi persatuan waktu adalah $3{,}85\times10^{26}$ watt. Di daerah perbatasan atmosfer bumi, energi matahari yang diterima adalah 1340 watt/m^2. Orbit bumi sekitar 1,47 sampai $1{,}52\times10^{11}$ meter dari matahari yang disebut 1 SA (satuan astronomi). Waktu rerata perjalanan cahaya ke bumi adalah 8,3 menit. Percepatan gravitasi di permukaan adalah 274 m/s^2 atau 28,0 kali percepatan gravitasi bumi. Kerapatan rerata 1410 kg/m^3 atau 0,255 kali kerapatan rerata bumi. Komposisi matahari terdiri dari 71% hidrogen, 27,1% helium dan kurang dari 2% untuk unsur-unsur yang lain. Suhu di pusat matahari dimodelkan sekitar 15,5 juta K dan suhu permukaannya adalah 5770 K. Bahan bakar matahari berasal dari **siklus proton** dengan proses reaksi fusi. Periode rotasi rerata matahari adalah 25,4 hari dan bervariasi dari 34,4 hari di daerah kutub dan 25,1 hari di daerah ekuator.

Permukaan yang tampak pada matahari adalah photosfer dimana pada lapisan ini mempunyai butiran-butiran (*granula*) terang yang dikelilingi butiran gelap yang kecil. Butiran-butiran yang terang mempunyai diameter 1500 km. Adanya butiran ini menggambarkan bahwa pada lapisan ini terjadinya sistem konveksi panas yang mana terjadi proses transformasi panas dari interior ke permukaan matahari.

Bintik hitam yang lebih dikenal *sunspot* terlihat ketika suhu matahari sekitar 3800 K. Titik pusat pada bagian yang gelap disebut umbra dengan diameter 30.000 km dan umbra ini dikelilingi oleh yang lebih terang yaitu penumbra yang berdiameter lebih dari 2

kalinya. Jumlah bintik-bintik hitam ini berubah seiring dengan perubahan waktu secara siklus yaitu sekitar 11 tahun dari perubahan maksimum ke minimum.

2. Merkurius

Merkurius adalah sebuah planet yang letaknya paling dekat dengan matahari. Garis tengahnya hanya sepertiga bumi. Karena letaknya dekat dengan matahari dan ukuran planet relatif kecil, maka sangat sulit untuk dilihat dengan mata atau dengan alat teleskop.



Sumber: *Jendela Iptek 14*

Gambar 2.9 *Planet Merkurius*

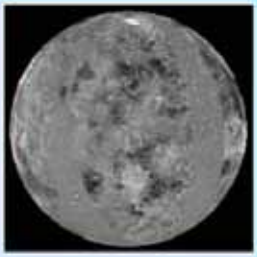
Planet merkurius kadang terlihat sebagai bintik hitam lewat di depan matahari yang disebut transit, dan terjadinya menyebabkan terjadinya fase-fase seperti bulan, lihat gambar 2.9.

Brilian

Untuk membuktikan bahwa planet merkurius sangat sulit untuk dilihat, coba kalian dekatkan ujung pensil ke bola lampu yang dihidupkan, apakah ujung pensil tersebut terlihat dengan mudah jika dibandingkan pada saat dijauhkan?

3. Venus

Venus merupakan planet terestrial kedua setelah Merkurius yang hanya dapat dilihat sebagai bintang pagi dan bintang sore. Walaupun Venus lebih dekat dengan bumi daripada planet lainnya, bagi kita planet Venus masih merupakan misteri. Bukan saja sulit diamati, karena alasan yang sama seperti Merkurius, tetapi seluruh planet ini senantiasa tertutup awan putih. Ini didapatkan dari nilai albedonya yang cukup tinggi 0,76. Sudut elongasi terbesar untuk Venus 48°, pada posisi ini didapatkan tingkat kecemerlangan maksimum.



Sumber: *Jendela Iptek 14*

Gambar 2.10 *Planet Venus*

Orbit Venus hampir berbentuk lingkaran dengan nilai $e = 0.0068$, sudut inklinasi 3,39° terhadap bidang ekliptik. Sumbu semimajornya adalah 0.7233 AU dan periode sideris 224,70 hari. Dari data penelitian dengan radar *Doppler-shift*, sistem menunjukkan bahwa planet Venus berotasi mundur dengan periode siderisnya 243,01 hari. Data lainnya bisa dilihat pada tabel 2.1 dan 2.2. Komposisi Venus hampir sama dengan planet Bumi yaitu terdiri dari kerak Venus yang berisi batuan, mantel dan unsur-unsur logam yang ada di pusat planet. Kandungan karbondioksida di venus melimpah yang mampu menyerap radiasi infra merah dalam jumlah yang besar sehingga menyebabkan suhu di permukaan pada saat Matahari bersinar terang ke permukaan Venus mencapai 730 K dan tekanan atmosfer mencapai 95 atm, peristiwa ini disebut **efek rumah kaca.**

4. Bumi

Bumi adalah suatu planet yang luar biasa. Jarak dari matahari ke bumi sekitar 1 SA membuatnya tidak terlalu panas dan tidak terlampau dingin. Daya panas yang dipancarkan ke bumi sekitar 10 W/m^2. Permukaan planet bumi yang terdiri dari sekitar 70% air yang berupa lautan dan 30 % daratan, lihat gambar 2.11.

Bumi mempunyai kerapatan rata-rata, $\langle\rho\rangle$, sebesar

$$\langle \rho \rangle = \frac{3M_{\oplus}}{4\pi R_{\oplus}^3} \qquad (2.32)$$

Berdasarkan tabel 2.1 dan persamaan 2.26 dapat ditentukan besarnya $\langle\rho\rangle$ = 5520 kg/m^3. Apa yang bisa kalian kemukakan bila harga kerapatan bumi dibandingkan dengan kerapatan air ($\langle\rho\rangle$ = 1000 kg/m^3)? Besarnya kerapatan di permukaan bumi 2800 kg/m^3 terdiri dari batuan, tentu bisa ditafsirkan bahwa bumi bagian dalam lebih rapat. Bumi dengan kedalaman 35 km dengan kerapatan 3300 kg/m^3 berupa kerak bumi. Pada kedalaman 2900 km dengan kerapatan 3400-5500 kg/m^3 berupa matel padat yang terdiri batuan silikat misal, olvine $(Mg,Fe)_2SiO_4$. Lapisan berikutnya dengan ketebalan 2200 km berupa inti bagian luar berupa cairan dengan kerapatan berkisar 9900 sampai 12000 kg.m^{-3}. Inti bagian dalam Bumi dengan jari-jari 1300 km berupa padatan mempunyai kerapatan 13000 kg.m^{-3}.



Sumber: *Jendela Iptek 12*

Gambar 2.11 *Planet Bumi*

Tugas 2.3

Berdasarkan pers. 2.32, tentukan berapa besar tekanan di pusat bumi! Diskusikan dengan teman sebangku, walaupun tekanan pusat bumi besar, mengapa tidak terjadi ledakan?

Atmosfer bumi terdiri dari lapisan troposfer, yang sebagian besar berperan dalam prakiraan cuaca. Pada lapisan ini banyak terkandung uap air, H_2O, N_2, O_2 dan CO_2 yang mampu mengabsorpsi radiasi infra merah. Akibatnya suhu pada lapisan semakin ke atas semakin menurun sampai pada ketinggian sekitar 15 km. Lapisan berikutnya adalah stratosfer, di mana suhu semakin ke atas semakin besar sampai pada ketingggian sekitar 40 km. Pada lapisan ini yang sangat berperan adalah lapisan ozon yang mampu menangkap radiasi ultraviolet.

Tabel 2.1 Data Fisis dari Tata Surya

Planet	Massa 10^{24} kg	Radius ekuator (km)	ρ rerata ($\times 10^3$ kg/m^3)	Gravitasi permukaan (=1)	Albedo	v lolos (km/s)	Pepatan	PeriodeRotasi sideris(hari)
Merkurius	0,33	2439	5,4	0,38	0,06	4,2	0	58,65
Venus	4,87	6.052	5,2	0,38	0,76	10,3	0	243
Bumi	5,97	6.378	5,52	0,38	0,4	11,2	0,0034	23jam56m 4,1s
Mars	0,64	3.393	3,9	0,38	0,16	5,1	0,0052	24jam 37m22,6s
Jupiter	1900	71.398	1,40	0,38	0,51	61	0,062	9jam50,5m
Saturnus	569	60	0,69	0,38	0,50	36	0,096	10jam14m
Uranus	87	25.559	1,19	0,38	0,66	21	0,06	17jam14m
Neptunus	103	24.8	1,66	0,38	0,62	24	0,2	16jam3m
Pluto	0,01	1.14	0,59	0,38	0,5	2,1	?	6,439
*Bulan	0,07	1.738	3,34	0,38	0,07	2,4	0,0006	27,3
*Matahari	199 × 1030 kg	696 × 108 m	1410kg/m3	0,38	-	6,18 × 105 m/s	-	25,4

Tabel 2.2 Data Fisis dari Tata Surya

Planet	Periode sinodis (hari)	Periode sideris		Sumbu semimajor		Eksentrisitas (e)	Inklinasi terhadap ekliptik (i)	Obliquity (O)
		sideris	tahun tropis	SA	10^6 km			
Merkurius	115,9	87,96	0,241	0,387	57,9	0,206	7,0	0,0
Venus	583,9	224,70	0,615	0,723	108,2	0,007	3,39	177,4
Bumi	-	365,26	1,000	1,000	149,6	0,017	0,00	23,5
Mars	779,9	686,98	1,881	1,524	228,0	0,093	1,85	25,2
Jupiter	398,9	4333	11,86	5,203	778,3	0,048	1,31	3,1
Saturnus	378,1	19.759	29,46	9,54	1427	0,056	2,49	26,7
Uranus	369,7	30.685	84,01	19,18	2871	0,047	0,77	98
Neptunus	367,5	60.188	164,8	30,06	4497	0,009	1,77	29
Pluto	366,7	248,6	248,6	39,44	5913	0,294	17,15	65

Obliquity didefinisikan sebagai inklinasi ekuator terhadap bidang orbit. Obliquity lebih besar dari 90o berimplikasi pada rotasi retrograde (rotasi mundur).

Kreasi Fisika

Dari data-data fisis pada tabel 2.1 dan 2.2 buatlah model planet-planet dan susunlah berdasarkan urutan, perbandingan jarak dan ukuran yang tepat. Buatlah model berdasarkan kreativitas imajinasi kalian, bisa dalam bentuk gambar, model dengan bahan kertas, tanah liat, malam, atau bahan-bahan yang lain. Bandingkan hasil karya kalian dengan hasil karya temanmu!

Lapisan ketiga adalah mesosfer. Di lapisan ini mempunyai ketinggian sampai 90 km dan suhunya mencapai 190 K. Pada lapisan ini semakin ke atas semakin naik suhunya sampai pada lapisan termosfer, yaitu pada interval ketinggian 90-250 km dan interval ini suhunya 1500-2000 K. Di atas lapisan termosfer adalah lapisan eksosfer. Eksosfer adalah lapisan paling atas di mana pada daerah ini dapat lepas ke ruang angkasa. Pada lapisan mesosfer sampai eksosfer (ketinggian 50-300 km) disebut lapisan ionosfer yang mana terjadi proses ionisasi molekul-molekul atom sehingga menambah elektron bebas. Proses ionisasi ini disebabkan adanya sinar-X dan sinar ultraviolet yang datang dari energi matahari atau bintang-bintang yang ada pada Galaksi Bima Sakti. Namun proses ionisasi yang terjadi secara alamiah maka keseimbangan dengan sendirinya. Karena elektron bebas akan rekombinasi secara cepat dengan ion-ion bermuatan positif. Kosentrasi oksigen, nitrogen, ozon, asam nitrit mempunyai perbedaan tingkatan pada lapisan ionisasi, dan secara keseluruhan sangat berguna untuk perlindungan dari energi radiasi matahari yang sangat berbahaya seperti energi ultraviolet.

Bumi mempunyai dwi kutub medan magnet, yaitu kutub utara dan selatan, di mana sumbunya mempunyai kemiringan 12^{o} terhadap sumbu rotasi bumi. *Effek Coriolis* membuktikan adanya kekuatan medan magnet. Dikarenakan kekuatan medan magnet menurun sebagai fungsi r^{-3} dengan jarak r dari bumi dan kerapatan atmosfer juga menurun secara eksponensial, maka keberadaan medan magnet sangat penting di samping atmosfer. Daerah yang masih dipengaruhi oleh medan magnet bumi dinamakan magnetosfer. Daerah ini bertemu dan berinteraksi dengan angin matahari, sehingga bentuknya seperti lintasan komet dikarenakan adanya tekanan angin matahari.

Magnetosfer melengkung akibat berinteraksi dengan angin matahari, namun tetap saja adanya partikel seperti proton dan elektron yang bisa menerobos lapisan ini. Partikel-partikel tersebut terperangkap oleh dwikutub medan magnet bumi. Peristiwa ini

dikemukan oleh A Van Allen 1958 yang dikenal sebagai sabuk Van Allen. Terjadilah pameran cahaya yang dinamakan Aurora yang terjadi pada waktu mereka menabrak atmosfer. Di kutub selatan dinamakan aurora australis dan di kutub utara aurora borealis.

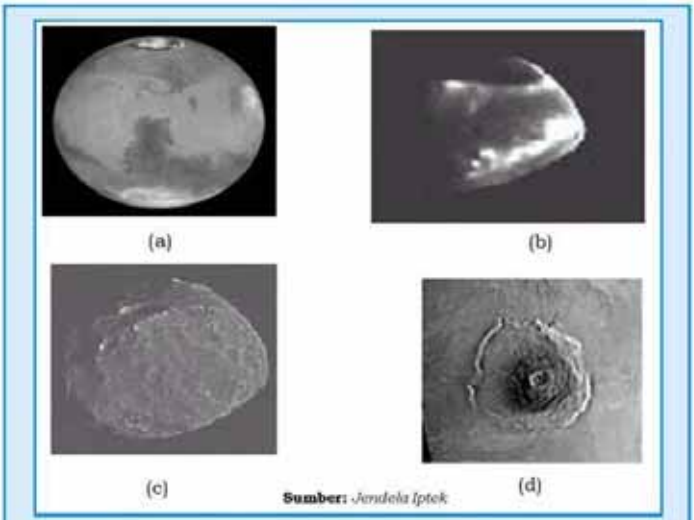
. . . . . **mengembangkan kemampuan sosial dan personal** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Coba kalian renungkan dan diskusikan dengan temanmu bagaimana kalau medan magnet dan atmosfer tidak ada di permukaan Bumi? Tentu semua partikel yang berbahaya bagi kehidupan kita akan terbawa oleh angin matahari masuk ke Bumi, bukan? Sebutkan partikel-partikel yang berbahaya dan langkah apa yang bisa kalian lakukan untuk melestarikan ini semua?

5. Mars

Planet Mars dikenal sebagai Planet Merah, lihat gambar 2.12(a). Dikarenakan warnanya merah maka dengan mudah untuk dilihat bila berada pada posisi terdekat dengan kita yaitu di posisi dengan jarak kurang lebih 56 juta km. Pada gambar 2.12 tampak adanya tanda-tanda terang dan gelap kemerahan dapat terlihat dengan 2 puncak kutubnya yang berwarna putih. Kutub putih tersebut diperkirakan sebagai karbon dioksida dan air. Tanda-tanda dan puncak kutub keduanya bisa berubah-ubah ukuran berdasarkan pada musim. Pergantian musim di planet Mars hampir sama dengan di planet Bumi dikarenakan mempunyai kemiringan sumbu yang hampir sama pula, lihat gambar 2.9. Mars mempunyai kecepatan berotasi yang hampir sama dengan Bumi, sehingga satu hari Mars hanya selisih sedikit lebih lama dari pada satu hari Bumi. Mars mempunyai 2 bulan yaitu **Phobos** dan **Deimos,** lihat gambar 2.12(b) dan 2.12(c). Suhu rerata di permukaan mencapai – 40°C, di bagian ekuator suhu naik sedikit di atas 0°C selama siang hari. Karena mempunyai karakteristis yang hampir sama dengan planet Bumi maka ada kemungkinan tanda-tanda kehidupan di planet Mars.



Gambar 2.12 *(a) Planet Mars; (b) Deimos; (c) Phobos; (d) Olympus Mons*

Sebagian besar permukaan Mars tertutup kawah, tetapi umumnya tidak sedalam kawah di Bulan, mungkin karena telah tererosi oleh badai pasir. Di antara ciri yang menyolok ialah dataran rendah yang amat luas dinamakan Hellas, yang terbentuk oleh benturan meteorit, sama seperti 'lautan' di bulan. Vulkano terbesar yang ada di Mars dan tampaknya terbesar dalam sistem tata surya kita adalah Olympus Mons, dengan diameter lebih dari 500 km dan ketinggian 3 kali dari gunung Everet yaitu sekitar 25 km dibandingkan dengan dataran di sekitarnya. Olympus Mons mempunyai volume 100 kali volume Mauna Loa di Hawai, lihat gambar 2.12(d). Dibandingkan dengan daerah lain di Mars hanya ada beberapa kawah yang menunjukkan secara geologi umurnya masih muda yaitu kurang dari 100 juta tahun.

Antara Hellas dan gunung api ada sebuah dataran tinggi yang terbelah oleh sebuah lembah celah sepanjang 5000 km. Dari dataran tinggi tersebut dan tempat lain lembah-lembah berliku meluas mirip saluran air. Tetapi kini air itu terikat di dalam puncak kutub, yang terbentuk dari es dan arang oksida beku, CO_2. Puncak-puncak itu mundur (berkurang) dan maju bertambah seiring dengan datangnya musim semi dan musim gugur. Es dan dioksida arang menguap ke atmosfer yang tipis menjelang musim panas, tetapi mengembun di permukaan tanah, menjelang musim dingin.

6. Jupiter



Sumber: *Jendela Iptek 14*
Gambar 2.13 *Planet Jupiter*

Planet Jupiter adalah planet Jovian yang pertama dalam sistem tata surya kita. Planet Jovian kebanyakan sangat besar, Yupiter adalah yang terbesar di antara semua planet kategori ini dengan garis tengah 11 kali bumi, dan volume lebih besar 1.000 kali lebih volume bumi. Karena besarnya dan albedonya 0,51 Yupiter menjadi planet yang cermerlang di malam hari khususnya saat di posisi jarak sumbu semimayor 5,2028 AU dan eksentrisitasnya rendah, yaitu 0,0484 dengan kemiringan 1,30° terhadap bidang ekliptik. Yupiter mempunyai periode sideris 11,862 tahun bumi sedang periode sinodis 398,88 hari, dengan kata lain Yupiter kembali ke posisi sekitar sebulan kemudian setelah setahun. Yupiter mempunyai gerak rotasi dengan kemiringan sumbu rotasi 3°,7' terhadap sumbu orbit. Periode sideris rotasi sangat bervariasi 9hari 50 menit sampai 9 hari 55 menit pada ketinggian tertentu. Oleh karena itu, gas atmosfernya menunjukan rotasi differensial, yaitu tercepat di equator dan terlambat di kutub. Matahari pun mempunyai rotasi differensial dikarenakan bentuknya berupa fluida (zat alir). Yupiter punya nilai pepatan sebesar 0,062, dikarenakan rotasi yang sangat cepat.

Yupiter juga amat ganjil karena memancarkan gelombang radio. Hal ini menunjukkan bahwa Yupiter memiliki sabuk-sabuk radiasi yang intensif yang dihasilkan oleh zarah bermuatan yang terperangkap di dalam medan magnet planet yang kuat. Sesungguhnya jumlah energi yang dikeluarkan Yupiter jauh lebih banyak daripada yang diterimanya dari Matahari. Jelas bahwa ia membuat energi sendiri. Suatu penyusutan ukuran hanya satu milimeter setahun, akan menghasilkan cukup energi untuk menyebabkan proses ini. Energi yang timbul mengakibatkan sistem cuaca di Yupiter agak ekstrem, hal ini ditunjukan adanya bintik merah di daerah ekuator. Yupiter mempunyai 14 bulan beredar, empat yang terbesar ditemukan oleh Galileo dan dinamakan Io, Europa, Ganymede, dan Callisto.

Voyager 1 mengidentifikasikan bahwa Jupiter mempunyai .... *ring*). Cincin ini sangat tipis (tebalnya kurang dari 30 km) dan bersifat transparan. Cincin ini akan tampak jika dilihat di bagian tepi, partikel akan menghamburkan cahaya dengan baik yang ukuran partikel ini sangat kecil dengan diameter 3¼ m.

7. Saturnus



Sumber: *Jendela Iptek 14*
Gambar 2.14 *Saturnus*

Planet Saturnus adalah planet terbesar setelah Jupiter untuk kelompok Jovian dengan cincin-cincinnya yang cemerlang adalah pandangan yang paling mengesankan dalam Tata Surya kita, lihat gambar 2.14. Jarak orbit pada sumbu mayor 9,539 SA, periode revolusi sideris 29,458 tahun dan esentrisitas, e = 0, 0556. Kemiringan orbit 2,49 terhadap bidang ekliptik. Dari bumi Saturnus mempunyai diameter anguler di posisi 20°. Periode rotasi sideris 10 jam 14 menit di dekat ekuator dan 10 jam 38 menit pada ketinggian tertentu. Seperti Jupiter, Saturnus mempunyai ketebalan atmosfer dan berotasi secara differensial. Akibat rotasi menyebabkan terjadi pepatan 0,096, jari-jari kutub dan ekuator berbanding 9:10.

Saturnus lebih kecil, 9 kali jari-jari bumi, dan kurang padat daripada Jupiter, dengan kerapatan 680 kg m^3 lebih kecil dari pada air. Saturnus sebagian terbesar tersusun oleh helium dan hydrogen tetapi intinya mempunyai elemen logam berat 10 kali massa bumi.

Saturnus sekurang-kurangnya mempunyai 17 bulan. Dengan dua keterkecualian yaitu Phoebe dan Iapetus, semua bulan Saturnus terpaku dekat pada bidang ekuator Saturnus. Massa dari bulan ditentukan dari gaya tarik gravitasi pada pesawat ruang angkasa. Kerapatannya dari 1200 kg/m^3 untuk Tethys dan 1400 kg/m^3 untuk Dione hampir serupa dengan kerapatan dari bulan Galilean terluar pada Jupiter.

Sistem Cincin

Cicin saturnus terletak pada bidang ekuator dan mempunyai kemiringan 26° terhadap bidang orbit. Dikarenakan kemiringannya, terjadi perubahan penampakan jika dilihat dari Bumi selama revolusi Saturnus terhadap matahari. Pada bagian tepi cincin tampak lenyap (menghilang) menunjukkan bahwa mereka sangat tipis tidak kurang dari beberapa kilometer tebalnya. Walaupun cincin ini tipis namun melebar sangat luas, ada tiga kategori yang dapat dilihat dari bumi, 71000 sampai 140.000 km dari pusat Saturnus.

8. Uranus



Sumber: *Jendela Iptek 14*
Gambar 2.15 *Uranus*

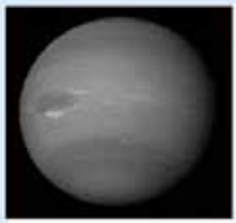
Planet Uranus masih dapat dilihat dengan mata telanjang. Lihat gambar 2.15. Tetapi baru dikenal sebagai planet ketika ditemukan dengan teleskop oleh Sir William Herschel pada tahun 1781. Komposisinya mirip Saturnus dan memiliki sistem cincin yang samar, yang ditemukan tahun 1977.

Uranus dan Neptunus kadang-kadang mengacu pada pengertian es raksasa, komposisi didominasi oleh air, ammonia, methane dan sedikit batuan yang tersusun dari silikat dan unsur logam. Atmosfer didominasi adanya unsur hidrogen dan helium yang diperkirakan massanya satu-tiga kali massa bumi.

Uranus juga memiliki 5 bulan, Miranda, Ariel, Umbriel, Tania dan Oberon, masing-masing lebih kecil daripada Bulan kita. Mereka mengitari bidang ekuator planet tersebut. Karena letak bulan Uranus sebidang dengan Uranus maka tampak dari Bumi orbitnya tampak berubah-ubah, seperti pada tahun 1987 tampak lingkaran tetapi pada 2008 mereka nampak lonjong.

Cincin Uranus ditemukan tahun Maret 1977 ketika Uranus melewati di belakang bintang yang redup. Voyager 2 menemukan sekurang-kurang ada 11 cincin. Cincin-cincin ini dibagi 3 kategori. Cincin 6,5 dan 4 kira-kira 42.500 km, ± dan 2 kira-kira 45.000 km, dan 3 pada 48.000 km, dan cincin μ dan dua cincin yang lain kira-kira 51.000 km dari pusat Uranus. Cincin yang tersempit kira-kira lebarnya 5 km. Cincin μ mempunyai lebar 10 km. Cincin yang paling gelap mempunyai albedo 0,03. Voyager 2 mengamati adanya partikel dalam cincin Uranus adalah es hitam dengan ukuran 1 m.

9. Neptunus



Sumber: *Jendela Iptek 14*
Gambar 2.16 *Planet Neptunus*

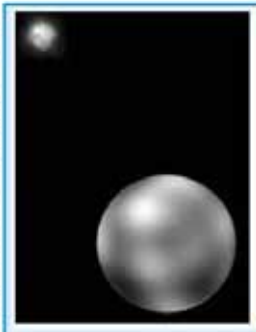
Planet Jovian terakhir adalah planet kedelapan, yaitu Neptunus. Neptunus bagaikan planet kembar dengan Uranus dalam ukuran, dan kandungan gas, lihat gambar 2.16. Sebelum ditemukan dengan teleskop, perhitungan matematis sudah bisa diramalkan keberadaan planet ini. Neptunus mempunyai sumbu mayor 30,06 SA, eksentrisitas, e = 0,0086, kemiringannya rendah 1,77° dengan periode sideris 164,79 tahun.

Dari pengamatan Voyager dua bahwa Neptunus memiliki 2 bulan, yaitu Triton dan Neried. Triton mempunyai diameter 2720 km yang mana merupakan satelit (bulan) terbesar dalam sistem tata surya kita. Nereid adalah bulan yang lebih kecil dengan diameter hanya 355 km. Triton memiliki periode revolusi sekitar 5 hari dan mengorbit mundur (retrograde) dari barat ke timur, dengan inklinasinya 20% terhadap bidang ekuator Neptunus. Tidak ada planet lain yang mempunyai bulan terdekat dengan orbit mundur. Nereid adalah bulan terluar yang mempunyai esentrisitas 0,75 dua kali lebih besar dari satelit-satelit yang lain dalam tata surya kita dengan jangkauan jarak sekitar 1 juta sampai 10 juta km dari Neptunus. Kecepatan orbit Nereid sekitar 3 km/s pada saat terdekat dengan Neptunus, dan kecepatan lolosnya hanya 0,2 km/s.

Voyager menunjukan adanya cincin yang sangat jelas yang mana terdiri dari 5 cincin secara individual. Kedua cincin yang cemerlang mempunyai jari-jari terluarnya 53,000 km dan 62.000 km. Cincin yang terdekat dengan lebar sekitar 2000 km. Keberadaan cincin ini masih bersifat misterius artinya belum banyak data yang didapatkan oleh para ahli astronomi.

10. Pluto

Pluto adalah planet kesembilan dalam sistem tata surya kita. Dari Bumi dengan teleskop Pluto nampak sebagai cahaya redup. Jarak rata-rata Pluto dari Matahari adalah 39,44 SA. Karena mempunyai eksentrisitas yang tinggi e = 0,25 dengan jangkauan dari 29,7 sampai 49,3 SA dari Matahari dan juga tidak pernah lebih dekat ke Bumi daripada jarak 28,7 SA. Karena Pluto merupakan jarak terjauh dan mempunyai diameter kecil maka dalam pengukuran diameter Pluto membawa tingkat frustasi yang tinggi dari para ilmuawan.



Gambar 2.17 *Pluto Bersama Charon*

Juni 1978, James Christy mengumumkan apa yang dia lihat citra dari Pluto yang tampak benjol. Setelah dia mengecek hasil fotograph yang lama juga ditemukan 7 citra yang sama dan selalu berorentasi ke selatan- utara. Dia mengusulkan bahwa citra yang benjol itu adalah bulan Pluto yang terekam dengan citra planet Pluto. Christy menamakan bulan tersebut adalah Charon. Setelah beberapa tahun penemuan ini Pluto dan Charon datang bersama sehingga

terjadi saling menutupi (eklips=gerhana) seperti yang terlihat dari Bumi. Karena untuk betul-betul dalam posisi satu garis hanya terjadi dua kali setiap 248 tahun. Adanya gerhana ini dimungkinkan diameter dari Pluto adalah 2240 km. Charon mempunyai diameter 1120 km sekitar separuh dari diameter Pluto. Periode revolusinya adalah 6,4 hari (sama dengan periode rotasi Pluto sehingga dikatakan dalam rotasi synchronous) pada jarak 19.600 km dari Pluto. Periode Charon sama dengan rotasi Pluto menunjukan adanya gaya tidal yang kuat.

Kerapatan rata-rata untuk Pluto dan Charon adalah sama yaitu 2100 kg/m^3, sehingga Pluto dimungkinkan terdiri dari 75% material batuan dan struktur bagian dalam mempunyai mantel dengan tebal sekitar ratusan kilometer yang berisi air dan di bawahnya intinya yang terdiri dari batuan hidrat. Ini sedikit berbeda untuk komposisi air dengan bulan pada planet Jovian.

Selamat Berpisah Temanku Hai Pluto

Sidang umum himpunan astronomi sedunia yang ke-26 atau International Astronomy Unioun (IAU) diselenggarakan di Praha, Repulblik Ceko tepatnya tanggal 14-25 Agustus 2006, diikuti oleh 75 negara memberikan suatu kesimpulan yang bersejarah di dunia ilmu pengetahuan yaitu tentang definisi Planet. Ada tiga pengertian tentang kategori planet yaitu:

1. benda langit tersebut mengelilingi matahari,
2. mempunyai bentuk bulat dan berukuran besar, dan
3. mempunyai orbit yang jelas dan bersih.

Definisi ketiga ini didasarkan pada penemuan-penemuan benda langit yang baru, yaitu:

1. Quaoar dengan diameter 1250 km yang ditemukan pada bulan Juni 2002.
2. Huya dengan diameter 750 km pada bulan Maret 2000.
3. Sedna dengan diameter 1.800 km pada bulan Maret 2004.
4. Orcus, Vesta, Pallas, Hygiea, Varuna, dan 2003 EL61 dengan diameter berkisar 1500 km ditemukan pada bulan Mei 2004. Penemuan 2003EL61 sangat menarik perhatian karena diyakini mempunyai satelit walaupun ukurannya lebih kecil dari Pluto yaitu pada bulan Januari 2005.
5. Penemuan yang paling terkenal adalah penemuan benda langit baru yaitu UB313 yang ditemukan oleh Michael Brown dari California Institute of Technology pada tahun 2003. UB313 memiliki diameter 2700 km dan benda langit ini diberi nama Xena. Ukurannya lebih besar dari Pluto dan memiliki satelit.

Dari berbagai penemuan jenis benda langit yang baru ini menimbulkan beberapa pertanyaan yang didasarkan pada kesepakatan tentang definisi planet. Didasarkan pada ukuran (diameter 2360 km), struktur (sifat kimianya mempunyai struktur yang mirip dengan komet) dan bentuk orbit Pluto yang lonjong dan disepakati bahwa Pluto bukan planet.

Orbit Pluto yang lonjong berakibat pada saat tertentu Pluto mempunyai jarak yang lebih dekat dengan matahari daripada Neptunus. Ukuran Pluto yang tidak berbeda jauh seperti Ceres jenis asteroid dengan diameter 940 km, Charon (diameter 1196 km) dan benda langit yang baru ditemukan maka Pluto termasuk ke dalam jenis planet kerdil atau planet katai (*dwarf planets*). Dilihat dari letak atau posisi Pluto dan jenis benda langit yang baru ditemukan dikelompokan sebagai objek sabuk kuiper (*Kuiper Belt Object = KBO*). Kelompok KBO mempunyai letak yang didasarkan pada wilayah di luar orbit Neptunus. Jadi, kelompok KBO terdiri dari Pluto, Quaoar, Sedna, Xena.

Keluarnya Pluto dari keluarga besar planet dalam tata surya mengingatkan kepada kita bahwa ilmu pengetahuan bukanlah sesuatu yang abadi namun bisa berubah-ubah berdasarkan suatu persepsi atau kesepakatan bersama oleh para ahli di bidangnya dan disertai data pengamatan yang mendukungnya. Namun, tidak menutup kemungkinan juga bahwa Pluto akan kembali masuk ke keluarga besar planet dalam tata surya kita, siapa tahu? Itulah ilmu pengetahuan yang selalu berkembang. (ulasan ini didasarkan pada sumber Kompas, 25 dan 27 Agustus 2006).

Rangkuman

1. Planet-planet dalam mengelilingi matahari tunduk pada Hukum Kepler, yaitu:
   a. Planet-planet bergerak mengelilingi matahari dengan orbit ellips dengan matahari berada di salah satu titik fokusnya.
   b. Dalam waktu yang sama planet akan menyapu luasan yang sama ketika berevolusi mengelilingi matahari.
   c. Kuadrat periode planet dalam mengelilingi matahari berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak rata-rata terhadap matahari, secara matematis ditulis sebagai:

$$\frac{T^2}{r^3} = K$$

2. Besarnya gaya gravitasi dua planet dirumuskan: $F_{grav} = G\frac{mM}{r^2}$
3. Kelajuan planet dalam mengelilingi matahari dinyatakan dalam: $v^2 = (\frac{2\pi a}{T})^2$
4. Besarnya medan gravitasi planet dalam mengorbit matahari dirumuskan: $g = G\frac{M}{r^2}$
5. Energi potensial gravitasi untuk sistem patikel/planet dinyatakan, $E_p = -\frac{GMm}{r}$
6. Kelajuan lolos roket dari permukaan bumi dinyatakan: $v_{lolos} = \sqrt{2gR_{\oplus}}$
7. Planet dalam tata surya terdiri atas Matahari sebagai pusatnya serta dikelilingi 8 planet, diantaranya merkurius, venus, mars, jupiter, saturnus, uranus, neptunus.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Menurut model Heliosentris dikatakan bahwa planet dan benda-benda keplanetan lain bergerak mengelilingi matahari dalam orbit berbentuk ellips dan matahari berada salah satu titik fokusnya, maka . . . .
   a. bila posisi planet di titik aphelion maka jarak planet ke matahari paling dekat
   b. bila posisi planet di titik perihelion maka jarak planet ke matahari paling jauh
   c. kelajuan planet di titik aphelion lebih besar daripada kelajuan planet di titik perihelion
   d. kelajuan planet di titik aphelion lebih kecil daripada kelajuan planet di titik perihelion
   e. kelajuan planet di titik aphelion sama besar dengan kelajuan planet di titik perihelion

2. Dengan menggunakan Hukum II Kepler diketahui bahwa pada bulan Desember bumi mengitari matahari pada jarak terdekat sedangkan pada bulan Juni pada jarak terjauh maka . . . .
   a. pada bulan Desember bumi mengitari matahari dengan kecepatan yang lebih besar daripada kecepatan pada bulan Juni
   b. pada bulan Desember bumi mengitari matahari dengan kecepatan yang lebih kecil daripada kecepatan pada bulan Juni
   c. pada bulan Desember bumi mengitari matahari dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan pada bulan Juni
   d. pada bulan Juni bumi mengitari matahari dengan kecepatan yang lebih besar maka belahan bumi bagian utara musim panas
   e. pada bulan Desember bumi mengitari matahari dengan kecepatan yang lebih kecil maka belahan bumi bagian utara musim dingin

3. Perbedaan antara model geosentris dan heliosentris pada sistem tata surya . . . .
   a. pada sistem geosentris, matahari dianggap sebagai pusat sistem tata surya dan planet-planet mengorbit matahari
   b. pada sistem heliosentris, bumi dianggap sebagai pusat sistem tatasurya matahari dan planet-planet lain mengorbit bumi
   c. pada sistem heliosentris, matahari dianggap sebagai pusat sistem tata surya dan planet-planet yang mengorbit matahari dideskripsikan dengan bentuk matematik yang sederhana dan harmonis
   d. pada sistem geosentris, bumi dianggap sebagai pusat sistem tata surya, matahari dan planet-planet yang mengorbit matahari dideskripsikan dengan bentuk matematik yang kompleks
   e. pada sistem heliosentris, matahari dianggap sebagai pusat sistem tata surya dan planet-planet yang mengorbit matahari dideskripsikan dengan bentuk matematik yang kompleks

4. Planet Jupiter mempunyai beberapa bulan, maka . . . .
   a. gerakan bulan yang mengikuti planet Jupiter tunduk pada Hukum Kepler dan Hukum Newton
   b. gerakan bulan yang mengikuti planet Jupiter hanya tunduk pada Hukum III Kepler saja
   c. gerakan bulan yang mengikuti planet Jupiter tidak tunduk pada Hukum kekekalan energi mekanik
   d. gerakan bulan yang mengikuti planet Jupiter lintasannya berbentuk parabol
   e. gerakan bulan yang mengikuti planet Jupiter melintasi matahari dalam lintasan berbentuk ellips

5. Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .
   a. bulan sideris adalah periode bulan mengitari bumi relatif terhadap suatu arah yang tetap di angkasa atau bintang tetap dan lamanya satu bulan sideris adalah 27,3 hari
   b. bulan sideris adalah periode bulan mengitari bumi relatif terhadap suatu arah yang tetap di angkasa atau bintang tetap dan lamanya satu bulan sideris adalah 29,5 hari
   c. interval waktu yang diperlukan untuk posisi bulan yang sama secara berturutan, misalnya dari bulan penuh sampai bulan penuh lagi dan lamanya 29,5 hari
   d. interval waktu yang diperlukan untuk posisi bulan yang sama secara berturutan, misalnya dari bulan penuh sampai bulan penuh lagi dan lamanya 27,3 hari
   e. interval waktu yang diperlukan untuk posisi bulan yang sama secara berturutan, dan lamanya 12 bulan

6. Tiga buah partikel yang massanya sama diletakkan di titik sudut-titik sudut P, Q, dan S dari belah ketupat PQRS dengan $\angle R = 60^\circ$ dan sisi-sisinya a. Maka besar dan arahnya medan gravitasi di titik sudut R oleh partikel tersebut adalah . . . .
   a. $\frac{GM}{R^2}\left(1+\frac{\sqrt{3}}{3}\right)$ menuju titik P
   b. $\frac{GM}{R^2}\left(1+\sqrt{3}\right)$ menuju titik P
   c. $\frac{GM}{R^2}\left(1+\sqrt{3}\right)$ menuju titik S

d. menuju titik Q
e. menuju titik S

7. Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah
   a. menurut Hukum III Kepler besarnya rasio kuadrat periode dengan jaraknya untuk planet-planet yang mengitari matahari adalah konstan
   b. menurut Hukum I Kepler planet-planet mengitari matahari dalam lintasan berbentuk ellips dengan matahari berada pada salah satu titik fokusnya
   c. menurut Hukum II Kepler kecepatan gerak planet yang mengelilingi matahari menjadi lebih besar bila planet mendekati matahari
   d. gerak planet yang mengitari matahari tunduk pada hukum kekekalan momentum anguler
   e. semua jawaban di atas adalah benar

8. Planet bumi massanya 6×10^{24} kg, jari-jarinya $6{,}37\times10^{6}$ m, dan jaraknya ke matahari adalah $1{,}5\times10^{11}$ m, maka . . . .
   a. $\frac{T_{bumi}^2}{r_{m-b}^3}=\frac{T_J^2}{r_{m-J}^3}$
   b. dengan menggunakan hukum III Kepler besarnya massa matahari adalah 2×10^{30} kg bila periode bumi mengitari matahari sebesar 1 tahun= $3{,}156\times10^{7}$ s.
   c. bila jarak planet Jupiter ke matahari adalah $7{,}78\times10^{11}$ m maka besarnya periode Jupiter T_J adalah $5{,}94\times10^{7}$ s
   d. jawaban pada a, b, dan c benar
   e. semua jawaban di atas salah

9. Bila bumi adalah bola padat yang homogen dan bila kita menggali terowongan di dalam bumi, maka . . . .
   a. kita akan mengalami gerak jatuh bebas bila kita berjalan melewati terowongan tersebut
   b. kita akan mengalami gerak dengan kecepatan konstan karena kita berjalan melewati terowongan tersebut
   c. kita akan mengalami gerak osilasi bila kita berjalan melewati terowongan tersebut karena gaya yang kita alami sebanding dengan jaraknya ke pusat bumi
   d. kita akan mengalami gerak osilasi bila kita berjalan melewati terowongan tersebut karena gaya yang kita alami berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya ke pusat bumi
   e. kita tidak akan dapat bergerak karena tidak bisa melawan gaya gravitasi bumi

10. Buah kelapa jatuh ke bumi karena gaya tarik gravitasi bumi, sedangkan bulan juga mengalami gaya tarik gravitasi bumi tetapi tidak jatuh ke bumi. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar **kecuali** . . . .
    a. kelapa jatuh ke bumi karena kelapa tidak mempunyai kecepatan yang arahnya sejajar dengan permukaan bumi yang cukup besar untuk bergerak rotasi
    b. satelit Palapa yang diluncurkan dari permukaan bumi dengan kecepatan awal yang cukup besar sedemikian hingga gerak satelit palapa tunduk pada hukum kekekalan energi maka satelit palapa tidak jatuh ke bumi
    c. bila kita dapat menembakkan peluru dengan komponen kecepatan awal arah mendatar yang sukup besar sehingga jangkauannya (panjang lintasan mendatar) sebesar keliling bumi maka peluru tersebut juga tidak jatuh ke bumi
    d. untuk meluncurkan satelit agar berotasi terhadap bumi maka satelit harus diluncurkan dengan kecepatan awal sebesar kecepatan lolos satelit
    e. gerak bulan tunduk pada hukum kekekalan energi mekanik

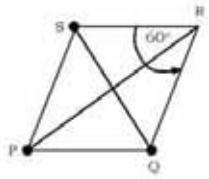
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengah singkat dan jelas!

1. Gaya gravitasi adalah gaya tarik menarik antara dua benda yang mempunyai massa dan berada pada jarak tertentu. Jelaskan mengapa kalian yang duduk bersebelahan tidak merasakan adanya gaya tarik menarik di antara kalian!
2. Jelaskan dengan menggunakan Hukum III Kepler mengapa planet-planet superior mempunyai periode lebih besar dari satu tahun bumi!
3. Dua buah benda saling menarik dengan gaya gravitasi sebesar 5×10^{-9} N. Bila jarak antara dua benda 2 cm dan massa totalnya 8 kg, berapakah besarnya masing-masing massa?
4. Dua buah bintang kembar, massanya sama, saling berevolusi satu sama lain dalam lintasan berbentuk lingkaran. Bila kecepatan mengorbit masing-masing bintang adalah 216 km/jam dengan periode 14,5 hari, tentukan massa masing-masing bintang tersebut!

5. Bulan mengelilingi bumi dengan periode 27,3 hari dan jarak bumi-bulan $3{,}84\times10^{8}$ m. Estimasilah massa bulan!

6. Satelit Geosynchronous mengorbit bumi pada ketinggian 42000 km dari pusat bumi. Kelajuan anguler satelit tersebut sama dengan kelajuan anguler rotasi bumi terhadap sumbunya, maka dari bumi satelit terlihat stasioner. Bila massa satelit 1000 kg, berapakah gaya gravitasi bumi yang bekerja pada satelit ini?

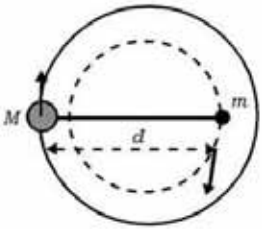
7. Tiga buah partikel yang massanya sama sebesar 10 gram diletakkan pada titik-titik sudut segitiga samasisi dengan sisi 50 cm. Tentukan energi potensial dari ketiga partikel tersebut! Bila partikel-partikel tersebut dilepaskan di mana mereka akan bertumbukan?



8. Sebuah satelit mengorbit planet tepat di atas permukaan planet dengan kelajuan v. Tunjukkan bahwa bila v_{lolos} adalah kecepatan peluncuran satelit sehingga satelit terlepas dari pengaruh gaya gravitasi planet tersebut!

9. Sebuah bola pejal yang homogen massanya 500 kg dan jari-jarinya 0,5 m. (a) Tentukan besarnya gaya yang dialami sebuah partikel yang massanya 100 gram yang terletak pada jarak (i) 2 m, (ii) 0,5 m dan (iii) 0,25 m dari pusar benda. (b) Tentukan energi potensial partikel pada ketiga jarak tersebut!

10. Dua buah bintang, masing-masing massanya M dan m, saling berevolusi satu sama lain dalam lintasan berbentuk lingkaran terhadap pusat massanya pada jarak d, lihat gambar! Tunjukkan bahwa T adalah periode rotasi kedua bintang tersebut!



Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawabanmu dengan teman-temanmu. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab III

Hukum Hooke dan Elastisitas



Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menganalisis dan menjelaskan pengaruh gaya pada sifat elastisitas bahan.

Kata kunci dalam bab ini, antara lain:

1. Pegas
2. Gaya

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:

1. Modulus Young
2. Hubungan Tegangan dan Regangan
3. Kompresi
4. Gaya Geser dan Gaya Torsi
5. Modulus Bulk
6. Susunan pegas

Kalian semua pasti sudah tahu tentang alat bermain yang disebut ketapel, bukan? Terutama anak laki-laki sering menggunakan ketapel untuk melempari buah-buahan, bahkan mungkin digunakan untuk menembak burung. Salah satu bagian ketapel yang sangat penting terbuat dari bahan karet. Biasanya jenis karet yang dipilih adalah karet yang mudah memanjang pada saat digunakan dan kembali ke bentuk semula dengan baik setelah dipakai. Bahan yang mudah memanjang dan kembali ke keadaan semula dengan baik dikatakan bahwa bahan tersebut sangat elastik.

Anak-anak perempuan mempunyai koleksi pengikat rambut yang berwarna-warni. Pengikat rambut yang dipilih adalah yang mudah dipakai dan setelah dipakai dapat kembali ke keadaan awal dengan baik. Pengikat rambut ini biasanya terbuat dari benang elastik atau kadang juga berasal dari gelang karet. Kalian juga mengetahui bahwa ada beberapa pengikat rambut yang telah kendor, yaitu tidak kembali ke bentuk semula dan tidak dapat lagi mengikat rambut dengan kencang.

Demikian juga karet pada ketapel setelah digunakan berulang kali maka karet tersebut juga mengendor. Seperti juga gelang karet bila kita tarik akan memanjang, untuk gelang karet jenis karet pentil bila ditarik dan kemudian dilepaskan dapat kembali kebentuk semula. Jenis gelang karet biasa tidak kembali ke bentuk semula dengan baik. Biasanya, semakin kuat gelang karet ditarik, semakin besar pertambahan panjangnya.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan vokasional** kalian, lakukanlah kegiatan berikut!

Kegiatan 3.1

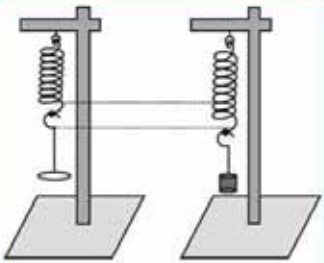
Tujuan:
Merumuskan hubungan antara gaya yang dikerjakan pada benda dengan pertambahan panjang benda.

Bahan dan alat:
1. Beberapa jenis gelang karet : pentil, setengah pentil, dan karet biasa.
2. Beberapa pegas (kawat spiral).
3. Penggaris.
4. Beberapa beban anak timbangan.
5. Alat penggantung beban (statif), lihat pada skema alat!

Skema peralatan:
Skema peralatan terdiri dari:
1. Statif yang terbuat dari batang besi dan plat besi.
2. Alat penggantung bahan.
3. Sebuah pegas (kawat spiral).
4. Alat penggantung anak timbangan.

Bahan yang diukur kontanta elastisitasnya dapat diganti-ganti, misalnya gelang karet, potongan karet atau pegas,

dan beban yang berupa anak timbangan yang digantung juga dapat diganti-ganti.



Gambar 3.1 *Sistem peralatan untuk menganalisis hubungan antara F dengan Δl*

Prosedur:

1. Rangkailah peralatan seperti pada gambar 3.1!
2. Ambillah gelang karet satu per satu dan pasang pada penggantung bahan!
3. Ukur panjang gelang karet yang tergantung!
4. Pasang penggantung beban dan letakkan sebuah anak timbangan yang diketahui massanya!
5. Setelah dibebani, apakah panjang karet terlihat memanjang? Ukur lagi panjang karet yang dibebani, hitung pertambahan panjang karet yang disebabkan oleh beban tersebut!
6. Tambah lagi anak timbangan secara bertahap pada beban penggantung beberapa kali dan catat masing-masing pertambahan panjang karet untuk masing-masing beban seperti pada langkah 5. Catatlah data dalam tabel berikut!

	Panjang Karet/ Pegas Awal	Massa/Berat Beban (*F*)	Pertambahan Panjang Karet/ Pegas (Δl)	$F/(\Delta l)$
1.				
2.				

7. Bila beban diambil semua beserta penggantungnya apa yang terjadi dengan panjang karet? Bila panjang karet tersebut diukur lagi, apakah panjangnya sama dengan panjang semula?
8. Setelah kalian melakukan pengukuran beberapa karet yang sama dengan beban penggantung yang berbeda, dan juga untuk beberapa karet yang berbeda-beda, kalian akan menemukan ada karet tertentu panjangnya kembali ke panjang semula untuk beban tertentu. Untuk karet yang berbeda walaupun bebannya sama setelah bebannya diambil semua, kondisi akhirnya bisa berbeda pula.

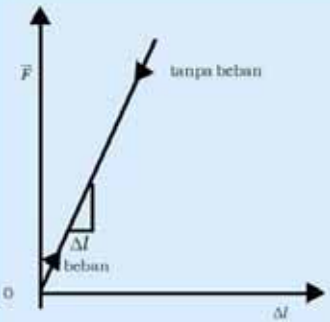
9. Buatlah grafik hubungan antara berat beban yang digantung dengan pertambahan panjang karet!
10. Bagaimanakah hubungan antara berat beban dengan pertambahan panjang karet/pegas? Kalian mungkin juga akan menemukan bahwa ada grafik yang berupa garis lurus, ada juga yang tidak berupa garis lurus setelah berat beban yang digantung melebihi berat tertentu.

Kesimpulan

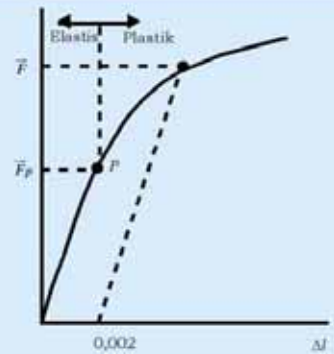
Apa yang dapat kalian simpulkan dari grafik dan data percobaan?

Dari kegiatan di atas kita dapat menyimpulkan hubungan antara berat beban dengan pertambahan panjang karet/pegas yang dikenainya. Pada gambar 3.2 ditunjukkan grafik hubungan antara gaya tarik pada pegas yang diberi beban (gaya tarik) secara bertahap dengan pertambahan panjang pegas karena gaya tarik tersebut. Dari gambar diketahui bahwa perbandingan antara gaya tarik dengan pertambahan panjang bersifat linier, secara matematik dapat dinyatakan sebagai

$$\vec{F} = k\Delta l \qquad (3.1)$$

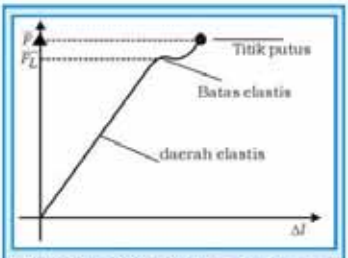


Gambar 3.2 *Grafik hubungan antara gaya(beban) dengan pertambahan panjang pegas Δl.*



Gambar 3.3 *Grafik hubungan antara gaya (beban) dan pertambahan panjang Δl dari bahan. Bila berat maksimum yang digantungkan pada bahan sebesar $\vec{F_P}$ atau kurang, maka setelah dibebani panjang bahan kembali ke semula, bahan masih bersifat elastik, tetapi bila lebih besar dar F_P maka bahan tidak dapat kembali ke panjang semula, bahan sudah bersifat plastik.*

Persamaan 3.1 tidak lain adalah pernyataan hukum Hooke, yaitu bila sebuah benda ditarik dengan gaya F maka benda tersebut akan bertambah panjang sebesar Δl yang sebanding dengan gaya $\vec{F}$ tersebut, k disebut konstanta kesebandingan.



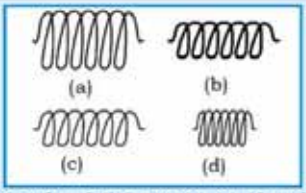
Gambar 3.4 *Grafik hubungan antara gaya yang dikerjakan pada bahan dan pertambahan panjangnya*

Secara umum untuk semua benda padat, dari besi sampai tulang, tunduk pada hukum Hooke, tetapi hanya untuk rentang gaya tertentu saja yang dikerjakan pada benda-benda padat itu. Bila gaya yang dikerjakan terlalu besar maka benda akan meregang berlebihan dan akhirnya putus, gambar 3.4.

Pada gambar 3.4 ditunjukkan bahwa $\vec{F_L}$ adalah batas gaya yang dapat dikerjakan pada bahan tersebut agar bahan tersebut kembali ke panjang awal. Bila gaya yang dikerjakan bertambah besar, maka pada besar gaya $\vec{F}$ bahan tersebut akan putus (retak).

A. Modulus Young (Tegangan dan Regangan)

Walaupun menurut hukum Hooke besarnya pertambahan panjang bahan hanya tergantung pada gaya yang dikerjakan padanya, namun konstanta kesebandingan untuk masing-masing bahan berbeda. Besarnya konstanta kesebandingan ternyata tergantung pada panjang awal dari bahan, luas penampang bahan, dan jenis bahan.



Gambar 3.5 *Pegas (a), (c), (dan d) terbuat dari bahan yang sama, (a) dan (c) panjangnya sama tetapi luas penampangnya berbeda, (c) dan (d) luas penampangnya sama tetapi panjangnya berbeda, sedangkan pegas (b) besarnya sama dengan (c) tapi terbuat dari bahan yang berbeda.*

Untuk menyelidiki hubungan antara gaya yang dikerjakan pada pegas/karet, cobalah kalian lakukan seperti pada kegiatan 3.1. Tetapi di sini kalian pilih beberapa pegas (gulungan kawat) yang terbuat dari bahan yang berbeda, atau panjangnya berbeda atau luas penampangnya berbeda, lihat gambar 3.5. Peralatan dan langkah-langkah kegiatan sama dengan kegiatan 3.1. Misalnya untuk pegas

(a) dan (c) dikenai gaya yang sama, kalian akan mengamati bahwa pertambahan panjang pada pegas (a) lebih kecil daripada pegas (b), hal ini berati bahwa pegas yang luas penampangnya lebih besar akan mengalami pertambahan panjang yang lebih kecil: sedangkan untuk pegas (c) dan (d) bila dikenai gaya yang sama, kalian akan amati bahwa pegas (c) memperoleh pertambahan panjang yang lebih besar daripada pegas (d). Pegas (c) yang terbuat dari baja dan pegas (b) yang terbuat dari almunium, kalian akan mengamati bahwa pegas yang terbuat dari aluminium mengalami pertambahan panjang yang lebih besar daripada yang terbuat dari baja.

Dari pengamatan yang kalian lakukan sesuai dengan diskusi di atas kalian dapat menyimpulkan bahwa pertambahan panjang pegas (Δl), berbanding lurus dengan besar gaya tarik pada pegas *lo* (F), dan panjang pegas mula-mula (l_0) serta berbanding terbalik dengan luas penampang pegas (A), dan kelenturan pegas (E). Secara matematik hubungan antara gaya yang menyebabkan, pertambahan panjang, panjang mula-mula, luas penampang dan jenis bahan pegas dinyatakan sebagai:

$$\Delta l = \frac{Fl_0}{AE} \qquad (3.2)$$

Bila dibandingkan dengan persamaan 3.1 dari hukum Hooke, bila besarnya konstanta kesebandingan $k = \frac{AE}{l_0}$, maka persamaan 3.2 merupakan bentuk lain dari pernyataan hukum Hooke. E adalah sifat intrinsik material yang tidak tergantung dari bentuk dan ukuran material, E disebut modulus elastisitas atau modulus Young. Tabel 3.1 menunjukkan modulus Young beberapa material.

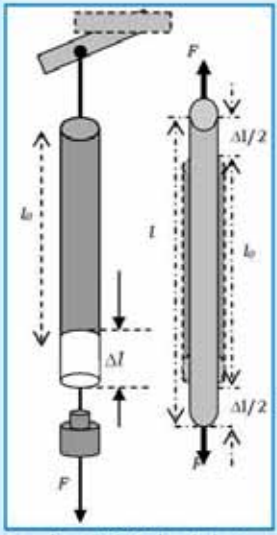
Gambar 3.6 menunjukkan sebuah benda yang mempunyai panjang mula-mula l_0 dengan luas penampang A_0 tergantung pada sebuah statif dan mengalami gaya tarikan sebesar F. Dari diagram benda bebas batang tersebut ditunjukkan bahwa pada bagian atas batang juga mengalami gaya tarik ke atas yang dikerjakan oleh tali penggantung batang. Karena batang dalam keadaan setimbang maka jumlah semua gaya pada batang adalah nol. Benda yang tergantung dan dikenai gaya tarik tersebut mengalami tegangan (*stress*) sebesar σ dalam seluruh batang. Tegangan didefinisikan sebagai perbandingan gaya tarik dengan luas penampang benda yang secara matematis dituliskan:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad (3.3)$$

Berdasarkan persamaan 3.3, satuan tegangan tarik adalah newton/meter^2 (N/m^2) atau pascal (Pa). Namun seperti di USA satuan dari σ dinyatakan dalam pound gaya per inch^2 (lb/inc^2) atau psi, yang mana 1(psi) = 6,89 × 10^3 Pa.

Pada gambar 3.6 juga ditunjukkan bahwa batang yang mula-mula panjangnya l_o bertambah panjang sebesar Δl karena ditarik oleh gaya F. Rasio antara pertambahan panjang Δl dengan panjang awal l_o disebut regangan *(strain)*, ε , yang dapat dituliskan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \qquad (3.4)$$



Gambar 3.6 *Sebuah batang yang panjang awalnya l_o dan luas penampangnya A, pada kedua ujungnya ditarik dengan gaya F panjangnya bertambah sebesar Δl.*

Perubahan panjang Δl disebut sebagai deformasi bahan. Berdasarkan persamaan 3.4 maka regangan tidak mempunyai satuan atau dimensi, namun penggunaan satuan meter/meter sering juga digunakan; walaupun nilai dari regangan jelas tidak mempunyai satuan. Kadang-kadang regangan juga dinyatakan dalam persentase, yaitu,

$$\varepsilon\% = (\varepsilon) \times (100\%) = \textit{perpanjangan } \%$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal kalian**, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 3.1

Sebuah batang aluminium dengan diameter 1,25 cm bermassa 1250 kg dikenai gaya. Hitung tegangan aluminium yang dinyatakan dalam N/m^2. (g = 10 m/s^2)

Penyelesaian:

Berdasarkan data dari soal, maka:

Diketahui:

Diameter Al =1,25 cm
Massa =1250 kg

Ditanya:

σ dalam (N/m^2)?

Jawab:

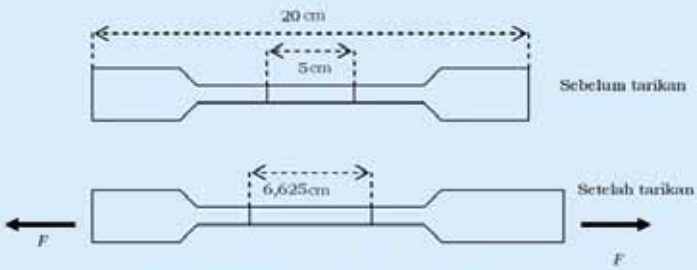
Berdasarkan persamaan 3.3 maka besarnya tegangan:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{1250\ \text{kg} \times 10\ \text{m/s}^2}{(\pi/4)\left(1{,}25 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)^2} = \frac{1{,}25 \times 10^6\ \text{N}}{(3{,}14/4) \times (1{,}25)^2\ \text{m}^2}$$

$$= 1{,}019 \times 10^6\ \text{N/m}^2$$

Contoh Soal 3.2

Sebuah lembaran aluminium dengan lebar 2,5 cm, tebal 0,10 cm, dan panjang 20 cm, di mana pada tengah-tengah aluminium tersebut diberi tanda sepanjang 5,0 cm sebelum ditarik. Setelah mengalami tarikan gaya sebesar F, aluminium bertambah panjang menjadi 6,63 cm, lihat gambar 3.7. Hitunglah besarnya regangan dinyatakan dalam persen!



Gambar 3.7 *Pertambahan panjang aluminium.*

Penyelesaian:

Data yang bisa diambil berdasarkan soal adalah, panjang mula-mula l_0 dan panjang akhir l setelah ada tarikan gaya sebesar F

Diketahui:

l_0 = 5,00 cm

l = 6,63 cm

Ditanya:
ε (regangan)?

Jawab:
Berdasarkan persamaan 3.4,

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{(6{,}63 - 5{,}00)\,\text{cm}}{5{,}00\,\text{cm}} = 0{,}325$$

ε % = 0,32 × 100% = 32,5 %

B. Hubungan Tegangan dan Regangan

Regangan struktur bahan tergantung pada besarnya tegangan yang dikenakannya. Hubungan tegangan terhadap regangan merupakan bentuk kesebandingan satu sama lainnya. Hubungan kesebandingan secara matematis dapat ditulis:

$$\sigma = E\varepsilon \qquad (3.5)$$

di mana E adalah konstanta pembanding yang disebut modulus elastis atau modulus Young. Untuk tipe-tipe logam tertentu secara umum mempunyai harga E berkisar $4{,}5\times10^4$ MPa untuk magnesium dan $40{,}7\times10^4$ MPa untuk bahan tungsten. Nilai modulus elastis dari beberapa jenis material ditunjukkan pada tabel 3.1.

KISI

Semua benda yang sudah dikenal telah diuji kekuatannya dan hasilnya diterbitkan dalam bentuk tabel yang digunakan untuk para insinyur. Apabila benda baru dibuat, benda itu harus diuji untuk menentukan kekuatannya dan benda yang akan digunakan untuk pekerjaan besar harus dicek untuk melihat apakah mutunya mencapai standar. Alat sederhana ini, yang digunakan pada abad ke-19, mengukur tegangan sampel beton dengan menggunakan beban yang secara teratur bertambah berat untuk menekannya, sehingga menimbulkan tegangan sampai beton tadi pecah.



Sumber: Jendela Iptek 15

Tabel 3.1 Modulus Elastis Bahan

Bahan	Modulus Elastis (10^4 MPa)
Aluminium	6,9
Kuningan	10,1
Tembaga	11,0
Magnisium	4,5
Nikel	20,7
Titanium	10,7
Tungsten	40,7
Beton	1,65
Granit	5,17
Tulang	1,79
Kayu pinus	1,10
Karet	0,0001

Sumber: *Giancoly, 1997*

C. Kompresi

Pengertian kompresi pada tegangan dan regangan sering digunakan dalam uji suatu material atau bahan. Dalam uji material arah gaya F berlawanan dengan tegangan. Persamaan 3.3 dan 3.4 dapat digunakan untuk perhitungan kompresi tegangan dan regangan dengan perjanjian bahwa gaya kompresi diambil tanda negatif sehingga menghasilkan tegangan dan regangan negatif. Oleh karena l_0 lebih besar daripada l sehingga persamaan 3.4 menghasilkan nilai negatif, lihat gambar 3.8(a).

Brilian

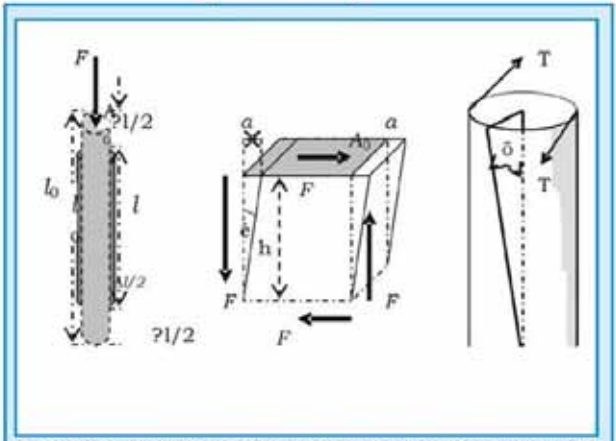
Bahan beton sering digunakan sebagai pondasi dalam bangunan, namun jarang digunakan sebagai atap atau tali dalam pembangunan jembatan. Sedangkan baja jarang digunakan sebagai pondasi, namun sering digunakan sebagai tali dalam pembangunan jembatan ataupun tempat bergantungnya sesuatu. Mengapa bisa demikian? Analisalah fenomena tersebut dengan konsep regangan dan tegangan!

D. Gaya Geser *(Shear)* dan Gaya Torsi

Jika gaya geser F dikenakan pada material atau bahan, maka bahan tersebut akan mengalami pergeseran dengan arah yang sejajar terhadap bidang kontak, lihat gambar 3.8(c). Tegangan geser

τ yang dikaitkan dengan gaya geser sebesar F dapat didefinisikan sebagai perbandingan gaya geser terhadap luasan A yang mengalami pergeseran. Secara matematis dapat dituliskan:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \qquad (3.6)$$



Gambar 3.8 *(a) Diagram benda bebas yang tergantung dan ditekan gaya F. (b) Benda yang ditarik dengan gaya geser F sehingga mengalami tegangan geser dan pertambahan panjang.*

Tegangan geser mempunyai satuan sama dengan tegangan tarik yaitu N/m^2 atau Pa. Tegangan geser dapat dimodelkan dengan sebuah buku yang berat diletakkan di atas meja secara kuat (dilem). Apabila bagian atas buku dikenai gaya yang sejajar dengan permukaan meja, maka pada permukaan buku yang bersinggungan dengan permukaan meja akan menerima gaya dari meja yang besarnya sama dengan gaya yang diberikan pada buku tapi arahnya berlawanan.

Regangan geser γ didefinisikan sebagai besarnya pergeseran atau perpindahan a, dibagi dengan jarak antara permukaan atas dan bawah h yang tegak lurus pada permukaan yang mengalami pergeseran a, lihat gambar 3.8(b). Secara matematis dapat ditulis:

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan\theta \qquad (3.7)$$

Untuk elastis murni, hubungan antara tegangan geser berbanding lurus terhadap regangan geser yang secara matematis dapat ditulis:

$$\tau = G\gamma \qquad (3.8)$$

di mana G adalah konstanta pembanding yang disebut modulus geser, biasanya modulus geser mempunyai harga (1/2) atau (1/3) modulus elastisitas E. Persamaan 3.8 dapat juga dituliskan sebagai:

$$a = \frac{Fh}{GA} \qquad (3.9)$$

E. Modulus Bulk

Sebuah benda yang dicelupkan dalam zat cair, semua bagian permukaan dari benda menderita tekanan yang dilakukan oleh zat cair sehingga volume benda mengalami penyusutan. Besarnya pengurangan volume pada benda yang mengalami gaya tekan dari segala arah berbanding lurus dengan volume mula-mula ΔV dan perubahan tekanan ΔP, dan dapat dituliskan sebagai:

$$\Delta V = -\frac{\Delta P V_0}{B} \qquad (3.10)$$

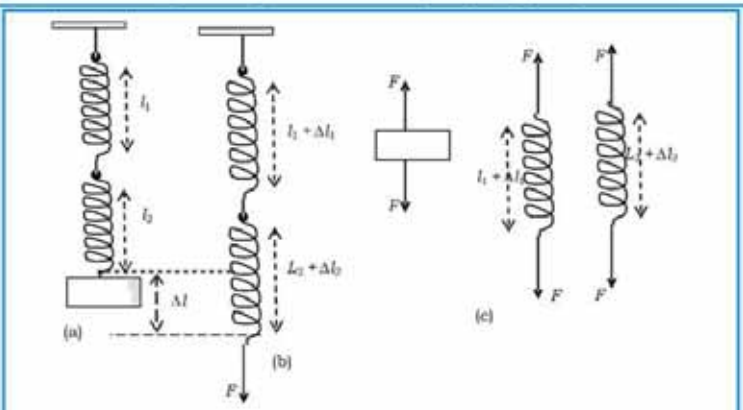
di mana B adalah konstanta kesebandingan yang juga disebut sebagai modulus Bulk.

F. Susunan Pegas

Seperti telah didiskusikan di atas bahwa pegas mempunyai sifat elastik. Hubungan antara gaya yang dikenakan pada pegas dengan pertambahan panjang pegas dirumuskan oleh Robert Hooke dalam hukum Hooke yang dicantumkan dalam persamaan 3.1. Besarnya tetapan gaya pegas, k , yang juga disebut sebagai konstanta kesebandingan dapat ditentukan seperti pada kegiatan 3.1 untuk pegas yang ringan.

Dengan mengukur panjang pegas awal (l_o) yang tergantung tanpa beban, dan mengukur pertambahan panjang untuk setiap berat beban (gaya tarik pegas) yang tergantung, maka besarnya tetapan gaya pegas merupakan rasio antara berat beban dengan

pertambahan panjang oleh beban tersebut. Bagaimanakah tetapan gaya pegas total bila dua buah pegas disusun seri atau paralel? Lihat gambar 3.9! Dengan menggunakan diagram benda bebas pada sistem susunan pegas yang setimbang, untuk pegas yang disusun seri, jumlah gaya pada masing-masing pegas adalah nol. Setiap pegas akan mengalami pertambahan panjang yang sama.



Gambar 3.9 *Dua buah pegas, l_1 dan l_2, masing-masing mempunyai konstanta k_1 dan k_2 disusun seri, (a) panjang pegas normal, (b) pegas mengalami pertambahan panjang karena beban F, (c) diagram benda bebas pada beban, pegas 1 dan pegas 2 yang dalam keadaan setimbang.*

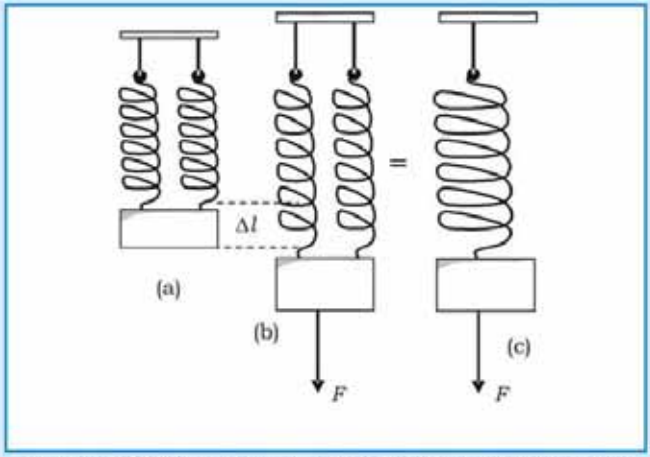
Kreasi Fisika

Setelah mempelajari materi di atas tentulah kalian tahu hakekat dari pegas. Analisalah alat-alat apa saja yang menggunakan pegas, kemudian datalah alat yang menggunakan pegas dalam kehidupan sehari-hari! Carilah prinsip kerja alat-alat tersebut dan tunjukkan konsep manakah yang digunakannya!

Untuk pegas yang disusun seri, karena gaya aksi-reaksi dan sistem dalam keadaan setimbang maka pegas dengan panjang *l* juga mengalami gaya tarik sebesar *F* seperti yang dialami oleh pegas yang langsung dihubungkan dengan beban yang beratnya *F*, lihat gambar 3.9(b). Karena sistem dalam keadaan setimbang, maka dari diagram benda bebas ditunjukkan bahwa jumlah total gaya yang bekerja pada masing-masing benda: beban, pegas *1*, dan pegas 2 adalah nol, lihat gambar 3.9(c). Jumlah total pertambahan

panjang pegas adalah sama dengan jumlah pertambahan panjang masing-masing pegas yang kedua-duanya ditarik dengan gaya F, yaitu:

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} = F\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right) = F\left(\frac{k_1 + k_2}{k_1 k_2}\right) \quad (3.10)$$



Gambar 3.10 *Dua buah pegas sejenis disusun paralel (a) panjang pegas dalam keadaan normal, (b) kedua pegas bertambah panjang sama, Δl, (c) pegas tunggal sebagai pengganti pegas paralel.*

Bila kedua pegas yang disusun seri dianggap sebagai pegas tunggal dengan kontanta pegas k dan gaya yang dikenainya F, maka:

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)^{-1} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (3.11)$$

Bila ada n pegas, masing-masing panjangnya l_1, l_2, l_3, ..., l_n dan masing-masing konstantanya k_1, k_2, k_3, ..., k_n disusun seri, maka konstanta total dari n pegas yang disusun seri adalah

$$k = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \ldots + \frac{1}{k_n}\right)^{-1} = \frac{k_1 k_2 k_3 \ldots k_n}{k_1 + k_2 + k_3 + \ldots + k_n} \quad (3.12)$$

Untuk susunan paralel, kedua pegas mengalami pertambahan panjang yang sama bila dikenai gaya F, maka

$$F = k_1 \Delta l + k_2 \Delta l = (k_1 + k_2)\Delta l.$$

Bila dua buah pegas yang disusun paralel diganti dengan satu pegas saja yang konstantanya k dan dikenai gaya F, susunan pegas pada gambar 3.10(b) diganti dengan pegas tunggal pada gambar 3.10(c), $F = k \Delta l$ maka konstanta pegas total k, adalah:

$$k = k_1 + k_2 \qquad (3.13)$$

Dengan demikian bila ada n pegas, masing-masing panjangnya l_1, l_2, l_3, ..., l_n dan masing-masing konstantanya k_1, k_2, k_3, ..., k_n disusun paralel, maka konstanta total dari n pegas yang disusun parallel adalah adalah

$$k = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + \ldots + k_n \qquad (3.14)$$

Tugas 3.1

Tiga buah pegas, yang masing-masing konstantanya 5 N/m, 10 N/m, dan 15 N/m, disusun seri. Berapakah besar pertambahan panjang total bila pada susunan pegas tersebut digantungkan balok sebesar 10 kg?

Rangkuman

1. Hubungan antara gaya F yang dikerjakan pada sebuah benda yang elastis dengan pertambahan panjang Δl yang dialami oleh benda tersebut dinyatakan dalam Hukum Hooke, $F = k \Delta l$ di mana k adalah konstanta kesebandingan.
2. Secara umum pertambahan panjang benda yang dikenai gaya F tidak hanya tergantung pada gaya F saja, tetapi juga tergantung pada panjang awal benda, luas penampang benda, dan jenis material benda.
3. Bila benda yang dikenai gaya F mula-mula panjangnya l_o, luas penampangnya A, maka pertambahan panjang benda

dinyatakan sebagai $\Delta l = \frac{Fl_0}{AE}$, dimana E menunjukkan sifat intrinsik jenis material benda dan E disebut sebagai modulus elastisitas atau modulus Young.

4. Bila benda yang tergantung ditarik dengan gaya F, maka benda tersebut mengalami tegangan tarik *(stress)* yaitu rasio antara gaya tarik dengan luas penampang A_0 benda yang ditarik : $\sigma = \frac{F}{A_0}$.
5. Disamping mengalami tegangan tarik *(stress)*, benda yang tergantung dan dikenai gaya tarik juga mengalami regangan (*strain*) yang didefinisikan sebagai perbandingan pertambahan panjang Δl, dengan panjang mula-mula (l_0) yaitu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}.$$

6. Perbandingan antara tegangan tarik dan regangan pada sebuah benda yang dikenai gaya tarik adalah sama dengan modulus Young: $E = \frac{\frac{F}{A_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$.
7. Bila sebuah benda yang tergantung ditekan dengan gaya F maka benda tersebut akan mengalami kompresi. Kompresi adalah negatif dari tegangan tarik.
8. Pada tegangan tarik dan regangan, gaya F dikerjakan tegak lurus pada permukaan benda. Bila sebuah benda ditarik degan sebuah gaya F yang searah dengan permukaan benda yang luasnya A_0, maka benda tersebut akan mengalami tegangan geser sebesar:

$$\tau = \frac{F}{A_0}.$$

9. Regangan geser adalah rasio antara pertambahan panjang geser (perpindahan geser), a, dengan jarak melintang, h, antara dua permukaan benda yang tegak lurus dengan gaya tarik F, yaitu $\gamma = \frac{a}{h} = \tan\theta$.

10. Perbandingan antara tegangan geser dengan regangan geser adalah $\tau = G\gamma$, di mana G adalah modulus geser. Seperti pada pertambahan panjang benda, perpindahan geser a, juga tergantung pada gaya F, luas penampang permukaan, jarak melintang antara permukaan, dan jenis materialnya, $a = \frac{Fh}{GA}$.
11. Bila seluruh permukaan sebuah benda mengalami tekanan dari segala arah, maka benda tersebut akan mengalami penyusutan (pengurangan volume) yang besarnya tergantung pada perbesaan /perubahan tekanan, volume awal, dan jenis bahannya yang dinyatakan sebagai $\Delta V = -\frac{\Delta P V_0}{B}$ di mana B adalah modulus Bulk.
12. . ... n pegas, masing-masing panjangnya $l_1, l_2, l_3, ..., l_n$ dan masing-masing konstantanya $k_1, k_2, k_3, ..., k_n$ disusun seri, maka konstanta total dari n pegas yang disusun seri adalah $k = (\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + ... + \frac{1}{k_n})^{-1} = \frac{k_1 k_2 k_3 ... k_n}{k_1 + k_2 + k_3 + ... k_n}$.
13. Bila ada n pegas, masing-masing panjangnya $l_1, l_2, l_3, ..., l_n$ dan masing-masing konstantanya $k_1, k_2, k_3, ..., k_n$ disusun paralel, maka konstanta total dari n pegas yang disusun paralel adalah $k = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + ... + k_n$.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a, b, c, d,* atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Sebuah benda yang massanya 100 kg digantung pada sebuah kabel yang diameternya 4 cm, maka . . . .
   a. besarnya tegangan pada kabel tersebut adalah $0{,}8 \times 10^6$ N/m^2
   b. besarnya tegangan pada kabel tersebut adalah $1{,}6 \times 10^6$ N/m^2
   c. bila kabel tersebut terbuat dari baja, modulus Young 2×10^{11} N/m^2, maka fraksi pertambahan panjang kabel adalah 2×10^{-6} %

d. bila kabel tersebut terbuat dari baja, modulus Young 2×10^{11} N/m^2, maka fraksi pertambahan panjang kabel adalah $3{,}2\times10^{-6}$ %
e. bila kabel tersebut terbuat dari baja, modulus Young 2×10^{11} N/m^2, maka fraksi pertambahan panjang kabel adalah 0,002 %

2. Bila modulus Bulk gliserin dua kalinya modulus Bulk air maka . . . .
   a. untuk memperoleh fraksi perubahan volume yang sama, maka kenaikan tekanan pada air harus dua kali kenaikan tekanan gliserin
   b. untuk memperoleh fraksi perubahan volume yang sama, maka kenaikan tekanan pada gliserin harus dua kali kenaikan tekanan air
   c. untuk memperoleh fraksi perubahan volume yang sama, maka kenaikan tekanan pada air harus empat kali kenaikan tekanan gliserin
   d. untuk memperoleh fraksi perubahan volume yang sama, maka kenaikan tekanan pada gliserin harus empat kali kenaikan tekanan air
   e. pernyataan di atas tidak ada yang benar

3. Anak-anak akan membuat ketapel dengan potongan karet yang berbeda. Ada dua macam karet A dan B dimana Y_A : Y_B = 1 : 2. Masing-masing jenis diameternya ada dua macam, dimana $d_1 = 2d_2$. Bila masing-masing karet ketapel sama panjang, dan kalian dapat membuat 4 macam ketapel yang berbeda, dan bila yang menguji coba ketapel tersebut hanya seorang anak, maka . . . .
   a. untuk diameter yang sama, pertambahan panjang karet A lebih kecil daripada karet B
   b. karena panjang, diameter dan gayanya sama maka pertambahan panjang kedua karet sama
   c. pertambahan panjang karet A lebih besar 2 kali daripada pertambahan panjang karet B untuk diameter yang sama
   d. pertambahan panjang kawat A yang diameternya d_1 2 kali dari pertambahan panjang kawat B yang diameternya d_2
   e. pertambahan panjang kawat A yang diameternya d_1 2 kali dari pertambahan panjang kawat A yang diameternya d_2

4. Dua buah gelang karet, A dan B, ditarik dengan gaya yang sama tetapi karet A mengalami pertambahan panjang 4X dari karet B, maka hubungan yang mungkin dari kedua karet tersebut adalah . . . .
   a. diameter karet B 4 kali diameter karet A
   b. diameter karet A 2 kali diameter karet B
   c. modulus Young karet A 4 kali modulus Young karet B
   d. diameter karet B 2 kali diameter karet A
   e. modulus Young karet B 2kali modulus Young karet A
5. Menurut bunyi hukum Hooke besarnya pertambahan panjang benda sebanding dengan gaya penyebabnya dan berbanding terbalik dengan konstantanya, maka . . . .
   a. makin besar konstanta pegas, maka makin mudah pegas memanjang
   b. makin kecil konstanta pegas, maka makin mudah pegas memanjang
   c. makin besar konstanta pegas, maka makin mudah pegas kembali ke keadaan awal
   d. makin besar gaya yang dikerjakan pada pegas, makin besar pertambahan panjang pegas, dan berapapun gaya yang diberikan pada pegas, pegas tetap elastis
   e. pegas selalu bersifat elastis dan tak pernah bersifat plastis
6. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, **kecuali** . . . .
   a. bila pada sebuah permukaan dikerjakan gaya tegak lurus, maka perbandingan antara gaya dengan luas permukaan disebut tegangan
   b. satuan tegangan dalam SI adalah N/m^2
   c. dimensi tegangan adalah $[M][L]^{-1}[T]^{-2}$
   d. modulus geser adalah perbandingan antara tegangan geser dan regangan geser
   e. besarnya pertambahan panjang per satuan panjang disebut regangan
7. Elastisitas didefinisikan sebagai kemampuan untuk kembali ke keadaan semula setelah pada benda diberi gaya tarik atau gaya tekan. Bila gaya tarik atau gaya tekan melebihi batas kemampuannya, maka . . . .
   a. benda tersebut akan retak/terdeformasi
   b. benda tersebut akan retak bila masih bersifat elastis
   c. benda tersebut akan terdeformasi bila sudah retak
   d. benda tersebut tetap elastis
   e. semua pernyataan di atas salah

8. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, **kecuali** . . . .
   a. modulus Bulk (B) adalah perbandingan antara perubahan tekanan dengan rasio antara pertambahan volume dengan volume awalnya
   b. dalam satuan SI satuan modulus Bulk adalah N/m^2
   c. dimensi dari modulus Bulk adalah $[M]^2[L]^{-1}[T]^{-2}$
   d. bila fraksi perubahan volume air adalah 0,1%, maka kenaikan tekanannya adalah $2{,}2\times10^6\ N/m^2$
   e. bila fraksi perubahan volume air raksa adalah 0,1%, maka kenaikan tekanannya adalah $26\times10^6\ N/m^2$
9. Tekanan pada benda elastik dinyatakan sebagai . . . .
   a. regangan
   b. modulus
   c. kerja
   d. tegangan
   e. batas elastisitas
10. Sebuah kubus yang terbuat dari kaca, diletakkan di dalam ruangan yang bertekanan tinggi sedemikan hingga semua bidang sisi kubus mengalami tekanan yang besarnya sama yaitu $1{,}6 \times 10^8\ N/m^2$. Bila panjang rusuk kubus adalah 8cm, maka . . . .
   a. fraksi perubahan volume kubus adalah 0,04%
   b. fraksi perubahan volume kubus adalah 0,4%
   c. besarnya volume kubus di bawah tekanan adalah 510 cm^3
   d. besarnya volume kubus di bawah tekanan adalah 514 cm^3
   e. besarnya volume kubus di bawah tekanan adalah 522 cm^3

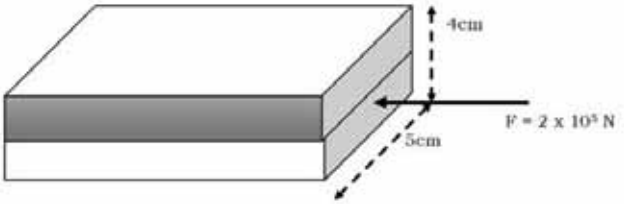
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. a. Jelaskan perbedaan antara tegangan dan tegangan geser!
   b. Jelaskan hubungan antara tegangan dan regangan! Bagaimanakah perbandingan antara tegangan dan regangan?
2. Bila disediakan sebuah beban dan 4 buah pegas identik, maka:
   a. Buatlah beberapa gambar skema tentang susunan pegas yang terdiri dari sebuah beban dan 4 buah pegas!
   b. Skema yang bagaimanakah yang menghasilkan konstanta pegas pengganti yang terbesar dan terkecil?

c. Bila besarnya konstanta pegas adalah 100 N/m dan massa beban yang digantungkan sebesar 0,5 kg, berapakah pertambahan panjang masing-masing pegas untuk susunan pegas yang konstantatanya terbesar dan terkecil?

3. Sebuah batang magnesium yang panjangnya 1 m berputar pada bidang horisontal terhadap sumbu yang tegak lurus pada salah satu ujungnya dengan kelajuan anguler konstan sebesar $\omega = 2$ rad/sekon. Bila batang magnesium berbentuk silinder tipis dengan diameter 2 mm dan modulus elastisitasnya $4{,}5\times10^{10}$ Pa dan gaya radial seolah-olah dikonsentrasikan pada ujung yang bebas, tentukan pertambahan panjang batang magnesium tersebut!
4. Tunjukkan dengan pembebanan bahwa besarnya konstanta pegas total dari 5 pegas identik yang konstantanya k yang disusun seri adalah ($k/5$) dan yang disusun paralel adalah $5k$!
5. Sebuah batang alumunium yang diameternya 6 cm dan tingginya 8 cm dipasang tegak lurus pada dinding secara kuat. Pada ujung yang bebas digantungkan beban yang massanya 1200 kg, bila modulus geser Al adalah 3×10^{10} N/m^2, berapakah besarnya tegangan geser Al tersebut? Berapakah simpangan vertikal Al pada ujung bebasnya?
6. Sebuah batang yang massanya 100 kg digantung dengan dua buah kawat besi yang diameternya sama tetapi panjangnya berbeda. Mula-mula kawat A panjangnya 3,3 m dan kawat B lebih pendek 2 mm dari panjang kawat A. Supaya balok dapat tergantung secara horisontal, balok digantung dengan cara pusat massa balok letaknya sedikit lebih dekat terhadap kawat B! Tentukan gaya tegangan pada kawat A dan B! Berapa jaraknya pusat massa balok tersebut dari A atau B?
7. Sebuah lampu trafik yang massanya 40 kg digantung dengan dua buah kabel sejenis yang panjangnya sama dan diameternya 0,7cm. Bila masing-masing kabel membuat sudut 37° terhadap arah horizontal, berapakah fraksi pertambahan panjang pada masing-masing kabel?
8. Sebuah kerangka besi mempunyai penampang yang berukuran 20 cm × 25 cm. Kerangka besi tersebut digunakan untuk menahan beban seberat 20 ton. Bila panjang kerangka besi tanpa beban 4m, berapakah panjang kerangka yang terbebani di atas?

9. Sebuah batang terdiri dari dua logam kuningan dan besi, yang tebalnya sama yaitu 2 cm dan lebarnya juga sama yaitu 5 cm, lihat gambar di bawah! Bila pada ujung logam tersebut dikenai gaya tekan sebesar 2×10^5 N, ke manakah logam akan membengkok? Jelaskan alasanmu!



10. Seorang tukang kayu mengerjakan gaya tangensial sebesar 200 N pada permukaan bagian atas sebuah balok kayu. Bila permukaan balok kayu berukuran 20 cm × 35 cm, tentukan tegangan geser pada balok kayu tersebut!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawabanmu dengan teman-temanmu! Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab IV

Gerak Osilasi

Tujuan pembelajaran:

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menganalisis dan menjelaskan hubungan antara gaya dengan getaran.

Kata kunci dalam bab ini, antara lain:

1. Frekuensi
2. Amplitudo
3. Periode

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:

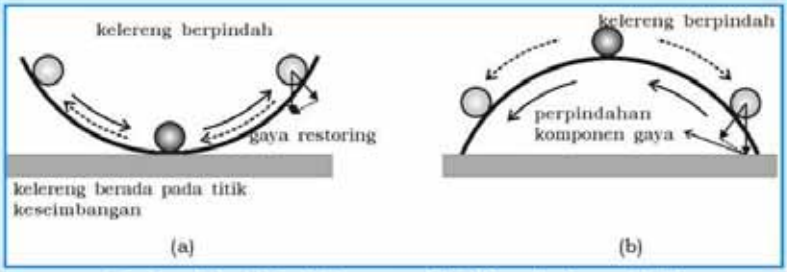
1. Gerak harmonik sederhana.
2. Energi pada gerak harmonik sederhana.
3. Ayunan sederhana.
4. Gerak osilasi teredam.
5. Resonansi.

Pengertian getaran atau osilasi mencakup pengertian gerak bolak-balik suatu benda di sekitar titik keseimbangan. Contohnya: sebuah benda yang berayun melakukan gerak osilasi atau gerak bolak-balik, sebuah kelereng yang diletakkan di dalam mangkok diberi sedikit simpangan dari posisi setimbangnya di dasar mangkok, akan menyebabkan kelereng bergerak bolak-balik di sekitar posisi kesetimbangannya dan akhirnya berhenti di posisi kesetimbangannya, lihat gambar 4.1.

Benda yang melakukan gerak bolak-balik terhadap titik setimbangnya disebabkan oleh adanya gaya pemulih (*restoring force*). Gambar 4.1(a) menunjukkan kelereng yang bergerak kembali ke

arah bawah menuju titik kesetimbangan karena adanya gaya pemulih. Gaya pemulih berupa komponen gaya berat kelereng yang searah dengan lintasan kelereng. Titik kesetimbangan tempat kelereng berhenti pada gambar 4.1(a) disebut titik kesetimbangan stabil, sebab setiap diberi gangguan atau disimpangkan, kelereng akan kembali ke tempat semula. akan tetapi untuk kelereng yang ada di puncak mangkok pada gambar 4.1(b) bila gerak kelereng tidak kembali ke tempat semula, melainkan akan terus turun ke bawah. Titik kesetimbangan ini disebut titik kesetimbangan labil.

Dalam bab ini, kalian akan mempelajari tentang hubungan antara gaya dan gerak getaran atau osilasi.

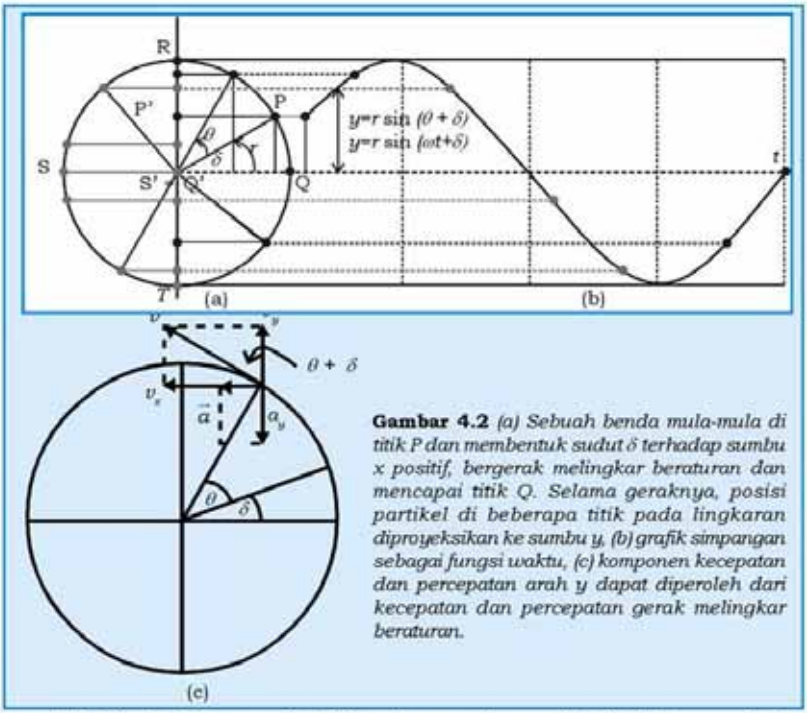


Gambar 4.1 *(a) Keseimbangan stabil, (b) kesetimbangan labil*

A. Gerak Harmonik Sederhana

Gerakan sebuah benda yang berosilasi tergantung pada besar kecilnya gaya pemulih yang menyebabkan benda bergerak bolak-balik. Untuk memahami persamaan posisi benda yang mengalami gerak harmonik pada setiap saat, kita dapat mendefinisikan gerak harmonik sebagai proyeksi dari gerak melingkar beraturan pada salah satu sumbunya. Pada sumbu x untuk gerak harmonik arah horizontal atau pada sumbu y untuk gerak harmonik arah vertikal.

Gambar 4.2 menunjukkan posisi benda yang melakukan gerak harmonik pada setiap saat sebagai hasil dari proyeksi benda yang melakukan gerak melingkar beraturan. Pada gambar 4.2 ditunjukkan, mula-mula partikel berada di titik P dan posisi sudut



Gambar 4.2 *(a) Sebuah benda mula-mula di titik P dan membentuk sudut δ terhadap sumbu x positif, bergerak melingkar beraturan dan mencapai titik Q. Selama geraknya, posisi partikel di beberapa titik pada lingkaran diproyeksikan ke sumbu y, (b) grafik simpangan sebagai fungsi waktu, (c) komponen kecepatan dan percepatan arah y dapat diperoleh dari kecepatan dan percepatan gerak melingkar beraturan.*

awal δ, P' adalah proyeksi P pada sumbu y. Partikel bergerak ke atas menuju R di mana R adalah titik tertinggi pada lingkaran proyeksinya berimpit dengan titik itu sendiri. Kemudian partikel bergerak ke bawah menuju S yang proyeksinya pada sumbu y adalah S'. Titik S' = Q' adalah titik kesetimbangan sehingga mempunyai simpangan nol. Kemudian partikel bergerak ke bawah dan mencapai simpangan maksimum kedua di titik T. Titik T bertanda negatif karena arahnya ke bawah dari titik kesetimbangan dan akhirnya mencapai titik Q yang proyeksinya Q'. Jadi, proyeksi posisi partikel yang bergerak melingkar beraturan pada sumbu y menghasilkan gerak bolak-balik sepanjang sumbu y dengan titik kesetimbangan di $y = 0$. Karena merupakan proyeksi pada sumbu y, maka persamaan posisi partikel setelah bergerak t sekon dan dinyatakan sebagai:

$$y = r \sin (\theta + \delta) = r \sin (\omega t + \delta) \qquad (4.1)$$

di mana ω adalah kelajuan sudut konstan. Grafik y sebagai fungsi t ditunjukkan pada gambar 4.2(b) yang merupakan grafik fungsi sinus.

Dengan demikian, besaran-besaran yang berlaku pada gerak melingkar juga berlaku untuk gerak harmonik, yaitu periode (T), frekuensi f, dan kecepatan sudut ω. Adapun yang dimaksud dengan satu periode, T, adalah waktu yang diperlukan oleh benda untuk bergerak bolak-balik dalam satu siklus penuh, sedangkan frekuensi, adalah banyaknya gerakan bolak-balik dalam waktu satu sekon. Hubungan-hubungan antara variabel-variabel tersebut adalah:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \qquad (4.2a)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \qquad (4.2b)$$

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa simpangan maksimum pada gerak harmonik sederhana tersebut tidak lain sama dengan jari-jari lingkaran r. Namun seperti telah disebutkan di atas, simpangan maksimum disebut sebagai amplitudo A, jadi $A = r$ dan persamaan 4.2 dapat ditulis menjadi:

$$y = A \sin(\theta + \delta) = A \sin(\omega t + \delta)$$

Tugas 4.1

Tunjukkan bahwa bahwa proyeksi posisi partikel pada sumbu x yang bergerak melingkar beraturan di atas dinyatakan sebagai $x = r\cos(\omega t + \delta)$!

Seperti pada gerak dalam satu dimensi atau dua dimensi, bila persamaan gerak sebuah benda sudah diketahui maka kecepatan benda sesaat dan percepatan sesaat dapat diperoleh dari persamaan gerak tersebut. Untuk gerak harmonik yang bergerak bolak-balik sepanjang sumbu y, kita dapat menentukan kecepatan sesaat searah dengan y, yaitu komponen kecepatan gerak melingkar beraturan dengan jari-jari $r = A$ dan dengan kecepatan sudut konstan ω, pada sumbu y, lihat gambar 4.2(c):

$$v_y = v\cos(\theta + \delta) = \omega A\cos(\omega t + \delta) \qquad (4.3)$$

Demikian juga percepatan sesaat a_y dapat diperoleh dari percepatan sentripetal $a_r = \frac{v^2}{A}$ yaitu komponen percepatan sentripetal arah sumbu y:

$$a_y = -\frac{v^2}{A}\sin(\theta + \delta) = -\omega^2 A\sin(\omega t + \delta) = -\omega^2 y \qquad (4.4)$$

Tanda negatif dipilih karena arah percepatan yang searah sumbu y ke bawah.

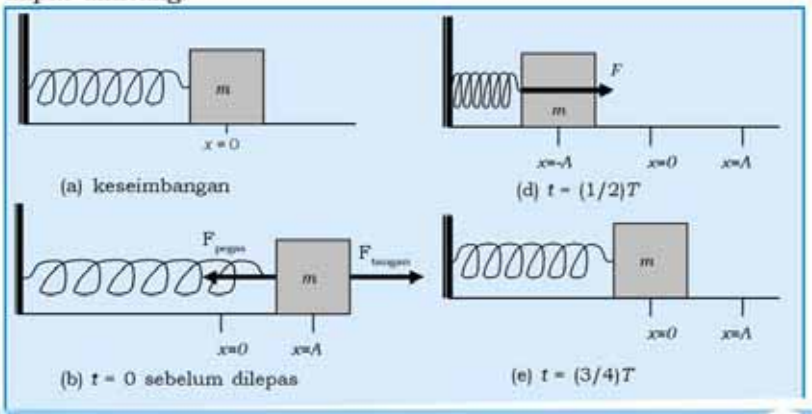
Karena cos $(\omega t+\delta)$ berharga antara –1 dan +1, maka harga kecepatan simpangan partikel yang melakukan gerak harmonis sederhana, v_y adalah $\pm\omega A$, sedangkan harga percepatannya, a_y adalah $\pm\omega^2 A$.

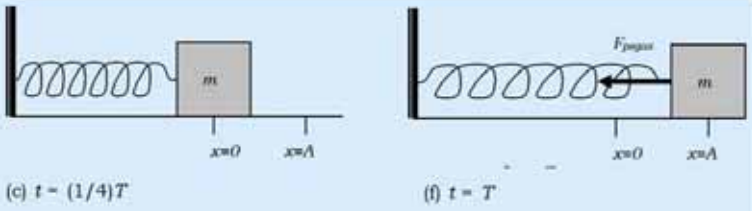
Ketika $v_y = \omega A$, partikel berada pada titik kesetimbangan atau simpangan partikel nol dan arah kecepatannya ke atas. Ketika $v_y = -\omega A$, simpangan partikel juga nol tetapi arah kecepatannya ke bawah. Di lain pihak, menurut persamaan 4.5 bila simpangan nol, maka harga percepatannya juga nol. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa bila harga kecepatannya maksimum maka harga percepatannya nol, sedangkan bila harga percepatannya maksimum, maka harga kecepatannya nol yaitu di titik-titik dimana simpangannya maksimum yaitu pada kedua titik balik gerak partikel.

Bentuk penyelesaian umum persamaan gerak harmonis sederhana yang dinyatakan dalam persamaan 4.1, konstanta sudut fase θ (posisi sudut awal) dan amplitudo $r = A$ harus memenuhi syarat kondisi awal. Misalkan posisi awal partikel pada saat $t = 0$ adalah y_0 dan kecepatan awal partikel v_0, maka dengan menggunakan persamaan 4.1 dan 4.3 diperoleh $y_0 = A \sin\theta$ dan $v_0 = \omega A \cos\theta$. Dan dari harga x_0 dan v_0 diperoleh:

$$A = \sqrt{(x_0^2 + (\frac{v_0}{\omega})^2} \text{ dan } \tan\theta = \frac{\omega y_0}{v_0}$$

Dari diskusi di atas dapat disimpulkan bahwa bila x_0, v_0, dan ω diketahui, maka harga amplitudo A dan konstanta sudut fase θ dapat dihitung.





Gambar 4.3 *Sebuah benda yang diikat dengan pegas disimpangkan di atas bidang datar yang licin, maka benda tersebut melakukan gerak harmonik sederhana*

Salah satu contoh gerak harmonis sederhana adalah gerak sebuah benda yang diikatkan pada ujung bebas pegas di atas bidang datar yang licin seperti pada gambar 4.3. Untuk menganalisis gaya pemulih yang bekerja pada benda yang bergerak harmonis sederhana, marilah kita tinjau gaya sederhana yang berbanding lurus dengan perpindahannya. Misalnya gaya pada sebuah benda yang diikatkan pada ujung pegas dengan besarnya simpangan benda tersebut dinyatakan sebagai hukum Hooke. Yaitu, bila sebuah benda yang diikatkan pada ujung bebas sebuah pegas disimpangkan sejauh x, maka hubungan antara gaya pemulih kembali yang menyebabkan pegas kembali ke keadaan semula adalah:

$$\vec{F} = -kx \qquad (4.5)$$

di mana k adalah konstanta pegas. Tanda negatif pada pers. 4.5 berarti bahwa gaya pemulih selalu berlawanan arah dengan arah simpangan.

Jika benda pada gambar 4.3 ditarik ke kanan dan kemudian dilepas, maka benda tersebut akan melakukan gerak bolak-balik atau berosilasi di sekitar titik kesetimbangan. Benda yang berosilasi secara teratur atau periodik melakukan gerak berulang-ulang dengan lintasan yang sama. Osilasi linear terjadi pada sebuah benda yang diletakkan pada bidang datar licin dan terikat pada ujung pegas, seperti terlihat pada gambar 4.3, atau pada sebuah benda yang tergantung pada pegas secara vertikal yang bergerak bolak-balik pada lintasan yang berbentuk garis lurus.

Osilasi anguler dialami oleh benda yang melakukan ayunan sederhana (pendulum). Benda bergerak bolak-balik pada lintasan berupa busur lingkaran dengan jari-jari sepanjang tali ayunan.

Gerak benda yang dipengaruhi oleh gaya yang tunduk pada hukum Hooke disebut gerak harmonik sederhana. Hal ini disebabkan karena gaya tersebut adalah gaya pemulih sebagai fungsi simpangan yang sangat sederhana, yaitu hanya berbanding lurus dengan simpangan, dan arahnya selalu menuju ke titik kesetimbangan. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 (b), balok bermassa m disimpangkan ke kanan dengan tangan, setelah pegangan tangan dilepas maka mulailah bekerja gaya pemulih yang arahnya ke kiri, menurut hukum II Newton:

$$F = -kx = ma$$

$$a = -\frac{k}{m}x \qquad (4.6)$$

Persamaan 4.6 dapat diartikan bahwa besarnya percepatan yang dialami balok sebanding dengan besarnya simpangan dari titik kesetimbangannya, tetapi arahnya berlawanan dengan arah simpangan. Balok yang terikat pada ujung pegas yang bebas dapat mengalami simpangan. Arah simpangannya bertanda positif (arah x positif) bila ditarik ke kanan dan negatif (arah x negatif) bila ditekan ke kiri. Simpangan maksimum dari balok yang berosilasi adalah $+A$ dan $-A$, seperti ditunjukkan pada gambar 4.3(b) dan (d). Besarnya perpindahan maksimum atau simpangan maksimum sebuah balok bermassa m dari posisi kesetimbangannya disebut amplitudo (A). Bila simpangan balok maksimum, $x = A$, yaitu balok yang ditarik ke kanan, kemudian gaya tariknya dilepaskan, balok bergerak dari keadaan diam, maka percepatannya sebesar $a = -\frac{k}{m}A$, yang merupakan harga percepatan ekstrem negatif. Pada saat balok mencapai titik kesetimbangan, percepatan balok menjadi nol karena simpangannya nol. Maka bila balok bergerak dalam satu siklus penuh yaitu bergerak selama satu periode T, maka balok tersebut telah menempuh jarak sebesar $4A$.

Untuk mendeskripsikan secara kuantitatif gerak balok yang terikat pada pegas, persamaan 4.6 dapat ditulis kembali menjadi:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \qquad (4.7)$$

Karena balok bergerak harmonik dalam arah sumbu x, maka persamaan geraknya dapat diperoleh dari proyeksi gerak melingkar beraturan pada sumbu x, yaitu:

$$x = A\cos(\omega t + \delta) \qquad (4.8)$$

Dari persamaan 4.8 kita secara langsung dapat menjabarkan kecepatan dan percepatan sesaat simpangan balok yang terikat pada pegas tersebut yaitu:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \delta) \text{ dan,}$$

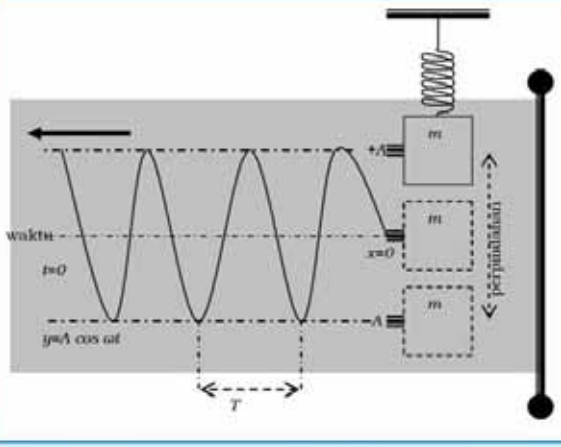
$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \delta) = -\omega^2 x \qquad (4.9)$$

Dapat kita lihat bahwa bentuk persamaan 4.9 mirip dengan bentuk persamaan 4.3 dan 4.4.
Dari persamaan 4.7 dan 4.8 dapat ditunjukkan bahwa,

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \qquad (4.10)$$

dan dari persamaan 4.2 diperoleh:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (4.11)$$

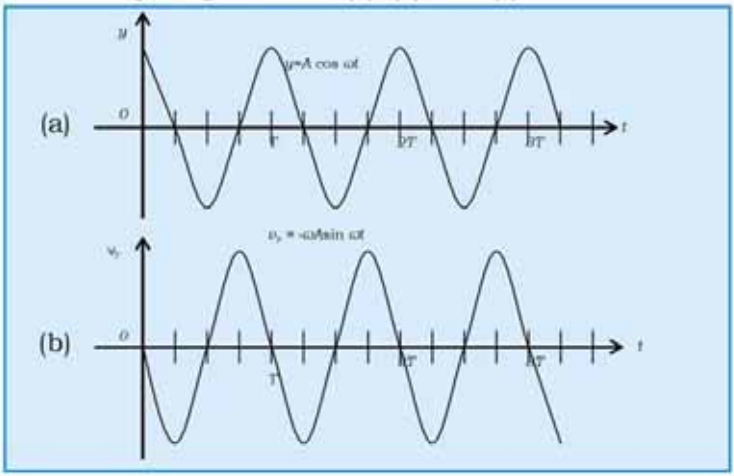


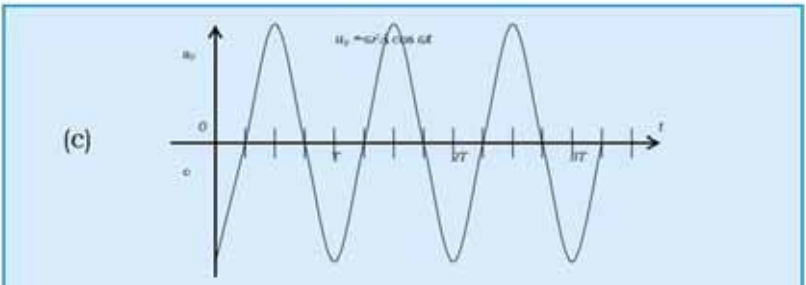
Gambar 4.4 *Alat demonstrasi gerak harmonik sederhana.*

Pada persamaan 4.11 ditunjukkan bahwa periode hanya tergantung massa benda yang bergerak harmonik dan konstanta pegas *k*. Pada gambar 4.4 ditunjukkan peralatan yang terdiri dari sebuah balok *m* yang tergantung pada pegas dan pena dipasang pada balok. Pada saat balok bergerak bolak-balik pena menorehkan grafik lintasan balok pada kertas yang berjalan sehingga pada kertas tergambar posisi balok sebagai fungsi waktu. Torehan pena yang paling awal berjalan paling jauh.

Seperti terlihat pada gambar 4.4, pada saat $t = 0$ balok yang ditekan ke atas dilepaskan dari keadaan diam, maka $x\ (t = 0) = A$. Karena pada saat $t = 0$ simpangannya maksimum maka persamaan simpangan dari gerak balok adalah $y = A \cos \omega t$, dimana kita telah memilih δ sama dengan nol. Pada saat balok bergerak bolak-balik, pena yang dipasang pada balok menorehkan grafik fungsi *cos* pada kertas grafik yang berjalan, yang hasilnya seolah-olah bagaikan gelombang yang berjalan. Pada gambar 4.4 ditunjukkan bahwa balok telah bergerak harmonik selama 3,25 T.

Untuk memahami gerak harmonik sebuah balok yang tergantung pada pegas pada gambar 4.4, maka kita harus memahami grafik kecepatan dan percepatannya pada saat yang sama yaitu $t = 3{,}25$ T. Karena pada saat $t = 0$ balok pada posisi ekstrem maksimum di mana persamaan geraknya adalah $y = A \cos \omega t$, maka kecepatan simpangannya adalah $v_y = -\omega A \sin \omega t$ dan percepatannya $a_y = -\omega^2 A \cos \omega t$. Grafik simpangan y, kecepatan v_y, dan percepatan a_y dilukiskan pada gambar 4.5 (a), (b), dan (c).





Gambar 4.5 *(a) Grafik simpangan balok yang bergerak harmonik pada gambar 4.4 sebagai fungsi waktu selama 3,25T, (b) grafik kecepatan fungsi waktu pada a) dan (c) Grafik percepatan fungsi waktu.*

Gambar 4.5(a) menunjukkan bahwa balok yang disimpangkan maksimum pada saat $t = 0$, bergerak ke bawah menuju ke titik kesetimbangan dan terus bergerak turun sampai mencapai simpangan maksimum negatif $-A$, dan kemudian bergerak balik ke atas dan seterusnya selama 3,25 T. Pada saat simpangannya maksimum maka kecepatan pada saat $t = 0$ adalah nol, lihat gambar 4.5 dan percepatannya $-\omega^2 A$. Harga percepatan yang negatif menunjukkan bahwa pada saat $t = 0$ benda berada pada simpangan maksimum maka gaya arahnya ke bawah sehingga memberikan percepatan yang negatif, dan setelah mencapai titik kesetimbangan gayanya menjadi nol dan juga percepatannya.

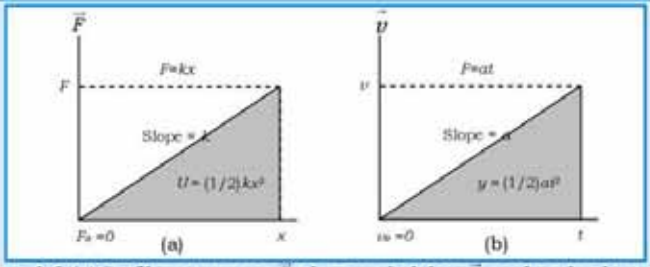
B. Energi Gerak Harmonik Sederhana

Pada penurunan persamaan gerak linier, kita mengenalkan konsep kecepatan rata-rata $\vec{v}_n = \left(\frac{v+v_0}{2}\right)$ untuk partikel yang bergerak dengan percepatan konstan. Untuk keadaan khusus pada gaya pegas dengan konstanta pegas k, kita dapat menggunakan suatu pendekatan tanpa menggunakan perhitungan kalkulus. Gambar 4.6 (a) menujukkan grafik hubungan antara F dan x yang dianalogikan dengan grafik hubungan antara v dan t, gambar 4.6(b) Garis miring menunjukkan nilai k dan F bertambah secara teratur terhadap x. Analogi dengan kecepatan rata-rata, maka besarnya gaya rata-rata dapat dituliskan sebagai:

$$\overline{F} = \left(\frac{F + F_0}{2}\right) = \frac{F}{2} \text{ ,di mana } F_0 = 0.$$

Kerja yang dilakukan akibat terjadinya renggangan atau pemampatan pegas sejauh x dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 4.5 sebagai:

$$U_p = \bar{F}x = \frac{Fx}{2} = \frac{1}{2}kx^2$$



Gambar 4.6 *(a) Grafik antara gaya $\bar{F}$ dan perpindahan x pada sebuah pegas, (b) analogi dengan grafik antara kecepatan v dan waktu t untuk gerak benda dengan percepatan konstan.*

Sebuah benda bermassa m yang melakukan gerak osilasi/ harmonis mempunyai energi kinetik sebesar $(1/2)mv_x^2$. Jadi energi total yang dilakukan oleh pegas adalah:

$$E = U + E_k = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv_x^2 \qquad (4.12)$$

Pada saat simpangan benda ekstrem, $x = \pm A$ maka kecepatan benda nol, sehingga besarnya energi totalnya adalah:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 + \frac{1}{2}m(0)^2 = \frac{1}{2}kA^2 \qquad (4.13)$$

Dengan mengabaikan energi yang hilang, maka energi total benda yang bergerak harmonik adalah konstan. Karena energi total konstan, dengan menggunakan persamaan 4.12 dan 4.13, kecepatan benda yang bergerak harmonik sederhana dapat dinyatakan sebagai fungsi posisi yaitu:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 + \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$$
$$v^2 = \frac{k}{m}(A^2 - x^2) \rightarrow v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} \qquad (4.14)$$

tanda ± menunjukkan arah kecepatan ke kanan dan ke kiri. Persamaan 4.14 menunjukkan bahwa bila $v = 0$ maka benda pada posisi diam sesaat untuk $x = \pm A$.

Pada saat benda berada pada posisi kesetimbangan $x = 0$, maka energi potensialnya sama dengan nol sehingga energi kinetiknya mencapai harga maksimum. Dari hukum kekekalan energi berlaku hubungan:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 + \frac{1}{2}k(0)^2 + \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$v_{max} = A\omega \text{ karena } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (4.15)$$

Persamaan 4.15 menunjukkan bahwa kecepatan maksimum tergantung pada besarnya amplitudo, massa benda, dan konstanta pegas. Dengan demikian, kecepatan simpangan benda disebut kecepatan amplitudo atau kecepatan simpangan. Demikian juga dengan besarnya percepatan maksimum, $a_{max} = A\omega^2$ yang juga tergantung pada amplitudo, massa benda yang bergerak harmonis dan konstanta pegas, maka percepatan benda juga disebut percepatan amplitudo atau percepatan simpangan gerak harmonis benda.

Contoh Soal 4.1

Sebuah balok bermassa 0,25 kg diletakkan pada permukaan yang halus dan dihubungkan dengan sebuah pegas yang mempunyai konstanta pegas k = 150 N/m (lihat gambar 4.3). Jika balok ditarik sejauh 15 cm dari titik kesetimbangannya dan kemuadian dilepas.

a. Berapa energi total dalam sistem?
b. Berapa kelajuan jika balok berada pada 10 cm dari posisi kesetimbangan?

Penyelesaian:
Diketahui:
m = 0,25 kg
k = 150 N/m
A = 15 cm
x = 10 cm

Ditanya:
a. Energi total sistem?
b. Kelajuan balok di x = 10 cm?

Jawab:

a. Energi total, $E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(150\,\text{N/m})(0{,}15\,\text{m})^2 = 1{,}69\,\text{Nm}$

b. Karena yang ditanyakan adalah kelajuan maka kita tidak perlu memperhatikan tanda arah, sehingga,

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} = \sqrt{\frac{150\ \text{N/m}}{0{,}25\ \text{kg}}\left[(0{,}15\ \text{m})^2 - \left(0{,}10\ \text{m}^2\right)\right]} \approx \sqrt{7{,}5}\ \text{m/s}$$

Contoh Soal 4.2

Sebuah balok diletakkan pada permukaan tanpa gesekan dengan massa 500 g diikatkan pada sebuah pegas dengan konstanta pegas k = 50 N/m. Balok ditarik sepanjang x = 10 cm dari titik kesetimbangan di x = 0 dan dibebaskan dari keadaan diam pada saat t = 0. Berapa percepatan sudut, frekuensi, dan periodenya?

Penyelesaian:
Berdasarkan data dan informasi dari soal ditunjukkan bahwa benda melakukan gerak harmonik sederhana yang bersifat linear, data yang diperoleh adalah:

Diketahui:
Massa benda = 500 g
k = 50 N/m
x = 10 cm

Ditanya:
a. Kecepatan sudut?
b. Frekuensi?
c. Periode gerakan?

Jawab:
a. Berdasarkan persamaan 4.7,

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{50\ \text{N/m}}{0{,}50\ \text{kg}}} = 10\ \text{rad/s}$$

b. Frekuensi,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{10 \text{ rad/s}}{2 \times 3{,}14 \text{ rad}} = 1{,}59/\text{s} \approx 1{,}6 \text{ Hz}$$

c. Periode,

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{1{,}59 \text{ Hz}} = 0{,}63 \text{ s}$$

Contoh Soal 4.3

Berkaitan dengan contoh soal 4.2,
a. Berapa amplitudo benda yang berosilasi?
b. Berapa kelajuan maksimum dari benda yang berosilasi?
c. Berapa besar percepatan maksimumnya?

Penyelesaian:
Diketahui:
Massa benda=500 g
k = 50 N/m
x = 10 cm
Ditanya:
a. x_{max}=A?
b. v_{max}?
c. a_{max}?

Jawab:
a. Karena benda berosilasi tanpa ada gesekan, maka dapat disimpulkan bahwa besarnya perpindahan maksimum atau amplitudo:

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

b. Kelajuan maksimum dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 4.9, yaitu:

$$v_{\max} = \omega A = (10 \text{ rad/s})(0{,}10 \text{ m}) = 1{,}0 \text{ m}$$

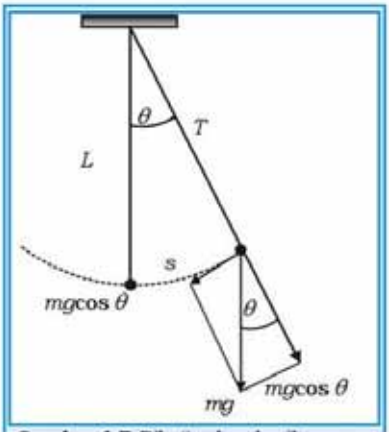
c. Besarnya percepatan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 4.11c,

$$a_{\max} = -\omega^2 A = (10 \text{ rad/s})^2 (0{,}10 \text{ m}) = 10 \text{ m/s}^2$$

(tanda negatif bisa diabaikan karena yang ditanyakan adalah besarnya (besaran skalar))

C. Ayunan Sederhana (Bandul Matematis)

Ayunan sederhana adalah salah satu contoh benda yang melakukan gerak bolak-balik dalam lintasan berbentuk busur lingkaran. Ayunan sederhana terdiri dari sebuah benda yang dianggap sebagai titik massa yang digantungkan pada tali yang panjangnya L dan ujung tali yang lain diikatkan secara tetap pada dinding, lihat gambar 4.7.



Gambar 4.7 *Bila θ cukup kecil, ayunan sedehana bergerak secara harmonis disekitar titik kesetimbangan θ =0*

Bila bandul disimpangkan ke kanan dengan simpangan sudut sebesar θ, maka bila dilepaskan bandul tersebut akan bergerak balik ke tempat titik setimbangnya. Hal ini terjadi karena pada bandul bekerja gaya pemulih yang diberikan oleh komponen gaya gravitasi pada bandul dengan arah garis singgung lintasan yang selalu menuju titik kesetimbangan di mana $\theta = 0$. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa komponen gaya tangensial adalah gaya pemulih yang dinyatakan sebagai:

$$\vec{F}_t = -mg\sin\theta = m\frac{d^2s}{dt^2} \qquad (4.16)$$

di mana s adalah panjang lintasan (simpangan) yang diukur sepanjang busur lingkaran yang jari-jarinya L. Karena $s = L\theta$, maka persamaan 4.16 dapat ditulis menjadi:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L}\sin\theta \qquad (4.17)$$

Pada persamaan 4.17 ditunjukkan bahwa benda yang melakukan ayunan sederhana tidak melakukan gerak harmonis untuk sembarang harga θ, tetapi bila harga θ cukup kecil, yaitu kurang dari 10°, maka harga sin θ dapat didekati dengan harga θ itu sendiri dengan satuannya dalam radian, sin $\theta \approx \theta$ rad, maka persamaan gerak titik massa m yang melakukan ayunan sederhana pada persamaan 4.17 dapat ditulis kembali menjadi:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L}\theta \qquad (4.17a)$$

Persamaan 4.17a menunjukkan persamaan benda yang melakukan gerak harmonik dimana:

$$\frac{g}{L} = \omega^2, \qquad (4.17b)$$

maka besarnya periode ayunan sederhana adalah:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (4.18)$$

Persamaan 4.18 menunjukkan bahwa periode ayunan sederhana hanya tergantung pada panjangnya tali, percepatan gravitasi, dan tidak tergantung massa. Dari persamaan 4.18 dapat disimpulkan bahwa semua benda yang melakukan gerak ayunan sederhana dengan tali yang panjangnya sama di tempat yang sama maka periode ayunannya sama. Ayunan sederhana yang ideal terjadi jika tidak ada gaya gesek antara tali dan tempat penggantung. Ayunan sederhana yang ideal dapat digunakan sebagai dasar untuk membuat jam bandul, dan juga dapat digunakan sebagai cara untuk mengukur percepatan gravitasi di suatu tempat tertentu.

Contoh Soal 4.4

Sebuah ayunan sederhana mempunyai periode T sebesar 2 s.

a. Berapakah panjang tali ayunan sederhana tersebut?
b. Berapakah periode ayunan sederhana tersebut bila berada di bulan yang percepatan gravitasinya 1,67 m/s^2?
c. Berapakah periode ayunan sederhana tersebut bila ayunan tersebut berada di dalam lift yang bergerak ke atas dengan percepatan 5 m/s^2.

Penyelesaian:

Untuk soal:

a. Kita bisa mengambil $g = 10$ m/s^2, maka dengan menggunakan persamaan 4.18, diperoleh $l = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{10\ \text{m/s}^2.(2\text{s})^2}{4(3{,}14)} = 1{,}01$ m

b. $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2(3{,}14)\sqrt{\frac{1{,}01\ \text{m}}{1{,}67\ \text{m/s}^2}} = 4{,}86$ s

c. Bila ayunan sederhana berada dalam lift yang bergerak ke atas dengan percepatan 5 m/s^2 relatif terhadap bumi, maka percepatan relatif yang dialami bandul terhadap pengamat yang ada di dalam lift adalah percepatan bandul

terhadap bumi dikurangi percepatan lift terhadap bumi yaitu $\vec{a}_r$ = (-10 –5) = -15 m/s². Jadi, seolah-olah bandul ditarik kebawah dengan percepatan sebesar 15 m/s², maka besarnya periode $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2\ (3{,}14)\sqrt{\frac{1{,}01\text{m}}{15\ \text{m/s}^2}}$

Brilian

Kalian semua sudah pernah melihat jam dinding yang dilengkapi jarum besar yang berosilasi dengan periode 1s, bukan? Bila jarum jam tersebut dapat dianggap sebagai ayunan sederhana dan bila diletakkan di ruang tamu periodenya 1 s, maka bila diletakkan di dalam lift yang berlantai seratus, sehingga dalam jangka waktu tertentu lift mengalami percepatan konstan ke atas sebesar 5 m/s², manakah yang lebih lama antara satu jam di lift dan satu jam di ruang tamu? Bila seseorang menggunakan jam tersebut untuk datang ke pertemuan, maka orang tersebut akan terlambat atau datang lebih awal?

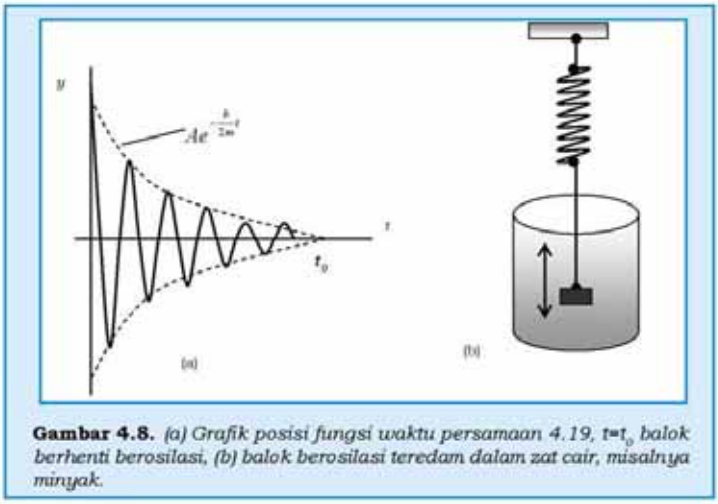
D. Gerak Osilasi Teredam

Ayunan sederhana yang kita diskusikan di atas mempunyai kondisi yang ideal. Coba kalian amati, apakah sebuah bola besi yang tergantung pada sebuah tali bila diayunkan akan berayun terus-menerus, atau suatu saat menjadi berhenti? Bila berhenti berarti kondisi ayunan sederhana tidak ideal lagi. Kondisi ayunan yang tidak ideal, dapat kita ciptakan salah satunya dengan gerakan bolak-balik balok yang terikat pada pegas, tetapi balok berada di dalam larutan/zat cair, misalnya minyak tanah. Balok yang berosilasi di dalam minyak tanah mengalami gaya gesek dari minyak tanah, maka balok tersebut dikatakan berosilasi teredam, lihat gambar 4.8.

Besarnya gaya gesek pada benda yang bergerak di dalam zat cair sebanding dengan kecepatan benda (menurut hukum Stokes), maka persamaan gerak dari benda yang berosilasi teredam dapat dituliskan sebagai:

$$\sum F_y = -ky - bv = ma_y \qquad (4.19)$$

di mana bv adalah besarnya gaya gesek yang dialami balok dalam medium, atau b adalah konstanta kesebandingan, v adalah kecepatan simpangan sesaat benda, dan a adalah perecepatan sesaat benda.



Gambar 4.8. *(a) Grafik posisi fungsi waktu persamaan 4.19, t=t_0 balok berhenti berosilasi, (b) balok berosilasi teredam dalam zat cair, misalnya minyak.*

Dengan perhitungan matematika kita peroleh penyelesaian persamaan 4.19 sebagai:

$$y = A_e^{-\frac{b}{2m}t} \cos(\omega t + \delta) \qquad (4.20)$$

di mana frekuensi sudut gerak osilasi teredam adalah:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - (\frac{b}{2m})^2} \qquad (4.21)$$

Buktikan bahwa persamaan 4.21 dapat diperoleh dengan cara memasukkan persamaan 4.20 ke dalam persamaan 4.19!

Tugas 4.2

Untuk membedakan frekuensi sudut antara osilasi sederhana dan osilasi teredam adalah bila b = 0, maka osilasi teredam menjadi osilasi sederhana dengan frekuensi sudut:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

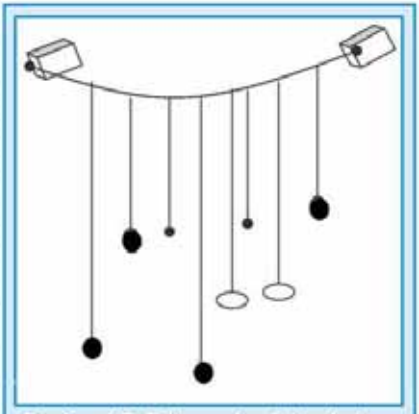
Karena ada gaya gesek antara balok yang bergerak bolak-balik dengan zat cair pada osilasi teredam maka setelah saat t_0 balok berhenti berosilasi seperti ditunjukkan pada gambar 4.8(a).

E. Resonansi

Bila kita mempunyai beberapa bandul sederhana digantungkan pada tali yang sama, apa yang terjadi bila salah satu bandul diayunkan? Bila tali bersifat elastis, maka bandul-bandul yang lain juga akan berayun-ayun. Coba amati secara saksama! Bandul yang mana yang mempunyai amplitudo ayunan yang paling besar? Setelah semua bandul berhenti, ayunkan lagi salah satu bandul yang lain yang panjang talinya berbeda dengan panjang bandul yang pertama! adakah bandul yang mempunyai simpangan yang paling besar? Ulangi lagi untuk bandul yang lain. Kesimpulan apa yang dapat kalian peroleh?

Untuk memperoleh sedikit gambaran tentang tugas di atas, coba kalian ingat lagi tentang ayunan bandul sederhana! Pada ayunan sederhana kalian telah me-ngetahui hubungan antara frekuensi sudut, panjang tali ayunan, dan percepatan gravitasi di tempat tersebut: $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$

Bila bandul hitam putih disimpangkan (diayunkan), maka yang jelas kelihatan berayun adalah juga bandul hitam putih yang lain. Coba kalian ukur, apakah tali penggantung kedua bandul



Gambar 4.9 *Beberapa bandul sederhana tergantung pada sebuah tali elestis yang kuat*

KISI

Pada waktu ada angin ribut di bulan November 1940, jembatan di atas sungai Tacoma Narrows di negara bagian Washington, Amerika Serikat mulai meliuk-liuk bolak-balik begitu kuat sehingga akhirnya ambruk, hanya empat bulan setelah diresmikan. Angin yang bertiup kencang itu hanya kebetulan saja meliuk-liuk pada frekuensi alami jembatan yang panjangnya 860 meter itu.

Hal tersebut menunjukkan adanya resonansi frekuensi sudut angin di sekitar jembatan sama dengan frekuensi alami jembatan, sehingga jembatan beresonansi dan amplitudo getaran jembatan menjadi besar.



Sumber: Jendela Iptek 3

tersebut sama panjang? Tapi kalau kalian amati secara saksama bandul-bandul yang lain juga ikut berayun tetapi ayunan yang amplitudonya paling besar adalah bandul yang berwarna merah biru. Ikut berayunnya bandul merah biru karena bandul merah biru yang lain diayunkan dengan frekuensi sudut kedua bandul tersebut sama besar dan peristiwa itu disebut peristiwa resonansi.

Kegiatan 4.1

Tujuan:
Mengamati besarnya gerak osilasi benda dalam medium.

Alat dan bahan:
1. Minyak tanah dalam wadah plastik.
2. Air dalam wadah plastik.
3. Dua balok sebagai beban yang memiliki massa berbeda.
4. Stopwatch.
5. Pegas.

Prosedur:
1. Susunlah peralatan seperti gambar!



Gambar 4.10 *Susunan alat percobaan*

2. Berikan simpangan kepada pegas dengan cara menekan balok ke bawah!
3. Lepaskan tekanan pada balok, bersamaan dengan itu hitung gerak osilasi pegas hingga berhenti!
4. Lakukan prosedur no. 3 hingga 5 kali, kemudian catat hasil pengamatan pada tabel 4.1!
5. Lakukan prosedur no. 1-4 dengan mengganti air dengan minyak!
6. Apabila diketahui persamaan simpangan pada gerak osilasi teredam, $y = Ac^{-\frac{b}{2m}t}\cos(\omega t + \delta)$, maka analisislah bagaimana besarnya konstanta kesebandingan b?

7. Lebih besar manakah konstanta kesebandingan minyak tanah dengan air?

Tabel 4.1 Waktu Getar pada Gerak Osilasi Teredam

No.	Jenis cairan	Waktu Hingga Berhenti				
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
1.	Air					
2.	Minyak tanah					

Kesimpulan:
Apa kesimpulan kalian setelah melakukan kegiatan di atas?

Rangkuman

1. Persamaan posisi partikel setelah bergerak t sekon dalam gerak harmonik sederhana dinyatakan sebagai:
   $y = A\sin(\theta + \delta) = A\sin(\omega t + \delta)$.
2. Besarnya frekuensi dan amplitudo benda yang bergerak harmonik sederhana dinyatakan sebagai:
   $T = \frac{2\pi}{\omega} \rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$.
3. Persamaan kecepatan benda dinyatakan sebagai:
   $v_y = v\cos(\theta + \delta) = \omega A\cos(\omega t + \delta)$.
4. Besarnya kecepatan maksimum, $v_{y\,mak} = \omega A$
5. Persamaan percepatan benda dinyatakan sebagai:
   $a_y = -\frac{v^2}{A}\sin(\theta + \delta) = -\omega^2 A\sin(\omega t + \delta) = -\omega^2 y$.
6. Besarnya percepatan maksimum $a_{y\,mak} = -\omega^2 A$.
7. Besarnya percepatan pegas yang bergerak osilasi:
   $a = -\frac{k}{m}x$.
8. Besarnya periode pegas yang bergerak osilasi:
   $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.
9. Besar energi total pegas yang bergerak osilasi:
   $E = U + E_k = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv_x^2$.
10. Besarnya periode pada ayunan sederhana dinyatakan:
    $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Pada sebuah benda tegar yang melakukan gerak rotasi murni (hanya melakukan rotasi saja), maka . . . .
   a. semua partikel yang menyusun benda tersebut mempunyai kecepatan anguler yang sama
   b. semua partikel yang menyusun benda tersebut mempunyai kecepatan linier yang sama
   c. percepatan semua partikel pada benda tersebut selalu nol
   d. jarak antara partikel-partikel pada benda yang berotasi bertambah besar
   e. semua jawaban di atas benar

2. Sepeda melaju pada jalan aspal yang kotor sehingga ada bagian lumpur yang tertempel pada ban belakang. Pada saat posisi lumpur satu garis mendatar dengan pusat roda dan posisi lumpur pada ban yang dekat dengan ban depan, lumpur terlempar dari ban, maka . . . .
   a. lumpur tersebut akan bergerak vertikal ke atas
   b. lumpur akan bergerak miring ke atas
   c. lumpur akan bergerak pada lintasan parabol arah ke bawah
   d. lumpur akan bergerak vertikal ke bawah
   e. lumpur akan bergerak mendatar

3. Sebuah katrol berbentuk piringan yang berjari-jari 0,3 m menggelinding tanpa slip pada sebuah bidang datar yang licin. Bila kelajuan anguler katrol tersebut adalah konstan dan besarnya 4 rad/s, maka . . . .
   a. kelajuan linier sesaat titik pada katrol bagian atas adalah 2,4 m/s
   b. kelajuan linier pusat massa katrol adalah 1,2 m/s
   c. kelajuan linier sesaat titik terbawah pada katrol adalah nol
   d. percepatan linier sesaat pada titik yang terletak pada keliling katrol bagian atas adalah nol
   e. semua pernyataan di atas benar

4. Pada saat hujan lebat sering terdengar guruh yang gemuruh dan sering ada jendela-jendela kaca yang ikut bergetar karena . . . .
   a. jendela memperoleh gangguan suara petir
   b. guruh adalah gelombang bunyi yang mempunyai frekuensi tinggi
   c. jendela mempunyai frekuensi alami yang sama atau hampir sama dengan frekuensi alami guruh
   d. jendela kaca berperilaku sebagai pegas
   e. semua pernyataan di atas tidak ada yang benar
5. Pada sebuah benda yang melakukan gerak harmonik sederhana, maka . . . .
   a. waktu yang diperlukan oleh benda untuk bergerak bolak-balik dalam satu siklus (satu getaran) adalah satu periode
   b. banyaknya getaran yang dilakukan dalam satu sekon disebut frekuensi
   c. pada saat simpangannya nol kelajuan simpangan maksimum
   d. pada saat simpangannya maksimum percepatannya minimum, karena arah simpangan selalu berlawanan dengan arah percepatan
   e. a, b, c, dan d semuanya benar
6. Bila bandul sederhana melakukan gerak harmonis, maka . . . .
   a. besarnya gaya pemulih pada bandul sederhana sama dengan komponen berat bandul yang tegak lurus pada arah lintasannya
   b. besarnya periode bandul berbanding terbalik dengan akar panjang tali bandul sederhana
   c. bila panjang tali penggantung bandul sama maka besarnya frekuensi gerak bandul sederhana di pantai lebih besar daripada di gunung
   d. besarnya frekuensi bandul berbanding terbalik dengan akar besarnya percepatan gravitasi
   e. semua jawaban di atas benar
7. Bila gerak harmonik sederhana diperoleh dari proyeksi gerak melingkar beraturan pada sumbu x atau y, maka . . . .

a. besarnya frekuensi anguler ω selalu berubah
b. kecepatan simpangannya merupakan fungsi kuadrat dalam t
c. pada saat simpangannya maksimum arah percepatannya ke bawah dan besarnya adalah $\omega^2 A$, dimana A adalah simpangan maksimum
d. percepatan simpangannya sama dengan proyeksi percepatan sentripetal yang tegak lurus pada arah simpangan
e. tidak berlaku hukum kekekalan energi mekanik

8. Kalian semua pasti telah merasakan nikmatnya main ayunan di taman. Bagi anak-anak yang telah biasa main ayunan tersebut, mereka tahu cara menyimpangkan ayunan agar diperoleh simpangan ayunan yang tertinggi. Simpangan ayunan tertinggi bila . . . .
   a. frekuensi hasil simpangan tersebut sama dengan frekuensi alami ayunan tersebut
   b. disimpangkan setinggi mungkin
   c. ayunan disimpangkan dengan frekuensi anguler maksimum
   d. ayunan disimpangkan dengan gaya yang besar
   e. semua jawaban di atas tidak benar

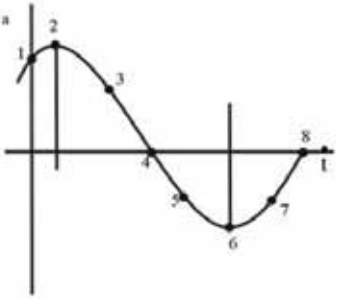
9. Di depan pintu bagian atas di beberapa rumah tergantung sebuah ornamen yang terdiri dari beberapa batang ringan yang bebas berayun. Pada saat tak ada angin, coba simpangkan salah satu batangnya, kalian akan melihat bahwa semua batang ikut bergoyang tetapi batang lain yang sama panjangnya dengan batang tadi berayun dengan simpangan yang paling besar diantara batang lain yang panjangnya berbeda, karena . . . .
   a. terjadi resonansi antara frekuensi yang sama besar dari benda-benda yang berosilasi
   b. frekuensi alami setiap benda berbeda
   c. semua batang berayun bersama
   d. semua batang berayun dengan frekuensi anguler yang sama
   e. semua jawaban di atas benar

10. Sebuah balok kecil yang massanya 0,5 kg diikatkan pada ujung pegas yang konstantanya 8 N/m dan yang tergantung tetap secara vertikal. Balok tersebut melakukan gerak harmonik sederhana dengan amplitudo 5 cm, maka . . . .

a. frekuensi anguler balok tersebut adalah 4 rad/s
b. kelajuan maksimum balok adalah 0,2 m/s
c. percepatan maksimumnya adalah 0,8 m/s^2
d. besarnya gaya pemulih pada saat simpangannya maksimum adalah 0,4 N
e. semua jawaban di atas benar

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Percepatan simpangan partikel sebagai fungsi waktu ditunjukkan pada gambar. Tentukan titik-titik pada grafik tersebut yang menunjukkan simpangan maksimum negatif! Bagaimanakah kecepatan partikel di titik 4 dan 8? Bagaimanakah posisi partikel di titik 5!



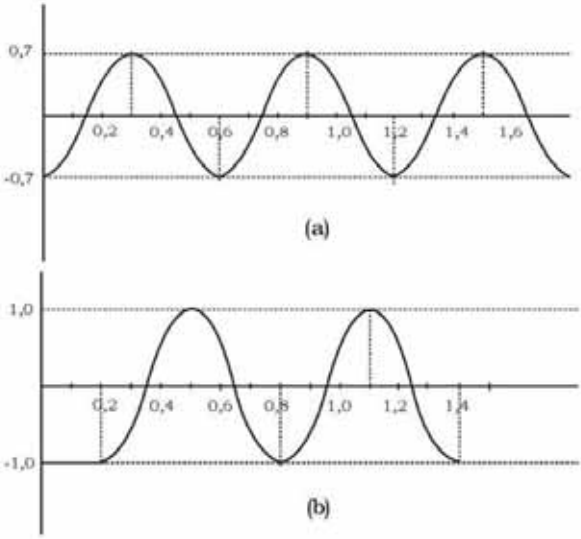
2. Sebuah balok yang massanya belum diketahui digantungkan pada ujung pegas yang konstantanya 8 N/m. Balok tersebut mengalami gerak harmonik sederhana dengan amplitudo 10 cm. Bila pada saat simpangannya sama dengan 5 cm, kelajuan balok sebesar 10 cm/s. Hitunglah
   a. massa balok yang tergantung,
   b. periode getaran balok,
   c. percepatan maksimum balok dan
   d. energi mekanik balok!

3. Balok A yang massanya 200 gram diletakkan di atas balok B yang massanya 400 gram. Koefisien gesekan statik antara kedua balok adalah 0,2. Bila balok B bergerak harmonik secara horisontal dengan amplitudo 8 cm, tentukan frekuensi tertinggi dari balok A agar balok A tidak bergerak relatif terhadap balok B!

4. Simpangan sebuah partikel sebagai fungsi waktu dinyatakan sebagai $x = \cos(3\pi t + \pi)$ di mana x dalam m dan t dalam sekon. Tentukan periode, frekuensi, amplitude, dan konstanta fase gerak harmonik dengan persamaan di atas! Pada saat t = 0,5 s, tentukan simpangan partikel tersebut!

5. Sebuah bola dijatuhkan dari tempat setinggi 4 m. Bola menumbuk lantai secara lenting sempurna, maka bola terpantul lagi ke tempat semula, jatuh lagi dan terpantul lagi, seolah-olah bola melakukan gerak bolak-balik. Tentukan periode bola yang melakukan gerak bolak-balik! Jelaskan apakah bola tersebut melakukan gerak harmonik sederhana!.

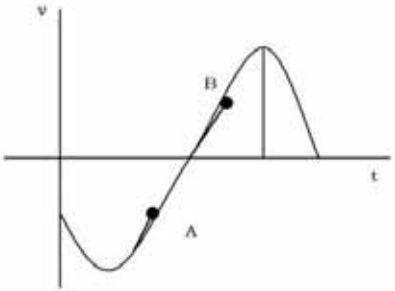
6. Pada ujung bebas sebuah pegas yang ringan digantungkan beban yang massanya *m*.



a. Ketika massa *m* disimpangkan secara vertikal, simpangan *m* sebagai fungsi waktu *t* ditunjukkan pada gambar (a). Dari gambar (a) tentukan periode dan frekuensi angulernya!

b. Bila untuk sistem massa-pegas yang lain simpangannya ditunjukkan pada gambar (b). Tentukan perbedaan waktu permulaan osilasi antara dua sistem massa-pegas tersebut. Tentukan fase sudut antara kedua osilasi tersebut!

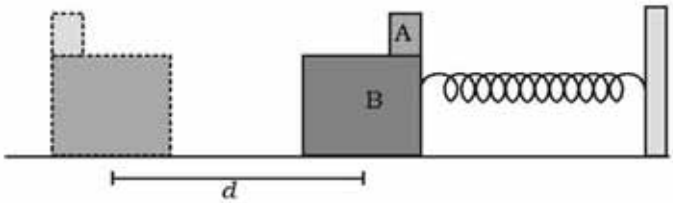
7. Grafik kecepatan sebagai fungsi waktu dari sebuah partikel yang mengalami gerak harmonik sederhana ditunjukkan pada gambar.



a. Tentukan simpangan di titik *A* dan *B*!
b. Kemanakah arah gerak partikel *n* di titik A dan di titik B?
c. Tentukan percepatan dititik *A* dan *B*!

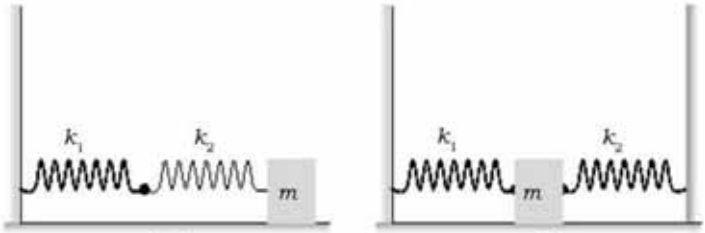
8. Sebuah partikel mengalami gerak harmonik sederhana. Waktu terpendek yang diperlukan oleh partikel untuk bergerak antara dua titik dimana kecepatan partikel nol adalah 0,5 s. Bila jarak antara kedua titik tersebut 40 cm, hitung periode dan amplitudo gerak tersebut!

9. Balok A terletak di atas balok B dan besarnya koefisien gesekan statis antara kedua balok adalah μ_s. Balok B diikatkan pada ujung bebas sebuah pegas, lihat gambar! Mula-mula balok B dan juga A berada pada titik kesetimbangannya, $x = 0$ dan pegas dalam keadaan relaks, kemudian balok B disimpangkan sejauh d dan dilepaskan. Karena sistem pegas-balok mengalami gerak harmonik sederhana, balok A bisa berada pada tepi balok B dan siap untuk terguling.



b. Gaya apakah yang menyebabkan balok A dipercepat dan berapa besarnya?
c. Di titik manakah A paling mungkin untuk mengalami terguling?
d. Simpangan awal A lebih besar daripada d. Bagaimanakah kemungkinan balok A untuk terguling?

10.



(a) (b)

Sebuah balok yang massanya m dihubungkan dua pegas yang konstanta gayanya k_1 dan k_2, lihat gambar! Balok di simpangkan dan kemudian dilepaskan sehingga sistem balok-pegas bergerak harmonik sederhana. Bila tidak ada gaya gesek antara bidang datar dengan balok, tunjukkan bahwa berlaku $T = 2\pi\sqrt{\frac{m(k_1 + k_2)}{k_1 k_2}}$ untuk gambar (a) dan $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{(k_1 + k_2)}}$ untuk gambar (b)!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawabankalian dengan teman-teman kalian! Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab V

Kerja dan Energi



Tujuan pembelajaran
Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menganalisis dan menjelaskan hubungan antara usaha, dan perubahan energi dengan hukum kekekalan energi mekanik.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah
1. Gaya
2. Energi
3. Kerja

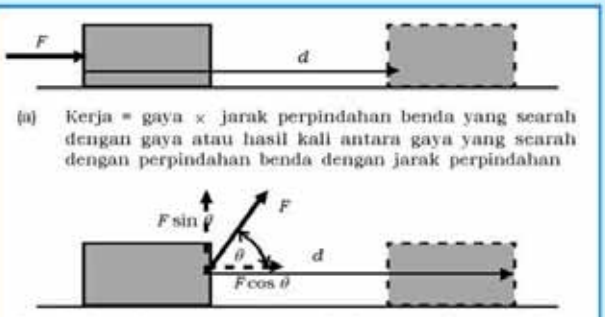
Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:
1. Kerja dengan gaya konstan dan berubah-ubah.
2. Kerja dan energi kinetik.
3. Energi potensial gravitasi.
4. Gaya konservatif dan nonkonservatif.
5. Hukum kekekalan energi.
6. Hubungan antara usaha, energi kinetik dan energi potensial.

Pada bab ini, kalian akan diajak untuk memahami dua konsep yang menarik dalam kehidupan sehari-hari dengan pengertian sains, yaitu konsep kerja dan energi. Kita biasa dihadapkan pada perkataan sehari-hari bahwa kerja dikaitkan dengan melakukan sesuatu yang harus diselesaikan. Biasanya kerja yang kita lakukan membuat fisik kita terasa lelah, oleh sebab itu kita menggunakan alat bantu seperti mesin untuk mengurangi tenaga kita yang

diperlukan. Di sisi lain, bila kita berkata tentang energi maka akan terbayang energi listrik untuk kehidupan sehari-hari, atau bahan bakar yang diperlukan dalam kehidupan sehari-hari, atau bahkan bentuk makanan yang diperlukan agar kita mampu melakukan suatu aktivitas sehari-hari.

Istilah ilmiah tentang kerja dan energi dapat diibaratkan dengan persepsi istilah kerja dan energi dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya seseorang yang mempunyai energi cukup maka mampu melakukan kerja, tetapi bila tidak cukup energi, maka orang tersebut tidak mampu melakukan kerja. Dalam fisika, seperti dalam kehidupan sehari-hari, jika sesuatu memiliki energi, maka sesuatu tersebut mempunyai kemampuan untuk melakukan kerja. Misalkan air yang ditampung di sebuah waduk, kemudian air dialirkan ke bawah seperti benda jatuh bebas untuk menjalankan turbin yang bisa digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Dalam hal ini air mempunyai energi dan mampu melakukan kerja yaitu membuat turbin berputar.

A Kerja dengan Gaya Konstan



(a) Kerja = gaya × jarak perpindahan benda yang searah dengan gaya atau hasil kali antara gaya yang searah dengan perpindahan benda dengan jarak perpindahan

(b) Kerja = komponen gaya searah dengan arah perpindahan × jarak perpindahan benda

Gambar 5.1 *Kerja yang dilakukan oleh sebuah gaya yang konstan*

Dalam fisika, pengertian kerja dikaitkan dengan pengertian gaya yang dikenakan pada benda dan perpindahan benda sebagai akibat gaya tersebut. Bila sebuah gaya konstan F, dikerjakan pada sebuah benda sehingga menyebabkan benda tersebut bergerak sejauh d,

maka besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya tersebut adalah merupakan hasil kali antara komponen gaya F yang searah perpindahan dengan besarnya perpindahan yang dialami benda tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai,

$$W = Fd \tag{5.1}$$

Jika gaya yang bekerja pada benda membentuk sudut θ dengan arah perpindahan benda, maka besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya F, yang membentuk sudut θ dengan arah perpindahan benda sebagai hasil dari gaya yang dikenakan pada benda tersebut didefinisikan sebagai,

$$W = \vec{F}.\vec{d} = |\vec{F}|\cos\theta|\vec{d}| = |\vec{F}||\vec{d}|\cos\theta \tag{5.2}$$

di mana $F = |\vec{F}|$ adalah magnitude (besarnya) gaya $\vec{F}$ dan $d = |\vec{d}|$ adalah magnitude dari perpindahan benda $\vec{d}$. Jika $\theta = 0^o$ maka persamaan 5.2 menjadi persamaan 5.1. Bila perpindahan benda arah mendatar, (gambar 5.1) dikatakan benda berpindah searah dengan arah x, yang berarti $d = x$, maka komponen gaya yang mendatar dapat dinyatakan sebagai F_x dan komponen vertikal dinyatakan sebagai F_y. Besarnya komponen sebuah gaya yang searah dengan sumbu x adalah $F_x = F\cos\theta$ dan yang searah dengan sumbu y adalah $F_y = F\sin\theta$, di mana θ adalah sudut antara gaya F dan arah x. Kerja yang dilakukan oleh komponen gaya vertikal, $F_y = F\sin\theta$ adalah nol karena perpindahan arah vertikal nol.

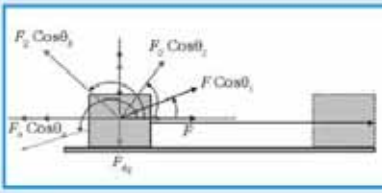
Secara umum ada beberapa macam gaya yang bekerja pada benda, namun pada dasarnya pemberian gaya tersebut bertujuan untuk mengubah keadaan gerak benda, misalnya untuk mempercepat, memperlambat, atau mengubah arah gerak benda. Jika arah vektor gaya berlawanan dengan arah perpindahan, misalnya gaya penahan atau pengereman pada sepeda atau mobil, dalam hal ini kerja yang dilakukan adalah negatif karena, $W = Fd\cos 180^o = -Fd$. Jadi, besarnya kerja yang dilakukan oleh sebuah gaya yang bekerja pada benda tergantung pada besarnya sudut antara vektor gaya dan vektor perpindahan.

Bila pada sebuah benda bekerja beberapa gaya sehingga benda tersebut mengalami perpindahan sejauh d, maka besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya-gaya tersebut sama dengan jumlah kerja yang dilakukan oleh masing-masing gaya, lihat gambar 5.2.

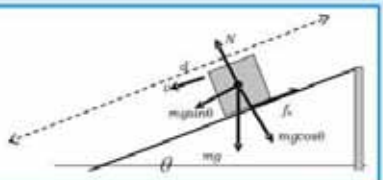
Keempat gaya F_1, F_2, F_3, dan F_4 bekerja pada sebuah benda sehingga benda tersebut mengalami perpindahan sejauh $d = x$, maka besarnya kerja yang dilakukan oleh masing-masing gaya adalah,

$$W = (F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x})x$$
$$= (F_1 \cos\theta_1 + F_2 \cos\theta_2 + F_3 \cos\theta_3 + F_4 \cos\theta_4 \quad (5.3)$$

Dari persamaan 5.3 dapat dilihat bahwa kerja total dari beberapa gaya yang bekerja pada benda adalah sama dengan jumlah kerja yang dilakukan masing-masing gaya.



Gambar 5.2 *Balok di atas bidang datar dikenai beberapa gaya.*



Gambar 5.3 *Balok meluncur di atas bidang miring karena gaya gravitasi.*

Untuk mengembangkan **kecakapan akademik, personal,** dan **sosial** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 5.1

Sebuah balok dengan massa 0,50 kg meluncur pada bidang miring (20°) dengan kecepatan konstan, lihat gambar 5.3. Jika L = 1,50 m, maka:

a. Berapa kerja yang dilakukan oleh gaya gesek pada balok saat balok meluncur sepanjang *d*?
b. Berapa hasil kerja total yang dilakukan oleh balok?
c. Diskusikan bahwa kerja total yang dilakukan jika sudut bidang miring diubah sehingga balok meluncur dengan percepatan tertentu!

Penyelesaian:

Gambar 5.3 menunjukkan balok yang meluncur pada bidang miring. Berdasarkan soal, kita dapatkan data sebagai berikut:

$m = 0{,}50$ kg
$\theta = 20°$
$L = 1{,}50$ m

Ditanya:

a. W_f (kerja yang dilakukan oleh gaya gesek)?
b. W_{net} (kerja netto/total)?
c. W (diskusikan kerja nettonya bila balok mendapat percepatan)!

Jawab:

a. Kerja yang dilakukan oleh gaya gesek f_k adalah,

$$W = f_k d \cos 180^\circ = -f_k d = u_k N d$$

$$N = mg \cos \theta$$

$$d = \frac{L}{\cos \theta}$$

$$\mu_k = \tan \theta$$

$$\text{Jadi, } W = -\tan\theta (mg \cos \theta) \frac{L}{\cos\theta} = -mgL \tan 20^\circ$$

$$W = -(0{,}50\,\text{kg})(9{,}80\,\text{m/s}^2)(1{,}50\,\text{m})(0{,}364) = -2{,}67\,\text{J}$$

b. Kerja netto yang dilakukan oleh balok adalah nol, karena balok meluncur dengan kecepatan konstan sehingga gaya total yang bekerja pada balok adalah nol,

$$W = F_{net} d = 0$$

Ini bisa dibuktikan dengan kerja yang dilakukan oleh komponen gaya berat yang arahnya sejajar dengan permukaan bidang miring yaitu $mg \sin \theta$,

$$W = mg \sin\theta \left(\frac{L}{\cos\theta}\right) = 0{,}50\ \text{kg}(9{,}80\ \text{m/s}^2)(1{,}50\,\text{m})(0{,}364) = 2{,}67\,\text{J}$$

c. Jika balok meluncur dengan suatu percepatan maka besarnya gaya total yang bekerja pada benda adalah,

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

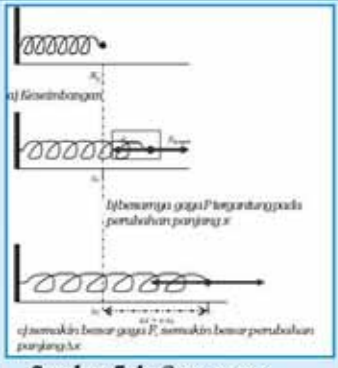
dalam hal ini komponen gaya $mg \sin \theta$ lebih besar daripada gaya gesek kinetiknya sehingga ada gaya netto yang menyebabkan balok meluncur dengan suatu percepatan.

B. Kerja yang Dilakukan oleh Sebuah Gaya yang Berubah-ubah

Pembicaraan dalam subbab sebelumnya hanya terbatas pada kerja yang dilakukan oleh gaya konstan, padahal secara umum kita mengetahui bahwa gaya yang bekerja pada benda cenderung berubah-ubah, yaitu berubah terhadap waktu atau posisi. Gaya gravitasi akan berubah bila benda jatuh dari tempat yang cukup tinggi, misal jatuhnya kembali pesawat ruang angkasa setelah menjelajahi angkasa. Namun tidak semua gaya dapat melakukan kerja selama tidak ada perpindahan yang dialami oleh benda yang diberi gaya. Misalnya, seseorang mencoba memindahkan almari buku yang penuh buku dengan cara mendorongnya, walaupun orang tersebut sudah berkeringat ternyata almari buku tidak bergeser sedikitpun. Pada kondisi ini dapat dikatakan bahwa orang tersebut tidak melakukan kerja meskipun berpeluh-peluh.

Contoh gaya yang berubah-ubah atau gaya variabel adalah gaya tarik atau tekan yang diberikan pada sebuah benda yang terikat pada sebuah pegas, lihat gambar 5.4. Gaya yang diperlukan untuk membuat pegas yang mula-mula dalam keadaan setimbang menjadi teregang atau tertekan berbanding lurus dengan perubahan panjang pegas x, seperti yang ditunjukkan oleh hukum Hooke,

$$F_{luar} = kx \qquad (5.4)$$



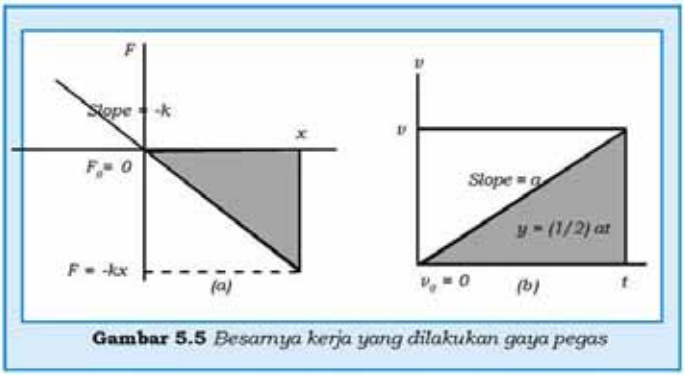
Gambar 5.4. *Gaya pegas*

Dari persamaan 5.4 ditunjukkan bahwa nilai gaya bervariasi terhadap fungsi posisi.

Sedangkan gaya pemulih pegas, yang merupakan gaya yang melawan terhadap gaya luar yang dikenakan pada pegas, besarnya sama dengan gaya luar tersebut tetapi arahnya berlawanan, dapat dituliskan sebagai:

$$\vec{F} = -kx \qquad (5.5)$$

k adalah konstanta pembanding dan disebut sebagai konstanta pegas. Semakin besar nilai k, semakin besar tingkat kekakuan pegas tersebut. Satuan k adalah newton/meter (N/m). Setelah pegas mencapai batas elastis, jika kita tarik lagi dengan gaya F, maka kesebandingan linier antara gaya dan perpindahan tidak berlaku lagi.



Gambar 5.5 *Besarnya kerja yang dilakukan gaya pegas*

Untuk menghitung kerja yang dilakukan oleh gaya pegas, kita dapat menggunakan pendekatan grafik yaitu besarnya kerja sama dengan luas area yang dibatasi oleh sumbu gaya F dan sumbu perpindahan x, seperti yang kita lakukan untuk menentukan persamaan lintasan yang merupakan luas area yang dibatasi sumbu kecepatan dan sumbu waktu, lihat gambar 5.5. Pada gambar 5.5(a), ditunjukkan grafik gaya pegas sebagai fungsi posisi pada saat pegas diregangkan dari posisi $x = 0$ ke posisi x (positif). Besarnya gaya pegas sama dengan $-kx$ pada saat $x = x$ dan nol pada saat $x = 0$, Kerja yang dilakukan oleh gaya pegas adalah,

$$W = -\frac{1}{2}kx^2 \qquad (5.6a)$$

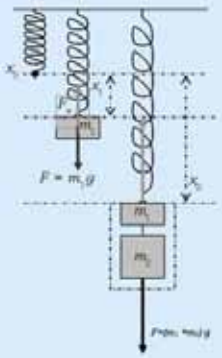
Jika pegas terenggang dari posisi x_0 ke posisi x, maka kerja yang dilakukan pegas adalah,

$$W = -\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}kx_0^2 = -(E_p - E_{p0}) = -\Delta E_p \qquad (5.6b)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan personal dan akademik kalian**, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 5.2

Sebuah balok bermassa 0,10 kg diikatkan pada ujung bebas yang tergantung vertikal dan menyebabkan pegas bertambah panjang ke arah bawah sebesar 2,5 cm dari posisi semula. Setelah itu ditambahkan beban sebesar 0,50 kg. Berapakah pertambahan panjang pegas total? (abaikan massa pegas). k = 39,2 N/m



Gambar 5.6 *Penentuan konstanta pegas*

Penyelesaian:
Data yang dapat diperoleh dari soal adalah

Diketahui:
m_1 = 0,10 kg
x_1 = 0,025 m
m_2 = 0,50 kg

Ditanya:
x (perpanjangan total)?

Jawab:
Berdasarkan persamaan 5.4 kita dapatkan bahwa besarnya nilai konstanta pegas adalah,

$$k = 39{,}2 \text{ N/m}$$

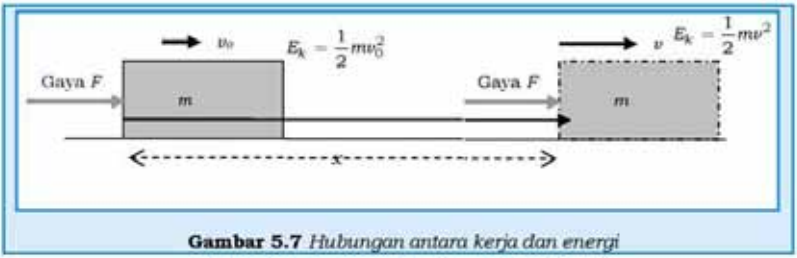
Akibat ada penambahan beban maka berlaku hubungan,

$$F = (m_1 + m_2)g = kx$$

$$x = \frac{(m_1 + m_2)g}{k} = \frac{(0{,}10\text{kg} + 0{,}50\text{kg})(9{,}8\text{m/s}^2)}{39{,}2\text{N/m}} = 0{,}15\text{m}$$

C. Kerja dan Energi Kinetik

Sebuah benda yang bergerak dengan percepatan a menunjukkan bahwa resultan gaya yang bekerja pada benda tersebut tidak sama dengan nol. Dalam situasi seperti ini berlaku hukum II Newton, $F = ma$ dan kerja yang dilakukan adalah (lihat gambar 5.7), $W = Fx = max$



Gambar 5.7 *Hubungan antara kerja dan energi*

Berdasarkan hubungan antara kecepatan awal, kecepatan akhir dan percepatan yang dibahas pada materi gerak lurus berubah beraturan, maka besarnya percepatan a dinyatakan sebagai, $a = \frac{v^2 - v_0^2}{2x}$, dan bila persamaan ini dimasukkan ke dalam persamaan usaha di atas maka diperoleh,

$$W = Fx = max = m\frac{v^2 - v_0^2}{2x}x$$

$$W = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \qquad (5.7)$$

Di mana $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ merupakan energi kinetik pada saat balok bergerak dengan kecepatan v.

Dari persamaan 5.7 dapat

KISI

Ketika Issaac Newton merumuskan hukum-hukum gerakannya (Hlm 30) pada tahun 1687, ia tidak menyebut mengenai energi. Orang Inggris, Thomas Young pertama kali menggunakan kata itu, dalam pengertian ilmiah, 80 tahun setelah meninggalnya Newton. Menurut Young, benda yang sedang bergerak mempunyai energi karena ia dapat "disuruh" melakukan pekerjaan. Apapun yang dapat melakukan pekerjaan itu mempunyai energi. Sebagai contoh, benda yang bergerak dapat menarik atau menyeret kereta kecil. Dewasa ini energi suatu benda yang bergerak kita sebut "energi kinetik". Insinyur William Rankine dari scotlandia menciptakan istilah. "energi Potensial" setengah abad setelah Young. Pada tahun 1847, ilmuwan Inggris, James Joule menunjukkan bahwa panas adalah bentuk energi juga.



Gambar 5.8 *James P Joule*

Sumber: [illegible]

dikatakan bahwa kerja yang dilakukan oleh gaya yang diberikan pada suatu benda besarnya sama dengan perubahan energi kinetik pada benda tersebut (ΔE_k). Persamaan 5.7 secara sederhana dapat dituliskan dalam bentuk,

$$W = E_f - E_i = \Delta E_k \qquad (5.8)$$

Persamaan 5.8 disebut sebagai bentuk teorema hubungan kerja-energi dan energi kinetik disebut juga sebagai energi gerak. Seperti satuan kerja, satuan energi adalah joule (J) dan merupakan besaran skalar.

Contoh Soal 5.3

Seorang siswa membawa buku tebal yang massanya 2,0 kg ke lantai dua dan kemudian buku tersebut dilepaskan dari ketinggian 3,5 m lewat sebuah jendela.

a. Berapa kerja yang dilakukan oleh siswa saat memegang buku di dekat jendela?
b. Berapa kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi saat buku dijatuhkan dari ketinggian 3,5m?
c. Berapa energi kinetiknya saat buku sampai di tanah?

Penyelesaian
Diketahui:
$v_0 = 0$
$m = 2{,}0$ kg
$d = 3{,}5$ m
Ditanya:
a. kerja saat siswa memegang buku di dekat jendela?
b. kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi?
c. energi kinetik (E_k) buku pada saat jatuh di tanah?

Jawab:
a. Walaupun siswa merasakan lelah saat membawa buku, namun secara mekanik dia tidak melakukan kerja saat buku tetap dipegang, sebab bukunya tidak mengalami perpindahan searah dengan gaya gravitasi pada saat buku dipegang dan siswa diam di tempat. Karena $d = 0$, maka

$$W = Fd = 0$$

b. Pada saat buku jatuh, gaya yang bekerja pada buku hanya gaya gravitasi yang besarnya sama dengan $F = mg$

(resistansi udara diabaikan). Karena arah perpindahan buku sama dengan arah gaya dan jarak perpindahannya 3,5 m, maka kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi adalah:

$$W = Fd\cos 0^\circ = mgd = (2\text{ kg})\times(9{,}8\text{ m/s}^2)(3{,}5\text{ m}) = 68{,}6\text{ J}$$

c. Untuk menentukan energi kinetik, kita gunakan persamaan 5.7 di mana kecepatan awalnya $v_0 = 0$, yaitu:

$$W = Fd = mgd = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}m(0) = E_k$$

$$= 2(9{,}8\text{m/s}^2)(3{,}5\text{ m}) = 68{,}6(\text{m/s})^2$$

$$\text{Jadi, } E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}2\text{ kg }[68{,}6(\text{m/s})^2] = 68{,}6\text{ J}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa yang didapat pada (b) sama dengan pada (c). Secara umum dapat dikatakan bahwa kerja merupakan bentuk transfer energi kinetik. Contoh, kerja yang dilakukan oleh gaya yang diberikan ke suatu benda menyebabkan kelajuan benda bertambah untuk memberikan kenaikan energi kinetiknya. Dengan kata lain, jika ada gaya gesek menyebabkan kelajuan benda berkurang dan energi kinetiknya juga menurun atau berkurang.

D. Daya

Dari segi praktis, mungkin cukup menarik bila kita mengetahui besarnya kerja yang dilakukan gaya per satuan waktu yang disebut sebagai daya. Bila sebuah gaya luar yang bersifat konstan, F, dikerjakan pada sebuah benda yang mula-mula diam selama Δt sehingga menyebabkan benda bergeser sejauh Δs yang searah dengan F, maka besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya F adalah $W = F\,\Delta s$. Besarnya daya rata-rata dari kerja W adalah:

$$P_{rt} = (W/\Delta t) = F(\Delta s/\Delta t) = Fv_{rt}$$

Di mana v_{rt} adalah besarnya kecepatan rata-rata selama gaya melakukan kerja. Bila gaya yang dikerjakan pada benda membentuk sudut θ terhadap arah perpindahan benda maka besarnya daya yang dihasilkan oleh gaya tersebut adalah:

$$P_{rt} = Fv_{rt}\cos\theta$$

Besarnya daya sesaat dapat ditentukan dengan mengambil harga limit daya rata-rata untuk Δt mendekati nol, yaitu

$$P = F\,v \qquad (5.9)$$

di mana v adalah besarnya kecepatan sesaat benda.

Persamaan 5.9 menunjukkan bahwa satuan daya dalam satuan SI adalah joule/sekon yang biasa disebut sebagai watt. Namun ada banyak peralatan yang satuan dayanya dinyatakan dalam Horse Power yang disingkat dengan hp di mana 1 hp = 746 watt.

Kalian semua mungkin sudah mengenal beberapa mesin atau motor yang sangat berguna bagi kehidupan. Coba bayangkan bila tidak ada mesin automobil atau sepeda motor, alangkah lamanya untuk bepergian dari satu kota ke kota lain. Pada peralatan rumah tangga banyak peralatan yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, atau energi listrik menjadi energi panas, atau bahkan energi bunyi. Pada peralatan tersebut, kalian akan membaca pada label tentang daya dari peralatan tersebut yang dinyatakan dalam watt atau hp. Biasanya yang tertulis adalah daya input, kalau disertai dengan efisiensi dari peralatan, maka efisiensi yang dimaksud adalah perbadingan antara kerja yang dilakukan persatuan waktu dengan kerja yang diberikan ke peralatan per satuan waktu. Secara umum efisiensi dapat dituliskan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100\% \qquad (5.10)$$

Pada tabel 5.1 ditunjukkan efisiensi beberapa mesin.

Tabel 5.1 Efisiensi Beberapa Mesin

No	Mesin	Efisiensi (%)
1	Kompresor	85
2	Motor listrik	70-95
3	Mesin otomobil	<15
4	Otot-otot tubuh manusia	20-25
5	Lokomotif uap	5-10

Contoh Soal 5.4

Motor bor listrik mempunyai efisiensi 80% dan diberi input 600 watt. Berapakah kerja yang dilakukan bor selama 30 sekon?

Penyelesaian:
Dari soal di atas, diketahui: $\eta = 80\%$, $P_{input} = 600$ watt, $t = 30$ s
Ditanya:
$W = \ldots ?$

Jawab:
Besarnya daya output adalah
$P_{output} = P_{input} \times \eta = 480$ watt, maka besarnya kerja $W = P\,t = 14400$ J = 14,4 kJ

Untuk **menumbuhkan etos kerja** kalian, kerjakanlah kegiatan berikut!

Brilian

Kalian dapat menemukan peralatan di sekitar rumah kalian, misalnya lampu bolam, oven, *rice cooker*, seterika, pompa air dan lain-lain. Pada peralatan tersebut pasti kalian dapat membaca berapa watt daya peralatan tersebut pada labelnya. Buatlah daftar barang-barang yang label dayanya dinyatakan dalam watt dan juga label dayanya yang dinyatakan dalam hp!

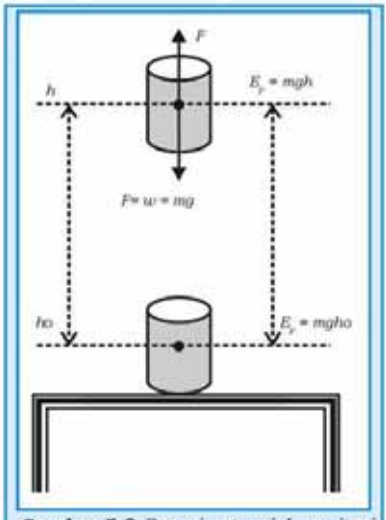
E. Kerja dan Energi Potensial

Sebuah benda yang bergerak mempunyai energi kinetik. Namun jika benda tidak bergerak apakah mempunyai energi? Jawabannya adalah ya, artinya bahwa baik benda yang diam maupun yang bergerak, keduanya sama-sama mempunyai energi dalam bentuk lain, yaitu energi potensial. Energi potensial mengandung pengertian mempunyai potensi untuk melakukan kerja, maka benda tersebut mempunyai energi atau kerja yang tersimpan. Air dalam waduk dan tarikan dari busur panah merupakan bentuk-bentuk adanya energi potensial. Dari contoh tersebut ditunjukkan bahwa sebuah benda mempunyai energi potensial karena kondisi posisi benda tersebut.

Benda yang mempunyai energi potensial berarti mempunyai potensi untuk melakukan kerja, maka benda tersebut mempunyai energi atau kerja yang tersimpan.

Energi potensial yang sudah difahami oleh banyak khalayak adalah energi potensial gravitasi. Contohnya, makin tinggi posisi waduk yang menyimpan air untuk pembangkit listrik, makin tinggi pula energi listrik yang dihasilkan. Energi potensial gravitasi adalah energi yang terkandung dalam benda yang mempunyai posisi ketinggian tertentu ditinjau dari permukaan bumi. Misalnya, sebuah benda bermassa m diangkat sampai setinggi Δh, lihat gambar 5.9.

Untuk mengangkat benda, seseorang harus mengerjakan gaya pada benda tersebut paling tidak sama dengan berat benda (gaya gravitasi). Arah gaya berlawanan dengan arah berat benda. Maka, besarnya kerja yang dilakukan untuk melawan gaya gravitasi pada benda tersebut sama dengan energi potensial benda pada ketinggian Δh.



Gambar 5.9 *Energi potensial gravitasi*

Persamaan 5.10 menunjukkan bahwa kerja, sama dengan perubahan energi potensial. Berdasarkan gambar 5.9, maka kerja yang dilakukan oleh gaya F untuk mengangkat kaleng dari ketinggian h_0 ke h sama dengan:

$$W = F\Delta h = mgh - mgh_0$$
$$W = \Delta E_p \qquad (5.11)$$

Jika, $h_0 = 0$ maka $W = E_p = mgh$

Dari persamaan 5.11 dapat dikatakan bahwa benda yang massanya m berada pada ketinggian h mempunyai energi potensial sebesar mgh, dan disebut sebagai energi potensial gravitasi dengan satuan joule (J). Karena benda diangkat ke atas searah sumbu y positif, persamaan 5.11 dapat dituliskan,

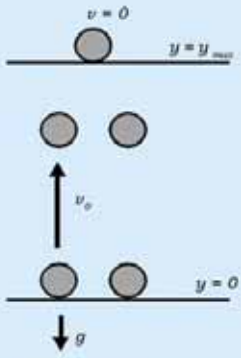
$$E_p = mgy \qquad (5.12)$$

Persamaan 5.12 atau 5.11 adalah bentuk persamaan energi potensial untuk benda di atas permukaan bumi dengan $h << R_B$, R_B (jari-jari bumi) sehingga nilai g dianggap konstan.

Contoh Soal 5.5

Sebuah benda bermassa 0,25 kg dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan 15 m/s, lihat gambar 5.10!

a. Berapa perubahan energi kinetik antara titik awal dan pada ketinggian maksimum?
b. Berapakah perubahan energi potensial antara titik pada ketinggian maksimum dan titik pada saat benda dilempar? (gesekan udara diabaikan).



Gambar 5.10 *Energi kinetik dan potensial*

Pemecahan:
Dengan mempelajari gambar 5.10 didapatkan data,

Diketahui:
$m = 0{,}25$ kg
$v_0 = 15$ m/s
$a = g$
Ditanya:
a. ΔE_k (antara v_0 dan v)?
b. ΔE_p (antara titik y dan y_0)?

Jawab:
a. Berdasarkan persamaan 5.7, di mana pada ketinggian maksimum kecepatan benda $v = 0$.

$$\Delta E_k = E_k - E_{k0} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$\Delta E_k = 0 - \frac{1}{2}0{,}25\text{kg}(15\text{m/s})^2 = -28{,}13\text{ J}$$

Jadi, bola kehilangan energi kinetik sebesar 28,13 J sebagaimana ditunjukkan kerja negatif yang dilakukan oleh gaya gravitasi (gaya dan perpindahan berlawanan arah).

b. Untuk menemukan perubahan energi potensial, kita menentukan ketinggian maksimum dengan persamaan $v_2 = v_0^2 - 2gy$ yaitu

$$y_{max} = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{(15\,\text{m/s})^2}{2(9{,}8\,\text{m/s}^2)} = 11{,}48\,\text{m}$$

dengan $y_0 = 0$, maka berdasarkan persamaan 5.10,
$W = mgy_{max} = 0{,}25\ \text{kg}\ (9{,}8\ \text{m/s}^2)(11{,}48\ \text{m}) = 28{,}13\ \text{J}$
Jadi energi potensial naik sebesar 28,13 J seperti yang diharapkan. Oleh karena itu, saat benda dilempar ke atas secara vertikal energi kinetiknya kehilangan sebesar 28,13J. Sehingga pada sistem tersebut terjadi perubahan energi kinetik ke energi potensial, $E_k = E_p$.

F. Energi Potensial Gravitasi menurut Hukum Gravitasi Newton

Energi potensial gravitasi yang dibahas hanya terbatas pada benda-benda yang posisinya tidak jauh dari permukaan bumi. Bagaimana besarnya energi potensial bulan relatif terhadap bumi?

Hukum gravitasi umum dari Newton menyatakan bahwa antara dua buah benda keplanetan yang masing-masing massanya m_1 dan m_2 bekerja gaya tarik-menarik yang besarnya sebanding dengan besarnya masing-masing massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (5.13)$$

Bila sebuah benda jatuh dari tempat setinggi h dari permukaan bumi maka besarnya percepatan benda yang jatuh bebas tersebut adalah:

$$a_\oplus = g = \frac{GM_\oplus}{(R_\oplus + h)^2} \qquad (5.14)$$

di mana G adalah tetapan gravitasi umum

$m_\oplus$ adalah massa bumi

$R_\oplus$ adalah jari-jari bumi

Jika $h << R_{\oplus}$ maka dengan menggunakan pendekatan deret diperoleh,

$$g = \frac{GM_{\oplus}}{(R_{\oplus})^2 (1 + h/R_{\oplus})^2}$$

$$g = g_{\oplus s}(1 - 2\frac{h}{R_{\oplus}}) \qquad (5.15)$$

Tugas 5.1

Buktikan persamaan 5.14 dari persamaan $F = G\frac{m_1 m_2}{r_2}$

Secara umum dapat dikatakan bahwa bila dua buah benda yang masing-masing massanya m_i dan m_j saling mengalami gaya tarik-menarik, maka besarnya energi potensial pada masing-masing benda adalah sama dan besarnya dinyatakan sebagai,

$$E_p = -G\frac{m_1 m_2}{r} \qquad (5.16)$$

Untuk energi potensial gravitasi Bumi, persamaan 5.16 dapat ditulis kembali,

$$E_{p\oplus} = -G\frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)} \qquad (5.17)$$

di mana m adalah benda yang tingginya h dari permukaan bumi.

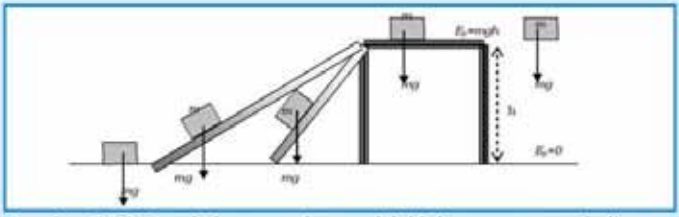
G. Gaya Konservatif dan Gaya Nonkonservatif

Secara umum gaya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gaya konservatif dan nonkonservatif. Contoh gaya konservatif adalah gaya gravitasi dan gaya pegas. Gaya konservatif adalah gaya yang bila bekerja pada sebuah benda, maka kerja yang dilakukan oleh gaya tersebut tidak tergantung pada lintasan yang ditempuh tetapi hanya tergantung pada posisi awal dan akhir.

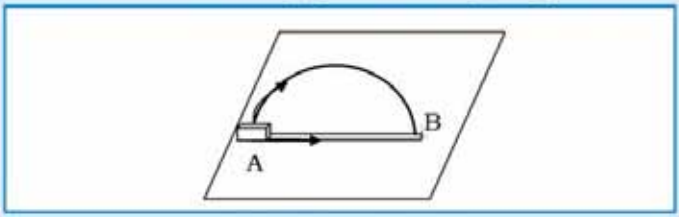
Contoh kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi diilustrasikan pada gambar 5.12 yang tidak tergantung pada lintasannya dan hanya tergantung pada posisi awal dan akhir. Besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi pada sebuah benda bermassa m yang

bergerak ke bawah dari tempat setinggi h, baik yang jatuh vertikal ke bawah atau yang meluncur lewat bidang miring yang licin adalah sama, yaitu $W = mgh$.

Sedangkan kerja yang dilakukan oleh gaya konservatif yang lain yaitu, gaya pegas yang mengalami perpindahan dari posisi x_1 ke posisi x_2 adalah $W = \frac{1}{2}kx_1^2 - \frac{1}{2}kx_2^2$.



Gambar 5.11. *Perubahan energi potensial tidak tergantung pada lintasan*



Gambar 5.12 *Sebuah balok bergerak dari A ke B, melintasi garis lurus AB atau melewati busur ½ lingkaran AB yang kasar.*

Contoh gaya nonkonservatif, misalnya seperti pada gaya gesek. Kerja yang dilakukan gaya gesek tergantung pada lintasan yang ditempuh, lihat gambar 5.13. Sebuah balok berpindah dari titik A menuju ke titik B dapat melewati lintasan lurus AB atau lintasan busur ½ lingkaran AB. Kedua lintasan tersebut sama kasarnya dan terletak pada bidang datar. Kerja yang dilakukan oleh gaya gesek pada balok tersebut bila melewati lintasan lurus AB yang panjangnya d adalah

$$W_f = -\mu mgd \qquad (5.18)$$

Sedangkan besarnya kerja gaya gesek bila balok melewati lintasan busur ½ lingkaran dengan diameter d adalah

$$W_f = -(1/2)\,\mu mg\,d \qquad (5.19)$$

di mana μ adalah koefisien gesekan kinetik dari kedua lintasan tersebut, dan m adalah massa balok.

Dari kedua persamaan tersebut, persamaan 5.18 dan persamaan 5.19, ditunjukkan bahwa untuk bergerak dari A ke B, gaya gesek melakukan kerja yang berbeda bila lintasannya berbeda.

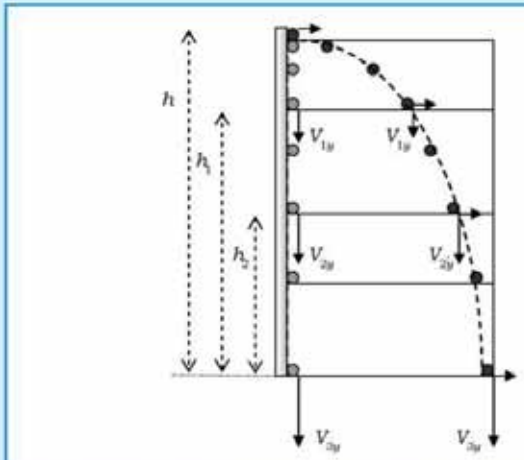
Untuk memahami konsep gaya konservatif dan nonkonservatif lebih mendalam, marilah kita tinjau kasus sebagai berikut: Sebuah buku yang tergeletak di meja belajar mempunyai energi potensial sebesar $E_p = mgh$ bila buku tersebut diambil dan dijatuhkan ke lantai, kemudian buku tersebut diambil dan diletakkan kembali ke atas meja seperti posisi semula. Peristiwa ini menunjukkan bahwa kerja yang dilakukan untuk menjatuhkan buku dan mengambilnya kembali untuk diletakkan di atas adalah nol, karena perubahan energi potensialnya nol. Atau kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi bersifat gaya konservatif.

Namun sedikit berbeda jika buku pada meja belajar tadi didorong di atas meja dan akhirnya dikembalikan ke posisi semula. Buku yang didorong di atas meja tadi mendapat gaya gesek dari permukaan meja. Kerja yang dilakukan oleh gaya nonkonservatif ini tidak nol karena kerja oleh gaya gesek tadi telah diubah menjadi energi bentuk lain seperti energi panas atau energi bunyi. Energi panas yang timbul besarnya tergantung pada panjangnya lintasan, maka kerja yang dilakukan oleh gaya gesek tergantung lintasan.

H. Hukum Kekekalan Energi

Kalian sekarang telah dapat membedakan antara kerja dan energi, antara energi kinetik dan energi potensial, dan hubungan antara kerja dengan energi kinetik dan energi potensial. Kalian juga sudah memahami perbedaan antara kerja yang dilakukan oleh gaya konservatif dan nonkonservatif. Kerja yang dilakukan oleh gaya yang bekerja pada benda berarti terjadi transfer energi kepada benda, sehingga benda mengalami penambahan energi kinetik. Karena terjadi transfer energi, maka energi dalam sistem tidak ada yang hilang. Sebagai contohnya adalah benda yang jatuh dari tempat ketinggian tertentu yang hanya dipengaruhi oleh gaya gravitasi, makin ke bawah posisi benda, makin besar energi kinetiknya. Tetapi bila pada benda bekerja gaya gesek maka kerja yang dilakukan gaya gesek hanya menghasilkan panas dan energi kinetik benda menjadi berkurang, hal ini berarti energi sistem benda yang dikenai gaya gesek ada yang hilang.

Misalnya kalian mengamati gerak parabola dari sebuah bola *baseball* yang dilemparkan dari satu pemain kepada pemain yang lain, kalian akan dapat menyimpulkan bahwa posisi bola dan kecepatannya berubah-ubah dengan berubahnya waktu. Karena bola *baseball* tersebut melakukan gerak peluru, maka pada titik tertinggi energi potensial bola terbesar, tetapi pada titik terendah energi kinetik bola terbesar. Hal ini terjadi karena pada saat bola dilemparkan atau pada saat bola jatuh kembali ditangkap pemain, harga kecepatan bola terbesar.



Gambar 5.13 *Posisi dan kecepatan dua buah bola pada saat yang sama. Bola abu-abu ditembakkan tanpa kecepatan awal, bola hitam ditembakkan dengan kecepatan awal mendatar v_0. Untuk masing-masing bola, jumlah energi kinetik dan potensial pada setiap saat selalu sama karena gerak bola hanya dipengaruhi oleh gaya gravitasi.*

Untuk menyelidiki hubungan antara kerja, energi kinetik, dan energi potensial sebuah benda, marilah kita perhatikan gerak bola yang dilepaskan dari ketinggian h_1 dengan kecepatan vertikal ke bawah v_1. Pada saat posisinya setinggi h_2 balok turun ke bawah dengan kecepatan v_2, maka hubungan antara kerja oleh gaya gravitasi pada bola dengan perubahan energi potensial dan energi kinetik dengan menggunakan persamaan 5.6a dan 5.6b adalah

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad \text{dan} \quad W = mgh_1 - mgh_2 \qquad (5.20)$$

Dari persamaan 5.20 diperoleh

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_1 - mgh_2$$

$$\text{atau } \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \qquad (5.21)$$

Persamaan 5.21 menunjukkan bahwa jumlah energi kinetik dan energi potensial benda pada posisi h_1 sama dengan energi kinetik dan potensial pada posisi h_2. Jumlah energi kinetik dan potensial sebuah benda disebut energi mekanik. Sebuah sistem yang hanya dipengaruhi gaya konservatif, maka energi mekanik sistem tersebut kekal dan sistem ini tunduk pada hukum kekekalan energi mekanik. Tapi perlu diingat bahwa gaya gesek antara benda yang dijatuhkan dengan udara diabaikan dan benda yang jatuh tidak berinteraksi dengan benda yang lain kecuali dengan bumi. Benda yang tidak berinteraksi dengan benda lain dikatakan dalam keadaan terisolasi.
Jadi, hukum kekekalan energi mekanik dinyatakan:

> Energi mekanik dalam sistem yang terisolasi selalu kekal

Jumlah energi kinetik dan energi potensial yang disebut energi mekanik, E , seperti pada masing-masing ruas pada persamaan 5.21 dapat ditulis sebagai:

$$E = E_k + E_p \qquad (5.22)$$

Untuk sebuah sistem yang bersifat konservatif (sistem yang hanya dipengaruhi oleh gaya konservatif), energi mekanik total adalah konstan atau kekal, yaitu:

$$E = E_0$$
$$\frac{1}{2}mv^2 + E_p = \frac{1}{2}mv_0^2 + E_{p0} \qquad (5.23)$$

Persamaan 5.23 adalah suatu pernyataan hukum kekekalan energi mekanik, lihat gambar 5.14.

Energi kinetik dan potensial dalam suatu sistem mungkin berubah, tetapi jumlahnya selalu konstan. Untuk sistem yang nonkonservatif, energi mekanik sistem dapat berubah karena adanya energi mekanik yang hilang (energi panas atau gesek) sehingga energi mekaniknya tidak kekal, lihat gambar 5.14.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik kalian**, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 5.6

Seorang tukang cat menjatuhkan kaleng cat yang bermassa 5kg dari ketinggian 6 m.

a. Berapa energi kinetiknya jika kaleng berada pada ketinggian 4 m?
b. Berapakah besarnya kecepatan kaleng ketika menghantam lantai?

Penyelesaian:

Diketahui:

$m = 5$ kg
$h_0 = 6$ m
$h = 4$ m
$(v_0 = 0)$

Ditanya:

a. energi kinetik?
b kecepatan kaleng menghantam lantai?

Jawab:

a. Saat kaleng cat berada pada ketinggian 6m, kecepatan bendanya nol sehingga energi mekanik totalnya sama dengan energi potensial.

$E = Ek + Ep = 0 + mgh_0$

$E = 5$ kg $(9{,}8$ m/s$^2)(6$ m$) = 294$ joule

Energi kinetik pada ketinggian 4 m dapat dihitung dengan,

$E_k = E - Ep$

$E_k = 294$ joule $- 5$ kg $(9{,}8$ m/s$^2)(4$ m$) = (294 - 196)$ joule $= 98$ joule.

b. Sebelum kaleng menghantam lantai, ($h = 0$ dan $E_p = 0$), energi total mekanik sama dengan energi kinetik.

$$E = E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

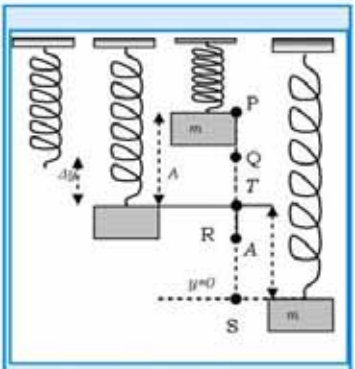
$$v = \frac{2E}{m} = \sqrt{\frac{2(294 \text{ joule})}{5 \text{kg}}} = \sqrt{\frac{588 \text{ joule}}{5 \text{kg}}} = \sqrt{117{,}6} \text{ m/s}^2 .$$

1. Hukum Kekekalan Energi pada pegas

Untuk menyelidiki hubungan antara energi kinetik dan energi potensial pegas pada setiap saat, marilah kita tinjau sistem pegas dan balok pada gambar 5.15. Pada gambar 5.15 ditunjukkan bahwa bila pegas dibebani dengan balok, maka pegas mengalami pertambahan panjang sebesar Δy karena berat balok berfungsi sebagai gaya tarik yang dikenakan pada pegas. Tetapi setelah balok digantungkan pada pegas yang tergantung vertikal, maka gaya yang mempengaruhi balok hanyalah gaya pegas dengan konstanta pegas sebesar:

$$k = \frac{mg}{\Delta y}$$

Maka bila balok yang terikat pada pegas ditekan ke atas dan kemudian dilepaskan sehingga balok bergerak bolak-balik antara titik P dan titik S, pada balok hanya bekerja gaya pegas yang sebanding dengan simpangan balok. Di titik P, kecepatan balok nol maka energi kinetik balok nol. Di titik P, pegas mempunyai simpangan sebesar A, maka sistem balok dan pegas mempunyai energi mekanik sebesar $E_P = \frac{1}{2}kA^2$. Sedangkan di titik kesetimbangan, titik T, kecepatan pegas mencapai nilai maksimum tetapi simpangan pegas nol, maka besarnya energi mekanik sistem di titik kesetimbangan adalah $E_T = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}mv_T^2$, dan besarnya energi mekanik di titik terendah S, adalah $E_S = \frac{1}{2}kA^2$.



Gambar 5.14 *Sistem pegas*

Sekarang kita amati gerakan benda dari titik Q dengan kecepatan v_Q dan simpangannya y_Q ke titik R dengan kecepatan v_R dan simpangannya y_R. Dengan menggunakan persamaan 5.7 dan (5.9) yang menyatakan hubungan antara kerja dengan energi kinetik dan energi potensial pegas sebagai:

$$W_{QR} = \frac{1}{2}mv_R^2 - \frac{1}{2}mv_Q^2 \text{ dan } W_{QR} = \frac{1}{2}ky_Q^2 - \frac{1}{2}ky_R^2,$$

Maka dari kedua persamaan ini diperoleh hasil

$$\frac{1}{2}mv_R^2 - \frac{1}{2}mv_Q^2 = \frac{1}{2}ky_Q^2 - \frac{1}{2}ky_R^2 \text{ atau}$$

$$\frac{1}{2}mv_R^2 + \frac{1}{2}ky_R^2 = \frac{1}{2}mv_Q^2 + \frac{1}{2}ky_Q^2 \qquad (5.\ 24)$$

Karena gaya pegas adalah gaya konservatif, maka energi mekanik sistem pegas pada setiap posisi antara titik P dan S selalu sama, yang besarnya sama dengan energi potensial pegas maksimum atau energi kinetik balok maksimum, yaitu:

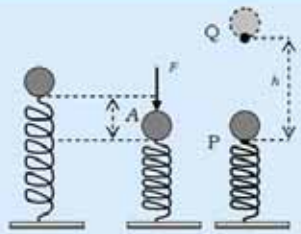
$$\frac{1}{2}mv_R^2 + \frac{1}{2}ky_R^2 = \frac{1}{2}mv_Q^2 + \frac{1}{2}ky_Q^2 = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

Di mana v_{max} adalah kecepatan maksimum partikel pada saat partikel melewati titik kesetimbangan. Dari persamaan-persamaan di atas ditunjukkan bahwa hukum kekekalan energi mekanik berlaku untuk sistem pegas-massa selama pegas tunduk pada hukum Hooke dan massa pegas diabaikan, dan tidak ada gaya gesek yang bekerja pada sistem pegas-massa.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 5.7

Peluru yang massanya 35 gram dapat diluncurkan dari moncong sebuah senapan mainan dengan cara menekan pegas peluncur peluru sejauh 12 cm dari posisi kesetimbangan. Sistem dan peluru mencapai tinggi maksimum sejauh 20 m bila moncong senapan diarahkan vertikal ke atas.



Gambar 5.15 *Peluru yang ditembakkan ke atas dengan pelontar pegas*

a. Dengan mengabaikan semua gaya gesek, berapakah konstanta pegas peluncur tersebut?
b. Tentukan kelajuan peluru pada saat peluru melewati titik kesetimbangan sistem, $y = 0$!

Penyelesaian:

Dari data di atas dapat diketahui bahwa peluru berada pada ujung atas pegas dan setelah pegas ditekan, peluru terlempar ke atas. Jadi, pada peluru bekerja gaya gravitasi dan gaya pegas, maka sistem pegas-peluru tunduk pada hukum kekekalan energi mekanik. Pada saat pegas ditekan ke bawah sejauh 0,12 m, lihat gambar 5.16, peluru dalam keadaan diam dan posisi tersebut digunakan sebagai titik acuan untuk energi potensial gravitasi, $E_p = U = 0$ maka diketahui : $m = 0{,}035$ kg, $A = 0{,}12$ m, $h = 20$ m

a. Dari gambar 5.16 ditunjukkan bahwa besarnya energi mekanik di titik P, $E_{MP} = \frac{1}{2}kA^2$

   Pada saat peluru mencapai titik tertinggi di Q, pegas telah kembali ke keadaan normal, maka besarnya energi mekanik sistem sama dengan besarnya energi potensial bola di titik Q dengan menggunakan titik P sebagai titik referensi, adalah $E_{MQ} = mgh$. Karena pada sistem berlaku hukum kekekalan energi mekanik, maka $\frac{1}{2}kA^2 = mgh$, atau

   $$k = \frac{2.0{,}035.10.20}{0{,}0144} = 972 \text{ N/m}.$$

b. Di titik kesetimbangan, peluru mempunyai energi kinetik dan energi potensial gravitasi, maka dengan menggunakan hukum kekekalan energi mekanik diperoleh hubungan

   $$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv^2 + mgA, \text{ atau}$$

   $$v = \sqrt{400 - 1{,}2} = \sqrt{398{,}8} = 20 \text{ m/s}.$$

Kegiatan 5.1

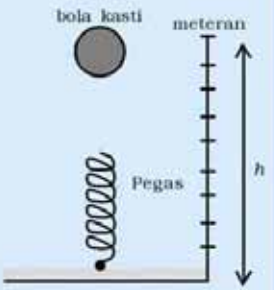
Tujuan:

Mengamati adanya konversi (perubahan) energi pada sistem pegas.

Alat dan bahan:

1. Pegas/per yang ringan dan lentur
2. Bola kasti

3. meteran
4. sekrup
5. papan



Gambar 5.16 *Susunan alat percobaan*

Prosedur:

1. Susun alat seperti skema di samping!
2. Ukur panjang pegas mula-mula!
3. Jatuhkan bola di atas pegas dari ketinggian *h*! Setelah bola menumbuk pegas, pegas tertekan secara maksimum.
4. Amati gerak pegas dan gambar posisi pegas pada buku laporan percobaan!
5. Jelaskan ada berapa macam konversi energi dalam sistem pegas tersebut?
6. Buatlah diagram batang yang mengilustrasikan proses perubahan energi mekanik dari kedudukan titik terendah sampai tertinggi!

Kesimpulan:

Apa yang dapat kalian simpulkan dari kegiatan di atas?

2. Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada Sistem yang Tunduk pada Hukum Gravitasi Umum

Besarnya energi mekanik untuk sistem benda-benda keplanetan ini bisa positif, nol, atau negatif. Tetapi untuk bumi dan matahari, energi mekanik sistem harus negatif karena bumi selalu terkungkung dengan gaya tarik matahari. Karena bumi mengorbit matahari dalam orbit berbentuk lingkaran, lihat gambar 5.18, maka bumi mengalami gaya tarik matahari yang sama besarnya dengan gaya sentral bumi, yaitu

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \qquad (5.25)$$

di mana M = massa matahari
m = massa bumi

Besarnya energi kinetik bumi yang mengorbit matahari yang dapat diperoleh dari persamaan 5.25 adalah,

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{2r} \qquad (5.\ 26)$$

Jadi, besarnya energi mekanik bumi yang mengorbit matahari menurut persamaan 5.26 adalah

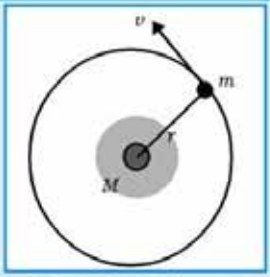
$$E_M = \frac{GMm}{2r} - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{2r} \qquad (5.27)$$

Persamaan 5.27 di atas menunjukkan bahwa energi mekanik untuk sistem planet yang mengorbit matahari atau satelit yang mengorbit planet induk adalah negatif. Bentuk orbit planet atau satelit dengan energi total negatif bisa berbentuk lingkaran atau ellips. Besarnya energi mekanik untuk planet yang orbitnya berbentuk ellips dengan setengah sumbu mayor a adalah:

$$E_M = -\frac{GMm}{2a} \qquad (5.28)$$

Sebuah satelit dengan massa m_1, bergerak dengan kelajuan v terhadap planet induknya yang berjarak r dari satelit. Bila planet induk n massanya m_2, biasanya $m_2 >> m_1$. Kemudian m_1 bergerak menjauh dan pada saat satelit berjarak r' dari planet induknya, kelajuan satelit adalah v'. Dengan menggunakan persamaan 5.18 dan 5.26 untuk sistem satelit yang mengorbit planet, diperoleh hukum kekekalan energi mekanik pada benda-benda yang tunduk pada hukum gravitasi umum sebagai,

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{Gm_1m_2}{r} = \frac{1}{2}mv'^2 - \frac{Gm_1m_2}{r'} \qquad (5\ .29)$$



Gambar 5.17 *Sebuah planet bermassa m mengelilingi matahari yang bermassa M pada jarak r dengan kelajuan v.*

Persamaan 5.29 berlaku untuk sistem dua benda yang dalam interaksinya hanya dipengaruhi oleh gaya tarik-menarik. Bila sebuah satelit buatan akan diorbitkan untuk mengitari bumi, maka satelit tersebut harus diluncurkan vertikal ke atas dengan kecepatan minimum tertentu agar satelit tidak jatuh kembali ke bumi.

Misalkan sebuah satelit buatan dengan massa m diluncurkan dari permukaan bumi dengan kecepatan v dan mengorbit bumi pada jarak r dari pusat bumi pada kecepatan v, maka menurut hukum kekekalan energi mekanik sistem bumi-satelit pada persamaan 5.29 diperoleh:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_{\oplus}m}{R_{\oplus}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_{\oplus}m}{r} \qquad (5.30)$$

Di mana $R_{\oplus}$ adalah jari-jari bumi dan M adalah massa bumi. Bila satelit mengorbit bumi, pada lintasan lingkaran setinggi h dari permukaan bumi, dan dengan kecepatan angular yang sama dengan kecepatan angular bumi, maka dari hukum kekekalan energi mekanik pada persamaan 5.30 diperoleh

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_{\oplus}m}{R_{\oplus}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_{\oplus}m}{(R_{\oplus}+h)} = -\frac{GM_{\oplus}m}{2(R_{\oplus}+h)} \qquad (5.31)$$

Dan dari persamaan 5.29 diperoleh:

$$\frac{GM_{\oplus}m}{2(R_{\oplus}+h)^2} = m(R_{\oplus}+h)\omega^2 \text{ dan } \omega = \frac{2\pi}{T}, \qquad (5.32)$$

di mana T adalah periode bumi yang berotasi terhadap sumbunya, dan $T >> 24$ jam.

Dari persamaan 5.32 dapat diperoleh tinggi orbit satelit dari permukaan bumi dan dari persamaan 5.31 dapat diperoleh kecepatan satelit yang diluncurkan dari permukaan bumi.

Bila satelit yang diluncurkan dari permukaan bumi sedemikian hingga satelit dapat melepaskan diri dari pengaruh gaya gravitasi bumi, maka satelit dikatakan lolos dari medan gravitasi bumi. Bila satelit lolos dari gravitasi bumi maka kecepatan satelit menjadi nol dan posisi satelit menuju tak hingga. Maka agar satelit dapat lolos dari bumi, satelit harus diluncurkan dari permukaan bumi dengan kecepatan minimum yang disebut kecepatan lolos yang dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 5.30.

$$\frac{1}{2}mv_{lolos}^2 - \frac{GM_{\oplus}m}{R_{\oplus}} = 0 \text{ atau } v_{lolos} = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \qquad (5.33)$$

Persaman 5.33 menunjukkan bahwa kecepatan lolos satelit tidak tergantung massa satelit tetapi tergantung pada massa planet induk dan jari-jarinya. Maka, untuk meloloskan satelit ataupun molekul, kecepatan lolosnya bisa sama besar selama diluncurkan dari planet yang sama. Kecepatan lolos satelit juga tidak tergantung pada arah kecepatannya, maka lintasan satelit tidak akan berpotongan dengan lintasan satelit planet. Persamaan 5.33 berlaku bagi sembarang satelit yang diluncurkan dari sembarang planet hanya dengan mengganti harga massa dan jari-jari planet yang bersangkutan.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal kalian**, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 5.8

Tentukan besarnya kecepatan lolos bagi sebuah pesawat ruang angkasa di permukaan bumi yang massanya 5000 kg dan tentukan energi kinetiknya di permukaan bumi agar pesawat tersebut lepas dari pengaruh gravitasi bumi!

Penyelesaian:
Menurut persamaan 5.33 kecepatan lolos pesawat ruang angkasa tersebut adalah

$$v_{lolos} = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} = \sqrt{\frac{2(6{,}67\times10^{-11}\,\text{N.m}^2\text{kg}^{-2})(5{,}98\times10^{24}\,\text{kg})}{6{,}37\times10^{6}\,\text{m}}}$$
$$= 1{,}12\times10^{4}\,\text{m/s}$$

Besarnya energi kinetik pesawat ruang angkasa tersebut adalah

$$E_k = \frac{1}{2}mv_{lolos}^2 = \frac{1}{2}(5000\,\text{kg})(1{,}12\times10^{4}\,\text{m/s})^2 = 3{,}14\times10^{11}\,\text{J}$$

3. Hukum Kekekalan Energi Mekanik untuk Benda yang Bergerak pada Bidang Miring

Bila sebuah benda meluncur di atas bidang miring yang licin, maka gaya yang bekerja pada benda tersebut hanyalah gaya gravitasi. Marilah kita perhatikan sebuah benda yang meluncur pada bidang miring dengan sudut kemiringan θ dari posisi awal setinggi h_1 dengan kecepatan v_1 ke posisi akhir setinggi h_2 dengan kecepatan v_2. Maka, besarnya kerja yang dilakukan oleh komponen gaya gravitasi yang searah dengan arah lintasan adalah:

$$W = (mg \sin \theta)((h_1 - h_2)/\sin \theta) = mg\,(h_1 - h_2) \qquad (5.34)$$

Sedangkan hubungan antara kerja dan perubahan energi kinetik untuk balok yang meluncur tersebut adalah:

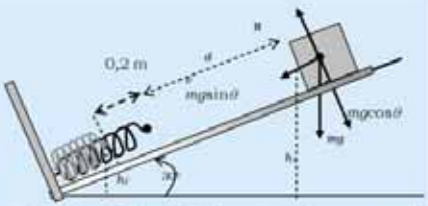
$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \qquad (5.35)$$

Walaupun benda meluncur pada bidang miring, tetapi gaya yang bekerja pada benda hanyalah gaya gravitasi karena gaya gesek antara benda dengan permukaan bidang miring diabaikan, maka hukum kekekalan energi mekanik juga berlaku untuk benda yang meluncur pada bidang miring, yaitu:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 \qquad (5.36)$$

Contoh Soal 5.9

Sebuah balok yang massanya 3 kg meluncur pada sebuah bidang miring yang licin dengan sudut kemiringan 30° sejauh d m dan menyentuh pegas yang dalam keadaan tak teregang. Setelah menyentuh pegas, kemudian pegas tertekan balok sejauh 0,2 m dan kemudian balok berhenti, lihat gambar 5.18. Tentukan d bila konstanta pegas 400 N/m!



Gambar 5.18 *Balok yang meluncur pada bidang miring dan menekan pegas*

Penyelesaian:

Dari soal dapat disimpulkan bahwa balok berpindah sejauh $(d+0{,}2)$ m. Dari gambar 5.18 dapat ditunjukkan bahwa tinggi

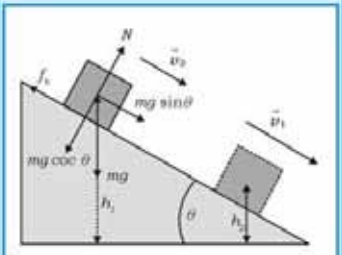
balok awal adalah h_1 dan saat berhenti setelah menekan pegas adalah h_2. Sedangkan $(h_2 - h_1) = \Delta h = (d+0{,}2)$ m sin 30° = $((d+0{,}2)/2)$ m. Besarnya energi mekanik di titik awal adalah $E_{M1} = mgh_1$, sedangkan besarnya energi mekanik pada saat balok berhenti adalah $E_{M2} = mgh_2 + (1/2)kx^2$ di mana $x = 0{,}2$ m dan $k = 400$ N/m. Dengan menggunakan hukum kekekalan energi mekanik diperoleh,

$$mgh_1 = mgh_2 + (1/2)kx^2 \text{ atau } mg\Delta h = (1/2)kx^2,$$

(2,5 kg)(10 m/s^2)$((d+0{,}2)/2)$ m) = (1/2) (400 N/m)(0,2 m)^2
Jadi $d = 3$ m.

I. Hubungan Usaha, Energi Kinetik, dan Energi Potensial Benda yang Dipengaruhi Gaya Gesek

Bila pada suatu sistem bekerja gaya gesek, maka pada sistem tersebut tidak berlaku lagi hukum kekekalan energi mekanik, tetapi kerja dari gaya total yang dikenakan pada benda tersebut masih sama dengan perubahan energi kinetik benda. Misal, sebuah benda meluncur pada bidang miring yang kasar dengan koefisien gesek kinetik μ_k, dari posisi 1 yang tingginya h_1 dan kecepatan benda $\vec{v}_1$ ke posisi 2 yang tingginya h_2 dan kecepatan benda $\vec{v}_2$, lihat gambar 5.19. Besarnya kerja oleh gaya total ($mg \sin \theta - f_k$) adalah :



Gambar 5.19 *Benda yang meluncur kebawah mengalami gaya gravitasi dan gaya gesek*

$$W = (mg \sin \theta - f_k)(h_1 - h_2)/\sin \theta = - f_k)(h_1 - h_2)/\sin \theta + mg(h_1 - h_2)$$

Di mana besarnya kerja oleh gaya total yang bekerja pada benda sama dengan pertambahan energi kinetik, yaitu:

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \qquad (5.37)$$

Dari kedua persamaan tersebut diperoleh,

$-f_k(h_1-h_2)/\sin\theta = (\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2) + (mgh_2 - mgh_1)$

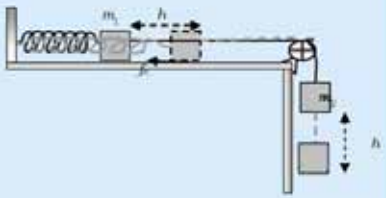
$(-f_k)(h_1-h_2)/\sin\theta$ adalah besarnya kerja yang dilakukan gaya gesek sepanjang perpindahan benda. $(\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2)$ adalah energi kinetik akhir dikurangi energi kinetik awal. $(mgh_2 - mgh_1)$ adalah energi potensial akhir dikurangi energi potensial awal. Jadi, secara umum dapat dikatakan bahwa besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya gesek sama dengan pertambahan energi kinetik dan energi potensialnya, secara matematik dapat dituliskan sebagai,

$$W_f = \Delta E_K + \Delta E_P \qquad (5.38)$$

Secara umum persamaan 5.38 berlaku juga untuk energi potensial pegas.

Contoh Soal 5.10

Dua balok, masing-masing massanya m_1 dan m_2, dihubungkan dengan tali ringan yang kuat lewat sebuah katrol yang licin. Balok m_1 terletak pada bidang datar dan dihubungkan dengan pegas dengan konstanta k. Mula-mula sistem dalam keadaan diam dan pegas dalam keadaan tak teregang, kemudian balok dilepaskan dan sistem berhenti setelah balok m_2 turun ke bawah sejauh h, lihat gambar 5.20. Tentukan koefisien gesek kinetik antara m_1 dan permukaan bidang datar!



Gambar 5.20 *Sistem yang mula-mula diam dan pegasnya tak terengang, setelah di lepas sistem*

Penyelesaian:

Baik keadaan awal maupun keadaan akhir sistem dalam keadaan diam. Besarnya koefisien gesek kinetik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 5.35.

$-\mu_k m_1 g = (\frac{1}{2}kh^2 - 0) + m_2 g(h_2 - h_1)$ di mana $(h_2 - h_1) = h$

Jadi $\mu_k = (m_2 gh - \frac{1}{2}kh^2)/(m_1 g)$

Untuk **menumbuhkan semangat kreatifitas dan merangsang keingintahuan** kalian, kerjakan tugas berikut ini!

Tugas 5.2

Kalian sudah pernah melihat tempat bongkar-muat barang bukan? Di tempat bongkar muat barang, kalian banyak melihat truk dari yang berukuran kecil sampai yang berukuran sangat besar. Biasanya truk yang besar, posisi bak truk juga tinggi. Untuk mengurangi kerja berat para buruh, biasanya barang yang dibongkar diturunkan dengan menggunakan bidang miring.

a. Bidang miring yang manakah yang kalian pilih, yang sangat halus atau yang sangat kasar? Jelaskan!
b. Bila barang (peti) sudah turun sampai di tanah, apakah peti masih melakukan gerak mendatar? Jelaskan! Bandingkan jarak yang ditempuh peti bila bidang miringnya sangat halus dan sangat kasar!

Rangkuman

1. Besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya F yang dikerjakan pada benda yang membentuk sudut θ dengan arah perpindahan d didefinisikan:

$$W = \vec{F}.\vec{d} = |\vec{F}|\cos\theta.|\vec{d}| = |\vec{F}|.|\vec{d}|\cos\theta \ .$$

2. Hubungan antara kerja yang dilakukan gaya F dengan energi kinetik benda adalah:

$$W = (\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2) .$$

3. Besarnya daya rata-rata P_{rt} sama dengan hasil kali antara komponen gaya yang searah dengan kecepatan dengan kecepatan rata-rata dan dituliskan sebagai $P_{rt} = Fv_{rt}\cos\theta$.
4. Besarnya daya sesaat sama dengan hasil kali antara komponen gaya yang searah dengan kecepatan sesaat dengan kecepatan sesaat:

$$P = Fv\cos\theta$$

5. Hubungan antara kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi dapat diinyatakan sebagai:

$$W = -mg(h_2 - h_1) = mgh_1 - mgh_2$$

6. Besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya pegas yang mula-mula disimpangkan sejauh x dari posisi kesetimbangan dan kemudian dilepaskan sehingga kembali ke posisi sejauh x_0 dari posisi kesetimbangan adalah:

$$W = \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{2}kx_0^2 = E_p - E_{p0}.$$

7. Gaya gravitasi dan gaya pegas adalah contoh gaya konservatif, sedangkan gaya gesek adalah contoh gaya nonkonservatif. Bila pada sebuah benda hanya bekerja gaya konservatif maka pada benda tersebut berlaku hukum kekekalan energi mekanik, yaitu jumlah total energi potensial dan kinetik sistem adalah konstan.
8. Dengan menggunakan hukum kekekalan energi mekanik, besarnya kecepatan v, yang diperlukan untuk meluncurkan satelit dari permukaan bumi menuju orbit setinggi h dan dengan kecepatan anguler $\omega = \frac{v}{(R_\oplus + h)}$ tertentu dapat dihitung, yaitu:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_\oplus m}{R_\oplus} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_\oplus m}{(R_\oplus + h)} = -\frac{GM_\oplus m}{2(R_\oplus + h)}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\{GM_\oplus(\frac{1}{R_\oplus} - \frac{1}{R_\oplus + h})\}}.$$

9. Bila pada sebuah benda yang bergerak mengalami gaya konservatif dan nonkonservatif, maka pada benda tersebut tidak lagi berlaku hukum kekekalan energi mekanik. Misalnya sebuah benda yang meluncur di atas bidang miring yang kasar, besarnya kerja yang dilakukan gaya gesek sama dengan energi mekanik akhir dikurangi energi mekanik awal yang dapat dinyatakan sebagai:

$$W_f = (E_{k2} - E_{k1}) + (E_{p2} - E_{p1}).$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Atlet angkat besi mengangkat barbel dari lantai ke atas kepala, maka pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .
   a. pada saat mengangkat berbel dari lantai sampai ke atas kepala, ia melakukan kerja lebih kecil dari hasil kali antara berat barbel dan tingginya
   b. orang tersebut melakukan kerja lebih besar daripada hasil kali antara berat barbel dengan tingginya
   c. pada saat barbel ditahan di atas kepala, ia melakukan kerja sama dengan hasil kali berat barbel dengan tingginya
   d. ia tidak melakukan kerja karena ia tidak berpindah secara horisontal
   e. ia melakukan kerja yang besarnya sama dengan hasil kali antara berat barbel dengan setengah tinggi badannya
2. Dua buah balok yang identik (bentuk, volume, dan massanya sama) terletak pada bidang datar yang licin. Balok 1 dikenai gaya F yang membentuk sudut θ dengan arah perpindahannya, sedangkan balok ke 2 dikenai gaya $2F$ dan membentuk sudut 2θ terhadap arah perpindahannya. Kedua balok mempunyai perpindahan yang sama besar, maka . . . .
   a. kerja pada balok 1 lebih besar daripada balok 2
   b. kerja pada balok 2 lebih besar daripada balok 1
   c. kerja pada kedua balok sama besar
   d. kerja pada kedua balok sama besar bila $2 \cos (2\theta) = \cos (\theta)$
   e. kerja pada balok 1 lebih besar daripada balok 2 bila $2 \cos (2\theta) > \cos (\theta)$
3. Sebuah pesawat jet mengikuti "*air show*" dengan terbang dalam lintasan berbentuk lingkaran vertikal. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, ***kecuali*** . . . .

a. kerja yang dilakukan gaya berat pesawat positif pada saat pesawat terbang ke bawah
b. kerja yang dilakukan gaya berat pesawat negatif pada saat pesawat terbang ke atas
c. besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya berat pesawat selalu berubah-ubah sepanjang lintasan
d. bila pesawat jet terbang dalam lintasan lingkaran dengan kelajuan konstan, maka pada gerak pesawat tersebut tunduk pada hukum kekekalan energi
e. bila pesawat jet terbang dalam lintasan lingkaran dengan kelajuan konstan, maka pada titik tertinggi energi mekaniknya maksimum

4. Sebuah peluru ditembakkan secara vertikal ke atas dengan kecepatan awal 10 m/s. Bila gesekan udara diabaikan, pernyataan-pernyataan di bawah ini semuanya benar **kecuali** . . . .
   a. kerja total yang dikerjakan pada peluru pada saat peluru jatuh kembali ke tempat semula adalah nol, karena kerja yang dilakukan oleh gaya berat hanya tergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir
   b. kerja total yang dikerjakan pada peluru pada saat peluru jatuh kembali ke tempat semula adalah nol, karena gaya berat adalah gaya konservatif
   c. kerja total yang dikerjakan pada peluru pada saat peluru jatuh kembali ke tempat semula adalah tidak nol, karena gaya berat adalah gaya konservatif
   d. kerja total yang dikerjakan pada peluru pada saat peluru jatuh kembali ke tempat semula adalah nol, karena perpindahan peluru adalah nol
   e. besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya berat pada saat peluru bergerak naik sama dengan kerja yang dilakukan gaya berat pada saat peluru bergerak turun, tetapi tandanya berlawanan

5. Dua buah mobil, truk dan sedan, keduanya melaju dengan kecepatan yang sama dan koefisien gesekan kinetik antara ban dan jalan juga sama besar. Bila keduanya di rem sampai berhenti, maka . . . .
   a. truk akan menempuh jarak yang lebih pendek untuk berhenti daripada sedan
   b. keduanya berhenti bersamaan pada jarak yang sama
   c. sedan akan menempuh jarak yang lebih pendek untuk berhenti daripada truk

d. keduanya mengalami gaya gesek yang sama
e. pada saat direm, truk mengalami perlambatan yang lebih besar daripada sedan

6. Gaya pegas dan gaya tarik gravitasi bumi adalah gaya konservatif, maka . . . .
   a. perubahan energi potensial gravitasi dan pegas hanya tergantung pada posisi awal dan posisi akhir
   b. perubahan energi potensial gravitasi hanya tergantung pada posisi awal dan posisi akhir, tetapi untuk energi potensial pegas tergantung pada lintasan
   c. perubahan energi potensial pegas hanya tergantung pada posisi awal dan posisi akhir, tetapi untuk energi potensial gravitasi tergantung pada lintasan
   d. perubahan energi potensial gravitasi dan pegas tergantung pada lintasan
   e. gerak benda yang dipengaruhi oleh kedua gaya tersebut tidak tunduk pada hukum kekekalan energi mekanik

7. Sebuah bandul kecil yang digantung dengan tali ringan berosilasi, maka . . . .
   a. energi kinetiknya terbesar pada saat mencapai simpangan maksimum
   b. energi kinetiknya terbesar pada saat bandul melewati titik kesetimbangan
   c. pada saat simpangan bandul maksimum, energi mekaniknya terbesar
   d. pada saat simpangan bandul maksimum, energi mekaniknya terkecil
   e. gerak bandul tidak tunduk pada hukum kekekalan energi mekanik karena bandul tergantung pada tali

8. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, **kecuali** . . . .
   a. satuan energi kinetik dan kerja yaitu joule
   b. satuan daya adalah watt untuk satuan SI dan hp (horse power) untuk satuan british
   c. satuan daya dalam watt dan satuan kerja dalam joule/sekon
   d. satuan energi potensial gravitasi adalah newton meter
   e. satuan energi mekanik sama dengan satuan energi potensial, yaitu joule

9. Lantai ruang *basement* jaraknya 3m di bawah permukaan tanah, sedangkan lantai beranda atas berada pada ketinggian 5m dari permukaan tanah, maka . . . .

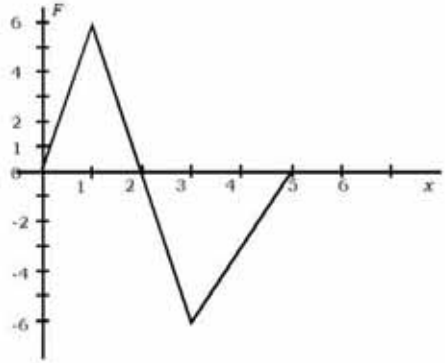
a. kerja yang dilakukan pada benda yang massanya 1,5kg yang dibawa dari beranda atas ke *basement* adalah 120 N
b. besarnya energi potensial benda di lantai *basement* adalah 45 N
c. besarnya kerja yang dilakukan pada benda yang dibawa dari *basement* ke lantai beranda adalah 120 N
d. besarnya kerja yang dilakukan pada benda yang dibawa dari basement ke lantai dasar adalah -45 N
e. besarnya kerja yang dilakukan pada benda baik benda dibawa turun atau naik adalah nol

10. Sebuah pompa air dengan daya 1 hp digunakan untuk menaikkan air sumur yang dalamnya 30 m. Bila semua energi dari pompa digunakan untuk menaikkan air dan energi kinetik yang diperoleh air selama geraknya diabaikan maka . . . .
    a. setiap menit volume air yang dipompa ke atas sebesar 152 liter
    b. setiap detik volume air yang dipompa ke atas sebesar 152 liter
    c. setiap jam volume air yang dipompa ke atas sebesar 152 liter
    d. setiap menit volume air yang dipompa ke atas sebesar 2,5 liter
    e. kerja yang dilakukan pompa air sebesar 746 watt per menit

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

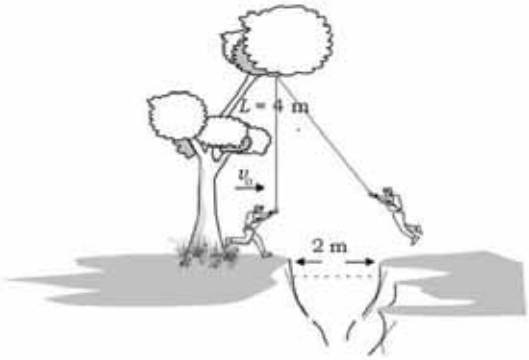
1. Sebuah bola karet dijatuhkan dari tempat setinggi 1,25 m dan menumbuk lantai yang keras. Ternyata, setiap kali bola tersebut menumbuk lantai, energinya hilang sebesar 18 %.
    a. Bila setiap bola menumbuk lantai, bola dipantulkan kembali, berapa ketinggian yang dicapai bola untuk pemantulan pertama?
    b. Berapa tinggi yang dicapai bola untuk pemantulan kedua?
    c. Agar bola dapat memantul kembali ke tempat semula, dimana bola dijatuhkan? Berapakah kecepatan awal bola yang dilemparkan ke bawah?

2. Seorang siswa menggantungkan balok yang massanya 0,25 kg pada ujung sebuah pegas sehingga pegas mengalami perpanjangan sebesar 5 cm. Kemudian siswa tersebut menarik balok tersebut ke bawah dengan cara memberikan kerja pada balok sebesar 6 joule. Tentukan pertambahan panjang pegas karena kerja tersebut!
3. Hitunglah kerja yang dilakukan oleh gaya tak konstan yang dilukiskan pada gambar di bawah ini yang menunjukkan grafik hubungan antara gaya dan perpindahan!



4. Sebuah peluru bergerak dengan kecepatan 350 m/s menumbuk pohon dan masuk ke dalam pohon sejauh 12 cm. Berapakah gaya rata-rata yang diberikan pada peluru sehingga peluru berhenti?
5. Pada sebuah *trailer* selalu di rem dengan gaya rata-rata yang sama dan konstan, sehingga jarak tempuh untuk berhenti juga sama dan konstan. Tunjukkan bahwa jarak tempuh untuk berhenti sebanding dengan kuadrat kecepatan sebelum *trailer* di rem!
6. Sebuah peluru yang massanya 0,5 kg ditembakkan dengan kecepatan awal 20 m/s dan membentuk sudut 37° dengan arah horisontal. Tentukan kerja yang dikenakan pada peluru pada saat peluru jatuh di atas permukaan tanah!
7. Seorang gadis kecil berayun-ayun pada ayunan yang panjang talinya 4 m. Tinggi maksimum ayunan adalah 2 m di atas permukaan tanah, sedangkan titik terendah ayunan adalah 0,5 m. Berapakah kelajuan maksimum yang dialami gadis kecil tersebut dan berapakah tingginya dari permukaan tanah?

8. Untuk melewati ngarai yang terjal, seorang pendaki akan melompat dengan mengayunkan dirinya dengan menggunakan tali, lihat gambar di bawah. Ia menggunakan tali yang panjangnya 4 m dan mendarat tepat di tepi jurang yang yang lebarnya 2 m. Berapakah kelajuannya pada saat ia mulai mengayun untuk menyeberang bila ia selamat? Berapakah kelajuannya pada saat ia mulai mengayun untuk menyeberang bila ia jatuh ke jurang? Jelaskan!



9. Sebuah helikopter yang massanya 1500 kg diberi percepatan yang konstan 2 m/s^2, vertikal ke atas dari keadaan diam dan menempuh jarak sejauh 30 m. Berapakah kerja bersih yang dilakukan terhadap helikopter?
10. Sebuah bola yang massanya 0,25 kg dijatuhkan dari tempat yang tingginya 2 m dari ujung atas sebuah pegas dengan konstanta pegas 600 N/m yang berdiri kokoh di atas lantai dan tepat di bawah bola. Berapakah jarak maksimum pegas yang ditekan oleh bola yang jatuh? Berapakah kelajuan bola pada saat pegas telah tertekan sejauh 5 cm?

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian . Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab VI

Momentum dan Tumbukan

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat memahami dan menunjukkan hubungan antara konsep implus dan momentum untuk menyelesaikan masalah tumbukan.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Momentum
2. Impuls
3. Hukum kekekalan momentum
4. Jenis-jenis tumbukan

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:

1. Gaya dan momentum
2. Impuls
3. Hukum kekalan momentum
4. Jenis-jenis tumbukan
5. Energi pada tumbukan
6. Pusat massa
7. Gerak sistem partikel

Pernyataan tentang momentum, mengajak kita untuk membayangkan tentang para pemain sepak bola di lapangan dan sedang bertanding. Bola diumpan ke tim dan pemain lain berlari untuk mengejar bola dan berusaha untuk memasukan ke gawang lawan. Namun bola yang sudah di depan gawang bisa dikendalikan oleh pihak lawan sehingga bola tidak jadi masuk gawang. Dalam situasi yang menegangkan tersebut, karakterik para pemain bola sangat menentukan.

Bagaimana dengan kecepatan lari dari para pemain? Kalian bisa mengamati kecepatan lari dilihat dari postur tubuh para pemain. Seorang pemain sepakbola akan lebih mudah pingsan jika diganjal oleh lawan berat yang berlari dengan kecepatan penuh dan pada oleh pengganjal yang lebih ringan atau yang bergerak lebih lambat.

Menurut ilmu fisika, biasanya kecepatan dikaitkan dengan berat atau ringannya massa benda. Kita mungkin membayangkan bahwa bila benda mempunyai massa yang besar atau lebih padat, ada kecenderungan mempunyai momentum yang besar walaupun geraknya sangat lamban. Namun secara teknis benda yang ringan pun sebenarnya bisa mempunyai momentum yang sama atau bahkan lebih besar dari benda yang bermassa lebih besar jika kecepatannya sangat besar.

Newton mengartikan momentum sebagai kuantitas gerak yang timbul dari adanya kecepatan dan kuantitas benda yang disebut massa. Momentum merupakan perkalian antara massa dan kecepatan. Secara matematis dituliskan:

$$\vec{p} = m\vec{v} \qquad (6.1)$$

di mana satuan momentum dalam satuan SI yang didasarkan pada persamaan 6.1 adalah kg.m/s.

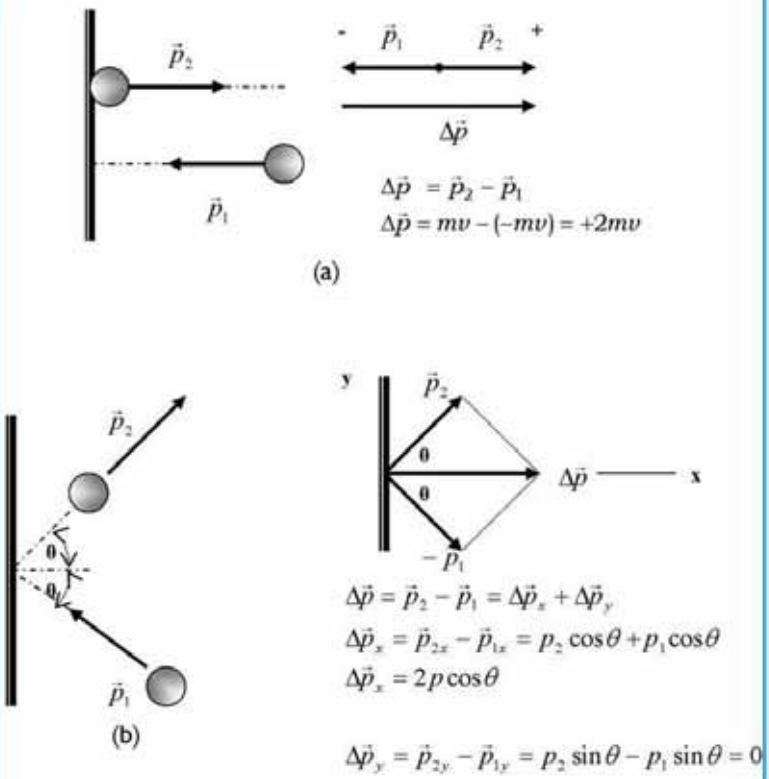
Momentum adalah besaran vektor yang mempunyai arah sama dengan arah kecepatan, maka vektor momentum juga dapat diuraikan ke dalam komponen-komponennya dalam arah $p_x = mv_x$, $p_y = mv_y$, dan $p_z = mv_z$ untuk momentum dalam ruang.

Persamaan 6.1 adalah momentum untuk benda atau partikel tunggal. Jika suatu sistem mempunyai partikel lebih dari satu maka besarnya momentum linear total dalam sistem tersebut adalah jumlah vektor dari momentum untuk setiap partikel, yaitu

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \ldots = \Sigma \vec{p}_i \qquad (6.2)$$

Karena momentum adalah besaran vektor, maka perubahan momentum dapat berupa perubahan besarnya dan atau arahnya. Contoh perubahan momentum yang disebabkan oleh adanya perubahan arah adalah terjadi pada tumbukan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.1. Pada gambar 6.1 besarnya momentum partikel sebelum dan sesudah tumbukan dianggap sama, seperti yang ditunjukkan oleh panjang anak panah. Pada gambar 6.1(a) ditunjukkan bahwa momentum mengalami perubahan arah sebesar 180°. Perubahan momentum $\Delta\vec{p}$ adalah perbedaan vektor,

yaitu vektor momentum sesudah tumbukan dikurangi dengan vektor momentum sebelum tumbukan. Pada gambar 6.1 b, sebuah partikel menumbuk dinding yang kokoh sehingga partikel dipantulkan kembali oleh dinding tersebut. Karena pemantulan tersebut, maka partikel mengalami perubahan momentum seperti yang ditunjukkan dengan adanya perbedaan komponen antara momentum partikel sebelum dan sesudah menumbuk dinding.



Gambar 6.1 *Perubahan momentum (a) perubahan momentum dari sebuah partikel yang menumbuk dinding dengan arah tegak lurus, (b) sebuah partikel menumbuk dengan arah kecepatan membentuk sudut θ.*

Pada gambar 6.1(a) diperlihatkan bahwa perbedaan antara vektor momentum sesudah dan sebelum tumbukan adalah $+2mv$, sedangkan gambar 6.1(b) menunjukkan perubahan momentum juga dapat ditentukan dari perbedaan antara komponen-komponen momentum pada masing-masing arah sumbu koordinat.

A. Gaya dan Momentum

Seperti yang telah kalian pelajari bersama bahwa untuk mengubah kecepatan sebuah benda diperlukan gaya yang dikerjakan pada benda tersebut. Bila kecepatan benda berubah, maka berubah pula momentumnya, sehingga untuk mengubah momentum suatu benda juga diperlukan gaya. Secara umum dapat ditunjukkan bahwa hukum II Newton dapat dinyatakan dalam konsep momentum. Hubungan antara gaya dan momentum dapat dijabarkan dari persamaan-persamaan gaya dan gerak:

$$\vec{F} = m\vec{a} \text{ dan } \vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$$

dan massa benda adalah konstan. Dari kedua persamaan tersebut diperoleh:

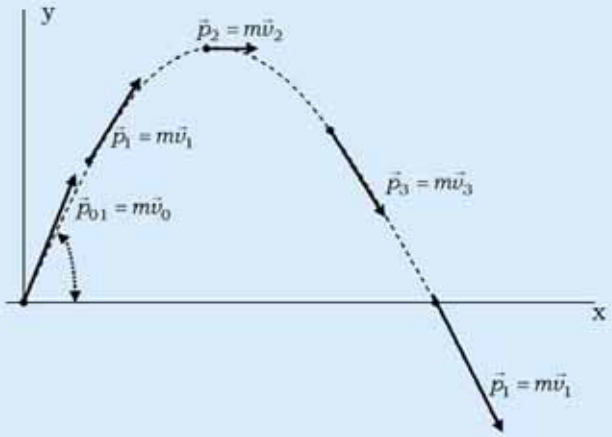
$$\vec{F} = m\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\vec{p} - \vec{p}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \qquad (6.3)$$

Persamaan 6.4 menunjukkan hubungan antara gaya dan momentum, di mana gaya $\vec{F}$ adalah gaya yang dikerjakan pada benda bermassa m, bila Δt mendekati harga nol, maka harga gaya tersebut menjadi harga gaya sesaat. Secara fisis dapat dijelaskan bahwa resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan perubahan momentum per satuan waktu. Jadi dengan kata lain, bahwa hukum II Newton yang dinyatakan $\vec{F} = m\vec{a}$ adalah ekuivalen dengan $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ jika massa benda konstan. Seperti pada persamaan $\vec{F} = m\vec{a}$ yang menunjukkan bahwa adanya sebuah percepatan karena adanya gaya, maka dalam hal yang sama untuk persamaan $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ menunjukkan bahwa adanya perubahan momentum merupakan bukti adanya gaya. Contoh pada gambar 6.2, perubahan momen-

tum dari proyektil yang ditunjukkan dengan adanya perubahan besar dan arah dari garis singgung pada lintasan parabolik. Perubahan momentum menunjukkan adanya gaya yang bekerja pada proyektil yang diketahui sebagai gaya gravitasi.

Brilian

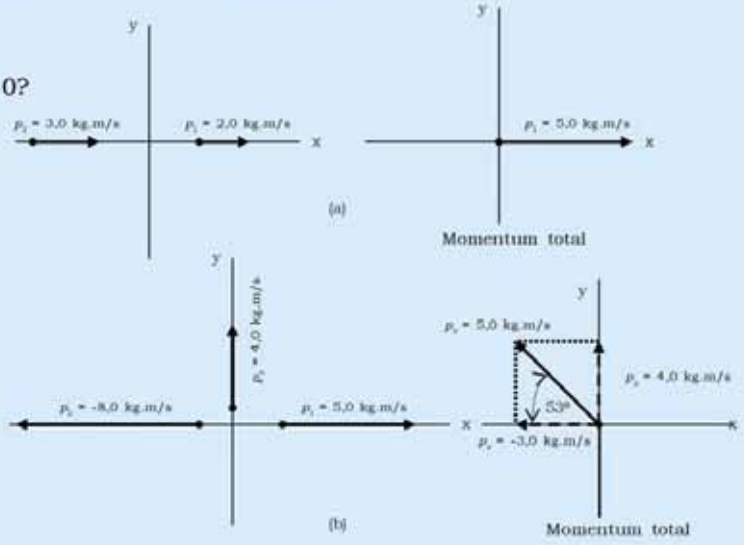
Apakah perubahan momentum pada gambar 6.2 dapat kalian identifikasi seperti gaya yang teridentifikasi pada gerak peluru/proyektil? Coba kalian pikirkan, apakah ada hubungannya dengan pernyataan hukum III Newton!



Gambar 6.2 *Perubahan momentum pada gerak peluru*

Contoh Soal 6.1

Berapa momentum total untuk setiap sistem seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.3.(a) dan 6.3(b)?



Gambar 6.3 *Momentum total*

Penyelesaian:
Berdasarkan gambar 6.3.
Diketahui:
Besar dan arah masing-masing momentum setiap partikel pada sistem ditunjukkan pada gambar 6.3.
Ditanya:
a. Momentum total pada gambar 6.3a (p)?
b. Momentum total pada gambar 6.3b (p)?

Jawab:
a. Momentum total dari sebuah sistem adalah jumlah vektor momentum dari setiap partikel:

$$p = p_1 + p_2$$

$$p = 2{,}0\,\text{kg.m/s} + 3{,}0\,\text{kg.m/s} = 5{,}0\,\text{kg.m/s}$$ (arah sumbu x positif)

b Menghitung momentum total untuk tiap komponen yaitu searah sumbu x dan y:

$p_x = p_1 + p_2$

$p = 5{,}0\,\text{kg.m/s} - 8{,}0\,\text{kg.m/s} = -3{,}0\,\text{kg.m/s}$

(arah sumbu x negatif)

$p_y = p_3$

$p_y = 4{,}0\,\text{kg.m/s}$ (arah sumbu y positif)

Maka resultan vektor momentum dapat ditulis sebagai:

$\vec{p} = p_x + p_y$

$\vec{p} = (-3{,}0\ \text{kg.m/s})\vec{i} + (4{,}0\ \text{kg.m/s})\vec{j}$

dan besar resultan momentum adalah $P = 5$ kg.m/s

Tugas 6.1

Dari hasil perhitungan di atas dan gambar 6.3b, buktikan bahwa sudut antara resultan momentum terhadap sumbu x negatif adalah 53°!

B. Impuls

Bila dua buah benda seperti pemukul golf dan bola golf, kaki pemain bola dan bola, saling bertumbukan, maka masing-masing benda akan memberikan gaya yang besar ke benda yang lain dalam waktu yang relatif singkat. Gaya yang saling dikerjakan satu sama lain tersebut besarnya tidak konstan. Hukum II Newton yang dinyatakan dalam bentuk perubahan momentum masih dapat digunakan untuk menganalisis peristiwa tumbukan dengan mengambil nilai rata-rata gaya tersebut.

Untuk jenis tumbukan di atas persamaan 6.3 dapat ditulis kembali sebagai:

$$\vec{F}_{rata\text{-}rata}\Delta t = \Delta\vec{p} = m\vec{v} - m\vec{v}_0 \qquad (6.4)$$

di mana besaran pada ruas sebelah kiri dari persamaan 6.4 disebut sebagai Impuls gaya ($\vec{I}$). Secara matematis dapat ditulis:

$$\vec{I} = \vec{F}_{rata-rata}\Delta t \qquad (6.5)$$

Menurut persamaan 6.5 satuan impuls dalam satuan SI adalah newton sekon (N.s) atau kg.m/s.

Dari persamaan 6.5 ditunjukkan bahwa untuk mendapatkan impuls yang konstan maka hubungan antara gaya dan waktu berbanding terbalik, yaitu semakin besar gaya yang dikerjakan satu sama lain semakin kecil waktu yang diperlukan.

Contoh aplikasi konsep impuls dalam kehidupan sehari-hari adalah kalian mungkin pernah berusaha untuk meminimalkan gaya impuls sesaat pada saat kalian melompat dari ketinggian tertentu ke suatu permukaan yang keras dengan cara tidak menggunakan kaki pada posisi yang kaku. Jika kalian berhenti atau mendarat secara tiba-tiba maka waktu sentuhnya (Δt) kecil dan gaya impulsnya besar sehingga menyebabkan rasa sakit sekali pada tulang kaki atau engkel kaki kalian. Untuk menghindari rasa sakit, kalian dapat melakukan dengan cara menekuk lutut saat mendarat.

Tugas 6.2

Bila kalian sebagai *pitcher* (pelempar bola) dalam permainan *baseball*, bagaimana caranya agar bola yang diumpankan ke pemukul melaju dengan kencang? Jelaskan dengan cara kalian menggerakkan tangan!

Kata impuls secara tidak langsung diartikan sebagai gaya impuls yang bekerja pada benda dalam waktu yang relatif kecil, pernyataan ini dalam berbagai hal adalah benar. Sebenarnya definisi impuls tidak terbatas pada waktu yang relatif kecil. Impuls sangat berkaitan dengan tumbukan, prinsip yang paling mendasar pada tumbukan adalah adanya interaksi antara dua benda dan mengakibatkan adanya perubahan momentum atau energi. Kalian mungkin berharap bahwa momentum dan energi saling berkaitan, mengingat adanya teorema impuls-momentum dan teorema kerja-energi. Untuk menunjukkan saling keterkaitan antara momentum dan energi marilah kita tinjau definisi energi kinetik dan momentum dari sebuah benda yang massanya m dan bergerak dengan kecepatan v:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} \qquad (6.6)$$

Persamaan 6.6 menunjukkan hubungan antara energi kinetik dan momentum. Jika gaya impuls bekerja pada sebuah benda yang mula-mula diam, maka menurut persamaan 6.6 besarnya perubahan energi kinetik sebanding dengan kuadrat perubahan momentum. Hukum kekekalan momentum dan energi adalah hal yang sangat penting dalam tumbukan.

Contoh Soal 6.2

Sebuah mobil dengan massa 1500 kg, digunakan untuk menguji kekuatan bemper dengan cara menabrakkan mobil ke dinding. Kecepatan awal mobil tersebut adalah -15,0 m/s dan kecepatan akhir setelah ditabrakkan menjadi 2,6 m/s. Jika tumbukan memakan waktu selama 0,150 s, tentukan besarnya impuls pada saat tumbukan dan gaya rata-rata yang dikerjakan pada mobil!

Penyelesaian:
Diketahui:
m_{mobil} = 1250 kg
v = -12,0 m/s
v' = 1,5 m/s
Δt = 0,150 s
Ditanya:
a. Impuls *(I)*
b. Gaya rata-rata ($\bar{F}$)

Jawab:
a. Besarnya momentum awal:

$$p = mv = (1250\,\text{kg})(-12{,}0\,\text{m/s}) = -1{,}5\times10^{4}\,\text{kg.m/s}$$

besarnya momentum akhir:

$$p' = mv' = (1250\,\text{kg})(1{,}5\,\text{m/s}) = 0{,}19\times10^{4}\,\text{kgm/s}$$

Karena impuls I sama dengan perubahan momentum, maka:

$$I = \Delta p = p' - p = [0{,}19 - (-1{,}5)]\times10^{4}\,\text{kgm/s} = 1{,}69\times10^{4}\,\text{kgm/s}$$

b. Gaya rata-rata yang dikerjakan pada mobil adalah:

$$\bar{F} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1{,}69\times10^{4}\,\text{kgm/s}}{0{,}150\,\text{s}} = 1{,}13\times10^{5}\,\text{N}$$

C. Kekekalan Momentum Linier

Seperti energi, momentum dari sebuah benda atau sistem adalah suatu besaran yang kekal di bawah suatu kondisi tertentu. Kekekalan momentum adalah salah satu prinsip (hukum) fisika yang sangat penting dalam mempelajari peristiwa fisika, khususnya dalam mempelajari tumbukan, baik yang berskala atomik atau mobil yang bertabrakan.

Momentum linear dari sebuah partikel atau benda yang bergerak adalah kekal bila tidak ada pengaruh dari luar yaitu bila jumlah total semua gaya yang bekerja pada benda tersebut adalah nol. Menurut hukum II Newton, jika resultan gaya yang bekerja pada benda adalah nol:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = 0$$

maka:

$$\Delta \vec{p} = 0 = \vec{p} - \vec{p}_0 \Rightarrow \vec{p} = \vec{p}_0 \qquad (6.7)$$

Atau $m\vec{v}_0 = m\vec{v}$ dimana $\vec{p}_0$ adalah momentum awal dan $\vec{p}$ adalah momentum akhir. Karena $\vec{p}_0$ sama dengan $\vec{p}$ maka momentum benda selama geraknya adalah kekal.

Persamaan 6.7 konsisten dengan hukum I Newton, sebuah benda yang diam akan tetap diam $\vec{p} = 0$ atau akan bergerak lurus dengan kecepatan konstan, $\vec{p}$ = konstan, bila tidak ada gaya luar yang bekerja pada benda tersebut. Dengan kata lain: momentum linier total adalah kekal jika resultan gaya yang bekerja pada benda atau sistem adalah nol.

Contoh Soal 6.3

Dua buah benda masing-masing massa, m_1 = 0,5 kg dan m_2 = 1,0 kg dihubungkan dengan sebuah pegas yang ringan. Keadaan pegas yang termampatkan dapat dipertahankan dengan cara kedua balok dihubungkan dengan seutas tali yang ringan, lihat gambar 6.4. Kemudian tali diputus dengan cara dibakar (gaya eksternal diabaikan) sehingga menyebabkan benda bergerak pada pemukaan tanpa gesekan. Benda m_1 bergerak dengan kecepatan 1,8 m/s ke arah kiri. Berapa kecepatan m_2?

Penyelesaian:

Data yang bisa didapatkan dari soal yang diketahui adalah:

$m_1 = 0{,}5$ kg

$m_2 = 1{,}0$ kg

$v_1 = 1{,}8$ m/s (ke kiri)

Ditanya:

Kecepatan v_2 dan arahnya.

Jawab:

Karena massa pegas dan tali dinyatakan sangat ringan, maka kedua massa tersebut diabaikan.

Sistem hanya terdiri dari dua massa benda dan sebuah pegas. Karena gaya pegas hanya ada sebagai gaya internal, maka pada sistem tersebut berlaku kekekalan momentum. Sehingga berdasarkan hukum kekekalan momentum berlaku:

$$\vec{p} = \vec{p}' = 0 \text{ dan } \vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0$$

Pegas tidak diperhitungkan dalam sistem karena massanya diabaikan. Jadi:

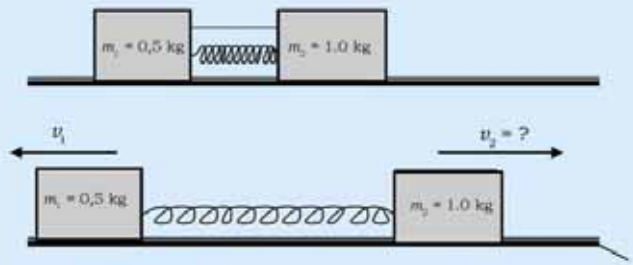
$$\vec{p}_2 = -\vec{p}_1$$

Yang berarti bahwa mometum benda m_1 sama dengan benda m_2 dengan arah yang berlawanan. Dengan menggunakan tanda arah (sumbu x positif arah kanan) memberikan,

$$\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = m_2\vec{v}_2 - m_1\vec{v}_1 = 0$$

$$\vec{v}_2 = \frac{m_1}{m_2}\vec{v}_1 = \frac{0{,}5\,\text{kg}}{1\,\text{kg}}1{,}8\,\text{m/s} = 0{,}90\,\text{m/s}$$

Jadi, kecepatan benda m_2 mempunyai arah ke kanan atau searah sumbu x positif.

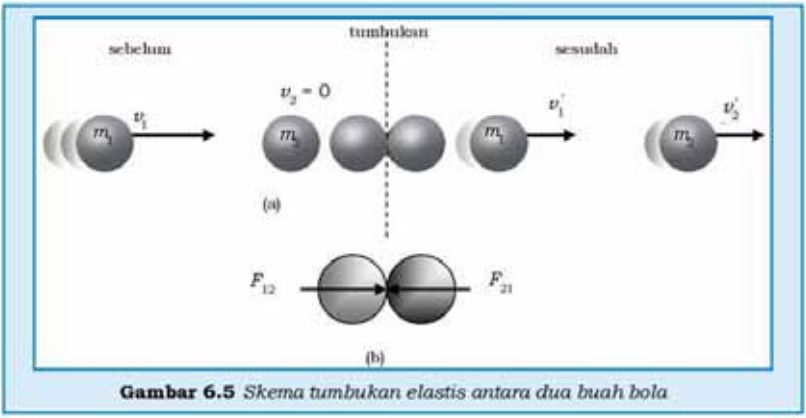


Gambar 6.4 *Gaya internal dan kekekalan momentum*

D. Hukum Kekekalan Momentum pada Tumbukan

Lihat pada gambar 6.5. Sebelum bertumbukan, partikel 1 bergerak dengan kecepatan $\vec{v}_1$ ke kanan dan menumbuk partikel 2 yang mula-mula dalam keadaan diam. Pada saat kedua bola bertumbukan, kedua bola bersentuhan dalam waktu Δt dan kedua bola saling mengerjakan gaya, $\vec{F}_{12}$ adalah gaya rata-rata yang dikerjakan partikel 1 terhadap partikel 2 dan $\vec{F}_{21}$ adalah gaya rata-rata yang dikerjakan oleh partikel 2 terhadap partikel 1. Menurut hukum III Newton, $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$ dan besarnya impuls dari gaya rata-rata tersebut adalah:

$$\vec{F}_{21}\,\Delta t = -\,\vec{F}_{12}\,\Delta t \qquad (6.8)$$



Gambar 6.5 *Skema tumbukan elastis antara dua buah bola*

Besarnya impuls pada suatu benda yang dikenai gaya impuls sama dengan perubahan momentum benda tersebut. Maka ruas kiri pada persamaan 6.8

$$\vec{F}_{21}\,\Delta t = \Delta \vec{p}_2 = (\vec{p}_1' - \vec{p}_2),$$

dan ruas kanan persamaan 6.8

$$\vec{F}_{12}\,\Delta t = \Delta \vec{p}_2 = (\vec{p}_1' - \vec{p}_1) \qquad (6.9)$$

$\vec{p_1} = m_1\vec{v_1}; \vec{p_1}$ adalah momentum partikel 1 sebelum tumbukan.

$\vec{p_2} = m_2\vec{v_2}; \vec{p_2}$ adalah momentum partikel 2 sebelum tumbukan.

$\vec{p_1} = m_1\vec{v_1}; \vec{p_1'}$ adalah momentum partikel 1 setelah tumbukan.
$\vec{p_2} = m_1\vec{v_2}; \vec{p_2'}$ adalah momentum partikel 2 setelah tumbukan.
Dalam kasus ini, $v_2 = 0$

Dengan memasukkan persamaan 6.9 ke dalam persamaan 6.8 diperoleh:

$$(\vec{p_1'} - \vec{p_1}) = -(\vec{p_2'} - \vec{p_2}) \Rightarrow \vec{p_2'} + \vec{p_1} = \vec{p_2} + \vec{p_1}$$

atau $$m_2\vec{v_2} + m_1\vec{v_1'} = m_2\vec{v_2} + m_1\vec{v_1} \quad (6.10)$$

Persamaan 6.10 menunjukkan jumlah total momentum kedua partikel sebelum dan sesudah tumbukan sama besar dan terkenal dengan hukum kekekalan momentum linier.

E. Tumbukan Elastis dan Tidak Elastis

Peristiwa tumbukan juga dapat dianalisa melalui hukum kekekalan energi. Dari diskusi kekekalan momentum pada tumbukan, kalian sudah memahami bahwa apa pun jenis tumbukannya selama tidak ada gaya luar yang dikerjakan pada sistem, jumlah total momentum sistem selalu kekal. Namun untuk energi kinetik sistem, tidak selalu bisa berlaku seperti pada momentum, karena energi kinetik bisa hilang dan diubah dalam bentuk panas atau diubah menjadi energi potensial elastik bila partikel-partikel bertumbukan. Jenis-jenis tumbukan dapat didefinisikan berdasarkan kondisi energi kinetik yang terkait dengan tumbukan, yaitu apakah energi kinetik tersebut konstan atau berkurang.

Pada tumbukan elastis, energi kinetik total sistem adalah kekal, artinya jumlah energi kinetik sebelum tumbukan, E_k, dan sesudah tumbukan, E_k', sama besar, yang dituliskan sebagai:

$$E_k' = E_k \quad (6.11)$$

Contoh tumbukan elastis adalah tumbukan antara bola billiard atau tumbukan antara molekul-molekul gas dengan dinding bejana.

Dalam tumbukan tidak elastis, energi kinetik total dari sistem yang bertumbukan tidak kekal. Contoh, tabrakan antara kedua mobil di mana kedua mobil mengalami suatu kerusakan atau peot.

Artinya bahwa kedua mobil tersebut setelah bertabrakan tidak kembali lagi ke bentuk semula atau setelah tumbukan ada panas yang dibebaskan. Dalam interaksi seperti ini, ada kerja dilakukan oleh gaya nonkonservatif seperti gaya gesek dan ada bagian energi kinetik yang hilang. Secara umum untuk tumbukan tidak elastis berlaku:

$$E_k' < E_k \qquad (6.12)$$

Bila sebuah sistem yang bertumbukan dan terisolasi dari pengaruh lingkungannya, baik tumbukan elastis maupun yang tidak elastis, maka pada peristiwa tumbukan tetap berlaku hukum kekekalan momentum. Untuk tumbukan tidak elastis, hanya sejumlah energi kinetik yang berhubungan dengan momentum akan hilang. Rasanya tidak masuk akal bila energi kinetik dapat hilang sedangkan momentum tetap kekal, tetapi peristiwa ini memberi makna tentang perbedaan antara besaran skalar dan vektor. Bila kedua benda setelah bertumbukan melekat (menempel) satu sama lain, yang berarti bahwa kecepatan benda setelah bertumbukan sama, maka tumbukan jenis ini disebut tumbukan tidak elastis secara sempurna atau tidak elastis sama sekali. Jadi, dua jenis tumbukan yang bersifat ekstrem ada dua jenis, yaitu tumbukan elastis sempurna dan tidak elastis sama sekali. Pada umumnya jenis tumbukan yang terjadi secara alami adalah tumbukan di antara kedua jenis yang ekstrem ini.

KISI



Gambar 6.6 *Impuls*

Foto ini diambil persis pada saat satu sisi bola golf dihantam sampai agak pipih oleh kepala tongkat golf. Gambar ini menunjukkan besarnya gaya yang dihasilkan oleh ayunan tongkat golf. Bola yang dipukul itu menjadi agak pipih dan tidak segera terbang, karena itu tongkat golf bersinggungan dengan bola lebih lama dan tenaga yang dipindahkan ke bola pun lebih besar. Tongkat itu jauh lebih berat daripada bolanya, dan karena jumlah momentumnya tetap, setelah benturan itu bola itu akan bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi daripada kecepatan ayunan tongkat sebelum terjadinya benturan.

Sumber: *Jendela Iptek 3*

F. Energi dan Momentum pada Tumbukan Elastis

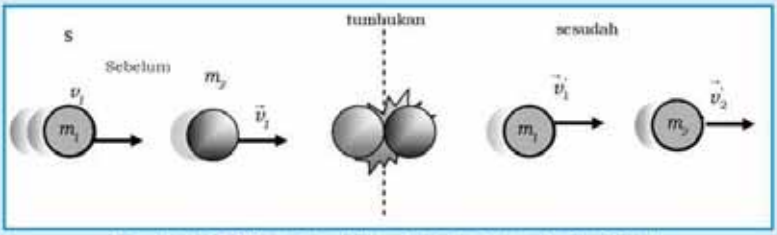
Pada tumbukan elastis berlaku hukum kekekalan energi dan momentum. Pada tumbukan elastis berlaku hukum kekekalan energi kinetik seperti yang ditunjukkan pada persamaan 6.11, yaitu:

$$\frac{1}{2}m_1\vec{v_1^2}+\frac{1}{2}m_2\vec{v_2^2}=\frac{1}{2}m_1\vec{v'^2_1}+\frac{1}{2}m_2\vec{v'^2_2} \qquad (6.13a)$$

dan juga hukum kekekalan momentum linier:

$$m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2=m_1\vec{v'}_1+m_2\vec{v'_2} \qquad (6.13b)$$

di mana m_1 dan m_2 adalah massa masing-masing benda yang bertumbukan, v_1 dan v_2 masing-masing adalah kecepatan benda 1 dan benda 2 sebelum tumbukan, v'_1 dan v'_2 masing-masing adalah kecepatan benda 1 dan benda 2 setelah tumbukan, lihat gambar 6.7. Anggaplah kedua benda setelah tumbukan bergerak ke arah kanan atau dalam arah positif.



Gambar 6.7 *Skema tumbukan elastis antara dua buah bola*

Persamaan 6.13a dapat ditulis kembali dalam bentuk:

$$m_1(\vec{v_1'^2}-\vec{v_1^2})=-m_2(\vec{v'^2_2}-\vec{v_2^2}) \qquad (6.13\ c)$$

dan persamaan6.13b dapat ditulis kembali sebagai,

$$m_1(\vec{v_1'}-\vec{v_1})=-m_2(\vec{v_2'}-\vec{v_2}) \qquad (6.13\ d)$$

Bila persamaan 6.13c dibagi dengan persamaan 6.13d maka diperoleh,

$$\frac{m_1(\vec{v_1'^2}-\vec{v_1^2})=-m_2(\vec{v_2'^2}-\vec{v_2^2})}{m_1(\vec{v'_1}-\vec{v_1})=-m_2(\vec{v_2'}-\vec{v_2})}\Rightarrow(\vec{v_1}+\vec{v_1})=(\vec{v'}_2+\vec{v_2}) \qquad (6.14\ a)$$

atau $$-\frac{\vec{v'_2}-\vec{v'_1}}{\vec{v_2}-\vec{v_1}}=1 \qquad (6.14\ b)$$

Harga ruas kiri pada persamaan 6.14b sama dengan nol bila setelah tumbukan kedua partikel menempel satu sama lain, yaitu partikel bergerak bersama-sama setelah tumbukan, $\vec{v'_2}=\vec{v'_1}$. Jadi

harga perbandingan kecepatan relatif antara kedua partikel sebelum dan sesudah tumbukan adalah satu dan nol. Dari dua keadaan ekstrem tersebut dapat disimpulkan bahwa harga rasio tersebut pada umumnya terletak antara nol dan satu, dan harga rasio tersebut terkenal dengan istilah koefisien restitusi, e, yaitu:

$$-\frac{\vec{v}_2' - \vec{v}_1'}{\vec{v}_2 - \vec{v}_1} = e \qquad (6.15)$$

Jadi, secara umum harga e dapat dituliskan sebagai $0 \leq e \leq 1$. Untuk tumbukan elastis maka $e = 1$, tumbukan tidak elastis sama sekali, maka $e = 0$, dan untuk tumbukan elastis sebagian maka harga e adalah bilangan pecahan positif antara 0 dan 1.
Dengan mensubtitusikan persamaan 6.14a ke dalam persamaan 6.13d diperoleh:

$$\vec{v}_1' = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)}\vec{v}_1 + \left(\frac{2m_2}{m_1 + m_2}\right)\vec{v}_2 \qquad (6.16\ a)$$

dan

$$\vec{v}_2' = \frac{(2m_1)}{(m_1 + m_2)}\vec{v}_1 + \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}\vec{v}_2 \qquad (6.16\ b)$$

Persamaan 6.16a dan b adalah kecepatan akhir dari kedua benda setelah mengalami tumbukan elastis sebagai fungsi kecepatan awal kedua partikel sebelum tumbukan.

Jika $m_1 = m_2$ maka dari persamaan 6.16a dan 6.16b diperoleh $\vec{v}_1' = \vec{v}_2$ dan $\vec{v}_2' = \vec{v}_1$. Dengan kata lain, bahwa jika benda yang bertumbukan mempunyai massa yang sama, maka hanya terjadi pertukaran momentum dan energi kinetik. Bila salah satu benda mula-mula diam, maka benda yang menumbuk langsung berhenti dan benda yang semula diam setelah ditumbuk bergerak dengan kecepatan sama dengan kecepatan benda yang datang menumbuknya.

1. Jika benda $m_1 >> m_2$ (artinya bahwa m_1 mempunyai massa sangat besar dibanding dengan m_2) maka $\vec{v}_1' \approx \vec{v}_1$ dan $\vec{v}_2' \approx 2\vec{v}_1 - \vec{v}_2$
   Artinya, bahwa jika benda m_1 sangat besar dibandingkan benda m_2 maka massa benda m_2 diabaikan sehingga kecepatan akhir benda m_1 hampir mendekati kecepatan semula sebelum tumbukan. Sebaliknya, untuk kecepatan benda m_2 yang dianggap kecil mempunyai kecepatan akhir dua kali kecepatan benda m_1 sebelum tumbukan dikurangi kecepatannya sendiri sebelum tumbukan.

b. Jika $m_1 << m_2$, maka $\vec{v}_1' = -\vec{v}_1 + 2v_2$ dan $\vec{v}_2' = \vec{v}_2$

Artinya, bahwa jika massa benda m_1 sangat kecil dibandingkan dengan massa benda m_2 maka m_1 bisa diabaikan terhadap m_2, sehingga menghasilkan kecepatan akhir benda m_1 setelah tumbukan sama dengan kecepatan semula sebelum tumbukan ditambah dengan 2 kali kecepatan benda 1. Kecepatan akhir benda m_2 sama dengan kecepatannya sendiri sebelum tumbukan.

Contoh Soal 6.4

Sebuah bola bermassa 0,25 kg bergerak dengan kecepatan 2,0 m/s dalam arah sumbu x positif menumbuk bola yang bermassa 0,70 kg yang mula-mula diam di $x = 0$ secara elastis. Berapa jarak pisah antara kedua bola dalam waktu 2,0 s setelah tumbukan?

Penyelesaian:

Berdasarkan data dari contoh soal 6.4.

Diketahui:

$m_1 = 0{,}25$ kg
$m_2 = 0{,}70$ kg
$v_1 = 2{,}0$ m/s
$t = 2{,}0$ s

Ditanya:

Jarak pisah antara kedua bola setelah tumbukan (Δx)?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 6.16 a dan 6.16 b, di mana $v_2 = 0$

$$\vec{v}_1' = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} v_1 = \frac{0{,}25\text{ kg} - 0{,}70\text{ kg}}{0{,}25\text{kg} + 0{,}70\text{kg}} (2{,}0\text{m/s}) = -0{,}95\text{m/s}$$

$$v_2' = \frac{(2m_1)}{(m_1 + m_2)} v_1 = \frac{2(0{,}25\text{kg})}{0{,}25\text{kg} + 0{,}70\text{kg}} (2{,}0\text{m/s}) = 1{,}05\text{ m/s}$$

$$x_1 = v_1 t = (-0{,}95\text{m/s})(2{,}0\text{s}) = -1{,}90\text{m}$$

$$x_2 = v_2 t = (1{,}05\text{m/s})(2{,}0\text{s}) = 2{,}10\text{m}$$

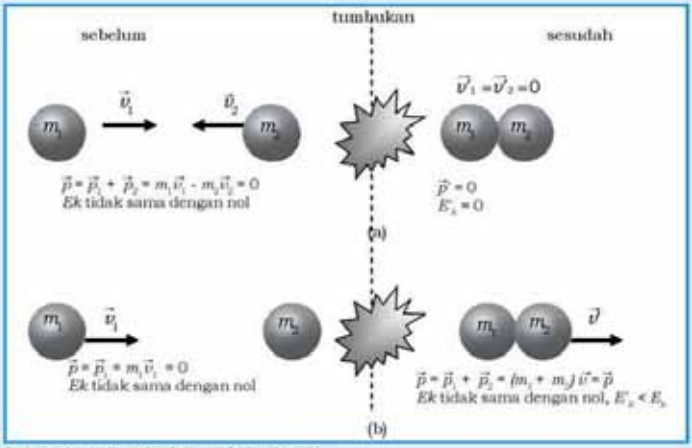
Jadi,

$\Delta x = x_2 - x_1 = (2{,}1\text{m}) - (-1{,}90\text{m}) = 4\text{m}$ (kedua bola terpisah sekitar 4 m setelah 2 sekon bertumbukan).

G. Energi dan Momentum pada Tumbukan Tidak Elastis

Perhatikan gambar 6.8, dua buah benda yang saling bertumbukan. Dalam keadaan pertama dua benda yang bertumbukan mempunyai massa yang sama ($m_1 = m_2$) saling mendekati satu sama lainnya dengan arah kecepatan yang berlawanan $v_1 = -v_2$. Oleh karena itu secara vektor, momentum total sebelum tumbukan adalah nol tetapi secara skalar energi kinetiknya tidak sama dengan nol.

Setelah tumbukan, kedua benda menyatu dan kecepatannya menjadi nol, sehingga momentum totalnya tetap yaitu sama dengan nol. Momentum tetap kekal karena gaya dari tumbukan adalah gaya internal dari sistem kedua benda, maka tidak menghasilkan resultan gaya luar pada sistem. Energi kinetik total sistem menjadi lebih kecil atau mengarah pada nilai nol. Dalam keadaan ini energi kinetik berkurang akibat digunakan untuk melakukan kerja secara permanen untuk mengubah bentuk benda (deformasi) karena kedua benda menyatu, sehingga energi kinetiknya telah hilang akibat adanya gaya gesek pada saat menyatu dan menghasilkan panas. Energi panas hilang karena saat tumbukan telah menghasilkan bunyi.



Gambar 6.8(a) *Tumbukan tidak elastis*

Gambar 6.8(b) *Menunjukkan benda (m_2) sebelum tumbukan mempunyai kecepatan nol (diam) dan benda m_1 bergerak menumbuk benda m_2 dengan kecepatan $\vec{v}_1$. Setelah tumbukan kedua benda tersebut menyatu dengan kecepatan akhir $\vec{v}_1$.*

Keadaan seperti ini disebut tumbukan tidak elastis sama sekali (tumbukan tidak lenting sama sekali). Jika kedua benda mempunyai massa yang berbeda, maka kedua benda sebelum dan setelah tumbukan adalah:

$$m_1\vec{v}_1 = (m_1 + m_2)\vec{v}'$$

dan

$$\vec{v}' = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\vec{v}_1 \qquad (6.17)$$

Persaman 6.17 berlaku untuk tumbukan tidak elastis dan benda m_2 mula-mula adalah diam. Jadi, kecepatan kedua benda yang menyatu setelah tumbukan lebih kecil daripada kecepatan benda m_1, dikarenakan faktor $\frac{m_1}{m_1 + m_2}$ yang lebih kecil dari satu. Berapa energi kinetik yang hilang setelah tumbukan? Energi kinetik mula-mula adalah $E_k = \frac{1}{2}m_1\vec{v_1^2}$ dan energi kinetik setelah tumbukan, $E_k' = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\vec{v'^2}$. Substitusikan nilai v' dari persamaan 6.17 maka didapatkan persamaan, $E_k' = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\left(\frac{m_1\vec{v}_1}{m_1 + m_2}\right)^2$. Dengan penyederhanaan secara aljabar biasa, maka kalian dapat menghasilkan bentuk persamaan:

$$\frac{E_k'}{E_k} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \qquad (6.18)$$

Persamaan 6.18 menunjukkan bahwa energi kinetik setelah tumbukan lebih kecil daripada energi kinetik sebelum tumbukan.

Contoh Soal 6.5

Sebuah bola bermassa 1,0 kg bergerak dengan kecepatan 4,0 m/s menumbuk bola diam yang bermassa 2,0 kg. Jika tumbukan tidak elastis sempurna,

a. Berapa kelajuan kedua bola setelah tumbukan?
b. Berapa persen perbandingan energi kinetik akhir terhadap energi kinetik awal setelah tumbukan?
c. Berapa momentum total setelah tumbukan?

Penyelesaian:

Data yang didapat dari soal adalah,

Diketahui:

m_1 = 1,5 kg
m_2 = 2,5 kg
v = 4,0 m/s

Ditanya:

a. Berapa kecepatan kedua bola setelah tumbukan ($\vec{v_1'}$ dan $\vec{v_2'}$)?
b. Berapa persen perbandingan energi kinetik akhir terhadap energi kinetik awal?
c. Total momentum setelah tumbukan (p)?

Jawab:

a. Karena bola menyatu setelah tumbukan, maka kedua bola mempunyai kecepatan sama.

$$\vec{v'} = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\vec{v_1} = \frac{1{,}5\,\text{kg}}{1{,}5\,\text{kg} + 2{,}5\,\text{kg}} 4{,}0\,\text{m/s} = 1{,}5\,\text{m/s}$$

b. $$\frac{E'_k}{E_k} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{1{,}5\,\text{kg}}{(1{,}5 + 2{,}5)\,\text{kg}} \times 100\% = 37{,}5\%$$

(ini hanya berlaku untuk tumbukan tidak elastis sama sekali)
Secara eksplisit bisa kita hitung dengan:

$$\frac{E'_k}{E_k} = \frac{(1/2)(m_1 + m_2)\overrightarrow{v'^2}}{(1/2)m_1\overrightarrow{v^2}} =$$

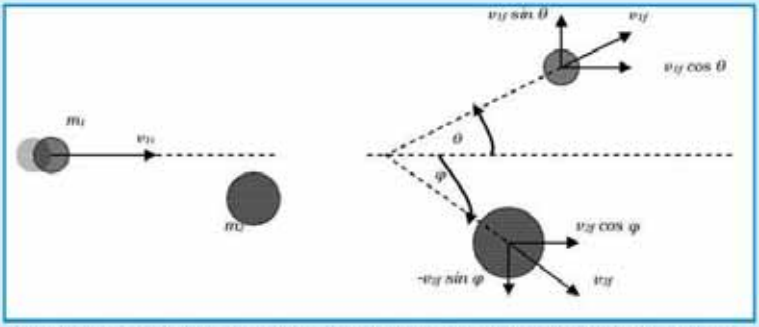
$$\frac{(1/2)(1{,}5\,\text{kg} + 2{,}5\,\text{kg})(1{,}5\,\text{m/s})^2}{(1/2)(1{,}5\,\text{kg})(4\,\text{m/s})^2} \times 100\% = 37{,}5\%$$

d. Selama tidak ada gaya eksternal, hukum kekekalan momentum tetap berlaku, sehingga momentum total sesudah tumbukan sama dengan momentum total sebelum tumbukan, $\vec{p}_1 = m_1\vec{v}$ = (1,5 kg)(4,0 m/s) = 6,0 kg.m/s dan dalam arah yang sama.

H. Tumbukan dalam Dua Dimensi

Hukum kekekalan momentum berlaku untuk tumbukan antara dua partikel yang terisolasi, baik tumbukan yang bersifat elastik maupun yang tidak elastik. Pada umumnya partikel bergerak tidak hanya pada satu dimensi tetapi dua atau tiga dimensi. Bila dua

partikel yang bergerak dalam tiga dimensi dan bertumbukan, maka hukum kekekalan momentum berlaku untuk masing-masing komponen momentum pada arah sumbu x, y, dan z. Sistem tumbukan yang sederhana: partikel yang bertumbukan dalam keadaan diam, misalnya partikel 1, massa m_1 dan bergerak mendatar ke kanan dengan kecepatan $\vec{v}_1$ menumbuk partikel 2, massa m_2 yang mula-mula dalam keadaan diam. Tumbukan antara dua partikel bukanlah tumbukan sentral, melainkan tumbukan yang menyinggung seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.9



Gambar 6.9 *Tumbukan dalam dua dimensi antara dua buah bola secara bersinggungan sehingga gerak dua buah bola setelah bertumbukan tidak segaris.*

Dengan menggunakan hukum kekekalan momentum, masing-masing untuk arah sumbu x dan y diberikan sebagai:

$$\begin{aligned} m_1\vec{v_{1i}} &= m_1 v_{1f}\cos\theta + m_2 v_{2f}\cos\varphi \\ 0 &= m_1 v_{1f}\sin\theta - m_2 v_{2f}\sin\varphi \end{aligned} \qquad (6.19)$$

Bila tumbukan antara dua partikel tersebut bersifat elastis maka pada tumbukan tersebut juga berlaku hukum kekekalan energi kinetik yaitu:

$$\frac{1}{2}m_1\vec{v_{1i}^2} = \frac{1}{2}m_1\vec{v_1^2}_f + \frac{1}{2}m_2\vec{v_{2f}^2} \qquad (6.20)$$

Bila pada persamaan 6.19 dan 6.20 masing-masing massa yang bertumbukan sudah diketahui dan kecepatan awal partikel 1 sebelum tumbukan sudah diketahui, maka salah satu dari kecepatan masing-masing partikel setelah tumbukan dan sudut simpangannya harus diketahui agar ketiga variabel lain dapat ditentukan. Dengan mengkuadratkan persamaan 6.19 diperoleh:

$$m_1^2\vec{v_{1i}^2} - 2m_1m_1\vec{v_{1i}}\vec{v_{1f}}\cos\theta + m_1^2\vec{v_{1f}^2} = m_2^2\vec{v_{2f}^2} \qquad (6.21)$$

Dari persamaan 6.20 dan 6.21 diperoleh:

$$-2m_1m_1\overrightarrow{v_{1i}v_{1f}}\cos\theta + m_1^2\overrightarrow{v_{1f}^2} = -m_1^2\overrightarrow{v_{1f}^2} \text{ atau } \cos\theta = \frac{v_{1f}}{v_{1i}} \quad (6.22)$$

Persamaan 6.22 menunjukkan bahwa bila kecepatan awal partikel 1 sebelum tumbukan diketahui, maka besaran-besaran setelah tumbukan dapat ditentukan. Dengan jalan yang sama dari persamaan 6.20 dan 6.21 juga diperoleh persamaan:

$$\cos\varphi = \frac{m_2}{m_1}\frac{v_{2f}}{v_{1i}} \text{ dan } \cos(\theta+\varphi) = 0 \quad (6.23)$$

Contoh Soal 6.6

Dalam pertandingan billiard, pemain ingin memasukkan bola ke dalam lubang di sudut meja. Bila posisi lubang sudut membentuk sudut 37° terhadap garis kerja vektor kecepatan bola penumbuk sebelum menumbuk bola yang masuk ke lubang, berapakah sudut simpangan dari bola penumbuk setelah bertumbukan terhadap garis kerja vektor kecepatan awalnya? Abaikan gesekan dan gerak rotasi kedua bola!

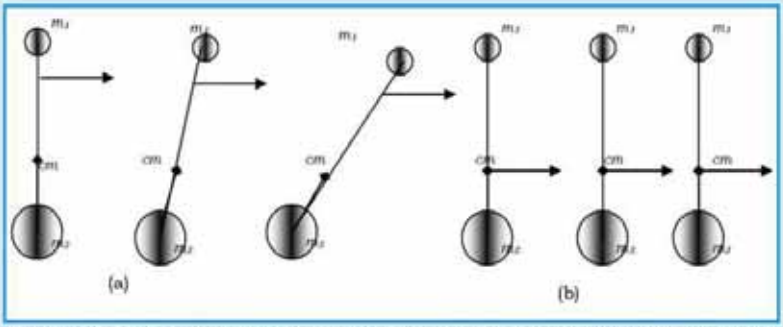
Penyelesaian:
Dari soal di atas hanya ditanyakan sudut simpangan bola ke 1 yang menumbuk bola ke 2 yang sudah diketahui sudut simpangannya yaitu $\varphi = 37°$, maka dengan menggunakan persamaan6.23 $\cos(\theta+\varphi) = 0$ maka $\cos(37°+\theta) = \cos 90°$ atau $\theta = 53°$

I. Pusat Massa

Sistem mekanika dapat terdiri dari beberapa partikel atau sekumpulan molekul yang mengisi suatu bejana, atau benda berukuran besar (bukan titik massa) seperti alat pemukul bola. Bila suatu sistem mekanik bergerak, maka seolah-olah semua massanya terkonsentrasi pada pusat massa sistem tersebut. Bila jumlah total gaya yang bekerja pada sistem mekanika yang jumlah total massanya M adalah $\vec{F}$ maka titik pusat massa sistem mekanika

tersebut bergerak dengan percepatan $\vec{a} = \vec{F}/M$ karena seolah-olah resultan gaya luar dikerjakan pada sebuah partikel yang massanya M yang terletak di pusat massa sistem mekanika tersebut.

Marilah kita tinjau sebuah sistem mekanika yang terdiri dari dua buah partikel yang dihubungkan oleh sepotong batang ringan yang kuat, lihat gambar 6.10! Titik pusat massa kedua partikel tersebut terletak pada garis hubung kedua partikel, di antara kedua partikel tetapi lebih dekat dengan partikel yang massanya lebih besar.



Gambar 6.10 *Dua buah massa yang berbeda dihubungkan dengan batang ringan yang kuat. (a) sistem benda berotasi karena dikenai gaya pada titik yang terletak diantaranya tetapi dekat ke massa yang lebih kecil. (b) Sistem benda bergerak translasi searah dengan arah gaya bila gaya dikenakan pada pusat massa benda*

Seperti ditunjukkan pada gambar 6.10a, bila sebuah gaya tunggal, $\vec{F}$, dikenakan pada sebuah titik yang terletak pada batang penghubung dan posisinya dekat dengan massa yang kecil, maka sistem benda berotasi searah dengan arah jarum jam. Tetapi bila gaya $\vec{F}$ dikerjakan pada sistem benda di titik pusat massanya, maka sistem benda akan bergerak linier searah dengan arah gaya yang dikerjakan padanya. Dengan demikian untuk mengidentifikasi lokasi pusat massa suatu benda, maka kita perlu memberikan gaya pada benda sedemikian hingga benda hanya bergerak linier dan titik di mana gaya dikenakan merupakan titik pusat massa benda.

Posisi pusat massa suatu sistem benda juga dapat dideskripsikan sebagai bobot rerata posisi dari masing-masing massa dalam sistem. Misalkan dua buah partikel yang masing-masing massanya m_1 dan m_2 dan terletak pada sumbu x dengan vektor posisi $\vec{x}_1$ dan $\vec{x}_2$, maka koordinat pusat massa kedua partikel tersebut adalah:

$$x_{cm} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \qquad (6.24)$$

Koordinat pusat massa pada persamaan 6.24 dapat diperluas untuk menentukan koordinat pusat massa sistem banyak partikel dalam ruang tiga dimensi, yaitu

$$x_{cm} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \ldots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \ldots + m_n} = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i} \qquad (6.25)$$

di mana x_i adalah koordinat x untuk partikel yang ke i dan $\sum_i m_i = M$ adalah jumlah massa total dari n partikel dalam sistem. Dengan menggunakan definisi yang sama, maka koordinat pusat massa untuk komponen y dan z masing-masing adalah:

$$y_{cm} = \frac{\sum_i m_i y_i}{\sum_i m_i} = \frac{\sum_i m_i y_i}{M} \text{ dan } z_{cm} = \frac{\sum_i m_i z_i}{\sum_i m_i} = \frac{\sum_i m_i z_i}{M} \qquad (6.26)$$

Vektor posisi pusat massa sistem partikel, $\vec{r}_{cm}$, dapat dinyatakan sebagai:

$$\vec{r}_{cm} = \vec{i}x_{cm} + \vec{j}y_{cm} + \vec{k}z_{cm}$$

dan vektor posisi untuk partikel ke i adalah:

$$\vec{r}_i = \vec{i}x_i + \vec{j}y_i + \vec{k}z_i$$

Untuk benda-benda yang tidak dianggap sebagai titik massa, pusat massa benda dapat ditentukan dengan membagi benda menjadi bagian-bagian yang kecil-kecil yang pusat massa masing-masing bagian sudah diketahui, misalnya benda yang berbentuk kubus dengan bidang sisi kubus yang tipis dan homogen, maka pusat massa kubus dapat ditentukan berdasarkan pusat massa dari setiap bidang sisi kubus, lihat gambar 6.11. Bila kubus tipis tersebut mempunyai rusuk a, maka dari gambar 6.11 dapat diketahui koordinat pusat massa dari masing-masing bidang sisi sebagai: $C_1(\frac{1}{2}a, 0, \frac{1}{2}a)$, $C_2(\frac{1}{2}a, a, \frac{1}{2}a)$, $C_3(\frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a, 0)$, $C_4(\frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a, a)$, $C_5(0, \frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a)$, $C_6(a, \frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a)$.

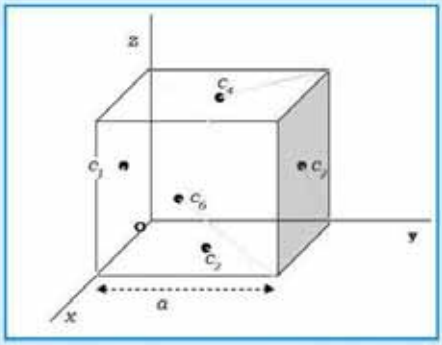
Kemudian massa dari setiap bidang sisi kubus sama besar yaitu m, maka koordinat pusat massa kubus tersebut adalah:

$$x_{cm} = \frac{m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + ma}{m+m+m+m+m+m} = \frac{3ma}{6m} = \frac{1}{2}a$$

$$y_{cm} = \frac{m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + ma}{m+m+m+m+m+m} = \frac{3ma}{6m} = \frac{1}{2}a$$

$$z_{cm} = \frac{m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + m\,\frac{1}{2}a + ma}{m+m+m+m+m+m} = \frac{3ma}{6m} = \frac{1}{2}a$$

Jadi koordinat pusat massa kubus tipis di atas adalah CM $(\frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a)$



Gambar 6.11 *Pusat massa pada bidang kubus*

Pada umumnya pusat massa benda yang bentuknya teratur dan homogen terletak di tengah-tengah benda. Untuk benda yang bersifat kontinu, yaitu yang tidak bisa dibagi secara terpisah seperti pada contoh kubus tipis di atas, biasanya pusat massa benda ditentukan dengan menggunakan integral, yang mungkin sudah kalian pelajari dalam matematika. Namun karena agak kompleks, penentuan pusat massa dengan menggunakan integral tidak kita diskusikan.

J. Gerak Sistem Partikel

Misalkan sebuah sistem partikel yang terdiri dari n partikel dengan jumlah total massanya M bergerak, maka kecepatan pusat massanya adalah:

$$\vec{v}_{cm} = \frac{d\vec{r}_{cm}}{dt} = \frac{1}{M}\sum m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}$$

atau

$$\vec{v}_{cm} = \frac{1}{M}\sum m_i \vec{v}_i \qquad (6.27)$$

di mana $\vec{v}_i$ adalah kecepatan partikel yang ke i. Dari persamaan 6.27 dapat diperoleh momentum total dari sistem partikel sebagai:

$$M\vec{v}_{cm} = \sum m_i \vec{v}_i = \sum \vec{p}_i = \vec{p}_{total} \qquad (6.28)$$

Persamaan 6.28 menunjukkan bahwa momentum linier total dari sistem partikel sama dengan massa total sistem partikel dikalikan dengan kecepatan pusat massa. Momentum linier total sistem partikel dapat dipandang sebagai momentum linier partikel tunggal dengan massa M dan bergerak dengan kecepatan $\vec{v}_{cm}$.

Sedangkan percepatan pusat massa dapat ditentukan dengan mendifferensialkan persamaan 6.27 sebagai:

$$\vec{a}_{cm} = \frac{d\vec{v}_{cm}}{dt} = \frac{1}{M}\sum m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \frac{1}{M}\sum m_i \vec{a}_i \qquad (6.29)$$

Dari persamaan 6.29 dan dengan menggunakan hukum ke II Newton diperoleh:

$$M\vec{a}_{cm} = \sum m_i \vec{a}_i = \sum \vec{F}_i \qquad (6.30)$$

di mana F_i adalah gaya yang dialami pada partikel yang ke i.

Dalam sistem partikel, setiap partikel dapat mengalami dua macam gaya, yaitu gaya luar yang dikerjakan pada partikel dan gaya internal, yaitu gaya interaksi antara partikel tersebut dengan partikel-partikel lain dalam sistem. Menurut hukum II Newton, gaya yang dikerjakan oleh partikel 2 pada partikel 1 sama besar dengan gaya yang dikerjakan pada partikel 2 oleh partikel 1 tetapi arahnya berlawanan. Maka jumlah total gaya internal pada semua partikel pada persamaan 6.30 adalah nol karena masing-masing

pasangan gaya interaksi untuk sepasang partikel saling meniadakan. Jadi gaya yang total yang bekerja pada sistem partikel pada persamaan 6.30 hanyalah gaya luar saja, dan persamaan 6.30 dapat ditulis kembali menjadi:

$$\Sigma \vec{F}_{luar} = M\vec{a}_{cm} = \frac{d\vec{p}_{total}}{dt} \qquad (6.31)$$

di mana $\frac{d\vec{p}_{total}}{dt}$ adalah perubahan pada momentum total dari sistem yang disebabkan oleh gaya luar $\Sigma \vec{F}_{luar}$ diberikan pada sistem. Jadi, gaya luar total yang bekerja pada sistem partikel sama dengan hasil kali antara massa total sistem dengan percepatan pusat massa sistem. Bila tidak ada gaya luar yang dikerjakan pada sistem partikel, maka titik pusat massa dari sistem partikel akan bergerak lurus dengan kecepatan konstan atau sistem dalam keadaan setimbang dan momentum total dari sistem partikel konstan. Jadi, untuk sistem partikel yang terisolasi maka kecepatan titik pusat massa dan momentum totalnya bersifat konstan.

Contoh Soal 6.7

Sebuah sistem terdiri dari sebuah partikel 1, bermassa 2 kg, bergerak dengan kecepatan $\vec{v}_1 = (2\vec{i} - 3\vec{j})$m/s dan sebuah partikel 2, bermassa 3 kg, bergerak dengan kecepatan $\vec{v}_2 = (\vec{i} + 6\vec{j})$m/s. Tentukan kecepatan pusat massa dan momentum linier total dari sistem dua partikel tersebut!

Penyelesaian:
Dari soal di atas diketahui:
$m_1 = 2$ kg, $m_2 = 3$ kg, $\vec{v}_1 = (2\vec{i} - 3\vec{j})$m/s dan $\vec{v}_2 = (\vec{i} + 6\vec{j})$m/s

Ditanyakan: $\vec{v}_{cm}$ dan $\vec{p}_{total}$?

Jawab :
Kecepatan pusat massa sistem dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 5.24, yaitu:

$$\vec{v}_{cm} = \frac{1}{M}\Sigma m_i \vec{v}_i = \frac{1}{(2+3)\text{kg}}\Sigma\{2(2\vec{i} - 3\vec{j})\text{kg.m/s}) + 3(\vec{i} + 6\vec{j})\text{kg.m/s}\}$$

$$= \frac{(7\vec{i} + 12\vec{j})\text{ kg.m/s}}{6\text{ kg}} = (\frac{7}{6}\vec{i} + 2\vec{j})\text{ m/s}$$

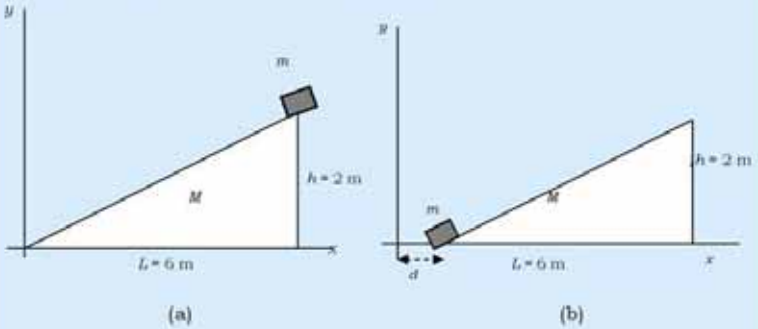
dan besarnya momentum linier total dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 6.31 sebagai $\vec{p}_{total} = \sum m_i v_i =$ $\sum \{2(2\vec{i} - 3\vec{j})\text{kg.m/s}) + 3(\vec{i} + 6\vec{j})\text{kg.m/s}\} = (7\vec{i} + 12\vec{j})\text{kg.m/s}$.

Contoh Soal 6.8

Sebuah balok kecil yang massanya 2 kg diletakkan pada puncak bidang miring yang massanya M = 8 kg yang tingginya 2 m dan panjang alasnya 6 m, lihat gambar! Bila balok dilepaskan dari keadaan diam dan semua permukaan sistem benda licin, berapa jauh bidang miring akan terdorong mendatar bila balok meluncur ke bawah sepanjang bidang miring?

Penyelesaian:

Sistem partikel terdiri dari balok dan bidang miring. Bidang miringnya homogen dan ketebalannya tipis, maka pusat massa bidang miring dapat didekati sebagai titik berat segitiga siku-siku yang sisi-sisinya 2 m dan 6 m



Gambar 6.12 *(a) Sebelum balok meluncur pada bidang miring, (b) Setelah balok meluncur pada bidang miring, bidang miring bergerak kekanan sejauh d, tentukan d dengan menggunakan teori sistem partikel dan pusat massa!*

Karena gaya luar yang bekerja pada sistem hanyalah gaya gravitasi dan hanya berpengaruh pada balok m karena bidang miring M dipertahankan oleh lantai untuk tidak bergerak arah vertikal. Maka perubahan momentum hanya terjadi pada arah vertikal dan hanya dialami oleh balok m. Momentum linier sistem balok dan bidang miring arah mendatar selalu konstan.

Karena balok bergerak dari keadaan diam dan bidang miring mula-mula juga diam, maka momentum total arah mendatar selalu nol, dan momentum sistem pada saat balok mencapai dasar bidang miring dapat dituliskan sebagai:

$$m\vec{v}_x + M\vec{v} = 0 \qquad (1)$$

di mana $\vec{v}_x$ adalah kecepatan balok m arah mendatar (ke kiri) dan v adalah kecepatan bidang miring arah ke kanan. Pada saat balok m di puncak bidang miring dan di dasar bidang miring tunduk pada hukum kekekalan energi mekanik, yaitu

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Mv^2 \qquad (2)$$

di mana $\vec{v}$ adalah kecepatan balok di dasar bidang miring,

$$v_x = \vec{v}\ (6/\sqrt{40}), \text{ dan } v_y = \vec{v}\ (2/\sqrt{40}) \qquad (3)$$

Bila persamaan 1 dan 3 dimasukkan ke persamaan 2 diperoleh,

$$2.10.2 = \frac{1}{2}.2.v^2 + \frac{1}{2}.8.(\frac{6}{4\sqrt{40}}v)^2 \text{ atau } 40 = \frac{49}{40}.v^2$$

yang memberikan harga $v = 40/7$ m/s.

Misal balok memerlukan waktu selama t untuk mencapai dasar bidang miring, maka jarak mendatar (arah ke kiri) yang ditempuh balok selama t adalah $(6\text{-}d)$ m dan bidang miring menempuh jarak d m ke kanan. Karena tidak ada gaya arah mendatar yang bekerja pada sistem maka kelajuan rata-rata arah mendatar untuk balok adalah $v_x/2$ dan $v/2$ untuk bidang miring, dan $(6\text{-}d)$ m = $(v_x/2 \times t)$ m dan dm = $(v/2 \times t)$ m,

sehingga diperoleh hubungan $\frac{6-d}{v_x} = \frac{d}{v}$ atau

$(6-d) = \frac{v_x}{v}d = 4d$, jadi d = 1,2 m

Rangkuman

1. Momentum benda yang bermassa m dan bergerak dengan kecepatan $\vec{v}$ dirumuskan: $\vec{p} = m.\vec{v}$
2. Hubungan gaya dengan momentum dinyatakan dalam persamaan: $\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$
3. Besarnya Impuls gaya dinyatakan dengan persamaan:

$\vec{I} = \vec{F} . \Delta t = \Delta \vec{p} = m(\vec{v} - \vec{v}_0)$

4. Hubungan energi kinetik dengan momentum benda bermassa m dan bergerak dengan kecepatan v dinyatakan:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}$$

5. Pada benda yang bertumbukan, berlaku hukum kekekalan momentum.
6. Macam tumbukan:
   a. tumbukan elastis
   b. tumbukan elastis sebagian
   c. tumbukan tidak elastis sama sekali
7. Besarnya koefisien restitusi dinyatakan:

$$e = -\frac{\vec{v_2'} - \vec{v_2'}}{\vec{v_1'} - \vec{v_1}}$$

Uji Kompetensi

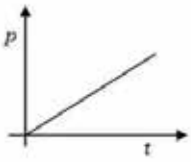
A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

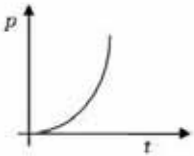
1. Salah satu gerbong kereta berjalan lambat di tengah kota terbuka. Pada saat itu turun hujan lokal yang tidak begitu deras. Air hujan yang jatuh di gerbong terbuka cukup banyak dan air hujan jatuh tegak lurus pada lantai gerbong, maka . . . .
   a. momentum gerbong yang terbuka bertambah karena memperoleh gaya tekan dari air hujan
   b. momentum gerbong yang terbuka tetap karena air hujan tegak lurus pada arah kecepatan gerbong sehingga gerbong tidak mengalami gaya yang searah dengan arah geraknya
   c. kecepatan gerbong tetap karena tidak ada gaya pada gerbong yang searah dengan arah gerak gerbong
   d. kecepatan gerbong bertambah karena massa gerbong bertambah
   e. semua pernyataan di atas tidak benar
2. Pada lantai sebuah truk yang mengangkut pasir terdapat

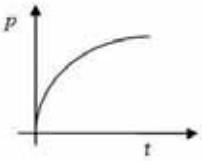
lubang kecil di tengah-tengahnya. Sopir truk tidak mengetahui lubang tersebut sehingga pada saat truk berjalan pasir berjatuhan, maka . . . .

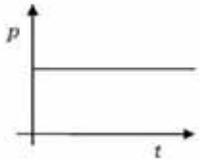
a. kecepatan truk tidak berubah karena pasir yang jatuh tidak mengerjakan gaya pada truk
b. kecepatan truk bertambah karena massa truk berkurang
c. momentum truk tetap karena pasir yang jatuh tidak mengerjakan gaya pada truk
d. momentum truk bertambah karena kecepatan truk bertambah
e. kecepatan truk berkurang karena massa truk berkurang

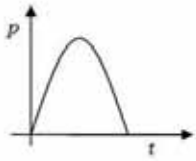
3. Momentum sebuah benda yang bergerak dengan percepatan konstan sebagai fungsi waktu disajikan pada gambar . . . .

a.


b.


c.


d.


e.


4. Sebuah bola yang jatuh ke bawah, harga momentumnya

selalu bertambah dan pertambahan momentum per satuan waktu tidak lain adalah sama dengan berat benda itu sendiri, maka . . . .

a. pada benda yang jatuh tersebut tidak tunduk pada hukum kekekalan momentum karena bekerja gaya luar yaitu gaya gravitasi
b. pada benda yang jatuh tersebut tunduk pada hukum kekekalan momentum karena perubahan momentumnya sama dengan gaya berat
c. sistem bola-bumi tunduk pada hukum kekekalan momentum bila momentum bola yang jatuh ke bumi bertambah maka momentum bumi yang bergerak super lambat berkurang yang besarnya sama dengan pertambahan momentum bola
d. sistem bola-bumi tunduk pada hukum kekekalan momentum bola karena gaya tarik gravitasi bumi
e. semua pernyataan di atas tidak ada yang benar

5. Yang manakah di antara benda-benda berikut yang mengalami gaya terbesar pada waktu bertumbukan dengan dinding batu jika diketahui benda-benda tersebut dihentikan oleh dinding dalam selang waktu yang sama?
   a. benda yang massanya 200 kg dan bergerak dengan kelajuan 8 m/s
   b. benda yang massanya 100 kg dan bergerak dengan kelajuan 18 m/s
   c. benda yang massanya 75 kg dan bergerak dengan kelajuan 20 m/s
   d. benda yang massanya 80 kg dan bergerak dengan kelajuan 15 m/s
   e. benda yang massanya 50 kg dan bergerak dengan kelajuan 38 m/s
6. Dua buah bola yang sama, masing-masing massanya m. Salah satu balok bergerak dengan kecepatan konstan v pada lantai yang licin mendekati bola lain yang diam dan menumbuknya secara lenting sempurna, maka . . . .
   a. setelah tumbukan bola yang penumbuk menjadi diam dan yang ditumbuk bergerak searah dengan balok penumbuk dengan kecepatan v
   b. setelah tumbukan kedua bola bergerak berlawanan dengan kecepatan yang sama
   c. setelah tumbukan kedua bola bergerak searah dengan kecepatan yang sama
   d. setelah tumbukan bola yang menumbuk bergerak

membalik dengan kecepatan v dan yang ditumbuk tetap diam

e. setelah tumbukan kedua bola bergerak bersama dan berlawanan arah dengan v

7. Bulan berevolusi terhadap bumi dalam lintasan berbentuk lingkaran dan bergerak secara beraturan, maka . . . .
   a. besarnya energi kinetik bulan selalu konstan
   b. besarnya energi potensial bulan selalu konstan
   c. besarnya momentum linier bulan selalu konstan
   d. besarnya energi mekanik bulan selalu konstan
   e. a, b, c, dan d semuanya benar
8. Dua buah bola, A dan B, mempunyai massa dan ukuran yang sama, A terbuat dari besi dan B terbuat dari karet. Bila kedua bola tersebut mempunyai kelajuan yang sama dan menumbuk tiang kayu, maka . . . .
   a. bola B masuk ke dalam kayu sehingga tiang kayu menjadi rusak
   b. kedua bola sama-sama masuk ke dalam kayu dan keduanya merusakkan kayu
   c. bola karet B dipantulkan sehingga tiang kayu menjadi roboh
   d. bola A dipantulkan sehingga membuat tiang kayu roboh
   e. kedua bola sama-sama dipantulkan oleh kayu sehingga kayu menjadi roboh
9. Seorang pemain basket P melompat ke atas untuk memasukkan bola basket ke ranjang. Setelah menembakkan bola maka . . . .
   a. P bergerak jatuh bebas dan mempunyai momentum linier yang konstan
   b. P turun ke bawah dengan kelajuan konstan dan mempunyai momentum linier yang konstan
   c. P turun ke bawah dengan jatuh bebas dan pada saat menumbuk tanah perubahan momentumnya nol
   d. P turun ke bawah dengan kelajuan konstan dan pada saat menumbuk tanah perubahan momentumnya nol
   e. P turun ke bawah dengan jatuh bebas dan pada saat menumbuk tanah perubahan momentumnya sama dengan berat badannya
10. Pada tumbukan sentral yang elastik antara dua partikel

di mana partikel yang ditumbuk mula-mula diam dan setelah menumbuk partikel penumbuk bergerak membalik dengan kelajuan (1/3) kelajuannya sebelum menumbuk, maka . . . .

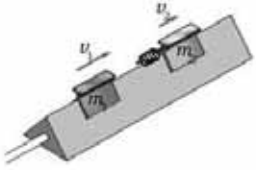
a. perbandingan massa antara partikel penumbuk dan yang ditumbuk adalah 1 : 2
b. perbandingan massa antara partikel penumbuk dan yang ditumbuk adalah 1 : 3
c. kelajuan partikel setelah tumbukan adalah (2/3) kelajuan partikel penumbuk sebelum tumbukan
d. pada tumbukan tersebut berlaku hukum kekekalan momentum dan energi kinetik sistem
e. semua pernyataan di atas benar

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan benar dan tepat!

1. Sebuah bola bilyard menumbuk bola bilyard lain yang diam. Bola bilyard penumbuk disimpangkan dengan membuat sudut 37° terhadap arahnya sebelum menumbuk. Bila tumbukan kedua bola tersebut bersifat elastis, tunjukkan bahwa arah gerak kedua bola tersebut membentuk sudut 90°!
2. Seseorang berdiri pada ujung perahu yang dekat pantai. Bila jarak ujung perahu yang dekat pantai terhadap pantai 100 m dan panjang perahu 8 m, orang yang massanya 80 kg berjalan menuju ujung yang lain dari perahu dengan kecepatan tetap, berapa jarak orang tersebut dari pantai bila massa perahu 60 kg? Pusat massa perahu terletak di tengah-tengah perahu.
3. Sebuah gerbong kereta yang kosong massanya 4,5 ton dan melaju perlahan-lahan di atas rel sambil dimuati tepung gandum. Bila massa total gandum yang dimuatkan pada gerbong sebesar 7,5 ton, apakah jenis tumbukan yang terjadi antara gerbong kereta dan tepung gandum? Bagaimanakah perubahan kecepatan, momentum dan energi kinetik kereta sebelum dan sesudah dimuati?
4. Bila dua buah benda bertumbukan secara sentral dan

bersifat elastik, (a) tunjukkan bahwa $(v_2 - v_1) = -(v_2' - v_1')$ dimana v_2 dan v_1 adalah kecepatan masing-masing benda sebelum tumbukan dan v_2' dan v_1' adalah kecepatan masing-masing benda setelah tumbukan. $(v_2 - v_1)$ disebut kecepatan relatif benda 2 terhadap benda 1 sebelum tumbukan, dan $(v_2' - v_1')$ adalah kecepatan relatif benda 2 terhadap benda 1 setelah tumbukan. Untuk tumbukan yang tidak elastis hubungan di atas diubah menjadi $-e(v_2 - v_1) = (v_2' - v_1')$ di mana e disebut koefisien restitusi (b) Tunjukkan bahwa untuk tumbukan tidak lenting sama sekali harga $e = 1$ dan untuk tumbukan lenting sebagian $0<e<1$!

5. Sebuah peluru, massa m, melaju secara mendatar dengan kecepatan v_0 menumbuk balok yang mula-mula diam di atas bidang yang koefisien geseknya μ_k. Balok tersebut terikat pada ujung bebas sebuah pegas yang konstantanya k sedemikian hingga peluru menerobos balok yang massanya M. Pada saat peluru keluar dari balok, balok telah bergeser sejauh d.
   a. Tentukan kecepatan peluru pada saat peluru keluar dari balok!
   b. Tentukan energi kinetik yang hilang karena tumbukan!
   c. Bila $m = 10$ gram, $v_0 = 600$ m/s , $M = 1$ kg, $k = 1000$ N/m dan $d = 6$ cm, $\mu_k = 0{,}2$ berapakah kecepatan peluru pada saat keluar dari balok?
   d. Berapakah energi kinetik yang hilang karena tumbukan?
6. Dua buah peluncur di set untuk bergerak bebas pada sebuah lintasan, lihat gambar di samping! Peluncur 2 dilengkapi dengan pegas yang konstantanya k. Bila peluncur 1 kecepatannya v_1 dan peluncur 2 kecepatannya v_2 di mana $v_1 > v_2$, maka peluncur 1 menumbuk peluncur 2 dan menekan pegas secara maksimum (simpangan pegas



maksimum). Karena menekan pegas secara maksimum, maka kedua peluncur setelah bertumbukan bergerak bersama-sama. Tentukan kecepatan kedua peluncur pada saat pegas mengalami simpangan maksimum, simpangan maksimum pegas dan kecepatan masing-masing peluncur setelah keduanya terpisah lagi!

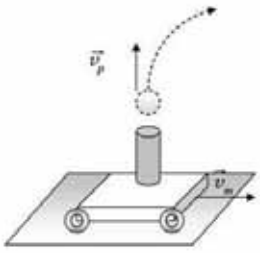
7. Sebuah bola besi yang massanya 5 kg menumbuk tembok yang licin dengan kelajuan 15 m/s dan membentuk sudut 37° dengan permukaan tembok. Bila bola tersebut menyentuh tembok selama t, berapakah gaya yang dikerjakan pada tembok bila tumbukannya elastis?
8. Pada sebuah lintasan PQR yang licin, balok m_1 = 2 kg dilepaskan dari titik P. Kemudian balok m_1 menumbuk balok m_2 = 4 kg yang mula-mula diam dan terletak di titik Q. Bila kedua balok tersebut bertumbukan secara sentral dan elastis, hitunglah ketinggian yang dicapai m_1 setelah bertumbukan!
9. Sebuah peluru yang massanya m melaju dengan kecepatan v menerobos sebuah bandul, massa M, yang tergantung pada tali yang panjangnya L. Bila kecepatan peluru pada saat keluar dari bandul adalah $(v/2)$ berapakah harga minimum v agar bandul setelah ditumbuk peluru dapat berayun dalam ayunan vertikal satu lingkaran penuh?
10. Partikel A yang massanya 4 kg mempunyai kecepatan $(2\vec{i} - 3\vec{j})$m/s, sedangkan partikel B yang massanya 6 kg mempunyai kecepatan $(\vec{i} - 6\vec{j})$m/s, tentukan kecepatan pusat massanya dan momentum total sistem!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawabanmu dengan teman-temanmu. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Latihan Ulangan Semester I

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Sebuah perahu motor berlayar dengan kelajuan 36 km/jam pada sebuah lintasan lurus di sebuah danau. Tiba-tiba bertiup angin kencang dengan kecepatan 15km/jam sehingga angin tersebut mendorong perahu secara tegak lurus selama 6 s. Bila perahu tetap berlayar pada garis lurus, maka pada saat $t = 5$ s
   a. perahu telah berlayar sejauh 60 m lurus dari posisi tempat angin mendorong perahu
   b. perahu telah berlayar sejauh 25 m lurus dari posisi tempat angin mendorong perahu
   c. perahu telah berlayar sejauh 65 m lurus dari posisi tempat angin mendorong perahu dan lintasan perahu membentuk sudut θ dengan arah perahu sebelum terkena angin di mana $\cos\theta = \frac{12}{13}$
   d. perahu telah berlayar sejauh 60m lurus dari posisi tempat angin mendorong perahu, dan lintasan perahu membentuk sudut θ dengan arah perahu sebelum terkena angin di mana $\cos\theta = \frac{12}{13}$
   e. perahu telah berlayar sejauh 15m lurus dari posisi tempat angin mendorong perahu, dan lintasan perahu membentuk sudut θ dengan arah perahu sebelum terkena angin di mana $\cos\theta = \frac{12}{13}$
2. Dalam demonstrasi gerak peluru digunakan motor balistik yang selalu bergerak dengan kecepatan konstan v_m dan dilengkapi dengan kanon pendek yang dihadapkan ke atas, lihat gambar! Bila peluru ditembakkan vertikal ke atas dan motor balistik tetap bergerak dengan kecepatan konstan, maka . . . .



a. kanon selalu menangkap peluru kembali
b. peluru akan bergerak vertikal ke atas
c. kanon selalu menangkap peluru karena pada kanon dilengkapi pegas
d. peluru akan bergerak lebih jauh dari kanon
e. peluru akan jatuh ke lantai motor bukan ke kanon

3. Budi lari dengan kelajuan 10 m/s pada lintasan lingkaran yang jari-jarinya 25 m, maka percepatan Budi tersebut adalah . . . .
a. 250 m/s
b. 4 m/s
c. 2,5 m/s
d. 15 m/s
e. 62,5 m/s

4. Satelit Explorer VIII ditempatkan pada orbitnya tahun 1960, untuk menyelidiki lapisan ionosfer. Bila Jarak terdekat (*perigee*) satelit tersebut 460 km dan jarak terjauhnya (*apogee*) 2300 km yang diukur dari permukaan bumi, maka rasio kelajuan satelit di titik *perigee* dan *apogee* adalah . . . .
a. 0,2 kali
b. 10 kali
c. 0,04 kali
d. 5 kali
e. 25 kali

5. Kecepatan lolos di bumi adalah 11,2 km/s. Bila massa bulan $\frac{1}{8}$ kali massa bumi dan jari-jari bulan $\frac{1}{4}$ kali jari-jari bumi, maka kecepatan lolos di bulan adalah . . . .
a. 25 km/s
b. 6 km/s
c. 0,6 km/s
d. 2,5 km/s
e. 12 km/s

6. Bumi bersama benda-benda langit (planet, satelit, komet) yang lain selalu berada pada satu sistem. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, **kecuali** . . . .
a. energi potensial suatu planet selalu negatif
b. bila suatu planet dapat mengembara jauh sekali sehingga terlepas dar pengaruh gravitasi bumi dan planet yang lain, maka energi potensial planet tersebut menjadi nol
c. besarnya energi potensial suatu planet sama dengan separuhnya energi kinetik planet tersebut
d. satelit buatan yang mengorbit bumi mempunyai energi potensial yang positif
e. besarnya gaya tarik menarik antara bumi dan bulan yamg dialami bulan dan yang dialami bumi sama besar

7. Sebuah planet baru ditemukan dan periodenya ditentukan. Maka jarak planet baru tersebut dapat ditemukan berdasarkan . . . .
   a. hukum I dan II Kepler
   b. hukum II dan III Kepler
   c. hukum II Kepler
   d. hukum I Kepler
   e. hukum III Kepler

8. Sabuk asteroid terletak antara Mars dan Jupiter. Sabuk asteroid mengitari matahari dengan periode 5 tahun. Jarak sabuk asteroid ke Matahari adalah . . . .
   a. $4{,}4\times10^{11}$ m
   b. $4{,}4\times10^{8}$ m
   c. $1{,}1\times10^{11}$ m
   d. $2{,}2\times10^{12}$ m
   e. $4{,}4\times10^{5}$ m

9. Gaya tangensial yang besarnya 100 N dikerjakan pada bagian permukaan atas suatu meja mainan yang ukurannya 20 cm x 25 cm, maka besarnya tegangan geser adalah . . . .
   a. 200 N/m^2
   b. 2000 N/m^2
   c. 20000 N/m^2
   d. 5000 N/m^2
   e. 500 N/m^2

10. Modulus elastisitas beton jauh lebih rendah dari modulus elastisitas baja. Padahal kedua material tersebut banyak digunakan untuk membangun gedung yang tinggi. Pernyataan–pernyataan di bawah ini benar, **kecuali** . . . .
    a. modulus elastisitas dapat ditentukan dengan cara tarikan
    b. modulus elastisitas dapat ditentukan dengan cara ditekan (kompresi)
    c. beton berperilaku baik bila pemberian gaya dengan cara kompresi
    d. baja berperilaku baik bila pemberian gaya dengan cara ditarik
    e. baja dan beton sama-sama bisa digunakan untuk pondasi dan juga untuk tulang bangunan bagian atap

11. Rel kereta api yang panjangnya 8m mempunyai penampang 0,0025 m^2. Pada hari yang sangat panas, rel bertambah panjang sebesar 0,003 m. Bila tidak ada ruang kosong di antara sambungan, maka gaya yang dikerjakan pada sambungan rel adalah . . . .
    a. $1{,}9\times10^{5}$ N
    b. $1{,}9\times10^{3}$ N
    c. 1×10^{5} N
    d. 1900 N
    e. 1000 N

12. Sebuah benda bermassa 0,2 kg bergerak harmonik sederhana dengan amplitudo 0,2 m dan dengan periode 0,4 s, maka . . . .
    a. besarnya gaya maksimum yang dialami benda tersebut adalah 9,86 N
    b. besarnya frekuensi anguler benda tersebut adalah 15,7 rad/s
    c. besarnya kecepatan maksimum benda tersebut adalah 3,14 m/s
    d. besarnya percepatan maksimum benda tersebut adalah 49,3 m/s^2
    e. semua pernyataan di atas benar
13. Sebuah partikel yang massanya m bergerak harmonik dengan amplitudo A, dan periode T. Pada saat $t = 0$ partikel berada pada titik kesetimbangan, kemudian partikel bergerak ke atas dan setelah bergerak t sekon partikel berada di bawah titik kesetimbangan berjarak $(1/2)A$ dan arah geraknya ke atas, maka . . . .
    a. $t = \frac{7}{8}T$
    b. $t = \frac{5}{8}T$
    c. kecepatan di titik tersebut besarnya $\frac{\pi}{T}A$.m/s
    d. percepatan di titik tersebut arahnya ke atas dan besarnya $\frac{4\pi^2 A}{T^2}$
    e. semua jawaban di atas benar

14. Sebuah bandul fisis terdiri dari batang yang panjangnya L tergantung pada penumpu yang dapat berputar bebas. Pada ujungnya yang bebas digantungkan bola yang jari-jarinya R. Bila massa kedua benda tersebut sama besar, maka . . . .
    a. pusat massa sistem tersebut berjarak $\frac{3}{2}L + \frac{3R}{2}$ dari titik gantung batang
    b. besarnya momen inersia sistem adalah $M(\frac{4L^2}{3} + \frac{2}{5}R^2)$ terhadap titik gantung batang
    c. besarnya momen inersia sistem adalah $M(\frac{2L^2}{3} + \frac{2}{5}R^2)$ terhadap titik gantung batang

d. pusat massa sistem tersebut berjarak $\frac{2}{3}L+\frac{2R}{5}$ dari titik gantung batang
e. semua jawaban di atas benar

15. Sebuah palu digunakan untuk memaku rusuk rumah. Bila palu tersebut massanya 2,5 kg dan diayun dengan kecepatan 20 m/s, paku masuk ke dalam kayu sedalam 4 cm, maka . . . .
a. besarnya gaya gesek kayu adalah 1250 N
b. besarnya gaya gesek kayu adalah 5000 N
c. kayu memberikan kerja pada paku sebesar 5000 J
d. besarnya gaya gesek kayu adalah 12500 N
e. kerja yang dilakukan paku pada kayu sebesar 5000 N

16. Sebuah bola yang massanya m tergantung pada sebuah tali yang ringan. Bola ditarik secara perlahan-lahan dengan gaya F yang berubah-ubah sedemikian bola dalam keadaan setimbang, maka . . . .
a. besarnya gaya F adalah $mg \cot \theta$
b. besarnya gaya F adalah $mg \tan \theta$
c. besarnya kerja yang dilakukan gaya F adalah $W = mgL\,(1+\tan \theta)$
d. besarnya kerja yang dilakukan gaya F adalah $W = mgL\,(1+\cot \theta)$
e. besarnya kerja yang dilakukan gaya F adalah $W = mgL\,(1+\cos \theta)$

17. Sebuah pegas ringan berdiri secara tegak pada bidang datar. Bila pada ujung atas pegas yang bebas diberi balok yang massanya m, pegas dalam keadaan setimbang dengan balok di atasnya setelah pegas tertekan sejauh d dari keadaan rileks. Tetapi sekarang balok dilepaskan tepat menyentuh ujung atas pegas yang rileks dan pegas mengalami kompresi sejauh d', maka berlaku . . . .
a. $mg = kd$ dan $mg = kd'$
b. $mg = kd$ dan $mgd' = kd'^2$
c. $mg = kd$ dan $mgd' = (1/2)\ kd'^2$
d. $d = 2d'$
e. $d = d'$.

18. Sebuah bola yang melaju dengan kecepatan v menumbuk tembok yang kasar secara lenting sempurna. Bila v membentuk sudut θ dengan garis yang tegak lurus tembok dan besarnya koefisien gesek statis adalah μ_s maka . . . .

a. besarnya kecepatan partikel sebelum dan sesudah tumbukan sama besar
b. besarnya perubahan momentum arah tegak lurus tembok adalah $2mv \cos \theta$
c. besarnya perubahan momentum yang searah dengan bidang tembok adalah $2mv \sin \theta$
d. besarnya sudut datang dan sudut pantul dari bola yang dipantulkan sama besar
e. semua jawaban di atas benar

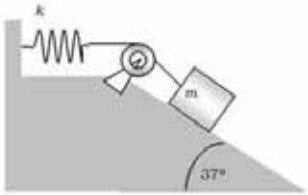
19. Dua buah bola A dan B masing-masing massanya m dan $2m$ bergerak saling mendekati. Bola A melaju dengan kecepatan $2v$ dan bola B dengan kecepatan v. Keduanya bertumbukan secara lenting sempurna, maka . . . .
a. setelah bertumbukan, masing-masing bola bergerak berbalik dan besarnya kecepatan mereka tidak berubah
b. setelah bertumbukan masing-masing bola bergerak searah dan besarnya kecepatan mereka tidak berubah
c. setelah bertumbukan, masing-masing bola bergerak berbalik dan besarnya kecepatan mereka tertukar yaitu bola A bergerak dengan kecepatan v dan bola B $2v$
d. setelah bertumbukan masing-masing bola bergerak berbalik dan besarnya kecepatan mereka sama besar.
e. setelah bertumbukan, masing-masing bola bergerak searah dengan arah gerak sebelum tumbukan dan besarnya kecepatan mereka tertukar yaitu bola A bergerak dengan kecepatan v dan $2v$ untuk bola B

20. Sebuah bola jatuh bebas dan menumbuk lantai secara lenting sebagian yaitu mempunyai koefisien restitusi e. Bila mula-mula bola jatuh dari ketinggian h maka . . . .
a. ketinggian yang dicapai pada pantulan bola yang pertama sebesar he
b. ketinggian yang dicapai pada pantulan bola yang pertama sebesar h^2e
c. ketinggian yang dicapai pada pantulan bola yang kedua sebesar he^4
d. ketinggian yang dicapai pada pantulan bola yang ketiga sebesar he^3
e. ketinggian yang dicapai pada pantulan bola yang kedua sebesar h^2e^4

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan benar dan tepat!

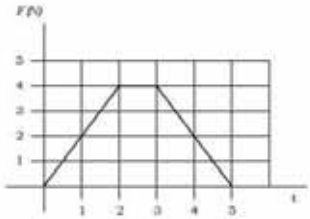
1. Sebuah peluru yang massanya m ditembakkan di atas bidang miring dengan sudut kemiringan θ. Bila peluru tersebut ditembakkan dengan kecepatan awal v_0 dan dengan sudut elevasi δ terhadap bidang miring,
   a. Tentukan dimana peluru jatuh di atas bidang miring!
   b. Tentukan kecepatan peluru pada saat jatuh di bidang miring!
2. Kereta api memperlambat kecepatannya dari 90 km/jam menjadi 54 km/jam dalam waktu 15 sekon untuk melewati tikungan tajam. Bila jari-jari tikungan yang tajam tersebut adalah 150 m, berapakah percepatan kereta api tersebut pada saat kelajuannya 54 km/jam!
3. Bintang kembar adalah dua buah bintang yang massanya hampir sama dan saling berotasi satu sama lain terhadap pusat massanya. Tetapi biasanya yang terlihat hanya salah satu saja dan yang lain gelap tak terlihat. Bila bintang yang terlihat kelajuannya 270 km/s, periode orbitnya 1,8 hari dan massanya $m_1 = 6\ M_s = 12 \times 10^{30}$ kg, tentukan massa bintang yang tidak terlihat!
4. Sebuah paket instrumen yang massanya 50kg ditembakkan vertikal ke atas sehingga mengorbit bumi pada ketinggian 800 m.
   a. Berapakah kecepatan awal untuk menembakkan paket tersebut dari permukaan bumi?
   b. Berapakah energi kinetik dan potensial paket yang mengorbit bumi tersebut?
5. Peluru yang massanya 8 gram ditembakkan ke arah balok yang massanya 2,5 kg yang diam di tepi meja yang licin. Setelah tumbukan, peluru tertanam dalam balok dan kemudian keduanya jatuh ke lantai yang berjarak 2 m dari dasar meja. Bila tinggi meja 1 m, tentukan kecepatan awal peluru sebelum menumbuk meja!
6. Dua balok identik dengan massa 250 gram, masing-masing dilengkapi dengan pegas yang identik dengan konstanta pegas 2500 N/m. Kedua balok tersebut bergerak saling mendekati dengan kelajuan yang sama besar, 3 m/s dan akhirnya saling bertumbukan. Hitung panjang pemampatan (kompresi) maksimum dari pegas!

7. Sebuah balok yang massanya 1 kg diletakkan di atas bidang miring yang kasar. Balok dihubungkan dengan pegas ringan yang konstantanya 200 N/m dengan seutas tali lewat katrol licin, lihat gambar!

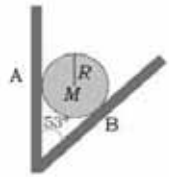


Kemudian balok dilepaskan dari keadaan diam dan balok meluncur pada bidang miring sejauh 10 cm dan berhenti. Tentukan koefisien gesek kinetik antara balok dengan bidang miring!

8. Gaya yang bekerja pada sebuah benda yang massanya 2 kg ditunjukkan pada grafik gaya vs waktu pada gambar di bawah ini.
   a. Tentukan impuls gaya *F*!
   b. Tentukan kecepatan akhir bila partikel mulai bergerak dari diam!
   c. Tentukan kecepatan akhir bila mula-mula partikel bergerak sepanjang sumbu *x* sengan kecepatan -2 m/s!



9. Sebuah bola massa *M* dan jari-jari *R* diletakkan pada sudut ruang, lihat gambar! Bila permukaan dalam ruang tersebut licin, tentukan gaya yang dikerjakan oleh bidang sisi di titik kontak pada bola!



10. Sebuah bola pejal yang jari-jarinya *R* menggelinding tanpa selip di dalam lengkungan silinder tanpa selip. Bila jari-jari silinder 5*R* dan bola diberi simpangan sedikit, kemudian dilepaskan sehingga bola bergerak harmonik.

    Tunjukkan bahwa periodenya $T = 2\pi\sqrt{\frac{13R}{2g}}$!

Bab VII

Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar

Tujuan pembelajaran
Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat mengetahui konsep dan hubungan antara torsi, momentum sudut, dan momen inersia, berdasarkan hukum II Newton, serta penerapannya dalam masalah benda tegar.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:
1. Torsi
2. Gaya
3. Massa
4. Kecepatan sudut

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:
1. Rotasi dan translasi benda tegar.
2. Torsi, kesetimbangan dan stabilitas.
3. Dinamika rotasi.
4. Energi kinetik dan kerja pada gerak rotasi.
5. Momentum sudut.

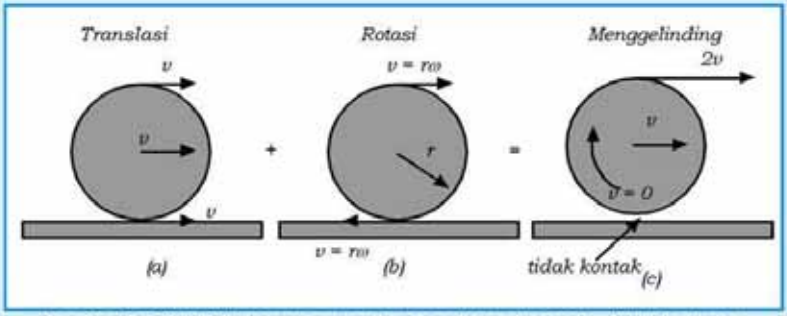
Gerak rotasi merupakan gerak alamiah yang sangat bermanfaat untuk dipelajari karena gerak tersebut banyak terjadi di sekitar lingkungan kita. Contohnya roda kendaraan, gir, katrol, dan gerak planet dalam sistem tata surya.

A. Rotasi dan Translasi Benda Tegar

Benda tegar adalah benda atau susunan partikel dimana jarak antarpartikel selalu tetap. Contoh, air bukan merupakan benda tegar tetapi es yang terbentuk dari air adalah benda tegar. Benda tegar bisa mengalami gerak translasi, rotasi, atau kedua-duanya. Bila sebuah benda hanya mengalami gerak translasi saja (gerak linear), lihat gambar 7.1(a), maka setiap partikel pada benda tersebut mempunyai kecepatan sesaat yang sama. (Mengapa? Jelaskan!)

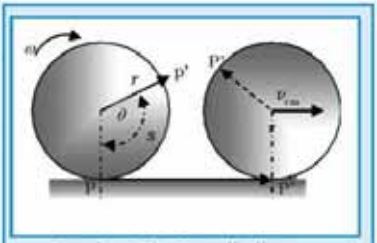
Sedangkan sebuah benda yang hanya melakukan gerak rotasi terhadap sumbu tetap (gambar 7.1(b)), maka semua partikel-partikel pada benda tersebut mempunyai kecepatan anguler sesaat yang sama dan bergerak melintasi lingkaran yang pusatnya terletak pada sumbu rotasinya. Walaupun pada umumnya sumbu rotasi sebuah benda melalui pusat masanya, namun hal ini tidak selalu terjadi sebab kita dapat memutar tongkat dengan sumbu rotasi lewat ujung tongkat.

Secara umum benda tegar mengalami gerak rotasi dan translasi. Jika kalian melemparkan bola, maka gerak translasi bola digambarkan sebagai gerak pusat massanya (seperti gerak peluru), namun bola tersebut mungkin juga melakukan gerak putaran atau berotasi. Contoh umum yang bisa kalian amati, sebuah benda dapat melakukan gerak translasi dan rotasi adalah gerak benda yang menggelinding, lihat gambar 7.1(c).



Gambar 7.1 *(a) Bola hanya mengalami gerak translasi saja, (b) Bola hanya mengalami gerak rotasi saja, (c) bola yang mengalami gerak translasi dan rotasi dikatakan bahwa bola menggelinding.*

Pada gambar 7.1(c) ditunjukkan vektor kecepatan sesaat di titik tertinggi, tengah, dan terbawah pada sebuah bola yang menggelinding. Kecepatan di titik tertinggi besarnya dua kali lipat dari kecepatan di titik tengahnya, sedangkan di titik terendah kecepatannya nol.



Gambar 7.2 *Mengelinding*

Pada titik terendah, bola ber-singgungan (kontak) dengan lantai dan kecepatannya selalu nol maka dikatakan garis yang tegak lurus pada titik kontak ini merupakan sumbu rotasi sesaat dari bola yang menggelinding. Gambar 7.2 menunjukkan sebuah bola atau silinder yang menggelinding pada sebuah garis bidang datar dan benda mengalami perputaran sebesar sudut θ. Mula-mula titik kontak antara bola dengan bidang datar adalah di titik P dan setelah berotasi sebesar sudut θ titik kontaknya menjadi P', maka PP' = s = $r\theta$. Kelajuan pusat massa benda yang menggelinding tanpa selip tersebut adalah:

$$v_{cm} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{r\Delta\theta}{\Delta t} = r\omega \qquad (7.1)$$

Persamaan 7.1 menunjukkan prasyarat hubungan antara kelajuan pusat massa dengan kelajuan anguler agar benda menggelinding tanpa selip. Dari gambar 7.2 juga ditunjukkan bahwa bila benda telah menggelinding sejauh s, maka pusat massa juga sudah berpindah sejauh s. Dari persamaan 7.1 dapat dijabarkan bahwa besarnya percepatan pusat massa benda yang menggelinding tanpa selip adalah:

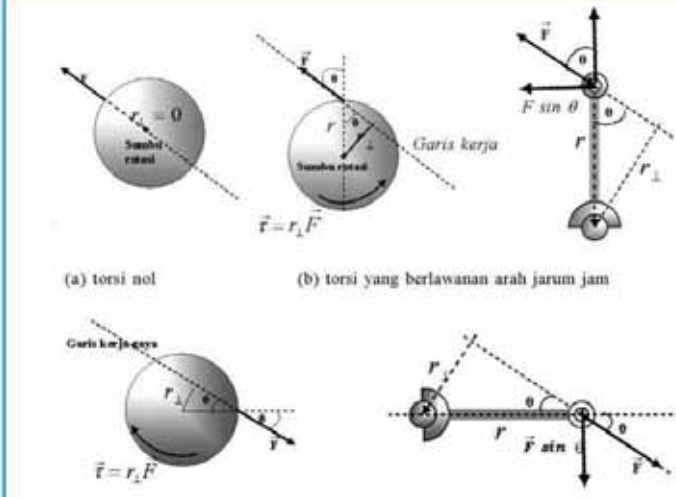
$$a_{cm} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{r\Delta\omega}{\Delta t} = r\alpha \qquad (7.2)$$

di mana α adalah percepatan anguler.

B. Torsi, Kesetimbangan, dan Stabilitas

Seperti pada gerak translasi, sebuah gaya harus dikerjakan pada benda untuk menghasilkan perubahan pada gerak rotasi. Bila sebuah gaya dikerjakan pada benda tegar, gaya tersebut tidak selalu

menghasilkan gerak rotasi, karena gerak rotasi tergantung pada lokasi titik tangkap gaya yang dikenakan pada benda tegar tersebut. Jika gaya (garis kerja gaya) dikenakan melalui sumbu rotasi, maka gaya tersebut tidak akan menghasilkan gerak rotasi, lihat gambar 7.3(a). Jika garis kerja gaya tidak melalui sumbu rotasi, maka gaya akan menghasilkan gerak rotasi, lihat gambar 7.3(b-c). Garis kerja adalah perpanjangan anak panah dari vektor gaya.

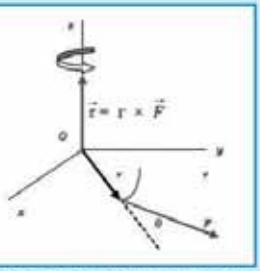


Gambar 7.3 *Torsi dan lengan gaya. (a) Gaya yang dikerjakan pada benda melalui sumbu rotasi, maka torsinya nol(b) Jarak tegak lurus dari sumbu rotasi ke garis kerja gaya disebut lengan gaya. Torsi yang menghasilkan gerak rotasi didefinisikan sebagai* $\vec{\tau} = r_\perp \vec{F}$ *. Rotasi yang dihasilkan torsi berlawanan dengan arah jarum jam. (c) Gaya yang diaplikasikan seperti pada (b) tetapi arahnya berlawanan, maka gerak rotasi yang dihasilkan juga berlawanan, yaitu searah dengan jarum jam.*

1. Torsi

Bila sebuah gaya dikenakan pada benda dan vektor gaya tersebut membentuk sudut θ dengan garis lurus yang menghubungkan pusat rotasi dengan titik tangkap gaya pada benda tersebut, maka besarnya torsi dari gaya tersebut didefinisikan

sebagai $\tau = rF\sin\theta$, di mana $r_\perp = r\sin\theta$, $r_\perp$ adalah lengan gaya dari gaya $\vec{F}$, yaitu jarak tegak lurus dari sumbu rotasi (pusat rotasi) ke garis kerja gaya, lihat gambar 7.3. Dari gambar 7.3 (b) dan (c), komponen gaya $\vec{F}$ yang cende-rung menyebabkan rotasi hanyalah $F\sin\theta$, sedangkan komponen $F\cos\theta$ tidak mempunyai kecende-rungan untuk menyebabkan rotasi sebab komponen tersebut melewati sumbu rotasi sehingga lengan gayanya nol.



Gambar 7.4. *Vektor torsi tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk oleh vektor posisi dan gaya yang diaplikasikan.*

Dari gambar 7.4 ditunjukkan bahwa arah rotasi berlawanan dengan arah jarum jam (*counter clockwise*), baik torsi maupun rotasinya searah dengan arah jarum jam (*clockwise*). Bila lengan gaya lebih kecil, walaupun gaya yang diaplikasikan sama, maka torsi yang dihasilkan juga lebih kecil. Semakin kecil lengan gaya, semakin kecil torsi yang dihasilkan.

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.3(b) dan (c), bila arah gaya yang dikerjakan berubah maka arah rotasi berubah, ini berarti bahwa arah torsi juga berubah. Jadi torsi adalah sebuah vektor yang tegak lurus pada vektor jarak $\vec{r}$, dan vektor gaya $\vec{F}$, maka secara umum, torsi didefinisikan sebagai, $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$ sehingga besarnya adalah:

$$\tau = \left|\vec{r} \times \vec{F}\right| = r_\perp F = (r\sin\theta)F = rF\sin\theta \quad (7.3)$$

Satuan torsi dalam satuan SI adalah mN yang sama dengan satuan untuk kerja yaitu Nm atau J (joule). Besarnya torsi untuk $\theta = 0°$, menurut persaman 7.3 adalah nol. Ini berarti bahwa garis kerja gaya yang bekerja pada benda melalui sumbu rotasi. Jika $\theta = 90°$, maka torsi yang dihasilkan adalah maksimum dan gaya yang bekerja pada benda mempunyai arah tegak lurus terhadap $\vec{r}$. Contoh kejadian sehari-hari yang menunjukkan torsi maksimum adalah

KISI

Mesin ini digunakan untuk menggiling jagung di Yunani pada abad ke-1 SM, mempunyai roda dayung horisontal. Seperti pada semua kincir, roda dayung itu berfungsi seperti roda dan sumbu, dan gaya yang menekan dayung di tepi toda menghasilkan gaya yang lebih kuat pada sumbu tengahnya.



Sumber: *Jendela Iptek 3*

pada saat kalian membuka pintu dengan cara mendorong pintu secara tegak lurus. Besarnya torsi juga dapat dinyatakan sebagai $\vec{\tau} = \vec{r}_{\perp}\vec{F} = \vec{r}\vec{F}_{\perp}$ yaitu sebagai hasil kali antara vektor $\vec{r}$ dan komponen gaya yang tegak lurus pada vektor $\vec{r}$.

Torsi pada gerak rotasi dapat dianalogikan dengan gaya yang bekerja pada gerak translasi. Karena torsi adalah perkalian secara vektor antara vektor gaya dan vektor lengan gaya, maka torsi juga merupakan besaran vektor. Arah torsi selalu tegak lurus bidang yang dilukis melalui vektor gaya dan vektor lengan gaya, lihat gambar 7.4, yang ditunjukkan dengan aturan tangan kanan.

Kegiatan 7.1

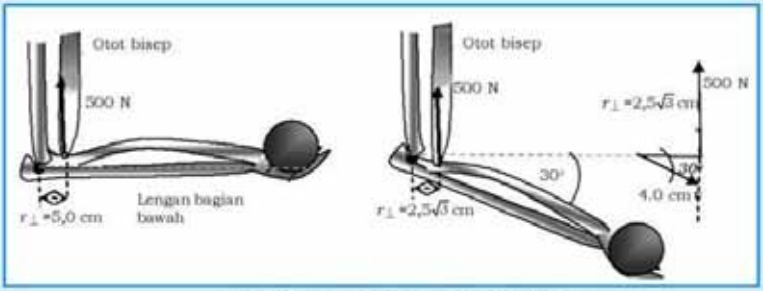
Tujuan:
Menyelidiki torsi yang bekerja pada suatu benda

Prosedur:
1. Buka dan tutuplah daun pintu yang berat dengan cara memegang bagian daun pintu yang berbeda-beda!
2. Bagian daun pintu yang mana yang harus dipegang agar daun lebih mudah dibuka/ditutup?
3. Bila pintu mudah dibuka, bagaimana besar torsinya?
4. Pernahkah kalian membuka daun pintu dengan cara mendorong pada sisi yang dekat dengan engsel/sumbu rotasi?
5. Apakah pintu dapat terbuka dengan mudah?

Kesimpulan:
Apa kesimpulan kalian setelah melakukan kegiatan ini?

Contoh Soal 7.1

Pada tubuh kita, torsi yang dihasilkan oleh kontraksi otot menyebabkan tulang-tulang berotasi pada titik tumpunya (sendi-sendinya). Contoh, pada saat kita mengangkat sebuah benda dengan lengan bagian bawah, maka sebuah torsi dikerjakan oleh otot bisep pada lengan bagian bawah, lihat gambar 7.5. Dengan sumbu rotasi melalui sendi siku-siku dan otot melekat pada jarak 5,0 cm dari sendi tersebut, berapa besar torsi yang dikerjakan oleh otot tersebut jika otot memberikan gaya sebesar 500 N?



Gambar 7.5 *Torsi oleh kontraksi otot*

Penyelesaian:

Pertama kita harus menulis data yang ada pada soal dan pada gambar 7.5.

Diketahui:

r = 5,0 cm = 0,05 m
F = 500 N

Ditanya:

a. Besarnya torsi untuk $\theta = 90^\circ$
b. Besarnya torsi untuk $\theta = 90^\circ + 30^\circ$

Jawab:

a. $\tau = r_\perp F = rF = (0{,}05\text{ m})(500\text{ N}) = 25\text{ m.N}$

b. $\tau = r_\perp F = rF\sin(90^\circ + 30^\circ) = (0{,}05\text{ m})(500\text{ N})\cos 30^\circ = 22\text{ m.N}$

2. Kesetimbangan Benda Tegar

Kalian telah mengetahui bahwa benda dikatakan dalam keadaan setimbang statis bila benda dalam keadaan diam, atau benda melakukan gerak lurus dengan kecepatan selalu konstan. Agar benda dalam keadaan setimbang statis, maka jumlah semua gaya yang bekerja pada benda tersebut harus nol, $\sum \vec{F}_i = 0$, yang tidak lain adalah pernyataan hukum I Newton.

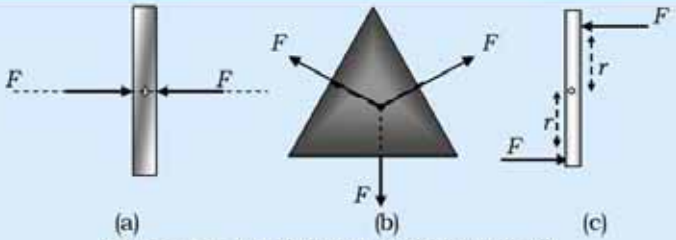
Gaya dengan garis kerja melalui titik yang sama dan bila dijumlahkan secara vektor sama dengan nol disebut gaya konkruen. Hal ini dapat dilihat gambar 7.6(a,b) dan benda dalam keadaan kesetimbangan translasi. Sebab, bila gaya pada sebuah benda tidak setimbang (resultan gaya tidak nol), maka gaya tersebut akan menghasilkan percepatan translasi.

Pada bab-bab sebelumnya, sebuah benda yang ditinjau geraknya atau yang dikenai gaya selalu dianggap bahwa benda tersebut massanya terkonsentrasi pada pusat massa atau bahkan benda tersebut dianggap sebagai benda titik massa. Jadi kalau benda mengalami perpindahan, maka yang ditinjau adalah perpindahan dari pusat massa, kecepatannya juga kecepatan dari pusat massa, dan sebagainya.

Kalau ada benda dalam keadaan setimbang statis, maka ada pula benda dalam keadaan setimbang dinamis. Kira-kira apakah perbedaan antara kesetimbangan statis dan dinamis? Untuk dapat menjelaskan perbedaan antara dua konsep kesetimbangan, marilah kita tinjau lagi gambar 7.6(a), (b) dan (c). Pada ketiga gambar tersebut, resultan gaya total yang bekerja pada benda adalah nol. Tetapi pada gambar 7.6(a) dan (b) semua garis kerja gaya berpotongan pada satu titik, sedangkan pada gambar (c) garis kerja gayanya tidak berpotongan.

Bila kalian amati, mungkin kalian akan menyimpulkan bahwa benda pada gambar 7.6(a), (b), dan (c) dalam keadaan diam. Pada gambar 7.6(a) dan (b) benda dalam kesetimbangan statis karena resultan gaya yang bekerja pada benda nol dan semua garis kerja gaya berpotongan di titik pusat massa, sehingga benda dapat dianggap sebagai titik massa. Pada gambar 7.6(c), walaupun resultan gayanya nol tetapi garis kerja gaya tidak berpotongan benda tidak dapat dianggap sebagai titik massa, jadi tidak tunduk pada hukum I Newton. Pasangan gaya sejajar yang besarnya sama tetapi arahnya berlawanan dan bekerja pada sebuah benda disebut *kopel* besarnya torsi terhadap pusat massa, yaitu $\sum \vec{\tau}_i = (r\vec{F} + r\vec{F})$ yang tidak sama dengan nol, maka batang berotasi terhadap pusat massa dengan percepatan anguler konstan.

Jika torsi pada sebuah benda tidak seimbang, maka torsi tersebut akan menghasilkan percepatan rotasi. Sebaliknya jika torsi dalam keadaan setimbang, maka benda dalam keadaan kesetimbangan rotasi.



Gambar 7.6. *Kesetimbangan statis dan mekanik*

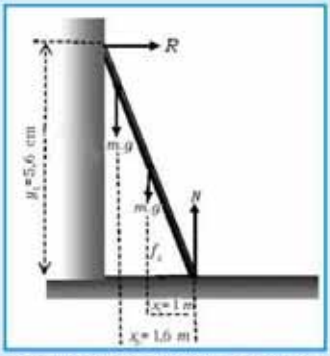
Dapat disimpulkan bahwa $\sum \vec{F}_i = 0$ merupakan syarat kesetimbangan translasi, dan untuk kondisi kesetimbangan rotasi diperlukan $\sum \vec{\tau}_i = 0$. Jika kedua kondisi terpenuhi maka benda dalam kesetimbangan mekanik.

$$\sum \vec{F}_i = 0 \text{ dan } \sum \vec{\tau}_i = 0 \qquad (7.4)$$

Bila benda tegar dalam kondisi kesetimbangan mekanik, maka benda mungkin dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan linear atau kecepatan anguler yang konstan. Contoh benda dalam kesetimbangan mekanik yang bergerak dengan kecepatan linier dan anguler yang konstan adalah sebuah bola yang menggelinding tanpa selip pada sebuah bidang datar dengan kecepatan pusat massa konstan. Tentu contoh ini merupakan kondisi yang ideal karena dalam realitasnya selalu ada gaya gesek.

Contoh Soal 7.2

Sebuah tangga dengan massa 15 kg bersandar diam pada dinding yang lincin, lihat gambar 7.7! Seorang tukang cat dengan massa 78 kg berdiri di atas tangga tersebut. Berapa gaya gesek yang harus bekerja pada ujung tangga bawah oleh lantai agar tangga tidak selip?



Gambar 7.7. *Tangga bersandar pada tembok.*

Penyelesaian:

Berdasarkan data dari soal dan gambar 7.7, maka dapat diketahui:

$m_{tangga} = 15$ kg

$m_{orang} = 78$ kg

x_1 = 1 m = jarak horizontal pusat massa tangga dengan ujung bawah tangga, x_2=1,6 m.=jarak horisontal pusat massa tukang cat dengan ujung bawah tangga, y_1 =5,6 m.

Ditanya:

Gaya gesek agar tangga tidak selip?

Jawab:

Karena tembok licin maka gaya gesek antara tangga dan tembok diabaikan, maka pada tangga ujung atas hanya bekerja gaya normal R akibat gaya reaksi dari dinding pada tangga. Dengan menerapkan prinsip kesetimbangan mekanik dan dengan memilih titik yang dilewati sumbu rotasi pada ujung tangga bawah, maka torsi yang disebabkan f_s dan N sama dengan nol. Dari prinsip kesetimbangan mekanik dapat dituliskan:

$$\Sigma F_x = R - f_s = 0$$

$$\Sigma F_y = N - m_{\text{orang}}\, g - m_{\text{tangga}}\, g = 0$$

dan

$$\Sigma \tau = (m_{\text{tangga}} g)\, x_1 + (m_{\text{orang}} g) x_2 - Ry = 0$$

Dengan menyelesaian ketiga persamaan di atas kita dapatkan nilai R dan f_s

$$R = \frac{(m_{\text{tangga}} g) x_1 + (m_{\text{orang}} g) x_2}{y}$$

$$= \frac{(15\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2)(1{,}0\text{ m}) + (78\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2)(1{,}6\text{ m})}{5{,}6\text{ m}} = 2{,}4 \times 10^2\text{ N}$$

Berdasarkan persamaan yang pertama maka,

$$R = f_s = 2{,}4 \times 10^2\text{ N}$$

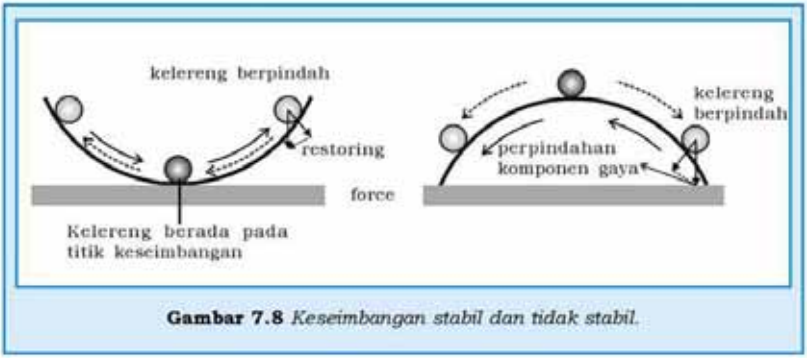
3. Stabilitas dan Pusat Gravitasi

Kesetimbangan sebuah partikel atau benda tegar dapat juga dideskripsikan melalui keadaan stabil dan tidak stabil dalam medan gravitasi. Untuk benda-benda tegar, kategori kesetimbangan lebih cocok jika dianalisis melalui pengertian pusat gravitasi. Seperti kita ketahui bahwa pusat gravitasi adalah sebuah titik di mana semua berat benda dikonsentrasikan dan seolah-olah benda sebagai

sebuah titik partikel. Bila percepatan yang disebabkan oleh gaya gravitasi konstan, maka pusat gravitasi dan pusat massa bertepatan pada titik yang sama.

Jika sebuah benda dalam posisi kesetimbangan stabil, setiap gangguan simpangan yang kecil, akan menghasilkan gaya pemulih atau torsi menyebabkan benda cendurung kembali ke posisi kesetimbangan semula. Gambar 7.8(a) memperlihatkan sebuah bola di dasar mangkok yang berada dalam kesetimbangan stabil, sebab setiap bola mengalami simpangan sedikit, bola cenderung kembali ke keadaan kesetimbangan, awalnya. Kalian dapat menunjukkan bahwa bola yang dalam kesetimbangan stabil bila diberi sedikit simpangan pusat berat benda naik dan demikian juga energi potensial benda. Jadi, bila suatu benda diberi sedikit simpangan yang mengakibatkan pusat berat benda dan energi potensialnya naik, maka benda yang mula-mula berada dalam kesetimbangan stabil dan cenderung kembali ke kesetimbangan stabil.

Untuk benda yang berada dalam kesetimbangan tak stabil, setiap pemberian simpangan kecil dari posisi kesetimbangannya, akan menghasilkan gaya atau torsi yang cenderung membawa benda lebih jauh dari posisi kesetimbangannya. Pada gambar 7.8(b) ditunjukkan sebuah bola berada di puncak mangkok yang terbalik, maka energi potensial bola maksimum. Bila bola diberi sedikit simpangan, kalian akan melihat bahwa bola turun ke bawah sepanjang dinding mangkok, karena pemberian simpangan tersebut menghasilkan gaya pemindah yang mengakibatkan bola bergerak menjauhi posisi kesetimbangannya. Kalian juga akan mengamati bahwa pada saat bola diberi sedikit simpangan, titik berat bola turun sehingga energi potensial bola menjadi berkurang.



Gambar 7.8 *Keseimbangan stabil dan tidak stabil.*

Brilian



Kalian percaya atau tidak bahwa antara wanita dan pria posisi titik beratnya berbeda. Jelaskan bagaimana pengaruh posisi titik berat pada tubuh manusia untuk melakukan kegiatan seperti yang ditunjukkan pada gambar!

Untuk meningkatkan **sikap kewirausahaan** kalian, lakukanlah kegiatan berikut!

Dari pembahasan di atas, bagaimanakah gedung-gedung harus dibangun agar dalam keadaan kesetimbangan stabil? Bagaimanakah kira-kira posisi (letak) pusat berat gedung yang kokoh? Untuk itu kalian diminta untuk menentukan pusat berat dari beberapa benda yang bentuknya berbeda yang dapat dibuat dari kertas karton: beberapa buah segitiga sembarang, segitiga siku-siku, segitiga sama sisi, persegi panjang, persegi, belah ketupat, silinder, kubus, dan bola. Untuk menentukan titik berat masing-masing benda dapat dilakukan dengan menggantungnya secara bebas dari tiga posisi atau lebih. Titik berat benda adalah perpotongan antara perpanjangan dari benang penggantung!

Contoh Soal 7.3

Batu bata yang seragam dengan panjang 20 cm ditumpuk satu per satu seperti pada gambar 7.10. Berapa banyak batu bata bisa ditumpuk seperti pada gambar sebelum batu bata tersebut runtuh atau berjatuhan?

Penyelesaian:

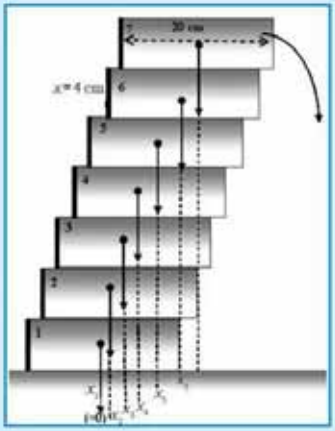
Diketahui:
Lihat gambar 7.9.

Ditanya:

Berapa jumlah batu bata yang harus ditumpuk sebelum batu bata tersebut berjatuhan?

Jawab:

Susunan batu bata akan berjatuhan jika pusat masa dari batu bata tersebut tidak ada yang menyangga dari dasar (batu bata paling bawah). Semua batu bata mempunyai massa yang sama dan pusat massa dari masing-masing batu bata berada pada tengah-tengahnya. Dengan menggambil titik pusat massa pada batu bata paling bawah, koordinat harisontal terhadap pusat massa (pusat gravitasi) untuk batu bata pertama, dimana $m_1 = m_2 = m$ dan x_2 adalah pergeseran pusat massa batu bata yang kedua:



Gambar 7.9 *Tumpukan batu bata.*

$$x_{cm_2} = \frac{mx_1 + mx_2}{m + m}$$

$$= \frac{m(0 + 4{,}0\ \text{cm})}{2\ \text{m}} = 2{,}0\ \text{cm}$$

Untuk batu bata yang ke-3,

$$x_{cm_2} = \frac{mx_1 + mx_2 + mx_3}{m + m + m}$$

$$= \frac{m(0 + 4{,}0\ \text{cm} + 8{,}0\ \text{cm})}{3\ \text{m}} = 4{,}0\ \text{cm}$$

Untuk batu bata yang ke-4

$$x_{cm_2} = \frac{mx_1 + mx_2 + mx_3 + mx_4}{m + m + m + m}$$

$$\frac{m(0 + 4{,}0\ \text{cm} + 8{,}0\ \text{cm} + 12{,}0\ \text{cm})}{4\ \text{m}} = 6{,}0\ \text{cm}$$

dan seterusnya.

Hasil perhitungan pusat massa tumpukan batu bata berbentuk deret bilangan yang selalu bertambah 2 (pusat massa tumpukan bergeser horisontal ke kanan 2 cm) setiap sebuah bata ditambahkan pada tumpukan. Untuk 6 batu bata, pusat massa bergeser 10 cm dari titik pusat massa batu bata yang

paling bawah (2,0 cm × 5 batu yang ditambahkan = 10 cm). Jadi, pusat massa tumpukan 6 batu bata tepat di atas ujung batu bata yang terbawah, dan jika diberi simpangan sedikit saja batu bata ke enam dapat jatuh, tetapi jika meletakkannya secara hati-hati tumpukan dalam keadaan setimbang. Tetapi bila ditambahkan batu bata yang ke tujuh pusat massanya sudah di luar posisi batu bata yang terbawah, maka pada tumpukan 7, batu bata akan berjatuhan.

Tugas 7.1

Seperti soal di atas tetapi posisi batu bata di atasnya secara berturutan hanya digeser x = 1 cm dan x = 2 cm!

C. Dinamika Rotasi

Sekarang kalian sudah mengetahui bahwa benda bisa dalam keadaan diam atau bergerak lurus beraturan bila resultan gaya yang bekerja pada benda tersebut nol, tetapi ada benda yang berotasi dengan percepatan anguler konstan, padahal resultan gaya yang bekerja pada benda adalah nol. Alasan mengapa benda berotasi, kalian juga sudah tahu karena adanya resultan torsi yang bekerja pada benda. Jadi, penyebab benda mengalami gerak rotasi adalah karena adanya torsi.

Besarnya torsi yang dihasilkan gaya tunggal yang dikerjakan pada benda yang dirumuskan pada persamaan 7.3:

$$\tau = r_{\perp}F = rF_{\perp} = rma_{\perp} = mr^2\alpha \qquad (7.5)$$

di mana $a_{\perp} = r\alpha$ adalah percepatan tangensial, yaitu percepatan yang searah garis singgung atau tegak lurus pada vektor $\vec{r}$. Untuk benda tegar yang berotasi terhadap sumbu tetap, persamaan 7.5 berlaku untuk setiap partikel yang menyusun benda tegar dan resultan torsi sama dengan resultan dari torsi masing-masing partikel. Pada benda tegar yang berotasi, semua partikelnya mempunyai kecepatan anguler yang sama dan percepatan anguler semua partikel juga sama, maka resultan torsi yang bekerja pada benda berotasi dapat dinyatakan sebagai:

$$\sum \tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 + \ldots + \tau_n$$

$$= m_1 r_1^2 \alpha + m_2 r_2^2 \alpha + m_3 r_3^2 \alpha + m_4 r_4^2 \alpha + \ldots + m_n r_n^2 \alpha$$

$$= \sum_{i=1}^{n} (m_i r_i^2) \alpha \qquad (7.6)$$

di mana r_i adalah jarak dari partikel yang ke-i ke sumbu rotasi dan besarnya tetap. Besaran $m_i r_i^2$ juga konstan dan besaran ini disebut momen inersia I, partikel yang ke-i. Besarnya momen inersia total benda tegar yang berotasi adalah sama dengan jumlah momen inersia dari masing-masing partikel, yaitu:

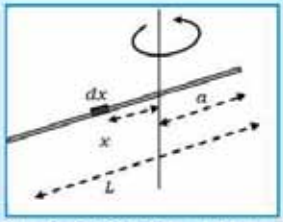
$$I = \sum_{i=1}^{n} (m_i r_i^2) \qquad (7.7)$$

Satuan momen inersia dalam satuan SI menurut persamaan 7.7 asalah kg.m^2. Dengan memasukkan persamaan 7.7 ke persamaan 7.6 diperoleh:

$$\tau = I\alpha \qquad (7.8)$$

Persamaan 7.8 tidak lain adalah bentuk hukum II Newton untuk gerak rotasi dan momen inersia pada gerak rotasi analog dengan massa m pada gerak tranlasi yaitu sebagai ukuran inersia dari benda yang berotasi. Namun perlu diingat bahwa massa benda yang bertranslasi selalu konstan selama kecepatannya tidak cukup besar, tetapi momen inersia tergantung pada sumbu rotasi yang dipilih, besarnya momen inersia berbeda untuk sumbu rotasi ynang berbeda. Torsi dan gaya, keduanya merupakan besaran vektor, dan torsi pada persamaan 7.8 adalah resultan torsi yang bekerja pada benda dengan momen inersia total I dan semua bagian dari benda yang berotasi mempunyai percepatan anguler sebesar α.

Momen inersia benda tegar yang tak dapat dibagi-bagi secara diskrit dapat ditentukan dengan mengaplikasikan konsep integral. Contoh: momen inersia sebuah batang homogen yang tegar, bermassa m, yang berotasi terhadap sebuah sumbu yang tegak lurus batang dan memotong batang pada jarak x dari salah satu ujungnya dapat dihitung dari gambar 7.10 . Batang homogen maka



Gambar 7.10. *Sebuah batang panjang L berotasi terhadap sumbu tegak yang berjarak a dari salah satu ujung.*

massa batang per satuan panjang besarnya tetap yaitu $\mu = \frac{m}{L}$ kg/m. Besarnya massa dari bagian batang yang panjangnya dx (panjang dx cukup kecil) adalah $dm = \mu dx$.

Besarnya momen inersia dari batang yang massanya dm yang berjarak x dari sumbu rotasi adalah $dI = dm\, x^2 = \mu dx\, x^2$. Karena benda tidak dapat dibagi menjadi partikel-partikel maka momen inersia total dari seluruh batang adalah:

$$I = \int dI = \int_{-a}^{(L-a)} \mu x^2 dx = \mu \frac{1}{3} x^3 \Big|_{-a}^{L-a} = \frac{\mu}{3}\{(L-a)^3 - (-a)^3\}$$

Kemudian harga μ diganti dengan m/L sehingga:

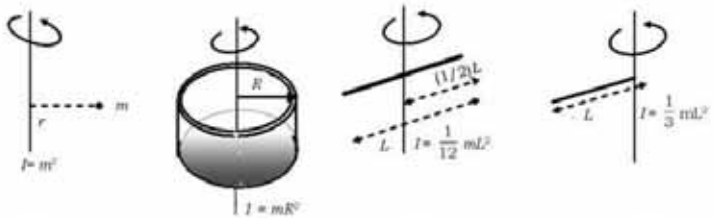
$$I_{batang} = \frac{m}{3L}\{(L-a)^3 - (-a)^3\}$$

Bila sumbu rotasi melewati titik di ujung batang maka $a = 0$ dan harga $I = \frac{m}{3L} L^3 = \frac{1}{3} mL^2$.

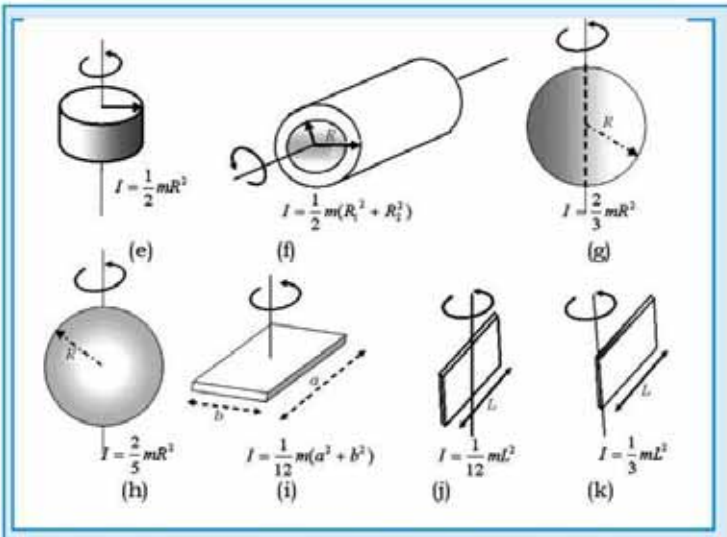
Tugas 7.2

Hitunglah momen inersia batang di atas bila sumbu rotasi melewati pusat massa batang (titik di tengah-tengah batang) dan melewati titik yang berjarak $(1/4)L$ dari salah satu ujungnya!

Pada gambar 7.11 ditunjukkan benda- benda yang teratur dan homogen yang berotasi terhadap sumbu tetap tertentu beserta momen inersia untuk masing-masing benda.



(a) (b) (c) (d)



Gambar 7.11 *Momen inersia (a) sebuah partikel massa m, berotasi berjarak r terhadap sumbu $I = mr^2$, (b) silinder tipis atau cincin terhadap sumbunya (c) batang tipis dengan sumbu lewat pusat massa (titik tengah batang), (d) batang tipis dengan sumbu lewat ujung batang, (e) dilinder pejal atau piringan terhadap sumbunya (f) silinder berongga dengan jari-jati R_1 dan R_2, (g) bola tipis berongga terhadap sumbunya (vertical), (h) bola pejal terhadap sembarang diameter, (i) plat persegi panjang terhadap sumbu yang lewat pusat massanya, (j) plat persegi panjang tipis terhadap sumbu yang terletak di pertengahan plat, (k) plat persegi panjang tipis dengan sumbu terletak pada sisi lebarnya.*

Sumbu rotasi yang biasanya dipilih untuk menentukan momen inersia benda yang bentuknya teratur pada gambar 7.11 adalah sumbu yang melewati pusat massa sedemikian hingga membagi massa dengan distribusi massa yang simetri. Bila sumbu rotasi tidak melewati pusat massa benda, tetapi dipilih sumbu rotasi sembarang yang sejajar dengan sumbu yang melewati pusat massa batang, maka besarnya momen inersia terhadap sumbu rotasi ini dapat ditentukan dengan teorema sumbu paralel yang dinyatakan sebagai:

$$I = I_{cm} + md^2 \qquad (7.9)$$

di mana I_{cm} adalah momen inersia benda terhadap sumbu yang lewat pusat massanya (sumbu simetri benda), d adalah jarak dari sumbu sembarang terhadap sumbu yang lewat pusat massa, dan m adalah massa total benda.

Sebagai contoh aplikasi dari teorema sumbu paralel, besarnya momen inersia batang terhadap sumbu yang lewat ujung batang adalah:

$I = I_{cm} + md^2$, $I_{cm} = \frac{1}{12}mL^2$ yang ditunjukkan pada gambar 7.11 (c), dan $d = \frac{1}{2}L$ maka $I_{ujung} = \frac{1}{12}mL^2 + m(\frac{1}{2}L)^2 = \frac{1}{3}mL^2$

Aplikasi Dinamika Rotasi

Aplikasi dinamika rotasi disajikan pada contoh soal berikut! Cermatilah contoh soal berikut untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian!

Contoh Soal 7.4

Seorang guru membuka pintu yang massanya 10 kg dengan mengerjakan gaya konstan sebesar 50 N secara tegak lurus pada pegangan pintu yang jaraknya 0,9 m dari engsel. Bila pintu tersebut panjangnaya 2,0 m dan lebarnya 1,0 m, berapakah besarnya percepatan anguler pintu?

Penyelesaian:

Dari soal di atas diketahui:

$m = 10$ kg, $F = 50$ N, $r_{\perp} = 0{,}9$ m, $p = 2{,}0$ m, $l = 1{,}0$ m

Ditanya:

Tentukan percepatan anguler pintu!

Pertama-tama kita harus menghitung momen inersia pintu dengan sumbu rotasi terletak pada tepi pintu yang ada engselnya, dengan menggunakan persamaan pada gambar 7.12(k) yaitu $I = \frac{1}{3}ml^2 = \frac{1}{3}10.(1{,}0)^2 = (10/3)$ kg.m^2

Dengan menggunakan persamaan: $\tau = r_{\perp}F = I\alpha$ maka

$$\alpha = \frac{0{,}9.50}{\frac{10}{3}} = 13{,}5 \text{ rad/s}^2$$

Contoh Soal 7.5

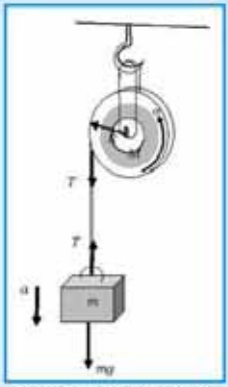
Sebuah balok yang massanya m tergantung pada seutas tali kuat yang dililitkan pada katrol licin yang berbentuk piringan tipis, jari-jarinya R dan massanya M. Bila balok yang dilepaskan dari keadaan diam, turun karena pengaruh gaya gravitasi. Tentukan percepatan balok! Abaikan massa tali!

Penyelesaian:

Kalau biasanya massa katrol diabaikan, pada soal ini massa katrol tidak diabaikan, maka percepatan linier balok tergantung pada percepatan sudut katrol karena bila balok bergerak menurun, tali yang terlilit pada katrol mengurai sehingga katrol berotasi. Hubungan antara percepatan linier balok dengan percepatan sudut katrol adalah:

$$a = R\alpha$$

Gaya tegangan tali bekerja pada katrol, maka besarnya torsi terhadap pusat katrol adalah $\tau = I\alpha$ di mana harga I :



Gambar 7.13 *Balok tergantung pada tali yang dililitkan pada katrol.*

$$I = \frac{1}{2}MR^2 \text{ dan } \tau = RT$$

Dari ketiga persamaan di atas diperoleh:

$$a = R\alpha = R\frac{\tau}{I} = \frac{TR^2}{\frac{1}{2}MR^2} = \frac{2T}{M}$$

Kemudian dengan menggunakan hukum II Newton untuk gerak balok :

$$mg - T = ma \text{ atau } mg - \frac{Ma}{2} = ma \Rightarrow a = \frac{m}{m + \frac{M}{2}}g$$

Bila pada hasil akhir harga M mendekati nol, maka besarnya perepatan yang dialami balok adalah percepatan gravitasi karena balok bergerak menurun hanya karena dipengaruhi gaya gravitasi.

Contoh Soal 7.6

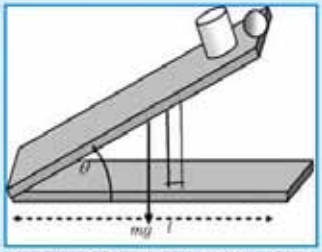
Dua buah papan yang lebarnya kecil dihubungkan dengan engsel sehingga salah satu papan dapat disetel sebagai bidang miring pada sudut kemiringan tertentu yang ditopang dengan sebuah tongkat pendek, lihat gambar 7.13! Kemudian sebuah bola besi diletakkan pada ujung papan yang agak cekung, sedangkan sebuah cangkir plastik diletakkan di atas papan pada posisi lebih bawah dari bola besi dan tetap menempel pada papan di posisinya. Bila penopang tongkat diambil secara tiba-tiba, maka pernyataan berikut yang benar adalah:

a. Papan, cangkir plastik, dan bola besi akan jatuh bersama-sama.
b. Bola jatuh ke dalam cangkir.
c. Bola jatuh di sebelah kanan cangkir.

Penyelesaian

Tinjau gerak yang dilakukan oleh papan beserta cangkir plastik tersebut lebih dahulu.

Bila penopang diambil, papan bergerak ke bawah bukan hanya karena gaya gravitasi, tetapi papan juga melakukan gerak rotasi karena ujung bawah papan yang miring dihubungkan dengan engsel dengan papan pada dasar bidang. Rotasi dari papan disebabkan oleh torsi yang dikerjakan oleh berat papan, maka besarnya torsi terhadap engsel adalah



Gambar 7.13. *Demontrasi sebuah bola dan cangkir pada bidang miring yang berotasi.*

$\tau = I\alpha$, di mana torsi $\tau = mg(\frac{l}{2}\cos\theta)$

dan momen inersia papan terhadap ujung papan adalah:

$I = \frac{1}{3}ml^2$ sehingga diperoleh: $\alpha = \frac{\frac{mgl}{2}\cos\theta}{\frac{ml^2}{3}} = \frac{3g\cos\theta}{2l}$ dan

besarnya percepatan tangensial di ujung papan atas adalah:

$a = l\alpha = \frac{3g\cos\theta}{2}$.

Karena papan bergerak ke bawah secara berotasi, maka besarnya komponen percepatan arah vertikal adalah:

$$a = \frac{3g\cos^2\theta}{2}$$

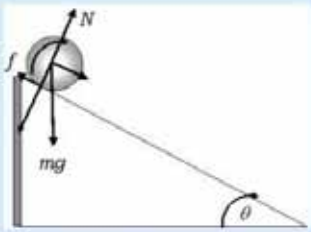
Supaya bola masuk ke cangkir, dan karena bola bergerak jatuh bebas dengan percepatan yang besarnya sama dengan percepatan gravitasi bumi, maka $a = \frac{3g\cos^2\theta}{2} > g$, yaitu cangkir bersama papan dulu yang jatuh baru kemudian bolanya. Jadi supaya bola jatuh ke cangkir, maka papan yang ditopang harus dimiringkan dengan sudut $\cos^2\theta > \frac{2}{3}$ atau $\theta < 35°$.

Tugas 7.3

Pada sudut berapa papan yang miring harus disetel supaya bola masuk ke cangkir plastik, bila bola diletakkan pada cekungan yang berada pada jarak (1/4) dari ujung atas papan dan cangkirnya tetap pada papan dekat bola?

Contoh Soal 7.7

Sebuah bola pejal yang massanya M dan jari-jarinya R dilepaskan dari puncak bidang miring yang permukaannya keras. Bola menggelinding tanpa selip dan hanya gaya gesek statis yang dikerjakan bidang pada bola. Tentukan percepatan pusat massa bola!



Gambar 7.14. *Bola mengelinding di atas bidang miring.*

Penyelesaian:

Seperti yang telah kita bicarakan pada konsep benda (bola atau silinder) yang menggelinding, pada titik kontak kecepatan bola nol, dan sumbu rotasi sesaat juga melalui titik kontak

tersebut. Ini berarti tidak ada gerak relatif antara bola dengan bidang miring. Karena tidak ada gerak relatif antara bola dengan bidang miring, maka gaya gesek yang dikerjakan oleh bidang miring pada bola adalah gaya gesek statis. Tanpa gaya gesek ini bola tidak menggelinding ke bawah. Gerak bola yang menggelinding ini dapat kita tinjau dengan mengunakan sumbu rotasi yang berbeda.

Bila kita memilih sumbu rotasi lewat pusat massa bola dan tegak lurus pada bidang kertas, maka satu-satunya gaya yang tidak lewat pusat bola adalah gaya gesek, maka besarnya torsi terhadap pusat massa bola adalah $\tau = Rf_s$ dan besarnya momen inersia bola terhadap sumbu yang lewat pusat massanya adalah: $I = \frac{2}{5}mR^2$.

Dengan menggunakan $\tau = I\alpha$, diperoleh hubungan:

$$Rf_s = \frac{2}{5}mR^2\,\alpha \Rightarrow f_s = \frac{2ma}{5}$$

Karena bola menggelinding, maka berlaku hubungan $a = R\alpha$, dan bola yang melaju turun pada bidang miring juga tunduk pada hukum II Newton, $mg \sin \theta - f_s = ma$.

Dengan menggunakan f_s yang dihitung sebelumnya diperoleh percepatan pusat massa bola, $a = \frac{5g\sin\theta}{7}$

Hasil ini juga bisa kalian peroleh dengan memilih sumbu rotasi sesaat yang melewati titik kontak bola dengan bidang miring. Coba kalian perhatikan gambar 7.15, satu-satunya komponen gaya yang tidak melewati titik kontak adalah komponen gaya berat bola yang sejajar bidang miring yaitu $mg \sin \theta$, kemudian kalian hitung momen torsi komponen gaya ini terhadap titik kontak, $\tau = Rmg \sin \theta$ dan hasilnya sama dengan momen inersia bola terhadap titik kontak dikalikan dengan percepatan sudut bola,

$I_k = I_{cm} + md^2 = \frac{2}{5}mR^2 + mR^2$. Jadi $R.\ mg \sin \theta = \frac{7}{5}mR^2\frac{a}{R}$

dan memberikan harga a sebagai $a = \frac{5g\sin\theta}{7}$.

Dari diskusi di atas, kalian dapat melihat bahwa percepatan bola yang menggelinding pada bidang miring hanya tergantung pada sudut kemiringan, tetapi tidak tergantung pada ukuran bola dan kerapatannya.

Tugas 7.4

Coba kalian hitung besarnya percepatan benda-benda yang menggelinding pada bidang miring yang sama sebagai berikut: silinder tipis yang berongga (cincin), bola yang berongga, dan silinder pejal.

D. Energi Kinetik dan Kerja pada Gerak Rotasi

Untuk menentukan energi kinetik sebuah benda yang berotasi terhadap sumbu tetap, kita dapat menggunakan asumsi tentang benda tegar yang berotasi yaitu semua partikel penyusun benda tegar mempunyai kecepatan anguler yang sama sebesar ω. Maka besarnya energi kinetik sebuah partikel yang massanya m dan besar kecepatannya $v = r\omega$, di mana r adalah jarak dari partikel ke sumbu rotasi, adalah

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mr^2\omega^2.$$

Bila benda tegar yang berotasi terdiri dari n partikel, maka jumlah total energi kinetik benda tegar tersebut adalah jumlah energi kinetik dari semua partikel yang dapat dinyatakan sebagai:

$$E_{k\,total} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}m_3v_3^2 + \frac{1}{2}m_4v_4^2 + \ldots + \frac{1}{2}m_nv_n^2$$

$$= \frac{1}{2}m_1r_1^2\omega^2 + \frac{1}{2}m_2r_2^2\omega^2 + \frac{1}{2}m_3r_3^2\omega^2 + \frac{1}{2}m_4r_4^2\omega^2 + \ldots + \frac{1}{2}m_nr_n^2\omega^2$$

$$\boxed{E_{k\,total} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(m_ir_i^2)\omega^2} \qquad (7.10)$$

Dengan menggunakan definisi pada persamaan 7.7 diperoleh:

$$\boxed{E_k = \frac{1}{2}I\omega^2} \qquad (7.11)$$

di mana E_k adalah energi kinetik total benda dan I adalah momen inersia total benda terhadap sumbu tetap tetap tersebut.

Seperti pada gerak translasi bahwa gaya yang dikerjakan pada sebuah benda akan melakukan kerja yang menyebabkan terjadinya perubahan energi kinetik. Pada gerak rotasi yang disebabkan oleh torsi yang besarnya tetap, maka torsi tersebut akan melakukan kerja dan juga mengubah energi kinetik benda yang bergerak rotasi.

Kerja pada gerak Rotasi

Misalnya sebuah gaya F tangensial dikerjakan pada benda yang bergerak sepanjang busur s maka besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya tersebut adalah:

$$W = F\,s = F\,r\,\theta = t\,\theta \qquad (7.12)$$

di mana θ dalam radian.

Besarnya daya, yang didefinisikan sebagai kerja persatuan waktu, pada gerak rotasi dapat dijabarkan dari persamaan 7.12, adalah

$$P = \frac{W}{t} = \tau\frac{\theta}{t} = \tau\omega \qquad (7.13)$$

Sedangkan bila persamaan 7.8 dimasukkan ke dalam persamaan 7.12 maka kita akan memperoleh $W = I\alpha\theta$. Menurut persamaan gerak pada gerak rotasi $\omega_t^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta$, maka kerja pada gerak rotasi dapat dinyatakan sebagai:

$$W = \frac{1}{2}I(\omega_t^2 - \omega_0^2) = E_{k_t} - E_{k_0} \qquad (7.14)$$

di mana berdasarkan persamaan 7.11 bahwa kerja yang dilakukan torsi pada gerak rotasi sama dengan kenaikan energi kinetik gerak rotasi, yang sesuai dengan teorema kerja-energi kinetik.

E. Momentum Sudut

Besaran yang penting lainnya dalam pembicaraan gerak rotasi adalah mometum sudut. Kalian sudah memahami konsep hubungan momentum linear dengan gaya. Demikian juga diharapkan hal yang serupa adanya hubungan antara momentum sudut dengan torsi. Torsi didefinisikan sebagai perkalian antara lengan gaya dengan gaya, sedangkan momentum sudut (L) adalah perkalian lengan gaya dengan momentum linier. Untuk partikel bermassa m yang mempunyai kecepatan linier sebesar v maka besarnya momentum linier adalah $p = mv$ padahal untuk partikel yang berotasi terhadap sumbu tetap $v = r\omega$, maka besarnya momentum sudut adalah:

$$L = r_\perp p = mr_\perp v = mr_\perp^2\omega \qquad (7.15)$$

Di mana $r_\perp$ adalah lengan gaya yaitu jarak tegak lurus dari partikel ke sumbu rotasi dan ω adalah kelajuan sudut rotasi. Untuk gerak melingkar $r_\perp = r$, dan v tegak lurus terhadap r. Dari persamaan 7.15 dapat ditunjukkan bahwa satuan dari momentum sudut adalah kg.m^2/s.

Untuk sistem partikel pada benda tegar, besarnya momentum sudut total adalah:

$$L = (\Sigma m_i r_i^2)\omega = I\omega \qquad (7.16)$$

Di mana r_i adalah jarak tegak lurus partikel ke i yang massanya m_i. Secara vektor momentum sudut bisa dituliskan sebagai:

$$\vec{L} = I\vec{\omega} \qquad (7.17)$$

Jadi, $\vec{L}$ searah dengan kecepatan sudut ($\vec{\omega}$)yang diberikan oleh aturan tangan kanan.

Untuk gerak linear, momentum berkaitan dengan gaya $\vec{F} = \Delta\vec{p}/\Delta t$. Sedangkan hubungan momentum sudut dengan torsi secara mudah dapat ditunjukkan dengan:

$$\vec{\tau} = I\vec{\alpha} = \frac{I\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{\Delta(I\vec{\omega})}{\Delta t}$$

$$\vec{\tau} = \frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t} \qquad (7.18)$$

Berdasarkan persamaan 7.18 dapat dikatakan bahwa torsi adalah perubahan momentum sudut per satuan waktu.

Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Persamaan 7.17 adalah resultan besarnya torsi yang didapatkan dari penurunan hubungan torsi dengan percepatan sudut untuk benda tegar dengan momen inersia yang konstan. Jika sistem partikel tidak berupa benda tegar, pers.amaan 7.17 tetap dapat digunakan.

Bagaimana menurut analisis kalian, jika dalam sistem partikel benda tegar torsinya nol atau percepatan sudut pada benda tegar nol? Jika resultan torsi pada sebuah sistem sama dengan nol, maka persamaan 7.17 dapat ditulis kembali:

$$\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t}, \tau = 0 \Rightarrow \Delta n = 0$$

$$\Delta L = L - L_0 = I\omega - I_0\omega_0 = 0$$

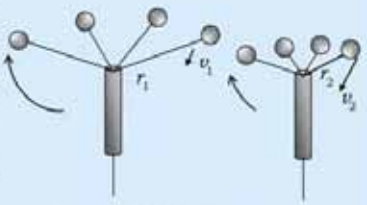
$$I\omega = I_0\omega_0 \qquad (7.19)$$

Persamaan 7.19 merupakan bentuk persamaan hukum kekekalan momentum sudut, yaitu jika tidak ada faktor luar yang menyebabkan torsi tidak dalam kesetimbangan, maka jumlah momentum sudut total dalam sistem tetap konstan, walaupun momen inersia dan kecepatan sudut sistem berubah.

Untuk benda tegar dengan momen inersia konstan (I=I_0), maka kelajuan sudutnya juga konstan (ω=ω_0) bila resultan torsinya sama dengan nol. Namun, bila ada kemungkinan terjadi perubahan momen inersia, maka akan memberikan perubahan kecepatan sudut jika tidak ada pengaruh dari luar.

Contoh Soal 7.8

Sebuah bola diikatkan pada salah satu ujung tali, sedangkan ujung tali yang lain dimasukkan dalam sebuah tabung. Bola diputar sehingga bola tersebut melakukan gerakan melingkar, lihat gambar 7.15. Ketika tali ditarik ke bawah melalui tabung tersebut, kelajuan sudutnya bertambah besar.



Gambar 7.15. *Hukum kekekalan momentum sudut*

a. Apakah ini akibat dari torsi yang dikarenakan tarikan gaya?
b. Bila bola semula melakukan gerak melingkar dengan jari-jari 0,40 m dengan kelajuan 2,8 m/s, berapa kelajuan tangensial jika tali ditarik ke bawah cukup jauh sehingga jari-jarinya berkurang sampai 0,20 m?

Penyelesaian:

Berdasarkan analisis data, maka
Diketahui:
r_1 = 0,40 m
r_2 = 0,20 m
v_1 = 2,8 m/s

Ditanya:

a. Apakah torsi penyebab perubahan kelajuan sudut?
b. Tentukan kelajuan tangensial akhir (v_2)!

Jawab:

a. Perubahan kecepatan sudut atau percepatan sudut tidak disebabkan oleh torsi dikarenakan adanya tarikan tali ke bawah. Gaya pada bola yang ditransmisikan lewat tali bekerja melalui sumbu rotasi, sehingga nilai torsinya sama dengan nol. Saat tali ditarik ke bawah, momen inersia bola ($I=mr^2$) berkurang dan menyebabkan kecepatan bola naik. Karena tidak adanya torsi luar, maka momemtum sudut bola tetap konstan.

b. Karena momentum sudut konstan, maka berdasarkan persamaan 7.19 kita dapatkan:

$I_1 w_2 = I_1 W_2\ r_1^2.v_1 r_1 = r^2.v_2 r_2 = r_1^3.\ 2{,}8 = \frac{1}{8} r_1^3.v_2\ \ v_2 = 2{,}8\ .\ 8 = 22{,}4$ m/s

Jadi, jika jarak tali memendek maka kecepatan bertambah. Hal ini dapat kalian gunakan untuk memahami konsep hukum luasan dari Keppler. Sebuah planet yang berevolusi mengitari matahari memiliki momentum sudut yang kekal, karena gaya tarik dari Matahari tidak menimbulkan torsi pada planet tersebut dan kita dapat mengabaikan torsi yang disebabkan oleh planet-planet yang lain. Jadi, pada saat planet mendekati matahari dalam orbit ellips, lengan gayanya pendek (jarak terpendek dengan matahari = perihelium), maka planet mempunyai kelajuan terbesar. Sebaliknya saat planet pada jarak terjauh (aphelium), maka kelajuan planet mempunyai harga terkecil.

Contoh Soal 7.9

Sebuah bola pejal homogen dengan jari-jari 0,3 m dan massanya 15 kg berotasi terhadap sumbu z melalui pusat massanya. Perhatikan gambar 7.17. Tentukan momentum sudut ketika kecepatan sudutnya 3 rad/s²!

Penyelesaian:

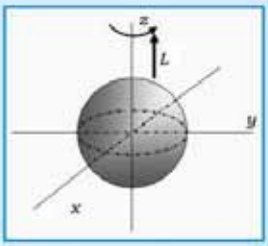
Dari data pada soal didapatkan:

Diketahui:

R = 0,30 m
M = 15 kg
ω = 3,0 rad/s

Ditanya:

Mometum sudut (L)?



Gambar 7.16. *Rotasi bola*

Jawab:

Momen Inersia bola pejal terhadap sebuah sumbu rotasi yang melalui pusat massa:

$$I = \frac{2}{5}MR^2 = \frac{2}{5}(15\text{ kg})(0{,}3\text{ m})^2 = 0{,}54\text{ kg.m}^2$$

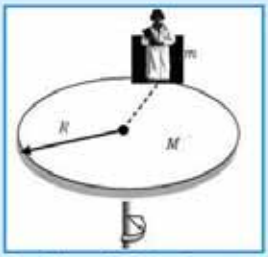
Besarnya momentum sudut,

$$L = I\omega = (0{,}54\text{ kg.m}^2)(3\text{ rad/s}) = 1{,}62\text{ kg.m}^2/\text{s}$$

Contoh Soal 7.10

Pada sebuah papan mendatar berbentuk lingkaran dengan massa 125 kg dan jari-jari 2,5 m, seseorang bermassa 50 kg berjalan perlahan-lahan dari tepian papan menuju ke pusat rotasi. Saat orang mulai berjalan kecepatan sudut sistem adalah 2 rad/s, lihat gambar 7.17!

a. Tentukan besarnya kecepatan sudut ketika orang tersebut berada 0,5 m dari pusat papan!
b. Hitung energi kinetik awal dan akhir!



Gambar 7.17 *Seorang berjalan di atas papan yang berputar menuju pusat rotasi.*

Penyelesaian:

Berdasarkan data dari soal dan gambar 7.17 maka:

Diketahui:

$m_{papan} = 125$ kg
$R_{papan} = 2{,}5$ m
$m_{seorang} = 50$ kg
$\omega_{awal} = 2$ rad/s

Ditanya:

a. Kecepatan sudut papan saat orang berada pada 0,5 m dari pusat (ω_2)?
b. Energi kinetik awal dan akhir?

Jawab:

a. Jika momen inersia dari papan I_p dan momen inersia seorang tersebut I_s, maka momen inersia total sistem tersebut:

$$I_{total(awal)} = I_p + I_s = \frac{1}{2}MR^2 + mR^2$$

Ketika orang berjalan dengan posisi $r < R$ momen inersianya berkurang:

$$I_{total(akhir)} = \frac{1}{2}MR^2 + mr^2$$

Karena tidak ada torsi luar, maka dalam sistem tersebut tetap konstan:

$$I_{total(awal)}\omega_{awal} = I_{total(akhir)}\omega_{akhir}$$

$$\omega_{akhir} = \frac{(1/2)MR^2 + mR^2}{(1/2)MR^2 + mr^2}\omega_{awal}$$

$$= \frac{(1/2)(125\text{ kg})(2{,}5\text{ m})^2 + (50\text{ kg})(2{,}5\text{ m})^2}{(1/2)(125\text{ kg})(2{,}5\text{ m})^2 + (50\text{ kg})(0{,}5\text{ m})^2}2\text{ rad/s}$$

$$\omega_{akhir} = \frac{390{,}63\text{ kg m}^2 + 312{,}50\text{ kgm}^2}{403{,}13\text{ kg.m}^2}2\text{ rad/s}$$

$$= \frac{703{,}13}{403{,}13}2{,}0\text{ rad/s} = 3{,}5\text{ rad/s}$$

b. $E_{k.awal} = (1/2)I_{awal}\omega^2$

$E_{k.awal} = (1/2)(703.13\text{ kg m}^2)(2\text{ rad/s})^2 = 1406\text{ J}$

$E_{k.awal} = (1/2)I_{akhir}\omega^2$

$E_{k.awal} = (1/2)(403.13\text{ kg m}^2)(3{,}5\text{ rad/s})^2 = 2469\text{ J}$

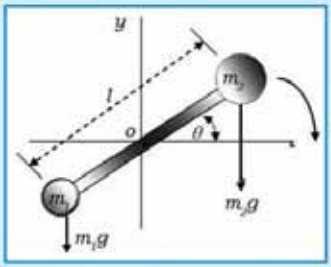
Karena energi kinetik akhir bertambah, maka ada perubahan energi yang dilakukan seorang yang berjalan ke sistem.

Contoh Soal 7.11

Sebuah batang tegar yang mempunyai massa M dan panjang l berotasi dalam bidang vertikal terhadap titik tumpu di pusat massa batang yang gaya geseknya diabaikan. Partikel bermassa m_1 dan m_2 ditempelkan pada kedua ujung batang, lihat gambar 7.18.

a. Tentukan momentum sudut jika kecepatan sudutnya adalah ω!

b. Tentukan percepatan sudut pada sistem saat batang membuat sudut θ terhadap bidang horisontal!



Gambar 7.18. *Rotasi batang*

Penyelesaian:

Dari data soal dan gambar maka, diketahui:

$L_{\text{batang}} = l$
$m_{\text{batang}} = M$
$m_{\text{partikel}} = m_1$
$m_{\text{partikel}} = m_2$

Ditanya:

a. momentum sudut (L)!

b. tentukan percepatan sudut saat batang membentuk sudut θ terhadap bidang horisontal!

Jawab:

a. Momen inersia dalam sistem di atas sama dengan jumlah momen inersia dari ketiga komponen yaitu batang, m_1, dan m_2. Momen inersia total sistem terhadap sumbu z melalui 0, adalah:

$$I = \frac{1}{12}Ml^2 + m_1(l/2)^2 + m_2(l/2)^2 = \frac{l^2}{4}\left(\frac{M}{3} + m_1 + m_2\right)$$

Besarnya momentum sudutnya adalah:

$$L = I\omega = \frac{l^2}{4}\left(\frac{M}{3} + m_1 + m_2\right)\omega$$

b. Torsi dikerjakan $m_1 g$ terhadap titik tumpu (0) adalah:

$$\tau_1 = m_1 g \frac{l}{2} \cos\theta$$ (arah ke luar bidang)

Torsi dikarenakan $m_2 g$ terhadap titik tumpu (0):

$$\tau_2 = -m_2 g \frac{l}{2} \cos\theta$$ (arah ke dalam bidang)

Torsi totalnya:

$\tau_{tot} = \tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{2}(m_1 - m_2) g l \cos\theta$ (jika $m_1 > m_2$, maka torsi masuk dalam bidang dan jika sebaliknya torsi keluar bidang)

Untuk menemukan percepatan anguler:

$$\tau = I\alpha \rightarrow \alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{2(m_1 - m_2) g \cos\theta}{l[(M/3) + m_1 + m_2)}$$

Dari hasil perhitungan, ditunjukkan bahwa percepatan sudut ditentukan oleh besar kecilnya nilai m_1 dan m_2 serta sudut θ. Jika sudut $\theta = 0^\circ$ atau À (posisi horisontal) maka harga percepatan sudutnya maksimum. Sebaliknya jika $\theta = \pi/2$ atau $-\pi/2$ (posisi vertikal), maka percepatan sudut sama dengan nol.

Rangkuman

Rotasi Benda Tegar dan Kesetimbangan

1. Benda tegar adalah benda atau sistem partikel yang jarak antara partikel-partikelnya selalu tetap walaupun benda melakukan gerak translasi, rotasi atau keduanya.
2. Bila benda tegar (bola atau silinder) bergerak translasi dan rotasi (menggelinding) tanpa selip (tergelincir), maka kelajuan pusat massa benda dinyatakan sebagai:

$$v_{cm} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{r\Delta\theta}{\Delta t} = r\omega.$$

Besarnya percepatan pusat massa bola/silinder yang menggelinding tanpa selip adalah:

$$a_{cm} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{r\Delta\omega}{\Delta t} = r\alpha .$$

4. Kelajuan (rerata) perubahan rotasi tidak hanya tergantung pada besarnya gaya yang bekerja tetapi juga pada jarak tegak lurus dari sumbu rotasi ke garis kerja gaya, $r_\perp$, besarnya $r_\perp = r\sin\theta$.
5. Besarnya torsi adalah:

   $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{r}_\perp \vec{F} = (r\sin\theta)F = rF\sin\theta$.
6. Besarnya momentum sudut dirumuskan:

   $I\vec{\omega} = I_0\vec{\omega}_0$

   $L = (\sum m_i r_i^2)\omega = I\omega$.
7. Secara vektor, momentum sudut bisa dituliskan sebagai: $L = I\omega$.
8. Hubungan momentum sudut dengan torsi ditunjukan dengan:

   $$\tau = I\alpha = \frac{I\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\Delta(I\omega)}{\Delta t}$$

   $$\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

   $$L = r_\perp p = mr_\perp v = mr_\perp^2\omega$$

   $$W = Fs = Fr\theta = t\theta$$

   di mana θ dalam radian.
9. Besarnya daya, yang didefinisikan sebagai kerja per satuan waktu, pada gerak rotasi dirumuskan:

   $$P = \frac{W}{t} = \tau\frac{\theta}{t} = \tau\omega .$$
10. Kerja pada gerak rotasi dapat dinyatakan sebagai:

    $$W = \frac{1}{2}I(\omega_t^2 - \omega_0^2).$$

11. Bila sumbu rotasi tidak melewati pusat massa benda tetapi dipilih sumbu rotasi sembarang yang sejajar dengan sumbu yang melewati pusat massa batang, maka besarnya momen inersia terhadap sumbu rotasi ini dapat ditentukan dengan teorema sumbu paralel yang dinyatakan sebagai:

$$I = I_{cm} + md^2$$

$$I = \sum_{i=1}^{n} (m_i r_i^2).$$

12. Hubungan antara torsi dengan momen inersia sebagai $\tau = I\alpha$.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Sebuah benda dikatakan dalam kesetimbangan mekanik, maka . . . .
   a. jumlah gaya yang bekerja pada benda tersebut nol
   b. resultan torsi pada benda tersebut nol
   c. jumlah semua gaya yang bekerja pada benda tersebut nol, tetapi resultan torsinya tidak nol
   d. jumlah semua gaya yang bekerja pada benda tersebut tidak nol, tetapi resultan torsinya nol
   e. jumlah semua gaya yang bekerja pada benda tersebut nol dan resultan torsinya juga nol
2. Sebuah benda disebut benda tegar bila jarak antara partikel-partikel yang menyusun benda tersebut selalu tetap, maka . . . .
   a. bila benda tegar melakukan gerak rotasi, semua partikelnya mempunyai kelajuan anguler yang sama besar
   b. bila benda tegar melakukan gerak rotasi, semua partikelnya mempunyai kelajuan linier yang sama besar

c. bila benda tegar melakukan gerak translasi dengan kelajuan konstan, maka semua partikel mempunyai kelajuan anguler yang sama besar
d. bila benda tegar melakukan gerak translasi dan rotasi tanpa selip, setiap partikel mempunyai kelajuan anguler yang berbeda
e. bila silinder pejal melakukan gerak rotasi dan translasi, maka silinder tersebut mempunyai dua sumbu rotasi yang satu lewat pusat massa yang searah dengan arah translasi, sedangkan yang lain adalah garis pada selimut silinder dan lewat titik kontak antara silinder dengan bidang datar tempat silinder menggelinding

3. Bila sebuah bola bowling dilepaskan dengan kecepatan linier arah mendatar, maka . . . .
   a. bola hanya akan melakukan gerak translasi saja
   b. bola hanya akan melakukan gerak rotasi saja
   c. pada saat bola menyentuh lantai, bola selip, sehingga mengalami gaya gesek dari lantai yang menyebabkan bola mengalami percepatan anguler dan percepatan linier yang negatif
   d. bila bola bergerak tanpa selip, maka percepatan angulernya nol
   e. bila bola bergerak tanpa selip, maka percepatan liniernya nol

4. Bila sebuah benda dalam kesetimbangan labil diberi sedikit simpangan maka . . . .
   a. energi potensial gravitasi benda tersebut bertambah
   b. energi potensial gravitasi benda tersebut berkurang
   c. posisi pusat berat benda tersebut bertambah tinggi
   d. besarnya kerja yang dilakukan terhadap benda tersebut nol
   e. benda tersebut cenderung bergerak menuju titik kesetimbangannya

5. Prinsip pokok dari hukum kekekalan momentum anguler adalah bahwa besarnya momentum anguler benda yang melakukan gerak rotasi terhadap sumbu tertentu adalah konstan apabila tidak ada gaya luar yang dikerjakan pada benda tersebut. Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .

a. bumi yang melakukan gerak mengitari matahari tunduk pada hukum kekekalan momentum
b. momentum anguler sebuah partikel didefinisiksn sebagai hasil kali secara vektor antara vektor posisi dengan momentum linier partikel tersebut
c. bila seorang anak yang massanya 30 kg duduk di atas kuda yang berjarak 1m dari sumbu rotasi komedi putar yang berotasi dengan kelajuan anguler 2 rad/s, maka momentum anguler anak tersebut adalah 60 Js
d. pada saat bumi berada pada titik terjauh dari matahari, maka kelajuan bumi mengelilingi matahari minimum
e. semua jawaban di atas benar

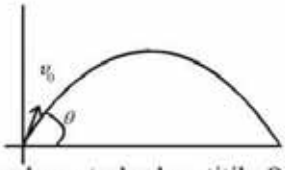
6. Empat buah benda yang berupa silinder pejal, silinder tipis, bola pejal, dan bola tipis mempunyai massa dan jari-jari yang sama. Bila ke empat benda tersebut dilepaskan dari puncak bidang miring yang sama dari keadaan diam, maka urut-urutan benda yang percepatan dari yang terbesar sampai yang terkecil adalah . . . .
   a. silinder pejal, silinder tipis, bola pejal, dan bola tipis
   b. bola pejal, silinder pejal, bola tipis, dan silinder tipis
   c. bola pejal, silinder pejal, silinder tipis, dan bola tipis
   d. silinder tipis, bola pejal, silinder pejal, dan bola tipis
   e. bola pejal, bola tipis, silinder pejal, dan silinder tipis

7. Sebuah partikel yang melakukan gerak melingkar beraturan, maka . . . .
   a. momentum linier dan momentum anguler terletak pada satu bidang
   b. momentum anguler hanya tegak lurus pada momentum linier
   c. momentum anguler hanya tegak lurus pada jari-jari lingkaran
   d. momentum anguler tegak lurus pada momentum linier dan jari-jari lingkaran
   e. momentum anguler sejajar dengan momentum linier

8. Bila sebuah bandul disimpangkan dari posisi kesetimbangannya dan kemudian dilepaskan, maka . . . .
   a. besarnya momentum anguler bandul terhadap pusat rotasinya tidak konstan
   b. besarnya torsi berbanding terbalik dengan sudut simpangan

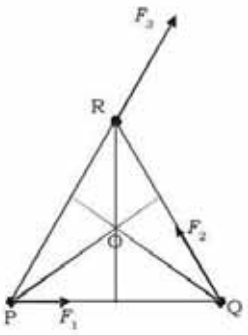
c. besar torsi maksimum ketika sudut simpangannya dan percepatan tangensialnya maksimum
d. besar momentum anguler maksimum ketika simpangan sudut dan percepatan sudutnya maksimum
e. tidak ada jawaban yang benar

9. Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan awal v_0 dan sudut elevasi θ, lihat gambar di disamping! Bila peluru hanya dipengaruhi oleh gaya gravitasi, maka . . . .



a. Besarnya momentum anguler peluru terhadap titik O selalu tetap
b. Besarnya momentum anguler terhadap titik O maksimum pada saat peluru mencapai titik tertinggi
c. Besarnya torsi pada peluru maksimum pada saat peluru mencapai titik tertinggi
d. Torsi yang bekerja pada benda didefinisikan sebagai perubahan momentum anguler persatuan panjang
e. Besarnya momentum anguler dan torsi maksimum pada saat peluru jatuh kembali ke tanah

10. Bila pada titik-titik sudut segitiga PQR sama sisi dikerjakan gaya yang searah dengan arah masing-masing sisi, lihat gambar! Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .



a. besarnya torsi terhadap titik O nol bila $F_1 + F_2 = F_3$
b. besarnya torsi terhadap titik P selalu nol
c. besarnya torsi terhadap titik Q selalu nol
d. besarnya torsi terhadap titik R selalu nol
e. semua jawaban di atas salah

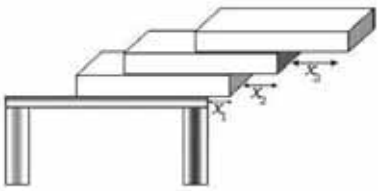
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Sebuah cakram yang jari-jarinya 0,25 m menggelinging tanpa selip di atas bidang datar dengan kelajuan anguler 2 rad/s.
   a. Tentukan kelajuan linier pusat massa cakram!
   b. Tentukan kelajuan tangensial di titik pada keliling cakram yang teratas!

2. Sebuah cakram yang jari-jarinya 20 cm menggelinding di atas bidang datar dengan kelajuan anguler 0,5 rad/s. Bila cakram mengalami percepatan linier yang konstan sebesar 0,03 m/s tanpa selip sehingga kelajuan angulernya berubah menjadi 3,5 rad/s, tentukan banyaknya putaran yang dialami cakram selama percepatan diberikan pada cakram!

3. Seseorang membuka pintu masuk kantor dengan cara mendorongnya secara tegak lurus dengan gaya 40 N pada pegangan pintu yang berjarak 1 m dari engsel. Tetapi staff kantor yang lain mendorong pintu tersebut pada jarak 0,75 m dari engsel, tentukan berapa gaya yang dikenakan oleh staff tersebut pada pintu!

4. Suatu sistem dikatakan setimbang bila titik berat semua benda bagian atas masih terletak di atas benda yang berada paling bawah (dasar). Bila tiga buah batu bata yang identik ditumpuk, lihat gambar. Tentukan panjang x_1 dan x_2 agar tumpukan tidak runtuh (setimbang stabil)!



5. Dua buah balok, masing-masing massanya 0,8 kg dan 1,2 kg, tergantung pada ujung-ujung tali yang dilewatkan pada katrol tetap. Bila katrol mempunyai jari-jari 0,2 m dan massanya 0.3 kg, dan tidak ada gaya gesek antara katrol dengan sumbunya, tentukan percepatan kedua balok yang tergantung tersebut!

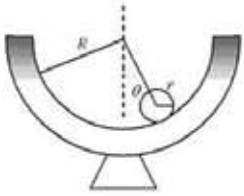
6. Sebuah cincin menggelinding di atas bidang miring tanpa selip. Tentukan sudut miring terbesar sebagai fungsi koefisien gesekan statik!

7. Sebuah bola bowling yang jari-jarinya R dan massanya M dilemparkan dengan kecepatan anguler ω_0. Pada saat menyentuh lantai bola selip sehingga bola mengalami percepatan linier dan setelah waktu t bola mulai menggelinding. Bila koefisien gesekan statik antara bola dengan lantai μ_s tentukan t!

8. Tentukan momen inersia dari:
   a. dua buah batang identik yang dibentuk seperti huruf L terhadap sumbu rotasi yang melewati pusat massa batang tersebut dan lewat salah satu ujung batang!
   b. Sebuah batang yang panjangnya L dan sebuah bola yang dipasang pada ujung batang yang jari-jarinya R dan massanya M terhadap sumbu rotasi yang lewat ujung batang yang bebas!

9. Sebuah batang yang panjangnya L massanya M terletak di atas lantai yang licin. Tiba-tiba sebuah peluru yang massanya m melaju dengan kecepatan v menumbuk pusat batang tersebut. Tentukan kecepatan linier dan anguler batang setelah tumbukan bila tumbukannya elastis!

10. Sebuah bola yang jari-jarinya r diletakkan di dalam mangkok yang berbentuk setengah bola yang jari-jarinya R. Bola dilepaskan dari keadaan diam pada saat garis hubung pusat bola dan pusat mangkok membentuk sudut dengan arah vertikal. Tentukan kelajuan anguler bola pada saat mencapai titik di dasar mangkok!



Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab VIII



Fluida

Tujuan pembelajaran
Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menganalisis dan menjelaskan hukum-hukum yang berhubungan dengan fluida statis dan dinamis, serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:
1. Volume
2. Tekanan
3. Kecepatan alir

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:
1. Tekanan dan prinsip Pascal.
2. Prinsip Archimedes.
3. Tegangan permukaan dan kapilaritas.
4. Adhesi dan kohesi.
5. Dinamika fluida dan prinsip Bernoulli.
6. Viskositas, hukum Poiseuille dan bilangan Reynolds.

Pernahkah kalian mengamati air yang menetes? Mengapa tetesan air tersebut berbentuk bola? Dan mengapa udara dapat mengisi seluruh ban? Pada bab ini kita akan mempelajari fenomena-fenomena yang berhubungan dengan fluida. Fluida merupakan zat yang dapat mengalir. Oleh karena itu fase cair dan fase gas disebut fluida.

A. Tekanan dan Prinsip Pascal

Bila sebuah gaya dikenakan pada benda, maka benda tersebut akan mengalami suatu perubahan, misalnya: kecepatan, tegangan atau regangan geser, dan juga dapat melakukan kerja atau usaha. Pada benda padat kita bisa mengaplikasikan sebuah gaya lewat titik kontak, namun pada fluida hal ini sulit dilakukan. Untuk fluida (zat cair dan gas), gaya harus dikenakan pada seluruh luasan permukaan agar mudah dianalisis secara fisika. Gaya biasanya dinyatakan dalam tekanan atau gaya per satuan luas, yaitu:

$$P = \frac{\vec{F}}{A} \qquad (8.1)$$

Dalam satuan SI tekanan dinyatakan dalam newton/meter^2 (N/m^2) atau pascal (Pa) dimana 1 Pa=1 N/m^2.

Pada Persamaan 8.1 diasumsikan bahwa gaya yang bekerja pada zat cair tegak lurus terhadap permukaannya. Jika gaya yang dikenakan pada benda membentuk sudut θ dengan garis normal bidang permukaan benda, maka besarnya tekanan pada bidang permukaan adalah:



Gambar 8.1. *Tekanan tergantung pada sudut antara gaya dan bidang permukaan*

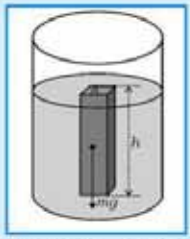
$$P = \frac{\vec{F}_{\perp}}{A} = \frac{F\cos\theta}{A} \qquad (8.2)$$

Karena tekanan yang dihasilkan gaya luar arahnya selalu tegak lurus pada bidang permukaan, maka arah tekanan selalu mempunyai arah yang berlawanan dengan arah normal bidang, maka tekanan merupakan besaran vektor. Persamaan 8.2 menunjukkan bahwa besar kecilnya nilai P tergantung pada sudut yang dibentuk oleh gaya yang dikenakan pada permukaan. Untuk mendapatkan P maksimum maka arah gaya harus tegak lurus pada bidang permukaan, atau membentuk sudut nol dengan normal bidang permukaan.

1. Tekanan dan Kedalaman

Pada saat menyelam, kalian akan merasakan tekanan bertambah besar bila menyelam semakin dalam. Hal ini bisa dirasakan oleh telinga saat mengalami perubahan tekanan akibat perubahan kedalaman. Peristiwa yang sama juga bisa dibedakan oleh telinga saat kalian naik ke daerah pegunungan, di mana tekanan akan berkurang seiring dengan ketinggian tempat.

Untuk mendemonstrasikan hubungan antara tekanan dan kedalaman pada fluida bisa kalian lihat pada gambar 8.2. Jika air dalam posisi diam (kesetimbangan statis), maka di semua titik pada kedalaman yang sama mempunyai tekanan yang sama. Sebaliknya, jika ada perbedaan tekanan pada fluida, maka akan menimbulkan pergerakan fluida tersebut (misalkan pergerakan angin atau air dalam sungai).



Gambar 8.2 *Hubungan tekanan dan kedalaman.*

Perhatikan bagian zat cair yang terkandung dalam volume yang berbentuk balok yang tingginya h. Karena dalam keadaan setimbang statis, maka jumlah semua gaya pada satu titik adalah nol. Gaya pada permukaan bagian bawah balok, baik yang dari bawah maupun yang dari atas harus sama besar. Karena gaya yang arahnya ke bawah pada permukaan balok bawah sama dengan gaya berat zat cair dalam balok, maka gaya yang arahnya ke atas yang berasal dari zat cair bagian bawah adalah $\vec{F} = W = mg$. Bila ρ adalah kerapatan benda cair, dan luas bidang permukaan balok adalah A, maka:

$$\vec{F} = mg = \rho Vg = \rho hgA \qquad (8.3)$$

Substitusikan persamaan 8.3 ke persamaan 8.1, maka diperoleh:

$$PA = \rho hgA$$
$$P = \rho gh \qquad (8.4)$$

Persamaan 8.4 menunjukkan bahwa tekanan pada setiap titik sepanjang garis horisontal pada kedalaman h sama besar.

Penurunan persamaan 8.4 tidak memperhitungkan tekanan pada permukaan zat cair dari gaya luar, misalnya tekanan udara. Maka besarnya tekanan total pada semua titik pada kedalaman h adalah:

$$P = P_0 + \rho gh \qquad (8.5)$$

Di mana P_0 adalah tekanan pada permukaan zat cair bagian atas, ... $h = 0$. Persamaan 8.5 hanya berlaku untuk daerah yang kerapatan udaranya konstan.

Untuk kontainer (wadah besar berisi zat cair) terbuka, maka P_0 adalah tekanan atmosfer atau berat udara per satuan luas yang dikenakan udara di atas permukaan zat cair. Tekanan atmosfer rata-rata didefinisikan sebagai tekanan udara yang diukur dengan barometer air raksa, di mana besarnya tekanan udara sama dengan tekanan dari air raksa setinggi 76 cm, maka

$$1 \text{ atm (atmosfer)} = \rho_{Hg}\, g\, (76 \text{ cm}) = (13600 \text{ kg/m}^3)(9{,}8 \text{ m/s}^2)(0{,}76 \text{ m})$$
$$= 101{,}325 \text{ kPa} = 1{,}01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Contoh Soal 8.1

Seorang penyelam menyelam di suatu danau pada kedalaman 10,0 m.

a. Berapa tekanan pada punggung penyelam yang dilengkapi peralatan dengan luas permukaan segi empat dengan ukuran 70,0 cm × 60,0 cm?

b. Berapa besarnya gaya pada punggung belakang yang disebabkan oleh tekanan air itu sendiri?

Penyelesaian:

Berdasarkan data dari soal di atas, maka:

Diketahui:

$h = 10{,}00$ m

$A = 0{,}700 \text{ m} \times 0{,}600 \text{ m} = 0{,}4200 \text{ m}^2$

$\rho = 1{,}00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

$P_0 = 1{,}01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Ditanya:

a. Tekanan total (P)?

b. Gaya dikarenakan air (F)?

Jawab:

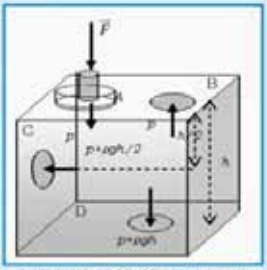
a. Berdasarkan persamaan 8.5:

$$P = P_0 + \rho g h$$
$$= (1{,}01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + (1{,}00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9{,}80 \text{ m/s}^2)(10{,}00 \text{ m})$$
$$P = (1{,}01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + 98 \times 10^3 \text{ N/m}^2 = 1{,}98 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

b. $F = 1{,}98 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (0{,}42 \text{ m}^2) = 0{,}83 \times 10^5 \text{ N}$

2. Prinsip Pascal

Bila tekanan (misalnya tekanan udara) dinaikkan pada seluruh permukaan zat cair, yang mana zat cair tersebut tak bisa dimampatkan dan dalam keadaan diam, maka tekanan pada semua titik di dalam zat cair atau pada batas permukaan akan naik sama besar. Pengaruhnya akan sama bila tekanan diberikan ke dalam zat cair dalam bejana tertutup dengan menggunakan piston yang dikerjakan pada satu permukaan tertentu, lihat gambar 8.3.



Gambar 8.3 *Prinsip Pascal*

Tekanan yang dialirkan ke dalam fluida dipelajari oleh Blaise Pascal. Tekanan yang dialirkan ke dalam fluida yang diteruskan ke segala arah yang teramati disebut sebagai prinsip Pascal. Jadi, prinsip Pascal adalah: *Tekanan yang diaplikasikan (diberikan) ke dalam fluida dalam bejana tertutup diteruskan ke semua titik di dalam fluida dan dinding bejana secara sama dan besarnya sama dengan tekanan yang diberikan pada fluida tersebut.*

Pada gambar 8.3, tekanan P diberikan ke dalam fluida dengan cara mengerjakan gaya $\vec{F}$ pada piston A yang luas penampangnya A, yaitu $P = \vec{F} / A$. Kemudian tekanan P diteruskan ke semua arah, baik dalam fluida maupun titik-titik pada dinding bejana fluida seperti di titik B, C dan D.

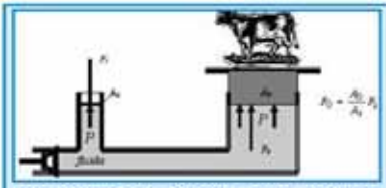
Untuk zat cair yang tidak termampatkan (*incompressible*), perubahan tekanan akan langsung ditransmisikan (dialirkan) sesaat. Namun untuk gas, perubahan tekanan secara umum akan diikuti oleh perubahan volume atau suhu, tetapi setelah itu kesetimbangan akan tercapai lagi, sehingga prinsip Pascal tetap berlaku benar.

Penggunaan prinsip Pascal diantaranya adalah pada rem hidraulik yang digunakan pada mobil. Gaya pada pedal rem mentrasmisikan sebuah gaya ke rem roda. Hal serupa pada penggunaan pompa hidraulik yang digunakan untuk mengangkat mobil atau benda berat yang lain. Penggunaan prinsip Pascal tidak sekedar mentransmisikan gaya ke sistem yang lain, namun juga dapat melipatgandakan gaya awal dengan menggunakan variasi luas permukaan yang digunakan untuk mengalirkan tekanan tersebut. Pada gambar 8.4 ditunjukkan cara kerja pompa hidraulik, tekanan (input) P_i diberikan pada piston kecil dengan cara

mengerjakan gaya sebesar F_i pada piston kecil yang luas penampangnya A_i. Kemudian tekanan P_i ditransmisikan ke piston output yang luas penampangnya A_0. Dari prinsip Pascal diperoleh $P_0 = P_i$ maka

$$\frac{\vec{F}_i}{A_i} = \frac{\vec{F}_0}{A_0} \text{ dan } F_0 = \frac{A_0}{A_i}\vec{F}_i \quad (8.6)$$

Bila A_0 lebih besar daripada A_i, maka dari persamaan 8.6 akan diperoleh gaya $\vec{F}_0$ lebih besar daripada $\vec{F}_i$. Dengan kata lain, gaya outputnya bisa digandakan dengan memperbesar variabel A_0.



Gambar 8.4 *Sistem kerja pompa hidraulik.*

Persamaan 8.6 adalah bentuk perbandingan gaya terhadap luas piston. Karena luas juga berbanding lurus dengan diameter dari permukaan piston, maka Persamaan 8.6 dapat dituliskan sebagai:

$$F_0 = \left(\frac{d_0}{d_i}\right)^2 F_i \quad (8.7)$$

Persamaan 8.7 juga menunjukkan bahwa bila $d_0 >> d_i$ maka kita akan mendapatkan output gaya yang jauh lebih besar dari gaya input.

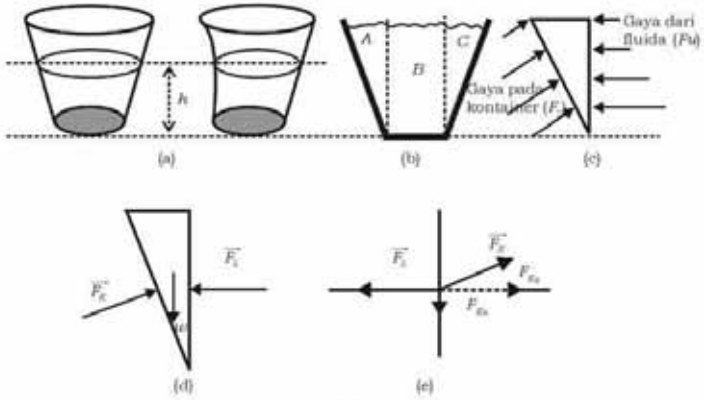
Mesin hidraulik yang didiskusikan di atas dapat digunakan untuk melipatgandakan gaya, namun energi yang secara ideal bersifat kekal, tentu saja energi tak dapat dilipatgandakan. Untuk mesin hidraulik yang ideal, besarnya input kerja sama dengan output kerja, yaitu:

$$W_i = W_0$$

atau

$$F_i x_i = F_0 x_0 \Rightarrow F_0 = \frac{x_i}{x_0} F_i \quad (8.8)$$

di mana x_i adalah jarak gerakan piston pada input dan x_0 adalah jarak gerakan piston pada output. Jadi, gaya output jauh lebih besar dari gaya input, jika jarak gerakan piston input jauh lebih besar daripada jarak gerakan piston output. Contoh untuk mendapatkan $F_0 = 10F_i$ maka jarak input $x_i = 10x_0$.



Gambar 8.5 *Analisis konsep prinsip pascal dan hukum III Newton.*

Dua kontainer dengan luas penampang alas yang sama tetapi mempunyai bentuk yang berbeda, keduanya diisi air pada ketinggian yang sama, lihat gambar 8.5(a). Diskusikan dengan teman kalian, untuk menganalisa jawaban di bawah ini. Mana yang kalian anggap benar berdasarkan gambar 8.5(a-e):

a. Tekanan pada bagian dasar dari kedua kontainer adalah sama.
b. Tekanan pada bagian dasar kontainer yang sisinya miring lebih besar.
c. Tekanan pada bagian dasar yang kontainernya berbentuk silinder lebih besar.

3. Pengukuran Tekanan

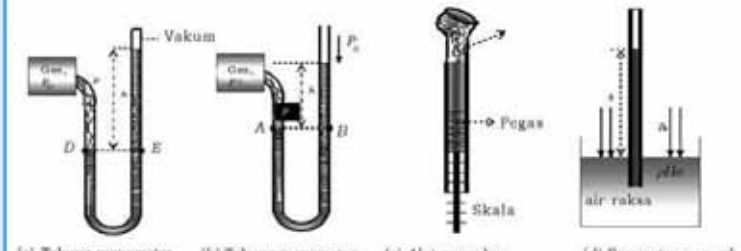
Tekanan dapat diukur dengan berbagai peralatan mekanik dengan cara pembebanan pada sebuah pegas. Alat tipe lain, yang disebut *manometer*, menggunakan satu jenis cairan biasanya merkuri (air raksa). Dua model manometer dengan bentuk U ditunjukkan pada gambar 8.6(a-b) yaitu manometer terbuka dan manometer tertutup. Pada manometer terbuka, salah satu ujungnya terbuka dan berhubungan langsung dengan udara luar (tekanan atmosfer) dan ujung tabung yang lain dihubungkan dengan bejana tertutup berisi gas yang tekanannya akan diukur, lihat gambar 8.6. Monometer tertutup, ujung tabung yang terbuka pada manometer terbuka divakumkan dan ditutup rapat, lihat

gambar 8.6(b). Zat cair dalam tabung U bertindak sebagai reservoir yang akan menstransmisikan (meneruskan) tekanan sesuai prinsip Pascal.

Menurut prinsip Pascal, tekanan gas sebesar P besarnya sama dengan tekanan oleh berat zat cair yang terdapat dalam kolom tabung setinggi h ditambah dengan tekanan atmosfer P_a dari udara luar:

$$P = P_a + \rho gh \qquad (8.9)$$

P disebut tekanan mutlak gas dan $P - P_a = \rho gh$ disebut tekanan Gauge.



(a) Tabung manometer (b) Tabung manometer (c) Alat pengukur tekanan dalam ban (d) Barometer

Gambar 8.6 *Alat pengukur tekanan*

Tekanan Gauge adalah tekanan yang terukur pada beberapa jenis alat pengukur tekanan seperti pada pengukur tekanan ban kendaraan, lihat gambar 8.6(c). Alat ini didasarkan pada perbandingan tekanan di dalam ban dengan tekanan di luar dan tercatat sebagai berbedaan tekanan:

$$P - P_a = P_{gauge} \qquad (8.10)$$

Tekanan Gauge akan bernilai positif jika tekanan mutlak lebih besar daripada tekanan atmosfer. Jika tekanan atmofer sama dengan tekanan mutlak, maka tekanan Gauge sama dengan nol. Dalam keadaan seperti ini ketinggian kolom pasti sama dengan nol (h=0), karena g dan ρ adalah konstan. Dengan kata lain, ketinggian permukaan zat cair pada kolom (tabung) adalah sama. Sebaliknya tekanan gauge akan bernilai negatif jika tekanan mutlak lebih kecil daripada tekanan atmosfer.

Pada manometer tertutup, tekanan atmosfer tidak mempunyai pengaruh terhadap tekanan gas dalam bejana tertutup, maka tekanan yang terukur oleh manometer ini sama dengan tekanan mutlak:

$$P_{gauge} = \rho gh = P - 0 = P \qquad (8.11)$$

Penggunaan prinsip manometer tertutup adalah barometer, lihat gambar 8.6(d), yang digunakan untuk mengukur tekanan udara.

Barometer air raksa ditemukan oleh Evangelista Torricelli (1608-1647) dengan cara mengisi penuh tabung dengan air raksa dan kemudian dimasukkan ke dalam reservoir air raksa dengan cara dibalik, lihat gambar 8.6(d). Sebagian air raksa dalam tabung keluar dan sebagian tetap mengisi kolom tabung karena menderita tekanan yang berasal dari tekanan luar pada permukaan air raksa dalam reservoir. Namun anehnya, ada sebagian kolom tabung yang kosong padahal sebelumnya diisi penuh dengan air raksa. Ruang kosong di atas permukaan air raksa dalam tabung terisi dengan uap air raksa walaupun tekanannya sangat kecil dan tekanan ini diabaikan. Maka tekanan atmosfer adalah sama dengan tekanan yang disebabkan oleh berat air raksa dalam kolom:

$$P_a = \rho gh \qquad (8.12)$$

Tekanan standar satu atmosfer didefinisikan sebagai tekanan yang dapat menopang (menahan) air raksa setinggi 76 cm dalam kolom pada tempat setinggi permukaan air laut dan pada suhu 0°C. Oleh sebab itu, perubahan tekanan atmosfer akan merubah ketinggian air raksa dalam kolom. Tekanan 1 atmosfer standar dinyatakan sebagai:

1 atm = 76 cmHg = 760 mmHg = 29,92 incHg = 760 torr

Untuk menghormati Torricelli, tekanan 1 mmHg diberi nama 1 torr, atau 1 mmHg = 1 torr.

KISI

Gambar di bawah menunjukkan salah satu penerapan hukum paskal: mengangkat mobil dengan lift. Penerapan daya yang kecil pada silinder kecil disamping lift menghasilkan daya yang besar pada silinder besar seperti terlihat di bawah.



Sumber: *Ilmu Pengetahuan Populer 4*

Contoh Soal 8.2

Bila kolom barometer biasanya diisi dengan air, berapakah tinggi kolom yang berisi air untuk tekanan 1 atmosfer standar?

Penyelesaian:

1 atm = 76 cmHg = $1{,}01325\times10^5$ N/m^2 = (1000 kg/m^3)(9,8 m/s^2)h, maka h = 10,34 m

Untuk meningkatkan **kemampuan personal dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Diskusikan dengan teman sekelas kalian, mengapa barometer air raksa tidak diganti dengan barometer air mineral atau alkohol seperti pada termometer?

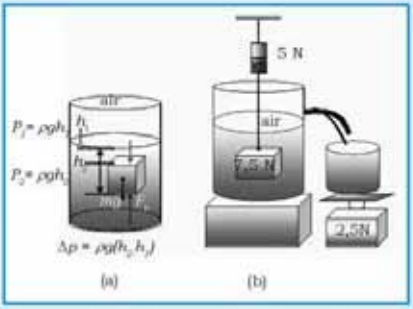
B. Prinsip Archimedes

Jika sebuah benda dimasukkan ke dalam fluida, benda tersebut akan tenggelam, melayang, atau mengapung. Contoh umum yang sering ditemui adalah benda yang ditempatkan dalam air. Efek yang sama juga terjadi pada gas. Sebuah benda yang jatuh adalah benda yang tenggelam dalam atmosfer sedangkan benda yang lain melayang-layang di atmosfer (balon yang berisi gas helium).

Jika ada benda yang bergerak ke atas, maka benda tersebut mengalami resultan gaya ke atas. Ini berarti ada perpaduan gaya ke atas dan gaya ke bawah yang merupakan berat benda. Dalam kasus ini, gaya ke atas lebih besar daripada gaya ke bawah. Jika kedua gaya dalam kesetimbangan, maka benda tersebut akan melayang, yaitu bergerak dengan kecepatan konstan atau tetap diam di dalam zat cair, benda dalam keadaan stasioner. Resultan gaya ke atas pada sebuah benda yang dibenamkan secara keseluruhan atau sebagian dalam suatu fluida disebut gaya apung atau gaya angkat (*buoyant force*).

Bagaimana munculnya gaya apung, dapat dilihat pada gambar 8.7, yaitu dengan mempertahankan sebuah benda mengapung di bawah permukaan zat cair. Tekanan pada permukaan atas dan

bawah pada balok masing-masing adalah $P_1 = \rho_1 g h_1$ dan $P_2 = \rho_1 g h_2$, dimana ρ_1 adalah kerapatan fluida. Jadi, perbedaan tekanan antara kedua permukaan tersebut adalah $\Delta P = P_2 - P_1 = \rho_1 g(h_2 - h_1)$. Perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah memberikan resultan gaya ke atas sebesar F_b karena $h_2 > h_1$. Gaya ini akan diimbangi oleh gaya berat balok yang arahnya ke bawah.



Gambar 8.7 *(a) Gaya ke atas, (b) prinsip Archimedes.*

Besarnya gaya keatas F_b:

$$F_b = P_2 A - P_1 A = (\Delta P)A = \rho_1 g(h_2 - h_1)A \qquad (8.13)$$

Karena $(h_2 - h_1)A$ adalah volume balok yang sama dengan volume fluida (V_f) yang terdesak sehingga:

$$F_b = \rho_1 g V_f \qquad (8.14)$$

Karena $m_f = \rho_1 V_f$ adalah massa dari fluida, maka gaya ke atas bisa ditulis sebagai:

$$F_b = m_f g \qquad (8.15)$$

Persamaan 8.15 menunjukkan bahwa besarnya gaya ke atas pada balok sama dengan berat fluida yang ditempati oleh balok. Contoh: besarnya gaya ke atas di illustrasikan pada gambar 8.7(b). Berat benda saat tergantung di udara sebesar 7,5 N, pada saat benda tergantung dalam air beratnya menjadi 5 N, maka berat zat cair yang dipindahkan adalah 2,5 N. Besarnya gaya ke atas yang dikerjakan pada balok adalah 2,5 N.

Hasil analisis yang bersifat umum ini disebut **prinsip Archimedes,** yaitu *sebuah benda yang dibenamkan sebagian atau seluruhnya ke dalam fluida akan mendapatkan gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat zat cair yang ditempati oleh benda tersebut (sama dengan berat zat cair yang dipindahkan).*

$$F_b = \rho_1 g V_f = m_f g \qquad (8.16)$$

Contoh Soal 8.3

Berapa besar gaya ke atas pada balon helium yang berbentuk bola dengan jari-jari 25 cm di udara yang mempunyai kerapatan $\rho_{\text{udara}} = 1{,}29\ \text{kg/m}^3$?

Penyelesaian:

Diketahui:

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

$\rho_{\text{udara}} = 1{,}29\ \text{kg/m}^3$

Ditanya:

Gaya ke atas pada helium (F_b)?

Jawab:

Volume balon adalah volume bola, yaitu $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ sehingga besarnya gaya ke atas:

$$F_b = (1{,}29\ \text{kg/m}^3)(\tfrac{4}{3} \times 3{,}14 \times (0{,}25\ \text{m})^3)(9{,}8\ \text{m/s}^2) = 0{,}8\ \text{N}$$

1. Gaya ke Atas dan Kerapatan

Kita biasanya mengatakan bahwa balon helium dan balon udara panas bisa mengapung ke atas karena keduanya lebih ringan daripada udara. Dari kerapatan benda, kalian bisa menyatakan bahwa benda tersebut tenggelam, melayang, dan mengapung bila kalian mengetahui besar kecilnya kerapatan fluida, di mana benda berada. Perhatikan sebuah benda padat yang homogen dibenamkan seluruhnya ke dalam zat cair! Berat benda padat tersebut, $W_0 = m_0 g = \rho_0 V_0 g$. Berdasarkan prinsip Archimedes, maka besarnya berat zat cair yang dipindahkan oleh benda padat tersebut yang merupakan gaya ke atas yang dikerjakan pada benda padat adalah $F_b = r_f\ V_0\ g$. Maka hubungan antara berat zat padat dan gaya ke atas pada zat padat tersebut adalah:

$$\frac{F_b}{W_0} = \frac{\rho_f}{\rho_0} \Rightarrow F_b = \left(\frac{\rho_f}{\rho_0}\right) W_0 \qquad (8.17)$$

Berdasarkan persamaan 8.17, kalian bisa menunjukkan bahwa besarnya rasio F_b terhadap W_0 dapat diketahui hanya dengan meninjau besarnya kerapatan fluida dan zat padat, ρ_f dan ρ_0. Ada tiga keadaan hubungan antara gaya ke atas yang dikerjakan pada benda dan berat bendanya, yaitu:

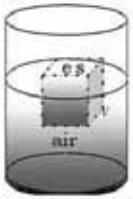
a. Jika $\rho_f > \rho_0$ maka harga $F_b > W_0$, gaya ke atas lebih besar daripada gaya berat, maka benda dalam keadaan terangkat atau terapung.

b. Jika $\rho_f = \rho_0$ maka harga $F_b = W_0$, gaya ke atas sama besar dengan gaya berat benda, maka benda dalam keadaan kesetimbangan dan melayang pada ketinggian tertentu. Ini terjadi jika kerapatan fluida tetap konstan. Jika kerapatan benda tidak homogen, maka kerapatan bendanya dihitung berdasarkan harga rata-ratanya.

c. Jika $\rho_f < \rho_0$ maka harga $F_b < W_0$, gaya ke atas lebih kecil daripada gaya berat benda, sehingga benda dalam keadaan tenggelam.

Contoh Soal 8.4

Sepotong es batu terletak dalam gelas yang berisi air seperti pada gambar 8.8. Berapa bagian es yang terapung diatas permukaan air?



Gambar 8.8 *Es dalam air.*

Penyelesaian:

Diketahui:

$\rho_a = 1000$ kg/m^3

$\rho_{es} = 917$ kg/m^3.

Ditanya:

Berapa volume es yang terapung di atas permukaan air?

Jawab:

Es yang terapung dalam keadaan setimbang. Besarnya gaya ke atas sama dengan berat es seluruhnya. Berdasarkan prinsip Archimedes, besarnya gaya ke atas sama dengan berat air yang dipindahkan es, yaitu sama dengan berat air yang volumenya sama dengan volume es yang tercelup, yaitu $F_b = \rho_a V_{\text{tenggelam}}\, g$. Berat es adalah, $W = \rho_{es}\, V_{es}\, g$.

$\rho_a V_{\text{tenggelam}}\, g = \rho_{es}\, V_{es}\, g$, maka diperoleh

$$\frac{V_{\text{tenggelam}}}{V_{es}} = \frac{\rho_{es}}{\rho_a}.$$

Jadi, bagian volume es yang terapung di atas permukaan air adalah:

$$f = \frac{V_{es} - V_{\text{tenggelam}}}{V_{es}} = 1 - \frac{\rho_{es}}{\rho_a} = 1 - \frac{917\ \text{kg/m}^3}{1000\ \text{kg/m}^3} = 0{,}083 \rightarrow 8{,}3\ \%$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakan tugas berikut ini!

Tugas 8.1

Berapa bagian dari gumpalan es yang tenggelam dalam air laut jika kerapatan air laut 1024 kg/m^3?

Contoh Soal 8.5

Sepotong tembaga (Cu) digantung pada seutas tali dan dicelupkan secara penuh ke dalam air, lihat gambar 8.9! Massa tembaga adalah 1 kg dan kerapatannya $8{,}92\times10^3$ kg/m^3. Hitung berapa tegangan tali sebelum dan sesudah dicelupkan?

Penyelesaian:

Berdasarkan data dari soal didapatkan:

Diketahui:

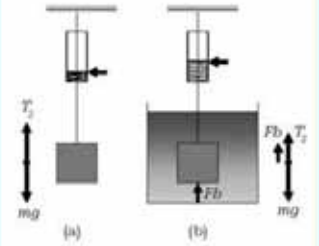
m_{Cu}=1 kg

ρ_{Cu}= 8,92x10^3 kg/m^3

Ditanya:

a. Tegangan tali bila tembaga di gantung di udara (T_1)?

b. Tegangan tali bila tembaga yang tergantung dicelupkan ke dalam air, (T_2)?



Gambar 8.9 *Tembaga dalam air.*

Jawab:

a. Berdasarkan gambar 8.9(a) nampak bahwa tembaga dalam keadaan setimbang sehingga gaya-gaya yang bekeja akan menghasilkan resultan gaya yang besarnya sama dengan nol. Dalam keadaan kesetimbangan, secara matematis dapat dituliskan, $T_1 - mg = 0$. Di sini besarnya gaya ke atas yang dikerjakan pada tembaga oleh udara diabaikan. Jadi, besarnya tegangan tali untuk T_1 adalah:
$T_1 = mg = (1\text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2) = 9{,}80\ \text{N}$.

b. Jika sepotong tembaga dalam keadaan kesetimbangan di dalam air dan berdasarkan diagram benda bebas (lihat gambar 8.9(b) maka berlaku hubungan,

$$T_2 + F_b - mg = 0 \rightarrow T_2 = mg - F_b$$

Besar gaya ke atas $F_b = \rho_a V_{Cu} g$

dimana $V_{Cu} = \dfrac{m}{\rho_{Cu}} = \dfrac{1\text{kg}}{8{,}9\times10^3\text{kg/m}^3} = 0{,}11\times10^{-3}\ \text{m}^3$

$\therefore F_b = 1\times10^3\ \text{kg/m}^3(0{,}11\times10^{-3}\ \text{m}^3)(9{,}8\ \text{m/s}^2) = 1{,}10\ \text{N}$

Oleh karena itu besarnya T_2:

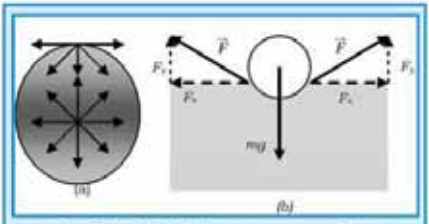
$T_2 = mg - F_b = 9{,}80\ \text{N} - 1{,}10\ \text{N} = 8{,}70\ \text{N}$

C. Tegangan Permukaan dan Kapilaritas

Pernahkah kalian melihat anggang-anggang berjalan di atas permukaan air, atau sebuah silet atau jarum yang dapat mengapung di atas permukaan air bila meletakkannya secara hati-hati? Padahal kerapatan baja lebih besar daripada air. Semua itu dapat terjadi karena permukaan air yang bebas dapat bertindak sebagai membran tipis yang dapat diganti dengan tegangan kecil.

Molekul-molekul zat cair mengerjakan gaya tarik-menarik yang kecil satu sama lainnya. Walaupun secara elektrik molekul zat cair tersebut dalam keadaan netral, namun ada sedikit muatan yang tidak simetris, sehingga memberikan gaya tarik-menarik

antarmolekul (disebut gaya Van Der Waals). Secara umum, molekul-molekul dalam zat cair secara sempurna dilingkupi oleh molekul yang lain sehingga menghasilkan resultan gaya nol.



Gambar 8.10 *Tegangan permukaan.*

Gambar 8.10(a) Menunjukkan resultan gaya yang bekerja pada sebuah molekul di permukaan dan molekul ke 2 di bawah permukaan. Molekul air yang ada di permukaan tidak mempunyai gaya tarik–menarik dengan molekul yang ada di atasnya. Pengaruh gaya tarik dengan molekul udara yang ada di atas permukaan zat cair dianggap kecil sehingga bisa diabaikan. Akibatnya, molekul yang berada pada lapisan atas (permukaan) mengalami gaya tarik-menarik hanya dengan molekul tetangganya seperti yang ada di bagian bawah dan di sampingnya. Gaya tarik arah ke bawah pada molekul permukaan menyebabkan permukaan zat cair mengkerut ke bawah, maka timbul gaya untuk melawan gaya tarik ke bawah tersebut sehingga menghasilkan resultan gaya yang terentang sepanjang permukaan dan menyebabkan timbulnya tegangan permukaan, lihat gambar 8.10(b).

Pada gambar 8.10(b) ditunjukkan diagram benda bebas gaya-gaya yang bekerja pada sebuah silet yang terapung di permukaan air akibat tegangan permukaan. Dalam diagram benda bebas nampak bahwa adanya sedikit penurunan permukaan air akibat tekanan gaya berat molekul (mg) pada permukaan air, sehingga gaya molekul F, membentuk sudut tertentu terhadap permukaan. Komponen gaya arah vertikal, F_y sama besar dengan gaya berat dari silet sehingga tetap terapung di permukaan.

Resultan gaya dari tegangan permukaan memberikan kemungkinan terbentuknya luas permukaan zat cair yang cenderung sekecil mungkin. Konsekuensi dari adanya tegangan permukaan menyebabkan kecenderungan tetes zat cair berbentuk bola. Contoh, jika kalian meneteskan air atau gelembung air sabun, maka tetesan air cenderung berbentuk bola. Bentuk bola memberikan luas permukaan terkecil dengan volume tertentu.

Tegangan permukaan (γ) dalam zat cair didefinisikan sebagai gaya per satuan panjang yang bekerja sepajang garis:

$$\gamma = \frac{\vec{F}}{L} \qquad (4.18)$$

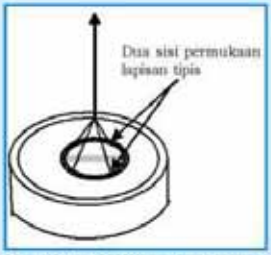
Berdasarkan persamaan 8.18, satuan SI untuk tegangan permukaan adalah newton/meter atau (N/m).

Beberapa nilai tegangan permukaan dari berbagai zat cair terlihat dalam tabel 8.1 berikut ini:

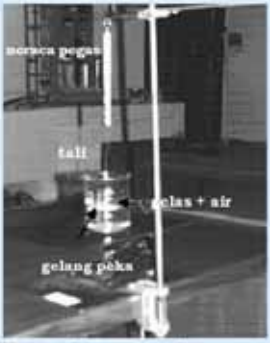
Tabel 8.1 Daftar Harga Tegangan Permukaan

Zat Cair	Suhu (°C)	Tegangan Permukaan (N/m)
Alkohol, ethyl	20	0,022
Darah	37	0,058
Merkuri (Air Raksa)	20	0,45
Larutan detergen	20	0,025
Air	0	0,076
Air	20	0,073
Air	100	0,059

Dalam tabel 8.1 nampak bahwa suhu sangat menentukan besar kecilnya tegangan permukaan, semakin tinggi suhu semakin kecil harga tegangan permukaannya. Pengaruh suhu mengakibatkan mudahnya molekul-molekul zat cair bergerak. Air sabun menunjukkan tegangan yang lebih kecil daripada air murni. Ini sebabnya mengapa sabun mudah membersihkan kotoran yang menempel pada pakaian atau benda lain.



(a) Sebuah kawat melingkar dengan keliling L yang diletakkan di permukaan air sehingga terbentuk selaput air yang mempunyai dua permukaan pada kawat melingkar.



(b) Set peralatan untuk menentukan tegangan permukaan.

Gambar 8.11 *Tegangan permukaan.*

Set peralatan yang digunakan untuk mengukur tegangan permukaan ditunjukkan pada gambar 8.11. Sepotong kawat melingkar dicelupkan ke dalam air sehingga terbentuk selaput air yang mempunyai dua permukaan pada kawat melingkar. Berdasarkan Persamaan 8.18 maka besarnya tegangan permukaan $\gamma = \frac{F}{2L}$, di mana angka 2 pada penyebut menunjukkan bahwa selaput air mempunyai dua permukaan. Seperti ditunjukkan pada gambar 8.11 (b), kalian bisa melihat besar gaya F, yang terukur oleh pegas saat kawat melingkar terlepas dari permukaan air sewaktu gelas diturunkan ke bawah. Gaya yang terukur oleh pegas merupakan gaya yang diperlukan untuk mengatasi tegangan permukaan pada kawat melingkar. Dengan diketahui harga L, maka kalian bisa menentukan tegangan permukaan zat cair yang bersangkutan.

Cara lain untuk menentukan tegangan permukaan yaitu dengan menggunakan konsep usaha atau kerja yang diperlukan untuk merentang luasan permukaan. Jika sepotong kawat lurus yang panjangnya L terletak pada kawat lain yang berbentuk U yang diletakkan di atas permukaan zat cair, maka untuk menggeser kawat L sejauh Δx dan sejajar dengan permukaan zat cair diperlukan gaya F, maka kerja yang dilakukan untuk melawan tegangan permukaan adalah:

$$W = F\Delta x = \gamma L\Delta x = \gamma \Delta A$$

karena $\overline{F} = \gamma L$ dan $\Delta A = L\Delta x$ maka:

$$\boxed{\gamma = \frac{W}{\Delta A}} \qquad (8.19)$$

Jadi, tegangan permukaan adalah gaya per satuan panjang yang ekuivalen dengan kerja per satu satuan perubahan luasan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 8.19, dan satuannya adalah N/m atau J/m^2 memberikan satuan untuk tegangan permukaan yaitu joule/m^2.

D. Adhesi dan Kohesi

Seperti yang ditunjukkan pada tabel 8.1, larutan sabun memberikan harga tegangan permukaan yang relatif kecil dibandingkan dengan air murni. Sabun dan detergen dalam air menyebabkan turunnya harga tegangan permukaan air. Oleh karena itu sabun atau detergen disebut sebagai surfaktan (penurun

tegangan). Larutan air sabun atau detergen memberikan kemudahan larutan tersebut masuk ke serat-serat pakaian sehingga kotoran mudah lepas. Air hangat juga banyak digunakan untuk membersihkan pakaian karena semakin tinggi suhu air semakin kecil tegangan permukaannya.

Sabun dan detergen juga bekerja sebagai alat pembasah *(wetting agents)*. Basah atau tidaknya suatu permukaan benda dari zat cair tergantung pada kekuatan gaya adhesi dan kohesi antarmolekul. *Gaya adhesi* adalah gaya tarik antarmolekul yang tidak sejenis. *Gaya kohesi* adalah gaya tarik antarmolekul yang sejenis. Jika gaya adhesi antara molekul zat cair terhadap suatu permukaan lebih besar daripada gaya kohesi, maka zat cair tersebut memberikan sifat kebasahan pada permukaan benda. Sebaliknya, jika gaya kohesi lebih besar daripada gaya adhesi, maka zat cair tersebut tidak akan memberikan sifat kebasahan pada permukaan benda.

Diskusikan

Kalian bisa mengamati apa yang terjadi pada binatang sejenis serangga yang berjalan di atas permukaan air, mengapa serangga tersebut tidak basah? Jelaskan!

Tabel 8.2 Sudut Kontak

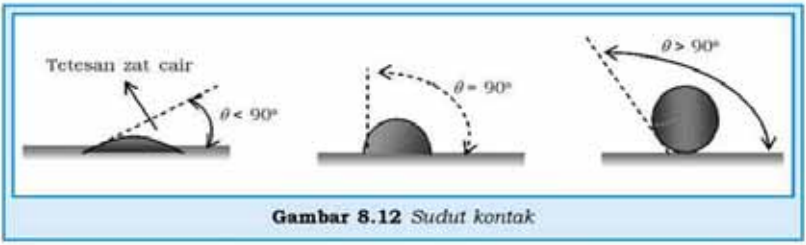
Zat Cair - Padat	Sudut Kontak (Pendekatan)
Alkhol-gelas	0°
Karosene-gelas	26°
Merkuri-gelas	140°
Air-silver	0°
Air-parafin	107°

Walaupun gaya adhesi dan kohesi sulit untuk dianalisis, namun kalian bisa menganalisisnya lewat efek zat cair yang diteteskan pada permukaan benda padat yang menyebabkan terbentuknya sudut kontak θ, yaitu sudut antara garis singgung pada permukaan zat cair dengan dinding (permukaan) bejana, lihat gambar 8.12. Sudut θ yang lebih besar dari 90° tidak menyebabkan permukaan basah. Sebaliknya untuk sudut θ lebih kecil dari 90°,

zat cair tersebut membasahi dinding tempat zat cair. Air pembersih gelas membuat sudut kontak hampir 0°, sedang air dengan parafin membentuk sudut kontak 107°.

Sedikit detergen pada parafin akan menyebabkan air tersebar atau membasahi permukaan dan akibatnya sudut kontaknya menurun. Bahan pembersih seperti sabun atau detergen memberikan peluang masuknya larutan tersebut untuk membasahi partikel-partikel yang terkotori, sehingga mereka bisa dengan mudah melepaskan kotoran dari partikel-partikel pada pakaian atau bahan lainnya.

Permukaan air dalam bejana secara bebas membentuk kurva menghadap ke atas (*konkaf*), maka dikatakan zat cairnya membasahi dinding bejana. Jika zat cairnya tidak membasahi dinding, maka kurva permukaan akan menghadap ke bawah (*konveks*).



Gambar 8.12 *Sudut kontak*

Bentuk kurva dari permukaan zat cair disebut *meniskus* (dalam bahasa Yunani berarti bulan sabit). Bila sebuah pipa kapiler salah satu ujungnya dicelupkan secara vertikal ke dalam reservoir zat cair (air), maka zat cair tersebut masuk ke dalam pipa kapiler dan naik ke atas, sehingga permukaan air dalam kapiler lebih tinggi dari permukaan air di sekelilingnya karena air bersifat membasahi dinding. Peristiwa kapilaritas ini disebabkan oleh adanya tegangan permukaan dan gaya adhesi. Gaya adhesi menarik zat cair ke atas sepanjang dinding tabung dan kohesi (tegangan permukaan) menarik kolom air ke atas.

Ketinggian zat cair dalam kolom tergantung pada diameter tabung. Kapiler berasal dari bahasa latin yang berarti seperti rambut (pembuluh darah yang kecil juga disebut kapillari). Pada titik kesetimbangan, komponen tegangan permukaan arah vertikal ke atas besarnya sama dengan komponen gaya berat dari zat cair dalam kolom. Besarnya tegangan permukaan adalah:

$$F = \gamma L = \gamma(2\pi r) \qquad (8.20)$$

di mana L adalah $2\pi r$ dikarenakan zat cair membuat kontak dengan dinding tabung di seluruh titik sepanjang penampang tabung yang berbentuk lingkaran. Komponen tegangan permukaan arah vertikal besarnya adalah:

$$F\cos\theta = \gamma(2\pi r)\cos\theta \qquad (8.21)$$

Sedangkan gaya berat zat cair sepanjang kolom tabung adalah:

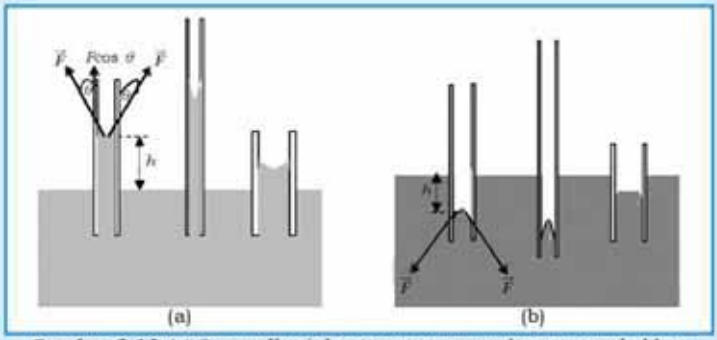
$$W = mg = \rho Vg = \rho(\pi r^2 h)g \qquad (8.22)$$

Karena komponen tegangan permukaan arah vertikal sama dengan gaya berat maka kombinasi Persamaan 8.21 dengan 8.22:

$$F = w \Rightarrow \gamma(2\pi r)\cos\theta = \rho(\pi r^2 h)g$$

$$h = \frac{2\gamma\cos\theta}{\rho g r} \qquad (8.23)$$

Pada Persamaan 8.23 ditunjukkan bahwa tinggi kenaikan zat cair dalam kolom pipa kapiler tergantung pada kerapatan zat cair, jari-jari tabung kapiler, dan sudut kontak yang berkaitan dengan tegangan permukaannya. Persamaan 8.23 juga dapat digunakan untuk menganalisis zat cair yang lain, misalnya air raksa di mana jika ujung tabung kapiler dicelupkan akan menyebabkan air raksa yang masuk ke dalam pipa kapiler bergerak menurun sehingga permukaannya berbentuk cembung. Dengan memasukkan karakteristik dari sifat air raksa di mana sudut kontaknya lebih besar daripada 90° (lihat gambar 8.13) dan h negatif, maka Persamaan 8.23 tetap berlaku.



Gambar 8.13 *(a) Gaya adhesi dan tegangan permukaan menyebabkan air naik dalam pipa kapiler karena air bersifat membasahi dinding, (b) air raksa menurun dalam kapiler karena air raksa tidak membasahi dinding.*

Contoh Soal 8.6

1. Berapa tinggi kenaikan air murni pada suhu 20°C dalam sebuah tabung kapiler dengan diameter 1,0 mm?
2. Dengan menggunakan tabung yang sama berapa ketinggian yang dicapai untuk air sabun?

Penyelesaian:

Diketahui:

d = 1,00 mm=1,0×10^{-3} m
r = 5,0×10^{-4} m
ρ_a = ρ_s = 1,0×10^{3} kg/m^{3}
γ_a = 0,073 N/m (tabel 8.1)
γ_s = 0,025 N/m (tabel 8.1)

Ditanya:

1. h (ketinggian air murni)?
2. h (ketinggian air sabun)?

Jawab:

1. Berdasarkan tabel 8.2, sudut kontak antara gelas dan air adalah θ = 0° (cos 0°=1), sehingga berdasarkan Persamaan 8.19:

$$h_a = \frac{2\gamma_a}{\rho_a g r} = \frac{2(0{,}073\ \text{N/m})}{(1{,}0\times10^{3}\ \text{kg/m}^3)(9{,}8\ \text{m/s}^2)(5{,}0\times10^{-4}\ \text{m})} = 0{,}030\,\text{m}$$

2. Untuk air sabun karena sebagian variabel sama kecuali harga tegangan permukaanya, maka kita dapat menggunakan bentuk persamaan perbandingan yaitu:

$$h_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} h_a = \frac{0{,}025\ \text{N/m}}{0{,}073\ \text{N/m}} 0{,}030\ \text{m} = 0{,}010\ \text{m}$$

Jadi, tinggi kolom air sabun hanya (1/3) dari tinggi kolom air murni.

E. Dinamika Fluida dan Persamaan Bernoulli

Secara umum, gerak (aliran) fluida sulit dianalisis. Mungkin secara fisis aliran fluida akan terlihat, namun hubungan antara variabel-variabel yang terkait dengan aliran fluida agak sulit

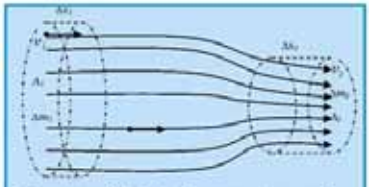
dirumuskan secara matematis, padahal hanya dengan persamaan matematik kita dapat menganalisis sifat-sifat fisisnya. Oleh karena itu, agar kita dapat mengetahui hubungan antara variabel aliran, kita menyederhanakan sistem dengan mengabaikan beberapa faktor, misalnya aliran air dalam sungai yang banyak batunya dan gaya gesekan yang terjadi antara aliran air dengan benda yang ada disekitarnya. Beberapa pendekatan tentang aliran fluida yang ideal meliputi:

1. alirannya tidak berotasi, artinya tidak ada resultan kecepatan anguler,
2. nilai viskositasnya tidak tinggi, yang berarti bahwa nilai kekentalannya dapat diabaikan,
3. tidak mengalami pemampatan (tidak seperti pada gas). Seperti pada sayap pesawat untuk penerbangan rendah udara tidak mengalami pemampata,
4. kerapatan fluida adalah konstan dan aliran bersifat stabil *(steady)* yaitu aliran partikel-partikel fluida mempunyai kecepatan sama di titik tertentu yang sama.

Aliran stabil juga disebut aliran reguler, dimana aliran membentuk aliran garis atau garis arus *(streamline)*, yaitu setiap partikel bergerak sepanjang lintasan yang sama seperti partikel-partikel yang lewat sebelumnya. Garis arus tidak akan berpotongan dengan garis lainnya atau menyeberang ke garis arus di dekatnya. Bila ada garis arus melintasi garis arus di dekatnya, maka sebuah partikel berubah lintasan dan secara tiba-tiba juga mengubah kecepatannya, sehingga keadaan ini menyebabkan alirannya tidak stabil lagi.

Aliran *steady* biasanya kecepatannya rendah. Ketika kecepatan alir sangat cepat maka arus *steady* cenderung nampak, khususnya di dekat perbatasan dan aliran cenderung turbulen (aliran yang tidak teratur).

Garis arus juga menunjukkan besaran relatif dari kecepatan fluida, bila kecepatannya lebih besar maka garis-garis arusnya lebih dekat, perhatikan gambar 8.14!



Gambar 8.14 *Garis arus atau garis aliran (streamline).*

1. Persamaan Kontinuitas Aliran

Jika selama mengalir dalam tabung tidak ada fluida yang hilang, maka massa fluida yang mengalir ke dalam tabung dalam waktu t, sama dengan massa fluida yang mengalir ke luar dari tabung dalam

waktu yang sama (hukum kekekalan massa). Dari gambar 8.14 ditunjukkan bahwa massa fluida, Δm, masuk ke dalam tabung dalam waktu Δt, adalah:

$$\Delta m_1 = \rho_1 \Delta V_1 = \rho_1 (A_1 v_1 \Delta t) \quad (8.24)$$

A_1 adalah luas penampang lintang tabung dimana fluida mengalir masuk dalam waktu Δt. Jika fluida bergerak dengan kecepatan v_1, maka dalam waktu Δt menempuh jarak sejauh $v_1 \Delta t$. Dengan cara yang sama, massa fluida yang meninggalkan/keluar dari tabung dalam interval waktu yang sama adalah:

$$\Delta m_2 = \rho_1 \Delta V_2 = \rho_1 (A_2 v_2 \Delta t) \quad (8.25)$$

Berdasarkan hukum kekekalan massa, maka Persamaan 8.24 sama dengan Persamaan 8.25:

$$\rho_1 A_1 v_1 \Delta t = \rho_1 A_2 v_2 \Delta t \Rightarrow Av = \text{konstan} \quad (8.26)$$

Persamaan 8.26 disebut persamaan kontinuitas untuk fluida yang tak termampatkan, dan secara umum dapat dituliskan menjadi:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (8.27)$$

Persamaan 8.27 disebut persamaan kelajuan aliran karena satuan yang didapatkan adalah $(m^2)m.s^{-1}$ atau m^3/s. Dengan kata lain, persamaan 8.27 menunjukkan besarnya volume fluida yang mengalir per satuan waktu dan juga disebut sebagai debit aliran fluida. Persamaan (8.27) menunjukkan bahwa semakin kecil luas penampang tabung semakin cepat aliran fluida dan garis arus samakin berdekatan (lihat gambar 8.14).

Persamaan 8.27 dapat digunakan untuk menganalisis aliran darah dalam tubuh kita. Aliran darah dari jantung ke aorta, terus membuat semacam sistem rangkaian aliran, terus ke arteries, arterioles (arteri yang lebih kecil), kapiler, dan kembali ke jantung lewat viens (vena). Di kapiler mempunyai kecepatan lebih rendah daripada arteri atau vena, hal ini disebabkan karena luas total kapiler lebih besar dari pada arteri atau vena, sehingga persamaan 8.27 tetap dipakai.

Contoh Soal 8.7

Sebuah pipa air dengan diameter 3,0 cm digunakan untuk mengisi air dalam ember yang dapat menampung sebanyak 30 liter. Jika air mengalir ke ember selama 2 menit, berapa besarnya kecepatan air mengalir meninggalkan pipa? (1 liter = 1000 cm^3).

Penyelesaian:
Berdasarkan soal di atas maka dapat diketahui:
$d = 3{,}0$ cm,
$r = 1{,}5$ cm
$V_{ember} = 30$ liter
$t = 2$ menit

Ditanya:
Kecepatan alir (v)?

Jawab:
Besarnya luas penampang pipa adalah:

$$A = \pi r^2 = (3{,}14)(1{,}5)^2 \text{cm}^2 = 7{,}06 \text{ cm}^2$$

Berdasarkan data yang ada dalam soal, maka didapatkan bahwa besarnya debit air adalah 30 liter/2 menit atau 15 liter/menit.
Berdasarkan persamaan 8.23 maka

$$Av = 15 \text{ liter/menit} = \frac{15 \times 10^3 \text{cm}^3}{60 \text{s}} = 2{,}5 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$v = \frac{2{,}5 \times 10^2 \text{cm}^3/\text{s}}{7{,}06 \text{cm}} = 0{,}35 \times 10^2 \text{cm/s} = 35 \text{ cm/s}$$

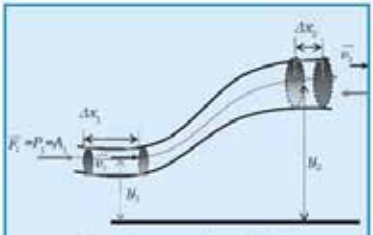
Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakan tugas berikut!

Tugas 8.2

Berkaitan dengan contoh soal, jika diameter pipa menjadi 2 cm, berapa besarnya kecepatan air pada saat meninggalkan pipa?

2. Persamaan Bernoulli

Hukum kekekalan energi atau teorema kerja-energi mengarahkan hubungan yang lebih umum untuk aliran fluida. Hubungan ini dikemukakan oleh Daniel Bernoulli pada tahun 1738 seorang matematikawan dari Swiss yang hidup pada tahun 1700-1782.



Gambar 8.15 *Aliran fluida yang bersifat steady.*

Dari gambar 8.15, dapat ditunjukkan bahwa kerja yang dilakukan oleh gaya luar pada zat alir yang masuk adalah $(\vec{F_1}\ \Delta x_1)$ dan positif karena searah dengan kecepatan fluida. Kebalikannya, kerja yang dilakukan oleh $\vec{F_2}$, adalah $(\vec{F_2}\ \Delta x_2)$, bernilai negatif karena berlawanan dengan arah kecepatan fluida. Resultan kerja yang dilakukan pada sistem tersebut adalah:

$$W = \vec{F_1}\Delta x_1 - \vec{F_2}\Delta x_2 = (P_1A_1)(\vec{v_1}\Delta t) - (P_2A_2)(\vec{v_2}\Delta t) \qquad (8.28)$$

Karena $A_1\vec{v}_1 = A_2\vec{v}_2$ maka kita dapat menuliskan persamaan 8.28 menjadi:

$$W = A_1\vec{v_1}\Delta t(P_1 - P_2) \qquad (8.29)$$

Berdasarkan hukum kekekalan massa di mana $\Delta m_1 = \Delta m_2$ maka persamaan 8.29 dapat dituliskan kembali sebagai:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho}(P_1 - P_2) \qquad (4.30)$$

Resultan kerja yang dilakukan pada sistem oleh gaya luar (kerja nonkonservatif) harus sama dengan perubahan energi mekanik, yaitu:

$$W = \Delta E = \Delta E_k + E_p \qquad (8.31)$$

Persamaan 8.30 sama dengan persamaan 8.31, maka:

$$\frac{\Delta m}{\rho}(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\Delta m(v_2^2 - v_1^2) + \Delta mg(y_2 - y_1)$$

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(y_2 - y_1) \qquad (8.32)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

Persamaan 8.32 disebut persamaan Bernoulli yang menyatakan bahwa:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{konstan} \qquad (8.33)$$

Secara fisis persamaan 8.33 menunjukkan kerja atau energi persatuan volume dengan satuan joule/m^3, dimana

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{1}{2}mv^2/V$$
$$\rho gy = mgy/V \qquad (8.34)$$

Beberapa keadaan khusus yang bisa dianalisis secara fisis dengan persamaan 8.34 yaitu:

a. Jika $y_1 = y_2$ (aliran horisontal) maka $P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstan}$.

Hal ini menunjukkan bahwa tekanan menurun jika kecepatan fluida naik atau sebaliknya.

Cerobong asap yang tinggi membawa banyak keuntungan, semakin cepat aliran angin yang ada di atas cerobong, semakin rendah tekanannya, sehingga menyebabkan perbedaan tekanan yang besar antara bagian bawah dan atas cerobong.

b. Jika kecepatan $\vec{v}_2 = \vec{v}_1$ maka fluida dalam keadaan diam, sehingga persamaan 8.32 menjadi:

$(P_2 - P_1) = \rho g(y_1 - y_2)$

c. Diskusikan dengan teman kalian apa yang terjadi jika $P_1 = P_2$?

Contoh Soal 8.8

Sebuah tabung venturi seperti pada gambar 8.16 dapat digunakan untuk mengukur kecepatan aliran fluida yang tak termampatkan. Tentukan besarnya kecepatan aliran di titik 2 bila beda tekanannya adalah P_1-P_2!

Penyelesaian:
Berdasarkan data yang dapat diperoleh dari soal, maka:

Diketahui:
Perbedaan tekanan pada dua titik adalah P_1-P_2.
$y_1 = y_2$

Ditanya:
Kecepatan aliran (v_2) di titik 2?

Jawab:

Pada gambar 8.16 menunjukan adanya alat pengukuran ..... P_1 dan di titik 2 yaitu P_2. Karena letaknya horisontal, sehingga $y_1 = y_2$. Maka persamaan 8.32 menjadi:

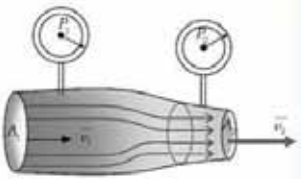
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

substitusikan persamaan 8.27 di mana $v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2$ sehingga,

$$2P_1 + \rho(\frac{A_2^2}{A_1^2})v_2^2 = 2P_2 + \rho v_2^2 \rightarrow 2(P_1 - P_2) = \rho v_2^2 - \rho(\frac{A_2^2}{A_1^2})v_2^2$$

$$\rho v_2^2(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}) = 2(P_1 - P_2) \rightarrow \text{Jadi, } v_2 = A_1\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

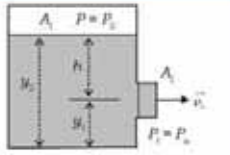
Dengan menghitung harga v_2 kalian bisa menentukan v_1 dengan menggunakan persamaan kontinuitas. Secara matematis untuk mendapatkan harga v_2 positif maka variabel dalam akar harus bernilai positif berarti $A_2 < A_1$ sehingga $P_1 > P_2$. Dengan kata lain, tekanan berkurang pada pipa yang semakin menyempit. Hal ini analogi dengan sebuah ruangan yang didalamnya penuh dengan orang (misalkan dalam ruangan pertunjukkan). Karena banyaknya orang yang ada di dalam ruangan sehingga saling tekan satu sama lain. Segera setelah pintu dibuka orang-orang mulai keluar dan kecepatan aliran orang terbesar pada saat keluar pintu dimana tekanan di dekat pintu mengecil.



Gambar 8.16 *Pengukuran tekanan.*

Contoh Soal 8.9

Sebuah tangki berisi zat cair yang mempunyai kerapatan ρ mempunyai sebuah lubang kecil pada salah satu sisinya pada ketinggian y_1 dari dasar tangki, lihat gambar 8.17. Udara di atas permukaan zat cair



Gambar 8.17 *Tangki berisi air.*

dipertahankan pada tekanan konstan P. Tentukan besarnya kecepatan zat cair yang meninggalkan lubang kecil saat ketinggian zat cair di atas lubang adalah h!

Penyelesaian:
Data yang diketahui bisa kalian lihat pada gambar 8.17.

Ditanya:
Kecepatan zat cair mengalir meninggalkan lubang (v)?

Jawab:
Karena $A_1 >> A_2$ maka kecepatan aliran zat cair di permukaan atas diangap nol ($v_2^2 = 0$) atau diam bila dibandingkan dengan kecepatan aliran zat cair yang meninggalkan lubang. Dengan menggunakan persamaan 8.32, maka:

$$P_a + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P + \rho g y_2$$

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 = (P - P_a) + \rho g(y_2 - y_1)$$

$$v_1^2 = \frac{2(P - P_a)}{\rho} + 2gh \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2(P - P_a)}{\rho} + 2gh}$$

di mana $h = (y_2 - y_1)$.

Untuk mendapatkan harga v_1 positif maka $P > P_a$ (tekanan di atas permukaan air harus lebih besar daripada tekanan atmosfer). Jika $P >> P_a$, maka harga $2gh$ bisa diabaikan. $P = P_a$ sehingga besarnya $v_1 = \sqrt{2gh}$, dengan kata lain besarnya nilai v_1 sama dengan kecepatan benda jatuh bebas dari ketinggian h. Ini yang disebut sebagai hukum Torricelli.

F. Viskositas, Hukum Poiseuille, dan Bilangan Reynolds

Semua aliran fluida mempunyai hambatan dalam untuk mengalir, dan hambatan dalam aliran biasanya direpresentasikan sebagai viskositas. Viskositas dapat ditinjau sebagai gesekan antara molekul-molekul fluida. Dalam zat cair, gaya gesek disebabkan adanya gaya kohesi dengan jarak yang dekat, sedang dalam gas terjadinya saling tumbukan antarmolekul. Viskositas untuk zat cair dan gas tergantung pada kecepatan gerak molekul-molekulnya.

Gesekan internal menyebabkan lapisan fluida untuk bergerak relatif yang satu dengan yang lainnya (gambar 8.18). Gerakan lapisan ..... *laminer*, yang ditandai dengan aliran *steady* untuk zat cair dengan viskositas dan kecepatan aliran yang rendah. Jika kecepatan aliran sangat tinggi maka aliran laminar berubah menjadi aliran rotasional atau aliran turbulen. Gambar 8.18(a) menunjukkan besarnya tegangan geser yang dapat digunakan untuk mengukur viskositas. Viskositas dicirikan oleh koeffisien viskositas (η). Jika F/A adalah tegangan geser yang diperlukan untuk mempertahankan aliran laminar antara dua bidang sejajar yang dipisahkan oleh jarak h relatif terhadap besarnya kecepatan v, maka:

$$\eta = \frac{F}{A}\frac{h}{v} = \frac{Fh}{Av} \qquad (8.35)$$

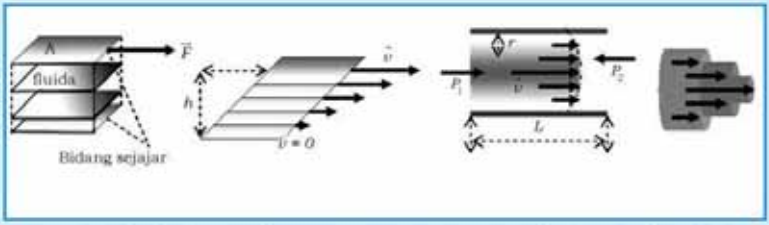
Satuan SI pada persamaan 8.35 adalah pascal.sekon (Pa.s) atau poiseuille (PI), yaitu satuan yang digunakan untuk menghormati seorang ilmuwan Perancis bernama Poiseuille (1799-1869) yang banyak mempelajari tentang aliran zat cair khususnya pada aliran darah. Satuan viskositas dalam cgs adalah poise (P).

Tabel 8.3 Nilai Koefisien Viskositas

Fluida	Viskositas (η)	
	PI	cP (centi poise)
Alkohol	$1{,}2\times10^{-3}$	1,2
Darah (37°C)	$1{,}7\times10^{-3}$	1,7
Glyserin	1,5	$1{,}5\times10^{3}$
Air raksa	$1{,}55\times10^{-3}$	1,55
Air	$1{,}00\times10^{-3}$	1,00
Pelumas *(mesin –mesin ringan)*	1,1	$1{,}1\times10^{3}$
Udara	$1{,}9\times10^{-5}$	$1{,}9\times10^{-2}$
Oksigen	$2{,}2\times10^{-5}$	$2{,}2\times10^{-2}$

Persamaan 8.35 dapat ditulis kembali dalam bentuk $\eta = \frac{F/A}{v/h}$ karena $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, sehingga $\eta = \frac{F/A}{\Delta x/\Delta t/h}$ atau $\eta = \frac{F/A}{(\frac{\Delta x}{h})/\Delta t}$.

Viskositas dan aliran fluida besarnya tergantung pada suhu. Hal ini bisa dibuktikan pada pelumas yang banyak digunakan pada mesin kendaraan bermotor. Pada musim salju (Negara yang mempunyai empat musim) disarankan untuk mengunakan pelumas mesin yang mempunyai viskositas rendah yaitu SAE (*Society of Automotive Engineers*), suatu organisasi yang mendesain tingkat kekentalan pelumas mesin bermotor yang didasarkan pada kelajuan aliran atau viskositas) 10W atau 20W karena pada keadaan mesin yang masih dingin pelumas tersebut lebih siap untuk mengalir. Namun, pada musim panas digunakan pelumas dengan viskositas tinggi dan disarankan untuk menggunakan SAE 30, 40 atau 50W.

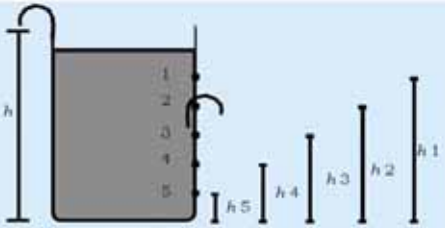


Gambar 8.18 *Aliran Laminer, (a) tegangan geser menyebabkan lapisan fluida bergerak relatif satu sama lainnya , (b) aliran laminer melalui sebuah tabung.*

Kegiatan 8.1

Tujuan:
Menyelidiki kecepatan keluarnya air dari lubang kecil pada dinding tangki air.

Alat dan Bahan:
1. Botol plastik besar/ember plastik yang dilubangi bagian dindingnya.
2. Mistar
3. Plester



Gambar 8.19 *Susunan alat percobaan*

Prosedur:

1. Buatlah beberapa lubang dengan paku yang diameter dan tinggi dari dasar ember berbeda, lihat gambar!
2. Sebelum diisi air, plester secara kuat lubang tersebut!
3. Isi ember dengan air hingga penuh!
4. Lepaskan plester no.1! Amati apa yang terjadi dengan air pada lubang tersebut!
5. Ukurlah tempat jatuhnya air dari dasar ember!
6. Tutup lagi lubang no.1 dengan plester! Lalu penuhi lagi air dalam ember!
7. Buka/lepaskan plester no. 2!
8. Amati gerak air yang keluar dan ukur jarak jatuhnya air dari dasar ember!
9. Ulangi prosedur no. 4, 5, 6, dan 7 dengan mengganti lubang yang dibuka mulai no. 3, 4, dan 5!
10. Amati bentuk lintasan air yang keluar dari lubang dinding, Bagaimanakah bentuk lintasannya?
11. Apakah bentuk lintasan itu sama dengan bentuk lintasan ketika kalian melemparkan bola secara mendatar?
12. Miripkah lintasan air tersebut dengan lintasan gerak peluru?
12. Dengan demikian kalian dapat menghitung kecepatan air yang keluar melalui lubang-lubang tersebut.
13. Untuk memudahkan perhitungan, kalian membutuhkan data diameter lubang, kedalaman air dari tiap lubang, dan ketinggian lubang dari dasar bejana.
14. Buatlah laporan dari kegiatan yang telah kalian lakukan secara individu!
15. Diskusikan hasil yang kalian peroleh dengan teman-teman kelompok kalian!

Kesimpulan:

Apa kesimpulan yang dapat kalian ambil dari kegiatan di atas?

Contoh Soal 8.10

Sebuah pelat logam dengan luas 0,10 m^2 dihubungkan dengan benda yang bermassa 8 gram melalui tali yang dilewatkan katrol tanpa gesekan. Sebuah pelumas setebal 0,3 mm yang ditempatkan di antara permukaan pelat dan bidang permukaan. Ketika sistem bergerak ke arah kanan, pelat bergerak dengan kelajuan konstan yaitu 0,085 m/s. Tentukan koefisien viskositas dari pelumas!

Penyelesaian:

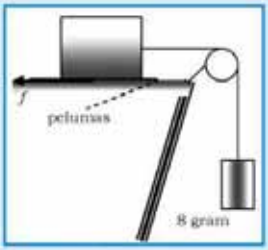
Berdasarkan soal di atas, maka data yang diketahui:

A_{pelat} = 0,10 m^2

Massa benda yang digantung = 6 gram

Tebal lapisan pelumas = 0,3 mm

v = 0,085 m/s



Gambar 8.20 *Plat logam yang dihubungkan dengan benda.*

Ditanya:

Koefisien Viskositas (η)?

Jawab:

Kelajuan pelat bersifat konstan, maka percepatanya sama dengan nol.Benda bergerak ke kanan disebabkan oleh besarnya tegangan T dan gaya gesek f, dihubungkan dengan viskositas. Karena menghasilkan kelajuan konstan maka resultan gaya sama dengan nol sehingga,

$$f = T = mg = (6\times10^{-3}\text{kg})(9{,}8\,\text{m/s}^2) = 58{,}8\times10^{-3}\text{N}$$

Dengan menggunakan Persamaan (8.35), maka besarnya koefisien viskositas adalah:

$$\eta = \frac{(58{,}8\times10^{-3})\ \text{N}(0{,}3\times10^{-3}\ \text{m})}{(0{,}10\ \text{m})^2(0{,}085\ \text{m/s})} = 0{,}21\ \text{N.s/m}^2$$

1. Hukum Poiseuille

Bila fluida mengalir melalui pipa, maka dimungkinkan adanya gesekan antara zat cair dengan dinding pipa, dan hal ini mengakibatkan kecepatan alir semakin ke pusat pipa semakin besar, lihat gambar 8.18(b). Kelajuan aliran rata-rata Q dinyatakan sebagai:

$$Q = A\bar{v} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad (8.36)$$

Persamaan 8.36 tak lain adalah persamaan debit aliran. Kelajuan aliran tergantung dari sifat fluida, dimensi pipa, dan perbedaan tekanan di kedua ujung pipa. Jean Poiseuille mempelajari tentang aliran zat alir dengan viskositas konstan dalam pipa dan tabung yang aliranya *steady* atau *laminer*. Dari studinya, ia berhasil menjabarkan persamaan untuk kelajuan aliran yang dikenal sebagai hukum Poiseuille yaitu:

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta L} \qquad (8.37)$$

di mana r adalah jari-jari pipa atau tabung dan L adalah panjang tabung.

Persamaan 8.37 menunjukkan bahwa kelajuan aliran berbanding terbalik dengan viskositas dan panjang pipa, tetapi berbanding lurus dengan perbedaan tekanan dan jari-jari tabung pangkat empat, maka kelajuan aliran sangat tergantung pada jari-jari pipa atau tabung.

2. Bilangan Reynold

Bila kelajuan aliran melebihi kecepatan tertentu, aliran laminer berubah menjadi aliran yang bersifat turbulen. Akibatnya persamaan 8.32 tidak berlaku lagi. Analisis aliran turbulen secara teoritis sangat sulit, maka analisisnya hanya didasarkan pada kesimpulan yang diperoleh dari eksperimen. Untuk membedakan aliran bersifat laminer atau tarbulen digunakan bilangan Reynold (R_n) yang berkaitan dengan kerapatan zat cair, kelajuan rata-rata, diameter pipa atau tabung (d), dan viskositas. Secara matematis bilangan Reynold dinyatakan sebagai:

$$R_n = \frac{\rho \bar{v} d}{\eta} \qquad (8.38)$$

Untuk aliran laminer, harga R_n lebih kecil dari 2000, sedangkan aliran bersifat turbulen jika harga R_n sekitar 2000 atau lebih besar dari 2000.

3. Aplikasi Prinsip Bernoulli

Setelah kalian mempelajari beberapa prinsip-prinsip atau hukum yang berlaku pada fluida, marilah kita tinjau bagaimana prinsip Bernoulli, Poiseuille, dan bilangan Reynold dapat digunakan untuk menganalisis aliran darah pada pada tubuh kita.

Prinsip Bernoulli menyatakan, bilamana ada aliran fluida yang cepat seperti udara atau air, maka tekanan berkurang pada ujung dimana aliran fluida sangat cepat. Contohnya aliran air yang sangat cepat dari *shower* menyebabkan tekanan berkurang di sekitar korden dan ini menyebabkan korden tertarik ke dalam (ke arah air). Hal serupa terjadi, jika kaca mobil yang sedang melaju dibuka, maka tekanan pada kaca yang terbuka berkurang tetapi aliran udara ke luar sangat cepat maka menyebabkan benda - benda berterbangan keluar jendela.

Prinsip Bernoulli didasarkan pada hukum kekekalan energi. Oleh karena itu, kita dapat menghitung rata-rata energi kinetik per satuan volume dengan menggunakan persamaan 8.34 untuk darah yang meninggalkan jantung dengan massa 10^{-3} kg dan volumenya 10^{-6} m^3 (=1 ml). Karena kecepatan rata-rata aliran darah 0,3 m/s, maka energi kinetik pada massa darah tersebut adalah:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = (1/2)(10^{-3}\text{kg})(0{,}3\text{m/s})^2 = 4{,}5\times10^{-5}\text{J}$$

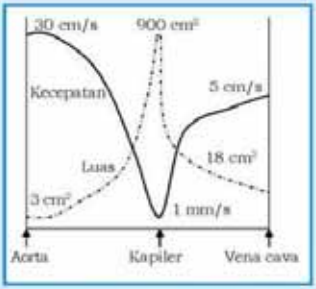
Karena volumenya 10^{-6} m^3, maka besarnya energi kinetik per satuan volume adalah $4{,}5 \times 10^{-5}$ J/10^{-6} m^3 = 45 J/m^3 saat darah meninggalkan jantung. Kerapatan energi sebesar 45 J/m^3 ekuivalen dengan tekanan yang besarnya 45 Pa atau sekitar 0,4 mmHg. Namun ketika seseorang melakukan olahraga berat kecepatan aliran darah yang dipompa oleh jantung mungkin sampai lima kali dari kecepatan rata-rata (pada keadaan istirahat), puncak detak jantung mempunyai energi kinetik per satuan volume ekuivalen 10 kPa (75 mmHg) dan dapat memperlihatkan sekitar 30% dari kerja total jantung.

4. Berapa kecepatan aliran darah kita?

Sebagaimana kita pelajari bersama melalui pelajaran biologi, bahwa pergerakan darah dari jantung-tubuh-jantung. Peredaran darah dari jantung kembali ke jantung melalui berbagai cabang arteri dan membawa darah ke berbagai jaringan (*tissue*). Saluran darah yang terkecil adalah kapiler dengan diameter sekitar 20¼ m dan dalam jumlah jutaan kapiler. Banyak darah yang dibawa lewat

saluran ini dan jumlah total luas penampang ekuivalen dengan sebuah tabung yang berdiameter sekitar 0,3 m.

Sedangkan aliran dari jantung melalui aorta ke dalam arteri dan arterioles mempunyai total luasan yang terbesar, kecepatan darah menurun. (lihat persamaan 8.270) seperti kecepatan air sungai menurun pada tempat yang lebih lebar. Gambar 8.21 secara sistematis menunjukan kecepatan aliran darah di aorta, kapiler dan vena cava.



Gambar 8.21 *Sistem peredaran darah di kaitkan dengan hukum kontinuitas*

Persamaan 8.27 menunjukkan bahwa kecepatan berbanding terbalik dengan luas penampang tabung yang mengalirkan darah. Kecepatan rata-rata di aorta sekitar 0,3 m/s, di kapiler sekitar [illegible] dengan CO_2 dan dengan kecepatan yang rendah memberikan waktu yang cukup untuk terjadinya proses diffusi gas tersebut.

Rangkuman

1. Besarnya tekanan dinyatakan sebagai: $P = \frac{F}{A}$
2. Besarnya tekanan hidrostatis dirumuskan: $P = \rho.g.h$.
3. Prinsip pascal: Tekanan yang diberikan ke dalam fluida dalam bejana tertutup diteruskan ke semua titik di dalam fluida dan dinding bejana, secara sama dan besarnya sama dengan tekanan yang diberikan pada fluida tersebut.
4. Pada pompa hidrolik berlaku:

   $\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$.
5. Besarnya gaya arhimedes dinyatakan dalam:

   $F_b = \rho.g(h_2 - h_1)A$

   $= \rho.g V_f = m_f.g$

6. Hubungan antara berat zat padat dan gaya ke atas pada zat padat dinyatakan: $F_b = \left(\frac{\rho_f}{\rho_0}\right) W_0$.
7. Keadaan hubungan antara gaya ke atas yang dikerjakan pada benda dan beratnya ada 3 macam, yaitu:
   a. $\rho_f > \rho_0 \rightarrow$ benda terapung.
   b. $\rho_f = \rho_0 \rightarrow$ benda melayang.
   c. $\rho_f < \rho_0 \rightarrow$ benda tenggelam.
8. Besarnya tegangan permukaan dalam zat cair didefinisikan sebagai gaya per satuan panjang yang bekerja segaris, dirumuskan: $\gamma = \frac{F}{L}$.
9. Besarnya tegangan permukaan dirumuskan: $F = \gamma L = \gamma(2\pi r)$.
10. Tinggi kenaikan zat cair dalam kolom pipa kapiler dirumuskan: $h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho . g . r}$.
11. Persamaan kontinuitas untuk fluida yang tak termampatkan yaitu: $A_1 V_1 = A_2 V_2$.
12. Hukum Bernoulli untuk aliran fluida dinyatakan dalam: $P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{konstan}$.
13. Besarnya koefisien viskositas dirumuskan: $\eta = \frac{Fh}{Av}$.
14. Kelajuan aliran berbanding terbalik dengan viskositas dan panjang pipa, tetapi berbanding lurus dengan perbedaan tekanan dan jari-jari tabung pangkat empat, dinyatakan dengan hukum poiseuille: $Q = \Delta \bar{v} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$.
15. Untuk membedakan aliran bersifat laminer atau turbulen digunakan bilangan Reynold (Rn), yang dinyatakan sebagai: $R_n = \frac{\rho \bar{v} d}{\eta}$.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Bila kalian mempunyai tas plastik yang cukup besar dan kuat, isilah tas plastik tersebut dengan air dan ikatlah dengan kuat. Kemudian ikat tas plastik tersebut dengan tali dan peganglah tali sambil berdiri di bibir pantai yang agak menjorok ke danau. Pada saat tas plastik yang penuh air itu seluruhnya terbenam dalam air danau, maka . . . .
   a. berat air menjadi berkurang
   b. air dalam tas plastik memperoleh gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat air dalam tas plastik itu sendiri
   c. berat air dalam tas plastik menjadi bertambah
   d. air dalam tas plastik memperoleh gaya ke atas yang besarnya lebih kecil dari berat air dalam tas plastik itu sendiri
   e. air dalam tas plastik memperoleh gaya ke atas yang besarnya lebih besar dari berat air dalam tas plastik itu sendiri

2. Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .
   a. semakin dalam benda dibenamkan dalam air semakin besar gaya ke atas yang dialami benda tersebut
   b. sebuah balon yang berisi gas yang dilepaskan dari permukaan bumi yang membubung ke atas, makin tinggi balon membubung makin besar volume balon
   c. balon gas yang membumbung tinggi di udara volumenya membesar karena tekanan udara, pada lapisan atmosfer bagian atas mengecil
   d. makin tinggi dinding waduk makin tinggi tenaga yang dihasilkan karena makin dalam air makin besar tekanannya
   e. jawaban di atas semuanya benar

3. Balok es dimasukkan ke dalam ember yang penuh air sehingga sebagian volume air tumpah. Kemudian setelah dibiarkan balok es mencair semuanya, maka . . . .
   a. ember menjadi penuh air lagi dan tidak ada air yang tumpah karena pada es yang mengapung, besarnya gaya ke atas yang dialami es sama dengan berat es itu sendiri
   b. ember penuh air dan sebagian air tumpah karena ada bagian es yang tidak terbenam dalam air
   c. air dalam ember tidak penuh karena massa jenis air lebih besar dari massa jenis es
   d. semua air dari es yang mencair tumpah
   e. semua pernyataan di atas tidak benar

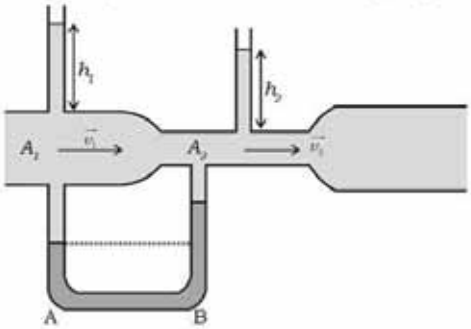
4. Air yang keluar dari keran baik yang menetes ke bawah ataupun yang memancar ke atas alirannya mengecil karena . . . .
   a. makin ke bawah kecepatan air konstan
   b. makin ke bawah kecepatan air makin besar padahal debit air konstan maka penampang alirannya mengecil
   c. makin ke bawah air mengalir makin bebas maka aliran air memperoleh tekanan udara yang lebih besar
   d. makin ke bawah percepatan air makin besar
   e. semua jawaban di atas salah

5. Air mengalir dalam pipa kaca yang diameter penampangnya bervariasi. Sebuah bola yang terbuat dari karet yang elastis dimasukkan dalam pipa dan ikut hanyut bersama air yang mengalir. Pipa diletakkan mendatar. Bila kalian amati, maka . . . .
   a. bola hanyut bersama dengan air yang mengalir dengan kelajuan konstan
   b. bola hanyut bersama aliran air yang mengalir dengan percepatan konstan
   c. bola hanyut dengan kecepatan lebih kecil daripada kecepatan air yang mengalir
   d. bola hanyut bersama aliran air, kecepatannya membesar pada saat lewat dari penampang besar ke penampang kecil dan bola benjol ke belakang (berlawanan dengan arah aliran)
   e. bola hanyut bersama aliran air, kecepatannya mengecil pada saat lewat dari penampang besar ke penampang kecil dan bola benjol ke depan

6. Dua buah waduk buatan A dan B mempunyai kedalaman yang sama, tetapi waduk A dan B masing-masing mempunyai diameter 15 km dan 50 km, maka . . . .
   a. besarnya tekanan pada dasar waduk B lebih besar daripada waduk A
   b. besarnya tekanan pada dasar waduk B lebih kecil dari pada waduk A
   c. besarnya tekanan pada dasar kedua waduk sama besar karena ketinggian airnya sama
   d. besarnya tekanan pada dasar kedua waduk sama besar karena air mempunyai kerapatan 1 gram/cm^3
   e. semua pernyataan di atas salah

7. Bila sebuah barometer dibuat dengan mengisinya dengan zat cair yang kerapatannya lebih kecil dari kerapatan air raksa, maka . . . .
   a. digunakan tabung yang diameternya lebih besar daripada tabung yang diisi dengan air raksa
   b. digunakan tabung yang diameternya lebih kecil daripada tabung yang diisi dengan air raksa
   c. digunakan tabung yang diameternya lebih besar dan panjang tabungnya lebih pendek daripada tabung yang diisi dengan air raksa
   d. digunakan tabung yang lebih panjang daripada tabung yang diisi dengan air raksa
   e. digunakan tabung yang diameternya lebih kecil dan lebih panjang daripada tabung yang diisi dengan air raksa

8. Air mengalir pada pipa kaca yang diameternya bervariasi, lihat gambar di bawah, maka menurut hukum Bernoulli pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .



a. tinggi air $h_1 > h_2$ dan permukaan air di kaki A lebih rendah daripada permukaan air di kaki B, karena pada pipa yang berdiameter kecil kecepatan air lebih besar daripada yang berdiameter lebih besar
b. tinggi air $h_1 > h_2$ dan permukaan air di kaki A lebih tinggi daripada permukaan air di kaki B, karena pada pipa yang berdiameter kecil kecepatan air lebih besar daripada yang berdiameter lebih besar
c. tinggi air $h_1 < h_2$ dan permukaan air di kaki A lebih rendah daripada permukaan air di kaki B karena pada pipa yang berdiameter kecil kecepatan air lebih besar daripada yang berdiameter lebih besar
d. tinggi air $h_1 < h_2$ dan permukaan air di kaki A lebih tinggi dari pada permukaan air di kaki B karena pada pipa yang berdiameter kecil kecepatan air lebih kecil daripada yang berdiameter lebih besar
e. semua jawaban di atas salah

9. Seorang siswa ingin mengukur tekanan udara di puncak gunung Merbabu dan di pantai Kaliurang. dengan menggunakan barometer air raksa. Walaupun kedua tempat tersebut suhunya sedikit berbeda namun rapat jenis di kedua tempat tersebut sama besar, maka . . . .
a. tinggi air raksa dalam tabung di kedua tempat sama
b. tinggi air raksa dalam tabung di gunung Merbabu lebih rendah daripada tinggi air raksa di Kaliurang
c. tinggi air raksa dalam tabung di gunung Merbabu lebih tinggi daripada tinggi air raksa di Kaliurang
d. tinggi air raksa dalam tabung pada siang hari yang sangat panas lebih tinggi daripada waktu malam yang sangat dingin
e. tinggi air raksa dalam tabung di gunung pada siang hari yang sangat panas lebih tinggi daripada waktu malam yang sangat dingin

10. Gejala-gejala fisika yang dapat diterangkan dengan konsep tegangan permukaan pada zat cair adalah . . . .
a. tetes air berbentuk bola, mengecilnya kecepatan aliran air pada penampang pipa yang lebih kecil
b. tetes air berbentuk bola, mengecilnya kecepatan aliran air pada penampang pipa yang lebih kecil, dan naiknya permukaan air ke dalam pipa kapiler bila pipa kapiler dicelupkan dalam reservoir air

c. tetes air berbentuk bola, membesarnya kecepatan aliran air pada penampang pipa yang lebih besar, dan terapungnya pisau silet di atas permukaan air
d. tetes air berbentuk bola, mengecilnya penampang aliran tetes air dari keran, karena air telah bergerak semakin ke bawah, dan terapungnya pisau silet di atas permukaan air
e. semua jawaban di atas benar

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

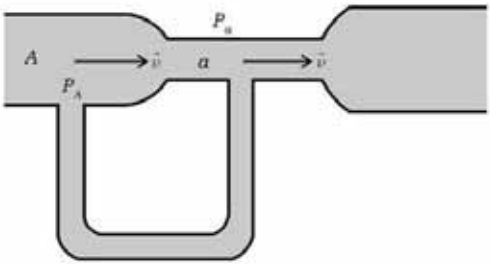
1. Bagaimanakah prinsip hukum Pascal? Berilah contoh penggunaan hukum Pascal dalam kehidupan sehari-hari!
2. Apakah yang disebut tegangan permukaan? Mengapa sabun dapat melarutkan kotoran dari pakaian secara lebih mudah daripada air biasa?
3. Jelaskan prinsip dari hukum Bernoulli dan berilah contohnya dalam kehidupan sehari-hari!
4. Sebuah benda berbentuk kubus tercelup dalam air yang massa jenisnya 1000 kg/m^3. Kubus tersebut pajang rusuk-rusuknya L dan bidang sisi atas terletak sejauh $(1/2)L$ dari permukaan air, tentukan:
   a. tekanan pada bidang sisi atas kubus,
   b. tekanan pada bidang sisi tegak kubus,
   c. tekanan pada sisi bawah kubus yang dikerjakan oleh air
   d. gaya ke atas yang dialami kubus!
5. Sebuah mobil massanya 1750 kg. Volume ruang penumpang yang berisi udara 6,25 m^3, volume mesin dan roda depan 0,8 m^3, dan volume tangki gas dan badan mobil 0,9 m^3. Mobil yang mula-mula diparkir di tepi danau tersebut tergelincir dan tercebur ke danau, jika:
   a. Sebelum ada air masuk ke dalam ruang penumpang, mobil mengapung dalam danau. Berapakah volume bagian mobil yang terbenam di dalam air?
   b. Bila kemudian air masuk ke dalam ruang penumpang, berapakah volume air yang masuk, sehingga mobil tidak mengapung lagi?

6. Air yang mengalir dalam pipa mempunyai kelajuan 8 m/s pada saat melewati bagian pipa yang luas penampangnya 6 cm^2, kemudian pipa dibengkokkan ke bawah sehingga posisi air yang mengalir turun 10 m dan luas penampang pipa yang dilewati seluas 12 cm^2.
   a. Berapakah kelajuan air pada aliran bawah?
   b. Berapakah tekanan air pada bagian bawah bila tekanan air pada bagian atas $1{,}5 \times 10^5$ Pa?

7. Sebuah bak air tingginya 4 m. Pada sisi bak air terdapat 4 lubang yang diameter 7 cm, 10,5 cm, 14 cm, dan 21 cm, sedangkan tingginya masing-masing 1 m, 1,5 m, 2 m, dan 3 m dari dasar bak dan ditutup dengan kuat. Bila kemudian tutup dilepas.
   a. Tentukan kecepatan air yang keluar dari masing-masing lubang!
   b. Tentukan jarak pancaran air yang jatuh dilantai!

8. Pada tumbuh-tumbuhan, air dapat naik ke atas lewat pipa kapiler yang disebut xilem yang diameternya antara 0,1 mm –0,3 mm. Berapa tinggi maksimum air yang naik dalam xylem?

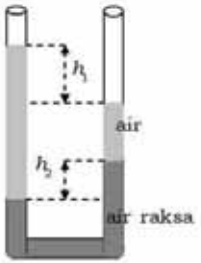
9. Sebuah venturimeter digunakan untuk mengukur aliran air dalam pipa. Alat ukur tersebut dihubungkan dengan dua bagian pipa yang luas penampangnya berbeda, lihat gambar! Kecepatan alir zat cair yang melewati penampang yang luasnya A dan a masing-masing adalah V dan v, sedangkan tekanan pada masing-masing penampang adalah P_A dan P_a.



a. Tunjukkan bahwa $V = \sqrt{\frac{2a^2\Delta p}{\rho(A^2 - a^2)}}$, di mana $\Delta p = P_A - P_a$ adalah perbedaan tekanan antara penampang besar dan kecil, dan ρ adalah massa jenis zat alir.

b. Bila $A = 72\ cm^2$ dan $a = 36\ cm^2$, $P_A = 64$ kPa dan $P_a = 48$ Pa, berapakah debit air (rata-rata volume air dalam m^3 yang mengalir per sekon) yang mengalir lewat pipa?

10. Sebuah pipa U mempunyai penampang yang homogen, kedua ujungnya terbuka. Mula-mula pipa tersebut diisi dengan air raksa, kemudian pada masing-masing kaki pipa dituangkan air sedemikian hingga beda permukaan air raksa pada kedua kaki setelah sistem dalam keadaan setimbang adalah $h_2 = 1$ cm, lihat gambar! Tentukan tinggi h_1 bila massa jenis air 1000 kg/m^3 dan massa jenis air raksa 13600 kg/m^3!



Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian! Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab IX

Teori Kinetik Gas

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menghitung momentum linear dan komponen-komponen momentum.

Kata kunci dalam memahami ab ini adalah:

1. Suhu
2. Tekanan
3. Volume
4. Energi
5. Kerja/usaha

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup:

1. Ciri-ciri gas ideal.
2. Hukum-hukum termodinamika.
3. Mesin panas dan pendingin.
4. Kapasitas panas.

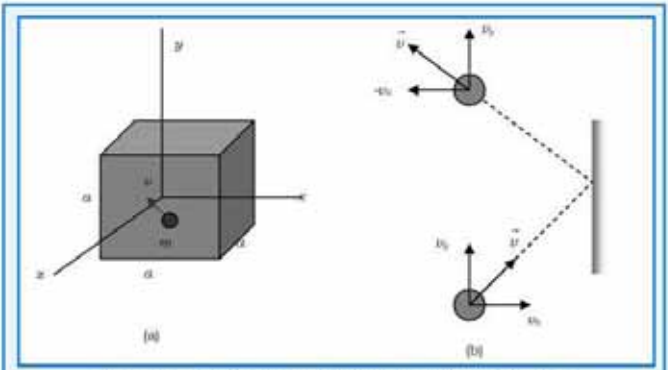
Pada bab ini, akan membahas pada penyelidikan secara teori bahwa materi, apapun fasenya, terdiri dari atom-atom dan bahwa atom-atom ini terus menerus bergerak secara acak. Teori ini disebut **teori kinetik**. Dari sini kita akan mengetahui hubungan penting antara energi kinetik rata-rata molekul dalam suatu gas dan suhu (temperatur) Pembahasan teori kinetik dalam bab ini dibatasi pada fase gas, yang dikenal dengan teori kinetik gas.

Dalam model gas yang sederhana, setiap molekul/partikel gas dipandang sebagai bola pejal yang dalam gerakannya mereka bertumbukan secara elastis, baik antara sesama molekul maupun antara molekul dengan dinding bejana tempat gas berada. Dengan menganggap bahwa molekul gas berbentuk bola pejal berarti interaksi antara molekul tidak terjadi kecuali bertumbukan. Selama bertumbukan, molekul tersebut tidak mengalami perubahan bentuk dan energi. Gambaran seperti ini mudah dipahami untuk gas atom tunggal (monoatom) yang hanya memiliki energi kinetik translasi. Berbeda dengan molekul yang lebih komplek seperti oksigen (O_2) dan CO_2 yang energi dalamnya dikaitkan dengan rotasi, dan vibrasi (getaran) molekul tersebut.

A. Ciri-ciri Gas Ideal

Untuk memudahkan analisis lebih lanjut dalam mempelajari sifat gas secara mikro, maka gas diasumsikan sebagai gas ideal. Ciri-ciri gas ideal adalah:

1. Jumlah molekulnya sangat banyak dan jarak antarmolekul lebih besar daripada ukuran masing-masing molekul gas. Oleh karena itu, volume dari molekul-molekul gas dapat diabaikan (dianggap sebagai titik massa) dibandingkan dengan volume bejananya.
2. Gerakan molekul tunduk pada hukum Newton tentang gerak, dan molekul bergerak secara acak (random). Karena bergerak secara random, maka setiap molekul mempunyai peluang yang sama untuk bergerak ke segala arah dengan kecepatan yang bervariasi. Distribusi kecepatan bersifat konstan walaupun terjadi tumbukan antarmolekul.
3. Molekul-molekul saling bertumbukan secara elastis satu sama lain dan dalam tumbukannya berlaku hukum kekekalan momentum dan energi.
4. Gaya antarmolekul diabaikan kecuali selama tumbukan. Gaya antarmolekul adalah gaya berjarak pendek, maka molekul hanya berinteraksi pada saat bertumbukan.
5. Gas ideal adalah gas murni, maka semua molekulnya identik.
6. Gas dan dinding bejana secara termal dalam keadaan setimbang, oleh karena itu banyaknya molekul dan energi kinetik molekul yang menumbuk dinding sama besar dengan yang dipantulkan dinding.



Gambar 9.1 *Partikel gas ideal menumbuk dinding.*

Ada saling hubungan antara kecepatan gerak partikel-partikel fluida dan tekanan. Demikian juga untuk gas ideal yang molekul-molekulnya bergerak secara acak dalam bejana tertutup. Besarnya tekanan dalam ruangan tertutup yang berisi gas dapat dijabarkan dari hukum-hukum Newton yang menguasai gerakan molekul-molekul gas. Misalnya, gas ideal yang terdiri dari N molekul menempati ruang (bejana) tertutup yang volumenya V, ditunjukkan pada gambar 9.1(a).

Gambar 9.1(a) menunjukkan sebuah bejana berbetuk kubus dengan panjang sisi-sisinya adalah a berisi N molekul gas. Sekarang marilah kita tinjau sebuah molekul yang bergerak dengan kecepatan v dan menumbuk dinding, seperti terlihat pada gambar 9.1(b). Sesungguhnya molekul bergerak dalam ruang dengan komponen kecepatan, masing-masing dalam arah sumbu x, y, dan z adalah v_x, v_y, v_z, tetapi untuk memudahkan penganalisisannya hanya diperlihatkan komponen kecepatan dalam arah x dan y saja. Komponen kecepatan arah sumbu z tidak diperlihatkan.

Seperti terlihat pada gambar 9.1(b), sebuah melekul gas menumbuk bidang yang sejajar dengan bidang yz (hanya diperlihatkan sebagai garis yang sejajar sumbu y). Komponen kecepatan yang berubah arahnya setelah molekul menumbuk bidang hanyalah komponen kecepatan yang tegak lurus pada bidang (garis) tersebut, yaitu komponen kecepatan arah sumbu x saja. Karena tumbukan bersifat elastis, maka perubahan momentum yang terjadi sebelum dan sesudah tumbukan adalah:

$$\Delta p_x = -mv_x - (mv_x) = -2mv_x \qquad (9.1)$$

Persamaan 9.1 menunjukkan bahwa momentum yang diberikan ke dinding untuk setiap tumbukan adalah $2mv_x$, karena momentum dalam sistem molekul dan bejana adalah kekal. Bila sebuah molekul menumbuk dinding yang sama sebanyak dua kali secara berturutan, maka molekul tersebut telah menempuh lintasan yang jaraknya $2a$ dan arahnya searah sumbu x dalam waktu Δt. Dalam waktu Δt tersebut molekul telah bergerak sejauh $v_x \Delta t$, sehingga waktu yang diperlukan agar sebuah molekul menumbuk dinding yang sama sebanyak dua kali secara berturutan adalah:

$$\Delta t = \frac{2a}{v_x} \qquad (9.2)$$

Bila pada setiap tumbukan molekul mengerjakan gaya F terhadap dinding, maka dalam waktu Δt besarnya impuls sama dengan perubahan momentum yang dapat diperoleh dari persamaan 9.1 dan 9.2 sebagai:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta \vec{p} = 2mv_x$$
$$\vec{F} = \frac{mv_x^2}{a} \qquad (9.3)$$

Persamaan 9.3 menunjukkan besarnya gaya arah sumbu x yang diberikan oleh sebuah molekul pada bidang xy dalam waktu Δt. Karena dalam ruang terdapat N molekul, maka besarnya gaya total arah sumbu x per satuan luas akan menghasilkan tekanan total. Dari persamaan (6.3) diperoleh:

$$P = \frac{\Sigma F}{A} = \frac{m}{a^3}\left(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + ...\right) \qquad (9.4)$$

di mana $a^3 = V$ (volume kubus) dan $(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + ...)$ adalah jumlah total kuadrat kecepatan arah sumbu x dari molekul 1, 2, 3 ...N. Karena jumlah molekul gas sangat besar, maka kecepatan yang diambil adalah kecepatan rata-rata $\bar{v}$ dari keseluruhan molekul yang berjumlah N. Persamaan 9.4 dapat dituliskan kembali sebagai:

$$P = \frac{Nm}{V}(\overline{v_x^2}) \qquad (9.5)$$

di mana $\overline{v_x^2} = \frac{v_x^2 + v_{x^2}^2 + ...}{N}$.

Kuadrat kelajuan untuk sembarang partikel yang bergerak dengan kecepatan v dalam ruang tertutup diberikan oleh:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Untuk gas ideal diasumsikan bahwa kecepatan rata-rata arah sumbu x, sumbu y, dan sumbu z sama besar, yaitu:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

Oleh karena itu persamaan 9.5 dapat ditulis kembali:

$$P = \frac{1}{3}\frac{Nm}{V}(\overline{v^2}) \qquad (9.6)$$

Dengan menggunakan pengertian energi kinetik sebuah molekul gas, $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ maka persamaan 9.6 dapat dituliskan sebagai:

$$P = \frac{2}{3}\frac{1}{2}m\overline{v^2}\frac{N}{V} = \frac{2}{3}\overline{E}_k\frac{N}{V} \qquad (9.7)$$

Persamaan 9.7 menunjukkan bahwa tekanan dalam ruang tertutup yang berisi gas ideal berbanding lurus dengan jumlah molekul persatuan volume dan energi kinetik rata-rata translasi per molekul.

Jika $N.m$ adalah massa total molekul gas yang besarnya sama dengan $n.M$, di mana n adalah banyaknya mol gas dan M adalah berat molekul, maka persamaan 9.6 dapat ditulis dalam bentuk lain:

$$P = \frac{1}{3}\frac{nM}{V}(\overline{v^2}) \qquad (9.8)$$

Dari model gas ideal di atas, kita dapat menemukan hubungan antara beberapa variabel penting dalam skala makroskopik, yaitu hubungan tekanan dan volume dengan besaran mikroskopik, yaitu kelajuan rata-rata molekul. Di sini kalian bisa melihat suatu hubungan yang sangat menarik antara dunia mikroskopik (molekul gas) dan dunia makroskopik seperti dalam pengukuran tekanan Gauge dan volume (dengan meteran).

B. Tinjauan Suhu secara Molekuler

Hubungan antara persamaan 9.7 dengan persamaan keadaan gas ideal yaitu $PV=NkT$, akan memberikan pemahaman tentang suhu menurut persamaan sebagai berikut:

$$\frac{2}{3}N(\bar{E}_k) = NkT \rightarrow T = \frac{2}{3k}(\bar{E}_k) \qquad (9.9)$$

di mana k adalah kontanta Boltzman yang besarnya $1{,}38\times10^{-23}$ J/K.

Persamaan 9.9 memperlihatkan bahwa suhu menunjukkan ukuran langsung dari energi kinetik translasi rata-rata. Persamaan 9.9 bisa ditulis kembali dalam pernyataan energi kinetik rata-rata per molekul sebagai fungsi suhu:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT \qquad (9.10)$$

Karena $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$ maka:

$$\bar{E}_{kx} = \bar{E}_{ky} = \bar{E}_{kz} = \frac{1}{2}kT \qquad (9.11)$$

Persamaan 9.11 menunjukkan bahwa setiap komponen gerak translasi memberikan kontribusi energi kinetik yang sama kepada gas, yaitu sebesar (1/2) kT.

Energi kinetik translasi total untuk N molekul gas sama dengan N dikalikan dengan energi kinetik translasi rata-rata per molekul, yaitu:

$$E = N\bar{E}_k = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}nRT \qquad (9.12)$$

di mana $k = \frac{R}{N_A}$ adalah konstanta Boltzman, $n = \frac{N}{N_A}$ = jumlah mol gas, N_A adalah bilangan Avogadro dan R adalah konstanta gas umum yang besarnya 8,31 J/mol.K.

Rata-rata kuadrat kelajuan dituliskan sebagai $\overline{v^2}$, dan akar rata-rata kuadrat kelajuan v_{rms}, didefinisikan sebagai $v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}}$. Dari persamaan 9.12 diperoleh:

$$\bar{E}_k = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \rightarrow \overline{v^2} = \frac{3}{m}kT$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \qquad (9.13)$$

di mana m adalah massa sebuah molekul dan M adalah berat molekul.

Persamaan 9.13 menunjukkan bahwa semakin ringan molekul, semakin cepat geraknya atau molekul-molekul gas yang lebih ringan akan bergerak lebih cepat daripada molekul gas yang lebih berat pada suhu ruangan yang sama. Contoh, untuk molekul hidrogen yang mempunyai berat molekul 2 g/mol, bergerak dengan v_{rms} = 4 kali lebih cepat daripada molekul oksigen yang mempunyai berat 32 g/mol, atau v_{rms} hidrogen = v_{rms} oksigen.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal kalian**, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 9.1

Sebuah tangki dengan volume 0,5 m^3 berisi 2 mol gas helium pada suhu 25°C. Dengan menganggap gas helium sebagai gas ideal:

a. Tentukan energi dalam total dari sistem tersebut!
b. Berapa energi kinetik rata-rata per molekul?

Penyelesaian:

Dari soal di atas, maka dapat diketahui:
V = 0,5 m^3
n = 2
T = (25+273)K
R = 8,31 J/mol K

Ditanya:

a. Energi dalam total (E)!
b. Energi rata-rata per molekul ($E_{k\ rata}$)!

Jawab:

a. Dengan menganggap bahwa gas helium adalah gas ideal, maka berlaku persamaan 9.12:

$$E = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}(2\text{mol})\{8,31\text{J/mol(K)}\}(298\text{K})$$

$$E = 7,43\times10^3\ \text{J}$$

b. Untuk menentukan energi kinetik rata-rata per molekul kita dapat menggunakan persamaan (9.10):

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2}KT = \frac{3}{2}(1{,}38\times10^{-23}\,J/K)(298K) \rightarrow \bar{E}_k = 6{,}17\times10^{-21}\,J$$

Untuk meningkatkan **kemampuan sosial dan akademik** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut ini!

Diskusikan

Dengan menggunakan berat molekul dari helium sebesar 4 g/mol, tentukan kelajuan *rms* pada suhu 25°C!

C. Hukum Pertama Termodinamika

Panas, energi dalam, dan kerja adalah besaran yang tercakup dalam sistem termodinamika. Secara umum, panas *(Q)* yang diberikan ke sistem akan dipergunakan untuk menaikan suhu atau menaikkan energi dalam (ΔU) sistem dan melakukan kerja (*W*). Prinsip ini dikenal sebagai hukum I termodinamika. Secara matematis dapat dituliskan:

$$Q = \Delta U + W \qquad (9.14)$$

Q mempunyai nilai positif jika panas diberikan ke sistem dan kerja positif bila dilakukan oleh sistem terhadap lingkungannya. Contohnya kerja dilakukan oleh sistem untuk memperbesar volume gas (ekspansi gas). Sebaliknya, nilai Q negatif jika panas dilepas dari sistem dan kerja yang dilakukan bernilai negatif. Hal ini terjadi bila energi dari luar melakukan kerja terhadap sistem, contohnya memperkecil volume (kompresi) gas.

D. Aplikasi Hukum I Termodinamika

1. Proses Isobarik

Proses isobarik adalah suatu proses dalam sistem gas pada tekanan tetap. Secara skematik proses isobarik ditunjukkan dengan diagram *P-V* pada gambar 9.2. Pada diagram *P-V*, lintasan proses

isobarik ditunjukkan pada sepanjang lintasan horisontal yang disebut garis isobar. Jika panas diberikan ke sistem dan tekanan gas dalam silinder dipertahankan konstan, menurut persamaan keadaan gas ideal, maka perbandingan antara volume terhadap suhu merupakan bilangan konstan, yaitu:

$$PV = NkT \rightarrow \frac{V}{T} = \frac{Nk}{P} = \text{konstan} \qquad (9.15)$$

Untuk P konstan maka V/T juga bernilai konstan karena N dan k adalah bilangan konstan.

Jika panas diberikan ke sistem pada tekanan tetap, maka kerja yang dilakukan oleh sistem adalah:

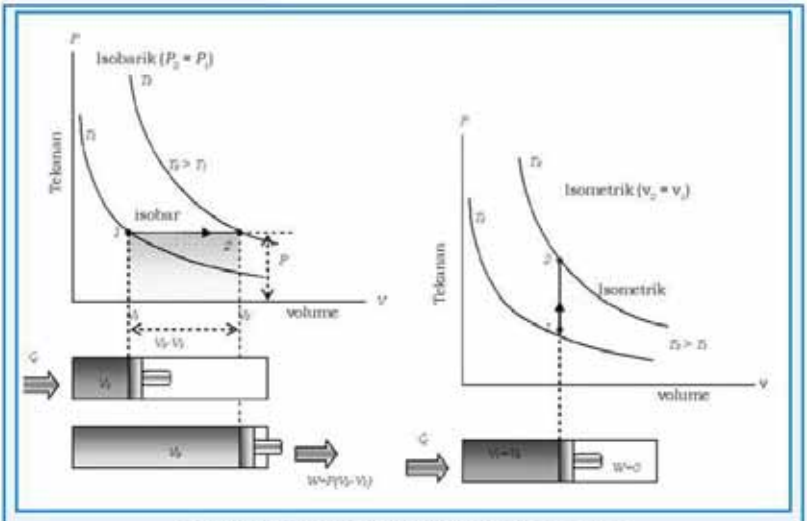
$$W = F\Delta x \text{ atau } W = PA\Delta x$$

di mana $A\Delta x$ sama dengan perubahan volume gas, $A\Delta x = \Delta V = V_2 - V_1$. Jadi kerja yang dilakukan adalah:

$$W = P\Delta V = P(V_2 - V_1) \qquad (9.16)$$

Secara umum untuk proses isobarik, hukum I termodinamika dapat ditulis kembali dalam bentuk:

$$Q = \Delta U + P\Delta V \qquad (9.17)$$



Gambar 9.2 *Proses Isobarik (tekanan konstan).*

Karena energi dalam gas ideal besarnya hanya tergantung pada suhu mutlak T (lihat persamaan 9.12), maka perubahan energi dalam tidak tergantung pada proses (lintasan) yang ditempuh, namun hanya tergantung pada suhu awal dan akhir gas:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \propto T_2 - T_1 .$$

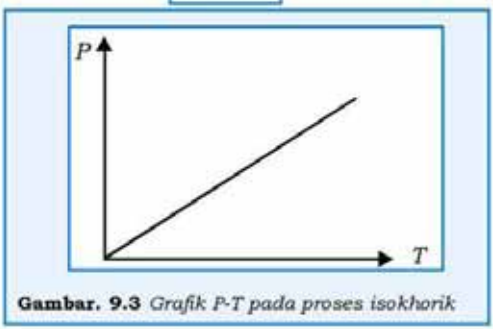
Brilian

Pernahkan kalian mengamati volume balon karet? Balon karet yang diisi udara dengan volume tertentu ketika dibiarkan ke atas dengan ketinggian tertentu, maka volume balon akan bertambah, mengapa bisa demikian? Cobalah kalian analisis fenomena tersebut dengan konsep termodinamika!

2. Proses Isometrik/Isokhorik

Jika panas diberikan pada suatu sistem dan sistem mengalami proses pada volume tetap (isometrik), lihat gambar 9.3, maka $\Delta V = 0$, maka penambahan panas ke dalam sistem hanya digunakan untuk menaikkan energi dalam sistem yang ditunjukkan dalam bentuk kenaikan suhu sistem. Oleh karena itu persamaan 9.17 menjadi:

$$Q = \Delta U \qquad (9.18)$$



Gambar. 9.3 *Grafik P-T pada proses isokhorik*

3. Proses Isotermal

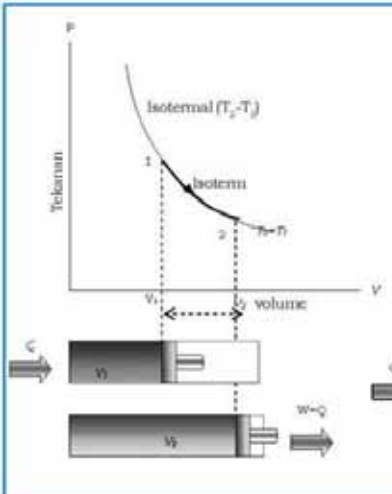
Jika panas diberikan ke sistem dan sistem dipertahankan pada suhu konstan (proses isotermal, $\Delta T = 0$), maka persamaan 9.16 menjadi,

$$Q = W = P\Delta U \qquad (9.19)$$

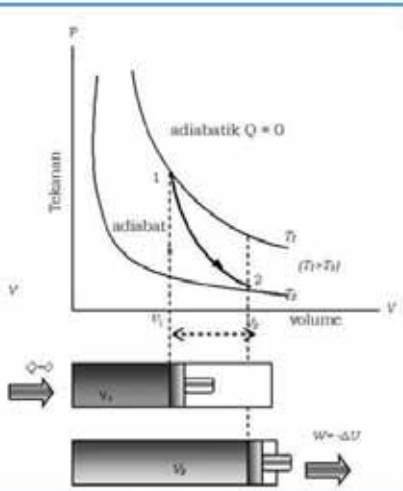
4. Proses Adiabatik

Bila suatu sistem gas mengalami proses dan tidak ada panas yang masuk atau keluar sistem, maka proses tersebut disebut proses adiabatik, lihat gambar 9.5. Jadi dalam proses adiabatik $Q = 0$, maka persamaan 9.17 dapat dituliskan sebagai:

$$Q = 0 = \Delta U + P\Delta V = W = -\Delta U \qquad 6.20)$$



Gambar. 9.4. *Proses Isotermal (suhu konstan).*



Gambar. 9.5. *Proses adiabatik ($Q = 0$).*

Contoh Soal 9.2

Suatu gas ideal dimampatkan dari volume 10 liter menjadi 3 liter pada tekanan konstan 1,5 atm. Dalam proses ini panas mengalir keluar dan suhu menurun. Kemudian panas ditambahkan dengan mempertahankan volume konstan, tekanan dan suhu naik sampai mencapai suhu awal. Hitung kerja total yang dilakukan dalam proses dan berapa panas total yang mengalir ke dalam gas!

Penyelesaian:

Data diketahui dari soal 9.2 adalah:

V_1 = 10,0 liter = $10,0 \times 10^{-3}$ m^3

V_2 = 3,0 liter = $3,0 \times 10^{-3}$ m^3

P_1 = P_2 = 1,5 atm = $1,5 \times 10^5$ N/m^2 (tekanan konstan)

V_2 = V_3 = 3 liter (volume konstan)

Ditanya:

a. Kerja total (W)?

b. Panas total (Q)?

Jawab:

a. Berdasarkan persamaan 9.16,

$$W = P\Delta V = P(V_2 - V_1)$$

$$W = (1,5 \times 10^5 \text{N/m}^2)(3-10) \times 10^{-3}\ \text{m}^3 = -1,1 \times 10^3\ \text{J}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa kerja dilakukan pada gas.

b. Karena suhu awal dan suhu akhir proses adalah sama, berarti tidak ada perubahan energi dalamnya ($\Delta U = 0$). Berdasarkan persamaan 6.16 maka:

$$Q = W = -1,1 \times 10^3\ \text{J}$$

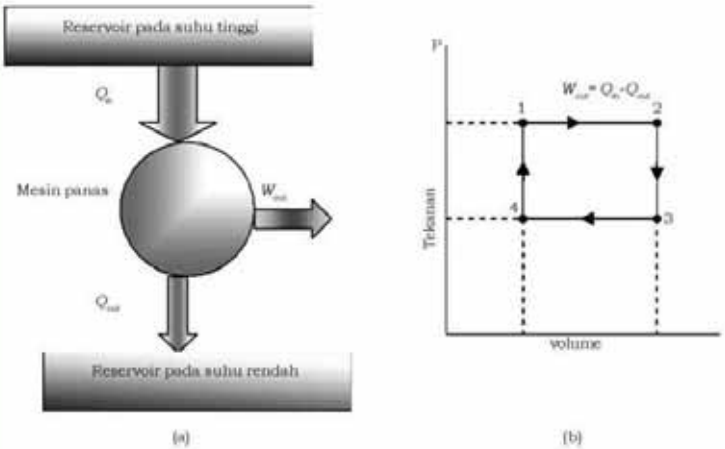
Karena kerja dilakukan terhadap gas maka panas juga keluar dari gas.

E. Mesin Panas dan Mesin Pendingin

1. Mesin Panas

Mesin panas adalah suatu alat yang berfungsi untuk mengkonversi energi panas menjadi kerja. Secara teori, mesin panas adalah peralatan yang mengambil energi panas dari sumber yang mempunyai suhu tinggi dan mengkonversi sebagian energi panas menjadi kerja yang berguna yang dilakukan oleh mesin dan sebagian sisanya dibuang ke lingkungan yang mempunyai suhu yang lebih rendah. Sebagian besar turbin, mesin yang menghasilkan energi listrik adalah mesin panas, energi panas yang digunakan berasal dari berbagai sumber, seperti bahan bakar kimia (minyak,

gas, dan batu bara), reaksi nuklir, atau energi panas bumi. Contohnya mesin diesel menggunakan bahan bakar solar dan mesin gasoline menggunakan bahan bakar premium, semuanya menggunakan prinsip kerja mesin panas. Sistem kerja mesin panas dapat dilihat pada gambar 9.6(a).



Gambar 9.6 *(a) Sistem kerja dari mesin panas, (b) sebuah proses siklus yang terdiri dari dua isobar dan dua isomet.*

Secara sederhana, bila energi panas diberikan ke dalam sistem gas yang berada dalam silinder yang dilengkapi piston, maka kerja akan dihasilkan hanya satu kali proses. Padahal, output yang diharapkan bersifat terus-menerus, maka dalam praktiknya mesin panas harus beroperasi dalam sebuah siklus atau serangkaian proses yang membawa mesin panas kembali ke keadaan semula, lihat gambar 9.6(b).

Contoh mesin yang beroperasi dalam sebuah siklus adalah mesin uap dan mesin-mesin pada sepeda motor dan mobil. Contoh ideal sebuah siklus tertutup termodinamika diperlihatkan pada gambar 9.6(b). Proses ini terdiri dari dua proses isobar dan dua isomet. Jika proses tersebut terjadi secara berturutan seperti yang

ditunjukkan pada gambar, proses berlangsung melalui siklus 1-2-3-4-1 yang kembali ke keadaan awal. Seperti yang sudah kalian pelajari bahwa pada proses isobarik, kerja yang dilakukan sama dengan luas daerah di bawah garis isobar, $W = P\,\Delta V$ pada diagram P - V. Pada gambar 9.6(b), besarnya kerja pada proses 1-2 adalah positif dan pada proses 3-4 negatif karena volumenya mengecil.

Seperti yang terlihat dalam gambar 9.6(a) bahwa panas yang diambil tidak semua digunakan untuk melakukan kerja namun sebagian terbuang ke lingkungan yang mempunyai suhu rendah. Perbandingan kerja yang dihasilkan oleh sistem terhadap panas yang diberikan ke sistem disebut efisiensi termal yang dinyatakan dalam persen. Efisiensi termal (η) secara matematis dapat dituliskan sebagai,:

$$\eta = \frac{W_{out}}{Q_{in}} \qquad (9.21)$$

KISI

Termodinamika



Sumber: Jendela Iptek 15

Mesin uap berjalan dengan dua tahap: api di dalam tengku menghasilkan uap, kemudian api ini mengembang memasuki silinder untuk memulai tugasnya. Menjelang pertengahan abad ke-19 orang melakukan percobaan dengan mesin yang lebih kecil, tetapi lebih efisien yang menyingkirkan fungsi uap dengan menaruh api ke dalam silinder itu sendiri. Masalah yang dihadapi adalah menemukan bahan bakar yang cocok, memasukkan bahan bakar itu ke dalam mesin dan menyalakannya. Semua ini dipecahkan oleh insiyur Jerman, Mikolous Otto (1832-1891).

Efisiensi memberikan suatu pengertian pada kita bahwa berapa yang kita keluarkan dan berapa yang kita dapat. Untuk satu sistem yang bersifat siklus pada sebuah mesin, kerja yang dikeluarkan $W = Q_{in}-Q_{out}$ atau dengan hukum I termodinamika:

$$Q = \Delta U + W \rightarrow Q_{in} - Q_{out} = 0 + W$$

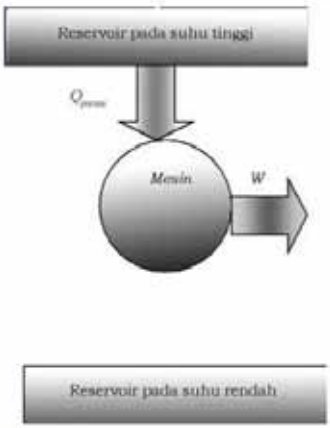
Perubahan energi dalam sistem sama dengan nol, karena sistem melakukan proses siklus yaitu keadaan akhir sama dengan keadaan awal. Jika $Q_{in}=Q_{panas}$ dan $Q_{out}=Q_{dingin}$, maka efisiensinya adalah:

$$\eta = \frac{Q_{panas} - Q_{dingin}}{Q_{panas}} = 1 - \frac{Q_{dingin}}{Q_{panas}} \qquad (9.22)$$

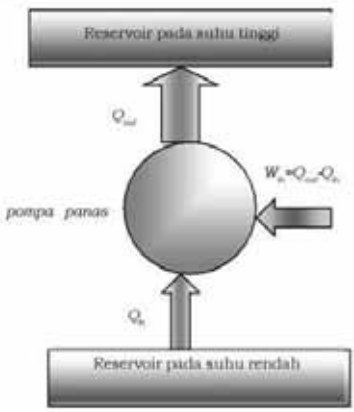
Persamaan 6.22 menunjukkan bahwa nilai efisiensi termal sama dengan 1 atau 100% jika $Q_{dingin} = 0$. Artinya bahwa secara alami ada energi panas yang hilang dan semua energi panas yang diberikan ke dalam sistem hanya digunakan untuk melakukan kerja saja. Bila sistem seperti ini maka sistem dalam keadaan ideal dan keadaan ideal ini tidak mungkin dapat dicapai. Dengan kata lain, mesin yang bisa bekerja dengan efisiensi 100% tidak mungkin dibuat secara alami. Contoh: mesin automobil yang baik hanya mempunyai efisiensi sekitar 20% sedang mesin diesel mempunyai efisiensi sekitar 35-40%. Untuk memaksimalkan nilai efisiensi termal dapat dilakukan dengan cara meminimalkan nilai perbandingan Q_{dingin}/Q_{panas}. Ini berarti Q_{dingin} yang dihasilkan harus sekecil mungkin.

Dasar ketidakmungkinan untuk mendapatkan efisiensi 100% seperti yang dinyatakan oleh Kelvin-Planck yang dikenal sebagai hukum II Termodinamika yaitu:

Adalah tidak mungkin untuk membuat mesin panas yang mampu beroperasi secara siklus yang tidak menghasilkan apapun kecuali menyerap energi panas dari reservoir dan menggunakan semua energi untuk melakukan kerja, lihat gambar 9.7.



Gambar 9.7. *Mesin yang tak mungkin dibuat.*



Gambar 9.8. *Sistem kerja dari mesin pendingin.*

2. Mesin Pendingin

Mesin pendingin *(refrigerator)* adalah mesin panas yang prinsip kerjanya dibalik. Fungsi dari mesin pendingin adalah memompa panas keluar dari mesin setelah melalui proses pengambilan energi pada suhu yang rendah (pendinginan). Sistem kerja dari mesin ini adalah kebalikan dengan mesin panas, yaitu sebuah alat yang mentransfer energi panas dari suhu rendah ke suhu tinggi, yang hanya dapat diperoleh bila kerja dilakukan terhadap sistem, lihat gambar 9.8. Jadi pada mesin pendingin, energi panas diserap dari reservoir yang bersuhu rendah dan kerja dilakukan terhadap sistem dan kemudian sistem membuang energi panas ke reservoir yang bersuhu tinggi. Contohnya mesin yang menggunakan prinsip ini adalah *refrigerator* (kulkas) dan *air conditioner* (AC).

Bahan (gas) pendingin yang biasa digunakan adalah bahan yang mempunyai titik didih relatif kecil. Amonia mempunyai titik didih -33,3°C pada tekanan 1atm, sulfurdioksida mempunyai titik didih -10,1°C dan freon mempunyai titik didih sekitar -29,8°C dapat digunakan sebagai bahan pendingin. Freon lebih umum digunakan pada mesin pendingin yang ada di sekitar kita.

Efisiensi pendinginan tergantung pada jumlah energi panas yang diserap dari reservoir suhu rendah ($Q_{in} = Q_{dingin}$) dan kerja W yang lakukan terhadap sistem. Karena sistem kerja dari mesin pendingin ini bersifat siklus sehingga $\Delta U = 0$. Berdasarkan hukum I termodinamika atau hukum kekekalan energi, $Q_{dingin} + W = Q_{panas}$ dimana $Q_{out} = Q_{panas}$ adalah panas yang diinjeksi ke reservoir pada suhu tinggi atau dibuang keluar. Efisiensi untuk mesin pendingin (seperti AC dan refregerator) disebut efisiensi tampilan kerja (*efficiency of performance*) yang didefinisikan sebagai:

$$\eta_p = \frac{Q_{in}}{W} = \frac{Q_{dingin}}{Q_{panas} - Q_{dingin}} \qquad (9.23)$$

Berdasarkan persamaan 9.23 semakin besar efisiensinya semakin baik dalam tampilannya. Jika kerja input (W_{in}) lebih kecil daripada panas yang diserap, maka nilai efisiensinya lebih besar dari satu.

Contoh Soal 9.3

Tentukan besarnya efisiensi sebuah mesin jika energi panas yang diberikan ke mesin sebesar 2500 J dan selama melakukan fase pembakaran, energi panas yang terbuang sebesar 2000 J!

Penyelesaian:

Berdasarkan data pada contoh soal 9.2 dapat diketahui:
Q_{in} = 2500 J
Q_{out} = 2000 J

Ditanya:

Efisiensi termal (η)?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 9.22 maka besarnya η:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{dingin}}{Q_{panas}} = (1 - \frac{2000\,\text{J}}{2500\,\text{J}}) \times 100\% = 20\%$$

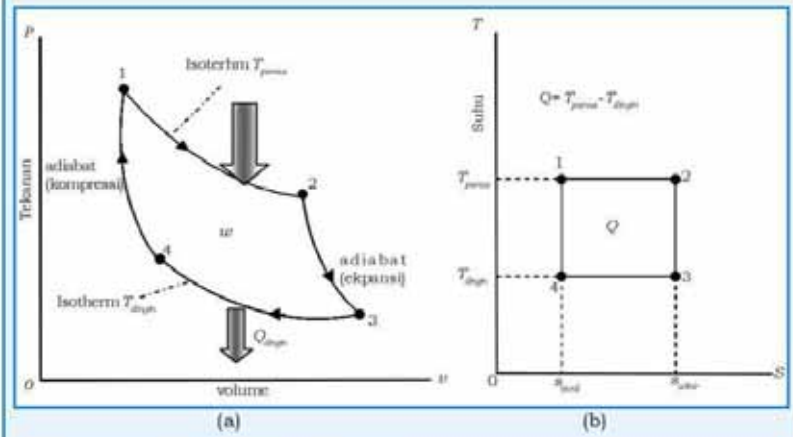
F. Siklus Carnot

Untuk memaksimalkan kerja mesin panas, desain atau konstruksi mesin harus diperhitungkan agar jumlah energi panas yang terbuang sekecil mungkin.Desain mesin diwujudkan dalam bentuk proses yang harus dialami gas untuk setiap proses satu siklus. Tetapi harus seberapa sedikitkah energi panas yang hilang yang mungkin dicapai oleh satu jenis desain mesin? Dengan kata lain, berapa efisiensi maksimum yang dapat dicapai desain mesin panas tertentu?

Sadi Carnot (1796-1832) seorang insinyur dari Prancis mampu memecahkan permasalahan yang disebutkan di atas. Pertama-tama yang ditinjau adalah tentang siklus termodinamika dari sebuah mesin panas yang ideal akan membuat (memilih) siklus yang paling efisien. Sebuah mesin panas akan menyerap panas dari reservoir bersuhu tinggi yang konstan dan membuang sisa panas ke reservoir bersuhu rendah yang konstan. Secara ideal proses isotermal ini dapat dibalik dan proses ini dapat disajikan dengan dua proses isotermal pada diagram P-V, lihat gambar 9.9. Tetapi

diperlukan dua proses yang lain, bagaimanakah untuk melengkapi proses satu siklus dan yang mampu menghasilkan nilai efisiensi tertinggi? Carnot menunjukkan bahwa dua proses yang dapat dibalik adalah proses adiabatik yang disebut adiabat pada gambar 9.9(a).

Jadi, Siklus Carnot yang ideal terdiri dari dua garis isoterm dan dua garis adiabat dan lebih mudah jika disajikan dalam diagram T-S dimana bentuknya merupakan segiempat, lihat gambar 9.9(b). Luas di bawah garis isoterm yang atas (1-2), energi panas diberikan ke sistem dari reservoir suhu tinggi $Q_{in} = Q_{panas} = T_{panas}\,\Delta S$ (dimana ΔS adalah perubahan entropy yang didefinisikan sebagai perbandingan panas yang ditambahkan atau diambil dari sistem oleh suatu proses yang bersifat balik pada suhu konstan). Hal yang serupa untuk luasan di bawah isoterm bagian bawah (3-4) panas dibuang, $Q_{out} = Q_{dingin} = T_{dingin}\Delta S$. Disini nampak bahwa Q_{in} dan Q_{out} adalah transfer panas pada suhu konstan, T_{panas} dan T_{dingin}. Pada adiabat tidak ada transfer panas $Q = 0$.



Gambar 9.9. *Siklus Carnot (a) Siklus Carnot terdiri dari dua isotermal dan dua adiabat (b) Diagram T-S untuk menunjukan siklus Carnot dalam bentuk segiempat.*

Perbedaan di antara kedua proses ini adalah pada kerja yang dihasilkan, yaitu sama dengan luas segiempat tertutup yang dibatasi oleh masing-masing proses tersebut, yaitu:

$$W = Q = Q_{panas} - Q_{dingin} = (T_{panas} - T_{dingin})\,\Delta S \qquad (9.24)$$

Karena ΔS adalah sama dengan luas daerah di bawah kedua isoterm tersebut, maka dari persamaan 9.24 dapat diperoleh hubungan antara energi panas dan suhu,

$$Q_{panas} = T_{panas}\,\Delta S \text{ dan } Q_{dingin} = T_{dingin}\,\Delta S$$

Sehingga

$$\frac{Q_{panas}}{T_{panas}} = \frac{Q_{dingin}}{T_{dingin}} \rightarrow \frac{Q_{panas}}{Q_{dingin}} = \frac{T_{panas}}{T_{dingin}} \qquad (9.25)$$

Persamaan 9.25 dapat digunakan untuk menghitung efisiensi dalam pernyataan suhu. Efisiensi Carnot dapat dituliskan:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{dingin}}{Q_{panas}} = 1 - \frac{T_{dingin}}{T_{panas}} \qquad (9.26)$$

di mana T dinyatakan dalam suhu Kelvin dan efisiensi dinyatakan dalam persen.

Contoh Soal 9.4

Sebuah mesin uap bekerja antara suhu 450°C dan 200°C. Berapa efisiensi kerja mesin tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui:
T_1 = (273+500) K
T_2 = (273+300) K

Ditanya:
Efisiensi Carnot dari mesin tersebut, η?

Jawab:
Berdasarkan persamaan 9.26

$$\eta = 1 - \frac{T_{dingin}}{T_{panas}} = (1 - \frac{473}{723}) \times 100\% = (1 - 0{,}74) \times 100\% = 26\%$$

G. Kapasitas Panas untuk Gas Ideal

Dari pembahasan teori kinetik gas, kita mengetahui bahwa suhu suatu gas dapat menunjukkan ukuran energi kinetik translasi rata-rata dari molekul gas. Energi kinetik ini hanya dikaitkan dengan gerak pusat massa untuk setiap molekul. Energi kinetik ini tidak mencakup energi dalam molekul gas sebagai hasil dari gerak rotasi dan vibrasi terhadap pusat massa. Karena teori kinetik gas yang menurunkan hubungan antara energi kinetik rata-rata dari molekul hanya memperhitungkan tumbukan antara molekul gas dengan dinding bejana, maka disini tidak meninjau struktur molekul gas sama sekali.

Pertama-tama marilah kita tinjau sistem gas yang sederhana, yaitu gas yang dalam satu molekul hanya terdiri dari satu atom saja dan disebut sebagai gas monoatomik (contohnya: hidrogen, helium, neon, dan argon). Bila energi panas ditambahkan ke dalam gas monoatomik yang mengisi sebuah bejana tertutup dengan volume konstan (misalnya dengan memanaskan silinder logam yang pejal yang berisi gas), maka semua energi panas yang diberikan hanya digunakan oleh atom-atom untuk menaikkan energi kinetik translasi rata-ratanya tanpa ada energi yang disimpan dalam bentuk lain. Oleh karena itu energi dalam total untuk gas monoatomik berdasarkan persamaan 9.12 adalah:

$$U = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}nRT \qquad (9.27)$$

Jika panas ditransfer ke sistem pada volume konstan, maka kerja yang dilakukan oleh sistem sama dengan nol, $W = P\Delta V$, karena $\Delta V = 0$. Oleh karena itu setiap penambahan panas hanya digunakan untuk penambahan energi dalam atau untuk menaikkan suhu:

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T \qquad (9.28)$$

Dari persamaan 9.28 ditunjukkan bahwa penambahan panas hanya digunakan untuk menaikan suhu dan energi dalam pada sistem, lihat gambar 9.7.

Berdasarkan konsep kapasitas panas yang telah dibicarakan di kelas X, di mana ΔT adalah perbedaan suhu antara dua isoterm pada proses isohoris tersebut, maka diperoleh hubungan:

$$nC_V\Delta T = \frac{3}{2}nR\Delta T \rightarrow C_V = \frac{3}{2}R \qquad (9.29)$$

di mana C_V adalah kapasitas panas molar pada volume konstan. Maka untuk semua gas monoatomik, besarnya kapasitas panas molar adalah sama dengan (3/2)R = 12,5 J/mol K.

Perubahan energi dalam untuk gas ideal yang dinyatakan dalam kapasitas panas molar:

$$\Delta U = nC_V\Delta T \qquad (9.30)$$

Dengan cara yang sama kita dapat menentukan kapasitas panas molar C_P dari gas monoatomik pada proses isobar (tekanan konstan) lihat gambar 9.2 . Bila energi panas Q ditransfer ke dalam sistem gas monoatomik pada tekanan tetap, maka panas tersebut akan digunakan oleh gas untuk menaikkan energi dalamnya (menaikkan suhunya sebesar ΔT) dan juga untuk melakukan kerja, sebesar W, terhadap lingkungan luarnya, karena gas mengalami perubahan suhu dan volume, maka:

$$Q = nC_P\Delta T \qquad (9.31)$$

dan berdasarkan hukum 1 termodinamika:

$$\Delta U = Q - W$$
$$nC_V\Delta T = nC_P\Delta T - nR\Delta T$$
$$R = C_P - C_V \qquad (9.32)$$

Persamaan 9.32 berlaku untuk sembarang gas ideal, dan menunjukan bahwa $C_P > C_V$.

Karena menurut persamaan 9.29 untuk gas monoatomik, besarnya $C_V = \frac{3}{2}R$ maka berdasarkan persamaan 9.32 besarnya $C_P = \frac{5}{2}R$. Perbandingan antara kedua kapasitas panas molar pada tekanan dan volume konstan yang didefinisikan sebagai $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = 1{,}67$ untuk gas monoatomik, dan nilai C_P ini sesuai dengan hasil eksperimen.

Tugas 9.1

Mengapa nilai kapasitas panas gas pada tekanan konstan lebih besar daripada kapasitas pada volume konstan? Jelaskan!

Contoh Soal 9.5

Sebuah silender berisi 4 mol gas helium pada suhu 298 K. Berapa panas yang ditransfer untuk menaikan suhu gas tersebut menjadi 450 K bila gas tersebut dipanaskan pada
a. volume konstan?
b. tekanan konstan?

Penyelesaian:
Dari soal di atas maka diketahui,
$T_1 = 298$ K
$T_2 = 450$ K
$R = 8{,}31$ J/mol.K
$n = 4$ mol

Ditanya:
Berapa panas yang ditransfer untuk menaikan suhu sistem (Q) pada tekanan dan volume tetap?

Jawab:
a. Untuk volume konstan $\Delta V = 0$ sehingga berdasarkan persamaan 9.28:

$$Q_V = \frac{3}{2} nR\Delta T = \frac{3}{2}(4 \text{ mol})(8{,}31 \text{ J/mol·K})(450 - 298) \text{ K}$$

$$= 7{,}60 \times 10^3 \text{ J}$$

b. Untuk tekanan konstan,

$$Q_p = nC_p\Delta T$$

$$Q_p = 4 \text{ mol}(\frac{5}{2}R)(450 - 298) \text{ K}$$

$$Q_p = 4 \text{ mol}(2{,}5 \times 8{,}31 \text{ J/mol K})(152\,K) = 12{,}63 \times 10^3 \text{J}$$

Diskusikan

Berapa kerja yang dilakukan dalam proses ini?

H. Proses Adibatik untuk Gas Ideal

Proses adibatik adalah suatu proses dalam sistem termodinamika yang tidak terjadi transfer energi panas antara sistem dengan lingkungan, lihat gambar 9.5. Dalam realitas, proses adiabatik yang sesungguhnya tidak dapat terjadi karena tidak ada sistem yang bisa diisolasi secara sempurna dari lingkungannya. Misalkan, bila suatu gas tertentu dikompresi (atau diekpansikan) secara cepat , maka akan sedikit aliran energi panas yang masuk atau keluar dari sistem, maka proses ini dikatakan mendekati adiabatik. Proses yang mendekati proses adiabatik tersebut terjadi pada mesin panas yang menggunakan bahan bakar gasoline (premium).

Misalkan suatu sistem gas mengalami ekspansi adiabatik *quasi-static* (secara perlahan-lahan) sedemikian hingga keadaan gas selalu hampir dalam keadaan setimbang, tetapi jauh lebih cepat bila dibandingkan dengan waktu yang diperlukan untuk terjadinya pertukaran panas antara sistem dengan lingkungannya, maka sistem gas ini tetap tunduk pada persamaan gas ideal, yaitu $PV = nRT$. Hubungan antara tekanan dan volume pada sembarang waktu selama proses adiabatik dapat dinyatakan sebagai:

$$PV^{\gamma} = \text{konstan} \qquad (9.33)$$

di mana $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$. Sedang hubungan antara suhu mutlak (skala Kelvin) dengan volumenya dapat diperoleh dari persamaan gas ideal dan persamaan 9.33 sebagai:

$$TV^{\gamma-1} = \text{konstan} \qquad (9.34)$$

Tugas 9.2

Gambarkan secara skematik sistem gas ideal yang mengalami proses adibatik dan isothermik pada diagram *P-V* dan *V-T*!

Contoh Soal 9.6

Gas dalam silinder pada mesin diesel pada suhu 25°C dikompressi secara adibatik dari tekanan awal 1 atm dan volume awal 800 cm^3 ke volume akhir 60 cm^3. Anggap udara bertindak sebagai gas ideal (γ = 1,40). Tentukan tekanan dan suhu akhir!

Penyelesaian:

Berdasarkan analisis, maka data diketahui sebagai berikut:

T_1 = (273+25)K
V_1 = 700 cm^3
V_2 = 60 cm^3
P_1 = 1 atm
γ = 1,40

Ditanya:

a. Tekanan akhir (P_2)?
b. Suhu akhir (T_2)?

Jawab:

a. untuk menentukan tekanan akhir kita dapat menggunakan persamaan 9.33 yaitu:

$$PV^{\gamma} = \text{konstan}$$

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma} \rightarrow P_2 = P_1\frac{V_1^{\gamma}}{V_2^{\gamma}}$$

$$P_2 = 1\text{ atm}\left(\frac{700\text{ cm}^3}{60\text{ cm}^3}\right)^{1,4} = 31{,}14\text{ atm}$$

b. Untuk menentukan suhu akhir T_2 kita menggunakan persamaan 9.34,

$$TV^{\gamma-1} = \text{konstan}$$

$$T_1V_1^{(\gamma-1)} = T_2V_2^{(\gamma-1)} \rightarrow T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(1,4-1)}$$

$$T_2 = 298\text{ K}\left(\frac{700\text{ cm}^3}{60\text{ cm}^3}\right)^{0,4} = 796.00\text{ K}$$

Rangkuman

1. Besarnya tekanan yang dilakukan gas ideal terhadap dinding adalah $P = \frac{1}{3}\frac{nM}{V}\left(\bar{v}^2\right)$.
2. Besarnya energi kinetik rata-rata per molekul gas ideal sebagai fungsi suhu dirumuskan $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$.
3. Energi kinetik total N molekul gas adalah:
   $E = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}nRT = N\overline{E_k}$.
4. Pada proses isobarik, besarnya kalor yang masuk ke sistem digunakan untuk kerja dan menaikkan energi dalam, dirumuskan: $Q = \Delta U + W = \Delta U + P.\Delta V$.
5. Pada proses isotermik, besarnya kalor yang masuk ke sistem seluruhnya digunakan untuk menaikkan energi dalam, $Q = \Delta U$.
6. Pada proses isotermal, kalor yang diberikan ke sistem seluruhnya digunakan untuk melakukan kerja, $Q = W$.
7. Pada proses adiabatik, tidak ada kalor yang keluar masuk sistem $Q = O$.
8. Besarnya efisiensi pada mesin panas dirumuskan:
   $\eta = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{dingin}}{Q_{panas}}$
9. Besarnya efisiensi pada mesin pendingin dirumuskan:
   $\eta = \frac{Q_{in}}{W} = \frac{Q_{dingin}}{Q_{panas} - Q_{dingin}}$
10. Besarnya efisiensi pada mesin Carnot dirumuskan:
    $\eta = 1 - \frac{Q_{dingin}}{Q_{panas}} = 1 - \frac{T_{dingin}}{T_{panas}}$.
11. Untuk gas monoatomik besarnya kapasitas panas dirumuskan, $C_v = \frac{3}{2}R$; $C_p = \frac{5}{2}R$; $\frac{C_p}{C_v} = 1{,}67$.
12. Pada proses adiabatik untuk gas ideal berlaku:
    PV^{γ} = konstan.
    TV^{γ} = konstan.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Asumsi-asumsi untuk gas ideal adalah . . . .
   a. jarak antara molekul-molekul ukurannya se-orde dengan ukuran molekul gas
   b. gaya antarmolekul gas diabaikan kecuali pada saat mereka saling bertumbukan karena gaya antara molekul adalah gaya jarak panjang (gaya medan)
   c. gerak molekul-molekul gas tidak tunduk pada hukum Newton tentang gerak
   d. molekul-molekul gas ukurannya lebih kecil daripada volume bejana, maka volume bejana yang ditempati gas diperhitungkan
   e. molekul-molekul gas ideal berbentuk bola pejal yang saling bertumbukan secara elastik sempurna. Gas dalam kesetimbangan termal dengan dinding, maka molekul-molekul gas akan menumbuk dinding juga secara elastis

2. Dalam sebuah bejana tertutup berisi sebagian zat cair. Bila gas dalam ruang/bejana tertutup divakumkan, maka . . . .
   a. suhu zat cair menjadi turun karena menurut hukum Boyle tekanan gas berbanding lurus dengan suhu.
   b. zat cair dalam kesetimbangan termal dengan gas di atasnya.
   c. gas dikeluarkan dari bejana, maka tekanan gas yang tertinggal dalam bejana mengecil
   d. suhu gas mengecil karena tekanan gas mengecil pada volume bejana yang tetap
   e. semua jawaban di atas benar

3. Bila suhu gas ideal dinaikkan dari 27°C menjadi 87°C maka energi dalam gas tersebut menjadi . . . .
   a. 2 kali
   b. 4 kali
   c. tidak berubah
   d. 1,2 kali
   e. semua jawaban di atas salah

4. Pada suhu 100° C, 1 gram air berubah menjadi uap yang volumenya 1671cm^3 pada tekanan 1 atm. Maka besarnya perubahan energi dalam dari air tersebut adalah . . . .
   a. 200 J
   b. 2000 J
   c. 2 J
   d 167 J
   e. 1670 J

5. Kualitas pompa pendingin dirata-rata berdasarkan . . . .
   a. efisiensi panasnya
   b. input kerja yang diperlukannya
   c. reservoir suhu tingginya
   d. reservoir suhu rendahnya
   e. semua jawaban di atas tidak ada yang benar

6. Siklus Carnot terdiri dari . . . .
   a. 2 proses adiabatik dan 2 proses isobarik
   b. 2 proses adiabatik dan 2 proses isokhorik
   c. 2 proses isokhorik dan 2 proses isobarik
   d. 2 proses adiabatik dan 2 proses isotermal
   e. 2 proses isotermal dan 2 proses isobarik

7. Refrigerator adalah alat yang memanfaatkan kerja untuk memindahkan energi panas dari suhu rendah ke suhu yang lebih tinggi. Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .
   a. refrigerator melakukan kerja pada kompressor listrik
   b. koefisien performansi refregerator adalah rasio antara panas yang diambil dari suhu yang rendah dengan kerja yang digunakan untuk mengambil panas tersebut
   c. koefisien performansi refrigerator adalah rasio antara kerja yang digunakan untuk mengambil panas dengan panas yang diambil dari suhu yang rendah
   d. *Air Conditioner* (AC) adalah *refrigerator*, tetapi mesin pemanas ruangan bukan refrigerator
   e. besarnya kerja yang dilakukan terhadap refrigerator selalu lebih besar daripada panas yang dibuang dari reservoir bersuhu rendah

8. . . . . **kecuali** . . . .
   a. bila suhu ruangan dapur menjadi sangat panas, maka besarnya koefisien performansi refrigerator mengecil
   b. karena besarnya kerja yang dilakukan pada refrigerator selalu lebih kecil dari energi panas yang dibuang dari reservoir bersuhu rendah, maka besarnya koefisien performansi selalu lebih besar dari 1

c. koefisien performansi mesin pemanas (heater) adalah rasio antara jumlah panas yang dibuang pada suhu yang lebih tinggi dengan kerja yang diberikannya
d. pada musim dingin, suhu di luar sangat dingin maka koefisien performansi membesar
e. mesin pendingin atau mesin pemanas yang memerlukan kerja lebih besar dari jumlah panas yang dibuang koefisiennya performansinya lebih besar dari 1

9. Jika suhu gas ideal dalam ruangan tertutup dinaikkan menjadi 6,25 kali suhu semula, maka kecepatan gerak partikel-partikelnya menjadi . . . .
   a. 2,5 kali semula
   b. 6,25 kali semula
   c. 12,5 kali semula
   d. 10 kali semula
   e. 25 kali semula

10. Pada keadaan normal, $T = 0$ K, $P = 1$ atm, 4 gram gas oksigen yang berat molekulnya, $M = 32$ mempunyai volume sebesar . . . . ($R = 8314$ J/K.mol, dan 1 atm = 10^5 N)
    a. $22{,}4 \times 10^{-3}$ m^3
    b. $2{,}8 \times 10^{-3}$ m^3
    c. $1{,}4 \times 10^{-3}$ m^3
    d. $2{,}24 \times 10^{-3}$ m^3
    e. 2,8 m^3

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Dua buah tabung yang berisi gas ideal dihubungkan dengan pipa kapiler. Volume tabung B 2 kali volume tabung A. Dalam tabung A terdapat N partikel gas sedangkan tabung B terdapat $4N$ partikel gas, maka bila suhu di tabung A 300K, tentukan suhu gas di tabung B!

2. Satu mol gas ideal menempati suatu silinder yang dilengkapi dengan penghisap tanpa gesekan mula-mula suhunya T. Gas tersebut dipanaskan pada volume tetap (karena penghisapnya bebas bergerak) sehingga volumenya menjadi 4 kali volume semula. Bila R adalah tetapan gas umum, tentukan besarnya usaha yang dilakukan oleh gas!

3. gas helium dengan volume 2,6 L di bawah tekanan 1,3 atm dan pada suhu 41°C, dipanaskan sehingga baik tekanan maupun volumenya menjadi dua kali lipat.
   a. Berapakah suhu akhir?
   b. Berapa gram jumlah helium yang ada? Masa molar helium 4 g/mol?

4. Suhu dan tekanan di atmosfer matahari adalah 2×10^{6} K dan 0,03 Pa. Hitunglah kecepatan v_{rms} elektron bebas yang berperilaku sebagai gas ideal bila massa elektron $9,1\times 10^{-31}$ kg!

5. Satu liter gas dengan γ=1,3 bersuhu 300 K dan tekanannya 1atm. Kemudian gas tersebut mengalami kompresi secara adiabatik sehingga volumenya menjadi (1/2)x volume semula. (a) Tentukan tekanan dan suhunya! (b) Kemudian gas tersebut didinginkan menjadi suhu semula pada tekanan tetap, berapakah volume akhir?

6. Suhu maksimum dari uap yang digunakan untuk pembangkit tenaga listrik adalah 540°C karena keterbatasan material.
   a. Bila kondensator uap dioperasikan pada suhu kamar berapakah efsiensi ideal mesin uap ini?
   b. Bila efisiensi aktualnya 35-40%, jelaskan perbedaan antara keduanya!

7. Seorang insinyur ingin mengoperasikan mesin pemanas dengan efisiensi 40% pada reservoir panas 360°. Berapakah suhu reservoir yang dingin?

8. Seorang atlet angkat besi mengangkat 145 kg *dumbell* setinggi 2,1 m. Sebagai akibatnya, orang tersebut kehilangan energi dalam sebesar 6×10^{4} J. Bila orang tersebut dianggap sistem termodinamika, berapa kkal energi panasnya berpindah dan kemana arahnya?

9. Tentukan perubahan energi dalam sistem bila:
   a. sistem menyerap 500 kkal dan melakukan kerja sebesar 800 J?
   b. sistem menyerap energi panas sebesar 500 kal dan diberikan kerja sebesar 500 J?
   c. pada volume konstan energi panas sebesar 800 kal dibuang dari sistem?

10. Tentukan koefisien performansi suatu refrigerator yang beroperasi pada efisiensi Carnot bila (a) mesin beroperasi
    a. antara suhu -3°C dan 27°C, (b) Bila operasi refrigerator
    b. dibalik menjadi mesin pemanas yang membawa panas dari luar yang bersuhu -3°C ke dalam ruangan yang suhunya 22°C!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawabankalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

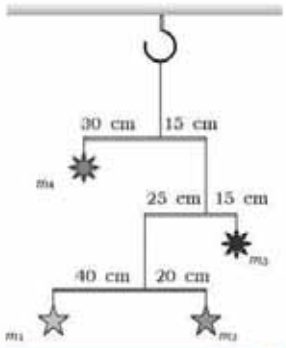
Latihan Ulangan Semester II

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Sebuah benda melakukan gerak rotasi murni, maka . . . .
   a. kecepatan anguler setiap partikelnya berbeda
   b. kecepatan anguler partikel-partikel yang jauh dari sumbu rotasi lebih besar daripada partikel-partikel yang dekat dengan sumbu rotasi
   c. kecepatan anguler setiap partikelnya sama besar
   d. sumbu rotasinya selalu tetap
   e. sumbu rotasinya selalu berubah

2. Dua buah batang tipis yang sejenis masing-masing panjangnya 1 m dan 0,50 m dibentuk menjadi bentuk *L*. Bila titik tempat disambungnya batang dianggap sebagai titik nolnya maka pusat massa batang adalah . . . .
   a. $(\frac{1}{4}, \frac{1}{2})$
   b. $(\frac{1}{2}, \frac{1}{4})$
   c. $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$
   d. $(0, \frac{3}{4})$
   e. $(\frac{3}{25}, \frac{1}{3})$

3. Dari gambar bila m_1 = 0,2 kg, dan masing-masing panjang batang ringan tertera pada gambar, maka besarnya m_2, m_3, dan m_4 adalah . . . .
   a. 0,4 kg, 1 kg, 0,8 kg.
   b. 0,2 kg, 1 kg, 0,8 kg.
   c. 0,4 kg, 0,6 kg, 0,8 kg.
   d. 0,4 kg, 1 kg, 0,1,6 kg.
   e. 0,4 kg, 0,6 kg, 0,8 kg



4. Mula-mula seorang anak berada pada tepi alas komedi putar yang jari-jarinya 2 m dan berotasi dengan kecepatan anguler ω. Kemudian anak tersebut berjalan perlahan-lahan menuju sumbu rotasi, bila massa anak m maka . . . .
   a. anak tersebut dalam bahaya karena ia semakin dekat dengan sumbu putar, kecepatan angulernya membesar
   b. pada saat posisi anak 1 m dari sumbu rotasi maka momen inersia anak tersebut menjadi $\frac{1}{4}$ kali semula
   c. sistem komedi putar dan anak tunduk pada hukum kekekalan momentum anguler
   d. bila alas komedi putar berbentuk cakram yang massanya M maka momen inersia cakram tersebut adalah $4M$
   e. semua jawaban di atas benar

5. Empat buah partikel yang massanya sama, 0,5 kg dihubungkan dengan batang ringan sehingga membentuk bujur sangkar yang panjang sisinya 0,2 m, maka . . . .
   a. besarnya momen inersia sistem bila sumbu rotasinya tegak lurus dan melalui pusat bujur sangkar adalah 0,01 kgm^2
   b. besarnya momen inersia sistem bila sumbu rotasinya tegak lurus dan melalui pusat bujur sangkar adalah 0,004 kgm^2
   c. besarnya momen inersia sistem bila sumbu rotasinya tegak lurus dan melalui salah satu massa tersebut adalah 0,04 kgm^2
   d. besarnya momen inersia sistem bila sumbu rotasinya tegak lurus dan melalui pusat bujur sangkar adalah 0,048 kgm^2
   e. besarnya momen inersia sistem bila sumbu rotasinya berimpit dengan salah satu sisi bujur sangkar adalah 0,002 kgm^2

6. Tiga buah benda terdiri atas silinder pejal, silinder tipis (berongga), dan bola pejal yang massa dan jari-jarinya sama, diletakkan pada puncak bidang miring. Bila ketiga benda tersebut dilepaskan bersamaan, maka . . . .
   a. ketiga benda akan mencapai dasar bidang miring bersamaan
   b. yang mencapai dasar bidang miring paling awal adalah silinder pejal
   c. yang mencapai dasar bidang miring paling awal adalah silinder tipis

d. yang mencapai dasar bidang miring paling awal adalah bola pejal dan yang paling akhir adalah silinder tipis
e. yang mencapai dasar bidang miring paling akhir adalah bola pejal dan yang paling awal adalah silinder tipis

7. Besarnya momen inersia empat persegi panjang yang massanya M dan ukurannya p dan l yang berotasi terhadap salah satu sisi lebarnya adalah . . . .
   a. $\frac{1}{3}Ml^2$
   b. $\frac{1}{12}Ml^2$
   c. $\frac{1}{3}Mp^2$
   d. $\frac{1}{12}Mp^2$
   e. $\frac{1}{12}M(p^2+l^2)$

8. Sebuah bola yang massanya m diikat dengan tali diputar mendatar dengan memegangnya secara kuat pada jari-jari R. Kemudian bola tersebut ditarik ke dalam sehingga jari-jari bola yang berputar menjadi $(\frac{1}{2})R$, maka . . . .
   a. momen inersia bola berubah menjadi $\frac{1}{2}$ kali semula
   b. kecepatan bola menjadi 2 kali semula
   c. kecepatan bola menjadi $\frac{1}{2}$ kali semula
   d. pada sistem tersebut berlaku hukum kekekalan momentum anguler
   e. kelajuan sudutnya menjadi 2 kali semula

9. Gejala-gejala fisika yang dapat diterangkan dengan konsep tegangan permukaan pada zat cair adalah . . . .
   a. tetes air berbentuk bola dan mengecilnya kecepatan aliran air pada penampang pipa yang lebih kecil
   b. tetes air berbentuk bola, mengecilnya kecepatan aliran air pada penampang pipa yang lebih kecil, dan naiknya permukaan air ke dalam pipa kapiler bila pipa kapiler dicelupkan dalam reservoir air
   c. tetes air berbentuk bola, membesarnya kecepatan aliran air pada penampang pipa yang lebih besar, dan terapungnya pisau silet di atas permukaan air

d. tetes air berbentuk bola, mengecilnya penampang aliran tetes air dari kran karena air telah bergerak semakin ke bawah dan terapungnya pisau silet di atas permukaan air
e. Semua jawaban di atas benar

10. Bila sebuah pipa kapiler dicelupkan dalam air raksa, maka . . . .
    a. permukaan air raksa turun karena gaya adhesi lebih besar dari pada gaya kohesi
    b. turunnya permukaan air raksa dalam pipa kapiler karena tunduk pada hukum Bernoulli
    c. turunnya permukaan air raksa karena gaya adhesi lebih kecil daripada gaya kohesi dan adanya gaya tegangan permukaan pada air raksa
    d. turunnya permukaan air raksa karena pada permukaan air raksa bekerja gaya tegangan persatuan luas permukaan
    e. turunnya permukaan air raksa karena pada permukaan air raksa bekerja kerja per satuan panjang oleh gaya tegangan permukaan

11. Bila luas penampang pipa barometer diganti menjadi 3 kali lebih besar, dan tekanan udara luar normal, maka tinggi air raksa dalam barometer adalah . . . .
    a. 228 cm
    b. 76 cm
    c. 25,3 cm
    d. 38 cm
    e. 114 cm

12. Venturimeter dihubungkan dengan penampang pipa yang berbeda dari pipa yang dialiri air. Pipa yang besar mempunyai jari-jari 3 kali pipa yang kecil. Bila pada pipa yang besar air mengalir dengan kecepatan 0,5 m/s, maka perbedaan permukaan air raksa dalam manometer dari venturimeter tersebut adalah . . . .
    a. 7,6 cm
    b. 76 cm
    c. 38 cm
    d. 228 cm
    e. 114 cm

13. Bila terdapat gaya gesekan antara zat alir dengan dinding pipa tempat zat alir mengalir, maka . . . .
    a. kecepatan zat alir yang tertinggi dialami zat alir yang mengalir ditengah-tengah pipa
    b. zat alir yang mengalir viskositasnya konstan dan tunduk pada hukum Poiseuille
    c. makin besar perbedaan tekanan antara kedua ujung pipa, makin besar volume zat alir yang mengalir per satuan waktu
    d. makin kental zat alir yang mengalir makin kecil volume zat alir yang mengalir per satuan waktu
    e. semua pernyataan di atas benar semua

14. Gas ideal adalah gas yang terdiri dari atom-atom atau molekul-molekul yang bentuknya seperti bola pejal dan saling bertumbukan secara lenting sempurna dan ukurannya jauh lebih kecil daripada jarak antara molekul-molekul itu sendiri, maka . . . .
    a. tekanan dalam ruang yang berisi gas ideal hanya dihasilkan oleh tumbukan antarmolekul-molekul gas
    b. persamaan keadaan gas ideal dapat dinyatakan sebagai $PV = CT$
    c. C adalah jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 mol gas sebsesar $1^{\circ}C$
    d. bila gas ideal disimpan dalam tabung besi (volumenya konstan), makin tinggi suhu gas ideal makin kecil tekanannya dan makin besar kelajuan gerak molekul-molekulnya
    e. volume molekul-molekul gas ideal menempati setengah ruangan

15. Mesin automobil, refrigerator, dan mesin pemanas bekerjanya didasarkan pada hukum termodinamika dengan menggunakan gas ideal sebagai media untuk mengoperasikan mesinnya. Pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .
    a. pada proses isokhorik, besarnya kerja yang diberikan kepada gas sama dengan perubahan energi dalam gas
    b. untuk gas monoatomik, besarnya kapasitas molar panas pada volume tetap: $C_v = \frac{5}{2}R$

c. untuk gas monoatomik, besarnya kapasitas molar panas pada tekanan tetap, $C_p = \frac{5}{2}R$ dan $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{5}{3}$

d. pada proses adiabatik persamaan keadaan gas dinyatakan sebagai $PV^{\gamma-1} = C$, dan tidak terjadi pertukaran panas antara sistem dengan lingkungannya

e. pada proses isotermal persamaan keadaan gas dinyatakan sebagai $PV = C$, dan tidak terjadi pertukaran panas antara sistem dengan lingkungannya karena suhunya tetap

16. Sebuah balon helium digunakan untuk penelitian di lapisan atmosfer bagian atas. Pada ketinggian 20 km, suhu di luar balon -53°C, tekanannya 55 mm Hg dan volume balon pada saat itu 831m^3. Banyaknya mol gas helium adalah . . . .
    a. $2{,}5\times10^4$ mol
    b. 2500 mol
    c. 2200 mol
    d. $2{,}2\ 10^4$ mol
    e. 2,5 mol

17. Sejumlah gas ideal mengalami proses siklik (siklus = proses yang kembali ke keadaan awal) dan melakukan kerja sebesar 400 J, maka . . . .
    a. ke dalam sistem ditambahkan energi panas sebesar 800 J
    b. perubahan energi dalam sistem sebesar 400 J
    c. energi dalam sistem tidak berubah karena energi dalam hanya tergantung pada perubahan suhu sistem.
    d. energi panas yang diberikan lebih kecil dari kerja yang dilakukan
    e. perubahan energi dalam sama dengan jumlah energi panas yang diberikan ke sistem dengan kerja yang dilakukan sistem

18. Pada setiap siklus mesin panas menyerap energi panas sebesar 150 kkal dari reservoir bersuhu tinggi dan membuang sisa energi panasnya sebesar 100 kkal pada reservoir bersuhu rendah. Pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .
    a. besarnya efisiensi mesin panas tersebut adalah 66,7%

b. besarnya kerja yang dilakukan oleh sistem tersebut adalah $2{,}1\times10^5$J
c. besarnya kerja yang dilakukan oleh sistem tersebut adalah $4{,}2\times10^5$J
d. besarnya efisiensi mesin panas tersebut adalah 50%
e. besarnya kerja yang dikerjakan terhadap sistem tersebut adalah $2{,}1\times10^5$ J

19. Sebuah mesin panas dapat dioperasikan dalam dua kondisi,
A : antara dua suhu yaitu antara 300°C dengan 100°C, dan
B : antara 300 K dengan 100 K, maka . . . .
a. kondisi B menghasilkan efisiensi yang lebih besar dari kondisi A
b. kondisi A menghasilkan efisiensi yang lebih besar dari kondisi B
c. kedua kondisi A dan B menghailkan efisiensi yang sama
d. efisiensi mesin tergantung pada jenis gas yang digunakan, maka efisiensinya tidak tertentu
e. semua jawaban di atas salah

20. Sebuah silinder yang dilengkapi dengan piston berisi 2*l* air. Secara perlahan-lahan energi panas sebesar 4 kkal dimasukkan ke dalam sistem, namun pistonnya tidak dapat bergerak. Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah . . . .
a. volume air dalam silinder tetap
b. tekanan air dalam silinder tetap
c. energi dalam air naik sebesar $1{,}68\times10^4$ J
d. suhu air naik sebesar 2°C
e. semua pernyataan di atas benar

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

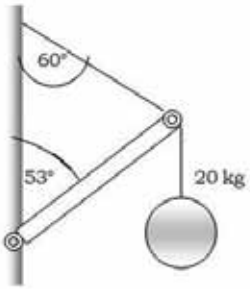
1. Sebuah batang tipis yang panjangnya L dan massanya M, salah satu ujungnya digantungkan pada sebuah paku sehingga batang dapat bebas berputar. Batang dilepaskan dari posisi mendatar, pada saat batang membentuk sudut θ dengan arah vertikal tentukan percepatan angulernya!

2. Sebuah bola menggelinding ke bawah pada bidang miring yang mana ujung dasar bidang miring terhubung dengan lintasan melingkar vertikal!



   a. berapakah kecepatan minimum bola di puncak lingkaran agar bola tetap melintasi lingkaran vertikal secara penuh?
   b. berapakah tinggi h dinyatakan dalam jari-jari lingkaran vertikal agar soal (a) terpenuhi?
   c. bila kecepatan minimum tidak terpenuhi apakah yang akan terjadi pada bola? Jelaskan!

3. Sebuah batang yang panjangnya 3 m dan massanya 10 kg menopang beban yang massanya 20 kg.



   a. Lukislah diagram benda bebas untuk gaya-gaya yang bekerja pada batang!
   b. Tentukan tegangan tali dan gaya reaksi pada engsel batang!

4. Seutas tali yang pada salah satu ujungnya diikatkan pisang dan seekor kera mengantung pada ujung tali yang lain. Bila massa kera dan massa pisang sama, dan katrol bermassa M dan jari-jarinya R, maka:



a. Hitung torsi total relatif terhadap sumbu katrol!
b. Hitung momentum anguler terhadap sumbu katrol!
c. Jelaskan apakah kera dapat menggapai pisang? (lihat gambar)

5. Sebuah tangki air yang besar diisi air setinggi h_0 ternyata pada tangki tersebut terdapat lubang yang luasnya 2 cm^2 dan berada pada dinding setinggi h dari dasar tangki. Berapakah volume air yang bocor setiap jamnya? Seberapa jauh air memancar keluar diukur dari dasar dinding tangki?

6. Sebuah bola pingpong yang diameternya 3,85 cm dan rapat massanya 0,085 g/cm^3. Berapakah gaya yang diperlukan untuk menahan bola pingpong tersebut agar seluruhnya terbenam dalam air?

7. Lingkaran kawat dengan diameter 3 cm digunakan untuk mengukur tegangan permukaan air yang penuh busa sabun dan air raksa pada suhu kamar. Berapakah gaya vertikal ke atas yang diperlukan untuk mengangkat lingkaran kawat dari masing-masing zat cair tersebut? (Tegangan permukaan air yang berbusa 0,025 dan air raksa 0,45)

8. Bila kecepatan v_{rms} untuk atom helium pada suhu kamar (20°C) adalah 1350 m/s, berapakah kecepatan molekul oksigen pada suhu yang sama, bila M_{He} adalah 4 dan M_{O_2} adalah 32?

9. Bila selama kompresi pada mesin gasolin tekanan naik dari 1 atm menjadi 20 atm dan proses kompresi tersebut adalah proses adiabatis, berapakah volume dan suhu akhir gas tersebut bila $\gamma = 1{,}4$?

10. Mesin yang pernah dibuat yang paling efisien beroperasi antara suhu 430° C dan 1870°C dan besar efisiensi rielnya (nyatanya) adalah 42%.

    a. Berapakah besarnya efisiensi secara teoritis?
    b. Berapakah daya riel yang dihasilkan mesin tersebut bila setiap sekon menyerap energi panas sebesar $1{,}4 \times 10^5$ J?

Glosarium

Adhesi. Gaya tarik-menarik antara partikel-partikel tidak sejenis.

Adiabatik. Proses tanpa adanya pertukaran kalor dengan lingkungan di luar sistem.

Aliran turbulent. Aliran berputar.

Benda seimbangan. Keadaan benda dalam keadaan diam atau bergerak beraturan; Benda yang tidak mengalami perubahan bentuk pada saat diberi gaya.

Benda tegar. Benda yang tidak mengalami perubahan bentuk pada saat diberi gaya.

Bilangan Avogadro. Bilangan yang menyatakan banyaknya partikel yang terkandung dalam setiap mole zat.

Daya. Usaha tiap satu satuan waktu.

Efisiensi. Perbandingan antara usaha luar yang dilakukan dengan energi yang diserap.

Elastis. Bahan yang dapat kembali ke bentuk semula setelah gaya yang bekerja padanya ditiadakan.

Energi. Kemampuan untuk melakukan usaha.

Fluida. Zat yang dapat mengalir.

Gas ideal. Gas yang diasumsikan untuk penyederhanaan perhitungan matematik pada teori kinetik gas.

Gaya gesekan. Gaya pelawan gerak benda.

Gaya gravitasi. Gaya tarik antara dua benda.

Gerak linear. Gerak sebuah benda melalui sebuah garis.

Impuls. Hasil kali gaya dengan lamanya gaya bekerja.

Inersia. Kecenderungan benda untuk mempertahankan keadaannya.

Isobarik. Proses dengan tekanan tetap.

Isokhorik. Proses dengan volume tetap.

Isotermal. Proses dengan suhu tetap.

Kapilaritas. Peristiwa naik atau turunnya permukaan zat cair dalam pipa kapiler (pembuluh sempit).

Kedudukan. Posisi sebuah benda terhadap acan tertentu.

Koefisien Restitusi. Konstanta dari suatu jenis tumbukan.

Koefisien gesekan. Nilai kekasaran bidang singgung antara dua benda yang relatif saling bergerak bersingungan.

Kohesi. Gaya tarik-menarik antara partikel-partikel sejenis.

Kompresibel. Perubahan volume karena pengaruh tekanan.

Kopel. Pasangan dua gaya sama besar, sejajar dan berlawanan arah.

Medan gravitasi. Daerah yang mendapat pengaruh gaya gravitasi dari suatu benda.

Menggelinding. Perpaduan gerak rotasi dan translasi.

Momen gaya. Hasil kali silang (*cross product*) antara vektor gaya dengan vektor lengan gaya.

Momentum sudut. Momentum dari partikel yang melakukan gerak rotasi.

Momentum. Hasil kali massa benda dengan kecepatan gerak benda.

Neraca Cavendish. Neraca untuk menentukan nilai konstanta gravitasi umum.

Radian. Satuan sudut datar (1 radian = 57,32°)

Regangan (*strain*). Perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula.

Regangan. Pertambahan panjang.

Siklus. Suatu proses yang dapat membawa ke keadaan semula.

Stream line. Aliran yang mengikuti suatu garis lurus atau melengkung yang jelas ujung dan pangkalnya.

Sudut elevasi. Sudut kecondongan (gradien) kecepatan benda yang melakukan gerak parabola.

Suhu mutlak. Suhu dalam satuan Kelvin.

Tegangan (*stress*). Perbandingan antara gaya dan luas penampang dimana gaya tersebut bekerja.

Tegangan permukaan. Sesuatu yang menahan permukaan zat.

Termodinamika. Keterkaitan antara suhu dan gerak.

Titik berat. Titik tangkap gaya berat benda.

Usaha Luar Gas. Usaha yang dilakukan oleh gas pada lingkungan di luar sistem gas tersebut.

Usaha. Hasil kali titik (*dot product*) antara vektor gaya dan vektor perpindahan.

Vektor. Sesuatu yang mempunyai besar dan arah.

Viskositas. Tingkat kekentalan dari suatu zat cair.

Daftar Pustaka

Achelis, Elisabeth, et-all. 2000. *IPP Edisi 4.* Jakarta: Grolier International, IMV: PT Widya Dara.

Bridgman, Roger. 2001. *Jendela Iptek 15: Teknologi.* Jakarta: Balai Pustaka.

Epstein, Lewis Carroll. 1987. *Thingking Physics.* San Francisco: Insight Press.

_____. 2005. *Physics, Prepare for Exams Series (topical)* Singapura: Red Spot.

Giancoly, Duglas C. 1997. *Fisika Jilid 1.* Jakarta: Erlangga.

_____. 2001. *Fisika, Jilid 2.* Jakarta: Erlangga

Halliday, David, Robert Resnick, Jearl Walker. 2004. New York: Replika Press.

Jati, B. M. E. 2003. *Fisika Dasar 1.* Yogyakarta: FMIPA UGM

Lafferty, Peter. 2001. *Jendela Iptek 3: Gaya dan Gerak.* Jakarta: Balai Pustaka.

Lippincott, Kristen. 2001. *Jendela Iptek 14: Astronomi.* Jakarta: Balai Pustaka.

Mary dan John Gribbin. 2001. *Jendela Iptek 13: Ruang dan Waktu.* Jakarta: Balai Pustaka.

Serway, Raymond A. 1996. *Physics for Scientist and Engineers, Fourt Ed.* United States : Saunders College Publishing.

Wilson, Jerri D. dan Anthony J. Buffa. 1997. *College Fhysics.* US: Prentice Hall

Indeks

A

adhesi 264
aliran turbulen 274
amplitudo 98
Anaksimander 40
arah perpindahan 125
Archimedes 255
aritarkhus 41
asteroid 53
astrofisika 40

B

barometer air raksa 253
benda tegar 208, 215
bilangan Avogadro 294
bilangan Reynold 278
Bumi 56

C

Charon 65

D

Daniel Bernoulli 269
daya 133, 230
Deimos 59

E

Edwin Hubble 43
Effek Coriolis 58
efisiensi 302
energi 132
energi kinetik 105, 141, 235
energi kinetik translasi 294
energi mekanik 143, 148
energi panas 309
energi potensial 135, 141
energi potensial elastik 175
energi potensial gravitasi 48, 138
energi potensial pegas 146
Eratosthens 41
Evangelista Torricelli 253

F

fluida 246, 271
frekuensi 98

G

Galileo 43
gas ideal. 290
gas monoatomik 308
gaya 124, 128, 166
gaya adhesi 263
gaya gesek 180
gaya gesekan 267
gaya gravitasi 45, 128, 139
gaya konservatif 139
gaya nonkonservatif 140
gaya pegas 129
gaya pemulih 95, 128
gaya rata-rata 104
gaya tarik 76
gerak harmonik 98, 103
gerak harmonik sederhana 101
gerak lurus 2
gerak melingkar beraturan 25
gerak parabola 142
gerak peluru 19, 21
gerak rotasi 207
gerak translasi 208

H

hidraulik 250
Hukum Hooke 77 ,101, 146
hukum I Kepler 42

Hukum I Newton 213
hukum I termodinamika 296
hukum II Kepler 42
hukum II Newton 166, 172
hukum II termodinamika 303
hukum III Kepler 42, 46
hukum kekekalan energi 143, 152
Hukum kekekalan momentum 171, 182
hukum Poiseuille 278
hukum Stokes 111
hukum-hukum Newton 291

I

Isaac Newton 43

J

James Christy 64
Johanes Kepler 42
Jupiter 61

K

kapasitas panas 308
kecepatan anguler 220
kecepatan lolos 150
kecepatan rata-rata 3, 14, 133
kecepatan satelit 150
kecepatan sesaat 15, 21, 26
kecepatan sudut 98
Kelajuan rata-rata 3
Kelajuan sesaat 4
kerapatan fluida 255
kerja 153, 230
kesetimbangan mekanik 215
kesetimbangan rotasi. 214
kesetimbangan stabil 217
kesetimbangan tak stabil 217
kinematika 2
koefisien gesek kinetik 153
koefisien gesekan kinetik 140
kohesi 263
komet 53
kompresi 82
konstanta pegas 100
kontanta Boltzman 294
koordinat posisi 13

L

lengan gaya 230

M

manometer 253
mars 59
matahari 53, 54
medan gravitasi 48
merkurius 55
mesin panas 300
mesin pendingin 304
modulus Bulk 84
modulus elastisitas 78, 84
modulus Young 78, 81
momen inersia 221
momentum 164, 292
mometum sudut 230

O

orbit 51
osilasi 95
osilasi Teredam 111

P

pascal. 249
pegas 76
percepatan anguler 220, 209
percepatan gravitasi 47
percepatan rata-rata 17
periode 44, 101
periode ayunan sederhana 110
persamaan Bernoulli 269
perubahan momentum 167
phobos 59
pipa kapiler 265
plato 41
pluto 64
pompa hidraulik 249
posisi 12
prinsip Bernoulli 279
proses Adiabatik 299
proses adibatik 311
proses isobarik 296
Proses Isometrik 298
proses Isotermal 298

pusat massa 185, 187
pusat orbit 46
pythagoras 41

R

regangan 79, 81
regangan geser 83
renggangan 105

S

saturnus 62
siklus Carnot 306
simpangan maksimum 98
simpangan sudut 109
sistem partikel 188
susunan paralel 87

T

tegangan 81
Tegangan geser 82, 83
tegangan permukaan 261
tekanan 247, 251
tekanan atmosfer 248, 253
tekanan gauge 252
teori kinetik gas 289
titik kesetimbangan 109
titik pusat massa 185
torsi 210
tumbukan 175, 177
tumbukan elastis 175, 178
tumbukan tidak elastis 181
Tycho Brahe 42

U

umbukan tidak elastis 175
Uranus 63
usaha 131, 262

V

venus 55
viskositas 274
viskositas 278

Lampiran

Konstanta - konstanta Dasar

Besaran	Simbol	Nilai Pendekatan	Nilai Terbaik yang Terakhir
Laju cahaya di ruang hampa	c	$3{,}00 \times 10^{8}$ m/s	$2{,}99792458 \times 10^{8}$ m/s
Konstanta Gravitasi	G	$6{,}67 \times 10\text{-}^{11}$N.m^2/kg^2	$6{,}67259(85) \times 10^{-11}$ N.m^2/kg^2
Bilangan Avogadro	N_A	$6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1}	$6{,}0221367(36) \times 10^{23}$ mol^{-1}
Konstanta gas	R	8,315J/mol.K = 1,99 kal/mol.K = 0,082 atm.liter/mol.K	8,314510(70) J/mol.K
Konstanta Boltzmann	k	$1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K	$1{,}380658(12) \times 10^{-23}$ J/K
Muatan elektron	e	$1{,}60 \times 10^{-19}$C	$1{,}6021733(49) \times 10^{-19}$C
Konstanta Stefan-Boltmann	σ	$5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m^2.K^4	$5{,}67051(19) \times 10^{-8}$ W/m^2.K^4
Permitivitas hampa udara	$\epsilon_0 = (1/c^2\mu_0)$	$8{,}85 \times 10^{-12}$ C^2/N.m^2	8,854187817... $\times 10^{-12}$ C^2/N.m^2
Permeabilitas hampa udara	μ_0	$4p \times 10^{-7}$ T.m/A	1,2566370614... $\times 10^{-6}$ T.m/A
Konstanta Planck	h	$6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s	$6{,}6260755(40) \times 10^{-34}$ J.s
Massa diam elektron	m_e	$9{,}11 \times 10^{-31}$ kg = 0,000549u = 0,511 MeV/c^2	$9{,}1093897(54) \times 10^{-31}$ kg = 5,48579903(13) $\times 10^{-4}$ sma
Massa diam proton	m_p	$1{,}6726 \times 10^{-27}$ kg = 1,00728 u = 938,3 MeV/c^2	$1{,}6726231\ (10) \times 10^{-27}$ kg = 1,007276479(12) sma
Massa diam neutron	m_n	$1{,}6749 \times 10^{-27}$ kg = 1,008665 u = 939,6 MeV/c^2	$1{,}6749286(10) \times 10^{-27}$ kg = 1,008664904(14) sma
Satuan massa atom (1sma)		$1{,}6605 \times 10^{-27}$kg = 931,5 MeV/c^2	$1{,}6605402(10) \times 10^{-27}$kg = 931,49432(28) MeV/c^2

Ditinjau oleh B.N. Taylor, National Institute of Standards and Technology.
Angka-angka dalam kurung menandakan simpangan baku ketakpastian eksperimen pada digit-digit akhir. Nilai tanpa kurung adalah nilai eksak. (Yaitu, besaran yang terdefinisi)

Triple Points

Material	Suhu (K)	Tekanan (10^5 Pa)
Hidrogen	13.84	0.0704
Deuterium	18.63	0.171
Neon	24.57	0.432
Oksigen	54.36	0.00152
Nitrogen	63.18	0.125
Ammoniak	195.40	0.0607
Sulfur dioksida	197.68	0.00167
Karbon dioksida	216.55	5.17
Air	273.16	0.00610

Disadur dari Young, Hugh D., University Physics, 7th Ed. Table 16-3
HyperPhysics

Konversi Satuan (Ekivalen)

Panjang

1 in. = 2,54 cm
1 cm = 0,394 in
1 ft = 30,5 cm
1m = 39,37 in. = 3,28 ft
1 mil = 5280 ft = 1,61 km
1 km = 0621 mil
1 mil laut (U.S) = 1,15 mil = 6076 ft = 1,852 km
1 fermi = 1 fertometer (fm) = 10^{-15} m
1 angstrom ($\overset{o}{A}$) = 10^{-10} m
1 tahun cahaya (ly) = $9,46 \times 10^{15}$ m
1 parsec = $3,26$ ly = $3,09 \times 10^{16}$ m

Volume

1 liter (L) = 1000 mL = 1000 cm^3 = $1,0 \times 10^{-3}$ m^3 = 1,057 quart (U.S.) = 54,6 in^3.
1 gallon (U.S.) = 4 qt (U.S.) = 231 in^3.= 3,78 L = 1 m^3 = 35,31 ft^3

Laju

1 mil/h = 1,47 ft/s = 1,609 km/h = 0,447 m/s
1 km/h = 0,278 m/s = 0,621 mil/h
1 ft/s = 0,305 m/s = 0,682 mil/h
1 m/s = 3,28 ft/s = 3,60 km/h
1 knot = 1,151 mil/h = 0,5144 m/s

Sudut

1 radian (rad) = 57,30° = 57°18'
1° = 0,01745 rad
1 rev/min (rpm) = 0,1047 rad/s

Waktu

1 hari = $8,64 \times 10^4$ s
1 tahun = $3,156 \times 10^7$ s

Massa

1 satuan massa atom (u) = $1,6605 \times 10^{-27}$ kg
1 kg = 0,0685 slug
(1 kg mempunyai berat 2,20 lb dimana g = 9,81 m/s^2.)

Gaya

1 lb = 4,45 N
1 N = 10^5 dyne = 0,225 lb

Energi dan Kerja

1 J = 10^7 ergs = 0,738 ft.lb
1 ft.lb = 1,36 J = $1,29 \times 10^{-3}$ Btu = $3,24 \times 10^{-4}$ kkal
kkal = $4,18 \times 10^3$ J = 3,97 Btu
1eV = $1,602 \times 10^{-19}$ J
1kWh = $3,60 \times 10^6$ J = 860 kkal

Daya

1W = 1 J/s = 0,738 ft.lb/s = 3,42 Btu/h
1 hp = 550 ft.lb/s = 746 W

Tekanan

1 atm = 1,013 bar = $1,013 \times 10N/m^2$
= 14,7 $lb/in.^2$ = 760 torr
1 $lb/in.^2$ = $6,90 \times 10^3$ N/m^2
1Pa = $1N/m^2$ = $1,45 \times 10^{-4}$ $lb/in.^2$

KUNCI AKTIF BELAJAR FISIKA XI SMA/MA

Bab I. Analisis Gerak dengan Vektor

A. Pilihan Ganda

1. d 3. c 5. c 7. e 9. b

B. Esai

1. (a) $2\,(4\hat{i} + 5\hat{j})$ m/s
   (b) $2\,(2\hat{i} + 5\hat{j})$ m/s
   (c) 7,2 m/s^2
2. (a) s = 900 ; t = 10.4 sekon
   (b) t = 10,8 s ; $\beta = 31{,}9°$;
   s = 935,3 meter
3. (a) $v_y = 0$
   (b) $v_y = 6\sqrt{2}$

Bab II. Gerak Planet

A. Pilihan Ganda

1. d 3. c 5. a 7. e 10. d

B. Esai

4. m = 3,23 x 10^{20}kg
5. m_{bulan} = 4.2 x 10^{22} kg

Bab III. Hukuk Hooke Elastisitas

A. Pilihan Ganda

1. a 3. c 5. b 8. c 10. c

B. Esai

5. $\tau = 4.25 \times 10^2$ N/m^2
   $a = 1.13 \times 10^3$m
10. 2,86 x 10^3 N/m^3

Bab IV. Gerak Osilasi

A. Pilihan Ganda

1. e 2. c 3. b 4. b 5. e
6. b 7. c 8. c 9. a 10. e

B. Esai

2. a. m = 8 kg
   b. T = 6,28 s
   c. a = 10 cm/s^2
   d. Em = 420 N.m
4. $T = \frac{1}{2}$ sekon, f = 1,5 Hz,
   A = 1 m, s = π,
   Jika t = 0.5 x = 1 m
6. a. T = 3 sekon, $\omega = \frac{2\pi}{3}$ rad/s
   b. t = 0,25, $\theta = \frac{\pi}{4}$

Bab V. Energi

A. Pilihan Ganda

1. b 3. e 5. b 7. b 9. c

B. Esai

1. 0,49 m
2. -3 joule
6. -100 joule
9. 9×10^4 joule
10. 13,3 m

Bab VI. Momentum dan Tumbukan

1. e 3. c 5. e 7. b 9. e

B. Esai

7. $\frac{9}{t}$ N

10. $\vec{V}_{em} = (1.4\vec{i} - 4.8\vec{j})$ m/s
    $\vec{P}_{total} = (14\vec{i} - 48\vec{j})$ kg.m/s

Bab VII. Gerak Rotasi dan Kesetimbangan Benda Tegar

A. Pilihan Ganda

1. a 2. e 3. a 4. b 5. a
6. e 8. a 10. a

B. Esai

1. a. v = 0,5 m/s
   b. a = 1 m/s^2
3. F = 53,3 N
5. a_1 = 3,75 m/s^2
   a_2 = 2,5 m/s^2

Bab VIII. Fluida

A. Pilihan Ganda

1. b 2. c 3. a 4. b 5. d
7. d 9. e

B. Esai

6. a. v_2 = 4 m/s
   b. P_2 = 2,74 $\times 10^5$ Pa
7. v_1 = 7,7 m/s
   v_2 = 7,0 m/s
   v_3 = 6,32 m/s
   v_4 = 4, 447 m/s

Bab IX. Teori Klinetik Gas

A. Pilihan Ganda

1. b 2. c 3. a 4. b 5. d
7. d 9. e

B. Esai

1. $T_B = 150$ K
7. $T_{dingin} = 216°C$

Latihan Ulangan Semester I

A. Pilihan ganda

1. c 3. b 5. d 7. d 9. e
11. a 13. a 15. d 17. c 19. a

B. Esai

1. $\vec{v}_1 = 140{,}6$ m/s
2. a. 12 N/s b. 3 m/s

Latihan Ulangan

A. Pilihan ganda

1. c 3. a 5. b 7. c 9. d
11. b 13. e 15. c 17. c 19. a

B. Esai

5. $V = 2{,}4 \times 10^{-2}\sqrt{5(ho-h)\text{m}^3}$

   $x = 2\sqrt{h(ho-h)\text{m}}$

7. $F_{air} = 2{,}36 \times 10^{-3}$ N

   $f_{raksa} = 4.24 \times 10^{-2}$ N

Aktif Belajar

Fisika

Untuk SMA & MA XI

ISBN 978-979-068-798-1 (No. Jld lengkap)
ISBN 978-979-068-800-1

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: 9 Tahun 2009 Tanggal 12 Februari 2009 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk Digunakan dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp.17.466,-