

BAB I BESARAN & PENGUKURAN

Fisika berasal dari bahasa Yunani, *physikos* yang berarti ‘alamiah’. Karena itu Fisika merupakan suatu ilmu pengetahuan dasar yang mempelajari gejala-gejala alam dan interaksinya yang terjadi di alam semesta ini. Hal-hal yang dibicarakan di dalam fisika, selalu didasarkan pada pengamatan eksperimental dan pengukuran yang bersifat kuantitatif.

Fisika terbagi atas dua bagian yaitu :

1. Fisika klasik yang meliputi bidang : Mekanika, Listrik Magnet, Panas, Bunyi, Optika dan Gelombang.
2. Fisika Modern adalah perkembangan Fisika mulai abad 20 yaitu penemuan Relativitas Einstein.

Ilmu Fisika mendukung perkembangan teknologi, engineering, kedokteran dan lain-lain.

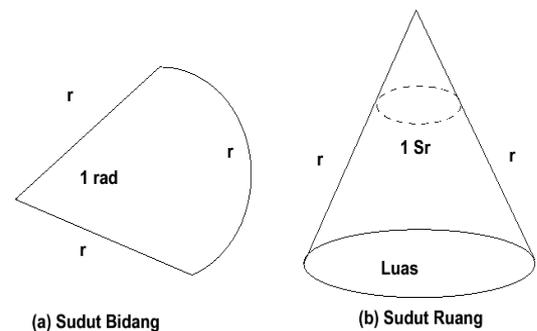
Untuk menggambarkan suatu fenomena yang terjadi atau dialami suatu benda, diperlukan pengukuran berbagai besaran-besaran fisika. Mengukur berarti membandingkan sesuatu besaran yang diukur dengan besaran standar yang telah didefinisikan sebelumnya. Besaran-besaran fisika ini misalnya panjang, jarak, massa, waktu, gaya, kecepatan, temperatur, intensitas cahaya, dan sebagainya.

Besaran Pokok

Besaran Pokok adalah besaran yang tidak tergantung pada besaran yang lain. Menurut Sistem International(SI) 1960, “*Bureau of Weight and Measures*”(Paris), besaran pokoknya adalah:

Tabel 1.1 Besaran pokok: simbol & satuan

Besaran	Simbol	Satuan
Panjang	<i>l</i>	m-meter
Massa	<i>m</i>	kg-kilogram
Waktu	<i>t</i>	s-detik
Arus Listrik	<i>I</i>	A-ampere
Temperatur	<i>T</i>	K-kelvin
Intensitas Cahaya	<i>Lc</i>	Cd-candela
Banyak Zat	<i>N</i>	Mol



Gambar 1.1 Dua besaran tambahan

Selain besaran pokok ada juga besaran yang melengkapi besaran pokok yaitu **sudut bidang** dalam Radian(Rad) dan **sudut ruang** dalam Steradian(Sr). Sudut terbesar pada sudut bidang adalah 4 rad dan sudut terbesar pada sudut ruang adalah 4 Sr .

Besaran Turunan

Besaran turunan adalah besaran yang diturunkan dari besaran pokok. Besaran turunan antara lain : Kecepatan, Percepatan, Gaya, Momentum dan Impuls, Energi dan Kerja, Gaya Listrik dan Magnetik, Medan Listrik, dan Magnetik, Potensial listrik dan Induksi magnetik, dsb

Satuan

Satuan adalah ukuran dari suatu besaran. Ada dua macam bentuk satuan yaitu : Metrik dan non-Metrik masing-masing terdiri atas sistem statik dan dinamik.

- Sistem statik terdiri atas sistem gravitasi dan sistem teknis (praktis) seperti *meter-kilogram-sekon* dan *ft-lbwt-sec/ft-lbf-sec*.
- Sistem dinamik terdiri: sistem **cgs**(*cm-gram-sekon*) dan **mks**(*meter-kilogram-sekon*).
- Satuan Internasional adalah Sistem MKS yang telah disempurnakan, yaitu:
 - **Meter**: satu meter adalah panjang lintasan cahaya di ruang vakum selama $\frac{1}{299.792.458}$ detik

- **Kilogram:** satu kilogram adalah massa kilogram berbentuk silinder yang dibuat dari bahan platina iridium (Se'vres Perancis).
- **Second:** satu detik adalah interval waktu dari 9.192.631.770 kali getar radiasi dari atom Cs¹³³
- **Ampere:** satu ampere adalah arus tetap yang terjadi bila dua konduktor lurus sejajar dengan panjang tak berhingga berjarak satu meter diletakkan dalam ruang vakum akan menghasilkan gaya antara dua konduktor sebesar 2×10^{-7} N .
- **Kelvin:** satu kelvin adalah $\frac{1}{273}$ bagian dari temperatur termodinamis dari titik triple air.
- **Candela:** satu candela adalah kuat penerangan tegak lurus permukaan yang luasnya $\frac{1}{600000} m^2$ dari sebuah benda hitam pada titik beku platina (2046.65 K) dan tekanan 1 atm.

Tabel 1.2. Contoh pengukuran massa

Benda	Massa (kg)
Alam semesta	1×10^{52}
Matahari	2×10^{30}
Bumi	6×10^{24}
Bulan	7×10^{22}
Bakteri	1×10^{-15}
Atom Hidrogen	1.67×10^{-27}
Elektron	9.11×10^{-31}

Dimensi

Dimensi adalah penulisan suatu formula fisika menggunakan besaran-besaran pokok, seperti Massa [M], Panjang [L], Waktu [T], Temperatur [θ], Arus listrik [I].

Tabel 1.3 Contoh Dimensi

Besaran	Dimensi
Kecepatan	LT^{-1}
Percepatan	LT^{-2}
Gaya	MLT^{-2}
Energi	ML^2T^{-2}
Momentum	MLT^{-1}

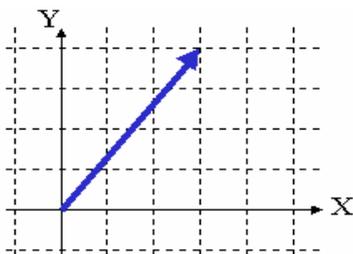
Dimensi suatu besaran menunjukkan cara besaran itu tersusun dari besaran pokok. Dimensi suatu besaran dinyatakan dengan lambang huruf dan diberi tanda kurung persegi. Dengan mengetahui dimensi dan satuan dari besaran-besaran pokok, dan menggunakan analisis dimensional dapat ditentukan dimensi dan satuan dari besaran turunan.

Kegunaan Dimensi : (1).Membuktikan dua besaran fisis setara atau tidak; (2) Menentukan persamaan yang pasti salah atau mungkin benar; dan (3) Menurunkan persamaan

suatu besaran fisis jika kesebandingan besaran fisis tersebut dengan besaran-besaran fisis lainnya diketahui.

Vektor dan Skalar

Dalam mempelajari fisika kita selalu berhubungan dengan besaran, yaitu sesuatu yang dapat diukur dan dioperasikan. Ada besaran yang cukup dinyatakan dengan nilai (*magnitude*) dan satuannya saja. Besaran ini disebut skalar. Contoh: massa, waktu, laju, kerja dan energi. Ada juga besaran yang disamping nilai dan satuannya perlu juga dinyatakan arahnya (*direction*). Besaran ini disebut vektor. Contoh: posisi, perpindahan, kecepatan, percepatan, gaya, berat, dan momentum.



Gambar 1.2 grafik vektor

Besaran vektor dituliskan dengan tanda panah diatas besaran tersebut (\vec{A}) atau dengan huruf tebal (**A**). Besar atau nilai dinyatakan dengan harga mutlaknya, $|A|$.

Vektor dapat direpresentasikan secara grafik dengan menggunakan anak panah, dimana arah anak panah menyatakan arah vektor tersebut, dan panjang anak panah sebanding dengan nilai vektornya. Titik pangkal vektor disebut titik tangkap vektor, dan garis yang berimpit dengan vektor disebut garis kerja vektor.

Penjumlahan dan pengurangan vektor

Mencari resultan dari beberapa buah vektor, berarti mencari sebuah vektor baru yang dapat menggantikan vektor-vektor yang dijumlahkan(dikurangkan).

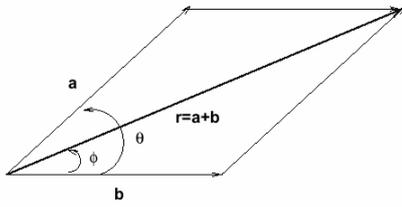
$$\vec{a} = a\hat{i} + a\hat{j} + a\hat{k} \text{ dan } \vec{b} = b\hat{i} + b\hat{j} + b\hat{k} \dots\dots\dots(1-1)$$

maka penjumlahan vektor dan vektor adalah

$$\vec{A} + \vec{B} = (\vec{A} + \vec{B})\hat{i} + (\vec{A} + \vec{B})\hat{j} + (\vec{A} + \vec{B})\hat{k} \dots\dots\dots(1-2)$$

Untuk penjumlahan atau pengurangan vektor, ada beberapa metode, yaitu:

1. Metode jajaran genjang



Gambar 1.3 Resultan vektor dengan metode jajaran genjang

Besarnya vektor :

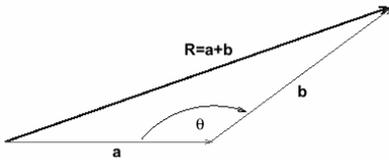
$$|\vec{R}| = |\vec{a} + \vec{b}| = \sqrt{|\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 + 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta}$$

Arah vektor **R** dapat ditentukan oleh sudut antara **R** dan **a** atau **b** misalkan ϕ maka

$$\frac{|\vec{b}|}{\sin\phi} = \frac{|\vec{a} + \vec{b}|}{\sin(180 - \theta)} \text{ atau } \sin\phi = \frac{|\vec{b}|\sin\theta}{|\vec{a} + \vec{b}|} \dots(1.3)$$

(Aturan Sinus)

Demikian juga untuk mencari selisih vektor, tinggal memperhatikan tanda negatif untuk diterapkan di rumus, misal $a - b$ adalah $a + (-b)$



Gambar 1.4 Resultan vektor dengan metode segitiga

2. Metode segitiga

Metode ini mencari resultannya mirip dengan metode jajaran genjang yaitu

Besarnya vektor :

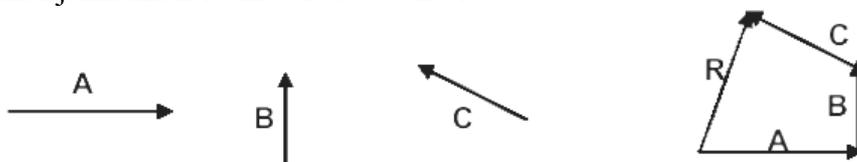
$$|\vec{R}| = |\vec{a} + \vec{b}| = \sqrt{|\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 + 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta}$$

Arah vektor **R** dapat ditentukan oleh sudut antara **R** dan **a** atau **b** misalkan ϕ maka

$$\frac{|\vec{b}|}{\sin\phi} = \frac{|\vec{a} + \vec{b}|}{\sin(180 - \theta)} \text{ atau } \sin\phi = \frac{|\vec{b}|\sin\theta}{|\vec{a} + \vec{b}|} \text{ (Aturan Sinus)}$$

3. Metode poligon (segi banyak)

Pada metode ini, tahapannya sama dengan metode segitiga, hanya saja metode ini untuk menjumlahkan lebih dari dua vektor.



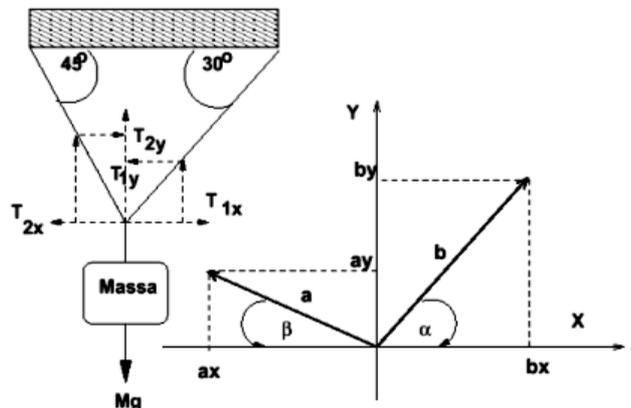
Gambar 1.5. Penjumlahan vektor dengan metode poligon, $R = A + B + C$

4. Metode uraian komponen

Setiap vektor yang akan dijumlahkan (dikurangkan diuraikan terhadap komponen-komponennya (sumbu x dan sumbu y)

Tabel 1.4 Komponen vektor dalam x,y

vektor	Komponen x	Komponen y
\vec{a}	$\vec{a}\hat{i}$	$\vec{a}\hat{j}$
\vec{b}	$\vec{b}\hat{i}$	$\vec{b}\hat{j}$
	$\vec{R}\hat{i} = \vec{a}\hat{i} + \vec{b}\hat{i}$	$\vec{R}\hat{j} = \vec{a}\hat{j} + \vec{b}\hat{j}$



Gambar 1.6 Vektor dalam komponen2nya

Besar vektor **R** :

$$|R| = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

Arah vektor **R** terhadap sumbu X positif :

$$\text{tg}\theta = \frac{R_y}{R_x} \dots\dots\dots(1-4)$$

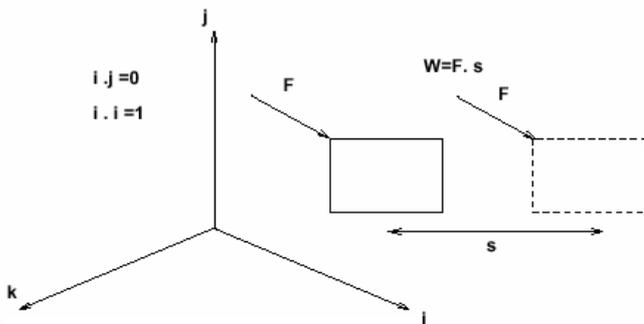
Sifat-sifat Aljabar Vektor

- 1. $A + B = B + A$ (Sifat Komutatif)
- 2. $A + (B + C) = (A + B) + C$ (Sifat Asosiatif)
- 3. $m A = A m$ (Sifat Komutatif Perkalian)
- 4. $m (A) = () A$ (Sifat Asosiatif Perkalian)
- 5. $(+ n) A = m A + n A$ (Sifat Distributif)
- 6. $m (A + B) = m A + n A$ (Sifat Distributif)

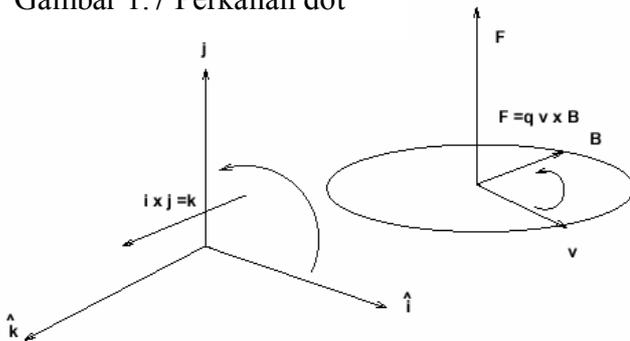
Perkalian Vektor

• Vektor dengan konstanta

$$k\vec{a} = k\vec{a}\hat{i} + k\vec{a}\hat{j} + k\vec{a}\hat{k}, k=\text{konstanta}$$



Gambar 1.7 Perkalian dot



Perkalian titik(dot product)

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}||\vec{b}| \cos(\vec{a}, \vec{b})$$

Sifat-sifat perkalian dot

- 1. $A \cdot B = B \cdot A$
- 2. $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$
- 3. $m(A \cdot B) = (mA) \cdot B = A \cdot (mB)$ m=skalar
- 4. $\hat{i} \cdot \hat{i} = \hat{j} \cdot \hat{j} = \hat{k} \cdot \hat{k} = 1; \hat{i} \cdot \hat{j} = \hat{j} \cdot \hat{k} = \hat{k} \cdot \hat{i} = 0$
- 5. $A \cdot B = 0$; A & B saling tegak lurus

Perkalian kali(cross product)

$$\vec{a} \times \vec{b} = |\vec{a}||\vec{b}| \sin(\vec{a}, \vec{b})$$

Sifat-sifat perkalian cross

- 1. $A \times B = B \times A$ (Komutatif)
- 2. $A \times (B + C) = A \times B + A \times C$ (Distributif)
- 3. $m(A \times B) = (mA) \times B = A \times (mB)$ m=skalar
- 4. $\hat{i} \times \hat{i} = \hat{j} \times \hat{j} = \hat{k} \times \hat{k} = 0$;
 $\hat{i} \times \hat{j} = \hat{k}; \hat{j} \times \hat{k} = \hat{i}; \hat{k} \times \hat{i} = \hat{j}$
- 5. $A \times B = 0$; A & B sejajar

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \vec{a}_x & \vec{a}_y & \vec{a}_z \\ \vec{b}_x & \vec{b}_y & \vec{b}_z \end{vmatrix} = (\vec{a}_y \vec{b}_z - \vec{a}_z \vec{b}_y) \hat{i} - (\vec{a}_x \vec{b}_z - \vec{a}_z \vec{b}_x) \hat{j} - (\vec{a}_x \vec{b}_y - \vec{a}_y \vec{b}_x) \hat{k} \dots\dots\dots(1.5)$$

alifis

BAB 2 KINEMATIKA

Kinematika adalah mempelajari mengenai gerak benda tanpa memperhitungkan penyebab terjadi gerakan itu. Benda diasumsikan sebagai benda titik yaitu ukuran, bentuk, rotasi dan getarannya diabaikan tetapi massanya tidak. Dalam kinematika meliputi gerak :

- **Gerak satu dimensi:** gerak lurus beraturan(glb), gerak lurus berubah beraturan(glbb), dan gerak lurus berubah tidak beraturan
- **Gerak dua dimensi:** gerak melingkar dan gerak peluru
- **Gerak tiga dimensi:** gerak benda yang mempunyai tiga komponen(x,y,z) misal gerak muatan dalam medan magnet dan medan listrik
- **Gerak relatif:** gerak benda yang diamati oleh pengamat pada saat bergerak atau diam.

Dalam kinematika besaran-besaran yang mempengaruhi gerak benda adalah: Perpindahan(*displacement*), Kecepatan(*velocity*) dan Percepatan(*accelaration*)

Gerak benda titik

Letak sebuah partikel dalam ruang dinyatakan oleh vektor posisi r . Vektor posisi ini dapat dituliskan dalam komponen-komponennya,

$$\vec{r} = r_x \vec{i} + r_y \vec{j} + r_z \vec{k} = x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k} \dots\dots\dots(2-1)$$

Bila partikel bergerak, posisinya berubah terus terhadap waktu. Jadi partikel yang bergerak memiliki vektor posisi yang merupakan fungsi waktu, demikian juga komponen-komponennya:

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k} \dots\dots\dots(2-2)$$

Misalkan pada saat t_1 partikel berada di titik 1 dengan vektor posisi $r_1 = r(t_1)$, dan pada saat t_2 benda di titik 2 dengan vektor posisi $r_2 = r(t_2)$. Perpindahan partikel dalam selang waktu ini dinyatakan dengan vektor Δr dari titik 1 ke titik 2. Vektor Δr ini disebut vektor perpindahan:

$$\Delta r = r_f - r_i$$

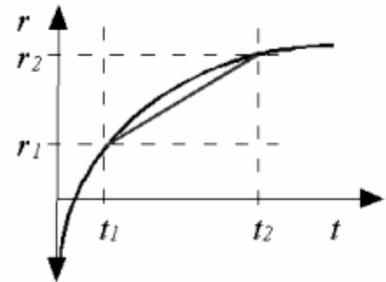
Kecepatan rata-rata adalah rasio perpindahan Δx terhadap selang waktu Δt :

$$v_{rata-rata} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

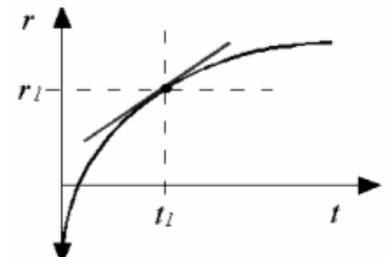
Disebut kecepatan rata-rata karena tidak menggambarkan kecepatan benda yang sesungguhnya, melainkan hanya kecepatan rata-rata selama selang waktu tersebut.

Kecepatan sesaat v adalah limit rasio ini jika selang waktu mendekati nol. Ini adalah turunan x terhadap t :

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \dots\dots\dots(2-3)$$



Gambar 2.1 . Posisi vs. waktu



Gambar 2.2 Tangen posisi vs waktu

Kecepatan sesaat ditampilkan secara grafik sebagai kemiringan kurva x terhadap t . Dalam satu dimensi, baik kecepatan rata-rata maupun kecepatan sesaat dapat bernilai positif maupun negatif. Besarnya kecepatan sesaat dinamakan kelajuan.

Percepatan rata-rata adalah rasio perubahan kecepatan Δv terhadap selang waktu Δt :

$$a_{rata-rata} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \dots\dots\dots(2-4)$$

Percepatan sesaat adalah limit rasio ini jika selang waktu mendekati nol. Percepatan sesaat adalah turunan v terhadap t , yang merupakan turunan kedua x terhadap t :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \dots\dots\dots(2-5)$$

Percepatan sesaat ditampilkan secara grafik sebagai kemiringan kurva v terhadap t . Dalam kasus istimewa percepatan konstan, berlaku rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 v &= v_0 + at \\
 x &= v_{rata-rata} t = \frac{1}{2}(v_0 + v)t \\
 x &= x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \\
 v^2 &= v_0^2 + 2a\Delta x
 \end{aligned}$$

$$\dots\dots\dots(2-6)$$

Gambar 2.3 Gerak jatuh akibat gravitasi

Perpindahan dapat ditampilkan secara grafik sebagai luas di bawah kurva v versus t . luas ini adalah integral v terhadap waktu dari saat awal t_1 sampai saat akhir t_2 dan ditulis

$$\Delta x = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \sum_i v_i \Delta t_i = \int_{t_1}^{t_2} v dt \dots\dots\dots(2-7)$$

Dengan cara sama, perubahan kecepatan selama beberapa waktu ditampilkan secara grafik sebagai luas di bawah kurva a versus t .

Gerak 2 dan 3 dimensi

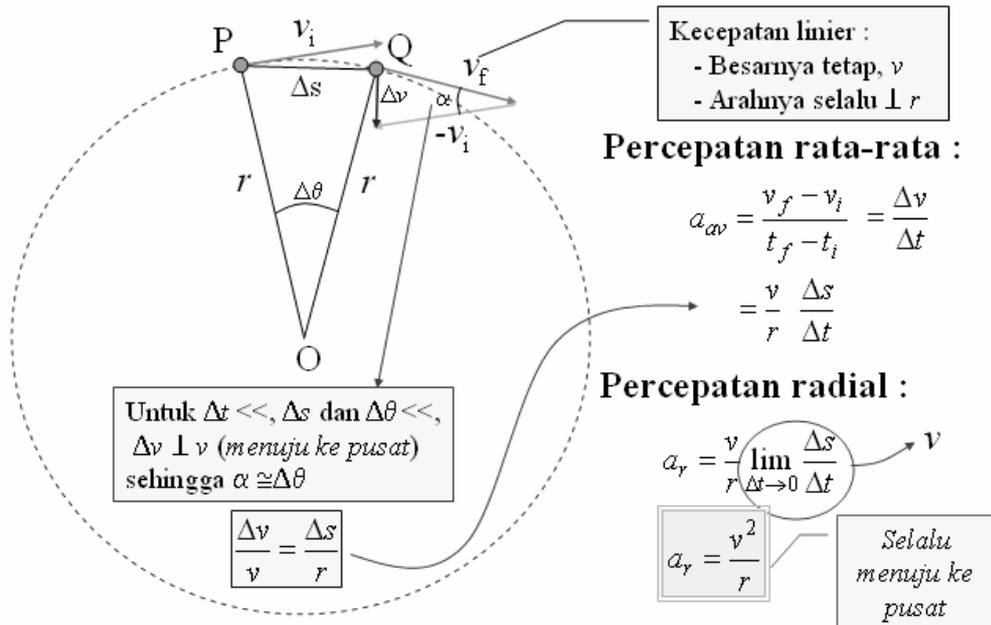
Dalam gerak 2 dan 3 dimensi, vektor posisi menunjuk dari titik asal sembarang ke posisi partikel. Dalam selang waktu Δt , \vec{r} berubah sebesar $\Delta\vec{r}$. Vektor kecepatan \vec{v} adalah laju perubahan vektor posisi. Besarnya adalah kelajuan, dan arahnya menunjuk ke arah gerakan, tangensial pada kurva yang dilewati partikel. Vektor kecepatan sesaat diberikan oleh

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \dots\dots\dots(2-8)$$

Vektor percepatan adalah laju perubahan vektor kecepatan. Vektor percepatan sesaat diberikan oleh

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \dots\dots\dots(2-9)$$

Sebuah partikel dipercepat jika vektor kecepatannya berubah besar atau arahnya, atau keduanya.



Gambar 2.4. Skematik percepatan linier & radial

Bila sebuah benda bergerak dalam sebuah lingkaran dengan kelajuan konstan, benda dipercepat karena kecepatannya berubah arah. Percepatan ini dinamakan percepatan sentripetal, dan mengarah ke pusat lingkaran. Besar percepatan sentripetal adalah

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Dengan v adalah kelajuan dan r adalah jari-jari lingkaran.

Gerak proyektil

Pada gerak proyektil, gerakan horisontal dan vertikal adalah saling bebas. Gerak horisontal mempunyai kecepatan konstan yang bernilai sama dengan komponen horisontal kecepatan awal :

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

$$\Delta x = v_{0x} t$$

Gerakan vertikal sama dengan gerakan satu dimensi dengan percepatan konstan akibat gravitasi g dan berarah ke bawah :

$$v_y = v_{0y} - gt$$

$$\Delta y = v_{0y} t - \frac{1}{2} gt^2 \dots\dots\dots(2-10)$$

$$v_{oy} = v_0 \sin \theta$$

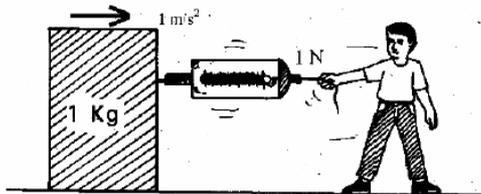
Jarak total yang ditempuh oleh proyektil, dinamakan jangkauan R , didapatkan dengan formulasi:

$$R = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta \dots\dots\dots(2-11)$$

BAB 3 DINAMIKA

Cabang dari ilmu mekanika yang mempelajari gerak partikel dengan meninjau penyebab geraknya dikenal sebagai dinamika. Dalam bab ini kita akan membahas konsep-konsep yang menghubungkan kondisi gerak benda dengan keadaan-keadaan luar yang menyebabkan perubahan keadaan gerak benda.

Gaya



Gambar 3.1. Gaya 1 Newton

Gaya 1 Newton adalah gaya yang menghasilkan percepatan 1 m/s^2 pada benda standar dengan massa 1 kilogram (kg).

Gaya dapat mengubah arah gerak suatu benda, gaya dapat mengubah bentuk suatu benda serta gaya juga dapat mengubah ukuran suatu benda dengan syarat gaya yang kita berikan cukup besar.

Gaya menyebabkan percepatan. Arah gaya searah dengan arah percepatan. Dari sini dapat disimpulkan bahwa gaya adalah besaran vektor. Disamping Newton, satuan gaya sering ditulis dalam bentuk kg m/s^2 . $1 \text{ Newton} = 1 \text{ kg m/s}^2$. Dalam sistem *cgs*, satuan gaya dinyatakan dalam 1 dyne . $1 \text{ dyne} = 1 \text{ gr cm/s}^2$

Inersia (Kelembaman)

Inersia adalah kecenderungan suatu benda untuk tetap diam atau tetap bergerak lurus dengan kecepatan tetap. Hukum Inersia menyatakan bahwa suatu benda cenderung tetap diam atau tetap bergerak dengan kecepatan tetap, asalkan tidak ada gaya yang mengganggu.

Sebuah kerangka acuan dimana hukum-hukum Newton berlaku dinamakan kerangka acuan inersia. Setiap kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif terhadap kerangka acuan inersia merupakan kerangka acuan inersia juga. Sebuah kerangka acuan yang dipercepat relatif terhadap kerangka inersia bukan kerangka acuan inersia.



Gambar 3.2. Penumpang di atas KA

Anggap bumi adalah kerangka inersia dan anda sedang berada di sebuah kereta api yang bergerak dengan kecepatan tetap v diukur oleh pengamat yang sedang di atas tanah. Sebuah benda di dalam kereta diberi gaya F . Waktu anda amati benda ini bergerak dipercepat dengan percepatan a . Berapakah percepatan benda oleh pengamat yang berdiri di atas tanah?

Karena bumi adalah kerangka inersia, maka kereta api juga adalah kerangka inersia (kereta api ini tidak bergerak dipercepat terhadap bumi). Karena semua hukum fisika berlaku dalam semua kerangka inersia, maka gaya (ataupun

percepatan) yang dialami oleh suatu benda yang diamati oleh pengamat disuatu kerangka inersia sama besar jika diamati oleh pengamat pada kerangka inersia yang lain. Jadi percepatan benda diukur oleh pengamat yang berdiri diatas tanah adalah a .



Gambar 3.3. Inersia pada dua benda yang berbeda jenis

Misalkan kita mempunyai 2 benda berukuran sama dalam keadaan diam. Yang satu terbuat besi dan yang lain dari kayu.

Jika kita ingin menggerakkan benda ini, kita membutuhkan gaya yang lebih besar untuk besi dibandingkan kayu. Hal ini disebabkan besi mempunyai inersia (kecenderungan untuk tetap diam) yang besar dibandingkan kayu, akibatnya untuk menggerakkan benda yang lebih besar inersianya dibutuhkan gaya yang lebih besar. (Catatan: pengertian inersia sebenarnya bukan untuk benda yang diam saja, tapi juga untuk benda yang bergerak dengan kecepatan tetap). Massa inersia (atau lebih dikenal dengan massa) didefinisikan sebagai ukuran inersia.

Hukum-Hukum Newton

Hubungan fundamental pada mekanika klasik tercakup dalam hukum tentang gerak yang dikemukakan oleh Isaac Newton, seorang ilmuwan Inggris. Newton sangat berjasa dalam mempelajari hubungan antara gaya dan gerak.

Hukum 1. Sebuah benda terus berada pada keadaan awalnya yang diam atau bergerak dengan kecepatan konstan kecuali benda itu dipengaruhi oleh gaya yang tak seimbang, atau gaya luar neto. Secara sederhana Hukum Newton I mengatakan bahwa percepatan benda nol jika gaya total (gaya resultan) yang bekerja pada benda sama dengan nol. Secara matematis dapat ditulis.

$$\Sigma F = 0 \dots\dots\dots(3-1)$$

Sebenarnya pernyataan hukum Newton I atau sering disebut hukum Inersia sudah pernah dinyatakan oleh Galileo Galilei beberapa tahun sebelum Newton lahir. Galileo mengatakan: Kecepatan yang diberikan pada suatu benda akan tetap dipertahankan jika semua gaya penghambatnya dihilangkan.

Jadi dapat disimpulkan bahwa bila pengaruh luar pada sebuah benda benar-benar dihilangkan, maka sebuah benda akan tetap diam bila pada mulanya diam, dan akan tetap bergerak dengan kecepatan konstan, bila pada mulanya bergerak dengan kecepatan konstan.

Hukum 2. Percepatan sebuah benda berbanding terbalik dengan massanya dan sebanding dengan gaya neto yang bekerja padanya :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{neto}}{m} \dots\dots\dots(3-2)$$

Bayangkan anda mendorong sebuah benda yang gaya F dilantai yang licin sekali sehingga benda itu bergerak dengan percepatan a. Menurut hasil percobaan, jika gayanya diperbesar 2 kali ternyata percepatannya menjadi 2 kali lebih besar. Demikian juga jika gaya diperbesar 3 kali percepatannya lebih besar 3 kali lipat. Dan sini kita simpulkan bahwa percepatan sebanding dengan resultan gaya yang bekerja.

Atau $\vec{F}_{neto} = m\vec{a} \dots\dots\dots(3-3)$

Sekarang kita lakukan percobaan lain. Kali ini massa bendanya divariasasi tetapi gayanya dipertahankan tetap sama. Jika massa benda diperbesar 2 kali, ternyata percepatannya menjadi 1/2 kali. Demikian juga jika massa benda diperbesar 4 kali, percepatannya menjadi 1/4 kali percepatan semula. Dan sini kita bisa simpulkan bahwa percepatan suatu benda berbanding terbalik dengan massa benda itu.

Massa adalah sifat intrinsik dari sebuah benda yang menyatakan resistensinya terhadap percepatan. Massa sebuah benda dapat dibandingkan dengan massa benda lain dengan menggunakan gaya yang sama pada masing-masing benda dan dengan mengukur percepatannya. Dengan demikian rasio massa benda-benda itu sama dengan kebalikan rasio percepatan benda-benda itu yang dihasilkan oleh gaya yang sama :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

Hukum Newton kedua lebih awal dimaknai sebagai pengaruh luar (gaya) yang bekerja pada sebuah benda sebanding dengan laju perubahan kuantitas gerak terhadap waktu. Kuantitas gerak disini adalah besaran vektor suatu benda yang tergantung pada massa inersia dan kecepatan benda, yaitu 'momentum' ($\vec{p} \equiv mv$)' Sehingga,

$$\vec{F}_{neto} = \frac{d\vec{p}}{dt} \dots\dots\dots(3-4)$$

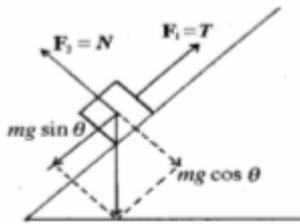
Sedangkan hukum Newton pertama adalah kasus khusus ketika tidak ada pengaruh luar pada sebuah benda, atau ketika gayanya sama dengan nol.

Hukum 3. Gaya-gaya selalu terjadi berpasangan. Jika benda *A*, mengerjakan sebuah gaya pada benda *B*, gaya yang sama besar dan berlawanan arah dikerjakan oleh benda *B* pada benda *A*.

$$\vec{F}_{aksi} = \vec{F}_{reaksi} \dots\dots\dots(3-5)$$

\vec{F}_{aksi} = gaya yang bekerja pada benda
 \vec{F}_{reaksi} = gaya reaksi benda akibat gaya aksi

Hukum ketiga menyatakan bahwa tidak ada gaya timbul di alam semesta ini, tanpa keberadaan gaya lain yang sama dan berlawanan dengan gaya itu. Jika sebuah gaya bekerja pada sebuah benda (aksi) maka benda itu akan mengerjakan gaya yang sama besar namun berlawanan arah (reaksi). Dengan kata lain gaya selalu muncul berpasangan. Tidak pernah ada gaya yang muncul sendirian!



Gambar 3.4. Pasangan gaya

Perhatikan Gambar 3.4!

Jika diambil sumbu x sepanjang bidang miring dan sumbu y tegak lurus bidang miring. Komponen x dan y persamaan di atas adalah, $F_x = T - m g \sin \theta = 0$;

$$F_y = T - m g \cos \theta = 0$$

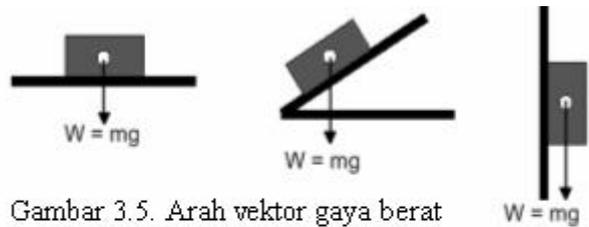
Analisis gaya-gaya analogi pada gambar 3.4 selalu tidak melepaskan gaya muncul sendirian.

Jenis-jenis Gaya

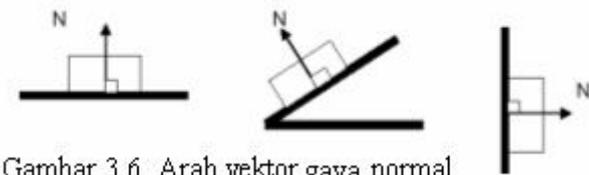
1. Gaya Berat

Berat \vec{w} sebuah benda adalah gaya tarikan gravitasi antara benda dan bumi. Gaya ini sebanding dengan massa *m* benda itu dan medan gravitasi *g*, yang juga sama dengan percepatan gravitasi jatuh bebas : $\vec{w} = m\vec{g}$

Berat benda sifat intrinsik benda. Berat bergantung pada lokasi benda, karena *g* bergantung pada lokasi. Gaya berat selalu tegak lurus kebawah dimana pun posisi benda diletakkan, apakah dibidang horisontal, vertikal ataupun bidang miring



Gambar 3.5. Arah vektor gaya berat



Gambar 3.6. Arah vektor gaya normal

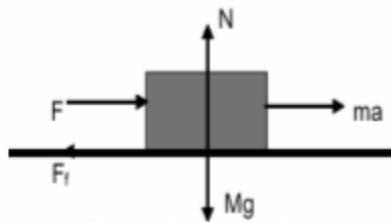
2. Gaya Normal

Gaya normal adalah gaya yang bekerja pada bidang sentuh antara dua permukaan yang bersentuhan, dan arahnya selalu tegak lurus bidang sentuh.

3. Gaya Gesek

Bila dua benda dalam keadaan bersentuhan, maka keduanya dapat saling mengerjakan gaya gesekan. Gaya-gaya gesekan itu sejajar dengan permukaan benda-benda di titik persentuhan.

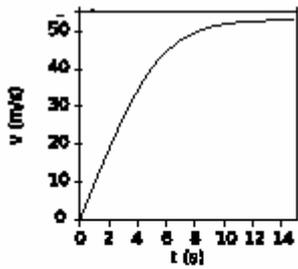
Jika permukaan-permukaan itu relatif diam yang satu terhadap yang lain, gaya gesekannya adalah gesekan statik, yang dapat berubah nilainya dari 0 sampai nilai maksimumnya $\mu_k F_n$, dengan F_n adalah gaya kontak normal dan μ_k adalah koefisien gesekan kinetik. Koefisien gesekan kinetik sedikit lebih kecil dibandingkan koefisien gesekan statik. Arah gaya gesekan ini selalu sepanjang bidang sentuh dan berusaha melawan gerak relatif bidang sentuhnya.



Gambar 3.7. Arah vektor gaya gesek

Jika sebuah benda bergerak dalam fluida seperti udara atau air, benda mengalami gaya hambat yang melawan gerakannya. Gaya hambat membesar dengan bertambahnya kelajuan. Jika benda dijatuhkan dari keadaan diam, kelajuannya bertambah sampai gaya hambat sama dengan gaya gravitasi, setelah itu benda bergerak dengan kelajuan konstan yang dinamakan kelajuan terminal. [lihat gambar 3.8]

Dalam menerapkan hukum Newton pada soal-soal dengan dua benda atau lebih, diagram benda bebas harus digambarkan untuk tiap benda. $\vec{F}_{neto} = m\vec{a}$ harus diterapkan pada tiap benda secara terpisah.



Gambar 3.8. Kec. terminal



Gambar 3.9. Gaya tegangan tali

4. Gaya Tegang Tali

Gaya tegangan tali disebut juga tegangan tali adalah gaya yang bekerja pada ujung-ujung tali karena tali itu tegang. Jika tali dianggap ringan maka gaya tegangan tali pada kedua ujung tali yang sama dianggap sama besarnya.

5. Gaya Pegas

Sebuah pegas ideal bila diregangkan atau ditekan akan memberikan gaya yang sebanding dengan besar perubahan panjang pegas. Gaya yang diberikan oleh pegas adalah

$\Delta\vec{x}$ adalah vektor besar perubahan panjang pegas dan tanda negatif pada persamaan di atas menunjukkan arah gayanya yang berlawanan dengan arah perubahan panjang pegas. Konstanta kesebandingan k disebut juga

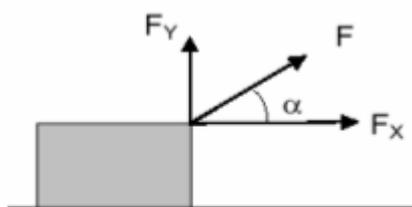
sebagai konstanta pegas. Kebanyakan pegas real akan mengikuti persamaan diatas untuk nilai $\Delta\vec{x}$ yang cukup kecil.

alifis

**BAB 4
USAHA DAN ENERGI**

Konsep fisika dalam dinamika yang juga dapat digunakan untuk mengetahui keadaan gerak suatu benda yang menghubungkan pengaruh luar (gaya) dengan keadaan gerak benda, selain hukum Newton adalah konsep usaha (kerja) dan energi (tenaga). Bedanya dengan konsep hukum newton, usaha dan energi adalah besaran skalar. Karena itu, untuk beberapa kasus, konsep usaha-energi dapat lebih mudah digunakan untuk mengetahui keadaan gerak suatu benda akibat pengaruh luar (gaya).

Usaha



Gambar 4.1 Gaya & perpindahan

Usaha yang dilakukan oleh gaya konstan adalah hasil kali skalar vektor gaya dan vektor perpindahan benda, hasil kali komponen gaya dalam arah gerakan dan besar perpindahan titik tangkap gaya tersebut :

$$W = F \cos \theta \Delta x = F_x \Delta x \dots\dots\dots(4-1)$$

dengan θ adalah sudut antara vektor gaya dan vektor perpindahan benda.

Usaha yang dilakukan gaya yang berubah-ubah, sama dengan luas daerah di bawah kurva gaya terhadap jarak :

$$W = \int_a^b F_x dx \dots\dots\dots(4-2)$$

= luas daerah di bawah kurva F_x terhadap x

Teorema Usaha-Energi

Usaha yang dilakukan pada sebuah partikel oleh gaya untuk perpindahan $d\vec{s}$ yang kecil dituliskan sebagai

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

dan usaha yang dilakukan pada partikel yang bergerak dari titik 1 ke titik 2 adalah

$$W = \int_{S_1}^{S_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

atau menurut komponen produk skalarnya,

$$W = \int_a^b (F_x dx + F_y dy + F_z dz) \dots\dots\dots(4-3)$$

Untuk memudahkan analisa, kita tinjau komponen x saja, karena analisa untuk komponen lainnya serupa. Diketahui bahwa:

$$F_x = m \frac{dv_x}{dt} = m \frac{dv_x}{dx} \frac{dx}{dt} = mv_x \frac{dv_x}{dx} \dots\dots\dots(4-4)$$

Pada akhirnya,

$$W_{tot} = \int_a^b m(v_x dv_x + v_y dv_y + v_z dv_z) \\ = \frac{1}{2} m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \Big|_a^b = \frac{1}{2} m(v_b^2 - v_a^2) \dots\dots\dots(4-5)$$

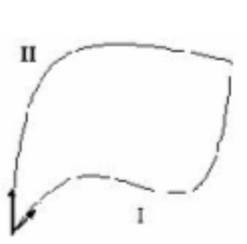
Jadi nilai total usaha bergantung pada suatu kuantitas akhir dan awal, yaitu selisih besar kuadrat kecepatan akhir dan awal dikali setengah massa. Kuantitas ini kemudian diberi nama energi, dan karena kuantitas ini bernilai tidak nol ketika kecepatannya tidak nol, maka diberi nama energi kinetik ($K = \frac{1}{2}mv^2$). Jadi total usaha yang bekerja pada suatu benda sama dengan perubahan energi kinetiknya.

$$W_{total} = \Delta K = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 \dots\dots\dots(4-6)$$

Satuan SI kerja dan energi adalah joule (J) : 1 J = 1 N.m

Gaya Konservatif

Gaya konservatif ~ F adalah gaya yang memenuhi sifat: Usaha yang dilakukan oleh gaya konservatif hanya bergantung pada posisi awal dan akhir benda, dan tidak bergantung pada lintasan perpindahan benda. Karena itu pula untuk lintasan yang berbentuk melingkar (kembali ke posisi awal) nilai usaha yang dilakukan oleh gaya konservatif selalu nol. Lihat



Gambar 4.2 lintasan I & II konservatif

gambar, Jadi untuk gaya konservatif, kedua lintasan I dan II menghasilkan nilai usaha yang sama.

$$W_k = \int_a^b \vec{F}_k \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{F}_k \cdot d\vec{s} \text{ dan } \oint \vec{F}_k \cdot d\vec{s} = 0$$

Energi potensial sebuah sistem adalah energi yang berhubungan dengan konfigurasi sistem. Perubahan energi potensial sistem didefinisikan sebagai negatif usaha yang dilakukan oleh gaya konservatif yang bekerja pada sistem :

$$dU = -\vec{F} \cdot d\vec{s} \\ \Delta U = U_2 - U_1 = -W = -\int_{S_1}^{S_2} \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

Usaha yang dilakukan pada sebuah sistem oleh gaya konservatif sama dengan berkurangnya energi potensial sistem. Nilai absolut energi potensial tidak penting. Hanya perubahan energi potensial yang penting.

Energi potensial gravitasi sebuah benda bermassa *m* pada ketinggian *y* di atas suatu titik acuan adalah :

$$U = mgy \dots\dots\dots(4-7)$$

Energi potensial pegas dengan konstanta gaya *k* ketika pegas diregangkan atau dikompresi sejauh *x* dari titik keseimbangan diberikan oleh :

$$U = \frac{1}{2}kx^2 \dots\dots\dots(4-8)$$

Dalam satu dimensi, sebuah gaya konservatif sama dengan negatif turunan fungsi energi potensial yang terkait :

$$F_x = -\frac{dU}{dx}$$

Pada nilai minimum kurva energi potensial sebagai fungsi perpindahan, gaya sama dengan nol dan sistem ada dalam keseimbangan stabil. Pada maksimum, gaya sama dengan nol dan sistem ada dalam kesetimbangan tak stabil. Sebuah gaya konservatif selalu cenderung mempercepat partikel ke arah posisi dengan energi potensial lebih rendah.

Jika hanya gaya konservatif yang melakukan usaha pada sebuah benda, jumlah energi kinetik dan energi potensial benda tetap konstan :

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 + U = \text{konstan} \dots\dots\dots(4-9)$$

Ini adalah hukum kekekalan energi mekanik.

Usaha yang dilakukan oleh gaya tak konservatif yang bekerja pada sebuah partikel sama dengan perubahan energi mekanik total sistem :

$$W_{nc} = \Delta(U + K) = \Delta E \quad (\text{teorema usaha-energi umum})$$

Kekekalan energi mekanik dan teorema usaha-energi umum dapat digunakan sebagai pilihan selain hukum Newton untuk memecahkan soal-soal mekanika yang membutuhkan penentuan kelajuan partikel sebagai fungsi posisinya.

Daya

Daya adalah laju alih energi dari satu sistem ke sistem lain. Jika sebuah gaya bekerja pada suatu partikel yang bergerak dengan kecepatan \vec{v} , daya masukan gaya itu adalah :

$$P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} \dots\dots\dots(4-10)$$

Satuan SI untuk daya adalah watt (W), yang sama dengan satu joule per sekon. Suatu satuan energi yang biasa digunakan adalah kilowatt – jam, yang sama dengan 3,6 megaJoule.

Hukum Kekekalan Momentum

Momentum suatu benda adalah hasil perkalian antara massa dengan kecepatannya pada saat tertentu. Impuls merupakan hasil perkalian antara gaya dan selang waktu Secara matematis dapat ditulis :

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \text{ dan } \mathbf{I} = \mathbf{F} \cdot \Delta t \dots\dots\dots(4-11)$$

dimana \mathbf{p} = momentum (kg m/s), m = massa (kg), \mathbf{v} = kecepatan (m/s), \mathbf{I} = impuls (Ns) \mathbf{F} = gaya (N) dan Δt = selang waktu (s). Momentum dan impuls adalah besaran vektor.

Dua buah benda A dan B yang bermassa m_A dan m_B bergerak berlawanan arah dengan kecepatan masing-masing v_A dan v_B . Kedua benda kemudian bertumbukan dan masing-masing setelah tumbukan adalah v_A' dan v_B' . Berlaku untuk kasus ini hukum Kekekalan Momentum, yaitu jumlah momentum sebelum tumbukan sama dengan besar momentum setelah tumbukan .

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B' \dots\dots\dots(4-12)$$

Tumbukan

Tumbukan lenting sempurna

Tumbukan lenting sempurna adalah tumbukan antara dua benda yang jumlah energi mekaniknya sama besar sesaat sebelum dan sesudah terjadi tumbukan. Secara matematis berlaku :

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B'$$

$$\frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 = \frac{1}{2} m_A v_A'^2 + \frac{1}{2} m_B v_B'^2$$

Berlaku disini koefisien restitusi:

$$e = - \frac{v_A' - v_B'}{v_A - v_B} = 1 \dots\dots\dots(4-13)$$

Tumbukan Lenting Sebagian

Tumbukan lenting sebagian adalah tumbukan antara dua benda dengan jumlah energi kinetik kedua benda sesudah tumbukan lebih kecil dibandingkan dengan jumlah energi kinetiknya sebelum terjadi tumbukan. Dengan demikian berlaku :

$$e = - \frac{v_A' - v_B'}{v_A - v_B} < 1 \dots\dots\dots(4-14)$$

Tumbukan Tak Lenting sempurna

Tumbukan tak lenting sempurna adalah tumbukan antara dua benda yang setelah terjadi tumbukan kedua benda menjadi satu dengan kecepatan yang sama atau $v_A = v_B' = v'$.

$$e = - \frac{v_A' - v_B'}{v_A - v_B} = 0 \dots\dots\dots(4-15)$$

alifis

BAB 5 KESETIMBANGAN BENDA TEGAR

Syarat Kesetimbangan

Benda dikatakan berada dalam kesetimbangan apabila:

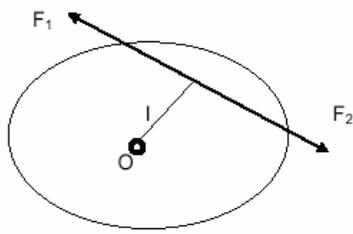
- Benda itu sebagai satu keseluruhan tetap diam atau bergerak menurut garis lurus dengan kecepatan konstan
- Benda itu tidak berotasi sama sekali atau berotasi dengan kecepatan tetap

Apabila benda dalam kesetimbangan maka resultan dari semua gaya yang bekerja pada benda tersebut sama dengan nol. Artinya:

$$\Sigma F_x = 0 \text{ dan } \Sigma F_y = 0 \dots\dots\dots(5-1)$$

Momen Gaya

Momen gaya : perkalian antara besarnya gaya dengan lengan dari gaya tersebut dengan rumus: $\tau = F.l$. Satuan momen gaya adalah Newton – meter (N-m) atau (lb-ft)



Gambar 5.1 Momen oleh dua buah gaya

Suatu benda dikatakan dalam keadaan setimbang sempurna bila $\Sigma F_x = 0$ dan $\Sigma \tau = 0$(5-2) disini τ adalah momen gaya F terhadap titik sembarang O.

Jika gaya : $F = F_x i + F_y j + F_z k$

Vektor posisi titik tangkap gaya:

$$r = x i + y j + z k$$

dan momen gayanya

$$\tau = \tau_x i + \tau_y j + \tau_z k$$

$$\text{maka: } \tau = r \times F$$

$$r \times F = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = (F_z.y - F_y.z)\hat{i} + (F_x.z - F_z.x)\hat{j} + (F_y.x - F_x.y)\hat{k}$$

disini

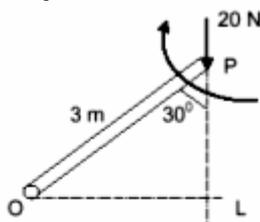
$$\tau_x = (F_z.y - F_y.z)$$

$$\tau_y = (F_x.z - F_z.x)$$

$$\tau_z = (F_y.x - F_x.y)$$

Besar momen gayanya adalah $|\tau = r \times F| = F.r \sin \theta = F.l \dots\dots\dots(5-3)$

Efek gaya F1 ialah rotasi berlawanan arah putaran jarum jam terhadap sumbu putar di O, biasanya diberi tanda positif, sedangkan efek gaya F2 ialah rotasi searah dengan jarum jam dan diberi tanda negatif



Gambar 5.2 momen gaya pada tongkat

Gambar berikut adalah contoh menentukan momen gaya terhadap poros O oleh gaya 20N.

Garis kerja adalah PL, sedangkan lengan adalah OL, segitiga OLP adalah siku-siku sehingga :

$$OL = OP \sin 30^\circ = 1,5 \text{ m.}$$

Gaya 20 N cenderung memutar tongkat OP searah jarum jam terhadap poros O, sehingga

$$\tau = - F. OL = - 20 . (1,5) = - 30 \text{ N.}$$

Gaya-gaya sebidang

Gaya-gaya sebidang terletak dalam satu bidang datar, suatu sistem yang berpotongan terdiri dari gaya-gaya yang berpotongan di suatu titik yang disebut titik perpotongan. Suatu sistem sejajar terdiri dari gaya-gaya yang berpotongan di titik tak berhingga. Suatu titik berpotongan dan tidak sejajar terdiri dari gaya-gaya yang tidak berpotongan mungkin sebuah gaya yang melalui titik perpotongan dan tidak sejajar.

Gaya-gaya berpotongan adalah gaya-gaya yang garis kerjanya berpotongan di suatu titik. Resultan R dari gaya-gaya yang berpotongan mungkin sebuah gaya yang melalui titik perpotongan atau nol. Besar vektor resultannya adalah :

$$|R| = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \text{ dan arah vektor R terhadap sumbu X positif: } \operatorname{tg} \theta = \frac{\sum F_y}{\sum F_x}$$

Sebuah benda berada dalam keadaan setimbang jika dibawah pengaruh gaya-gaya yang berpotongan, maka :

- Benda itu diam dan tetap diam (disebut keadaan kesetimbangan statik)
- Benda itu bergerak dengan vektor kecepatan yang tetap (disebut kesetimbangan translasi)

Syarat kesetimbangan :

$$R = \sum F = 0 \text{ dan } \sum F_x = \sum F_y = 0 \dots\dots\dots(5-4)$$

Gaya-gaya paralel adalah gaya - gaya yang berpotongan di satu titik tak berhingga. Resultan gaya – gaya sejajar mempunyai arah yang sama dengan arah dengan arah gaya – gaya itu dan besarnya sama dengan jumlah besar gaya – gaya tadi. Gaya resultan ini mungkin :

sebuah gaya R yang sejajar dengan sistem, suatu kopel atau nol.

Jika sistem paralel ini sejajar dengan sumbu Y maka : $R = \sum F$ dan $R \cdot \bar{x} = \tau_o$ disini \bar{x} adalah jarak tegak lurus dari pusat momen O ke resultan R dan besarnya :

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum \Gamma_o}{\sum F} \\ &= \frac{x_1 \cdot F_1 + x_2 \cdot F_2 + x_3 \cdot F_3 + \dots\dots\dots + X_n \cdot F_n}{F_1 + F_2 + F_3 + \dots\dots\dots + F_n} \end{aligned}$$

Jika $\sum F = 0$, kopel resultan jika ada besarnya sama dengan

$$\bar{C} = \sum \tau_o = R \cdot \bar{x}$$

Gaya-gaya yang tidak berpotongan dan tidak sejajar adalah gaya – gaya yang garis kerjanya tidak berpotongan di satu titik dan tidak sejajar. Gaya resultan sistem mungkin : gaya tunggal R, suatu kopel dalam bidang sistem atau bidang sejajar atau nol.

Secara aljabar: $|R| = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2}$ dan arah: $\operatorname{tg} \theta_x = \frac{\sum F_y}{\sum F_x}$

disini θ_x adalah sudut antara resultan R dengan sumbu x positif.

Sistem gaya yang bekerja pada benda tegar pada umumnya sistem tidak berpotongan dan tidak sejajar. Syarat kesetimbangan benda tegar di bawah pengaruh gaya – gaya bidang adalah :

$$\sum F = 0 \text{ atau } \sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0 \text{ dan } \sum \tau_o = 0 \dots\dots\dots(5-5)$$

Pusat Massa

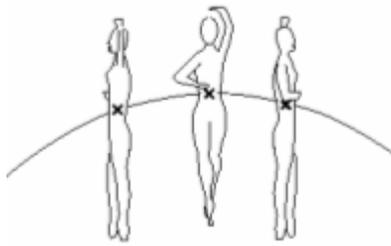
Pusat massa adalah titik tangkap dari resultan gaya-gaya berat pada setiap anggota sistem, yang jumlah momen gayanya terhadap titik tangkap ini (pusat massa) sama dengan nol. Dikatakan juga bahwa pusat massa adalah sebuah titik pada sistem benda titik yang bila dikerjakan gaya luar akan mengakibatkan benda bergerak translasi murni. Setiap benda titik mengalami gaya tarik bumi dengan gaya $w = mg$ disebut gaya berat, arah gaya ini menuju pusat bumi, gaya ini akan berpotongan di tempat yang jauh sekali, arahnya dapat dikatakan sejajar.

Jadi :

$$\begin{aligned} W_{\text{sistem}} &= \sum mg && \text{atau dalam komponen-komponennya} \\ \bar{r}_{pm} &= \frac{\sum m_i \cdot g \bar{r}_i}{\sum m_i \cdot g} && x_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \\ &= \frac{\sum m_i \cdot \bar{r}_i}{\sum m_i} && y_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} \dots\dots\dots(5-6) \\ &&& z_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i} \end{aligned}$$

(x_{pm} , y_{pm} , z_{pm}), adalah koordinat dari pusat massa

Koordinat titik pusat massa juga dapat ditulis sebagai berikut



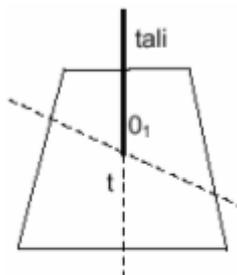
$$\begin{aligned}
 x_{pm} &= \int \frac{x \cdot dv}{V} \text{ atau } x_{pm} = \int \frac{x \cdot dA}{A} \text{ atau } x_{pm} = \int \frac{x \cdot dl}{l} \dots\dots\dots(5-7) \\
 y_{pm} &= \int \frac{y \cdot dv}{V} \text{ atau } y_{pm} = \int \frac{y \cdot dA}{A} \text{ atau } y_{pm} = \int \frac{y \cdot dl}{l} \\
 z_{pm} &= \int \frac{z \cdot dv}{V} \text{ atau } z_{pm} = \int \frac{z \cdot dA}{A} \text{ atau } z_{pm} = \int \frac{z \cdot dl}{l}
 \end{aligned}$$

Gambar 5.3 pusat massa tubuh

Jika benda tegar yang homogen mempunyai bentuk simetri, pusat massa akan berimpit dengan pusat simetrinya, misalnya bola, parallel epipedum(balok), kubus, dan lain-lain. Jika benda tegar yang homogen mempunyai sumbu simetri misalnya kerucut, silinder, maka pusat massanya akan berada pada sumbu simetrinya.

Titik Berat

Titik berat adalah titik-titik yang dilalui oleh garis kerja dari resultan gaya berat sistem benda titik, berarti merupakan titik potong dari garis kerja gaya berat bila letak dari sistem ini berubah – ubah. Misal benda tegar seperti gambar 5.4.



Gambar 5.4 titik berat benda tegar

Sebuah benda tegar digantung dengan pusat 0, maka garis vertikal melalui 0 adalah tempat kedudukan titik berat benda. Jika digantung pada tempat yang berlainan maka akan mempunyai titik berat yang berbeda. Koordinat titik berat benda dirumuskan sebagai berikut:

$$x_z = \frac{\sum w_i \cdot x_i}{\sum w_i} = \frac{\sum m_i \cdot g \cdot x_i}{\sum m_i} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i}$$

dengan cara yang sama didapat untuk titik yang lain:

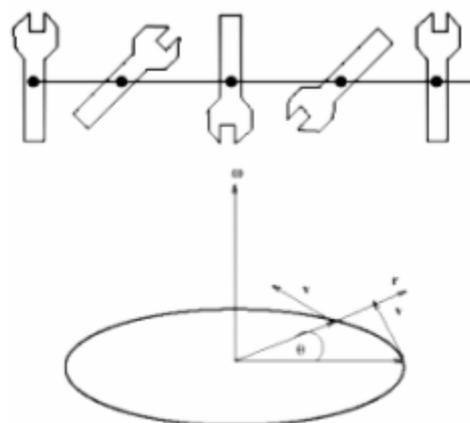
$$y_z = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i}, \quad z_z = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i}$$

untuk benda tegar berlaku

$$x_z = \frac{\int x \cdot dw}{\int dw}, \quad y_z = \frac{\int y \cdot dw}{\int dw}, \quad z_z = \frac{\int z \cdot dw}{\int dw} \dots\dots\dots(5-8)$$

Titik berat dan titik pusat massa mempunyai koordinat yang sama, berarti titik ini berimpit. Hal ini benar bila benda atau system berada dekat dengan permukaan bumi. Untuk benda-benda yang jauh dari permukaan bumi titik berat letaknya berubah, lebih dekat ke arah bumi dari pada pusat massa, yang selalu tetap letaknya dimana pun benda itu berada.

Gerak Benda Tegar



Gambar 5.5 Gerak rotasi benda

Benda tegar adalah sistem benda yang terdiri atas sistem benda titik yang jumlahnya tak-hingga dan jika ada gaya yang bekerja, jarak antara titik-titik anggota sistem selalu tetap. Gerak benda tegar terdiri atas: (1) Gerak Translasi, (2).Gerak Rotasi, dan (3).Kombinasi gerak rotasi dan translasi

Kinematika rotasi adalah mempelajari gerak rotasi benda tegar dengan mengabaikan gaya penyebab gerak rotasi.

Parameter fisika yang penting dalam kinematika rotasi adalah

1. Perpindahan rotasi(angular) → θ (rad)
2. Kecepatan rotasi(angular) → ω (rad/s)
3. Percepatan rotasi(angular) → α (rad/s²)

.Gerak rotasi dapat dibedakan yaitu

1. Gerak rotasi beraturan
 $\omega = \text{tetap}$ atau $\alpha = 0$
2. Gerak rotasi berubah beraturan
 $\alpha = 0 \rightarrow \alpha > 0$ atau $\alpha < 0$ dan $\omega > 0$

artinya ada gerak rotasi dipercepat atau diperlambat.

Hubungan Perpindahan, kecepatan dan percepatan angular adalah

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 \pm \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \\ \omega &= \omega_0 + \alpha t \end{aligned} \dots\dots\dots(5-9)$$

Kecepatan dan percepatan angular sebagai vektor

Dinamika gerak rotasi adalah mempelajari gerak rotasi dengan memperhitungkan pengaruh gaya yang menyebabkan benda bergerak.

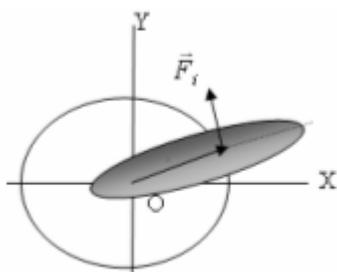
Karena ada pengaruh gaya maka dinamika rotasi meliputi

1. Hukum kekekalan momentum rotasi
2. Hukum kekekalan energi

Hukum gerak yang mengatur gerak translasi dan rotasi adalah hukum 2 Newton . yaitu

Gerak translasi $\Sigma F = m a$ dan Gerak rotasi $\Sigma \tau = I \alpha$

Momen Inersia & Momen Gaya



Gambar 5.6. Momen Gaya

Gambar 5.6 di samping melukiskan sebuah benda tegar yang berada pada sebuah bidang kartesian X-Y. Pada benda itu bekerja sebuah gaya \vec{F}_i sebidang dengan bidang kartesian, sehingga benda berotasi terhadap sumbu yang tegak lurus O. Gaya itu bekerja pada partikel ke i dari benda tegar sehingga ia berotasi dengan jejari \vec{r}_i terhadap titik O.

Akibat gaya itu dikatakan bahwa pada benda bekerja sebuah momen gaya atau torsi terhadap titik O, yaitu:

$$\vec{\tau}_i = \vec{r}_i \times \vec{F}_i \dots\dots\dots(5-10)$$

Besar momen gaya itu adalah:

$$\tau_i = r_i F_i \sin \theta_i \dots\dots\dots(5-11)$$

Momen gaya ini dinyatakan dengan satuan Nm, dan arah vektor momen gaya ini adalah tegak lurus terhadap vektor lengan gaya dan juga tegak lurus terhadap gaya itu. Jadi arah momen gaya ini adalah tegak lurus terhadap bidang x-y atau searah dengan sumbu rotasi benda tegar. Akibat momen gaya ini, benda tegar berotasi berlawanan arah dengan arah putaran jarum jam dan partikel ke I benda tegar itu berotasi dengan jejari r_i .

Momen gaya yang bekerja pada partikel ke-i dirumuskan,

$$\tau_i = (m_i r_i^2) \alpha$$

Untuk momen gaya yang bekerja pada benda tegar adalah $\Sigma \tau = \Sigma (m_i r_i^2) \alpha$, atau dapat ditulis $\Sigma \tau = I \alpha$ (5-12)

I disebut sebagai momen inersia benda tegar yaitu ukuran kelembaman benda tegar untuk berotasi karena pengaruh momen gaya yang bekerja pada benda itu.

Persamaan ini analog dengan hukum II Newton yang telah dibicarakan dalam bab dinamika. Secara umum momen inersia benda tegar juga dapat dinyatakan dengan persamaan

$$I = \int r^2 dm \dots\dots\dots(5-13)$$

Resultan momen gaya yang bekerja pada sebuah benda tegar menyebabkan percepatan angular terhadap benda tegar itu menurut persamaan

$$\Sigma \tau = I \alpha \dots\dots\dots(5-14)$$

dengan I adalah momen kelembaman benda tegar. Bila kita mengingat bahwa definisi percepatan angular adalah perubahan kecepatan angular pada tiap satuan waktu atau dinyatakan dengan persamaan

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

maka resultan momen gaya itu dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\sum \tau = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \dots\dots\dots(5-14)$$

Energi Kinetik Rotasi

Dalam dinamika gerak lurus telah kita ketahui bahwa energi kinetik translasi dinyatakan dengan persamaan

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

Untuk benda yang bergerak rotasi, maka laju linearnya memenuhi persamaan $v = \omega r$ maka diperoleh energi kinetik rotasi, yaitu

$$E_K = \frac{1}{2}m(\omega r)^2 \text{ atau } E_K = \frac{1}{2}(mr)^2 \omega$$

karena mr^2 merupakan momen inersia benda (I), maka energi kinetik rotasi di atas dapat dinyatakan dengan persamaan

$$E_K = \frac{1}{2}I\omega^2 \dots\dots\dots(5-16)$$

Hubungan antara besaran-besaran linear dengan besaran anguler dalam analogi tertera pada table 5.1. berikut.

Tabel 5.1. Analogi Persamaan Antara Gerak Rotasi dengan Translasi

Besaran	Linear (Translasi)	Anguler (rotasi)	Hubungan
Posisi	$\vec{s}_t = \frac{1}{2}\vec{a}t^2 + \vec{v}_o t + \vec{s}_o$	$\vec{\theta}_t = \frac{1}{2}\vec{\alpha}t^2 + \vec{\omega}_o t + \vec{\theta}_o$	$\vec{s} = \vec{\theta}x\vec{r}$
Kecepatan	$\vec{v}_t = \vec{\omega}t + \vec{v}_o$	$\vec{\theta}_t = \vec{\omega}t + \vec{\theta}_o$	$\vec{v} = \omega x \vec{r}$
Percepatan	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$	$\vec{a}_T = \alpha x \vec{r}$
Gaya	$\sum \vec{F} = ma$	$\sum \tau = I\alpha$	$\vec{\tau}_1 = \vec{r}_1 x \vec{F}_1$
Impuls	$(\sum \vec{F})dt = d\vec{P}$	$(\sum \vec{\tau})dt = d\vec{L}$	
Momentum	$\vec{P} = m\vec{v}$	$\vec{L} = I\vec{\omega}$	
Energi Kinetik	$E_K = \frac{1}{2}mv^2$	$E_K = \frac{1}{2}I\omega^2$	

alifis

BAB 6
MEKANIKA ZAT PADAT DAN FLUIDA

Pada benda tegar, jarak relatif antara bagian-bagian atau partikel-partikel penyusun materinya tetap, berbeda dengan Fluida, yaitu kasus di mana jarak relatif antara bagian-bagian materi atau partikel-partikel penyusun materi dapat berubah-ubah. Fluida, dapat berupa cairan maupun gas, dan dinamai fluida karena memiliki sifat dapat mengalir. Karena partikel-partikel dalam fluida dapat mudah bergerak, secara umum rapat massanya tidak konstan. Walaupun begitu dalam hanya akan meninjau keadaan dengan kerapatan konstan.

Sifat Jenis Zat

- Kerapatan suatu zat adalah rasio massa terhadap volumenya :

$$\text{Kerapatan} = \frac{\text{Massa}}{\text{volume}} \quad \text{atau} \quad \rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(6-1)$$

- Berat jenis suatu zat adalah rasio kerapatannya terhadap kerapatan air. Sebuah benda tenggelam atau terapung dalam suatu fluida tergantung pada apakah kerapatannya

lebih besar atau lebih kecil dibandingkan kerapatan fluida. Kebanyakan kerapatan zat padat dan zat cair hampir tak bergantung pada temperatur dan tekanan, sedangkan kerapatan gas sangat tergantung pada temperatur dan tekanan ini. Kerapatan berat adalah kerapatan kali g . Kerapatan berat air adalah $62,4 \text{ lb/ft}^3$.

- Tegangan tarik adalah gaya per satuan luas yang bekerja pada sebuah benda :

$$\text{Tegangan} = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(6-2)$$

- Regangan adalah perubahan fraksional pada panjang benda :

$$\text{Regangan} = \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots(6-3)$$

- Modulus Young adalah rasio tegangan terhadap regangan :

$$Y = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \dots\dots\dots(6-4)$$

- Modulus geser adalah rasio tegangan geser terhadap regangan geser :

$$M_s = \frac{\text{tegangan geser}}{\text{regangan geser}} = \frac{F_x/A}{\Delta X/L} \dots\dots\dots(6-5)$$

- Rasio (negatif) tekanan terhadap perubahan fraksional volume sebuah benda dinamakan modulus limbak :

$$B = -\frac{P}{\Delta V/V}$$

Inversi rasio ini adalah kompresibilitas k .

Tekanan

Tekanan fluida adalah gaya per satuan luas yang dikerjakan oleh fluida :

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(6-6)$$

Satuan SI tekanan adalah Pascal (Pa), yang adalah Newton per meter persegi :

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

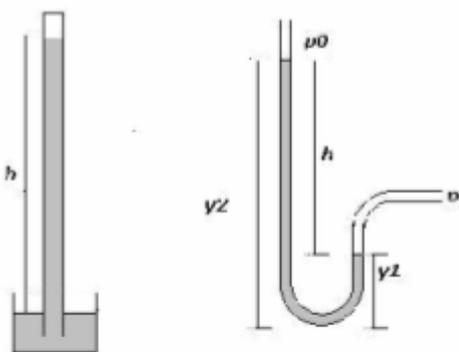
Banyak satuan tekanan lain, seperti atmosfer, bar, torr, pound per inci persegi, atau millimeter air raksa, seringkali digunakan. Satuan-satuan ini dihubungkan oleh :

$$1 \text{ atm} = 101,3245 \text{ kPa} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ torr} = 29,9 \text{ inHg} = 33,9 \text{ ftH}_2\text{O} = 14,7 \text{ lb/in}^2$$

Tekanan gauge adalah perbedaan antara tekanan absolut dan tekanan atmosfer.

Prinsip Pascal menyatakan bahwa tekanan yang bekerja pada cairan tertutup diteruskan tanpa berkurang ke tiap titik dalam fluida dan ke dinding wadah. Dalam cairan, seperti air, tekanan bertambah secara linear dengan kedalaman :

$$P = P_o + \rho gh \dots\dots\dots(6-7)$$



Gambar 6.1 Barometer & Manometer

Dalam gas seperti udara, tekanan berkurang secara eksponensial dengan ketinggian.

Prinsip Archimedes menyatakan bahwa sebuah benda yang seluruhnya atau sebagian tercelup dalam fluida diapungkan ke atas oleh gaya yang sama dengan berat fluida yang dipindahkan.

Untuk aliran fluida inkompresibel keadaan tunak, laju aliran volume adalah sama di seluruh fluida.

$$I_v = vA = \text{konstan} \dots\dots\dots(6-8)$$

Ini dinamakan persamaan kontinuitas.

Jenis-Jenis Aliran Fluida

Normalnya, ketika kita meninjau keadaan gerak dari suatu sistem partikel, kita akan berusaha memberikan informasi mengenai posisi dari setiap partikel sebagai fungsi waktu. Tetapi untuk kasus fluida hal tersebut merepotkan, sehingga Euler memberikan metode yang lebih mudah dimana kita tidak mengikuti pergerakan masing-masing partikel, tetapi kita mendapat informasi mengenai keadaan fluida pada setiap titik ruang dan waktu, dari massa jenis $\rho(\mathbf{r}, t)$ dan kecepatan fluida $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$.

Aliran fluida dapat dikategorikan menurut beberapa kondisi:

1. Bila vektor kecepatan fluida di semua titik $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{r})$ bukan merupakan fungsi waktu maka alirannya disebut aliran tetap (steady), sebaliknya bila tidak maka disebut aliran tak tetap (non steady).
2. Bila di dalam fluida tidak ada elemen fluida yang berotasi relatif terhadap suatu titik maka aliran fluidanya disebut aliran irrotasional, sedangkan sebaliknya disebut aliran rotasional.
3. Bila massa jenis ρ adalah konstan, bukan merupakan fungsi ruang dan waktu, maka alirannya disebut aliran tak termampatkan, sebaliknya akan disebut termampatkan.
4. Bila terdapat gaya gesek dalam fluida maka alirannya disebut aliran kental, sedangkan sebaliknya akan disebut aliran tak kental. Gaya gesek ini merupakan gaya-gaya tangensial terhadap lapisan-lapisan fluida, dan menimbulkan disipasi energi mekanik.

Persamaan Bernoulli

$$P + \rho g v + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konstan} \dots \dots \dots (6-9)$$

berlaku untuk aliran keadaan tunak, nonviskos tanpa turbulensi di mana energi mekanik kekal. Untuk keadaan di mana kita dapat mengabaikan perubahan ketinggian, kita mempunyai hasil yang penting yang bila kelajuan fluida bertambah, tekanan turun. Hasil ini dikenal sebagai efek Venturi, dapat digunakan untuk menjelaskan secara kualitatif daya angkat pada sayap pesawat terbang dan kurva jejak baseball.

Dalam aliran viskos lewat suatu pipa, turunnya tekanan sebanding dengan laju aliran volume dan dengan resistansi, yang selanjutnya berbanding terbalik dengan jari-jari pipa pangkat empat :

$$\Delta P = I_v R = \frac{8\eta L}{\pi r^4} I_v \dots \dots \dots (6-10)$$

Ini adalah hukum Poiseuille.

alifis

**BAB 7
OSILASI & GELOMBANG**

Pada gerak harmonik sederhana, percepatan sebanding lurus dengan simpangan dan arahnya berlawanan. Jika x adalah simpangan, percepatannya adalah :

$$a_x = -\omega^2 x \dots \dots \dots (7-1)$$

dengan ω adalah frekuensi sudut osilasi, yang berhubungan dengan frekuensi f melalui persamaan :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \dots \dots \dots (7-2)$$

Periode osilasi merupakan kebalikan frekuensi :

$$T = \frac{1}{f}$$

dan periode diberikan oleh:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{dan} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \dots \dots \dots (7-3)$$

dimana benda bermassa m pada pegas dengan konstanta gaya k , atau bandul sederhana dengan panjang L .

Fungsi posisi x untuk gerak harmonik sederhana dengan amplitudo A dan frekuensi sudut ω diberikan oleh persamaan :

$$x = A \cos(\omega t + \delta) \dots\dots\dots(7-4)$$

dengan δ adalah konstanta fase, yang bergantung pada pemilihan waktu $t = 0$. Kecepatan partikel diberikan oleh persamaan

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \delta) \dots\dots\dots(7-5)$$

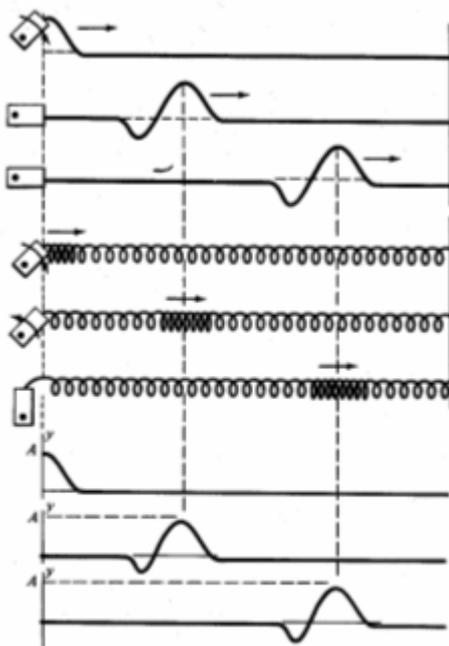
Energi total dalam gerak harmonik sederhana berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo. Untuk massa pada pegas yang memiliki konstanta gaya k , energi total diberikan oleh persamaan

$$E_{total} = \frac{1}{2}kA^2$$

Energi potensial dan energi kinetik untuk massa yang berosilasi pada sebuah pegas diberikan oleh persamaan :

$$U = E_{total} \cos^2(\omega t + \delta) \text{ dan } K = E_{total} \sin^2(\omega t + \delta) \dots\dots\dots(7-6)$$

Gelombang



Gambar 7.1 gerak gelombang tali & slinki

Gelombang adalah gangguan sifat fisis suatu medium yang merambat menurut tempat dan waktu, dimana medium tidak bergerak.

Berdasarkan arah rambat, gelombang dibedakan menjadi:

- Gelombang Longitudinal yaitu arah rambat gelombang sejajar dengan arah gerak partikel-partikel medium.
- Gelombang Transversal yaitu arah rambat gelombang tegak lurus dengan arah gerak partikel-partikel medium.

Berdasarkan mekanismenya, gelombang dibedakan:

- Gelombang mekanis yaitu gelombang yang cepat rambatnya tergantung pada besaran mekanik.
- Gelombang elastik yaitu gelombang yang cepat rambatnya tergantung pada besaran-besaran elastisitas.
- Gelombang permukaan dalam zat cair yaitu gelombang yang cepat rambatnya tergantung pada besaran permukaan cairan.

- Gelombang elektromagnetik yaitu gelombang yang cepat rambatnya tergantung pada besaran listrik dan magnetik.

Pada gelombang transversal, seperti gelombang pada tali, arah gangguan tegak lurus terhadap arah penjalaran. Pada gelombang longitudinal, seperti gelombang bunyi, arah gangguannya adalah sepanjang arah penjalaran. Baik energi maupun momentum dibawa oleh gelombang.

Laju gelombang bergantung pada rapat massa dan sifat-sifat elastik medium. Laju gelombang tak bergantung gerak sumber gelombang. Laju gelombang pada tali dihubungkan dengan tegangan F dalam tali dan massa per satuan panjangnya μ oleh

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \dots\dots\dots(7-7)$$

Bila dua gelombang atau lebih bertemu pada tempat yang sama, gelombang-gelombang akan saling bertumpang tindih, gangguan-gangguan akan berjumlah secara aljabar. Prinsip superposisi berlaku untuk gelombang-gelombang pada tali jika simpangan transversal tidak terlalu besar.

Pada gerak harmonik, gangguan berubah secara sinusoidal terhadap waktu dan ruang. Pada gelombang harmonik pada tali, segmen tali berosilasi dengan gerak harmonik sederhana dalam arah tegak lurus arah gelombang. Jarak antara puncak-puncak gelombang yang berurutan adalah panjang gelombang λ .

Fungsi gelombang $y(x, t)$ untuk gelombang harmonik

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \dots\dots\dots(7-8)$$

dimana A adalah amplitudo,

$$k \text{ adalah bilangan gelombang, } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

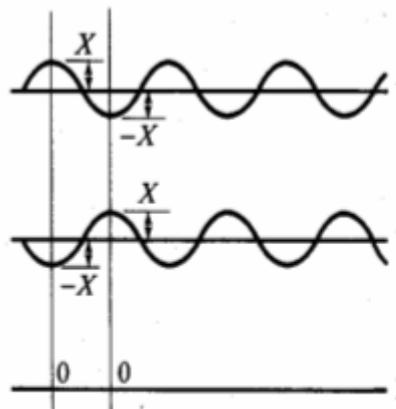
$$\omega \text{ adalah frekuensi sudut, } \omega = 2\pi f$$

Laju gelombang harmonik = frekuensi kali panjang gelombang: $v = f\lambda = \frac{\omega}{k} \dots\dots(7-9)$

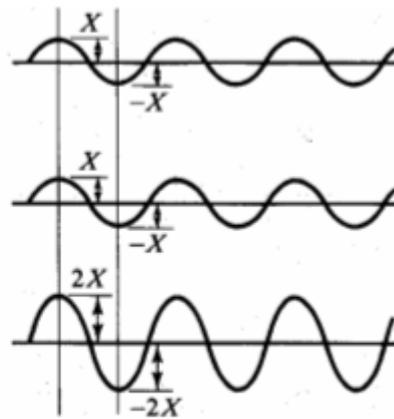
Daya yang ditransmisikan oleh gelombang harmonik berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo gelombang dan diberikan oleh

$$P = \frac{1}{2} \mu \omega^2 A^2 v \dots\dots\dots(7-10)$$

Superposisi gelombang harmonik disebut interferensi. Jika gelombang sefase atau berbeda fase sebesar suatu bilangan bulat kali 2π , amplitudo gelombang saling menjumlah dan interferensi berlangsung secara konstruktif. Jika gelombang berbeda fase sebesar π atau bilangan bulat ganjil kali π , amplitudo saling mengurangi dan interferensi berlangsung secara destruktif.



Gambar 7.2 superposisi konstruktif



Gambar 7.3 Superposisi destruktif

Fungsi gelombang untuk gelombang pada tali mengikuti persamaan gelombang, yang menghubungkan turunan-turunan fungsi gelombang terhadap ruang dengan turunan terhadap waktu :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \dots\dots\dots(7-11)$$

Persamaan gelombang diturunkan dari hukum kedua Newton yang diterapkan pada suatu segmen tali yang bergetar.

Bunyi

Gelombang bunyi adalah gelombang longitudinal perapatan dan perenggangan. Dalam fluida, gelombang bunyi bergerak dengan kecepatan

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \dots\dots\dots(7-12)$$

dengan B adalah modulus limbak (bulk) dan ρ adalah rapat kesetimbangan fluida. Laju bunyi dalam gas dihubungkan dengan temperatur mutlak oleh persamaan

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \dots\dots\dots(7-13)$$

$R = 8,314\text{J/mol.K}$ adalah konstanta gas universal, M adalah massa molar (massa per mole), dan γ adalah konstanta yang bergantung pada jenis gas dan mempunyai nilai $1,4$ untuk udara. Dalam zat padat, laju bunyi dihubungkan dengan modulus Young Y dan kerapatan ρ oleh persamaan

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \dots\dots\dots(7-14)$$

Gelombang bunyi dapat dipandang baik sebagai gelombang simpangan maupun sebagai gelombang tekanan. Dalam gelombang bunyi harmonik, amplitudo tekanan P_o dihubungkan dengan amplitudo simpangan s_o oleh persamaan

$$P_o = \rho \omega v s_o$$

dengan ω adalah frekuensi sudut, ρ adalah kerapatan medium, dan v adalah laju gelombang. Telinga manusia sensitive terhadap gelombang bunyi dalam rentang frekuensi kira-kira 20 Hz hingga 20 kHz.

Intensitas gelombang adalah gaya dibagi luas. Intensitas gelombang bola dari sumber titik berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari sumber.

$$I = \frac{P_{rata-rata}}{4\pi r^2} \dots\dots\dots(7-15)$$

Tingkat intensitas bunyi diukur pada skala logaritmik. Tingkat intensitas bunyi β dalam decibel (dB) dihubungkan ke intensitas I oleh persamaan

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

dengan $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, yang merupakan nilai pendekatan ambang pendengaran. Pada skala ini, ambang pendengaran adalah 0 dB dan ambang sakit adalah 120 dB.

Dalam medium nondispersif, laju gelombang tidak bergantung pada frekuensi ataupun panjang gelombang, dan pulsa bergerak tanpa berubah bentuk. Dalam medium dispersif, laju gelombang bergantung pada panjang gelombang dan frekuensi, dan pulsa berubah bentuk ketika bergerak. Dalam medium dispersif, kecepatan pulsa, disebut kecepatan grup, tidak sama dengan kecepatan fase, yang merupakan kecepatan rata-rata komponen-komponen harmonik pulsa.

Gelombang dapat direfleksikan (dipantulkan), direfraksikan (dibiaskan), dan didifraksikan. Refraksi adalah perubahan arah gelombang yang terjadi bila laju gelombang berubah karena medium berubah. Difraksi adalah pembelokan gelombang di sekitar suatu penghalang atau pinggir suatu contoh. Difraksi terjadi kapan saja bila muka gelombang terbatas. Bila penghalang atau celah cukup besar dibandingkan dengan panjang gelombang, difraksi dapat diabaikan dan gelombang menjalar dalam garis lurus seperti berkas partikel. Ini dikenal sebagai aproksimasi berkas (sinar). Karena difraksi, gelombang hanya dapat digunakan untuk menentukan lokasi sebuah benda dalam orde panjang gelombang atau lebih.

Ketika sumber bunyi dan penerima bergerak relatif, frekuensi yang teramati akan bertambah jika keduanya bergerak saling mendekat, lain dan berkurang jika bergerak saling menjauhi. Ini dikenal sebagai efek Doppler. Frekuensi yang teramati f' dihubungkan dengan frekuensi sumber f_0 oleh persamaan

$$f' = \frac{1 \pm u_r / v}{1 \pm u_s / v} f_0 \dots\dots\dots(7-16)$$

Bila laju relatif sumber atau penerima u jauh lebih kecil daripada laju gelombang v , pergeseran Doppler hampir sama, tidak peduli apakah sumber ataupun penerima yang bergerak, dan besarnya diberikan oleh

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \pm \frac{u}{v}$$

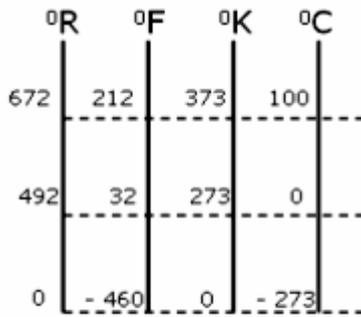
alifis

BAB 8 TEMPERATUR, KALOR & HUKUM TERMODINAMIKA

Temperatur

Suatu skala temperatur dapat dibentuk dengan memilih suatu sifat termometrik dan mendefinisikan bahwa temperatur itu berubah secara linear dengan sifat itu dengan menggunakan dua titik tetap, seperti titik es dan titik uap air. Dalam skala Celsius, titik es didefinisikan senilai 0°C dan titik uap 100°C . Dalam skala Fahrenheit, titik es adalah 32°F dan titik uap 212°F .

$^{\circ}\text{F}$ dan titik uap 212°F . Temperatur pada skala Fahrenheit dan Celcius dihubungkan oleh(8-1)

$$t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32^{\circ})$$


Gambar 8.1 Perbandingan skala temperatur

Termometer yang berbeda tidak selalu sesuai satu sama lain pada pengukuran temperatur kecuali pada titik yang tetap. Termometer gas mempunyai sifat bahwa semuanya sesuai satu sama lain dalam pengukuran temperatur berapa pun selama kerapatan gas dalam termometer sangat rendah. Temperatur gas ideal T didefinisikan oleh

$$T = \frac{273,16\text{K}}{P_3} P$$

dengan P adalah tekanan gas dalam termometer ketika termometer ada dalam kesetimbangan termal dengan sistem yang temperaturnya akan diukur, dan P_3 adalah tekanan ketika termometer dicelupkan dalam bak air-es-uap pada titik tripelnya. Skala temperatur absolut atau Kelvin sama dengan

skala gas ideal dalam rentang temperatur yang memungkinkan penggunaan termometer gas. Temperatur absolut dihubungkan dengan temperatur Celcius oleh

$$T = t_c + 273,15 \text{ K}$$

Koefisien muai linear adalah rasio fraksi perubahan panjang terhadap perubahan temperature :

$$\alpha = \frac{\Delta L / L}{\Delta T} \dots\dots\dots(8-2)$$

Koefisien muai volume, yang merupakan rasio fraksi perubahan volume terhadap perubahan temperatur, adalah tiga kali koefisien muai linear :

$$\beta = \frac{\Delta V / V}{\Delta T} = 3\alpha \dots\dots\dots(8-3)$$

Pada kerapatan rendah, semua gas memenuhi hukum gas ideal :

$$PV = nRT \dots\dots\dots(8-4)$$

dengan

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

adalah konstanta universal gas, yang dihubungkan dengan bilangan Avogadro N_A dan konstanta Boltzman k oleh

$$R = kN_A$$

Bilangan Avogadro adalah

$$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ molekul/mol}$$

dan konstanta Boltzman adalah

$$k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Bentuk hukum gas ideal yang berguna untuk memecahkan soal yang melibatkan sejumlah gas yang tetap adalah

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \dots\dots\dots(8-5)$$

Persamaan keadaan van der Waals menggambarkan perilaku gas nyata untuk rentang temperatur dan tekanan yang lebar :

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2} \right) (V - bn) = nRT \dots\dots\dots(8-6)$$

Persamaan ini ikut memperhitungkan pula ruang yang ditempati molekul dan gas itu sendiri dan tarikan antar molekul.

Panas (Kalor)

Panas adalah energi yang ditransfer dari satu benda ke benda lain karena beda temperatur. Kapasitas panas suatu zat adalah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur zat dengan satu derajat. Panas jenis adalah kapasitas panas per satuan massa. Kalori, yang pada mulanya didefinisikan sebagai panas yang diperlukan untuk menaikkan

temperatur satu gram air dengan satu derajat Celcius, sekarang didefinisikan sebagai 4,184 joule. Panas jenis air adalah 4,184 kJ/kg.K.

Panas yang dibutuhkan untuk mencairkan suatu zat adalah hasil kali massa zat itu dan panas laten peleburan L_f :

$$Q = mL_f$$

Panas yang dibutuhkan untuk menguapkan cairan adalah hasil kali massa cairan dan panas laten penguapan L_v :

$$Q = mL_v$$

Pencairan dan penguapan terjadi pada temperatur konstan. Untuk air, $L_f=333,5$ kJ/kg dan $L_v=2257$ kJ/kg. Panas yang dibutuhkan untuk mencairkan 1 g es atau untuk menguapkan 1 g air adalah besar dibandingkan dengan panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur 1 g air sebanyak satu derajat.

Transfer Panas pada Benda Padat

Panas dapat berpindah dari suatu tempat (atau benda) ke tempat (atau benda) lain melalui tiga cara, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Konduksi melibatkan molekul-molekul atau atom-atom (dan/atau elektron-elektron bebas) yang bergerak pada jarak pendek dan bertumbukan. Secara umum terjadi pada benda padat. Sedangkan konveksi melibatkan gerak molekul-molekul pada jarak yang besar, dan merupakan mekanisme utama perpindahan panas dalam fluida disekitar kita.

Panas, selain mengalir dari suatu benda yang suhunya lebih tinggi ke benda lain yang suhunya lebih rendah apabila disinggungkan satu sama lain, juga mengalir dari bagian suatu benda yang suhunya tinggi ke bagian lain dari benda itu juga yang suhunya lebih rendah. Aliran panas demikian merupakan transfer atau perpindahan tenaga kinetik getaran dari satu atom ke atom lain disebelahnya melalui tumbukan. Sebagaimana di dalam benda padat, atom-atom benda itu bergetar disekitar titik setimbangnya dengan tenaga kinetik $K = \frac{1}{2} mv^2 = 3 \times \frac{1}{2} kT$ sesuai dengan azas equipartisi tenaga atau pembagian merata tenaga yang mengatakan bahwa tenaga kinetik partikel sama dengan $\frac{1}{2} kT$ untuk tiap derajat kebebasan, dengan mengingat bahwa setiap gerakan translasi maupun vibrasi dapat diuraikan menjadi 3 komponen derajat kebebasan misalnya sepanjang sumbu-sumbu koordinat Cartesian X, Y dan Z (Soedjojo, 2004).

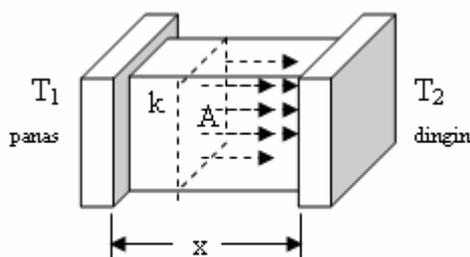
Dalam getarannya, atom-atom di bagian yang suhunya lebih tinggi (tenaga kinetiknya lebih tinggi) sewaktu bertumbukan dengan atom-atom di bagian yang suhunya lebih rendah (tenaga kinetiknya lebih rendah), akan merosot tenaga kinetiknya (turun suhunya) dan sebaliknya atom-atom yang ditumbuknya menjadi naik tenaga kinetiknya (naik suhunya).

Kuantitas perubahan dQ yang dipindahkan selama waktu dt (disebut juga laju panas, H atau juga disebut arus termis I) tergantung pada luas penampang benda (A) dan gradient suhu ($\partial T / \partial x$):

$$H = I = \frac{dQ}{dt} = -k.A.(\partial T / \partial x) \dots\dots\dots (8.7)$$

dimana tanda minus berkaitan dengan kenyataan bahwa arah arus adalah dari suhu tinggi ke suhu rendah, atau menurut Sumardi, dkk (2007) jumlah energi panas Q yang melewati lempeng bahan dalam periode waktu t ditentukan oleh:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{k.A.\Delta T}{x} \dots\dots\dots (8.8)$$



Gambar 8.2 Model perpindahan panas dalam zat padat

dimana $\Delta T=T_1-T_2$. Dalam SI satuan Q/t dinyatakan dalam Watt dan k dalam $W/m^{\circ}C$.

Jadi, laju aliran panas secara konduksi melalui suatu lempeng bahan tergantung pada empat variabel:

- a. Perbedaan suhu ΔT antara permukaan-permukaan lempeng. Makin besar perbedaan temperatur, makin cepat energi panas berpindah.

- b. Ketebalan x lempeng. Makin tebal lempeng bahan, makin pelan energi panas berpindah.
- c. Luas penampang A batang benda. Makin luas penampang lempeng, makin cepat energi panas berpindah.
- d. Konduktivitas termal k bahan. Makin besar nilai k , makin cepat energi panas berpindah.

Persamaan ini dapat ditulis

$$\Delta T = IR$$

dengan R adalah resistansi termis:

$$R = \frac{\Delta x}{kA} \dots\dots\dots(8-9)$$

Resistansi termis untuk satuan luasan bahan lempengan dinamakan factor R yaitu R_f :

$$R_f = RA = \frac{\Delta x}{k}$$

Laju radiasi termis satu benda diberikan oleh

$$P = e\sigma AT^4 \dots\dots\dots(8-10)$$

dengan $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ adalah konstanta Stefan, dan e adalah emisivitas, yang bervariasi antara 0 dan 1 tergantung pada komposisi permukaan benda. Bahan-bahan yang merupakan absorber panas yang baik adalah radiator panas yang baik. Sebuah benda hitam mempunyai emisivitas 1. Benda ini merupakan radiator yang sempurna, dan menyerap semua radiasi yang datang padanya. Daya termis neto yang diradiasi oleh sebuah benda pada temperatur T dalam suatu lingkungan pada temperatur T_0 diberikan oleh

$$P_{neto} = e\sigma A(T^4 - T_0^4)$$

Spektrum energi elektromagnetik yang diradiasikan oleh benda hitam mempunyai maksimum pada panjang gelombang λ_{maks} , yang berubah secara terbalik dengan temperatur absolut benda :

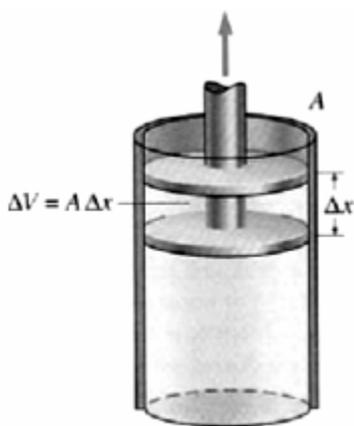
$$\lambda_{maks} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T}$$

Ini dikenal sebagai hukum pergeseran Wien.

Untuk semua mekanisme transfer panas, jika beda temperatur antara benda dan sekitarnya adalah kecil, maka laju pendinginan sebuah benda hampir sebanding dengan beda temperatur. Hasil ini dikenal sebagai hukum pendinginan Newton.

Hukum pertama termodinamika adalah pernyataan kekekalan energi. Pernyataan ini mengatakan bahwa panas neto yang ditambahkan pada suatu sistem sama dengan perubahan energi internal sistem ditambah usaha yang dilakukan oleh sistem :

$$Q = \Delta U + W$$



Gambar 8.2 Kerja & perubahan volume

Energi internal sistem adalah sifat keadaan sistem, seperti halnya tekanan, volume, dan temperatur, tetapi tidak demikian halnya dengan panas dan usaha. Energi internal gas ideal hanya tergantung pada temperatur absolut T .

Proses kuasistatik adalah proses yang terjadi secara lambat agar sistem berubah lewat serangkaian keadaan setimbang. Sebuah proses adalah isobarik jika tekanan tetap konstan, isotermis jika temperatur tetap konstan, dan adiabatik jika tidak ada panas yang ditransfer. Untuk ekspansi gas ideal secara adiabatik kuasistatik, tekanan, dan volume dihubungkan oleh

$$PV^\gamma = \text{konstan, dimana } \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Bila sebuah sistem berekspansi secara kuasistatik, usaha yang dilakukan oleh sistem diberikan oleh

$$W = \int PdV \dots\dots\dots(8-11)$$

Usaha yang dilakukan oleh gas dapat dinyatakan secara grafis sebagai luasan di bawah kurva P versus V . Usaha ini dapat dihitung jika P diketahui sebagai fungsi V untuk ekspansi tersebut. Untuk ekspansi isotermis gas ideal, usaha yang dilakukan oleh gas adalah

$$W_{\text{isotermis}} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Untuk ekspansi adiabatik gas ideal, usaha yang dilakukan oleh gas adalah

$$W_{\text{adiabatik}} = -C_v \Delta T = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{\gamma - 1}$$

Kapasitas panas pada volume konstan dihubungkan dengan perubahan energi internal oleh

$$C_v = \frac{dU}{dT}$$

Untuk gas ideal, kapasitas panas pada tekanan konstan lebih besar daripada kapasitas panas pada volume konstan dengan jumlah nR :

$$C_p = C_v + nR$$

Hukum kedua Termodinamika, muncul dari usaha untuk mencari sifat atau besaran sistem yang merupakan fungsi keadaan. Ternyata orang yang menemukannya adalah Clausius dan besaran itu disebut entropi. Pernyataan hukum kedua Termodinami adalah: Proses suatu sistem terisolasi yang disertai dengan penurunan entropi tidak mungkin terjadi. Dalam setiap proses yang terjadi pada sistem terisolasi, maka entropi sistem tersebut selalu naik atau tetap tidak berubah.

alifis

Referensi:

- Crowell Benjamin, 2005, Newtonian Physics, Creative Commons Attribution-ShareAlike.
 Dede, 2007, PPT file: Besaran Dalam Ilmu Fisika, free-ebook, dede@fisikau.ac.id
 Jonifan, dkk, 2008, Fisika Mekanika, Open Course at OCW Gunadarma.
 Miller, F.J.R., 1989, College Physics, McGraw-Hill.
 Satriawan Mirza, 2007, Basic Physics For Civil Engineering Students, free-ebook, mirza@ugm.ac.id
 Tipler, P.A., 1991, Physics fir Scientists and Engineers, Worth Publisher.