Catatan Mengajar

Fisika Dasar

untuk Fakultas Pertanian

Oleh: Richard Blocher
Desember 2007

Daftar Isi

1 Pengantar

1.1 Perkenalan

1.1.1 Dosen

- Richard Blocher
- Perumahan Dinas Unijoyo, no 6
- Tel: (031) 301 43 64 / 081 55 3 55 0491

1.1.2 Mahasiswa

1.2 Aturan Kuliah

- Tepat waktu.
- Ulangi bahan kuliah sebelum kuliah berikut, → grafik persentase ingat manusia;
- Wajib hadir
  - Absen, tetapi tidak dipakai untuk pemberian nilai
- Minitest: Ulangan singkat (≈ 10 menit) pada awal kuliah; tidak diberi tahu sebelumnya; Tujuan: motivasi untuk mempelajari setiap kuliah; mengecek / mendorong untuk datang tepat waktu; mengganti absen; mengulangi kuliah sebelumnya;
- Aturan Ujian: Segala jenis ketidak-jujuran dapat sanksi nilai E dalam ujian bersangkutan.
- Nilai akhir kuliah: 25% rata-rata Minitest, 32,5% UTS, 42,5% UAS.
- Nilai akhir digabungkan dengan nilai kuliah dan nilai praktikum:

  ⅔ nilai akhir kuliah, ⅓ nilai Praktikum

1.3 Bahan Kuliah Fisika Dasar

1.3.1 Isi Kuliah ini

- Dasar Mekanika: Gaya, Gerakan, Usaha, Energi (≈ 1/2 Semester)
- Mekanika Fluida: Tekanan, Gesekan gerakan fluida, kapilaritas
- Termofisika: Panas / suhu, sifat benda ketika dipanaskan, energi panas

1.3.2 Buku

- Sears, Francis W.; Zemansky, Mark W. dan Young Hugh D; 1898; University Physics; jilid I; Terjemahan dalam bahasa Indonesia: Fisika untuk Universitas, jilid I; Penerbit Trimitra Mandiri;
- Alonzo, Marcelo dan Finn, Edward J., 1992, Dasar-dasar Fisika untuk Universitas, Jilid 1, terjemahan bahasa Indonesia: Penerbit Erlangga.
- Halliday, David dan Resnick Robert, 1994, Fisika;
- Diktat kuliah dari ITS Fisika I;
- Larry Gonick & Art Huffman; Kartun Fisika; KPG (Kepustakaan Populer Gramedia), 2001;

2 Prinsip Dasar, Mengukur

2.1 Fisika itu apa ?

Bagaimana dalam fisika ditentukan, apa yang benar ?

Atau:

Bagaimana menentukan, apa yang diterima sebagai hukum alam / hukum fisika ?

Contoh: *“Setiap benda selalu dan di manapun jatuh ke bawah.”* – Apa benar sebagai hukum alam atau tidak ? → **pembenaran / penyalahan dari eksperimen !**

→ Hukum fisika / hukum alam (hampir) selalu mempunyai keterbatasan, di mana dan dalam situasi apa hukum tersebut benar.

Pertanyaan lagi: Apakah “jatuh” sama dengan “jatuh” ? Misalnya batu, kertas ringan, kapas, … Semua jatuh, tetapi apakah cara jatuh sama ? → Ternyata kecepatan dan jalur berbeda-beda.

Jadi:

Bagaimana mendapatkan hukum fisika ?

→ Mengamati dengan teliti, berarti mengukur, lalu menetapkan suatu hukum alam.

Tetapi: Setiap hukum alam perlu diuji dulu. Baru setelah diuji cukup lama diterima sebagai hukum alam. Cara menguji hukum alam: (?) → Eksperimen ! atau: pengamatan dari sesuatu yang terjadi.

Kesimpulan: Setiap hukum fisika memiliki hubungan yang jelas dengan dunia nyata.

2.2 Apa Arti Mengukur ?

Contoh: Panjang meja – bagaimana cara menentukan lebar meja ?

- Bandingkan dengan lebar tangan ?
- Taruh meteran di atas meja ?
- …

→ Pakai meteran, meteran ditaruh pada sisi benda yang mau diukur, ujung awalnya ditaruh pada satu ujung benda, skala meteran pada ujung meja kedua dibacakan.

- Supaya hasil benar, meteran harus sesuai dengan meteran standar.

Standar panjang: **meter asli di Paris**; sekarang: 1.650.763,73 kali panjang gelombang dari **radiasi tertentu dari ^{86}Kr**.

Arti mengukur:

Membandingkan suatu besaran dengan besaran standar.

Berarti untuk mengukur perlu dua hal:

1. Besaran standar. Misalnya: meteran standar; massa standar; voltase standar; suhu standar; …
2. Aturan, bagaimana membandingkan besaran standar dengan benda yang diukur.

Hasil Pengukuran:

Sebagai hasil pengukuran selalu didapatkan suatu **angka dan** suatu **satuan**.

Satuan itu sangat penting dan selalu harus diikutkan dengan angka yang menunjukkan berapa kali satuan itu didapatkan.

> Dalam semua perhitungan satuan harus ditulis !!!!

Contoh:

- Terdapat benda, bentuk kotak, panjang ***p* = 30 cm**, lebar ***l* = 20 cm**, tinggi ***t* = 20 cm**. Berapa besar volumenya ?

$\cancel{V = 30 \cdot 20 \cdot 20 = 12\,000\,\mathrm{cm}^3}$

tidak benar !!!

Yang benar:

$$V = 30\,\mathrm{cm} \cdot 20\,\mathrm{cm} \cdot 20\,\mathrm{cm}$$

$$= 12\,000\,\mathrm{cm}^3$$

- $5 \cdot \mathrm{m} + 3 \cdot \mathrm{m} = 8\,\mathrm{m}$
- $5 \cdot \mathrm{m} + 45 \cdot \mathrm{cm} = 5{,}45\,\mathrm{m} = 545\,\mathrm{cm}$; Besaran bisa memiliki tambahan untuk menyatakan satu faktor pangkat 10. (Tabel 2.1)
- $5\,\mathrm{kg} + 3\,\mathrm{l} = ???$ - Besaran yang berbeda tidak bisa dijumlahkan !!!
- 3 · 4 kg = 12 kg

tambahan satuan	singkatan tambahan	arti
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^{9}
Mega	M	10^{6}
kilo	k	10^{3}
mili	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
piko	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}

Tabel 2.1: *Tambahan pada satuan.*

2.3 Besaran Skalar dan Besaran Vektor

Teman-teman kenal besaran apa saja ?

→ ***Apa yang membedakan dua kolom ini ?***

Skalar	***Vektor***
panjang	gaya
volume	tempat
massa	kecepatan
massa jenis	percepatan
besar muatan	medan magnet
suhu	•
voltase	•
•	•

Apa perbedaan antara besaran skalar dan besaran vektor ?

→ Besaran vektor mempunyai arah, skalar hanya besaran saja.

Skalar	***Vektor***
dinyatakan dengan: angka + satuan	dinyatakan dengan: angka + satuan + **arah**

Contoh: Satu pesawat berangkat dari Surabaya pada jam 8:00 pagi. Kecepatan pesawat sebesar 1 000 $\frac{\text{km}}{\text{jam}}$. Jam berapa pesawat tersebut akan tiba di Jakarta ?

→ ***?***

Bagaimana cara menyatakan arah ?

→ di bumi: arah utara, selatan, barat, timur

→ mendatar, ke atas, …

→ sudut naik; sudut dari utara

→ ***Kita perlu suatu sistem koordinat.*** → Pasal berikut.

Pertanyaan Ulang

→ Bagaimana dalam fisika suatu pernyataan bisa dikonfirmasikan benar atau dibuktikan salah ?

→ Apa arti mengukur ? Apa yang didapatkan sebagai hasil ukur ?

→ Apa membedakan besaran skalar dari besaran vektor ?

3 Dasar Matematika I

3.1 Sistem Koordinat

3.1.1 Tiga sistem koordinat yang biasa dipakai:

→ koordinat kartesius / tegak lurus
→ koordinat silinder
→ koordinat polar
→ dll.

Yang ***paling sering*** digunakan adalah ***sistem koordinat kartesius***.

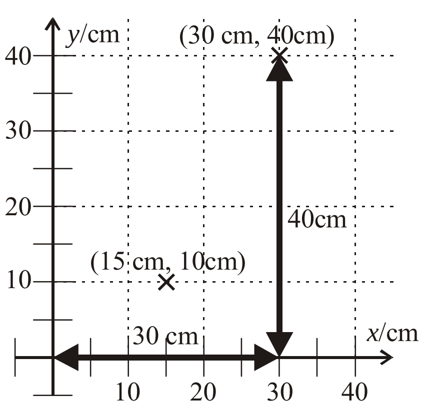
3.1.2 Koordinat Kartesius / Tegak Lurus di Bidang Mendatar

Dalam bidang mendatar sistem koordinat kartesius mempunyai dua sumbu yang tegak lurus satu terhadap yang lain. Setiap sumbu mempunyai skala. Dua sumbu bertemu pada titik nol (sumber koordinat) yang mana skala dari masing-masing sumbu mulai dari nol.

- ***Matematika:*** skala mempunyai ***angka saja***
- ***Fisika:*** skala selalu memiliki ***angka (besar) dan satuan***. Untuk menyatakan tempat dalam ruang, satuan mesti satuan panjang.

Sumbu biasanya (tetapi tidak harus) disebut dengan sumbu *x* dan sumbu *y*. Sumbu *x* **biasanya** sumbu mendatar dan sumbu *y* **biasanya** sumbu tegak.

: …***Cara menyatakan satu tempat dalam sistem koordinat kartesius:***



Gambar 3.1: *Menyatakan tempat dalam sistem koordinat kartesius. Contoh:* $(x,\, y) = (30\,\text{cm}, 40\,\text{cm})$ *dan* $(x,\, y) = (15\,\text{cm}, 10\,\text{cm})$

Sebutkan dua angka (bersama dengan satuan!), misalnya: tempat T_1: (30 cm, 40 cm), berarti ke kanan – ke arah sumbu x – sejauh angka pertama, lalu ke atas sejauh angka kedua. Berbagai cara menulis tempat:

$$T_1\text{: (30 cm, 40 cm)} = 30\text{ cm } \hat{x} + 40\text{ cm } \hat{y} = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 40\,\text{cm} \end{pmatrix}$$

Arti dari $\hat{x}$, $\hat{y}$: vektor dengan panjang 1 ke arah x atau y. Dengan kata lain: menunjukkan arah dari angka yang ditulis sebelumnya. Misalnya $30\,\text{cm}\,\hat{x}$ berarti 30 cm ke arah x.

Supaya lebih jelas bisa juga ditulis:

$$T_1\text{: } (x, y) = (30\,\text{cm}, 40\,\text{cm}) \text{ atau } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 40\,\text{cm} \end{pmatrix}$$

3.1.3 Koordinat Kartesius Dalam Ruang

Bagaimana menentukan tempat dalam ruang kuliah ?

→ Bisa dengan sistem koordinat kartesius, tetapi perlu ***tiga arah***, $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$.

Tiga sumbu, semua tegak lurus merupakan sistem koordinat kartesius dalam ruang.

Contoh: posisi T_1: (1 m, 2 m, 1,5 m) di mana ?. Apa yang harus ditetapkan dulu, supaya informasi ini jelas ? → ……………………

3.1.4 Koordinat Silinder

Pakai sudut, jari-jari dan tinggi. Jadi satu tempat dinyatakan dengan jari-jari, sudut, bagian sumbu z: (ρ, φ, z).

3.1.5 Koordinat Polar / Koordinat Bola

Pakai dua sudut dan jari-jari. Jadi suatu tempat T_1 dinyatakan dengan (jari-jari, sudut antara sumbu utama dalam bidang datar, lalu sudut antara bidang datar dengan arah naik dari jari-jari), berarti: T_1: (ρ, φ, Φ).

3.1.6 Hubungan Antara Sistem-Sistem Koordinat

Hubungan antara besar koordinat dalam tiga sistem koordinat bisa dihitung dengan hukum Pythagoras dan hukum-hukum perhitungan trigonometri.

Misalnya: suatu tempat dinyatakan dengan koordinat kartesius seperti $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ = (20 cm, 40 cm, 30 cm), maka koordinat silinder dari tempat ini menjadi:

$$(\rho, \varphi, z) = \left(\rho = \sqrt{(20\,\mathrm{cm})^2 + (40\,\mathrm{cm})^2}, \varphi = \arctan\frac{40\,\mathrm{cm}}{20\,\mathrm{cm}}, z = 30\,\mathrm{cm}\right) \tag{3.1}$$
$$(\rho, \varphi, z) = (44{,}7\,\mathrm{cm}, 63{,}4°, 30\,\mathrm{cm})$$

3.2 Vektor

3.2.1 Contoh: Vektor Pergeseran

- Pergeseran bisa dinyatakan dengan panah dari posisi awal ke posisi akhir pergeseran. Panah / Pergeseran ini disebut sebagai vektor. ***(Vektor pergeseran)***
  → Dalam gambar vektor digambar dengan ***panah*** – mempunyai ***arah dan panjang***.
- Setiap bagian dari suatu benda yang digeser mengalami pergeseran dengan arah dan jarak yang sama. Definisi vektor: Satu pergeseran merupakan satu vektor, berarti:
  → ***Semua panah dengan panjang dan arah yang sama adalah panah dari satu vektor.*** Dengan kata lain:
  → ***Satu vektor adalah semua panah dengan arah dan panjang yang sama.***
- Vektor dinyatakan dengan panah di atas huruf yang melambangkan vektor. Misalnya: pergeseran dari (0, 0) ke tempat (30 cm, 20 cm) disebut sebagai vektor $\vec{s}_1 = (30\,\mathrm{cm}, 20\,\mathrm{cm})$. (Panah di atas s !)
- Vektor dinyatakan seperti tempat ujung vektor jika kaki vektor pada sumber koordinat. Misalnya vektor $\vec{s}_1$ di atas: $\vec{s}_1 = (30\,\mathrm{cm}, 20\,\mathrm{cm})$ atau
  $\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\,\mathrm{cm} \\ 20\,\mathrm{cm} \end{pmatrix}$ atau $\vec{s}_1 = 30\,\mathrm{cm}\cdot\hat{x} + 20\,\mathrm{cm}\cdot\hat{y}$.

- ***Panjang vektor*** dinyatakan dengan huruf yang dipakai untuk vektor tanpa panah di atasnya atau dengan lambang vektor diapit garis tegak: panjang vektor $\vec{a} = |\vec{a}| = a$.
- ***Sudut vektor*** $\vec{a}$ ditulis $\measuredangle\vec{a}$ atau $\angle\vec{a}$. Sudut vektor dihitung dari sumbu *x*.
- Dua ***pergeseran yang dilakukan berturut-turut*** mempunyai hasil yang sama dengan satu pergeseran dari posisi awal pergeseran pertama ke posisi akhir pergeseran kedua. Misalnya pertama pergeseran sesuai dengan vektor $\vec{s}_1 = (30\,\text{cm}, 20\,\text{cm})$ di atas dilakukan , lalu pergeseran sesuai dengan vektor $\vec{s}_2 = (-20\,\text{cm}, 10\,\text{cm})$ dilakukan, maka hasil sama dengan pergeseran $\vec{s}_3 = (10\,\text{cm}, 30\,\text{cm})$. Satu pergeseran yang didapatkan dari melakukan dua pergeseran berturut-turut didefinisi sebagai jumlah dari dua vektor:

  $\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{s}_3$.
- Cara menghitung ***jumlah dua vektor*** didapatkan dari definisi di atas:

$$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1_x} \\ s_{1_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 20\,\text{cm} \end{pmatrix},\ \vec{s}_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{2_x} \\ s_{2_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -20\,\text{cm} \\ 10\,\text{cm} \end{pmatrix},$$

maka: $\vec{s}_j = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 20\,\text{cm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -20\,\text{cm} \\ 10\,\text{cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} + (-20\,\text{cm}) \\ 20\,\text{cm} + 10\,\text{cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10\,\text{cm} \\ 30\,\text{cm} \end{pmatrix}$

→ ***Jumlah vektor dalam koordinat kartesius:***

$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} s_{1x} \\ s_{1y} \end{pmatrix}$, $\vec{s}_2 = \begin{pmatrix} s_{2x} \\ s_{2y} \end{pmatrix}$, maka

$$\vec{s}_j = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \begin{pmatrix} s_{1x} \\ s_{1y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{2x} \\ s_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1x} + s_{2x} \\ s_{1y} + s_{2y} \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

- ***Pembagian vektor ke dalam komponen:***

  Satu pergeseran $\vec{s}_1$ bisa dibagikan de dalam dua pergeseran $\vec{s}_{1a}$ dan $\vec{s}_{1b}$ sehingga dua pergeseran baru $\vec{s}_{1a}$ dan $\vec{s}_{1b}$ dilakukan berturut-turut menghasilkan pergeseran asli $\vec{s}_1$. Berarti: jumlah dari dua pergeseran bagian sama dengan pergeseran asli: $\vec{s}_1 = \vec{s}_{1a} + \vec{s}_{1b}$. Misalnya: pergeseran $\vec{s}_1$ dari atas dibagi ke satu pergeseran ke arah $\hat{x}$ dan satu pergeseran ke arah $\hat{y}$:

$$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 20\,\text{cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 20\,\text{cm} \end{pmatrix}$$

dengan cara menulis yang lain:

$$\vec{s}_1 = s_{1x} \cdot \hat{x} + s_{1y} \cdot \hat{y} = 30 \text{ cm} \cdot \hat{x} + 20 \text{ cm} \cdot \hat{y} .$$

Tetapi pembagian bisa juga ke arah lain selain arah sumbu koordinat. Misalnya:

$$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} 20\,\text{cm} \\ 5\,\text{cm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 10\,\text{cm} \\ 15\,\text{cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 20\,\text{cm} \end{pmatrix} \text{ atau}$$

$$\vec{s}_1 = \begin{pmatrix} 10\,\text{cm} \\ -20\,\text{cm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 20\,\text{cm} \\ 40\,\text{cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\,\text{cm} \\ 20\,\text{cm} \end{pmatrix}$$

Dengan memakai definisi vektor bisa dikatakan: vektor $\vec{a}$ dibagi ke dalam dua komponen (bagian) $\vec{a}_1$ dan $\vec{a}_2$ dengan $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$.

- ***Perkalian skalar dengan vektor:***

  Arti perkalian secara umum: ambil sesuatu beberapa kali atau menjumlahkan sesuatu beberapa kali, misalnya 3 kali 5 kg beras (dalam kantong per 5 kg misalnya) sebanyak: 3 · 5 kg = 5 kg + 5 kg + 5 kg = 15 kg.

  Untuk vektor: $3 \cdot \vec{a} = \vec{a} + \vec{a} + \vec{a}$, atau secara umum $n \cdot \vec{a}$ (*n* kali vektor $\vec{a}$), berarti menjumlahkan vektor $\vec{a}$ sebanyak *n* kali. Hasil adalah satu vektor baru $n\vec{a}$. Vektor baru $n\vec{a}$ mempunyai arah yang sama dengan arah vektor asli. Panjangnya sebesar *n* kali panjang vektor asli: $|n\vec{a}| = n \cdot |\vec{a}|$. Dengan definisi ini perkalian bisa juga dilakukan dengan bilangan riil: $x \cdot \vec{a}$ adalah vektor yang arah sama dengan $\vec{a}$ dan panjangnya sebesar *x* kali panjang $\vec{a}$: $|x \cdot \vec{a}| = x \cdot |\vec{a}|$.

3.2.2 Vektor dalam berbagai sistem koordinat

Vektor dinyatakan seperti suatu tempat dalam sistem koordinat dengan menulis satu posisi saja, misalnya $\vec{s}_1 = (30\,\text{cm}, 20\,\text{cm})$. Yang dimaksud adalah satu vektor yang diwakili oleh panah dari sumber koordinat ke tempat yang dinyatakan dalam penulisan vektor. Setiap tempat bisa dinyatakan dalam berbagai sistem koordinat. Jika suatu tempat dinyatakan dalam sistem koordinat berbeda, tempat itu tetap sama, tetapi angka-angka yang menunjukkan tempat itu berbeda. Mengubah sistem koordinat yang dipakai untuk menyatakan suatu tempat dikatakan sistem koordinat ditransformasikan atau vektor ditransfer ke sistem koordinat yang lain. Vektor ditransfer antara sistem koordinat dengan cara yang sama seperti mengubah sistem koordinat untuk menyatakan suatu tempat. Proses ini dilakukan dengan memakai aturan trigonometri. Contoh:

$\vec{t} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15\,\text{cm} \\ 5\,\text{cm} \end{pmatrix}$ dalam sistem koordinat kartesius. Dalam sistem koordinat bola $\vec{t}$ menjadi:

$$\vec{t} = (\rho, \varphi) = \left(\sqrt{{t_x}^2 + {t_y}^2}, \arctan \frac{t_y}{t_x} \right) = (15{,}81\ \text{cm}, 18{,}43°)\ .$$

$\vec{s} = (\rho, \varphi) = (20\,\text{cm}, 30°)$ dalam sistem koordinat bola ditransfer dalam sistem koordinat kartesius menjadi:

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho \cdot \cos\varphi \\ \rho \cdot \sin\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20\,\text{cm} \cdot \cos 30° \\ 20\,\text{cm} \cdot \sin 30° \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 17{,}32\,\text{cm} \\ 10\,\text{cm} \end{pmatrix}.$$

Pertanyaan Ulang

→ Apa perbedaan antara satu vektor $\vec{a}$ dan satu panah $\vec{a}$? (Jangan menjawab "tidak ada perbedaan" – jawaban ini salah !)

→ Bagaimana cara menjumlahkan dua vektor ? a: secara gambar / grafik; b: dengan perhitungan dalam koordinat kartesius;

→ Bagaimana satu vektor bisa dibagikan ke dalam dua komponen ? Bagaimana bisa dibuktikan bahwa hasil pembagian benar ?

4 Gaya

4.1 Apa Gaya ?

"Apakah gaya ?"; "Apa ciri-cirinya ?"; "Bagaimana kita mengetahui bahwa ada gaya ?"

→ Gaya bisa dimengerti dari akibatnya: rasa sakit, bentuk benda berubah (sampai rusak / roboh), benda yang tadi diam mulai bergerak, benda bergerak terus walaupun ada gesekan.

Bagaimana gaya bisa diukur ? → ……………

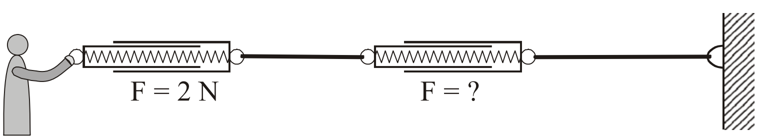
Apa gaya merupakan besaran <u>skalar atau</u> besaran <u>vektor</u> ? → Jika arah gaya berbeda, maka akibatnya berbeda. ⇒ ………

⇒ gaya adalah ………….

Lambang untuk gaya: *F* dari "*Force*".
Satuan gaya: Newton, disingkat N.
⇒ $[F] = \mathrm{N}$

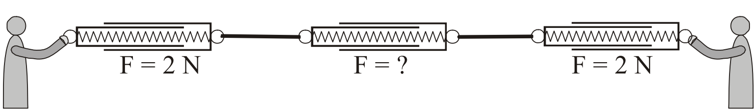
4.2 Keseimbangan dan Hukum Newton III (Satu Arah)

<u>Percobaan-percobaan:</u> Gaya dalam Tali

1. 

Tali diikat di satu ujung (di tembok / statif yang dipasang di meja), lalu ditarik dari ujung ke dua. Pengukur gaya dipakai pada ujung tarik dan di tengah tali. ***Bandingkan gaya di ujung dan di tengah:*** ………

⇒ ***Gaya merambat dalam tali***. Pada setiap bagian tali …….

2. 

Ujung yang tadi diikat ke tembok / meja dilepaskan dan orang menarik dari ujung itu juga.

- ***"Apakah gaya di tengah akan berubah dibanding situasi 1 ?"; "Gaya sekarang akan menjadi berapa besar ?"***

  → Hasil percobaan: …………

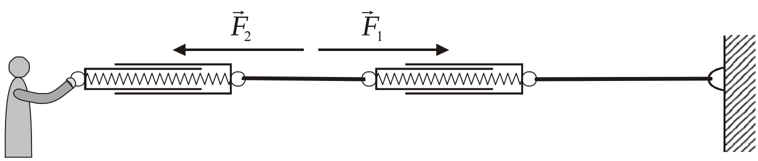
  "Mengapa ?" → …………

  Tembok / tiang di meja menarik tali dengan gaya yang sama besar dengan orang yang menarik dari sisi terbalik. Arah gaya dari tembok ke tali terbalik dengan arah gaya tarik dari orang ke tali yang diteruskan dari tali ke tembok. Gaya dalam tali sama persis ketika tali diikat dengan tembok dengan gaya yang terdapat ketika ada orang yang menarik dari sisi kedua.

  ⇒ ***aksi = reaksi*** / Hukum Newton III:

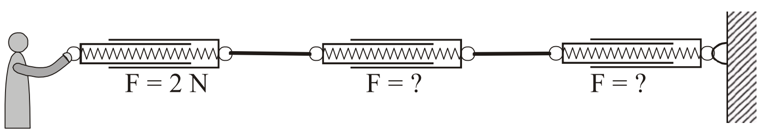
  Jika terdapat gaya dari satu benda kepada benda yang lain, maka benda yang lain itu akan memberikan gaya kepada benda pertama yang sama besar dan arahnya berlawanan.

- ***"Gaya dalam tali ke arah mana ?"*** → ………



$\vec{F}_1$ adalah gaya dari bagian kanan tali kepada bagian kiri tali,

$\vec{F}_2$ adalah gaya dari bagian kiri tali kepada bagian kanan tali.

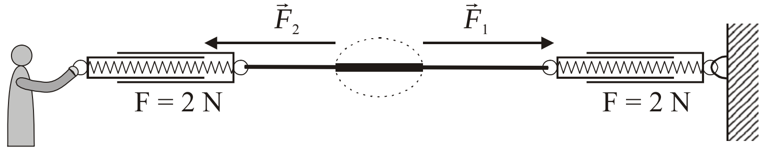
3. 

   Dalam percobaan 3. orang diganti tembok / kait di meja. ***Apakah gaya-gaya dalam tali / pada pengukur gaya akan sama atau berbeda dengan 2. ?***

   ………

   → Di sebelah kanan, tali menarik tembok ke kiri dengan gaya sebesar $\vec{F} = 2\,\mathrm{N}$, maka sesuai dengan hukum ***aksi = reaksi*** tembok menarik tali ke kanan dengan gaya yang sama besar. ⇒ Situasi ini persis sama dengan situasi 2 di atas, di mana tembok diganti orang.

4. Perhatikan salah satu bagian tali dan gaya yang terdapat kepada bagian tali itu. Misalnya bagian yang digambar tebal di bawah ini:



"Berapa besar gaya $\vec{F}_1$ ***yang menarik bagian ini ke kanan ?"***

"Berapa besar gaya $\vec{F}_2$ ***yang menarik bagian ini ke kiri ?"***

……

→ Ternyata gaya ke kiri sama besar dengan gaya ke kanan, berarti jumlah gaya kepada bagian tali ini sebesar nol: $\sum \vec{F}_i = 0$.

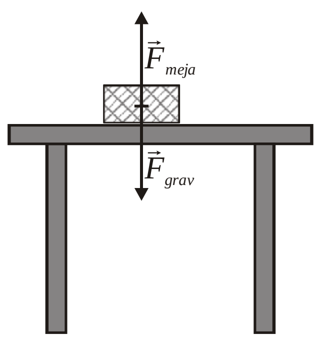
Karena jumlah gaya kepada tali ini nol, maka tali tidak dipercepat. Dikatakan: ***gaya*** kepada tali (bagian tengah) ***seimbang***.

Ini suatu prinsip umum: Jika jumlah gaya kepada suatu benda nol, maka terdapat ***keseimbangan gaya*** pada benda itu dan benda itu tidak akan dipercepat.
(***Perhatikan:*** Gaya dijumlah sebagai vektor, bukan besarnya yang dijumlah.)

→ ***Semua benda yang diam berada dalam keadaan keseimbangan gaya. Berarti:*** $\sum \vec{F}_i = 0$

Beberapa ***contoh*** mengenai keseimbangan gaya dan hukum aksi = reaksi:

- Benda terletak diam di atas meja (gambar 4.1): Gaya apa saja yang bekerja dalam situasi ini dan bagaimana terdapat keseimbangan gaya kepada benda ?
  → …………
  Gaya gravitasi / gaya berat benda dorong ke bawah, benda tidak turun ke bawah karena ………………………. Karena prinsip aksi = reaksi, maka ………………. Berarti meja mendorong benda ke atas dengan besar gaya yang sama dengan gaya gravitasi. Maka jumlah gaya kepada benda $\left(\vec{F}_{gravitasi} + \vec{F}_{meja}\right)$ nol dan terdapat keseimbangan gaya.



Gambar 4.1: *Keseimbangan gaya / aksi = reaksi pada benda di atas meja*

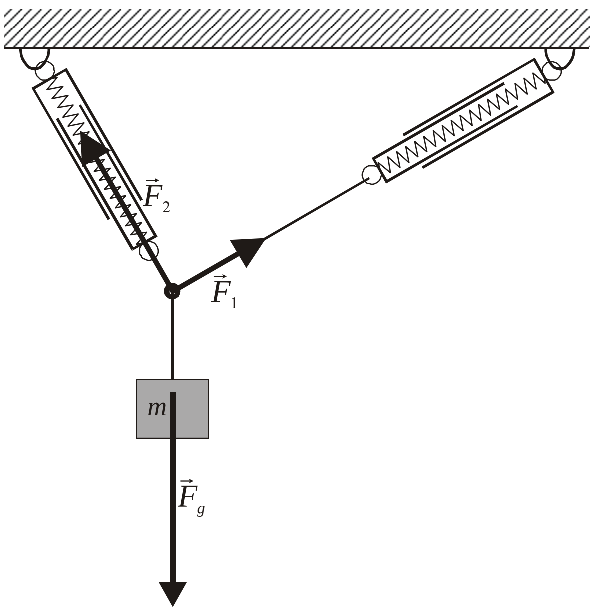
- Orang yang memukul tembok merasakan gaya reaksi dari tembok dengan jelas.
- Dua mobil yang bertabrakan: setiap mobil mengalami gaya dari mobil lain sehingga bentuk bodynya berubah.
- Katrol dan takal, pasal 4.4.1 "Katrol dan Takal".

4.3 Keseimbangan Gaya dalam Tiga Dimensi

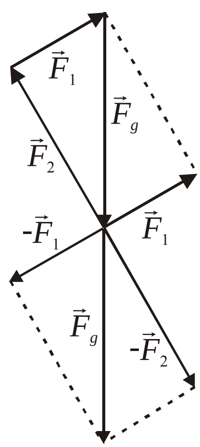
Percobaan: Satu beban digantung dengan dua tali seperti di gambar 4.2.

→ Tiga gaya yang bekerja pada satu tempat ***berjumlah sebagai vektor***. Dalam situasi keseimbangan akan terdapat jumlah gaya nol. → gambar 4.2 dan gambar 4.3: $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \sum_i \vec{F}_i = 0$ (4.1)

- ***Sisi pandang yang lain:***
  → Gaya gravitasi yang bekerja pada kait dibagi ke dua gaya, masing-masing ke arah tali. Berarti gaya berat beban yang menarik ke bawah dibagi ke gaya $-\vec{F}_1$ yang menarik tali kanan dan ke gaya $-\vec{F}_2$ yang menarik tali kiri. Masing-masing gaya kepada tali diimbangi dengan gaya dari tali kepada kait sehingga jumlah gaya tetap nol.
- ***Perhatikan:*** Apa perbedaan antara "jumlah besar gaya nol" dan "jumlah vektor gaya nol" ? Benar yang mana ? → …………



Gambar 4.2: *Tiga gaya yang bekerja pada satu tempat. Jumlah gaya kepada satu tempat / benda selalu nol kalau tempat / benda dalam keadaan keseimbangan (diam).*

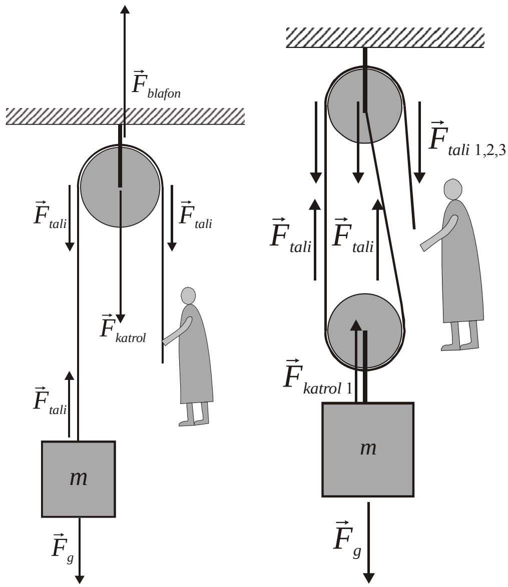


Gambar 4.3: *Penjumlahan gaya dari gambar 4.2.*

4.4 Contoh-Contoh

4.4.1 Katrol dan Takal

Selidiki soal keseimbangan dan aksi = reaksi pada katrol dan pada takal. Kita anggap bahwa semua katrol bisa berputar tanpa gesekan. Maka gaya dalam tali ikut dibelokkan di katrol sehingga gaya dalam tali di setiap posisi sama besar. Gaya dalam tali di sebelah kanan katrol sama besar dengan gaya dalam tali di sebelah kiri katrol. Gaya kepada setiap katrol didapatkan dari setiap tali yang menarik kepada katrol itu.

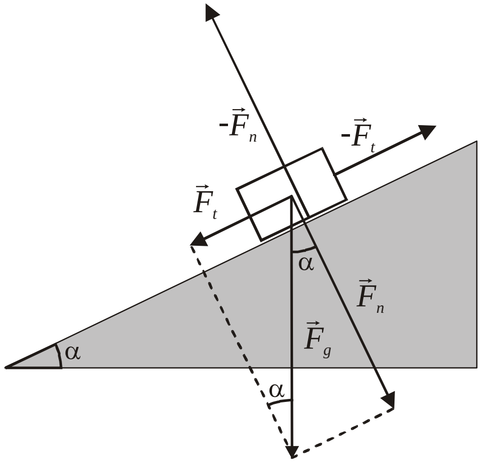


Gambar 4.4: *Gaya pada katrol (kiri) dan takal dua roda (kanan).*

4.4.2 Bidang Miring

Jika suatu benda terletak di atas bidang miring seperti dalam gambar 4.5 terdapat gaya gravitasi terhadap benda itu. Gaya yang biasanya perlu diketahui adalah gaya ke arah bidang miring dan gaya tegak lurus dengan bidang miring. Gaya ke arah bidang miring disebut sebagai ***gaya tangensial*** $\vec{F}_t$, gaya tegak lurus dengan bidang miring disebut sebagai ***gaya normal*** $\vec{F}_n$. Dua gaya tersebut merupakan bagian dari gaya gravitasi: $\vec{F}_n + \vec{F}_t = \vec{F}_g$. Supaya benda di bidang miring tidak mulai bergerak, harus ada keseimbangan gaya, maka gaya normal $\vec{F}_n$ harus diimbangi dengan gaya yang berlawanan arah. Gaya ini terdapat dari permukaan bidang miring kepada benda dan dalam gambar 4.5 gaya ini ditunjukkan sebagai $-\vec{F}_n$. Gaya $-\vec{F}_t$ yang melawan gaya tangensial $\vec{F}_t$ bisa didapatkan dari gesekan atau dari orang yang menarikkan benda ke atas.

Bagaimana menghitung besar gaya normal dan gaya tangensial ?…………………



Gambar 4.5: *Gaya-gaya pada bidang miring.*

Dari gambar vektor gaya dalam gambar 4.5 hubungan antara besar gaya F_n, F_t dan F_g bisa dihitung dengan perhitungan trigonometri:

$$\frac{F_n}{F_g} = \cos\alpha \Leftrightarrow F_n = F_g \cdot \cos\alpha \qquad (4.2)$$

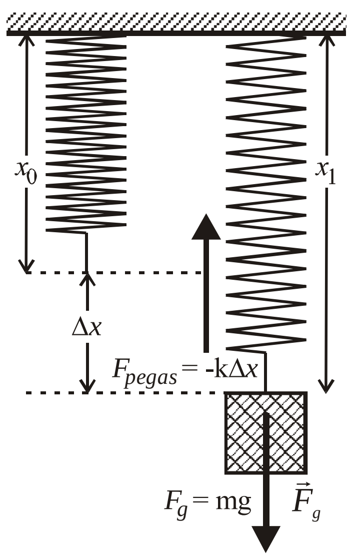
$$\frac{F_t}{F_g} = \sin\alpha \Leftrightarrow F_t = F_g \cdot \sin\alpha \qquad (4.3)$$

4.4.3 Kapal di Selokan Ditarik Dua Kuda

4.5 Beberapa Jenis Sumber Gaya

4.5.1 Gaya Elastis / Hukum Hook

Bentuk dari benda yang dikenai gaya, berubah. Kalau gaya tidak *terlalu besar*, maka sering terdapat hubungan linear antara perubahan bentuk dan besar gaya. Berapa besar “terlalu besar” itu tergantung jenis dan bentuk benda. Berarti terdapat persamaan sbb.:



Gambar 4.6: *Gaya dari pegas jika pegas diperpanjang.*

$$F = -\mathrm{k}\cdot \Delta x \tag{4.4}$$

di mana :

F : gaya benda yang melawan perubahan bentuk (deformasi).

k : Konstanta Hook mengenai sifat dari benda dalam hal gaya pada deformasi.

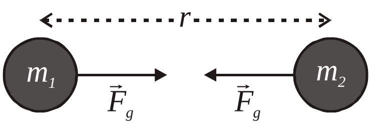
Δx : Jarak perubahan bentuk.

Contoh lihat gambar 4.6.

4.5.2 Gaya Gravitasi

Antara dua benda yang mempunyai massa sebesar m_1 dan m_2 terdapat gaya tarik-menarik sebesar

$$F = \mathrm{G}\cdot\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \tag{4.5}$$



Gambar 4.7: *Gaya gravitasi antara dua massa.*

Dengan konstanta gravitasi G sebesar $\mathrm{G} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{kg}^2}$.

Di permukaan bumi gaya gravitasi dirasakan sebagai berat dari benda yang ditarik ke bawah / ke arah bumi. Jika besar dari massa bumi dan jarak antara pusat bumi dan permukaan bumi dimasukkan ke dalam persamaan (4.5) terdapat satu persamaan yang menunjukkan besar gaya gravitasi benda F_g di permukaan bumi. Besar gaya gravitasi atau berat benda di permukaan bumi hanya tergantung dari massa benda:

$$F_{berat} = F_g = \underbrace{G \cdot \frac{m_{bumi}}{r_{bumi}^{\;2}}}_{\mathrm{g}} \cdot m_{benda} = \mathrm{g}\cdot m_{benda} \Leftrightarrow F_g = m\,\mathrm{g} \tag{4.6}$$

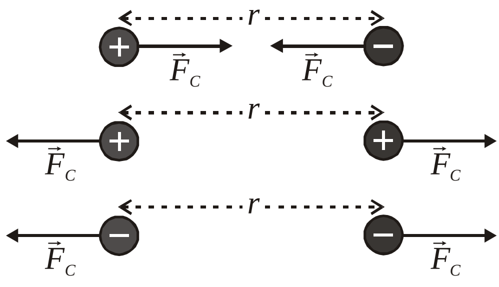
Konstanta g yang dipakai sebelah kanan dalam (4.6), disebut sebagai percepatan gravitasi di bumi. Percepatan gravitasi di bumi g merupakan satu singkatan dari faktor $\left(G \cdot \frac{m_{bumi}}{r_{bumi}^{\;2}}\right)$.

→ ***Apakah percepatan gravitasi g sama besar untuk setiap tempat di bumi?***
………(Bagaimana di atas dan di bawah gunung ? Perhatikan juga bentuk ellipsoid dari bumi.)

4.5.3 Gaya Elektrostatik / Hukum Coulomb

Antara dua muatan listrik terdapat gaya. Arah gaya tergantung dari jenis muatan. Antara dua muatan sama jenis terdapat gaya tolak-menolak dan antara dua muatan lawan jenis terdapat gaya tarik menarik. Besar dari gaya ini sesuai dengan hukum Coulomb:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (4.7)$$



Gambar 4.8: *Gaya Coulomb.*

4.5.4 Gaya Magnetik

Gaya magnetik adalah gaya yang didapatkan antara dua magnet atau antara arus listrik dan magnet. Juga antara dua tempat (benda) yang dialiri arus terdapat gaya magnetik.

<u>Pertanyaan ulang</u>

→ Mengapa gaya merupakan besaran vektor ?

→ Apa perbedaan antara jumlah besar gaya dan jumlah gaya ? Jika dua gaya mengenai satu tempat, yang berjumlah apa ?

→ Jelaskan mengenai besar dan arah dari gaya dalam tali yang satu ujungnya diikat pada tembok dan satu ujungnya ditarik orang. Bandingkan dengan tali yang kedua ujungnya ditarik orang.

→ Suatu beban digantungkan pada pegas. Perpanjangan pegas tergantung apa saja ? Apakah konstruksi ini bisa dipakai untuk menentukan massa dari beban yang digantungkan pada pegas ? Apa yang harus diperhatikan kalau mau mendapatkan besar massa dengan sangat teliti ?

→ Apa perbedaan antara konstanta gravitasi G dan percepatan gravitasi g ? Apa hubungannya ? Apakah nilai dari dua besaran ini sama besar di setiap tempat dalam alam semesta (berbagai tempat di bumi, bulan, Mars, angkasa luar, …) ?

→ Mengapa orang lompat di bulan bisa lebih tinggi dan lebih jauh daripada lompat di bumi ?

5 Kinematika / Gerakan

5.1 Menyatakan Gerakan

Dalam kinematika hubungan antara tempat dan waktu dari suatu benda dijelaskan / digambarkan / diselidiki. Contoh paling sederhana adalah gerakan lurus.

s (cm)	*t* (det)
0	0
2	3
4	6
6	7
8	8
10	10

Tabel 5.1: *Contoh s(t).*

→ ***“Bagaimana menjelaskan suatu gerakan ?”**………*

→ Memberitahukan ***posisi jarak s yang telah ditempuh pada waktu t.***

- <u>Cara pertama:</u> Dengan ***<u>tabel</u>***, misalnya seperti dalam contoh tabel 5.1 untuk gerakan di jalur lurus: tempat dinyatakan mulai dari satu tempat nol, lalu jarak dari tempat tersebut pada waktu tertentu ditentukan. Dengan cara ini terdapat pasangan nilai untuk jarak *s* dan waktu *t*.

  → ***Cara menulis*** / berkata: tempat *s* pada waktu *t* sebesar *s*(*t*). Contoh dari tabel 5.1: tempat *s* pada waktu *t* = 3 det sebesar ***s*(3 det) = 2 cm**.

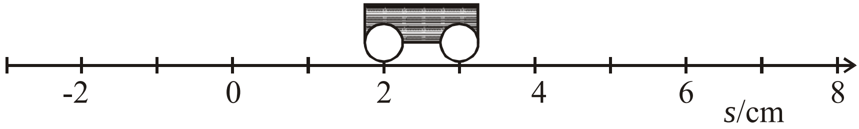
- ***Apakah informasi dalam tabel sudah menggambarkan suatu gerakan dengan komplit ?*** ……………

  (Bagaimana dengan besar waktu yang tidak tercantum dalam tabel ?)

  Apakah ada cara yang lebih lengkap ? ……………

→ ***Apa perbedaan antara <u>grafik</u> dan tabel ?*** ………………

→ Tabel memuat hanya beberapa pasangan nilai saja, grafik bisa menunjukkan semua pasangan nilai dalam daerah tertentu. Dengan kata lain grafik menunjukkan nilai ***s*** untuk setiap waktu ***t***. Kalau untuk setiap waktu *t* satu nilai posisi *s* diperlihatkan, maka grafik akan merupakan satu garis yang tidak putus. Dalam grafik makna dari suatu gerakan dimengerti dengan mudah. Orang yang bisa membaca grafik, akan langsung melihat perubahan tempat dan kecepatan dari grafik



Gambar 5.1: *Kereta di jalur lurus. Misalnya posisi ujung kiri kereta diperhatikan pada setiap waktu **t**.*

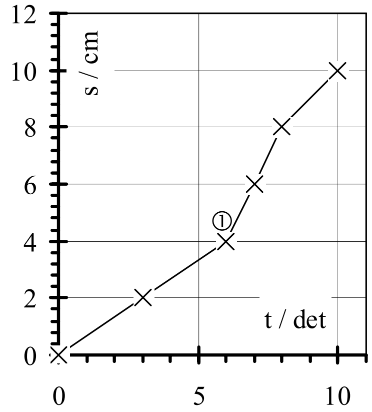
s terhadap t.

→ ***Apa berbeda, apa sama antara grafik seperti ini dan sistem koordinat ?***

→ ***Sama:*** ....

dua sumbu tegak lurus; nol berada pada seluruh sumbu koordinat; nilai lain berada pada seluruh garis searah dengan sumbu koordinat.

→ ***Berbeda:*** ....



Gambar 5.2: *Grafik dari data tabel 5.1.*

Arti sumbu bukan tempat, tetapi besaran fisik yang lain. Dalam contoh sumbu mendatar menunjukkan waktu. Satu titik dalam grafik bukan tempat, tetapi pasangan nilai, misalnya titik ① menunjukkan pasangan dengan waktu t = 6 det **dan** s = 4 cm. Berarti titik-titik yang dipakai sebagai grafik yang menggambarkan gerakan benda menunjukkan hubungan antara tempat dan waktu. Pada setiap waktu t, satu tempat s yang merupakan posisi benda pada waktu itu bisa digambarkan. Berarti terdapat grafik $s(t)$.

- Cara ketiga untuk menjelaskan hubungan antara tempat dan waktu: Dengan ***persamaan***. Misalnya: $s(t) = 1,5\,\frac{\text{cm}}{\text{det}} \cdot t + 3\,\text{cm}$. Dengan persamaan seperti ini untuk setiap waktu t satu pasangan tempat s ditentukan. Persamaan bisa digambar ke dalam grafik dengan menggambar semua pasangan yang memenuhi persamaan. Dengan cara ini terdapat satu garis yang tidak putus, berarti terdapat satu pasangan nilai $(s(t))$ untuk setiap waktu t.

Pertanyaan Ulang:

→ Apa yang harus diberitahukan untuk menjelaskan gerakan dari suatu benda ?

→ Sebutkan tiga cara untuk menyatakan hubungan antara posisi dan waktu $s(t)$. Apa keuntungan dan kesulitan dari cara masing-masing ?

→ Apa yang dimaksud dengan grafik ? Misalnya grafik $s(t)$?

5.2 Kecepatan

5.2.1 Penjelasan Umum dan Contoh Kecepatan Konstan

Apa perbedaan antara benda yang diam dan benda yang bergerak ? …………

Kalau benda tidak bergerak (diam), berarti tempat …………. Dalam grafik tempat terhadap waktu ……………

Kalau benda bergerak, berarti tempat ……………, dengan kata lain: tempat berbeda untuk waktu yang berbeda. Dalam grafik tempat terhadap waktu ($s(t)$) …………………

Grafik s(t) yang naik tajam menunjukkan apa mengenai gerakan benda dibanding grafik s(t) yang naik pelan ?

Apa kecepatan ? …………………

Definisi kecepatan rata-rata: Kecepatan rata-rata $\bar{\vec{v}}(t_1, t_2)$ adalah jarak antara dua posisi $\vec{s}_1(t_1)$ dan $\vec{s}_2(t_2)$ yang dimiliki benda pada waktu t_1 dan t_2 dibagi besar selang waktu antara t_1 dan t_2.

Sebagai persamaan terdapat:

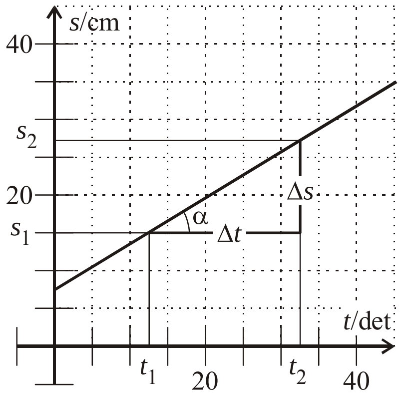
$$\bar{\vec{v}}(t_1, t_2) = \frac{\vec{s}_2(t_2) - \vec{s}_1(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t} \tag{5.1}$$

Perhatikan: tempat adalah besaran vektor; maka: kecepatan juga merupakan besaran vektor. Untuk gerakan linear (gerakan pada garis lurus) vektor tempat dan vektor kecepatan bisa dihitung sebagai skalar atau cukup untuk memperhatikan dan menghitung besar vektor saja.

Bagaimana kecepatan sesuai dengan definisi ini dilihat dalam grafik s(t) ***?***………………

Dalam grafik s terhadap t perbedaan tempat $\Delta s = s_2 - s_1$ bisa digambar sebagai jarak pada sumbu tempat antara posisi s_1 dan s_2. Perbedaan waktu $\Delta t = t_2 - t_1$ bisa digambar sebagai jarak pada sumbu waktu antara posisi t_1 dan t_2. Kalau jarak tempat dan jarak waktu tersebut digambar pada grafik $s(t)$ seperti dalam gambar 5.3, terdapat satu segitiga yang dibentuk oleh garis jarak Δs, garis jarak Δt dan grafik $s(t)$. Kecepatan v dari definisi (5.1) sebesar tangen sudut α dari grafik $s(t)$ terhadap arah mendatar.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \tan \alpha \qquad (5.2)$$



Gambar 5.3: *Definisi kecepatan rata-rata.*

Karena kecepatan v dalam grafik s terhadap t menunjukkan informasi mengenai sudut dari grafik $s(t)$, maka kecepatan v disebut sebagai kemiringan dari grafik $s(t)$.

Jika grafik $s(t)$ berbentuk garis lurus – seperti dalam gambar 5.3 – maka, dilihat dari geometri segitiga, perbandingan $\frac{\Delta s}{\Delta t} = v$ sama besar untuk pasangan waktu t_1 dan t_2 apa saja. Berarti kecepatan v sama besar pada setiap waktu. Dengan kata lain kecepatan v konstan.

Contoh menghitung besar kecepatan: Gambar 5.3: Δs = 14 cm, Δt = 20 det, berarti kecepatan $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{14\,\text{cm}}{20\,\text{det}} = 0{,}7\,\frac{\text{cm}}{\text{det}}$. Tabel 5.1 dan gambar 5.2 antara t_1 = 3 det dan t_2 = 6 det: Δs = 2 cm, Δt = 3 det, berarti kecepatan $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\,\text{cm}}{3\,\text{det}} = \frac{2}{3}\,\frac{\text{cm}}{\text{det}}$.

Bagaimana <u>persamaan tempat terhadap waktu</u> $s(t)$ dari gerakan dengan kecepatan konstan ?

Dari definisi kecepatan (5.1) terdapat:

$$\vec{v}(t_1, t_2) = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta \vec{s} = \vec{v} \cdot \Delta t \Leftrightarrow \vec{s}_2(t_2) - \vec{s}_1(t_1) = \vec{v} \cdot (t_2 - t_1) \qquad (5.3)$$

Jika gerakan berlangsung pada jalur lurus, cukup menghitung besar dari jarak dan kecepatan saja. Untuk mendapatkan persamaan gerak yang lebih sederhana, persamaan (5.3) ditulis untuk tempat pertama $s_1(t_1)$ sebagai tempat yang dimiliki pada waktu $t_1 = 0$, lalu s_1 disebut sebagai s_0 (angka nol karena ini tempat pada waktu nol), lalu $s_2(t_2)$ ditulis sebagai $s(t)$ maka (5.3) menjadi:

$$s_2(t_2) = v \cdot (t_2 - t_1) + s_1(t_1) \Leftrightarrow s(t) = v \cdot t + s_0 \qquad (5.4)$$

Di mana s_0 dan v dilihat dalam grafik ? ………………

Bagaimana grafik berubah kalau kecepatan berubah (naik / turun)? Bagaimana kalau posisi awal berubah ? ………………

Fungsi linear secara umum: Jika terdapat hubungan antara dua variabel *x* dan *y* dalam bentuk $y(x) = \mathrm{a} \cdot x + \mathrm{b}$ dengan konstanta a dan b, maka grafik dari pasangan nilai (*x*, *y*) membentuk garis lurus. Konstanta a menentukan sudut kemiringan dari garis lurus tersebut dan disebut sebagai kemiringan grafik. Konstanta b disebut sebagai perpotongan sumbu *y*. Perpotongan sumbu *y* adalah nilai variabel *y* jika *x* = 0, berarti posisi di mana grafik memotong sumbu *y*. Hubungan seperti ini disebut sebagai hubungan linear.

Jadi dalam grafik tempat terhadap waktu (*s*(*t*)), kecepatan bisa dilihat dari kemiringan grafik. Jika grafik *s*(*t*) merupakan garis lurus, berarti terdapat hubungan linear antara tempat dan waktu, maka kecepatan konstan / sama besar pada setiap saat. Kecepatan *v*(*t*) pada setiap saat bisa digambarkan ke dalam grafik kecepatan terhadap waktu.

→ ***Bagaimana gambar v(t) untuk situasi kecepatan konstan ?*** ……………

→ ***Bagaimana posisi benda s(t) bisa dilihat dari grafik v(t) ?*** ……………

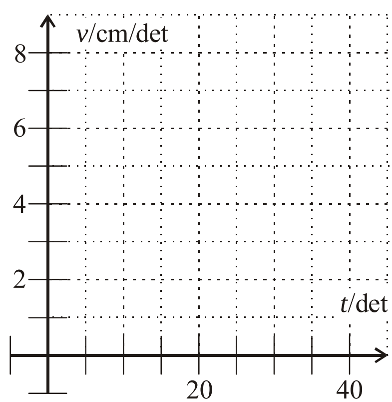
→ Untuk situasi *v*(*t*) konstan dari (5.3) dan (5.4) dilihat:

$$v(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta s = \underbrace{v \cdot \Delta t}_{\substack{\text{luas di bawah} \\ \text{kurva } v(t)}}$$

$$s(t) = \underbrace{\Delta s}_{\substack{\text{tambahan} \\ \text{jarak}}} + \underbrace{s_0}_{\substack{\text{posisi} \\ \text{awal}}} \qquad (5.5)$$

$$\Rightarrow s(t) = \underbrace{v \cdot t}_{\substack{\text{luas di bawah} \\ \text{kurva } v(t)}} + \underbrace{s_0}_{\text{posisi awal}}$$

Berarti perubahan tempat (jarak tempuh) antara waktu t_1 dan t_2 sebesar luas di bawah kurva *v*(*t*) antara t_1 dan t_2. Posisi *s*(*t*) terdapat dengan besar luas di bawah kurva *v*(*t*) tersebut ditambah dengan posisi awal.



Gambar 5.4: *Grafik kecepatan terhadap waktu.*

Pertanyaan Ulang

→ Gambarlah *v*(*t*) dan Δ*s* dari t_1 = 5 det sampai t_2 = 20 det ke dalam grafik gambar 5.4 untuk kecepatan konstan sebesar $v = 5\,\frac{\text{cm}}{\text{det}}$. Jelaskanlah gambar anda dari (5.5)………………

5.2.2 Kecepatan tidak Konstan

5.2.2.1 Contoh Eksperimen

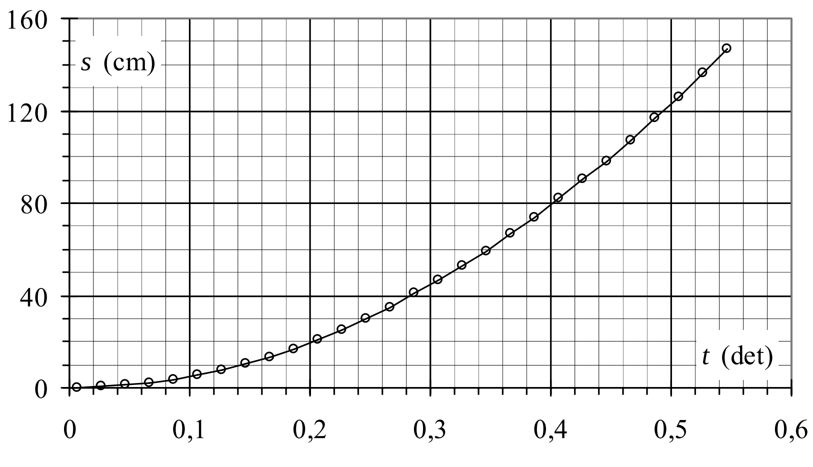
Suatu benda dibiarkan jatuh. Untuk merekam gerakan benda, satu pita kertas diikat dengan benda. Kertas melewati suatu alat perekam waktu. Alat tersebut disebut sebagai *ticker timer*. Dalam *ticker timer* pada setiap jarak waktu tertentu satu titik diketik kepada pita kertas. Misalnya setiap selang waktu sebesar Δt = 0,02 det, pita kertas diberikan satu titik. Jadi posisi titik menunjukkan jarak gerak benda dan jumlah titik yang sudah diketik menunjukkan selang waktu yang sudah berlalu. Dari posisi titik-titik pada pita kertas, grafik $s(t)$ bisa digambarkan. Hasil yang didapatkan seperti diperlihatkan dalam gambar 5.5. Dalam contoh pengukuran jarak waktu antara dua titik sebesar Δt = 0,02 det.

5.2.2.2 Kecepatan Rata-Rata

Bagaimana kecepatan rata-rata sebaiknya didefinisikan ?

……………

Dari hasil pengukuran contoh eksperimen di atas pada gambar 5.5,



Gambar 5.5.: *Jarak tempuh dari benda yang jatuh terhadap waktu. Direkam dengan "ticker timer".*

dilihat bahwa grafik tempat terhadap waktu tidak merupakan garis lurus, berarti hubungan antara tempat dan waktu tidak linear. Untuk menentukan kecepatan dari gerakan benda ini, definisi kecepatan dalam (5.1), $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, bisa dipakai. Secara praktis kita bisa menggambar segitiga Δs dan Δt dan menentukan perbandingan antara perubahan tempat terhadap perubahan waktu. Dalam grafik ini ternyata $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ tidak konstan, tetapi nilai v yang didapatkan sangat tergantung, pada waktu kapan dan tempat mana, kecepatan ditentukan. Perhatikan gambar 5.6.

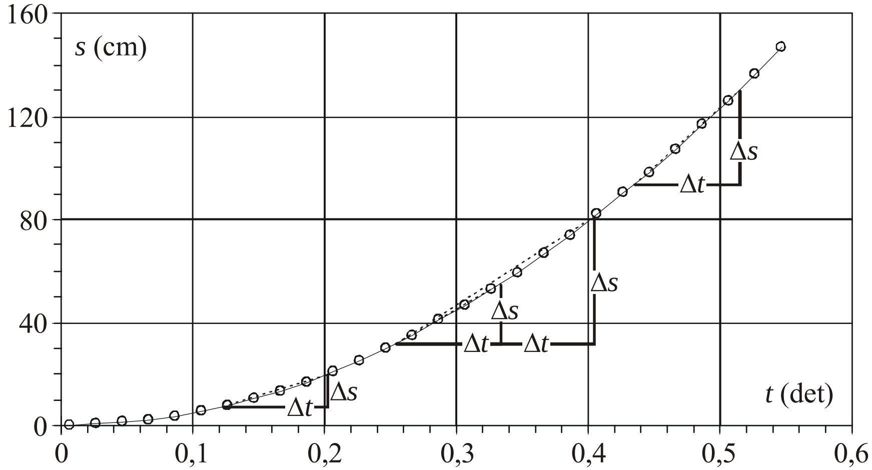
Untuk situasi kecepatan tidak konstan, kecepatan perlu dibedakan antara kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat. Kecepatan rata-rata didefinisi seperti dalam (5.1) sebagai perubahan tempat Δs dibagi selang waktu (perubahan waktu) Δt yang dibutuhkan benda untuk bergerak sejauh jarak Δs tersebut. Dalam menentukan kecepatan rata-rata jarak antara dua tempat / dua posisi waktu boleh besar saja dan benda bisa bergerak beberapa waktu dengan cepat, beberapa waktu dengan pelan, bahkan bisa berhenti selama beberapa waktu dan bergerak lagi. Dalam menentukan kecepatan rata-rata hanya jarak antara tempat awal dan tempat akhir serta waktu tempuh total saja yang diperhatikan. Tentu saja, nilai kecepatan yang didapatkan sangat tergantung dari posisi / waktu awal dan posisi / waktu akhir yang dipakai untuk menentukan kecepatan. Beberapa contoh untuk hasil ukur dari gambar 5.5 diperlihatkan dalam gambar 5.6.

Apakah kecepatan rata-rata memberikan informasi yang memuaskan mengenai suatu gerakan ? Bagaimana cara untuk mendapatkan informasi yang lebih rinci mengenai gerakan suatu benda ? ....

5.2.2.3 Kecepatan Sesaat

Bagaimana (5.1) bisa diubah untuk mendekati kecepatan pada satu saat saja, bukan dalam selang waktu Δt ? ....

Walaupun kecepatan rata-rata berguna untuk situasi tertentu, yaitu jika selang waktu / selang jarak yang dipakai untuk menghitung kecepatan rata-rata besar, namun informasi mengenai gerakan sebenarnya tidak detil. Informasi yang lebih rinci didapatkan dengan memakai selang waktu Δt dan jarak Δs yang lebih kecil untuk menentukan $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, kemudian v ditentukan lagi untuk selang waktu dan jarak berikut, dst.



Gambar 5.6: *Beberapa contoh untuk menghitung kecepatan rata-rata sesuai dengan (5.1)*

Sebagai contoh kita mengambil hasil ukur dari eksperimen di atas dan menentukan kecepatan pada masing-masing selang waktu Δt sebesar $\Delta t = 0{,}06$ det. Waktu ini didapat antara tiga tanda titik pada pita kertas. Secara praktis kita bisa memotong pita kertas yang dipakai untuk mengukur gerakan pada setiap tiga tanda titik. Panjang potongan pita menunjukkan jarak gerak benda dalam waktu $\Delta t = 0{,}06$ det sehingga kecepatan v terdapat sebesar: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\text{Panjang potongan pita}}{0{,}06\text{det}}$. Kita anggap kecepatan yang didapatkan dengan cara ini merupakan kecepatan yang dimiliki saat di tengah interval waktu, berarti kecepatan pertama yang dihitung dari $t = 0$ sampai $t = 0{,}06$ det, dihitung sebagai kecepatan pada waktu $t = 0{,}03$ det. Potongan pita kertas bisa ditaruh dalam grafik kecepatan terhadap waktu. Setiap potongan pita dipasang pada waktunya. Hasil yang diperlihatkan dalam gambar 5.7 menunjukkan perubahan kecepatan terhadap waktu. Dalam contoh ini dilihat bahwa grafik kecepatan terhadap waktu (grafik $v(t)$) berbentuk garis lurus, berarti kecepatan berubah secara linear dengan waktu: $v(t) = \mathrm{a} \cdot t$ dengan a sebagai konstanta.

Apakah dengan cara ini terdapat kecepatan sesaat ? ……………

→

Cara menentukan kecepatan seperti dalam contoh di atas bukan kecepatan sesaat, tetapi kalau panjang interval waktu diperkecil lagi, maka perubahan kecepatan dengan waktu terdapat lebih rinci lagi dan kecepatan pada satu saat bisa diketahui lebih teliti.

Kecepatan sesaat $v(t)$ didapatkan jika interval waktu Δt dalam perhitungan (5.1) diperkecil sampai mendekati nol. Secara matematis kecepatan dihitung dengan limit Δt mendekati nol:

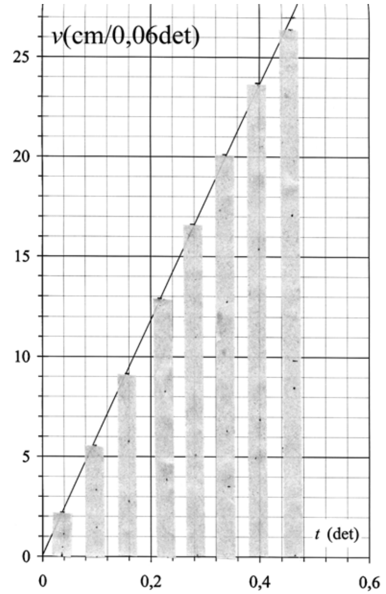
$$\begin{aligned}\vec{v}(t) &= \lim_{t_2\to t} \bar{\vec{v}}(t,t_2) \\ &= \lim_{t_2\to t} \frac{\vec{s}_2(t_2)-\vec{s}(t)}{t_2-t} \qquad (5.6) \\ &= \lim_{t_2\to t} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t}\end{aligned}$$

Berarti definisi kecepatan sesaat sbb.:

$$\vec{v}(t) = \frac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t} \qquad (5.7)$$

Dengan kata lain: kecepatan sesaat adalah turunan dari fungsi $s(t)$.

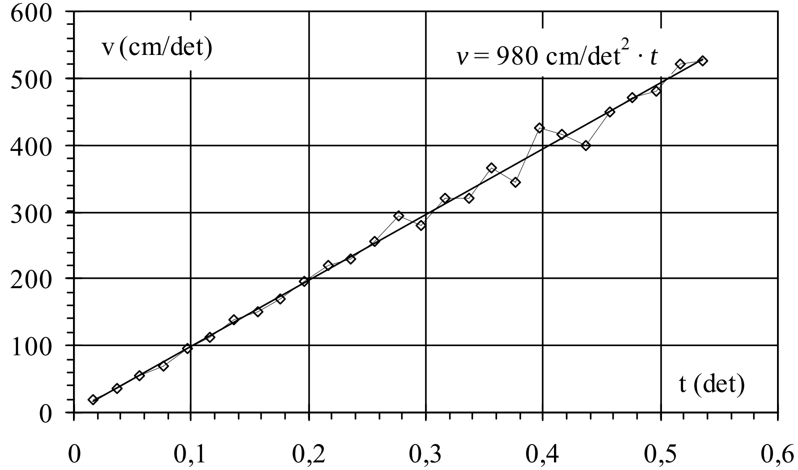
Bagaimana kecepatan sesaat terlihat dalam grafik s(t) ? (Tunjukkan dalam contoh gambar 5.5 dan gambar 5.6.) ………………



Gambar 5.7: *Hasil pengukuran jatuh bebas dengan ticker timer. Jarak titik menunjukkan kecepatan.*

Bagaimana dalam contoh eksperimen benda jatuh bebas, kecepatan sesaat terhadap waktu bisa didapatkan ? Apakah kecepatan sesaat bisa didapatkan secara sempurna dari hasil eksperimen ini ? Bagaimana mendapatkan pendekatan yang baik ?……………………

Bagaimana hubungan antara kecepatan dan waktu dalam contoh ini ? → v(t) = ………………



Gambar 5.8.: *Kecepatan dari benda yang jatuh terhadap waktu dihitung dari pengukuran gambar 5.5.*

5.2.2.4 Tempat terhadap waktu *s*(*t*) dari kecepatan terhadap waktu *v*(*t*)

→ ***Bagaimana posisi benda s(t) bisa dilihat dari grafik v(t) ?*** ……………

→ ***Bagaimana persamaan gerak benda s(t) bisa didapatkan dari persamaan v(t) ?*** ……………

Untuk kecepatan yang konstan dalam (5.5) telah terdapat: tambahan jarak Δs sebesar luas di bawah kurva $v(t)$.

$$v(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta s = \underbrace{v \cdot \Delta t}_{\substack{\text{luas di bawah} \\ \text{kurva } v(t)}} \tag{5.8}$$

Jika waktu tidak konstan penambahan jarak (posisi) Δs berbeda pada setiap saat. Untuk mendapatkan perubahan dalam selang waktu Δt yang besar, maka penambahan jarak ds untuk selang waktu dt yang kecil harus ditentukan, kemudian penambahan ds untuk setiap bagian waktu dt ditambahkan pada posisi awal ds sehingga terdapat $\Delta s = \mathrm{d}s_1 + \mathrm{d}s_2 + \mathrm{d}s_3 + \ldots.$

Besar penambahan jarak ds yang kecil terdapat dari definisi kecepatan sesaat dalam (5.6):

$$\vec{v}(t)=\frac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t}\Leftrightarrow \mathrm{d}\vec{s}=\vec{v}(t)\cdot\mathrm{d}t \quad (5.9)$$

Besar penambahan jarak ds sebesar luas di bawah kurva $v(t)$ selama waktu dt sehingga penambahan jarak Δs antara waktu t_1 dan t_2 tetap sebesar luas di bawah kurva $v(t)$ antara waktu t_1 dan t_2 seperti untuk situasi kecepatan konstan. Penjumlahan dari semua bagian ds yang kecil disebut menghitung integral ds:

$$\sum_{\lim\Delta s_i\to 0}\Delta s_i=\int \mathrm{d}s \quad (5.10)$$

Maka untuk besar jarak s terhadap waktu terdapat:

$$\begin{aligned}&\mathrm{d}\vec{s}=\vec{v}(t)\cdot\mathrm{d}t\Rightarrow\Delta\vec{s}=\int_{s_1}^{s_2}\mathrm{d}\vec{s}=\int_{s_1(t_1)}^{s_2(t_2)}\vec{v}(t)\cdot\mathrm{d}t\\&\Rightarrow\vec{s}(t)=\int_{t_1}^{t_2}\vec{v}(t)\cdot\mathrm{d}t+\vec{s}(t_1)\end{aligned} \quad (5.11)$$

Penambahan jarak Δs antara waktu t_1 dan t_2 sebesar integral kecepatan terhadap waktu $\left(\int\vec{v}(t)\cdot\mathrm{d}t\right)$ dan sebesar luas di bawah kurva $v(t)$ antara waktu t_1 dan t_2. Arti dari ***menghitung integral*** memang secara umum ***berarti menghitung luas di bawah kurva***. Kalau waktu t_1 pada awal perhitungan nol terdapat persamaan untuk jarak / tempat terhadap waktu sbb.:

$$\vec{s}(t)=\int_{t_1}^{t_2}\vec{v}(t)\cdot\mathrm{d}t+\vec{s}_0 \quad (5.12)$$

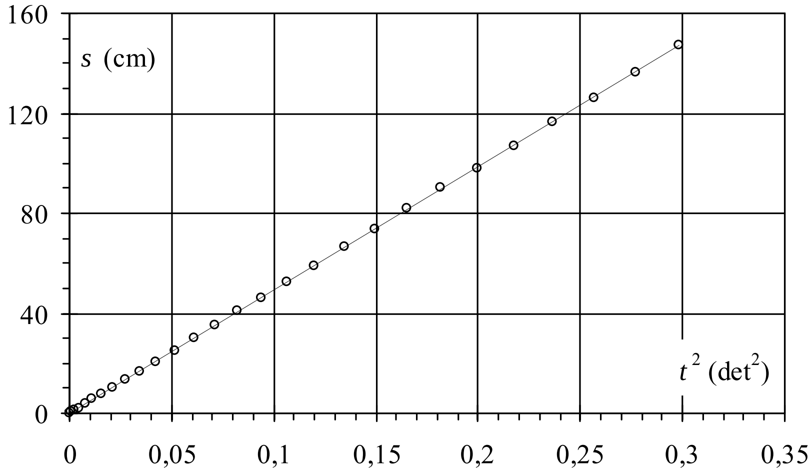
5.2.2.5 Hubungan antara *s*(*t*) dan *v*(*t*) pada contoh khusus

Dalam eksperimen dengan benda yang jatuh dengan bebas terdapat kecepatan yang bertambah secara linear dengan waktu, berarti $v(t)=a\cdot t+v_0$.

Bagaimana cara untuk menentukan grafik s(t) dari gerakan ini jika a dan v_0 diketahui ? → A: secara perhitungan dari persamaan; → B: dari grafik;

....

Tempat terhadap waktu $s(t)$ bisa dihitung sebagai luas di bawah kurva grafik. Hasil yang didapatkan:



Gambar 5.9.: *Jarak tempuh dari benda yang jatuh terhadap waktu kuadrat dari pengukuran gambar 5.5.*

$$s(t) = \int_0^t v(t')\,\mathrm{d}t + s_0 = \int_0^t \left(\mathrm{a}\,t + v_0\right)\mathrm{d}t + s_0 = \frac{1}{2}\mathrm{a}\,t^2 + v_0 t + s_0 \qquad (5.13)$$

Dalam contoh percobaan di atas dengan benda yang jatuh dengan bebas, kecepatan nol pada awal gerakan dan posisi diukur dari posisi awal sebagai jarak nol, maka $v_0 = 0$ dan $s_0 = 0$. Maka $s(t) = \frac{1}{2}\mathrm{a}\,t^2$. Kalau tempat digambar dalam grafik tempat terhadap waktu, terdapat grafik yang melengkung ke atas seperti dalam gambar 5.5. Dengan membuat grafik tempat s terhadap waktu kuadrat t^2 terdapat garis lurus sebagai grafik seperti dalam gambar 5.9 karena hubungan antara s dan t^2 linear.

Untuk situasi kecepatan konstan, konstanta a yang menunjukkan perubahan kecepatan dengan waktu dalam perhitungan di atas menjadi nol. Maka terdapat: $v(t)$ = konstan = v_0. Tempat (jarak / posisi) terhadap waktu dihitung seperti dalam (5.13) atau (5.5):

$$s(t) = \int_0^t v(t')\,\mathrm{d}t + s_0 = \int_0^t v_0\,\mathrm{d}t + s_0 = v_0 t + s_0 \qquad (5.14)$$

5.3 Percepatan

Percepatan rata-rata $\bar{\vec{a}}$ didefinisi sebagai perubahan kecepatan per waktu. Sebagai persamaan terdapat:

$$\bar{\vec{a}}(t_1, t_2) = \frac{\vec{v}_2(t_2) - \vec{v}_1(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \tag{5.15}$$

Untuk situasi di mana kecepatan berubah-ubah percepatan rata-rata kurang tepat, tetapi percepatan sesaat dibutuhkan. Definisi dari percepatan sesaat sbb.:

$$\vec{a}(t) = \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} \tag{5.16}$$

Hubungan antara percepatan dan kecepatan: dari turunan dalam (5.16) terdapat hubungan integral sbb.:

$$\vec{a}(t) = \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} \Rightarrow \vec{v} = \int \vec{a}(t)\,\mathrm{d}t + v_0 \tag{5.17}$$

Kalau memperhatikan hubungan antara kecepatan dan percepatan dan membandingkan hubungan ini dengan hubungan antara tempat dan kecepatan, maka kelihatan bahwa dua hubungan ini sama persis. Kecepatan terdapat sebagai turunan dari tempat terhadap waktu atau dengan kata lain, kecepatan merupakan perubahan tempat (jarak) per waktu. Percepatan terdapat sebagai turunan dari kecepatan terhadap waktu atau dengan kata lain, percepatan merupakan perubahan kecepatan per waktu.

Hubungan antara percepatan dan tempat terdapat secara langsung dengan menggabungkan (5.16) dan (5.7):

$$\left.\begin{aligned} \vec{a}(t) &= \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} \\ \vec{v}(t) &= \frac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \vec{a}(t) = \frac{\mathrm{d}\dfrac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2\vec{s}}{\mathrm{d}t^2} \tag{5.18}$$

Berarti hubungan antara tempat dan waktu diturunkan dua kali terhadap waktu menghasilkan percepatan. Untuk mendapatkan tempat terhadap waktu dari percepatan terhadap waktu, percepatan harus diintegrasikan dua kali terhadap waktu.

Dalam contoh benda jatuh dengan bebas, terdapat kecepatan sebesar: $v(t) = \mathrm{a}\cdot t$. Berarti terdapat percepatan sebesar: $a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(\mathrm{a}\cdot t)}{\mathrm{d}t} = \mathrm{a}$. Percepatan a dalam situasi ini ternyata tidak berubah dengan waktu, tetapi konstan. Dengan percepatan konstan terdapat perubahan kecepatan terhadap waktu secara linear.

5.4 Persamaan untuk Beberapa Situasi Khusus

Untuk dua situasi khusus, yaitu kecepatan konstan dan percepatan konstan dari teori di atas terdapat hubungan antara tempat, kecepatan dan percepatan sbb.:

	percepatan	kecepatan	tempat
kecepatan konstan	a = 0	v = konstan $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	$s(t) = v \cdot t + s_0$
percepatan konstan	a = konst $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	v(t) = a · t + v0 $\vec{v}(t) = \frac{d\vec{s}}{dt}$	$s(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + s_0$ $s(t) = \frac{1}{2}\Delta v \cdot \Delta t + v_0 t + s_0$

Perhatikan bahwa persamaan dalam tabel ini hanya benar pada situasi khusus yang disebut dalam tabel.

Pertanyaan Ulang

→ Jelaskanlah arti dan definisi dari kecepatan dengan kata dan dengan persamaan.

→ Apa perbedaan antara kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat ? Mengapa pengertian mengenai kecepatan sesaat dibutuhkan ? Apa gunanya dari kecepatan rata-rata ?

→ Jelaskanlah arti dan definisi dari percepatan dengan kata dan dengan persamaan.

→ Kalau kita tahu, percepatan nol, maka kita tahu apa mengenai kecepatan ? (Jelaskanlah, mengapa.)

→ Kalau percepatan konstan, apa yang kita tahu mengenai kecepatan ? (Jawab dengan kata dan dengan persamaan dan rincikan / jelaskan jawaban anda.)

→ Mengapa – menurut perkiraan anda – dalam diktat ini penjelasan mengenai kecepatan mencakup beberapa (≈ 10) halaman, penjelasan mengenai percepatan dimuat dalam hanya satu halaman saja ? Apakah teori mengenai percepatan lebih sedikit atau lebih sederhana ?

6 Hukum-Hukum Newton

6.1 Hukum Newton I

Apa yang terjadi dengan sebuah benda yang bergerak dan dibiarkan ? Bagaimana jika seandainya tidak ada gesekan seperti di angkasa luar ? ……………………

→ Jika tidak ada gaya kepada benda, maka setiap benda memiliki kelembaman yang membuat dia bertahan dalam gerakannya. Berarti kecepatan (baik besar maupun arah) konstan.

Prinsip ini disebut sebagai hukum Newton I:

"Setiap benda bertahan dalam gerakannya jika tidak ada gaya yang bekerja terhadap benda tersebut."

6.2 Hukum Newton II

Jika tidak ada gaya kepada benda, ternyata kecepatan konstan seperti telah dinyatakan dalam hukum Newton I. Tetapi:

Apa yang terjadi jika ada resultan gaya kepada suatu benda ? – Berarti, apa yang terjadi jika gaya tidak nol seperti dibicarakan dalam Hukum Newton I ? ………………………

Jika ada gaya, gerakan benda akan berubah.

Bagaimana perubahan gerakan tergantung dari benda dan dari gaya yang bekerja ? → Ini yang dibicarakan dalam hukum Newton II.

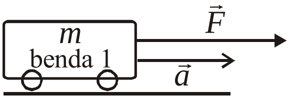
Kecepatan yang berubah dalam pasal mengenai kinematika telah didefinisi sebagai percepatan. Jadi pertanyaan yang dijawab dalam hukum Newton II: ***Bagaimana hubungan antara percepatan benda $\vec{a}$ dan gaya $\vec{F}$ yang bekerja kepada suatu benda dan sifat benda yang mana mempengaruhi percepatan yang dialami ?*** …………………………

Sifat benda yang mempengaruhi percepatan disebut sebagai massa lembam atau singkat sebagai massa. Maka kita perlu selidiki hubungan antara besar gaya, besar percepatan dan besar massa. Jika dua benda diberi gaya yang sama besar, maka dari pengalaman sehari-hari kita tahu bahwa benda dengan massa yang lebih besar mengalami percepatan yang lebih kecil. Jika gaya lebih besar, maka kita tahu, kecepatan berubah lebih jauh, berarti percepatan yang dialami lebih besar.

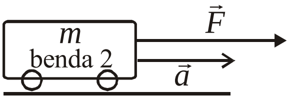
Apakah semua hubungan tersebut merupakan hubungan linear, kuadratis, akar atau yang lain ?

Mengenai hubungan antara besar gaya F dan besar massa m kita melakukan satu eksperimen angan-angan sbb.:

- Satu benda dengan massa sebesar m ditarik dengan gaya sebesar F, maka benda mengalami percepatan sebesar a.



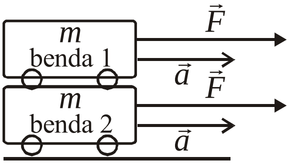
- Satu benda lain dengan massa yang sama besar, berarti sebesar m, ditarik dengan gaya yang sama besar, berarti sebesar F, maka benda lain ini mengalami percepatan berapa besar ? ………………… → Mesti mengalami percepatan yang sama besar, sebesar a.



- Langkah ketiga: dua benda digabungkan menjadi satu (misalnya ditaruh satu di atas yang lain). Supaya dua benda ini bersama mengalami percepatan sebesar a yang tadi, maka gaya yang bekerja harus berapa besar ? ………………

  Mengapa gaya harus menjadi dua kali lipat ? ………………

  → Karena gaya yang bekerja kepada satu benda berjumlah, maka dengan gaya yang dua kali lipat terdapat situasi yang sama dengan dua benda dipercepat sendiri-sendiri.



Gambar 6.1: *Dua benda dengan massa sama dipercepat oleh gaya yang sama, berarti total terdapat gaya dua kali lipat dan massa dua kali lipat.*

⇒ Hubungan antara gaya yang bekerja dan besar massa yang dipercepat linear:

$$F \sim m \Leftrightarrow F = \text{konstanta} \cdot m \tag{6.1}$$

Untuk mengetahui hubungan antara besar gaya dan besar percepatan perlu dilakukan eksperimen, bagaimana perubahan percepatan jika gaya berubah. Dari semua eksperimen yang dilakukan terdapat bahwa hubungan antara besar gaya dan besar percepatan juga linear. Berarti:

$$F \sim a \Leftrightarrow F = \text{konstanta} \cdot a \tag{6.2}$$

Jika (6.1) dan (6.2) digabungkan terdapat hukum Newton II:

$$\vec{F} = \text{konstanta} \cdot m \cdot \vec{a} \tag{6.3}$$

Dalam satuan internasional besar gaya didefinisi sehingga konstanta dalam (6.3) memiliki nilai 1. Baik gaya maupun percepatan adalah besaran vektor dan arah percepatan selalu sama dengan arah gaya yang menghasilkan percepatan tersebut. Maka dalam (6.3) gaya dan percepatan harus ditulis sebagai vektor. Maka dengan definisi gaya yang membuat konstanta bernilai 1, hukum Newton II menjadi:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \tag{6.4}$$

Hukum Newton I ternyata merupakan satu situasi khusus dari Hukum Newton II. Jika besar gaya dalam (6.4) nol, maka besar percepatan nol juga, berarti kecepatan konstan. Kecepatan konstan berarti benda bertahan dalam gerakannya.

6.3 Satuan Gaya dalam Satuan Internasional

Dalam satuan internasional satuan gaya didefinisi melalui hukum Newton II:

"Gaya sebesar satu Newton membuat benda dengan massa sebesar 1 kg dalam satu detik dipercepat dari diam memiliki kecepatan satu meter per detik."

Seperti telah disebut di atas, sebagai akibat dari definisi ini faktor konstan dalam hukum Newton memiliki nilai 1.

Maka dalam satuan Internasional satuan gaya terdapat dari hukum Newton II sebagai percepatan kali massa:

$$[F] = [m] \cdot [a] = \frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{det}^2} = \mathrm{N} \ \ \text{(Newton)} \tag{6.5}$$

6.4 Contoh Mengenai Hukum Newton

6.4.1 Benda Meluncur di Bidang Miring

Berapa besar percepatan dari suatu benda yang meluncur di atas bidang miring ? ....

Yang membuat benda dipercepat adalah gaya tangensial dari persamaan (4.3). Kalau hanya gaya itu bekerja kepada benda (kalau tidak ada gesekan / gesekan bisa diabaikan) maka gaya yang mempercepat benda sesuai dengan hukum Newton sebesar F_t:

$$\left.\begin{array}{l} F_t = F_g \cdot \sin\alpha = mg \cdot \sin\alpha \\ F = ma \end{array}\right\} \Rightarrow mg \cdot \sin\alpha = ma \Leftrightarrow a = g \cdot \sin\alpha \tag{6.6}$$

6.4.2 Benda Jatuh Bebas

Benda yang jatuh dengan bebas mengalami gaya dari gravitasi bumi. Gaya dari gravitasi bumi sebesar $F_{grav} = m \cdot g$. Maka benda yang dibiarkan bergerak dalam gaya gravitasi mengalami percepatan sesuai dengan hukum Newton II:

$$F = m \cdot a \Leftrightarrow mg = ma \Leftrightarrow a = g \qquad (6.7)$$

Jadi percepatan yang dialami benda jika jatuh dengan bebas sebesar konstanta *g*. Sebab itu *g* disebut sebagai percepatan gravitasi di bumi.

Besar dari percepatan gravitasi di bumi telah dibicarakan dalam pasal 4.5.2 "Gaya Gravitasi" mengenai hukum gravitasi. Nilai dari g kira-kira sebesar $9{,}8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{det}^2}$. Dalam perhitungan *g* sering dibulatkan dan dihitung sebesar $g = 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{det}^2}$. Tetapi dengan memperhatikan arti dari *g* seperti telah dijelaskan dalam pasal 4.5.2 "Gaya Gravitasi", maka jelas bahwa besar dari *g* bervariasi dan tergantung ketinggian di atas laut (dpl) dan posisi derajat lebar di bumi karena bentuk bumi tidak bulat. Untuk 0 dpl terdapat:

Derajat lebar	0^o	10^o	20^o	40^o	60^o	80^o	90^o
$g\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{det}^2}\right) =$	9,780	9,782	9,786	9,802	9,819	9,831	9,832

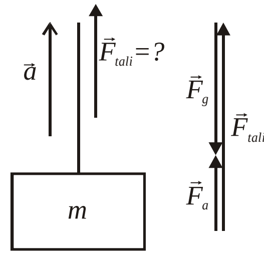
Tabel 6.1.: *Percepatan gravitasi di bumi pada derajat lebar yang berbeda.*

6.5 Gaya Percepatan bersama dengan Gaya yang lain

Berapa besar gaya dari tali terhadap benda dalam gambar 6.2 ketika benda dipercepat dengan percepatan a ke atas / ke bawah ? (Perhatikan gaya gravitasi dan gaya untuk mempercepat benda.)

Ketika suatu benda mengalami percepatan, maka pada benda tersebut terdapat resultan gaya atau total gaya yang berbeda dengan nol. Hubungan antara besar percepatan dan gaya total terhadap benda sesuai dengan Hukum Newton II. Jika beberapa sumber gaya bekerja pada satu benda, maka jumlah dari semua gaya (dijumlahkan sebagai vektor !) menghasilkan percepatan:
$\sum \vec{F}_i = \vec{F}_a = m \cdot \vec{a}$.

Satu contoh adalah suatu benda yang dipercepat ke atas atau ke bawah dalam gaya gravitasi. Misalnya suatu benda terikat dengan tali dan diangkat ke atas dengan percepatan *a* seperti diperlihatkan dalam gambar 6.2. Gaya yang dibutuhkan untuk mempercepat benda ini sebesar $\vec{F}_a = m_{benda} \cdot \vec{a}_{benda}$. Arah gaya $\vec{F}_a$ dan arah percepatan ke atas.



***Gambar 6.2:** Benda dipercepat ke atas. Sebelah kanan penjumlahan dari gaya yang bekerja. Persamaan (6.8)*

Dalam situasi ini terdapat dua sumber gaya terhadap benda, yaitu gaya gravitasi dan gaya tali terhadap benda. Arah gaya gravitasi ke bawah. Arah gaya tali terhadap benda ke atas. Jumlah dari dua vektor gaya tersebut harus sebesar $\vec{F}_a$:

$$\vec{F}_a = \vec{F}_{tali} + \vec{F}_g \tag{6.8}$$

Karena gaya gravitasi ke bawah dan gaya tali serta gaya $\vec{F}_a$ yang mempercepat benda ke arah atas, maka terdapat persamaan untuk besar gaya:

$$F_a = F_{tali} - F_g$$

$$\Leftrightarrow F_{tali} = F_a + F_g = m \cdot a + m \cdot g = m(a+g) \tag{6.9}$$

Jadi percepatan gravitasi dan percepatan benda terhadap permukaan bumi dijumlahkan merupakan percepatan total yang menghasilkan gaya pada benda: $F_{tali} = m(a+g)$.

Dengan percepatan ke bawah, perhitungan sama persis, hanya dengan percepatan *a* yang negatif. Kalau benda mengalami percepatan ke samping atau miring, maka arah $\vec{a}$ dan arah $\vec{F}_a$ ke samping atau miring. Persamaan (6.8) tetap sama, tetapi tidak bisa ditulis dengan sederhana sebagai persamaan skalar seperti dalam (6.9). Untuk besar gaya oleh tali terhadap benda $\vec{F}_{tali}$ terdapat persamaan vektor:

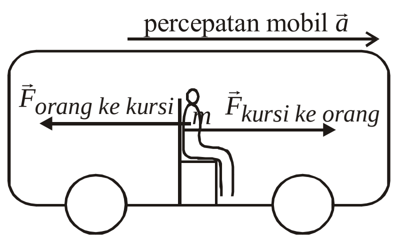
$$\vec{F}_a = \vec{F}_{tali} + \vec{F}_g \Leftrightarrow \vec{F}_{tali} = \vec{F}_a - \vec{F}_g = m(\vec{a} - \vec{g}) \tag{6.10}$$

Dalam persamaan (6.10) ini perlu diperhatikan bahwa percepatan gravitasi $\vec{g}$ ke arah bawah.

6.6 Gaya Semu dan Keseimbangan Gaya Dinamis

Keseimbangan gaya sama untuk benda yang diam dan untuk benda yang bergerak dengan kecepatan konstan. Kecepatan konstan dalam hal ini berarti baik besar maupun arah dari kecepatan konstan. Menurut Hukum Newton I gaya total yang bekerja terhadap benda dengan kecepatan konstan sebesar nol. Berarti benda dengan kecepatan konstan berada dalam keseimbangan gaya dengan jumlah gaya terhadap benda nol. Tetapi kalau sebuah benda mengalami percepatan, maka ada gaya yang mempercepat benda sesuai dengan Hukum Newton II dan keseimbangan gaya dalam arti statis yang sederhana tidak berlaku lagi.

Gaya F_a yang dipakai untuk mempercepat suatu benda (benda 1) adalah gaya yang bekerja terhadap benda 1 tersebut. Berarti ada benda lain (benda 2) yang memberi gaya terhadap benda 1 tersebut. Sesuai dengan hukum Newton III akan ada gaya oleh benda 1 terhadap benda 2 yang sama besar dan arahnya berlawanan. Gaya reaksi dari benda 1 terhadap benda 2 muncul karena penolakan dari benda 1 terhadap percepatan dan gaya ini disebut sebagai gaya semu. Sebagai contoh kita membahas situasi orang yang duduk dalam kendaraan yang dipercepat.



Gambar 6.3: *Jika suatu massa dipercepat, maka massa menolak percepatan dengan gaya semu.*

Seseorang duduk dalam kendaraan yang sedang dipercepat. Orang ikut dipercepat. Supaya orang ikut dipercepat, maka kursi harus mendorong orang ke arah percepatan. Berarti terdapat gaya oleh kursi terhadap orang sesuai dengan hukum Newton II: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Sesuai dengan hukum Newton III terdapat gaya oleh orang terhadap kursi yang berlawanan arah dan sama besar. Berarti orang memberikan gaya terhadap kursi, atau orang mendorong kursi ke belakang. Gaya ini bisa ditafsir sebagai gaya dari massa lembam orang yang menolak percepatan. Gaya ini disebut sebagai gaya semu. Tetapi istilah gaya semu bukan berarti bahwa gaya ini tidak nyata. Gaya ini memang nyata, bisa diukur dan dirasakan. (Bukti: Pada kecelakaan orang terlempar ke depan. Gaya semu dari orang kepada kaca ketika orang kena kaca depan membuat kaca pecah.)

Dengan menghitung gaya semu dari penolakan benda mengikuti percepatan $\left(-\vec{F}_a\right)$ sebagai salah satu gaya yang bekerja terhadap benda, semua benda, baik yang tidak dipercepat maupun yang dipercepat selalu berada dalam keseimbangan gaya. Jadi dengan menghitung gaya semu yang menolak percepatan $-\vec{F}_a$ sebagai salah satu gaya yang bekerja terhadap benda, maka jumlah gaya terhadap setiap benda selalu nol $\left(\sum \vec{F}_i = 0\right)$.

6.7 Pertanyaan Ulang

→ Mengapa kecepatan benda jatuh tidak tergantung dari massa benda ? Apakah memang benar-benar tidak tergantung dari massa benda ?

→ Mengapa orang dalam mobil terlempar ke depan ketika mobil direm dengan keras ?

→ Mengapa berat benda terasa bertambah ketika berada dalam lift yang sedang berangkat ke arah atas ?

→ Mengapa berat benda terasa berkurang ketika berada dalam lift yang sedang berangkat ke arah bawah ?

6.8 Contoh II Mengenai Hukum Newton

Makna dari hukum-hukum Newton terasa dalam berlalu lintas.

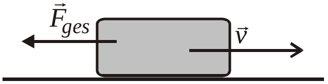
Misalnya: Sebuah mobil dipercepat dari diam ke kecepatan $\boldsymbol{v = 79{,}2\,\frac{km}{jam}}$ dalam waktu $\boldsymbol{t = 10\ det}$. Massa mobil sebesar $\boldsymbol{m_{mobil} = 1000\ kg}$. Massa dari penumpang A sebesar $\boldsymbol{m_{org} = 50\ kg}$. Berapa besar gaya kepada mobil dan kepada orang ? Gaya tersebut bekerja dari mana ke mana ? Bagaimana ketika mobil mengerem dari kecepatan tadi menjadi berhenti dalam waktu $\boldsymbol{t = 2{,}5\ det}$? Bagaimana kalau percepatan mobil lebih besar ketika ada kecelakaan ?

7 Gesekan

Dalam pasal ini kita membicarakan gaya gesekan antara dua benda padat yang bersinggungan. Gaya gesekan antara benda padat dan cairan atau gaya gesekan dari benda padat yang bergerak dalam cairan atau dalam gas berbeda. Juga gaya gesekan dari kendaraan yang memiliki roda berbeda dengan hal yang dibicarakan dalam pasal ini.

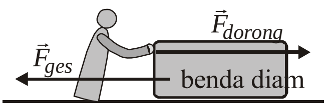
Jika dua benda bersinggungan, gerakan satu benda terhadap yang lain terhambat oleh gaya gesekan. Gaya gesekan perlu dibedakan antara gaya gesekan statis dan gaya gesekan dinamis atau gaya gesekan kinetik.

Kalau satu benda sudah bergerak terhadap benda yang lain, terdapat gaya gesekan dinamis atau gaya gesekan kinetik. Gaya gesekan dinamis berlawanan arah dengan arah gerakan benda. Dalam gambar 7.1 benda bergerak di atas lantai. Gaya gesekan melawan gerakan benda.



Gambar 7.1: *Gaya gesekan dinamis melawan arah gerakan.*

Kalau dua benda tidak bergerak satu terhadap yang lain, tetapi terdapat gaya yang mendorong satu benda untuk bergerak terhadap yang lain, terdapat gaya gesekan statis. Gaya gesekan statis melawan gaya yang bekerja kepada benda dan menghalangi gerakan benda. Dalam gambar 7.2 benda didorong oleh seseorang, tetapi benda belum bergerak. Gaya gesekan melawan gaya dorong. Gaya gesekan statis sama besar dengan gaya yang bekerja pada benda untuk menggerakkan benda. Arah dari gaya gesekan berlawanan dengan arah gaya dorong. Prinsip ini sesuai dengan hukum Newton III mengenai aksi dan reaksi. Misalnya orang mendorong benda dengan gaya $\vec{F}_{dorong}$, maka benda melawan dengan gaya $\vec{F}_{ges}$. Kalau gaya yang mendorong benda melebihi batas gaya gesekan statis maksimal, $\vec{F}_{ges\ statis\ maks}$, maka benda akan mulai bergerak.



Gambar 7.2: *Gaya gesekan statis melawan gaya yang mendorong benda untuk bergerak ketika benda masih diam.*

Besar dari gaya gesekan dinamis dan gaya gesekan statis maksimal tergantung dari sifat dua permukaan yang saling bersinggungan, tetapi tidak tergantung dari luas persinggungan. Gaya gesekan F_{ges} sebanding dengan gaya normal F_N (gaya impit) yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan yang bersinggungan, dan biasanya tidak tergantung dari kecepatan satu benda terhadap benda yang lain. Terdapat rumus sbb.:

$$F_{ges} = \mu \cdot F_N \tag{7.1}$$

Konstanta μ dalam (7.1) adalah koefisien gesekan yang tergantung sifat dari dua permukaan yang saling menyinggung. Gaya gesekan statis maksimal lebih besar daripada gaya gesekan kinetik. Oleh sebab itu terdapat dua koefisien gesekan, koefisien gesekan statis μ_s dan koefisien gesekan kinetik μ_k. Maka persamaan (7.1) sebenarnya perlu ditulis terpisah untuk besar gaya gesekan dinamis (gaya gesekan kinetik) dan untuk besar gaya gesekan statis maksimal:

$$F_{ges\ dinamis} = \mu_k \cdot F_{\mathrm{N}} \tag{7.2}$$

$$F_{ges\ statis\ maks} = \mu_s \cdot F_{\mathrm{N}} \tag{7.3}$$

Jadi besar gaya gesekan untuk benda bergerak selalu sebesar gaya gesekan dinamis, sedangkan gaya gesekan untuk benda yang diam selalu lebih kecil atau sama besar dengan gaya gesekan statis maksimal.

Pertanyaan Ulang

→ Mengapa kecepatan benda jatuh tergantung dari massa benda ?

8 Energi dan Potensial

8.1 Usaha *W*

8.1.1 Definisi

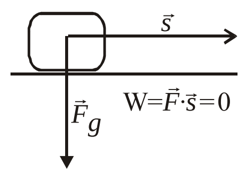
Beberapa pertanyaan mengenai arti dari usaha secara fisika:

→ Satu beban ditarik ke atas dengan konstruksi katrol seperti di sebelah kiri dan di sebelah kanan dalam gambar 4.4. Bandingkan panjang tali yang harus ditarik dan besar gaya pada masing-masing konstruksi. ***Apakah tenaga / usaha yang dibutuhkan untuk mengangkat beban, berbeda dalam dua konstruksi ini ?*** …………………

Bagaimana usaha bisa didefinisikan untuk memberikan informasi yang tepat ? …………………………

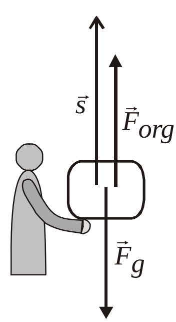
→ ***Berapa besar usaha untuk meggerakkan suatu benda tanpa gesekan ke arah mendatar ?*** …………………

Perhatikan hukum Newton I: Jika benda telah bergerak, maka benda tetap dalam gerakannya.

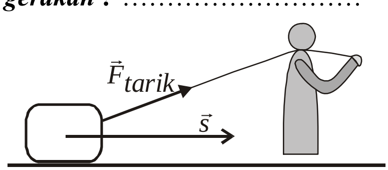


→ ***Berapa besar usaha untuk mengangkat suatu benda ke atas ?*** ………………………

Apa yang membedakan situasi ini dengan situasi di atas ketika benda bergerak ke arah mendatar ? ………………………



→ ***Bagaimana jika arah gaya miring dengan arah gerakan ?*** ………………………



Usaha didefinisikan sebagai perkalian antara jarak tempuh dan gaya yang bekerja ke arah gerakan pada jarak tersebut. Dalam definisi ini perlu diperhatikan baik-baik bahwa hanya bagian (komponen) gaya ke arah gerakan yang dihitung. Menghitung hanya bagian gaya ke arah gerakan sama dengan menghitung seluruh gaya dan hanya bagian gerakan yang searah dengan gaya. Usaha disingkat dengan huruf *W* besar dari bahasa Inggris "*Work*". Berarti terdapat definisi usaha *W* dalam mekanika sbb.:

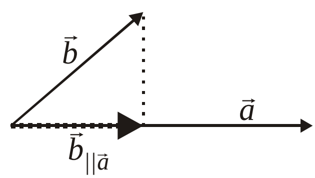
$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} \tag{8.1}$$

Dalam (8.1) perkalian antara gaya $\vec{F}$ dan jarak tempuh atau vektor gerakan $\vec{s}$ adalah perkalian skalar.

Perkalian skalar antara dua vektor $\vec{a}$ dan $\vec{b}$ terdefinisi sbb.:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot \left|\vec{b}\right| \cdot \cos\left(\vec{a}, \vec{b}\right) \tag{8.2}$$

Dari (8.2) terdapat hasil dari perkalian skalar antara dua vektor sebagai besaran skalar. Di mana besaran skalar tersebut merupakan perkalian antara panjang vektor $\vec{a}$ dan panjang dari komponen vektor $\vec{b}$ ke arah $\vec{a}$, berikut disebut sebagai $\vec{b}_{\|\vec{a}}$. Vektor $\vec{b}_{\|\vec{a}}$ sering disebut sebagai proyeksi dari vektor $\vec{b}$ ke vektor $\vec{a}$. Perhatikan gambar 8.1. Komponen dari $\vec{b}$ ke arah $\vec{a}$ mempunyai panjang sebesar:



Gambar 8.1: *Perkalian skalar* $\vec{a} \cdot \vec{b}$.

$$\left|\vec{b}_{\|\vec{a}}\right| = \left|\vec{b}\right| \cdot \cos\left(\vec{a}, \vec{b}\right) \tag{8.3}$$

Maka panjang vektor $\vec{a}$ dikalikan dengan panjang dari komponen vektor $\vec{b}$ ke arah $\vec{a}$ $\left(\vec{b}_{\|\vec{a}}\right)$ sebesar perkalian skalar antara $\vec{a}$ dan $\vec{b}$ dalam (8.2).

Dalam semua penjelasan di atas dua vektor dalam perkalian skalar bisa dibalikkan, berarti perkalian skalar antara $\vec{a}$ dan $\vec{b}$ bisa juga ditafsir sebagai perkalian panjang vektor $\vec{b}$ kali panjang dari komponen $\vec{a}$ ke arah $\vec{b}$.

Cara menghitung perkalian skalar dalam koordinat kartesius bisa dilakukan dengan mudah sbb.:

Dalam perkalian skalar antara dua vektor $\vec{a}$ dan $\vec{b}$ besar dari bagian yang searah dikalikan. Hal ini didapatkan dengan mengalikan bagian masing-masing vektor ke arah sumbu *x*, berarti a_x dan b_x, lalu dijumlahkan dengan perkalian antara bagian masing-masing vektor ke arah sumbu *y*, a_y dan b_y. Berarti terdapat:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix} = a_x \cdot b_x + a_y \cdot b_y \tag{8.4}$$

Dari definisi perkalian skalar ini dilihat bahwa perkalian skalar $\vec{F} \cdot \vec{s}$ dalam (8.1) secara otomatis menghitung bagian gaya yang searah dengan arah gerakan dikalikan dengan jarak gerakan atau menghitung bagian gerakan yang searah dengan gaya yang bekerja.

Dari (8.2) dan (8.4) langsung kelihatan bahwa perkalian skalar komutatif: $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a}$.

Jika besar gaya, arah gaya dan mungkin juga arah gerakan dalam satu jalur berubah-ubah, maka usaha harus dihitung pada setiap bagian jalur $\mathrm{d}\vec{s}$ yang kecil menghasilkan bagian usaha $\mathrm{d}W = \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{s}$ yang kecil. Lalu bagian-bagian usaha dijumlahkan untuk mendapatkan usaha total dalam jalur dari posisi ***a*** ke posisi ***b***. Penjumlahan dari bagian kecil dW secara matematis merupakan integral sehingga terdapat persamaan untuk usaha dari ***a*** ke ***b*** sebesar:

$$W_{\boldsymbol{a} \to \boldsymbol{b}} = \int_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{b}} \mathrm{d}W = \int_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{b}} \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{s} \tag{8.5}$$

8.1.2 Arah Usaha

Usaha merupakan besaran skalar, tetapi yang dibicarakan dalam pasal ini, usaha dikerjakan dari benda mana ke benda mana.

Jika suatu benda diangkat, berarti orang yang mengangkat benda memberikan gaya ke atas kepada benda ini dan arah gerakan ke atas juga. Berarti arah gaya dari orang kepada benda dan arah gerakan sama. Dalam situasi ini usaha yang dihitung dengan (8.1) memiliki nilai positif, berarti usaha yang dihitung menunjukkan usaha yang diberikan dari orang kepada benda.

Dalam situasi sama terdapat gaya dari benda kepada orang ke bawah. Benda bergerak ke atas, berarti arah gerakan berlawanan dengan arah gaya. Usaha yang dihitung dengan (8.1) negatif. Nilai negatif ini menunjukkan usaha dari benda kepada orang negatif, berarti benda menerima usaha atau orang yang memberikan usaha kepada benda.

Jadi untuk menentukan, usaha diberikan dari mana ke mana, arah gaya harus diperhatikan. Untuk menentukan usaha dari benda 1 kepada benda 2, maka yang dihitung adalah gaya dari benda 1 kepada benda 2. Vektor gaya ini dikalikan dengan vektor gerakan.

8.1.3 Satuan Usaha

Satuan dari usaha terdapat dari definisinya sebagai perkalian antara gaya dan jarak:

$$[W]=[F]\cdot[s]=\text{Nm}=\text{J}\ \ (\text{Joule}) \tag{8.6}$$

Berarti satuan asli dari usaha adalah Nm atau Newton – meter, disingkat sebagai Joule yang disingkat dengan huruf J besar.

8.1.4 Contoh: Takal

Bandingkanlah usaha untuk mengangkat beban memakai takal dengan usaha mengangkat beban secara langsung. …………………

8.1.5 Contoh: Benda Dinaikkan pada Bidang Miring

Bandingkan usaha antara menaikkan suatu benda secara langsung tegak lurus ke atas setinggi h dengan usaha menaikkan benda melalui bidang miring, tetapi dengan ketinggian akhir h yang sama besar. ……………………

8.1.6 Usaha Mengangkat Massa dalam Gaya Gravitasi Bumi

→ ***Berapa besar usaha W untuk mengangkat suatu benda dengan massa m = 5 kg setinggi h = 2 m ?*** …………………

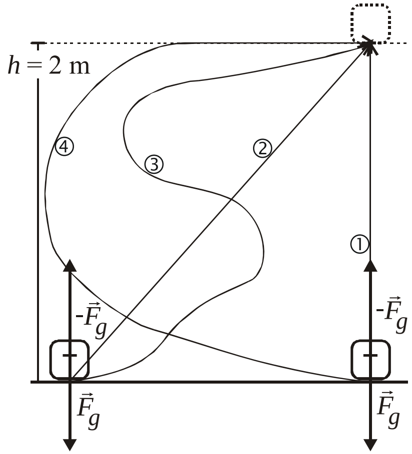
→ ***Apakah besar usaha tergantung, benda diangkat lurus ke atas atau diangkat melalui bidang miring atau melalui jalur yang lain ? / Berapa besar usaha pada jalur ①, ②, ③, ④ dalam gambar 8.2 ?*** ……………………

Dari definisi usaha terdapat bahwa hanya gaya ke arah gerakan atau gerakan ke arah gaya yang dihitung. Gaya yang dikerjakan kepada benda ini terdapat dari gaya ke atas yang melawan gaya gravitasi dan sebab itu gerakan yang dihitung hanya bagian gerakan ke arah atas. Komponen gerakan ke arah mendatar tidak menambahkan bagian pada usaha. Komponen gerakan ke arah atas sama besar pada semua jalur, berarti besar usaha sama besar pada semua jalur.

→ Untuk mengangkat benda dalam medan gravitasi[1] usaha hanya tergantung dari beda tinggi yang dilewati, tidak tergantung pada jalur gerakan. Bisa dikatakan: besar usaha hanya tergantung dari posisi awal dan posisi akhir, tidak tergantung dari jalur gerakan. Jika suatu medan gaya memiliki sifat ini, maka medan gaya disebut sebagai **medan potensial**.

→ Maka besar usaha untuk mengangkat suatu benda dalam gaya gravitasi bisa dihitung dari beda tinggi Δh yang dilewati dan dari massa benda:

$$W_{angkat} = \int \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = mg \cdot \Delta h \qquad (8.7)$$



Gambar 8.2: *Benda diangkat dalam medan gravitasi bumi melalui jalur yang berbeda-beda.*

8.2 Energi *E*

8.2.1 Definisi

Jika suatu benda telah diberikan usaha, maka usaha itu tidak hilang, tetapi dimiliki oleh benda tersebut. Misalnya dua benda yang berhubungan dengan tali melalui sebuah katrol seperti dalam gambar 8.3. Benda 1 diangkat oleh benda 2, berarti benda 2 diberikan usaha oleh benda 1. Benda 2 naik ke posisi yang lebih tinggi, benda 1 turun ke posisi yang lebih rendah. Setelah benda 2 diangkat, maka benda 2 mempunyai kemampuan untuk mengerjakan usaha kepada benda 1. Dalam situasi ini dikatakan benda 2 memiliki energi. ***Energi adalah kemampuan untuk mengerjakan usaha***. Ketika benda 2 turun, maka energi dari benda 2 dipakai untuk mengangkat benda 1, berarti energi dari benda 2 dipakai untuk mengerjakan usaha kepada benda 1. Energi dari benda 2 semakin berkurang sampai hilang ketika sudah di bawah, tetapi energi dari benda 1 bertambah besar. Total energi tetap sama, energi hanya dipindahkan dari satu benda kepada benda yang lain.

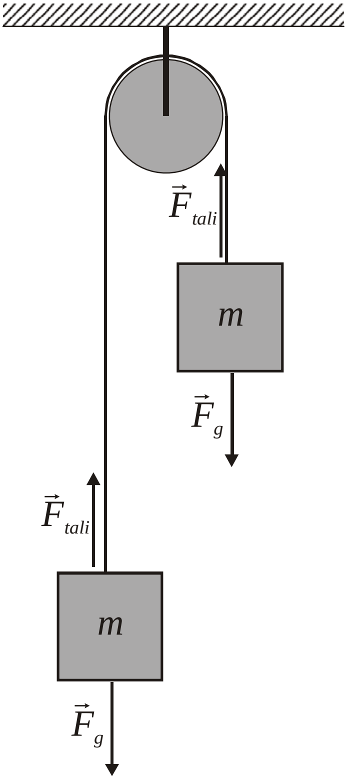
[1] Suatu medan terdapat jika suatu besaran terdapat pada setiap tempat dalam ruangan. Misalnya medan gaya gravitasi: Pada setiap tempat dalam ruangan terdapat gaya tertentu kepada suatu benda. Keseluruhan dari semua vektor gaya disebut sebagai medan gaya gravitasi atau singkat sebagai medan gravitasi / medan gaya.

Bahwa energi total dalam suatu sistem tertutup tidak bisa berubah merupakan suatu hukum alam yang disebut sebagai ***azas kekekalan energi***:

Jumlah energi dalam suatu sistem tertutup konstan.

Dalam hal ini suatu sistem tertutup adalah suatu sistem yang mana tidak ada energi masuk dari luar dan juga tidak ada energi yang hilang ke luar.

Jika benda dengan massa m diangkat dalam medan gaya gravitasi setinggi Δh, maka benda diberi usaha sebesar $W_{angkat} = mg \cdot \Delta h$, berarti energi yang dimiliki oleh benda akibat posisi yang setinggi h di atas posisi dasar sebesar $E_{pot} = mgh$. ***Energi yang dimiliki karena posisi tertentu disebut sebagai energi potensial.*** Besar dari energi potensial memang tergantung dari tempat asli atau posisi standar yang dipilih. Berarti besar energi selalu relatif terhadap keadaan asli. Yang mempunyai makna atau kepentingan dalam fisika selalu bukan sekedar nilai energi, tetapi perbedaan energi antara dua situasi yang bisa diperoleh.



Gambar 8.3: *Dua massa yang sama besar digantung pada katrol.*

→ ***Mengapa tidak praktis untuk memilih posisi dasar dalam menghitung energi potensial suatu benda, pada tempat 20 m di bawah tanah ?*** ………………
(Bagaimana cara memanfaatkan energi potensial $E_{pot} = mgh$ yang dimiliki benda pada posisi permukaan tanah ?)

8.2.2 Energi / Usaha untuk Mempercepat Massa

Jika suatu benda dipercepat, pasti ada gaya yang membuat benda dipercepat. Selama benda dipercepat, benda sudah bergerak ke arah gaya tersebut. Berarti ketika benda dipercepat ada usaha yang dikerjakan kepada benda. Besar usaha bisa dihitung dari gaya yang dipakai dan jarak tempuh selama percepatan. Supaya perhitungan lebih sederhana kita menghitung benda dengan massa m dipercepat dengan percepatan konstan sebesar a dari keadaan diam (v = 0) sampai mempunyai kecepatan sebesar v. Gaya kepada benda terdapat dari hukum Newton II sebesar $F = ma$, kecepatan benda setelah waktu *t* sebesar $v = at \Leftrightarrow a = \frac{v}{t}$ dengan jarak tempuh selama waktu *t* sebesar $s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}vt$. Maka terdapat usaha *W* untuk percepatan benda sebesar:

$$W = F \cdot s = m \cdot \underbrace{a}_{a=\frac{v}{t}} \cdot \underbrace{s}_{s=\frac{1}{2}vt} = m \cdot \frac{v}{t} \cdot \tfrac{1}{2}vt = \tfrac{1}{2}mv^2 \tag{8.8}$$

Jadi usaha untuk mempercepat suatu benda hanya tergantung dari kecepatan akhir *v* dan massa *m* dari benda. Ketika benda diperlambat, benda bisa mengerjakan usaha yang sama besar kepada benda lain. Jadi benda yang bergerak memiliki energi sebesar usaha yang dipakai untuk mempercepat benda tersebut. Energi yang dimiliki benda karena gerakannya (karena kecepatan yang dimilikinya) disebut sebagai **energi kinetik E_{kin}**. Energi kinetik dari benda dengan massa *m* dan kecepatan *v* sebesar:

$$E_{kin} = \tfrac{1}{2}mv^2 \tag{8.9}$$

8.2.3 Energi Pegas

Jika sebuah pegas ditekan dari posisi asli yang diberi skala jarak 0 sampai sejauh jarak *s*, maka ada gaya yang dibutuhkan untuk menekan pegas. Besar gaya berubah selama panjang pegas berubah sesuai dengan hukum Hook untuk pegas dengan konstanta Hook sebesar *k*: $F = ks$. Arah gaya dan arah gerakan sama sehingga besar usaha yang diberikan kepada pegas menjadi sebesar:

$$W = \int_0^s F \,\mathrm{d}s' = \int_0^s ks' \,\mathrm{d}s' = \tfrac{1}{2}ks^2 \tag{8.10}$$

Jika pegas dilepaskan, maka pegas bisa mengerjakan usaha sebesar usaha yang sebelumnya diberikan kepada pegas. Berarti pegas yang telah ditekan (ditarik) sejauh jarak *s* dari keadaan aslinya memiliki energi pegas sebesar:

$$E_{pegas} = \tfrac{1}{2}ks^2 \tag{8.11}$$

Karena energi ini hanya tergantung dari posisi / jarak pegas ditekan, maka energi ini juga merupakan energi potensial seperti energi yang dimiliki benda jika diangkat dalam gaya gravitasi.

8.3 Potensial φ

Jika suatu benda diangkat dari suatu posisi referensi kepada posisi tertentu, maka benda memiliki energi potensial. Besar dari energi potensial tergantung hanya dari massa benda dan tempatnya saja, tidak tergantung dari jalur gerak. Sebab itu energi benda dalam gaya gravitasi disebut sebagai energi potensial. Potensial itu sendiri didefinisi sebagai sifat dari tempat sbb.: Jika benda pada suatu posisi $\vec{r}$ memiliki energi sebesar $E_{\vec{r}}$, maka dikatakan tempat $\vec{r}$ itu sendiri memiliki potensial φ sebesar $\varphi = E_{\vec{r}}$. Jadi Potensial adalah besar energi yang dimiliki benda ***jika / ketika*** benda berada pada tempat tersebut. Karena setiap tempat pasti memiliki nilai potensial tertentu (terhadap satu benda dan satu tempat referensi tertentu), maka dikatakan dalam ruang terdapat satu medan potensial. Antara medan potensial dan medan gaya ada hubungan dekat: Medan potensial merupakan integral dari medan gaya $\left(\varphi = \int \vec{F}\,\mathrm{d}\vec{s}\right)$ dan gaya terdapat sebagai turunan dari medan potensial:

$$\vec{F} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\vec{s}}\varphi = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \frac{\partial\varphi}{\partial y}, \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \qquad (8.12)$$

(Cara menulis turunan di tengah (8.12) secara matematis kurang tepat, tetapi diharapkan cara menulis ini menolong untuk mengerti maknanya.)

8.4 Keseimbangan

Mengapa suatu bola besi yang berada di atas lantai atau meja yang tidak mendatar selalu bergerak menuju ke posisi yang paling rendah ?

....

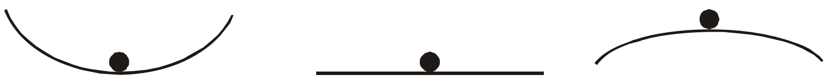
Dari definisi potensial dan dari (8.12) gaya dalam medan gravitasi dilihat sebagai turunan dari potensial terhadap tempat. Ini berarti, jika potensial untuk suatu benda lebih rendah di satu tempat daripada di sebelahnya, maka terdapat gaya dari tempat dengan potensial yang lebih tinggi kepada tempat dengan potensial yang lebih rendah. Gaya itu akan membuat benda bergerak dari tempat dengan potensial tinggi ke tempat dengan potensial rendah. Dalam medan gaya gravitasi tinggi potensial sebanding dengan tinggi tempat. Maka dalam medan gaya gravitasi, gambar mengenai tinggi tempat dan grafik mengenai tinggi potensial bisa dijadikan satu. Sebagai contoh kita memperhatikan suatu bola besi yang bisa berguling tanpa gesekan di lantai.

Jika ***lantai miring***, bola besi selalu akan bergerak ke arah yang mana lantai lebih rendah, karena ada gaya yang mendorong ke arah potensial rendah. Jika ada ***tempat yang paling rendah***, akhirnya bola akan berdiam di tempat yang paling rendah itu. Di situ potensial (energi yang dimiliki bola ketika berada di situ) paling rendah.

Jika ***lantai mendatar***, maka di mana saja tinggi bola sama sehingga energi bola sama besar di setiap tempat. Dengan kata lain: pada lantai mendatar potensial untuk bola sama besar pada setiap tempat. Bola tidak mengalami gaya untuk bergerak ke mana-mana.

Dari sini satu prinsip fisika bisa dilihat: ***Setiap benda ataupun setiap sistem fisik akan selalu masuk ke dalam keadaan dengan energi yang paling rendah***, berarti posisi yang akan diambil dalam medan potensial adalah posisi dengan potensial yang paling rendah.

Dari prinsip ini terdapat tiga jenis keseimbangan yang kita selidiki dengan contoh bola di atas suatu alas.



Gambar 8.4: *Tiga jenis keseimbangan: sebelah kiri keseimbangan stabil; di tengah keseimbangan netral; di sebelah kanan keseimbangan tak stabil.*

- → Situasi pertama ketika alas melengkung ke atas seperti sebelah kiri dalam gambar 8.4. Bola dalam keadaan seimbang ketika bola berada di posisi paling bawah. Berada dalam keadaan seimbang berarti tidak ada gaya yang membuat bola bergerak, dengan kata lain: jumlah gaya kepada bola nol. Jika bola digeser dari keadaan seimbang, berarti didorong sedikit ke samping dari posisi diam, lalu dilepaskan, maka bola akan segera kembali kepada posisi semula. Situasi ini disebut sebagai ***keseimbangan stabil***. Dalam keseimbangan stabil, suatu benda (sistem fisik) berada dalam minimum potensial dan jika digeser, benda (sistem fisik) digeser ke tempat potensial yang lebih tinggi. Maka jika digeser dari keadaan semula selalu akan ada gaya untuk mengembalikannya ke posisi awal.
- → Situasi kedua diperlihatkan di tengah dalam gambar 8.4. Bola berada di atas lantai datar. Bola juga seimbang di atas lantai datar, berarti tidak ada gaya kepada bola yang membuat bola bergerak. Tetapi, jika bola ini digeser dari posisi semula, lalu dibiarkan, maka bola tidak akan kembali ke posisi semula, tetapi akan tetap tinggal pada posisi baru yang mana bola dibiarkan. Situasi seperti ini disebut sebagai ***keseimbangan netral***. Dalam keseimbangan netral benda (sistem fisik) berada dalam situasi yang mana potensial tidak berubah jika posisi benda (keadaan sistem fisik) berubah sehingga setiap posisi bisa dimiliki oleh benda (sistem fisik). Dalam situasi ini grafik potensial terhadap tempat merupakan garis mendatar.

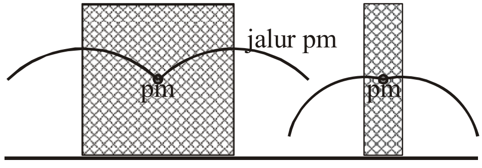
→ Situasi ketiga diperlihatkan di sebelah kanan dalam gambar 8.4. Bola berada pada ujung atas dari suatu bukit atau alas yang melengkung ke atas. Bola pas di puncak atas sehingga dasar bola mendatar dan bola dalam keadaan seimbang, berarti tidak ada gaya yang membuat bola bergerak. Tetapi, jika bola digeser sedikit dari posisi semula, maka akan ada gaya kepada bola yang membuat bola bergeser lebih jauh dari keadaan semula. Situasi ini disebut sebagai ***keseimbangan tak stabil***. Dalam keseimbangan tak stabil, benda (sistem fisik) berada pada suatu maksimum potensial, maka jika posisi digeser, benda (sistem fisik) langsung mempunyai kesempatan untuk masuk ke dalam posisi (keadaan) potensial yang lebih rendah lagi sehingga akan semakin jauh dari keadaan semula.

8.5 Kestabilan Terhadap Jatuh

Potensial dari suatu benda tegar ditentukan oleh tinggi dari pusat massa benda. Pusat massa adalah titik di mana seolah-olah seluruh massa benda berada di situ, berarti pusat massa adalah tempat rata-rata dari semua massa yang bergabung dalam suatu benda tegar. Definisi matematis untuk menghitung posisi pusat massa r_{pm} sbb.:

$$\vec{r}_{pm} = \frac{\sum_i m_i \cdot \vec{r}_i}{\sum_i m_i} \qquad (8.13)$$

Jika suatu benda berdiri di lantai dan kita mau tahu, berapa stabil posisi benda itu, berarti berapa sulit atau mudah benda dijatuhkan oleh angin, getaran lantai atau gaya lain yang bekerja pada benda itu, maka kita harus memperhatikan situasi keseimbangan dari benda itu. Sebagai contoh kita bandingkan tiga benda dalam gambar 8.5 dan gambar 8.6.

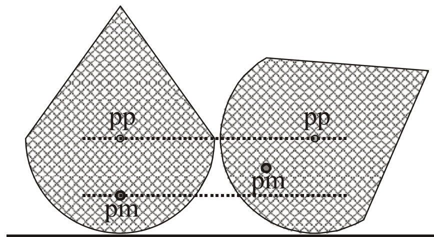


Gambar 8.5: *Dua benda dengan kestabilan terhadap jatuh yang berbeda.*

Benda pertama sebelah kiri dalam gambar 8.5 berbentuk balok dan lebar kira-kira sama besar dengan tingginya. Pusat massa di tengah benda. Jika benda ini mau digulingkan, maka benda diputarkan terhadap ujung bawahnya. Bentuk dari gerakan pusat massa digambarkan ke dalam gambar. Dilihat bahwa benda dalam keseimbangan stabil dan pusat massa harus diangkat cukup tinggi ke atas sampai benda akan jatuh.

Benda kedua di sebelah kanan dalam gambar 8.5 berbentuk balok juga, tetapi lebih sempit. Pusat massa juga di tengah. Tetapi jika benda ini digulingkan, pusat massa tidak perlu diangkat begitu tinggi, berarti untuk menggulingkan benda ini tidak perlu memberikan banyak usaha kepada benda. Maka benda ini akan lebih mudah jatuh daripada benda pertama.

Benda ketiga dalam gambar 8.6 mempunyai dasar berbentuk bola. Pusat massa lebih rendah daripada pusat bola dari dasar kakinya. Jika benda ini dimiringkan, pusat massa naik dari posisi aslinya, berarti keseimbangan benda ini stabil. Jika benda ini dimiringkan, lalu dibiarkan, benda ini akan langsung kembali ke posisi aslinya.



Gambar 8.6: *Benda dengan pusat massa (pm) di bawah pusat putaran (pp) memiliki keseimbangan stabil.*

8.6 Daya

Daya P didefinisi sebagai usaha yang bekerja per waktu:

$$P = \frac{W}{t} \tag{8.14}$$

Maka terdapat satuan untuk daya sebagai usaha per waktu:

$$[P] = \frac{[W]}{[t]} = \frac{\text{Nm}}{\text{det}} = \frac{\text{J}}{\text{det}} = \text{W}\,(\text{Watt}) \tag{8.15}$$

Satuan untuk daya yang biasa dipakai adalah Watt, disingkat dengan W, di mana satu Watt sebesar satu Joule per detik.

Dari satuan daya Watt terdapat satuan kWh. Arti dari kWh adalah sbb.:

k = kilo = 1 000, W = Watt = $\frac{\text{J}}{\text{det}}$, h = hour = jam, maka arti dari kWh sbb.:

$$1\,\text{kWh} = 1000\ \text{Watt}\cdot\text{jam} = 1000\frac{\text{J}}{\text{det}}\cdot 3\,600\,\text{det} = 3\,600\,000\,\text{J} = 3{,}6\,\text{MJ} \tag{8.16}$$

Jadi kWh bukan satuan daya, tetapi satuan usaha atau energi.

8.7 Pertanyaan Ulang

→ Mengapa rem mobil / motor menjadi panas ketika jalan menurun ?

9 Mekanika Fluida

9.1 Tiga Keadaan Zat

Zat terdapat dalam tiga bentuk yang berbeda, yaitu zat padat, cairan dan gas. ***Apa perbedaan antara tiga bentuk tersebut ?*** → ……………

→ ***Zat padat:*** Bentuk padat dan tidak berubah dengan mudah.

→ ***Cairan:*** bentuk tidak permanen, tetapi bentuk berubah dengan mudah dan bisa dipisahkan dengan mudah. Untuk menyimpan cairan perlu wadah yang tertutup di samping supaya cairan tidak mengalir ke mana-mana.

→ ***Gas:*** Bentuk lebih fleksibel lagi daripada cairan. Untuk menyimpan gas perlu wadah yang tertutup dari semua sisi.

Dalam pasal ini sifat cairan akan dibicarakan lebih rinci.

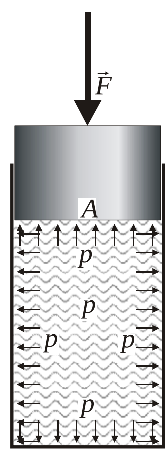
9.2 Tekanan

9.2.1 Sifat dan Definisi Tekanan

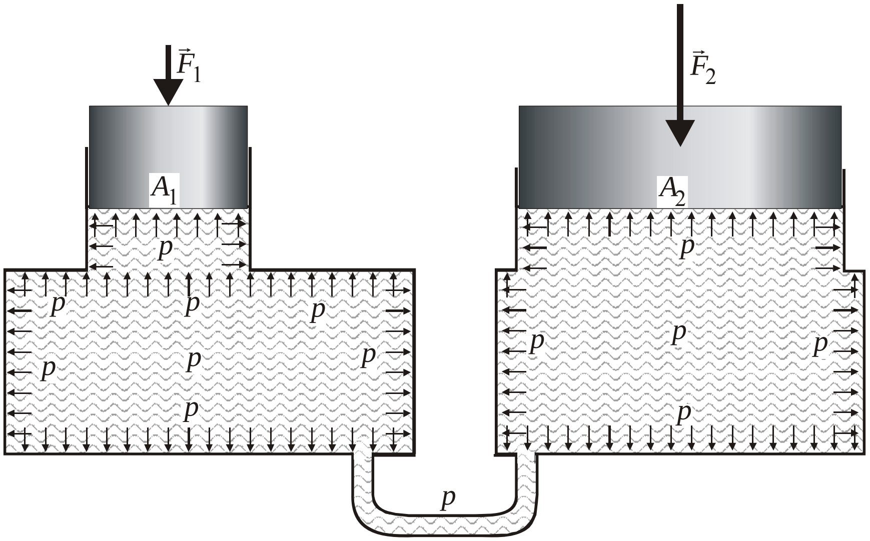
- ***Apa yang terjadi kalau cairan ditekan dari satu arah tertentu ?*** → ………

- ***Apa yang terjadi kalau cairan ditekan dari satu arah, tetapi cairan berada dalam wadah tertutup sehingga tidak bisa bergeser seperti dalam contoh gambar 9.1 ?*** → …………………

  Cairan mau bergeser ke semua arah. Karena cairan tidak bisa bergeser, maka timbul **tekanan** dalam cairan. Tekanan dalam cairan adalah gaya dorong dalam cairan ke semua arah. Gaya dorong atau tekanan ini bekerja baik antara bagian-bagian cairan maupun dari cairan kepada dinding wadah. Wadah dalam contoh gambar 9.1 tertutup di atas dengan silinder. Silinder memberikan gaya F kepada cairan ke bawah, sedangkan tekanan dalam cairan memberikan gaya kepada silinder ini ke arah atas. Gaya dari cairan kepada silinder merupakan gaya reaksi dari gaya F. Gaya antara cairan dan



Gambar 9.1: *Wadah tertutup diberi gaya dari satu arah.*



Gambar 9.2: *Dalam dua tabung yang terisi cairan dan yang berhubungan terdapat tekanan yang sama besar. Tekanan memberikan gaya kepada semua arah.*

silinder akan dibagi rata pada luas silinder sehingga besaran yang tersebar secara konstan dalam cairan adalah **tekanan *p*** yang merupakan gaya F per besar luas A dalam cairan:

$$p = \frac{F}{A} \tag{9.1}$$

Dari (9.1) terdapat satuan dari tekanan p:

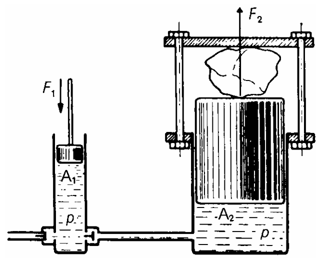
$$[p] = \left[\frac{F}{A}\right] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{Pa}\ \text{(Pascal)};\ 1\,\mathrm{bar} = \frac{10\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{cm}^2} = 10^5\ \mathrm{Pa} \tag{9.2}$$

Apa akan terjadi kalau dalam wadah ada satu lubang kecil ?
→ …………

Bagaimana tekanan dalam dua wadah tertutup yang tersambung dengan satu pipa atau selang kecil seperti dalam gambar 9.2 ? → ……………

Bagaimana hubungan antara besar gaya kepada dua silinder dalam gambar 9.2 ? Misalnya luas silinder sebelah kiri sebesar A_1 = 60 cm^2, luas silinder sebelah kanan sebesar A_2 = 300 cm^2 dan gaya kepada silinder sebelah kiri sebesar F_1 = 600 N. Berapa besar gaya F_2 kepada silinder sebelah kanan ? → ……………

Prinsip seperti ini dipakai dalam dongkrak hidraulis atau dalam alat penekan hidraulis seperti diperlihatkan dalam gambar 9.3.



Gambar 9.3: *Alat penekan hidraulis.*

9.2.2 Bentuk Permukaan Cairan

- ***Bagaimana bentuk permukaan cairan jika terdapat gaya tambahan selain gaya gravitasi, misalnya suatu tabung diputarkan sehingga terdapat gaya sentrifugal ?*** → ………………

9.2.3 Tekanan Statis dari Gravitasi

9.2.3.1 Prinsip Dasar

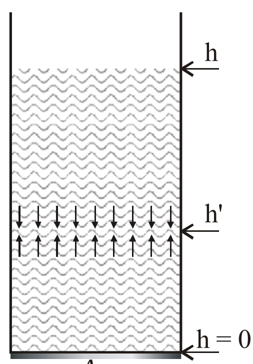
Di atas telah dibicarakan bahwa dalam cairan timbul tekanan ketika cairan diberikan gaya dari luar. Tetapi selain gaya dari luar selalu terdapat gaya gravitasi yang juga bekerja kepada cairan. Karena gaya gravitasi menarik cairan ke bawah, maka cairan yang lebih di bawah lagi akan mendapat gaya dari cairan di atasnya. Gaya ini menimbulkan tekanan yang akan kita sebutkan sebagai tekanan statis dari gaya gravitasi. Besar tekanan statis tersebut bisa dihitung dengan menghitung besar gaya per luas yang dihasilkan oleh gaya gravitasi. Dalam gambar 9.4 terdapat sebuah yang terisi cairan setinggi *h*. Wadah mempunyai luas dasar sebesar *A*. ***Berapa besar gaya gravitasi dan tekanan kepada dasar wadah ?***
→ ……………………

Gaya gravitasi F_g terdapat dari massa benda, dalam hal ini massa cairan mengalami gaya gravitasi sebesar

$$F_g = m_{cairan} \cdot g \ . \tag{9.3}$$

Besar massa cairan dalam wadah terdapat dari besar massa jenis dan volume cairan sebesar:

$$\begin{aligned} m_{cairan} &= \rho_{cairan} \cdot V_{cairan} \\ &= \rho_{cairan} \cdot A \cdot h \end{aligned} \tag{9.4}$$



Gambar 9.4: *Perhitungan tekanan hidrostatis dari gaya gravitasi kepada cairan.*

Tekanan cairan pada dasar wadah terdapat dari definisi tekanan dalam (9.1) sebesar gaya gravitasi kepada dasar wadah per luas dasar wadah. Maka dari (9.1), (9.3) dan (9.4) terdapat besar tekanan statis dari gravitasi:

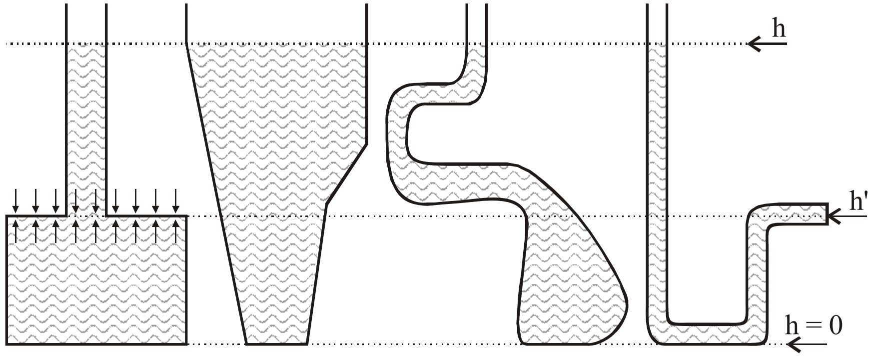
$$\begin{aligned} p_{grav} &= \frac{F_g}{A} = \frac{\rho_{cairan} \cdot A \cdot h \cdot g}{A} \\ &= \rho_{cairan} \cdot g \cdot h \end{aligned} \tag{9.5}$$

Dengan (9.5) terdapat tekanan statis dari gravitasi pada posisi ketinggian tertentu. Tinggi *h* dalam persamaan ini terdapat dari perhitungan berat cairan di atas posisi tersebut, berarti tinggi *h* adalah tinggi cairan di atas posisi yang mana tekanan dihitung. Tetapi, walaupun gaya gravitasi bekerja ke bawah, tekanan dalam cairan selalu merupakan gaya dorong ke segala arah. Berarti juga tekanan statis dari gravitasi bekerja ke segala arah. Jadi: ***Tekanan statis dari gaya gravitasi ini memberikan gaya ke arah mana saja ?*** → ……………

- ***Berapa besar tekanan pada tinggi h' dalam gambar 9.4 ?***
  → ………………

- ***Berapa besar tekanan dalam wadah dengan berbagai bentuk*** ? Misalnya wadah dengan bentuk seperti dalam gambar 9.5 ? Kalau empat wadah dalam gambar 9.5 terisi dengan cairan yang sama: ***Apakah tekanan pada dasar (h = 0) sama besar dalam setiap wadah ? Apakah tekanan pada posisi ketinggian h' sama besar dalam setiap wadah ?***
  → ……………………
  → Bandingkan gaya-gaya yang bekerja pada ketinggian h' dalam wadah sebelah kiri dalam gambar 9.5 dengan gaya-gaya yang ada pada ketinggian h' dalam wadah pada gambar 9.4: Pada tinggi h' terdapat tekanan sebesar $p_{grav} = \rho_{cairan} \cdot g \cdot \Delta(h - h')$. Tekanan ini memberikan gaya ke semua arah, berarti juga ke atas. Di sebelah kanan dan di sebelah kiri pada wadah dalam gambar 9.5 gaya dari tekanan bekerja kepada dinding wadah yang mendatar di atas cairan dan memberikan gaya ke atas. Dinding wadah tersebut memberikan gaya reaksi yang sama besar dan ke bawah. Dalam gambar 9.4 tidak ada dinding mendatar pada posisi yang sama, tetapi terdapat cairan di atasnya sehingga gaya dari dinding digantikan dengan gaya (gravitasi) dari cairan. Berarti situasi gaya dalam dua wadah ini sama persis. Maka besar tekanan pada dasar wadah maupun pada posisi ketinggian h' persis sama. Sebagai kesimpulan terdapat:
  → Tekanan hidrostatis dari gravitasi sama besar untuk segala bentuk bejana: $p = \rho g h$, di mana tinggi *h* dihitung dari ketinggian tekanan ditentukan sampai ketinggian permukaan cairan.

9.2.3.2 Bejana Berhubungan



Gambar 9.5: *Cairan dalam wadah dengan berbagai bentuk menghasilkan tekanan statis yang sama pada ketinggian yang sama.*

Dalam hidup sehari-hari sering terdapat situasi berikut: Dua bejana, yang terbuka di atas dan terhubung dengan selang atau pipa, terisi cairan. Selang atau pipa tersambung pada bagian bejana yang terisi cairan dan selang atau pipa sendiri juga penuh dengan cairan. Pertama kita anggap dua bejana terisi cairan yang sama. ***Apakah / mengapa tinggi cairan dalam dua bejana sama ?***
→ ………………

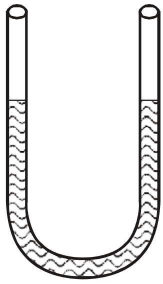
→ Tekanan pada satu posisi pipa sambungan sebesar $p_{grav} = \rho_{cairan} \cdot g \cdot h$ dengan *h* sebagai tinggi permukaan cairan di atas posisi tersebut. Dalam situasi seimbang, berarti ketika cairan diam dalam dua bejana, gaya dari sebelah kanan pasti sama besar dengan gaya dari sebelah kiri. Berarti tekanan dari dua sisi pipa pasti sama besar. Karena jenis cairan sama, berarti massa jenis ρ sama besar, maka tinggi *h* dalam dua bejana pasti sama besar.

Apakah tinggi cairan dalam bejana berhubungan tetap sama besar kalau cairan dalam dua bejana berbeda ? → ………………

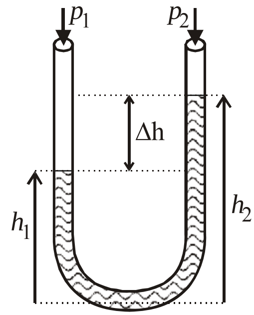
Sebutkan penerapan praktis dari Prinsip ini. → ……………

9.2.3.3 Manometer U

Satu contoh untuk bejana berhubungan adalah manometer U seperti diperlihatkan dalam gambar 9.6. Cairan dalam dua sisi manometer sama tinggi. Kalau dua sisi dari manometer U disambungkan dengan wadah atau alat yang memiliki tekanan yang berbeda, berarti dalam sati sisi manometer U terdapat tekanan sebesar p_1 dan dalam sisi manometer U yang lain terdapat tekanan sebesar p_2, maka tinggi cairan akan berbeda. Perbedaan tinggi cairan Δh bisa dihitung dengan memperhatikan bahwa tekanan dari sebelah kanan pada bagian bawah manometer sama besar dengan tekanan dari sebelah kiri. (Karena



Gambar 9.6: *Manometer U yang seimbang pada dua sisinya.*



Gambar 9.7: *Beda tinggi cairan dalam manometer U menunjukkan perbedaan tekanan antara dua sisinya.*

keseimbangan gaya.) Dalam hal ini tekanan pada bagian bawah manometer terdapat dari tekanan statis dari berat cairan ditambah tekanan tambahan pada sambungan manometer sebesar p_1 dan p_2. Jadi dari sebelah kanan terdapat tekanan sebesar:

$$p_{kanan} = p_2 + \rho g h_2 \tag{9.6}$$

Dari sebelah kiri terdapat tekanan sebesar:

$$p_{kiri} = p_1 + \rho g h_1 \tag{9.7}$$

Karena tekanan sebelah kiri sama besar dengan tekanan sebelah kanan, maka terdapat:

$$\begin{aligned} p_{kanan} = p_{kiri} &\Leftrightarrow p_2 + \rho g h_2 = p_1 + \rho g h_1 \\ &\Leftrightarrow \Delta p = p_1 - p_2 = \rho g \left(h_2 - h_1\right) \end{aligned} \tag{9.8}$$

Jadi manometer U bisa dipakai untuk mengukur perbedaan tekanan antara dua tempat.

Apakah persamaan (9.8) juga benar kalau cairan di sebelah kanan dan di sebelah kiri dalam manometer U berbeda ? → ………………

9.2.4 Perbedaan Antara Tekanan Statis dan Tekanan Dinamis

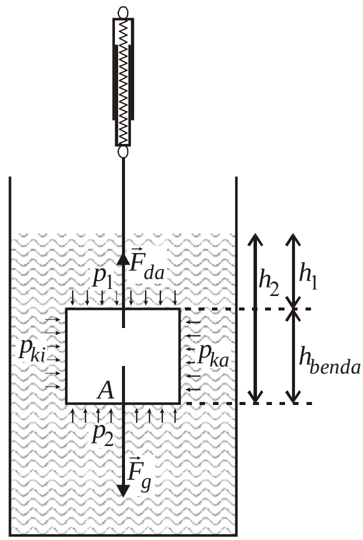
- ***Apa tekanan tetap sama jika kran air dibuka dan air mengalir ?***
  (→ Perhatikan aliran air pada kran lain, jika satu kran dibuka.)
  → Ketika air mengalir, maka tekanan turun. ***Mengapa ? → gesekan*** dalam aliran air.

→ Ketika kran barusan dibuka, air mengalir pelan dulu, lalu menjadi lebih cepat. Ketika satu kran ditutup dengan cepat, air di kran lain sebentar mengalir lebih kencang. ***Mengapa ? → Percepatan*** air.

9.2.5 Gaya Daya Apung

Perhatikan hasil dari Percobaan sbb: Sebuah benda digantungkan pada timbangan pegas / pengukur gaya, berat benda (gaya gravitasi terhadap benda) dibaca dari skala pengukur gaya. Kemudian benda dimasukkan ke dalam air selama tetap digantungkan pada pengukur gaya yang sama. ***Apakah berat benda yang ditunjukkan sama setelah benda masuk ke dalam air ? →*** …………… ***Mengapa ?***

Ternyata berat benda berubah ketika benda dimasukkan ke dalam cairan. Karena gaya gravitasi sebagai gaya tarik antara massa bumi dan massa benda tetap sama, kita bisa mengambil kesimpulan bahwa cairan memberikan gaya kepada benda ke arah atas. Gaya tersebut dari cairan kepada benda disebut sebagai ***"gaya daya apung"***. ***Dari mana terdapat gaya daya apung ? →*** ……………………



Gambar 9.8: *Gaya daya apung terdapat dari perbedaan tekanan di atas dan di bawah benda.*

Dari gambar 9.10 besar gaya daya apung bisa dipelajari. Benda yang dimasukkan ke dalam cairan mendapat gaya dari semua sisi dari tekanan dari berat cairan. Besar tekanan p kepada benda pada posisi sejauh h di bawah permukaan cairan terdapat dari tinggi cairan h di atas posisi yang mana tekanan ditentukan sebesar $p_{grav} = \rho_{cairan} \cdot g \cdot h$. Maka pada permukaan atas dari benda terdapat tekanan sebesar

$$p_1 = \rho g h_1 , \tag{9.9}$$

berarti terdapat gaya kepada benda sebesar

$$F_1 = A \cdot p_1 = A \cdot \rho g h_1 . \tag{9.10}$$

Pada permukaan bawah dari benda terdapat tekanan sebesar

$$p_2 = \rho g h_2 , \tag{9.11}$$

berarti terdapat gaya kepada benda sebesar

$$F_2 = A \cdot p_2 = A \cdot \rho g h_2 . \tag{9.12}$$

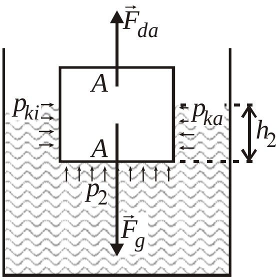
Arah gaya kepada permukaan atas ke bawah dan arah gaya kepada permukaan bawah ke atas sehingga terdapat gaya total ke atas sebesar gaya daya apung F_{gda}:

$$\begin{aligned} F_{gda} &= F_{total} = F_2 - F_1 = A \cdot \rho g h_2 - A \cdot \rho g h_1 = A \cdot \Delta h \cdot \rho g \\ &= V_{benda} \cdot \rho_{cairan} \cdot g \end{aligned} \tag{9.13}$$

Jadi gaya daya apung sebesar gaya gravitasi kepada cairan yang digeserkan atau sebesar berat cairan yang digeserkan.

Berapa besar gaya daya apung kalau hanya sebagian benda masuk ke dalam cairan ? (Seperti dalam gambar 9.9) → …………………

$$F_{gda} = A \cdot h_2 \cdot \rho g = V_{cairan\ yang\ digeser} \cdot \rho_{cairan} \cdot g$$



Gambar 9.9: *Gaya daya apung ketika sebagian benda masuk ke dalam cairan.*

9.2.6 Pertanyaan Ulang

- Tekanan merupakan gaya ke arah mana saja ? Mengapa ?
- Apa definisi dari tekanan ? Bagaimana terdapat tekanan dalam suatu cairan ?
- Jelaskanlah fungsi dari dongkrak hidraulis.
- Tekanan statis dari gaya gravitasi tergantung apa saja ?
- Gaya daya apung tergantung apa saja ?

9.3 Tegangan Permukaan dan Kapilaritas

9.3.1 Struktur Cairan dan Kohesi dan Adhesi

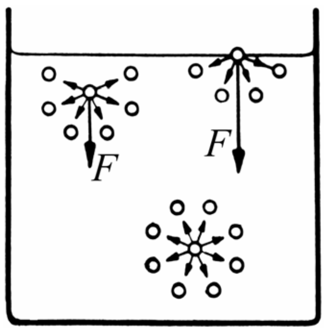
Cairan terdiri dari atom atau molekul seperti zat padat, tetapi ikatan antara partikel cairan jauh lebih lemah daripada ikatan antara partikel zat padat. Pada zat padat ikatan antara partikel dari satu benda menentukan posisi dari setiap partikel (atom atau molekul) dengan pasti dan satu partikel tidak bisa bergeser terhadap yang lain. Dalam cairan ikatan antara partikel kecil dan posisi dari satu partikel dengan partikel yang lain bisa berubah dengan mudah. Karena ini tekanan menyebar atau menghasilkan gaya ke semua arah. Tetapi walaupun gaya antara partikel cairan kecil tidak berarti bahwa tidak ada gaya sama sekali. Tetap terdapat interaksi / gaya antara partikel cairan sebagai gaya tarik-menarik antara partikel cairan. Gaya tarik-menarik antara partikel dari satu cairan disebut sebagai ***kohesi***. Gaya tersebut berasal dari gaya elektrostatik dan disebut sebagai gaya *van der Waals*.

Selain gaya kohesi antara partikel dari jenis yang sama terdapat juga gaya tarik-menarik antara partikel dari suatu cairan dengan partikel (molekul atau atom) dari jenis lain. Misalnya gaya antara partikel cairan dengan partikel zat padat pada dinding wadah atau gaya antara partikel cairan dengan gas (udara) yang terdapat di atas cairan. Gaya tarik antara partikel cairan dengan partikel zat lain disebut sebagai ***adhesi***.

Dalam pasal berikut akibat dari gaya kohesi dibicarakan dulu.

9.3.2 Energi Permukaan Jenis dan Tegangan Permukaan Jenis - Prinsip

Perhatikan gaya tarik-menarik antara molekul cairan (gambar 9.10): Sebuah molekul yang berada di tengah cairan mempunyai molekul tetangga di semua sisinya. Maka molekul tersebut mendapatkan gaya tarik (gaya kohesi) dari molekul tetangga kepada semua arah seperti diperlihatkan pada contoh bagian bawah dalam gambar 9.10. Maka total gaya kepada molekul di tengah cairan nol. Jika sebuah molekul berada pada posisi dekat dengan permukaan cairan, maka jumlah tetangga pada sisi molekul dekat permukaan lebih sedikit seperti diperlihatkan pada dua contoh di atas dalam gambar 9.10. Karena molekul tersebut mendapatkan gaya dari semua molekul tetangga, maka terdapat resultan gaya (gaya total) ke dalam cairan. Untuk memindahkan satu molekul dari dalam cairan ke permukaan cairan, molekul harus digeser melawan gaya total tersebut. Maka untuk memindahkan molekul dari dalam ke permukaan, terdapat usaha yang harus dikerjakan kepada molekul tersebut, berarti terdapat penambahan energi cairan ΔE.

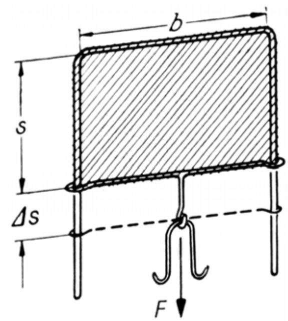


Gambar 9.10: *Gaya kepada molekul di dalam cairan dan dekat dengan permukaan.*

Kalau molekul dipindahkan dari dalam ke permukaan, maka luas permukaan bertambah. Berarti: Untuk menambahkan besar luas permukaan, maka ada usaha yang harus dikerjakan atau terdapat penambahan energi cairan ΔE. Besar penambahan energi cairan ΔE tersebut sebanding dengan besar penambahan luas ΔA. Penambahan energi cairan ΔE per penambahan luas ΔA merupakan sifat khas untuk suatu cairan tertentu dan disebut sebagai ***energi permukaan jenis σ*** dari cairan itu:

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta A} = \frac{\text{penambahan energi}}{\text{penambahan luas permukaan cairan}} \tag{9.14}$$

Jadi ada energi yang dibutuhkan untuk memperbesar permukaan cairan. Hal ini berarti bahwa dari cairan terdapat gaya kepada ujung permukaan yang bekerja untuk memperkecil luas permukaan. Gaya tersebut bekerja ke arah tegak lurus pada garis batas permukaan dan ke dalam bidang permukaan. Dalam gambar 9.11 satu percobaan untuk menunjukkan gaya tersebut diperlihatkan. Dalam suatu kerangka kawat terdapat satu kawat yang bisa bergeser dengan mudah. Di dalam kerangka diberikan satu lapisan cairan tipis (misalnya dari larutan sabun). Gaya yang menarik kawat fleksibel ke atas bisa diukur.



Gambar 9.11: *Percobaan untuk memperlihatkan gaya permukaan.*

Jika kawat bergeser ke bawah sejauh Δs, maka terdapat penambahan energi permukaan jenis sebesar:

$$\Delta E = \sigma \cdot 2 \cdot \Delta A = \sigma \cdot 2 \cdot b \cdot \Delta s$$

Faktor 2 dalam (9.15) terdapat karena suatu kulit cairan mempunyai dua permukaan. Usaha atau penambahan energi ΔE untuk menggeser kawat bisa dihitung dari besar gaya F dan jarak pergeseran Δs sebesar:

$$\Delta E = F \cdot \Delta s \tag{9.16}$$

Karena besar energi yang dipakai untuk menambahkan luas permukaan terdapat dari gaya untuk menggeser kawat, maka perubahan energi ΔE dalam (9.15) sama besar dengan ΔE dalam (9.16), maka terdapat:

$$\sigma \cdot 2 \cdot b \cdot \Delta s = F \cdot \Delta s \Leftrightarrow \sigma = \frac{F \cdot \Delta s}{2b \cdot \Delta s} = \frac{F}{2b} = \frac{F}{l} \tag{9.17}$$

Dalam (9.17) variabel l dalam ruas belakang adalah panjang permukaan yang menarik kawat fleksibel ke atas. Panjang l sebesar $2b$ karena lapisan cairan mempunyai permukaan di depan dan di belakang.

Dari (9.17) terdapat definisi untuk ***tegangan permukaan jenis σ***. Tegangan permukaan jenis σ adalah gaya yang bekerja per panjang l dari suatu garis permukaan. Gaya ini menarik ujung permukaan ke dalam. Besar tegangan permukaan jenis tergantung merupakan besaran khas untuk satu jenis cairan. Definisi dari ***tegangan permukaan jenis σ*** seperti terdapat dalam (9.17):

$$\sigma = \frac{F}{l} \tag{9.18}$$

Energi permukaan jenis dan tegangan permukaan jenis untuk satu cairan sama besar. Satuannya juga sama:

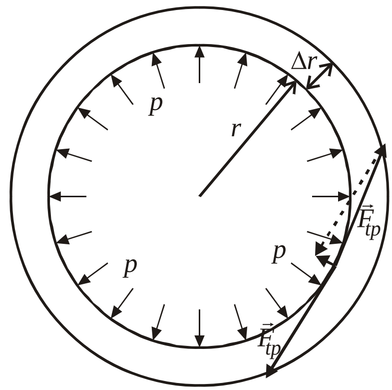
$$[\sigma] = \left[\frac{W}{A}\right] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^2} = \left[\frac{F}{l}\right] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}} \tag{9.19}$$

Besar tegangan permukaan turun kalau suhu naik. Kalau dalam cairan terdapat sedikit tambahan dari zat yang lain, tegangan permukaan bisa berubah jauh.

9.3.3 Tekanan Dalam Tetesan Cairan

Sebuah tetesan cairan mempunyai permukaan yang melengkung, maka gaya pada permukaan yang menarik permukaan untuk diperkecil mempunyai resultan ke dalam tetesan dan menghasilkan tekanan dalam tetesan. Untuk menentukan besar tekanan dalam tetesan kita menghitung usaha yang dibutuhkan seandainya besar tetesan diubah. Di satu sisi usaha ΔW tersebut terdapat dari besar tekanan dan perubahan jari-jari r sebesar Δr sebesar:

$$\begin{aligned}\Delta W &= p \cdot A \cdot \Delta r \\ &= p \cdot 4\pi r^2 \cdot \Delta r\end{aligned} \tag{9.20}$$



Gambar 9.12: *Tekanan p dalam tetesan melawan resultan dari gaya tegangan permukaan* $\vec{F}_{tp}$.

Di sisi lain besar usaha ΔW tersebut terdapat dari perubahan besar luas permukaan ΔA yang terdapat ketika jari-jari diubah sebesar Δr. Dengan memperbesar luas permukaan terdapat penambahan energi atau usaha dari energi permukaan jenis sesuai (9.14) sebesar:

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \Leftrightarrow \Delta W = \sigma \cdot \Delta A \tag{9.21}$$

Dengan perubahan jari-jari sebesar Δr terdapat perubahan luas permukaan ΔA sebesar:

$$\Delta A = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} A \cdot \Delta r = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(4\pi r^2\right) \cdot \Delta r = 8\pi r \cdot \Delta r \tag{9.22}$$

Maka (9.21) menjadi:

$$\Delta W = \sigma \cdot 8\pi r \cdot \Delta r \tag{9.23}$$

Dalam situasi keseimbangan usaha dari tekanan sama besar dengan usaha dari memperbesar luas permukaan, maka ΔW dalam (9.20) sama besar dengan ΔW dalam (9.23):

$$\Delta W = p \cdot 4\pi r^2 \cdot \Delta r = \sigma \cdot 8\pi r \cdot \Delta r \Leftrightarrow p = \frac{\sigma \cdot 8\pi r \cdot \Delta r}{4\pi r^2 \cdot \Delta r} = \frac{2\sigma}{r} \tag{9.24}$$

Jadi sebagai akibat dari tegangan permukaan jenis dalam tetesan terdapat tekanan yang bertambah besar ketika tetesan kecil. Hal ini mudah dimengerti karena dengan tetesan kecil lengkung di permukaan lebih besar sehingga komponen gaya ke dalam lebih besar.

9.3.4 Energi Permukaan Jenis Antara Berbagai Jenis Zat

Dalam pasal-pasal di atas tegangan permukaan jenis dijelaskan sebagai gaya yang bekerja untuk memperkecil luas permukaan sebagai akibat dari gaya kohesi antara partikel cairan. Tegangan permukaan atau energi permukaan yang telah dijelaskan merupakan energi permukaan yang terdapat pada permukaan antara cairan dan suatu gas yang berada di luar cairan. Dalam situasi ini gaya kohesi dalam cairan lebih besar daripada gaya adhesi dari molekul cairan terhadap molekul gas sehingga terdapat energi permukaan jenis yang positif. Energi permukaan jenis atau tegangan permukaan jenis bukan sifat dari satu cairan, tetapi merupakan sifat antara dua zat yang bersentuhan.

Pada permukaan antara cairan dan gas selalu terdapat energi permukaan jenis yang positif, berarti luas permukaan cairan memiliki tegangan (gaya) yang bekerja untuk memperkecil besar luas permukaan. Seandainya energi permukaan jenis negatif, partikel cairan akan cenderung untuk ke luar dari cairan dan masuk ke dalam gas, berarti cairan akan menguap.

Antara cairan dan zat padat sering terdapat situasi dengan gaya adhesi antara partikel cairan dan zat padat lebih besar daripada gaya kohesi antara partikel cairan. Dalam situasi ini cairan cenderung untuk menyebar pada permukaan zat padat. Situasi ini biasanya terdapat antara air dan kaca. ***Di mana gaya adhesi ini bisa dilihat ? →*** …………… Dalam situasi adhesi lebih besar daripada kohesi terdapat tegangan permukaan jenis atau energi permukaan jenis yang bekerja untuk memperbesar luas permukaan, berarti energi / tegangan permukaan jenis mempunyai nilai yang negatif. Antara zat padat dan cairan kadang terdapat energi permukaan jenis yang negatif, kadang terdapat energi permukaan jenis yang positif.

Kalau terdapat dua cairan yang tidak berlarut satu dalam yang lain, maka antara dua cairan tersebut terdapat energi permukaan jenis yang positif.

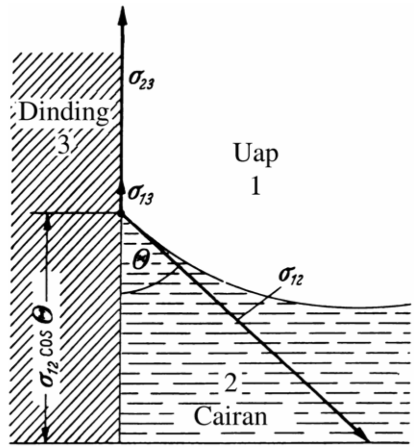
Dalam tabel 9.1 beberapa kemungkinan untuk besar energi permukaan jenis σ ditulis.

Jenis Zat	Energi Permukaan Jenis
Cairan – gas	$\sigma > 0$
Cairan – cairan	$\sigma > 0$
Cairan – zat padat	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$
Zat padat – gas	σ biasanya sangat kecil

Tabel 9.1: *Besar energi permukaan jenis yang biasanya didapatkan antara berbagai jenis zat.*

9.3.5 Sudut Cairan Pada Dinding

Kalau cairan dimasukkan ke dalam suatu wadah, maka pada dinding wadah terdapat tiga jenis tegangan permukaan yang memberikan gaya kepada ujung cairan. Sebagai akibat dari tiga jenis tegangan permukaan, cairan sering naik pada dinding wadah. Ujung cairan pada satu dinding menjadi seperti diperlihatkan pada gambar 9.13. Dalam situasi ini terdapat tiga jenis bahan, yaitu cairan (no 2 dalam gambar), dinding wadah (no 3) dan gas di atas cairan (no 1). Gas itu sering merupakan uap dari cairan itu sendiri. Antara masing-masing pasangan bahan terdapat tegangan permukaan.



Gambar 9.13: *Gaya yang bekerja kepada ujung cairan pada dinding wadah. Dalam contoh ini adhesi antara cairan dan dinding lebih besar daripada kohesi cairan.*

Pertama terdapat tegangan permukaan antara cairan dan uap di atas cairan. Tegangan permukaan ini memberikan gaya yang mau memperkecil permukaan antara cairan dan uap tersebut, berarti terdapat gaya ke arah tangensial permukaan cairan pada ujung cairan. Tegangan ini menarik ujung cairan ke dalam seperti diperlihatkan dalam gambar 9.13 oleh panah σ_{12}.

Tegangan permukaan ke dua terdapat antara cairan dan dinding wadah. Tegangan permukaan ini merupakan tegangan permukaan antara cairan dan zat padat dan bisa menjadi positif atau negatif. Kalau tegangan permukaan negatif terdapat gaya yang mau memperbesar permukaan antara cairan dan dinding, berarti terdapat gaya yang menarik cairan ke atas seperti diperlihatkan oleh panah σ_{23} dalam gambar 9.13. Dalam situasi ini kohesi antara cairan dan zat padat dinding lebih besar daripada adhesi dalam cairan sendiri. Sebab itu cairan ditarik oleh dinding sampai naik ke atas. Kalau adhesi cairan lebih besar daripada kohesi antara cairan dan zat padat, tegangan permukaan menjadi positif dan mau memperkecil permukaan antara cairan dan dinding sehingga terdapat gaya kepada ujung cairan ke arah bawah. Dalam situasi ini ujung cairan tidak naik pada dinding, tetapi turun. Hal ini terjadi dengan air raksa pada dinding kaca.

Tegangan permukaan ke tiga terdapat antara uap dan dinding wadah (zat padat). Tegangan permukaan ini mau memperkecil luas permukaan antara uap dan dinding wadah, berarti terdapat gaya kepada ujung cairan ke arah atas seperti diperlihatkan oleh panah σ_{13} dalam gambar 9.13. Tegangan permukaan σ_{13} biasanya mempunyai nilai yang kecil (pasal di atas).

Besar gaya yang bekerja sesuai (9.18) sebesar tegangan permukaan dikalikan panjang ujung permukaan: $F_{nm} = l_{ujung\ permukaan} \cdot \sigma_{nm}$. Karena panjang ujung permukaan sama besar pada semua permukaan, maka untuk mendapatkan keseimbangan gaya, besar dari vektor tegangan permukaan yang digambar dalam gambar 9.13 harus seimbang. Komponen gaya ke arah mendatar bisa mendapatkan gaya reaksi dari dinding wadah untuk menjadi seimbang. Maka hanya komponen dari tegangan permukaan ke arah tegak lurus harus mendapatkan keseimbangan dari besar dan arah gaya tegangan permukaan. Dengan arah tegak lurus sebagai arah y dan dengan memperhatikan bahwa σ_{13} ke arah atas, σ_{23} ke arah bawah (kalau mempunyai nilai positif, bukan nilai negatif seperti dalam gambar 9.13) dan σ_{12} ke arah kanan bawah dengan sudut Θ antara dinding dan permukaan cairan terdapat:

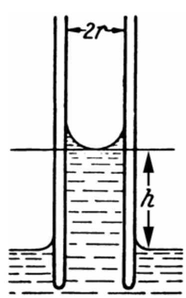
$$\sigma_{13y} - \sigma_{23y} = \sigma_{12y} \Rightarrow \sigma_{13} - \sigma_{23} = \sigma_{12} \cdot \cos\Theta \qquad (9.25)$$

Sudut Θ dari vektor yang menunjukkan σ_{12} adalah sudut antara permukaan cairan dan dinding wadah.

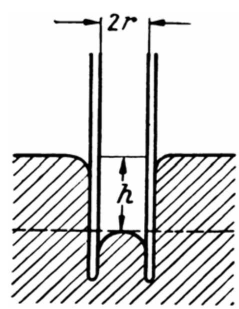
9.3.6 Kapilaritas

Kalau suatu pipa dengan diameter kecil dimasukkan ke dalam cairan, cairan bisa naik di dalam pipa sehingga permukaan cairan dalam pipa lebih tinggi daripada permukaan cairan di luar seperti diperlihatkan dalam gambar 9.14. Hal ini terjadi kalau adhesi antara cairan dan bahan pipa lebih besar daripada kohesi dalam cairan, berarti σ_{23} dalam (9.25) mempunyai nilai negatif. Kalau adhesi antara cairan dan bahan pipa lebih kecil daripada kohesi dalam cairan, berarti σ_{23} dalam (9.25) mempunyai nilai positif, maka cairan di dalam pipa akan didorong ke bawah menjadi lebih rendah daripada permukaan cairan di luar seperti diperlihatkan dalam gambar 9.15.

Cairan naik karena gaya yang didapatkan oleh tegangan permukaan pada ujung permuka-an. Gaya ini sebesar resultan tegangan permukaan σ dari (9.25) dikalikan dengan panjang ujung



Gambar 9.14: *Cairan naik dalam kapiler.*



Gambar 9.15: *Cairan didorong ke bawah oleh kapiler.*

permukaan *l*. Berarti dalam pipa dengan diameter sebesar $2 \cdot r$ terdapat gaya dari tegangan permukaan sebesar:

$$F_{tp} = l \cdot \sigma = 2\pi r \cdot \sigma \qquad (9.26)$$

Cairan dalam pipa juga mendapatkan gaya ke bawah dari gaya gravitasi. Dengan tinggi cairan di atas permukaan cairan di sekitar sebesar *h,* diameter pipa sebesar $2 \cdot r$ dan massa jenis cairan sebesar ρ, maka gaya gravitasi kepada cairan dalam pipa menjadi sebesar:

$$F_g = mg = V \cdot \rho \cdot g = \pi r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g \qquad (9.27)$$

Supaya terdapat keseimbangan, maka gaya dari tegangan permukaan dalam (9.26) sama besar dengan gaya gravitasi dalam (9.27). Maka terdapat tinggi cairan *h* sebesar:

$$\left.\begin{aligned} F_g &= \pi r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g \\ F_{tp} &= 2\pi r \cdot \sigma \\ F_g &= F_{tp} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \pi r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g = 2\pi r \cdot \sigma \Leftrightarrow h = \frac{2\sigma}{\rho \cdot g \cdot r} \qquad (9.28)$$

Besar σ dalam (9.28) sesuai dengan (9.25):

$$\sigma = \sigma_{13} - \sigma_{23} = \sigma_{12} \cdot \cos\Theta \qquad (9.29)$$

Berarti tinggi cairan dalam pipa kecil (kapiler) tergantung dari besar tegangan permukaan σ dan dari diameter kapiler. Besar tegangan permukaan σ tergantung dari jenis cairan dan jenis zat kapiler. Dengan kapiler yang lebih kecil, cairan bisa naik lebih tinggi.

Kapilaritas membuat air dari dalam tanah naik sampai mendekati permukaan dan bisa diserap oleh akar tanaman, juga membuat batu-batu yang terletak di tanah menjadi lembab karena air dari tanah bisa naik sampai masuk ke dalam batu. Juga masih ada banyak situasi lain yang mana kapilaritas bekerja dalam hidup sehari-hari.

9.4 Cairan yang Bergerak

9.4.1 Medan Aliran dan Jenis-Jenis Aliran

Ketika suatu cairan bergerak, kita bisa memperhatikan gerakan dari partikel demi partikel dari cairan tersebut pada satu saat tertentu. Pada satu saat setiap partikel mempunyai arah dan kecepatan tertentu. Semua vektor kecepatan

$\vec{v}(\vec{r})$ [2] disebut sebagai medan aliran. Kalau vektor-vektor kecepatan disambungkan, terdapat satu gambar yang menunjukkan arah gerakan cairan pada setiap tempat. Garis-garis dari gambar ini disebut sebagai garis arus. Medan aliran bisa ditampilkan kelihatan dengan cara sbb. Partikel kecil yang berwarna dimasukkan ke dalam cairan yang mengalir, lalu cairan tersebut difoto dengan cara membuka shutter selama waktu yang singkat, misalnya 1/10 detik. Partikel berwarna akan dilihat sebagai garis-garis pendek. Arah garis akan menunjukkan arah gerakan dan panjang garis menunjukkan besar kecepatan.

Suatu aliran disebut sebagai **aliran stasioner** kalau medan aliran sama (konstan) pada setiap saat. Kalau medan aliran stasioner, bukan berarti bahwa kecepatan dari suatu partikel konstan, tetapi hanya berarti bahwa kecepatan dari partikel yang melewati suatu tempat tertentu selalu sama besar pada tempat tersebut. Ketika suatu partikel terbawa ke tempat yang lain oleh aliran, maka kecepatan pada tempat baru bisa mempunyai arah dan / atau kecepatan yang berbeda. Berarti suatu partikel bisa mengalami percepatan atau perlambatan ketika berada dalam aliran stasioner. Dalam diktat ini kita hanya akan membahas aliran stasioner.

Suatu aliran disebut sebagai **aliran laminar** kalau cairan bisa dibagi ke dalam lapisan-lapisan dan satu lapisan bergerak di atas lapisan yang lain tanpa bercampur dengan lapisan di sebelah. Dalam aliran laminar gesekan antara lapisan-lapisan tersebut mempunyai peran besar dalam menentukan kecepatan aliran dan bentuk dari medan aliran.

Suatu aliran yang tidak laminar adalah **aliran turbulen**. Pada aliran turbulen medan aliran berputar-putar dan berubah-ubah.

Dalam diktat ini hanya aliran laminar akan dibahas.

Kita akan membahas hanya cairan yang *incompressible*, berarti cairan yang tidak bisa dipadatkan dengan memberikan tekanan kepada cairan. Massa jenis dari cairan seperti ini konstan walaupun tekanan berubah. Ketika cairan *incompressible* mengalir dalam pipa atau wadah, volume cairan yang melewati satu tempat pasti sama besar dengan volume yang akan melewati tempat berikut.

9.4.2 Cairan Ideal

9.4.2.1 Definisi

Suatu cairan disebut sebagai cairan ideal jika gesekan di dalam cairan bisa diabaikan.

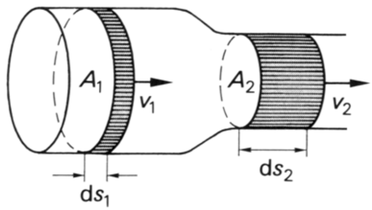
---

2 Arti dari $\vec{v}(\vec{r})$: Vektor kecepatan $\vec{v}$ pada setiap tempat $\vec{r}$.

9.4.2.2 Persamaan Kontinuitas

Massa cairan yang masuk satu daerah tertentu dalam aliran stasioner selalu sama besar dengan massa cairan yang ke luar dari daerah tersebut. Dengan cairan *incompressible* untuk semua aliran massa dan volume cairan yang masuk suatu daerah akan sama besar dengan massa dan volume cairan yang ke luar dari daerah tersebut. Secara matematis terdapat persamaan vektor untuk medan kecepatan $\vec{v}(\vec{r})$:

$$div\,\vec{v} = 0 \tag{9.30}$$



Gambar 9.16: *Penjelasan mengenai persamaan Bernoulli.*

Untuk situasi sederhana yang dibicarakan dalam diktat ini cukup untuk memperhatikan situasi seperti dalam gambar 9.16. Jika suatu aliran melewati sebuah pipa dan diameter pipa berubah pada jalur aliran, maka kecepatan aliran akan berubah juga. Karena volume cairan konstan, maka volume V_1 yang melewati pipa sebelah kiri sama besar dengan volume V_2 di sebelah kanan. Dengan luas pipa A_1 di sebelah kiri dan A_2 di sebelah kanan dan jarak gerak per waktu dt sebesar ds_1 di sebelah kiri dan sebesar ds_2 di sebelah kanan terdapat persamaan untuk kecepatan $v_1 = \frac{\mathrm{d}s_1}{\mathrm{d}t}$ dan $v_2 = \frac{\mathrm{d}s_2}{\mathrm{d}t}$ sbb.:

$$V_1 = V_2 \Leftrightarrow A_1 \frac{\mathrm{d}s_1}{\mathrm{d}t} = A_2 \frac{\mathrm{d}s_2}{\mathrm{d}t} \Leftrightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2 \Leftrightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} \tag{9.31}$$

Dari (9.31) dilihat kecepatan cairan tambah cepat ketika cairan melewati daerah yang sempit atau ketika garis aliran semakin dekat (tempat yang dipakai cairan untuk mengalir lebih sempit). Terbalik, jika aliran cairan tambah cepat, maka luas yang dilewati cairan semakin kecil.

9.4.2.3 Tekanan pada Cairan Bergerak

Energi yang dimiliki cairan terdiri dari tiga bagian:

1. Energi potensial yang tergantung dari ketinggian tempat yang dimiliki cairan pada tempat tertentu sebesar: $E_{pot} = mgh = \rho\Delta Vgh$.
2. Energi tekanan yang diberikan kepada cairan ketika cairan didorong oleh tekanan p untuk bergerak dalam pipa sebesar: $E_p = F \cdot s = p \cdot \Delta V$.
3. Energi kinetik oleh gerakan cairan sebesar: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho \cdot \Delta V \cdot v^2$.

Dalam banyak situasi gesekan dalam cairan bisa diabaikan. Kalau tidak ada gesekan, maka azas kekekalan energi akan berlaku, berarti jumlah energi pada setiap saat sama besar. Untuk situasi ini dalam pipa aliran gambar 9.16 energi total di sebelah kiri (pipa aliran besar) sama besar dengan energi total di sebelah kanan (pipa aliran kecil) sehingga terdapat:

$$E_{pot1} + E_{p1} + E_{kin1} = E_{pot2} + E_{p2} + E_{kin2}$$

$$\Leftrightarrow \rho\Delta V g h_1 + p_1 \Delta V + \tfrac{1}{2}\rho\Delta V {v_1}^2 = \rho\Delta V g h_2 + p_2\Delta V + \tfrac{1}{2}\rho\Delta V {v_2}^2 \qquad (9.32)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \rho g h_1 + p_1 + \tfrac{1}{2}\rho {v_1}^2 = \rho g h_2 + p_2 + \tfrac{1}{2}\rho {v_2}^2$$

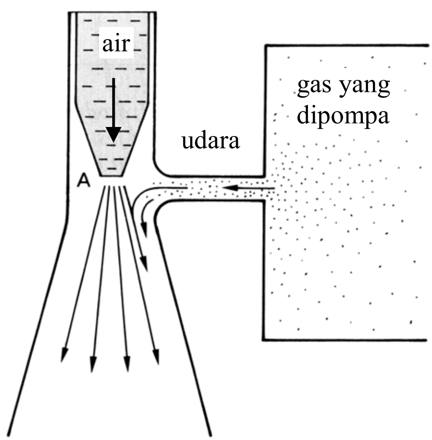
Untuk situasi umum (9.32) menjadi:

$$\rho g h + p + \tfrac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstan} = p_{total} \qquad (9.33)$$

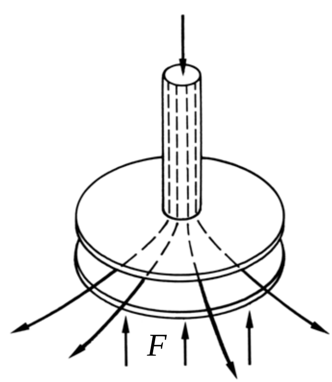
Persamaan (9.33) disebut sebagai persamaan Bernoulli. Jumlah yang konstan disebut sebagai tekanan total. Hal ini berarti $\frac{1}{2}\rho v^2$ ditafsir sebagai tekanan dinamik atau tekanan gerakan. Tekanan ini memang bisa diukur secara langsung. Bagian $\rho g h$ yang terdapat dari energi potensial merupakan tekanan posisi dan bagian p disebut sebagai tekanan kerja. Dua jenis tekanan ini merupakan tekanan statis.

Karena jumlah tekanan konstan, maka tekanan kerja p akan turun ketika kecepatan cairan bertambah. Hal ini bisa diamati pada berbagai percobaan dan dimanfaatkan dalam berbagai alat. Tiga contoh di bawah ini:

Pompa berkas air (gambar 9.17)***:*** Air melalui sebuah semprotan (*jet*), berarti pada pipa yang dialiri air terdapat tempat yang sempit sehingga kecepatan



Gambar 9.17: *Pompa berkas air.*

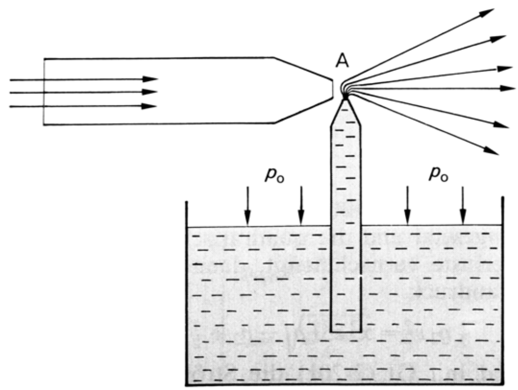


Gambar 9.18: *Paradokson Hidrodinamika*

air di situ besar. Pada tempat kecepatan air besar, tekanan dinamis menjadi besar dan tekanan kerja kecil. Karena tekanan kerja kecil, maka gas atau udara ditarik kepada tempat tersebut dan sebuah wadah terisi udara atau gas yang tersambung bisa dikosongkan sehingga bervakum.

Paradokson hidrodinamika (gambar 9.18)***:*** Ketika suatu berkas cairan atau gas diarahkan kepada dinding atau dasar wadah, selang tidak terdorong ke belakang, tetapi malah ditarik oleh dinding atau lantai. Karena cairan yang kena dinding / lantai tersebar dengan kecepatan tinggi, maka tekanan kerja menjadi kecil dan akan terdapat gaya tarik.

Semprotan (obat nyamuk) (gambar 9.19)***:*** Udara dilewatkan sebuah *jet* dengan kecepatan tinggi, maka tekanan dinamis menjadi besar dan tekanan kerja kecil. Karena tekanan kerja udara kecil setelah melewati *jet*, maka cairan dari tabung di bawah ditarik naik ke dalam berkas udara dan disebarkan dengan berkas udara.



Gambar 9.19: *Semprotan.*

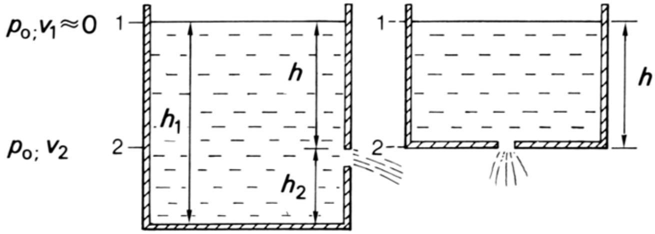
9.4.2.4 Cairan Mengalir ke luar dari Wadah

Jika sebuah wadah yang terisi cairan mempunyai lubang kecil pada ketinggian h di bawah permukaan cairan, maka cairan akan mengalir ke luar dari lubang tersebut sesuai dengan persamaan Bernoulli (9.33). Dengan lubang yang cukup kecil perubahan tinggi cairan dalam wadah bisa diabaikan. Dengan kata lain, kecepatan cairan dekat dengan permukaan atas bisa dihitung sebesar nol. Situasi seperti diperlihatkan dalam gambar 9.20. Tekanan kerja baik di permukaan cairan dan di tempat lubang sama-sama sebesar tekanan udara p_0.

Maka dari persamaan Bernoulli terdapat:

$$\begin{aligned} & \rho g h_1 + p_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1{}^2 = \rho g h_2 + p_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2{}^2 \\ \Leftrightarrow\ & \rho g h_1 + p_0 + \tfrac{1}{2}\rho 0^2 = \rho g h_2 + p_0 + \tfrac{1}{2}\rho v_2{}^2 \\ \Leftrightarrow\ & g\left(h_1 - h_2\right) = \tfrac{1}{2} v_2{}^2 \end{aligned} \tag{9.34}$$

Maka terdapat kecepatan cairan yang mengalir ke luar dari lubang sebesar:



Gambar 9.20: *Penjelasan mengenai hukum Torricelli.*

$$gh = \tfrac{1}{2} v_2^{\,2} \;\Leftrightarrow\; v = \sqrt{2gh} \tag{9.35}$$

Kecepatan cairan sama besar dengan cairan atau benda lain yang telah jatuh bebas dari ketinggian *h*. Dengan besar *h* sebagai tinggi antara permukaan cairan dan lubang. Jika lubang berada pada dinding samping dari wadah atau berada pada dasar wadah, kecepatan cairan mengalir ke luar tetap sama besar.

Dalam praktek kecepatan yang akan diukur lebih kecil daripada kecepatan yang dihitung dengan persamaan (9.35). Perlambatan ini disebabkan oleh dua hal:

1. Gesekan dalam cairan: Berapa besar perlambatan oleh gesekan merupakan suatu sifat khas cairan yang tergantung dari kekentalannya. Pengaruh ini bisa dihitung dengan *angka kecepatan* φ. (Pada air terdapat *angka kecepatan* sebesar $\varphi_{air} \approx 0{,}97$.)
2. Berkas ke luar mengalami penyempitan (kontraksi): Pada lubang air mengalir ke luar berkas mengalami penyempitan yang tergantung dari bentuk pinggir lubang. Karena penyempitan tersebut banyaknya air yang mengalir ke luar berkurang. Penyempitan bisa dihitung dengan memakai *angka kontraksi* α. (Untuk pinggir lubang yang bersudut tajam *angka kontraksi* sebesar $\alpha \approx 0{,}61$)

Untuk mendapatkan besar kecepatan dan besar arus aliran (massa per waktu) yang sesuai dengan realitas, maka kecepatan dan arus aliran yang dihitung dengan persamaan Bernoulli harus dikalikan dengan *angka kecepatan* φ dan *angka kontraksi* α. Misalnya ketika air mengalir ke luar dari wadah melalui sebuah lubang dengan sudut tajam, maka kecepatan dan banyaknya air yang mengalir ke luar per waktu akan hanya sebesar $\varphi \cdot \alpha$ · (hasil dari (9.35)) = 0,59 · (hasil dari (9.35)): $v_{dikoreksi} = \varphi \cdot \alpha \cdot \sqrt{2gh} = 0{,}59 \cdot \sqrt{2gh}$.

9.4.3 Cairan dengan Gesekan

9.4.3.1 Viskositas

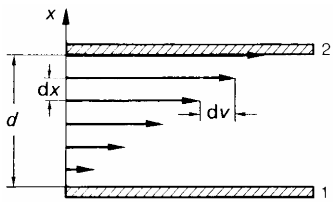
Kata viskositas diserap dari bahasa Inggris “viscosity” dan berarti kekentalan cairan. Kekentalan cairan atau viskositas bisa dimengerti sebagai gesekan antara lapisan-lapisan cairan yang bergerak satu terhadap yang lain. Gambar 9.21 dan gambar 9.22 bisa menolong untuk mengerti definisi mengenai besar koefisien kekentalan atau viskositas η. Di antara satu lantai tetap (1) dan satu plat (2) yang bergerak dengan kecepatan konstan sebesar v_0 terdapat suatu cairan. Luas plat dianggap besar. Satu lapisan cairan tipis yang berada dekat dengan plat akan mengikuti gerakan plat dengan kecepatan v_0, lapisan cairan di bawah akan diam dengan lantai. Cairan di antara plat akan bergerak satu lapisan di atas yang lain seperti ditunjukkan dalam gambar 9.22. Cairan yang lebih di atas akan bergerak lebih cepat. Dalam situasi ini kecepatan cairan akan berubah secara linear ke arah *x* dari plat 1 ke plat 2. Gaya untuk melawan gesekan antara plat 2 dan lantai 1 tergantung secara linear dari luas plat *A*, invers jarak *d* antara plat dan lantai, kecepatan gerakan v_0, dan kekentalan cairan yang dinyatakan dengan η sesuai dengan:

$$\vec{F} = \eta \cdot A \cdot \frac{\vec{v}}{d} \tag{9.36}$$

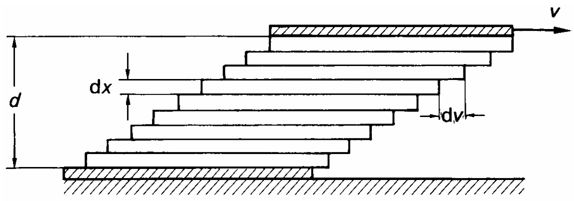
Konstanta η (baca: eta) menunjukkan sifat dari cairan yang ada di antara plat dan disebut sebagai koefisien gesekan dalam atau viskositas. Gesekan ini bukan gesekan antara benda padat dan cairan, tetapi gesekan antara lapisan cairan yang berdekatan. Faktor terakhir dalam (9.36) menunjukkan bahwa gaya tergantung perubahan kecepatan per jarak. Persamaan (9.36) ini ditulis untuk situasi linear di mana perubahan kecepatan per jarak sama besar pada setiap tempat. Dalam situasi umum pecahan $\frac{\vec{v}}{d}$ perlu ditulis sebagai perbedaan kecepatan d*v* dari satu lapisan cairan setebal d*x* terhadap lapisan cairan di atasnya. Dengan cara ini $\frac{\vec{v}}{d}$ menjadi $\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}x}$ sehingga terdapat bentuk diferensial dari (9.36):

$$\vec{F} = \eta \cdot A \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}x} \tag{9.37}$$

Persamaan diferensial ini tidak hanya benar dalam situasi linear seperti dalam contoh di atas, tetapi bisa dipakai untuk setiap situasi umum. Berarti ada gaya *F* yang dibutuhkan untuk membuat satu lapisan cairan bergerak lebih cepat (beda kecepatan d*v*) dari lapisan cairan di sebelahnya (dengan jarak d*x*).



Gambar 9.21: *Kecepatan cairan ke arah kanan berubah secara linear.*



Gambar 9.22: *Lapisan-lapisan cairan yang bergerak satu terhadap yang lain.*

Satuan untuk viskositas η terdapat dari (9.37) sebagai:

$$[\eta] = \frac{\mathrm{N \cdot det}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m \cdot det}} \tag{9.38}$$

Kadang satuan cgs untuk viskositas masih dipakai:

$$[\eta] = \mathrm{Poise} = \mathrm{P} = \frac{\mathrm{dyn \cdot det}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm \cdot det}} = 0{,}1\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m \cdot det}} \tag{9.39}$$

Viskositas cairan tergantung dari jenis cairan dan sangat tergantung dari suhu cairan.

9.4.3.2 Aliran Laminar antara Dua Plat Besar

Silakan hitung sendiri atau cari dalam buku lain, bagaimana pembagian kecepatan cairan dalam situasi ini dan berapa banyak cairan yang bisa melewati di antara dua plat.

9.4.3.3 Aliran Laminar dalam Pipa

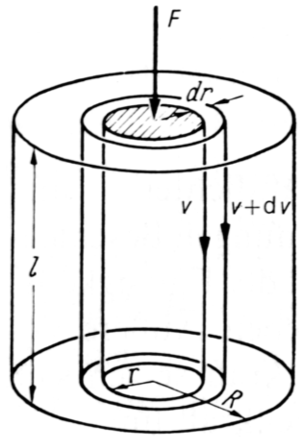
Dalam pasal ini kecepatan cairan yang mengalir dalam pipa dihitung. Untuk perhitungan ini dianggap aliran dalam pipa merupakan aliran laminar. Pipa yang dihitung sesuai gambar 9.23 dengan panjang pipa sebesar l, diameter pipa sebesar R, dan beda tekanan antara dua ujung pipa sebesar Δp. Dalam situasi pipa, kecepatan cairan akan tergantung dari jarak dengan garis tengah pipa, berarti distribusi kecepatan akan mempunyai simetri silinder. Besar kecepatan cairan bisa didapatkan dengan menghitung keseimbangan gaya pada suatu silinder dengan jari-jari r di tengah pipa. Gaya statik dari tekanan kepada silinder ini terdapat dari definisi tekanan sebesar:

$$F = A \cdot \Delta p = \pi r^2 \cdot \Delta p \qquad (9.40)$$

Dari gesekan dalam cairan terdapat gaya pada silinder tersebut sesuai dengan (9.37) kalau persamaan tersebut diterapkan untuk kecepatan cairan v pada permukaan silinder dengan jari-jari r dan kecepatan cairan $v + \mathrm{d}v$ pada jari-jari $r + \mathrm{d}r$. Luas permukaan silinder sebesar $A = l \cdot 2\pi r$. Maka terdapat gaya dari gesekan cairan sebesar:

$$F = -\eta \cdot A \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}x} = -\eta \cdot l \cdot 2\pi r \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}r}$$

Tanda minus terdapat karena gaya gesekan berlawanan arah dengan gaya dorong dari tekanan. Dengan gaya kepada silinder dengan jari-jari r dari (9.40) terdapat persamaan sbb.:



Gambar 9.23: *Aliran laminar dalam pipa.*

$$\pi r^2 \cdot \Delta p = -\eta \cdot l \cdot 2\pi r \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}r} \Leftrightarrow \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}r} = \frac{-\pi r^2 \cdot \Delta p}{\eta \cdot l \cdot 2\pi r} = -\frac{r\Delta p}{2\eta l} \qquad (9.42)$$

Persamaan (9.42) ini merupakan satu persamaan diferensial yang bisa diintegrasikan dengan mudah. Diferensial jari-jari dr bisa dipindahkan ke kanan, lalu persamaan diintegrasikan. Hasilnya:

$$\mathrm{d}\vec{v} = \frac{-\Delta p}{2\eta \cdot l} \cdot r\,\mathrm{d}\,r \Rightarrow \vec{v}(r) = \frac{-\Delta p}{4\eta \cdot l} r^2 + C \qquad (9.43)$$

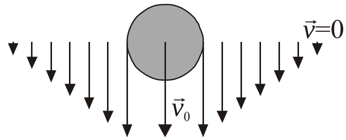
Karena cairan tidak ikut bergerak pada permukaan pipa, maka kecepatan $v(R)$ pada jari-jari $r = R$ akan nol, $v(R) = 0$. Maka konstanta integrasi C sebesar

$$C = \frac{\Delta p}{4\eta \cdot l} R^2 \qquad (9.44)$$

Dengan (9.44) dimasukkan ke dalam (9.43) terdapat hubungan antara kecepatan cairan dan jari-jari (jarak dari tengah pipa) r sebesar:

$$\vec{v}(r) = \frac{\Delta p}{4\eta \cdot l}\left(R^2 - r^2\right) \qquad (9.45)$$

Jadi kecepatan terhadap jari-jari berbentuk parabola. Cairan paling cepat di tengah dengan kecepatan sebesar $\vec{v}(0) = \frac{\Delta p}{4\eta \cdot l} R^2$. Dan cairan diam pada dinding pipa.



Gambar 9.24: *Suatu bola bergerak dalam cairan. Cairan yang jauh dari bola diam, cairan dekat dengan bola ikut gerakan bola. Gambar ini menunjukkan prinsip saja, tidak merupakan gambar kecepatan yang tepat.*

Untuk mendapatkan volume cairan V yang melewati seluruh pipa per waktu t, maka volume cairan yang mengalir pada dinding silinder dengan jari-jari r dengan dinding setebal dr dihitung dulu. Pada dinding silinder tersebut terdapat aliran sebesar:

$$\frac{V}{t} = 2\pi r \cdot v(r) \cdot \mathrm{d}\, r \qquad (9.46)$$

Dalam seluruh pipa terdapat aliran sebesar:

$$\frac{V}{t} = \int_0^R 2\pi r \cdot v(r) \cdot \mathrm{d}\, r$$

$$= \int_0^R 2\pi r \cdot \frac{\Delta p}{4\eta l}\left(R^2 - r^2\right) \cdot \mathrm{d}\, r = \frac{\pi \Delta p}{8\eta l} R^4 \qquad (9.47)$$

Persamaan ini disebut sebagai hukum Hagen Poiseuille. Ternyata banyaknya cairan yang mengalir dalam pipa per waktu tergantung dengan potensi empat dari diameter pipa, berarti kalau diameter menjadi dua kali lipat lebih besar, maka 16 kali lipat lebih banyak cairan bisa melewati pipa tersebut pada tekanan yang sama. Tetapi harus diperhatikan bahwa hukum Hagen Poiseuille hanya berlaku untuk aliran laminar.

9.4.3.4 Bola Bergerak dalam Cairan

Jika suatu benda bergerak dalam cairan yang diam, maka cairan di permukaan benda akan mengikuti gerakan benda. Dengan demikian terdapat perbedaan kecepatan antara cairan yang mengikuti gerakan benda dan cairan di sebelahnya yang tetap diam. Situasi kira-kira seperti diperlihatkan dalam gambar 9.24. Sesuai (9.37) harus ada gaya F yang mendorong benda untuk menghasilkan perbedaan kecepatan antara lapisan-lapisan cairan. Dalam situasi di mana volume cairan tidak terbatas atau bola bergerak dalam suatu bak yang luas dan aliran merupakan aliran laminar, besar gaya F yang dibutuhkan bisa dihitung dengan Hukum Stokes:

$$F = 6\pi\eta v r \qquad (9.48)$$

Dengan:
- r : jari-jari bola
- v : kecepatan bola
- η : viskositas cairan

Menghitung situasi ini merupakan suatu perhitungan yang kompleks. Dengan perhitungan yang sederhana sbb persamaan ini hampir didapatkan:

Jarak di mana cairan diam kira-kira sebesar jari-jari bola r. Maka perubahan kecepatan per jarak akan sebesar:

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z} = \frac{v}{r} \tag{9.49}$$

Permukaan bola yang membawa cairan dengan kecepatan v sebesar $A = 4\pi r^2$. Maka dari (9.37) terdapat gaya kepada bola sebesar:

$$\vec{F} = \eta \cdot A \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}x} = \eta \cdot 4\pi r^2 \cdot \frac{v}{r} = 4\pi\eta v r \tag{9.50}$$

Persamaan ini sudah agak dekat dengan hasil yang tepat dalam (9.48).

Baik hukum Stokes maupun hukum Hagen Poiseuille bisa dipakai untuk mengukur viskositas cairan.

Soal Latihan

1 Pengantar

Tidak ada soal latihan untuk pasal ini.

2 Prinsip Dasar, Mengukur

Tidak ada soal latihan untuk pasal ini.

3 Sistem Koordinat dan Vektor

3.1. Gambarlah satu sistem koordinat kartesius (skala x: -5 cm… 5 cm, skala y: -5 cm…5 cm) dan tunjukkan tempat-tempat berikut:

- T_1: (3 cm, 5 cm); T_2: (-4 cm, 3 cm); T_3: (2 cm, -2,5 cm); T_4: (-2,8 cm, -3,5 cm)

3.2. Terdapat vektor sbb.: $\vec{a} = (4\,\text{cm}, 3{,}5\,\text{cm})$, $\vec{b} = (-7\,\text{cm}, 2\,\text{cm})$, $\vec{c} = (-1\,\text{cm}, -6\,\text{cm})$

Hitunglah penjumlahan / pengurangan berikut dan gambarkan vektor yang dipakai, perhitungan dan hasil ke dalam sistem koordinat:

a. $\vec{d} = \vec{a} + \vec{b}$

b. $\vec{e} = \vec{b} + \vec{a}$

c. $\vec{f} = \vec{a} - \vec{b}$

d. $\vec{g} = \vec{b} - \vec{a}$

e. $\vec{h} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$

f. $\vec{i} = \vec{a} + \vec{c} + \vec{b}$

g. $\vec{j} = \vec{b} - \vec{c}$

h. $\vec{k} = \vec{a} - \vec{c}$

3.3. Tentukan koordinat polar dari vektor $\vec{a}$, $\vec{b}$ dan $\vec{c}$ dalam soal 3.2.

3.4. Hitunglah dan gambarlah vektor berikut dengan tetap memakai vektor $\vec{a}$, $\vec{b}$ dan $\vec{c}$ dari soal 3.2.

a. $\vec{l} = 3 \cdot \vec{a}$

b. $\vec{m} = 0,3 \cdot \vec{c}$

c. $\vec{n} = 1,5 \cdot \vec{b}$

3.5. Bagikan vektor $\vec{a} = (10\,\text{cm}, 5\,\text{cm})$ ke dalam dua komponen yang tegak lurus, satu dari dua komponen tersebut ke arah sumbu *x*.

3.6. Bagikan vektor $\vec{F} = (\rho, \varphi) = (10\,\text{cm}, 30°)$ yang diberikan dalam koordinat polar ke dalam dua komponen, satu ke arah sumbu *x* dan satu ke arah sumbu *y*.

4 Gaya

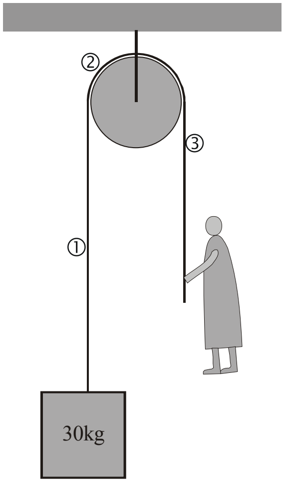
4.1. Sebuah katrol dipasang di langit-langit seperti diperlihatkan pada gambar 4.1. Tali pada katrol tersebut dibebani dengan beban sebesar ***m* = 30 kg**. Satu orang menarik tali ke bawah sehingga beban diam di tempat. Massa dari tali, katrol dan gantungan diabaikan dan katrol dianggap tidak memiliki gesekan.

a. Berapa besar gaya dalam tali pada tempat ①, ② dan ③ ? Gaya pada tempat tersebut ke arah mana ?

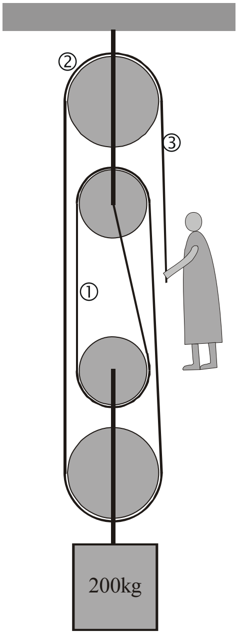
b. Orang harus menarik tali dengan gaya yang berapa besar ?

c. Berapa besar gaya dari katrol kepada gantungannya ? Arahnya ke mana ?

d. Berapa besar gaya dari gantungan kepada katrol ? Arahnya ke mana ?



Gambar 4.1.: *Katrol biasa dibebani. Soal 4.1.*



Gambar 4.2.: *Takal dengan 4 roda dipakai untuk mengangkat beban yang besar. Soal 4.2.*

4.2. Terdapat takal dengan 4 roda seperti dalam gambar 4.2 . Takal ini dibebani dengan satu benda yang memiliki massa $\boldsymbol{m}$ **= 200 kg**. Massa dari katrol, gantungan dan tali diabaikan. Katrol dianggap berputar tanpa gesekan.

a. Gaya dari beban kepada kedua katrol di bawah berapa besar ? Gaya ini akan dibagi sehingga katrol masing-masing mendapat bagian. Berapa besar bagian gaya dalam katrol masing-masing ?

b. Gaya dalam tali berapa besar dan ke arah mana ? (di tempat ①, ②, ③)

c. Orang harus menarik tali dengan gaya berapa besar ?

d. Kira-kira orang itu cukup kuat untuk menarik tali dengan gaya tersebut ? Apa syarat supaya orang ini bisa menarik tali dengan gaya tersebut ?

e. Gaya kepada gantungan di langit-langit berapa besar ?

4.3. Seseorang menarik satu kereta pada bidang miring seperti diperlihatkan dalam gambar 4.4. Gesekan dari kereta, roda dan bidang miring bisa diabaikan. Kemiringan sebesar $\boldsymbol{\alpha = 20^o}$. Massa dari kereta sebesar $\boldsymbol{m}$ **= 80 kg**.

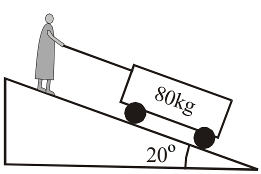
a. Berapa besar gaya dari kereta kepada bidang miring ?

b. Berapa besar gaya dalam tali yang harus ditarik orang ?

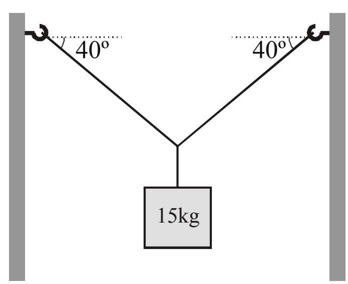
4.4. Satu beban digantungkan dengan tali seperti dalam gambar 4.5. Sudut antara arah mendatar dan tali masing-masing sebesar $\boldsymbol{\alpha = 40^o}$. Massa beban sebesar $\boldsymbol{m}$ **= 15 kg**. Massa tali bisa diabaikan.

a. Berapa besar gaya dalam tali masing-masing ?

b. Berapa besar gaya kepada gantungan masing-masing ke arah mendatar dan ke arah bawah ?



Gambar 4.4.: *Kereta di bidang miring. Soal* 4.3.



Gambar 4.5.: *Beban digantungkan dengan dua tali. Soal* 4.4.

4.5. Suatu menara antena diikat dengan tali seperti diperlihatkan dalam gambar 4.6. Terdapat angin yang menyebabkan gaya kepada menara. Gaya tersebut sebesar $\boldsymbol{F_{angin}}$ **= 1000 N** ke arah mendatar pada tempat tali tersambung dengan menara.

a. Berapa besar gaya dalam tali ?

b. Berapa besar gaya kepada kait di tanah ke arah mendatar ?

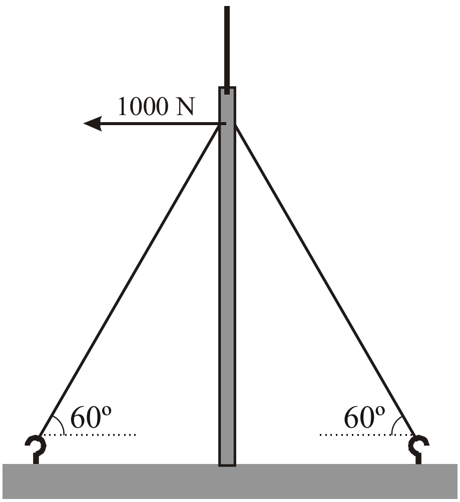
c. Berapa besar gaya kepada kait di tanah ke arah atas ?

d. Berapa besar gaya yang mendorong menara ke bawah ?

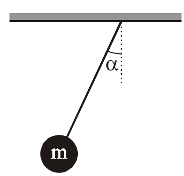
4.6. Terdapat sebuah bandul matematis (titik massa digantungkan pada benang). Bandul sedang mempunyai simpangan sebesar α. (gambar 4.7.)

a. Berapa besar gaya dalam tali ?

b. Berapa besar gaya yang mau menggerakan massa m ke tengah. *Informasi:* Yang menggerakkan massa adalah gaya ke arah gerakan, berarti ke arah tangen lingkaran gerakan.



Gambar 4.6: *Menara diikat dengan tali kena angin. Soal 4.5.*



Gambar 4.7: *Bandul matematis. Soal 4.6.*

5 Kinematika

Soal dengan * mengenai pasal berikut tentang Hukum Newton

5.1. Suatu mobil jalan dengan kecepatan konstan sebesar $\boldsymbol{v} = \mathbf{90\,\frac{km}{jam}}$ dari Bangkalan ke arah Selatan (Kamal). Pada jam 10:00 mobil berada pada posisi $\boldsymbol{s_0} = \mathbf{4\ km}$ dari Pusat Kota Bangkalan.

a. Pada waktu $\boldsymbol{t_1}$ **= jam 10:20** (20 menit setelah jam 10:00) mobil berada di mana ?

b. Pas pada waktu $\boldsymbol{t_1}$ mobil mulai mengerem dan berhenti setelah waktu sebesar $\boldsymbol{t_2} = \mathbf{5\ det}$. Mobil mengerem dengan percepatan berapa ?

c. Mobil akan berhenti di posisi mana ?

5.2. Suatu mobil berangkat dari keadaan diam dengan percepatan $\boldsymbol{a} = \mathbf{2\,\frac{m}{det^2}}$.

Percepatan konstan sampai $\boldsymbol{t_1} = \mathbf{8\ det}$. Setelah waktu $\boldsymbol{t_1} = \mathbf{8\ det}$ mobil berjalan terus dengan kecepatan konstan. Massa mobil sebesar $\boldsymbol{m} = \mathbf{800\ kg}$.

a. Mobil memiliki kecepatan berapa besar dan sudah jalan berapa jauh pada waktu $\boldsymbol{t_1}$?

b. Mobil sudah jalan berapa jauh pada waktu $\boldsymbol{t_2}$ **= 10 menit dan 8 detik** setelah berangkat.

c*. Roda harus mendorong mobil dengan gaya berapa besar ketika mobil dipercepat ? (Gesekan angin diabaikan.)

d*. Daya ***P*** yang diberikan kepada roda ketika mobil dipercepat berapa besar ? Gambarlah grafik tentang daya terhadap waktu.

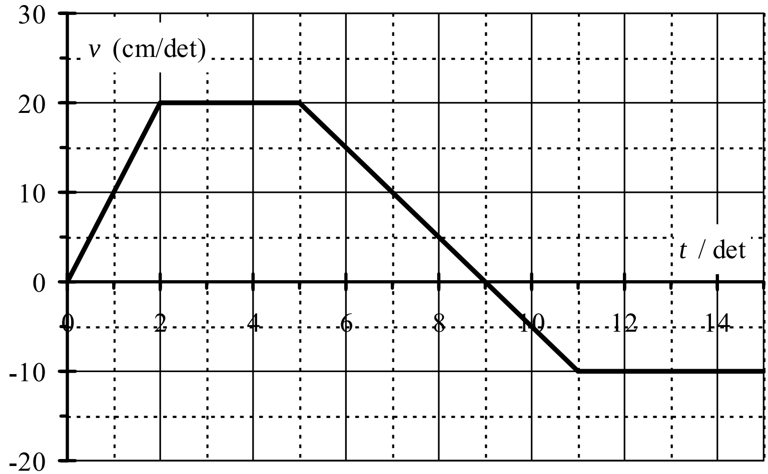
5.3. Sebuah benda bergerak sesuai dengan grafik kecepatan terhadap waktu dalam gambar 5.1. Posisi awal benda pada waktu $\boldsymbol{t} = \mathbf{0}$ pada posisi $\boldsymbol{s_0} = \mathbf{20\ cm}$.

a. Berapa besar percepatan benda antara 0 dan 2 det, antara 2 det dan 5 det, antara 5 det dan 11 det dan antara 11 det dan 15 det ?

b. Di mana benda pada waktu $\boldsymbol{t_1} = \mathbf{2\ det}$, $\boldsymbol{t_2} = \mathbf{5\ det}$, $\boldsymbol{t_3} = \mathbf{9\ det}$, $\boldsymbol{t_4} = \mathbf{11\ det}$ dan $\boldsymbol{t_5} = \mathbf{15\ det}$?

c. Gambarlah grafik posisi dari benda ini terhadap waktu.

d. Tulislah persamaan gerak $\left(s(t) = ...\right)$ dari benda ini untuk waktu antara 0 dan 2 det dan juga untuk waktu antara 2 det dan 5 det.



Gambar 5.1: Grafik kecepatan terhadap waktu; soal 5.3.

5.4. Suatu mobil jalan dari Kamal menuju ke Bangkalan. Kita mulai mengamati mobil ini pada waktu $\boldsymbol{t_0 = 0}$. Pada waktu tersebut mobil berada pada posisi $\boldsymbol{s_0 = 1\ \text{km}}$ dari Kamal, kecepatan mobil sebesar $\boldsymbol{v_1 = 80\ \frac{\text{km}}{\text{jam}}}$. Setelah selang waktu $\boldsymbol{t_1 = 1\ \text{menit}}$ mobil mengerem selama waktu $\boldsymbol{t_2 = 10\ \text{det}}$ dengan percepatan $\boldsymbol{a_2 = 2\ \frac{\text{m}}{\text{det}^2}}$. Kemudian jalan dengan kecepatan konstan selama $\boldsymbol{t_3 = 1\ \text{menit}}$. Kemudian mempercepat lagi selama waktu $\boldsymbol{t_4 = 10\ \text{det}}$ dengan percepatan sebesar $\boldsymbol{a_4 = 1{,}5\ \frac{\text{m}}{\text{det}^2}}$. Kemudian mempercepat selama waktu $\boldsymbol{t_5 = 8\ \text{det}}$ dengan percepatan $\boldsymbol{a_5 = 1\ \frac{\text{m}}{\text{det}^2}}$. Lalu mobil berjalan dengan kecepatan konstan selama waktu $\boldsymbol{t_6 = 1\ \text{menit}}$.

a. Setelah waktu $\boldsymbol{t_1}$ sampai $\boldsymbol{t_6}$ mobil berada di posisi mana dan memiliki kecepatan berapa besar ?

b. Gambarkanlah satu grafik dengan kecepatan $\boldsymbol{v}$ terhadap waktu $\boldsymbol{t}$ dan satu grafik dengan tempat $\boldsymbol{s}$ terhadap waktu $\boldsymbol{t}$.

5.5. Sebuah mobil mengerem dari kecepatan awal sebesar $\boldsymbol{v_0 = 60\ \frac{\text{km}}{\text{jam}}}$. Setelah waktu $\boldsymbol{t = 2\ \text{det}}$ mobil sudah berhenti. Massa mobil ini sama supir sebesar $\boldsymbol{m = 1\ \text{ton}}$.

a. Percepatan a dari mobil berapa besar ?

b*. Berapa besar gaya yang dikenakan jalan kepada rodanya ?

c. Mobil masih jalan berapa jauh sampai diam ?

d*. Supir mempunyai massa $\boldsymbol{m}$ **= 70 kg**. Kursi supir sama sabuk pengaman dikenai gaya berapa besar ketika mobil mengerem ? (Anggaplah bahwa supir tidak mendorong kepada stir mobil untuk menghindari jatuh ke depan.)

6 Hukum Newton

6.1. Terdapat suatu benda di atas bidang miring dengan kemiringan sebesar $\boldsymbol{\alpha = 25^o}$. Massa benda sebesar $\boldsymbol{m}$ **= 40 kg**. Pada awal benda tersebut diam pada ujung atas. Panjang dari bidang miring memberikan benda jalur gerak sepanjang $\boldsymbol{l}$ **= 2,5 m**. Bidang licin sehingga gesekan bisa diabaikan.

a. Gaya normal F_n kepada bidang miring berapa besar ?

b. Gaya tangential F_t yang mau mempercepat benda ini berapa besar ?

c. Percepatan benda berapa besar ?

d. Benda akan membutuhkan berapa lama sampai tiba di ujung bawah bidang miring ?

e. Kecepatan benda berapa besar ketika tiba pada ujung bawah bidang miring ?

f. Seandainya massa benda sebesar $\boldsymbol{m}$ **= 10 kg**. Apakah jawaban pada soal-soal di atas akan berubah ? Yang mana berubah dan yang mana tidak berubah ? Mengapa ?

6.2. Satu timbangan pegas dipasang dalam suatu lift. Beban dengan massa sebesar $\boldsymbol{m}$ **= 1 kg** digantungkan kepada timbangan tersebut. Lift ini berhenti di lantai 3 dan kemudian mulai bergerak ke bawah dengan percepatan konstan. Setelah $\boldsymbol{t_1 = 1\ \mathrm{det}}$ lift mempunyai kecepatan $\boldsymbol{v = 2{,}5\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{det}}}$ dan bergerak terus dengan kecepatan konstan. Untuk berhenti di lantai 1 lift perlu waktu sebesar $\boldsymbol{t_2 = 0{,}5\ \mathrm{det}}$. Kemudian lift kembali naik dari lantai 1 ke lantai 3 dengan cara yang sama: Dipercepat selama $\boldsymbol{t_1 = 1\ \mathrm{det}}$, lalu gerak dengan kecepatan konstan sebesar $\boldsymbol{v = 2{,}5\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{det}}}$, lalu perlu waktu sebesar $\boldsymbol{t_2 = 0{,}5\ \mathrm{det}}$ untuk berhenti. Jarak antara lantai 3 dan lantai 1 sebesar $\boldsymbol{s = 10\ \mathrm{m}}$.

a. Timbangan itu memperlihatkan massa benda berapa besar ketika lift bergerak dipercepat ke bawah ?

b. Timbangan itu memperlihatkan berat berapa besar ketika lift bergerak dengan kecepatan konstan ke bawah ?

c. Timbangan itu memperlihatkan berat berapa besar ketika lift bergerak diperlambat ke bawah ? (Ketika mau berhenti di lantai 1.)

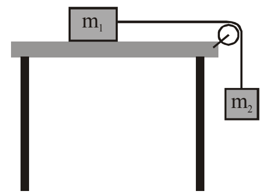
d. Timbangan itu memperlihatkan berat berapa besar ketika lift bergerak dipercepat ke atas ?

e. Timbangan itu memperlihatkan berat berapa besar ketika lift bergerak dengan kecepatan konstan ke atas ?

f. Timbangan itu memperlihatkan berat berapa besar ketika lift bergerak diperlambat ke atas ? (Ketika mau berhenti di lantai 2.)

g. Lift perlu berapa lama dari lantai 3 ke lantai 1 dan berapa lama untuk kembali ?

6.3. Terdapat satu konstruksi seperti dalam gambar 6.1. Benda dengan massa $\boldsymbol{m_1}$ **= 4 kg** yang bisa bergerak tanpa gesekan di atas meja terikat dengan tali lewat sebuah katrol dengan benda kedua. Massa dari benda kedua sebesar $\boldsymbol{m_2}$ **= 2 kg**. Gesekan, massa tali dan massa katrol diabaikan.



Gambar 6.1.: *Gambar soal 6.3..*

a. Berapa besar percepatan dari kedua benda ini ?

b. Gaya dalam tali berapa besar ?

c. Ketika dua benda ini mulai bergerak benda kedua setinggi ***h*** **= 1,5 m** di atas lantai. Setelah waktu *t* berapa benda ini akan kena lantai ?

6.4. Suatu benda dilemparkan tegak lurus ke atas. Kecepatan awal yang diberikan kepada benda ini sebesar $\boldsymbol{v_0 = 20\,\frac{m}{det}}$ ke arah atas.

a. Berapa besar kecepatan $\boldsymbol{v(t)}$ dari benda itu pada waktu $\boldsymbol{t}$ **= 0; 0,5; 1; 1,5; …4 det ?**

b. Berapa besar tinggi $\boldsymbol{T(t)}$ pada waktu tersebut ?

c. Gambarlah grafik $\boldsymbol{v(t)}$ dan $\boldsymbol{T(t)}$.

d. Kapan benda mencapai puncak tertinggi dari gerakannya ? Berapa besar kecepatannya pada saat itu ?

e. Kapan benda kembali ke tinggi awalnya ? Berapa besar kecepatannya pada saat itu ?

6.5. Suatu benda dilemparkan ke arah mendatar dari gedung bertingkat 3. Kecepatan awalnya sebesar $\boldsymbol{v_0 = 20\,\frac{m}{det}}$. Tinggi awalnya $\boldsymbol{T_0}$ **= 15 m**.

a. Tinggi dan kecepatan (besar dan arah) benda setelah $\boldsymbol{t_1} = \mathbf{1}$ det berapa ?
b. Berapa lama sampai benda ini kena tanah ?
c. Di mana akan kena tanah ?

6.6. Satu benda dilemparkan miring ke atas. Kecepatannya sebesar $\boldsymbol{v_0} = \mathbf{14{,}4\,\frac{m}{det}}$. Sudut lemparan sebesar $\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{45^o}$.

a. Tinggi dan kecepatan (besar dan arah) benda setelah $\boldsymbol{t_1} = \mathbf{2}$ det berapa ?
b. Kapan dan di mana benda itu berada pada posisi paling tinggi ?
c. Kapan dan di mana benda kembali ke tinggi awalnya ?

7 Gesekan

7.1. Dalam soal 6.1 bidang miring tidak lagi licin, tetapi terdapat koefisien gesekan dinamis antara permukaan bidang miring dan benda sebesar $\boldsymbol{\mu_k} = \mathbf{0{,}2}$. Jawablah semua pertanyaan untuk situasi ini.

7.2. Dalam soal 6.3. terdapat gesekan antara massa $\boldsymbol{m_1}$ dan meja dengan koefisien gesekan dinamis sebesar $\boldsymbol{\mu_k} = \mathbf{0{,}3}$. Gesekan katrol dan tali tetap diabaikan. Jawablah pertanyaan soal ini untuk situasi dengan gesekan ini.

7.3. Sebuah balok kayu terletak pada satu ujung di atas papan kayu yang panjangnya sebesar $\boldsymbol{l} = \mathbf{1{,}5\ m}$. Koefisien gesekan statis antara permukaan papan dan permukaan balok sebesar $\boldsymbol{\mu_s} = \mathbf{0{,}65}$. Koefisien gesekan dinamis sebesar $\boldsymbol{\mu_k} = \mathbf{0{,}3}$. Papan kayu pada awal mendatar, lalu ujung yang mana balok kayu terletak dinaikkan dengan pelan. Pada kemiringan α balok mulai meluncur ke bawah. Ketika balok mulai meluncur kemiringan papan dipertahankan sebesar α.

a. Berapa besar α ?
b. Balok gerak ke bawah dengan percepatan berapa besar ?
c. Berapa lama setelah balok mulai meluncur, balok akan tiba di ujung papan ?
d. Kecepatan balok berapa besar ketika tiba pada ujung papan ?

7.4. Satu mobil berada di jalan menurun. Sudut antara jalan dan arah mendatar sebesar $\alpha = \mathbf{10^o}$. Kecepatan mobil sebesar $\boldsymbol{v_1} = \mathbf{18\,\frac{km}{jam}}$. Dari tenaga mesin terdapat gaya dorong dari roda ke jalan sebesar $\boldsymbol{F_{mesin}} = \mathbf{2100\ N}$. Massa mobil sama penumpang sebesar $\boldsymbol{m} = \mathbf{700\ kg}$. Koefisien gesekan antara jalan dan roda mobil sebesar $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{0{,}8}$.

a. Berapa besar percepatan mobil ketika mobil berjalan ke arah menurun ?
b. Berapa besar kecepatan mobil setelah $\boldsymbol{t_1}$ **= 5 det** ?
c. Lalu mobil direm dengan keras sehingga rodanya terblokir. Berapa lama sampai mobil diam dan selama mengerem mobil masih bergerak berapa jauh ?
d. Berapa besar percepatan mobil kalau jalan ke arah berlawanan dan naik di jalan yang sama ? (Kecepatan awal dan gaya mesin tetap sama.)
e. Berapa besar kecepatan mobil ketika naik setelah $\boldsymbol{t_1}$ **= 5 det** ?
f. Lalu mobil mengerem dengan keras sehingga rodanya terblokir. Berapa lama sampai mobil diam dan selama mengerem mobil masih bergerak berapa jauh ?
g. Mobil berada di jalan yang naik dan memiliki kecepatan dari hasil soal b. Lalu mobil direm sehingga rodanya terblokir. Berapa lama sampai mobil diam dan selama mengerem mobil masih bergerak berapa jauh ?

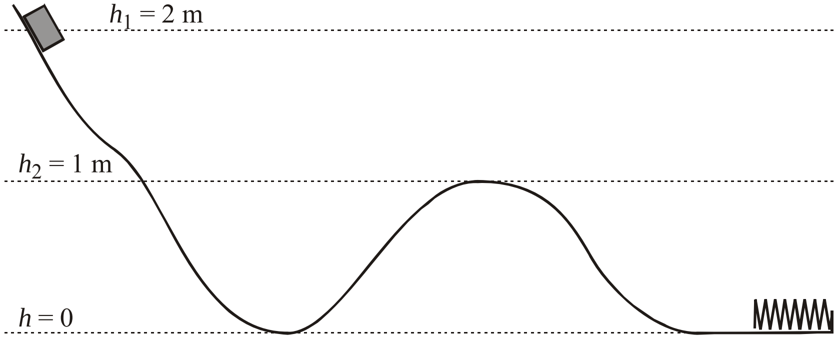
8 Energi dan Potensial

8.1. Satu benda dengan massa $\boldsymbol{m = 2}$ **kg** ditarik sejauh $\boldsymbol{l = 10}$ **m** di atas lantai mendatar dengan kecepatan konstan sebesar $\boldsymbol{v = 0{,}5\,\frac{m}{det}}$. Gaya gesekan sebesar $\boldsymbol{F = 4}$ **N**.

a. Berapa besar usaha total yang dikerjakan kepada benda ini ?
b. Berapa besar daya yang dikerjakan kepada benda ini pada setiap waktu ?
c. Berapa besar penambahan energi benda ini selama pergeseran tersebut ?

8.2. Satu benda, massa sebesar $\boldsymbol{m = 5}$ **kg**, dipercepat dari keadaan diam sampai kecepatan sebesar $\boldsymbol{v = 20\,\frac{m}{det}}$ dengan percepatan konstan. Percepatan sebesar $\boldsymbol{a = 2\,\frac{m}{det^2}}$. Tidak ada gesekan.

a. Berapa besar usaha yang harus diberikan kepada benda ini ?
b. Berapa lama sampai percepatan ini selesai ?
c. Berapa besar daya rata-rata selama benda dipercepat ?



Gambar 8.1.: *soal 8.3.*

d. Berapa besar daya yang diberikan kepada benda ini pada setiap saat $\boldsymbol{t}$ dari awal benda dipercepat sampai akhir benda dipercepat ? ($P(t) = ?$)

8.3. Satu balok dengan massa $\boldsymbol{m} = \mathbf{2\ kg}$ bisa meluncur di relnya tanpa gesekan. Bentuk rel seperti dalam gambar 8.1. Pada awal tinggi balok sebesar $\boldsymbol{h_1} = \mathbf{2\ m}$. Lalu turun ke tinggi nol dan kemudian naik lagi ke tinggi $\boldsymbol{h_2} = \mathbf{1\ m}$, kemudian turun lagi ke tinggi nol dan di situ kena satu pegas yang ditekan oleh balok. Konstanta pegas sebesar $\boldsymbol{k} = \mathbf{5\ \frac{N}{cm}}$. Pakailah azas kekekalan energi untuk menjawab pertanyaan a, b dan d.

a. Berapa besar kecepatan balok ketika turun sampai ketinggian $\boldsymbol{h_2} = \mathbf{1\ m}$, ketika berada pada tinggi nol dan berapa ketika kemudian sudah naik lagi ke posisi rel yang setinggi $\boldsymbol{h_2} = \mathbf{1\ m}$, berapa sebelum kena pegas ?

b. Pegas akan ditekan berapa jauh ?

c*. Jari- jari pada lengkung ke atas yang naik kembali ke tinggi $\boldsymbol{h_2}$ pada puncaknya maksimal berapa besar supaya balok tidak lompat ke luar dari jalurnya ?

d. Bagaimana gerakan balok selanjutnya ? Apakah akan kembali ? Pada berbagai posisi akan memiliki kecepatan berapa besar ? Akan kembali naik sampai ke mana ? Bagaimana gerakan balok ketika kembali dibandingkan gerakannya ketika turun ? Apa yang akan terjadi kalau sistem ini dibiarkan terus ?

8.4. Satu benda, massa $\boldsymbol{m} = \mathbf{2\ kg}$ digantungkan pada pegas dengan koefisien Hook sebesar $\boldsymbol{k} = \mathbf{2\ \frac{N}{cm}}$.

a. Gambarkanlah fungsi potensial benda dalam gaya gravitasi terhadap tempat.

b. Gambarkanlah fungsi potensial benda dalam gaya pegas terhadap tempat.

c. Gambarlah fungsi untuk potensial total terhadap tempat dari benda ini.
d. Posisi benda akan di mana ? Mengapa ?

9 Mekanika Fluida

9.1. Satu dongkrak mobil mempunyai silinder pompa dengan diameter sebesar $\boldsymbol{d_p}$ **= 2 cm**. Panjang dari silinder pompa sebesar $\boldsymbol{p}$ **= 10 cm**. Poros dari tuas pompa sejauh $\boldsymbol{l_1}$ **= 10 cm** dari silinder dan orang memegang tuas sejauh $\boldsymbol{l_2}$ **= 60 cm** dari porosnya. Diameter dari silinder yang mengangkat mobil sebesar $\boldsymbol{d}$ **= 10 cm**. Mobil yang diangkat mempunyai massa sebesar $\boldsymbol{m}$ **= 700 kg**. Tetapi mobil diangkat hanya pada satu sisi sehingga hanya separuh dari berat mobil dikenai dongkrak.

a. Berapa besar tekanan oli dalam dongkrak ?

b. Berapa besar gaya yang harus dikerjakan pada silinder pompa ?

c. Dengan satu kali menurunkan silinder pompa sejauh panjang silindernya, mobil diangkat berapa tinggi ?

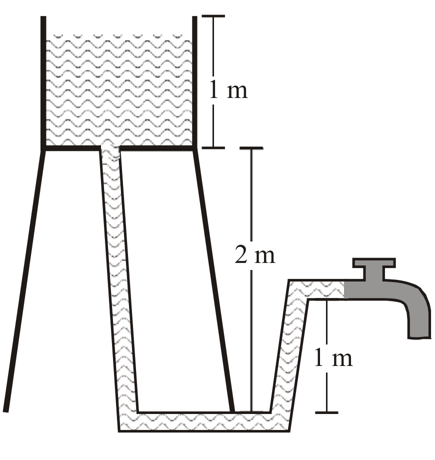
d. Berapa besar gaya yang harus dikenai tuas pompa ?

9.2. Sebuah manometer U diisi air raksa (Hg). Beda tinggi antara permukaan air raksa sebesar $\boldsymbol{\Delta h = 2\ \mathrm{cm}}$. Massa jenis air raksa sebesar $\rho_{air\ raksa} = \mathbf{13{,}53\ \frac{g}{cm^3}}$

a. Berapa besar beda tekanan antara dua sisi manometer ?

b. Manometer U yang diisi air akan menunjukkan beda tinggi berapa pada beda tekanan yang sama besar ? $\left(\rho_{air} = \mathbf{1\ \frac{g}{cm^3}}\right)$

9.3. Satu tandon air dipasang setinggi $\boldsymbol{h_1}$ **= 2 m** di atas lantai rumah. Tandon sendiri setinggi $\boldsymbol{h_2}$ **= 1 m**. Suatu kran dalam rumah berada pada posisi setinggi $\boldsymbol{h_3}$ **= 1 m** di atas lantai. Pipa dari tandon sampai ke kran sepanjang $\boldsymbol{l}$ **= 15 m**. Ukuran pipa ½ inch. (1 inch = 2,54 cm; ukuran pipa menunjukkan diameter dalam.) Viskositas air



Gambar 9.1: *Soal 9.3.*

sebesar η = $\mathbf{0{,}001\ \frac{N\cdot det}{m^2}}$. Massa jenis air sebesar ρ_{air} = $\mathbf{1\ \frac{g}{cm^3}}$.

a. Berapa besar tekanan air pada kran ketika tandon penuh ? Kran sedang dalam keadaan tertutup, berarti tidak ada aliran air.

b. Berapa besar tekanan air pada kran ketika tandon hampir kosong ? Kran sedang dalam keadaan tertutup, berarti tidak ada aliran air.

c. Aliran dalam pipa dianggap aliran laminar dan kran dianggap tidak menghambat aliran air ke luar, berarti tekanan air pada kran sebesar tekanan udara. Ketika tandon masih penuh dan air sudah mengalir (tidak perlu dipercepat lagi), satu timba sebesar V = **15 l** perlu diisi. Waktu t untuk mengisi timba tersebut berapa lama ?

d. Seandainya pipa adalah pipa ukuran 1 inch, waktu t untuk mengisi timba 15 l berapa ?

9.4. Satu balok es terapung dalam suatu gelas air yang penuh - air hampir meluap. Kemudian es mencair.

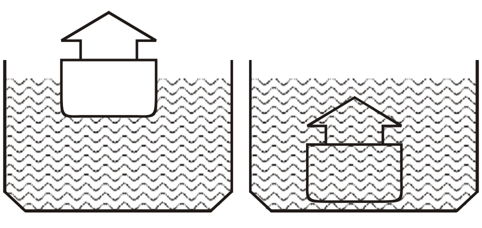
a. Apakah air akan meluap? Mengapa?

b. Kalau tidak: Apakah permukaan air akan turun? Mengapa?

9.5. Satu kanal menyeberangi satu lembah. Untuk penyeberangan ini dibuatkan jembatan dan kanal berada dalam jembatan. Kuat jembatan cukup untuk membawa berat dari massa sebesar m = **20.000 ton** selain beratnya sendiri. Di dalam jembatan adalah air sebanyak V_{air} = $\mathbf{18.000\ m^3}$.

a. Kalau satu kapal lewat jembatan itu massa kapal maksimal berapa besar ? Apakah kapal boleh lebih dari 2.000 ton ?

9.6. Satu perahu terapung dalam bak tertutup. (gambar 9.2.) Tiba-tiba perahu bocor dan tenggelam. Bagaimana tinggi air dalam bak berubah? (Tetap, turun atau naik ?)



Gambar 9.2.: *Soal 9.6.*

9.7. Suatu benda terdiri dari bahan yang homogen (massa jenis sama pada setiap bagian) dan memiliki bentuk balok dengan ukuran l = **1 m**, b = **50 cm**, h = **20 cm**. Benda ini terapung dalam air $\left(\rho = \mathbf{1\ \frac{g}{cm^3}}\right)$. Posisi benda ternyata menjadi mendatar, berarti sisi yang paling pendek memiliki arah tegak lurus ke atas. Benda masuk sejauh h_d = **18 cm** ke dalam air.

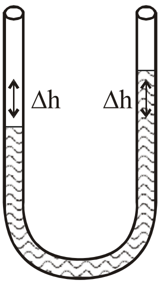
a. Massa jenis benda berapa ?

b. Mengapa posisinya menjadi mendatar ?

9.8. Dalam satu pipa U adalah cairan. Cairan itu bisa bergerak tanpa gesekan. Jadi cairan itu bisa berayun. Maksudnya: cairan bisa naik di sebelah kanan dan turun di sebelah kiri, kemudian kembali dan naik di sebelah kiri dan turun di sebelah kanan, kembali lagi dan seterusnya. Massa jenis cairan sebesar $\rho = \mathbf{1\,\frac{g}{cm^3}}$ Panjang bagian pipa yang diisi air sebesar $\boldsymbol{L} = \mathbf{40\ cm}$. Luas pipa sebesar $\boldsymbol{A} = \mathbf{2\ cm^2}$.

a. Apakah ayunan itu selaras?

b. Berapa besar waktu periode T ?



Gambar 9.3.:
Soal 9.8.

9.9. Terdapat pipa kapiler dengan diameter $\boldsymbol{d} = \mathbf{2\ mm}$. Pipa ini dimasukkan ke dalam air. Sudut antara permukaan air dan kaca menjadi $\boldsymbol{\Theta = 0}$. Tegangan permukaan antara air dan udara sebesar $\boldsymbol{\sigma = 0{,}0729\,\frac{N}{m}}$.

Massa jenis air sebesar $\rho = \mathbf{1\,\frac{g}{cm^3}}$.

a. Air akan naik berapa tinggi dalam pipa ?

b. Air naik berapa tinggi kalau permukaan kaca berbeda sehingga terdapat sudut sebesar $\boldsymbol{\Theta = 30^o}$.

9.10. Terdapat pipa kapiler dengan diameter $\boldsymbol{d} = \mathbf{2\ mm}$. Pipa ini dimasukkan ke dalam air raksa. Sudut antara permukaan air raksa dan kaca menjadi 0 ke bawah. Tegangan permukaan antara air raksa dan udara sebesar $\boldsymbol{\sigma = 0{,}471\,\frac{N}{m}}$. Massa jenis air raksa sebesar $\rho = \mathbf{13{,}53\,\frac{g}{cm^3}}$.

a. Air raksa akan turun berapa jauh dalam pipa ?