

Bab 1



MOMEN INERSIA



Standart Kompetensi

Menerapkan konsep dan prinsip mekanika klasik sistem kontinu (benda tegar dan fluida) dalam penyelesaian masalah.



Kompetensi Dasar

Memformulasikan hubungan antara konsep torsi, momentum sudut, dan momen inersia, berdasarkan hukum II Newton serta penerapannya dalam masalah benda



Indikator

- Memformulasikan pengaruh torsi pada sebuah benda pada gerak rotasi
- Mengungkap analogi hukum II Newton pada gerak rotasi
- Memformulasikan momen inersia untuk berbagai bentuk benda tegar
- Memformulasikan hukum kekekalan momentum sudut pada gerak rotasi
- Menganalisis masalah dinamika rotasi benda tegar untuk berbagai keadaan



Pendalaman Materi



A. MOMEN GAYA DAN KOPEL

MOMEN GAYA

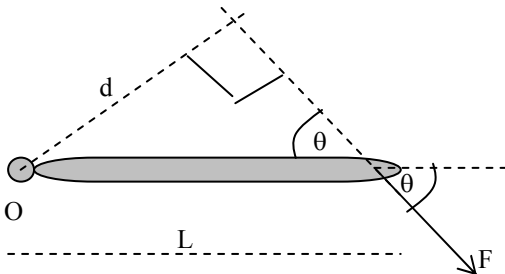
- Kecenderungan suatu gaya untuk memutar suatu benda terhadap suatu titik poros tertentu disebut momen gaya (torsi).
- Momen gaya merupakan perkalian silang (cross product) antara vector gaya dengan vector posisi.

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F}$$

- Vektor momen gaya (τ) dapat diselesaikan dengan metode sarrus. Misalkan $\mathbf{r} = r_x \mathbf{i} + r_y \mathbf{j} + r_z \mathbf{k}$ dan $\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}$ maka:

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ r_x & r_y & r_z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

- Perhatikan gambar berikut ini!



Sebuah gaya F memutar tongkat yang panjangnya L dengan sumbu putar di O . Besarnya momen gaya oleh gaya F dapat ditentukan dengan:

$$\tau = F \cdot d = F \cdot L \sin \theta$$

τ = besarnya momen gaya (N.m)

d = panjang lengan momen(m)

L = jarak antara titik tangkap gaya terhadap sumbu putar

(m)

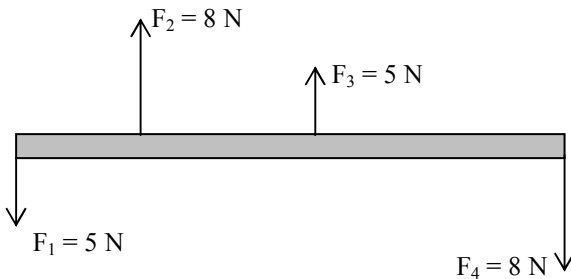
- Jika pada benda bekerja beberapa gaya misalnya F_1 , F_2 dan F_3 , maka resultan momen gaya terhadap sembarang titik pada benda tersebut sama dengan jumlah aljabar momen gaya dari masing-masing gaya terhadap titik itu.

$$\tau_R = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$$

- Momen gaya bernilai positif jika kecenderungan gaya memutar benda searah dengan putaran jarum dan bernilai negatif jika kecenderungan gaya memutar benda berlawanan arah dengan putaran jarum jam.

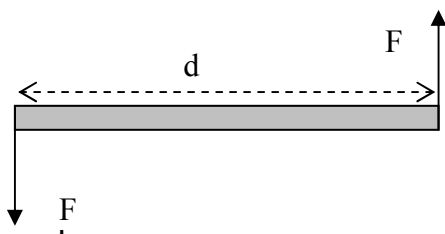
MOMEN KOPEL

- Pasangan dua buah gaya sejajar, sama besar tetapi berlawanan arah dinamakan kopel. Perhatikan gambar berikut ini!



Dari gambar di atas pasangan gaya F_1 dan F_3 membentuk sebuah kopel, pasangan gaya F_2 dan F_4 juga membentuk sebuah kopel.

Jadi secara sederhana dapat digambarkan berikut :



- Momen kopel adalah perkalian antara salah satu gaya pembentuk kopel dengan jarak antara kedua gaya.

$$M = F \cdot d$$

Dimana : M = momen kopel (N.m)

F = Besar gaya (N)

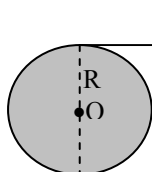
d = Jarak antara kedua gaya (m)

- Momen kopel bernilai positif jika kecenderungan kopel memutar benda searah dengan putaran jarum dan bernilai negatif jika kecenderungan gaya memutar benda berlawanan arah dengan putaran jarum jam.



Contoh Soal

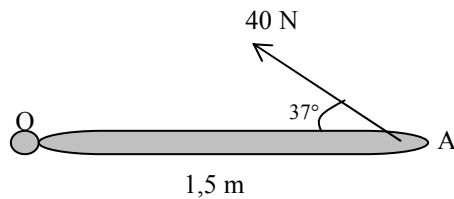
1. Sebuah silinder pejal dipasak pada poros yang licin sempurna seperti gambar berikut ini. Seutas tali dililitkan pada dinding luar silinder dan di tarik dengan gaya 5 N. Jika diameter silinder 2 m, tentukan besar dan arah momen gaya F !



$F = 5 \text{ N}$ Dari gambar tampak arah momen gaya positif (searah putaran jarum jam).

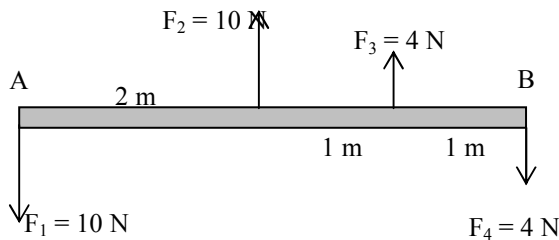
$$\tau = F \cdot \frac{1}{2} d = 5 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 5 \text{ Nm}$$

2. Tentukan besar momen gaya terhadap titik O pada batang untuk gambar berikut ini!



$$\begin{aligned} \tau &= F \cdot d = F \cdot L \sin \theta \\ &= 40 \text{ N} \cdot 1,5 \text{ m} \sin 37^\circ \\ &= 60 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0,6 = 36 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

3. Pada sebuah batang AB panjangnya 4 m berkerja empat buah gaya, yaitu $F_1 = F_2 = 10 \text{ N}$ dan $F_3 = F_4 = 4 \text{ N}$ seperti pada gambar berikut ini. Tentukan besar dan arah kopel pada batang AB!



Gaya F_1 dan F_2 membentuk momen kopel berlawanan arah dengan putaran jarum jam.

$$M_1 = -F \cdot d = -10 \text{ N} \cdot 2 \text{ m} = -20 \text{ Nm}.$$

Gaya F_3 dan F_4 membentuk momen kopel searah dengan putaran jarum jam.

$$M_2 = F \cdot d = 4 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 4 \text{ Nm}.$$

Momen kopel total:

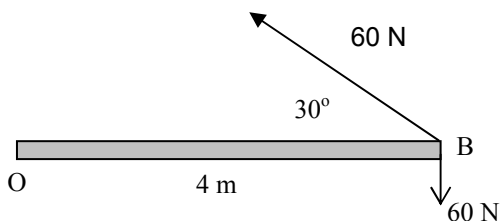
$$M = M_1 + M_2 = -20 \text{ Nm} + 4 \text{ Nm} = -16 \text{ Nm}.$$

Tanda negatif menyatakan arah putaran berlawanan arah dengan putaran jarum jam

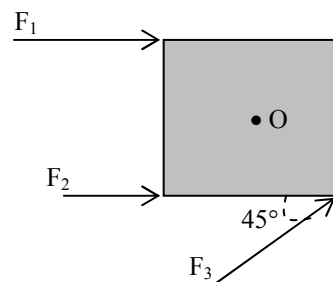
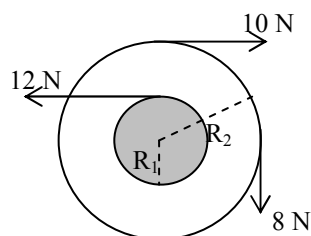


Uji Kompetensi 1

1. Tentukan besarnya momen gaya yang berkerja pada batang di bawah ini terhadap titik O.

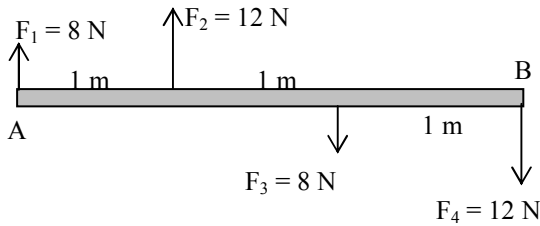


2. Tentukan besarnya momen gaya total pada roda berikut ini terhadap poros roda jika diketahui $R_1 = 10 \text{ cm}$ dan $R_2 = 25 \text{ cm}$.



3. Sebuah pelat tipis mempunyai sisi-sisi berbentuk bujur sangkar (gambar di atas) dengan panjang sisi 0,2 m. Sumbu putar di O seperti gambar berikut ini. Tentukan momen gaya terhadap titik O jika di ketahui $F_1 = 28 \text{ N}$, $F_2 = 16 \text{ N}$ dan $F_3 = 18 \text{ N}$!

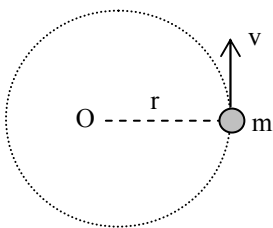
4. Pada sebuah batang AB berkerja empat buah gaya, yaitu $F_1 = 8 \text{ N}$, $F_2 = 12 \text{ N}$, $F_3 = 8 \text{ N}$ dan $F_4 = 12 \text{ N}$ N seperti pada gambar berikut ini. Tentukan besar dan arah kopel pada batang AB!



B. MOMEN INERSIA (KELEMBAMAN)

Momen inersia (momen kelembaman) merupakan ukuran kelembaman dari suatu benda atau partikel yang sedang bergerak rotasi. Dapat juga dianalogikan bila benda yang diam memiliki massa, maka ketika bergerak melingkar benda tersebut juga akan mempunyai besaran lain yang disebut momen inersia. Secara umum besaran momen inersia sebanding dengan massa benda dan kuadrat jari-jari lintasan gerak melingkar.

- Perhatikan gambar berikut ini!



Sebuah partikel bermassa m dan berjarak r dari sumbu putar akan mempunyai momen inersia:

$$I = m r^2$$

- Jika terdapat sejumlah partikel bermassa m_1, m_2, m_3, \dots dan masing masing partikel berjarak r_1, r_2, r_3, \dots terhadap sumbu putar momen inersia total adalah:

$$I = \sum_i m_i r_i^2 = m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot r_2^2 + m_3 \cdot r_3^2 + \dots$$

- Momen inersia sebuah benda tegar dimana partikelnya tersebar merata pada seluruh bagian benda dapat dihitung dengan metode integral untuk batas integral meliputi seluruh bagian benda.

$$I = \int r^2 \cdot dm$$

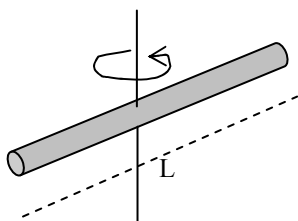
- Jika momen inersia benda terhadap pusat massa I_{pm} di ketahui, maka momen inersia benda terhadap sembarang sumbu yang paralel dengan sumbu pusat massa dapat dihitung menggunakan teori sumbu paralel.

$$I = I_{pm} + M \cdot d^2$$

M = massa benda (kg)

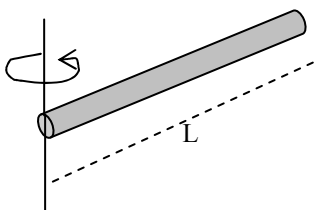
d = jarak dari sumbu pusat massa terhadap sumbu pusat massa (m)

- Momen inersia benda tegar yang mempunyai berbagai bentuk simetris tergantung letak sumbu putarnya. Lihat gambar berikut ini!



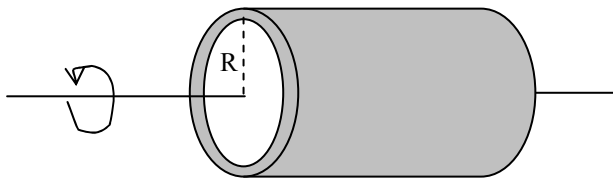
Batang silinder, poros melalui pusat

$$I = \frac{1}{12} ML^2$$



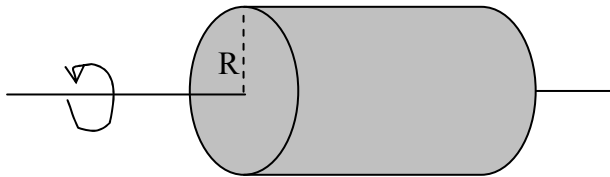
Batang silinder, poros melalui ujung

$$I = \frac{1}{3} ML^2$$



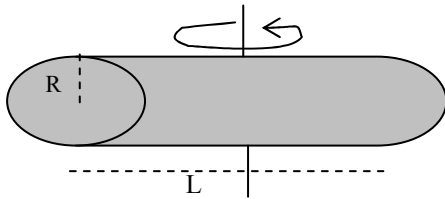
Silinder tipis berongga, poros melalui sumbu silinder

$$I = MR^2$$



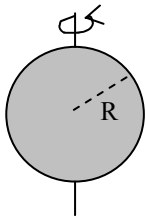
Piringan atau silinder pejal, poros melalui sumbu silinder

$$I = \frac{1}{2} MR^2$$



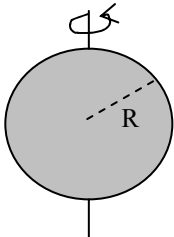
Silinder pejal, poros seperti pada gambar

$$I = \frac{1}{4} MR^2 + \frac{1}{12} ML^2$$



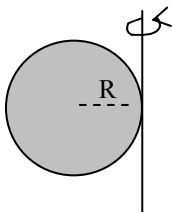
Bola pejal, poros melalui diameter

$$I = \frac{2}{5} MR^2$$



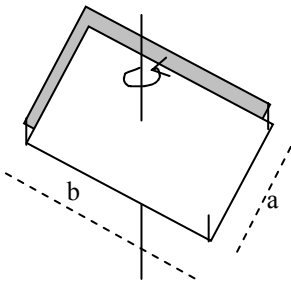
Bola berongga, poros melalui diameter

$$I = \frac{2}{3} MR^2$$



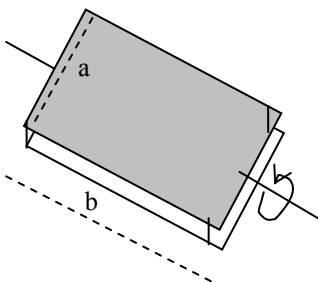
Bola pejal, poros seperti gambar

$$I = \frac{7}{5} MR^2$$



Lempeng tipis, poros melalui sumbu tegak lurus

$$I = \frac{1}{12} M(a^2 + b^2)$$



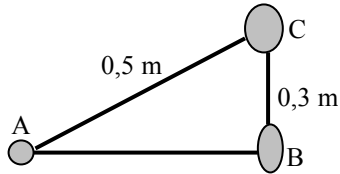
Lempeng tipis, poros seperti pada gambar

$$I = \frac{1}{12} Ma^2$$



Contoh Soal

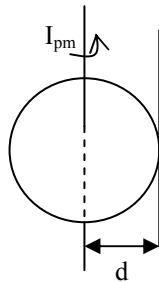
1. Tiga buah benda masing-masing bermassa $m_A = 1 \text{ kg}$, $m_B = 2 \text{ kg}$ dan $m_C = 3 \text{ kg}$. Ketiga benda dihubungkan dengan batang tak bermassa pada segi tiga seperti gambar dibawah ini. Berapakah momen inersia sistem benda jika poros putar berada di A?



Jika poros di A maka berdasarkan gambar diperoleh $r_A = 0$, $r_B = 0,4 \text{ m}$ dan $r_C = 0,5 \text{ m}$.

$$\begin{aligned}
 I &= m_A \cdot r_A^2 + m_B \cdot r_B^2 + m_C \cdot r_C^2 \\
 &= 0 + 2 \text{ kg} \cdot (0,4 \text{ m})^2 + 3 \text{ kg} \cdot (0,5 \text{ m})^2 \\
 &= 2 \text{ kg} \cdot 0,16 \text{ m}^2 + 3 \text{ kg} \cdot 0,25 \text{ m}^2 \\
 &= 0,32 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 0,75 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\
 &= 1,07 \text{ kg} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

2. Momen inersia sebuah bola pejal terhadap titik pusat massanya $I_{pm} = \frac{2}{5} MR^2$. Dengan menggunakan teori sumbu paralel tentukan momen inersia bola pejal terhadap garis singgungnya!



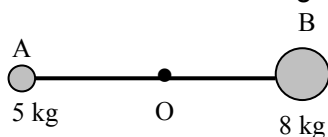
$$\begin{aligned}
 I &= I_{pm} + Md^2 \\
 &= \frac{2}{5} MR^2 + MR^2 = \frac{7}{5} MR^2
 \end{aligned}$$



Uji Kompetensi 2

1. Dua buah benda masing-masing bermassa 5 kg dan 8 kg dihubungkan dengan sebuah tongkat kayu tak bermassa yang panjangnya 1 m seperti gambar di bawah ini. Tentukan momen inersia benda jika poros putar berada di:

- titik O
- pada benda bermassa 5 kg

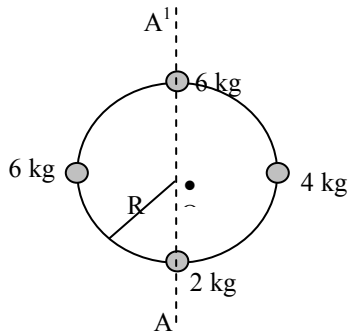


2. Sebuah batang homogen bermassa M dan panjangnya L. Jika diputar melalui poros yang terletak pada pertengahan batang momen inersianya $I_{pm} = \frac{1}{12} ML^2$. Jika poros terletak pada jarak $\frac{1}{6} L$ dari salah satu ujung batang, berapakah momen inersia batang tersebut?

3. Sebuah batang yang massanya M dan panjangnya L. Jika momen inersia batang saat diputar di tengah-tengah $= \frac{1}{12} ML^2$, tentukan momen inersia batang saat diputar dengan sumbu putar yang terletak pada jarak $\frac{1}{3} L$ dari salah satu ujungnya !

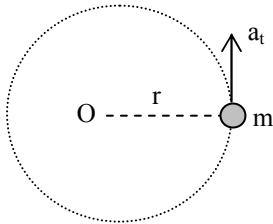
4. Keempat massa seperti tampak pada gambar berikut dihubungkan dengan kawat yang massanya dapat di abaikan. Tentukan momen inersia sistem jika sumbu putarnya:

- Melalui O tegak lurus pada bidang gambar.
- Melalui garis AA¹ diketahui jari-jari lingkaran adalah 0,5 m!



HUKUM NEWTON PADA GERAK ROTASI

- Perhatikan gambar berikut ini!



Sebuah partikel bermassa m melakukan gerak rotasi dengan jari-jari r . Gaya F memberikan percepatan tangensial.

Sesuai dengan hukum II Newton :

$$\Sigma F = m \cdot a_t$$

Karena $a_t = \alpha \cdot r$, dan ruas kiri maupun kanan dikalikan dengan r , maka :

$$(r \cdot F = m \cdot r \cdot \alpha) \cdot r$$

$$r \cdot F = (m \cdot r^2) \cdot \alpha$$

$$\tau = I \cdot \alpha$$

- Persamaan di atas mempunyai kemiripan dengan persamaan hukum II Newton pada gerak translasi $F = m \cdot a$, maka:

$$\Sigma \tau = I \cdot \alpha$$

dimana τ = momen gaya (N.m)

$\Sigma \tau$ = resultan momen gaya (Nm)

ΣF = resultan gaya (N)

m = massa benda (kg)

α = percepatan sudut (rad/s^2)

I = momen inersia benda ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

a_t = percepatan tangensial /linier (m/s^2)

- Benda yang mengalami gerak rotasi (gerak melingkar) berubah beraturan, maka berlaku :

$$\omega = \omega_0 + \alpha \cdot t$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \theta$$

$$\theta = \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t^2$$

dengan :

ω = kecepatan sudut setelah t (rad/s)

ω_0 = kecepatan sudut awal (rad/s)

α = percepatan sudut (rad/s^2)

t = waktu (s)

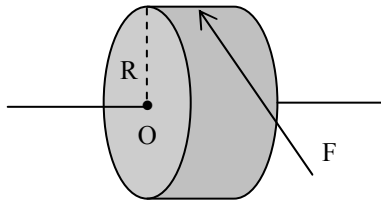
θ = sudut tempuh (rad)



Contoh Soal

- Sebuah gerinda berbentuk silinder pejal massanya 2 kg dengan jari-jari 10 cm, mula-mula diputar dengan kecepatan sudut 120 rad/s. Gerinda kemudian dihentikan oleh gaya konstan 2 N yang menyinggung tepi gerinda seperti gambar di bawah ini. Berapa lama gerinda akan berhenti?

Penyelesaian :



$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{2} MR^2 \\
 &= \frac{1}{2} 2 \text{ kg} \cdot (0,1 \text{ m})^2 \\
 &= 0,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^2
 \end{aligned}$$

Karena gaya F mengentikan gerinda dan berkerja mendatar pada tepi gerinda maka:

$$\tau = -R \cdot F = - (0,1\text{m}) \cdot 2 \text{ N} = - 0,20 \text{ N}\cdot\text{m}$$

tanda negatif artimya arah momen gaya berlawanan dengan arah putaran gerinda.

$$\tau = I \cdot \alpha \text{ atau } \alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{-0,2 \text{ Nm}}{0,01 \text{ kgm}^2} = -20 \text{ rad} / \text{s}^2$$

Dengan demikian t dapat di cari dengan persamaan:

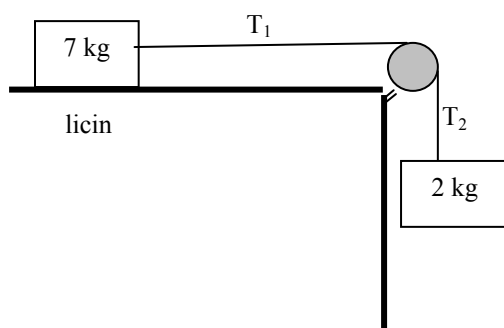
$$t = \frac{\omega_t - \omega_o}{\alpha} = \frac{0 - 120 \text{ rad} / \text{s}}{-20 \text{ rad} / \text{s}^2} = 6 \text{ sekon}$$



Uji Kompetensi 3

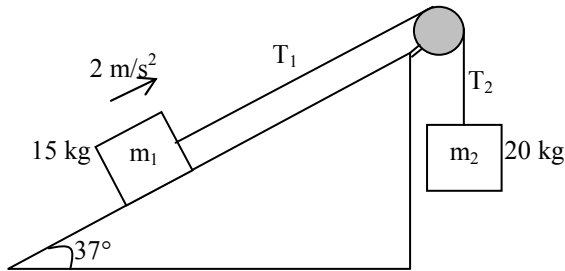
1. Pada sebuah roda pejal berjari-jari 70 cm bermassa 10 kg bekerja momen gaya sebesar 25 Nm. Tentukan percepatan sudut roda !
2. Sebuah katrol bermassa 5 kg homogen berjari-jari 20 cm digantung pada langit-langit rumah. Sebuah tali yang massanya diabaikan dililitkan pada tepi katrol dan ditarik dengan gaya 6 N. Tentukan besarnya percepatan sudut putaran katrol !
3. Sebuah batu gerinda berbentuk silinder pejal massanya 4 kg berjari-jari 8 cm. Mula-mula roda gerinda diam, dan akibat momenn gaya konstan roda gerinda berotasi mencapai kecepatan 1200 rpm dalam waktu 15 sekon. Tentukan :
 - a. percepatan sudut
 - b. resultan momen gaya yang dikerjakan pada roda
 - c. sudut putaran selama 15 s.
4. Sebuah benda berotasi dengan momen inersia $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ dan kecepatan sudut awal 5 rad/s. Agar benda berhenti dalam waktu 2,5 s, berapa besarnya momen gaya yang harus dikerjakan ?
5. Sebuah benda berbentuk silinder pejal dengan jari-jari 0,7 m dan massanya 940 kg. Mula-mula benda berotasi dengan kecepatan sudut 10 rpm. Karena gaya luar 40 N menghambat benda dibagian tepi akhirnya benda berhenti. Berapakah waktu yang perlukan gaya untuk menghambat benda hingga berhenti?
6. Massa sebuah roda dianggap terkonsentrasi pada tepi roda yang berjari-jari 34 cm. Roda berputar bebas 210 rpm dan massa roda 740 gram. Berpakah gaya gesek yang harus dikerjakan pada tepi roda agar roda berhenti dalam waktu 0,92 sekon?
7. Pada sebuah katrol bermassa 2 kg dan berjari jari 10 cm dililitkan seutas tali. Pada ujung-ujung tali tergantung benda bermassa 1 kg dan 3 kg. Jika katrol di anggap berbentuk silinder pejal dan gesekan antara tali dengan katrol tidak dapat diabaikan (katrol berputar), tentukan :
 - a. percepatan linier sistem
 - b. percepatan anguler sistem
 - c. tegangan tali masing-masing

8. Perhatikan sistem berikut ini :



Jika massa katrol 1 kg, tentukan tegangan tali T_1 dan T_2 !

9. Dua buah balok kayu seperti gambar berikut ini disamping dihubungkan dengan seutas tali dan sebuah katrol masing-masing bermassa m_1 dan m_2 yang jari-jarinya 25 cm dan momen inersianya I . Balok pada bidang miring bergerak ke atas dengan percepatan konstan 2 m/s^2 .
- Tentukan besarnya tegangan tali T_1 dan T_2 !
 - Tentukan besarnya momen inersia katrol!



D. MOMENTUM SUDUT

- Jika pada gerak translasi dikenal momentum maka pada gerak rotasi dikenal besaran momentum sudut.
- Pada gerak rotasi momentum sudut dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$L = I \cdot \omega$$

L = momentum Sudut ($\text{kg m}^2/\text{s}$)
 I = momen inersia benda (kg m^2)
 ω = Kecepatan sudut (rad/s)

- Momentum sudut termasuk besaran vector. Arah momentum sudut ditentukan dengan aturan tangan kanan terenggam. Jika keempat jari dirapatkan sesuai dengan arah gerak rotasi maka arah tunjuk ibu jari menunjukkan arah momentum sudut.

- Mengingat :

$$I = m \cdot r^2 \quad \text{dan} \quad \omega = \frac{v}{R}$$

maka :

$$L = I \cdot \omega = m \cdot R^2 \cdot \frac{v}{R} = m \cdot v \cdot R$$

- Pada gerak translasi diketahui bahwa impuls sama dengan perubahan momentum.

$$F \cdot dt = dp$$

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = \frac{d(m \cdot \omega R)}{dt}$$

($F = \frac{d(m \cdot \omega R)}{dt}$), jika ruas kiri & kanan di kalikan R , maka :

$$R \cdot F = \frac{d(m \cdot \omega R^2)}{dt}$$

$$\tau = \frac{dL}{dt}$$

Persamaan di atas merupakan pernyataan hukum II Newton untuk gerak rotasi

HUKUM KEKALKAN MOMENTUM SUDUT

- Hukum kekekalan momentum sudut menyatakan: *Jika tidak ada resultan momen gaya luar yang berkerja pada suatu benda ($\Sigma \tau = 0$), maka momentum sudut benda adalah tetap.*

$$\Sigma \tau = \frac{dL}{dt} = 0 \quad \text{maka } L \text{ adalah tetap.}$$

$$L_1 = L_2$$

$$I_1 \cdot \omega_1 = I_2 \cdot \omega_2$$

- Beberapa penerapan hukum kekekalan momentum sudut antara lain pada penari balet, pelompat indah dan kursi putar.



Contoh Soal

1. Sebuah benda bermassa 6 kg berputar terhadap titik poros O dengan kecepatan linier 4 m/s berlawanan arah dengan putaran jarum jam. Jika jarak benda terhadap sumbu putarnya 2 m, berapakah momentum sudut benda?

$$L = m \cdot v \cdot R = 6 \text{ kg} \cdot 4 \text{ m/s} \cdot 2 \text{ m} \\ = 48 \text{ kg.m}^2/\text{s}$$

2. Roda sepeda Budi mempunyai momen inersia 4 kg.m², ketika sedang berputar mempunyai momentum sudut 60π kg.m²/s. Berapakah kecepatan sudut putaran roda sepeda Budi?

$$L = I \cdot \omega \text{ atau } \omega = \frac{L}{I} = \frac{60\pi \text{ kg.m}^2/\text{s}}{4 \text{ kg.m}^2} = 15\pi \text{ rad/s}$$

3. Seorang penari balet mempunyai momen inersia 4 kg.m² ketika kedua lengannya terentang dan 1,2 kg.m² ketika kedua tangannya merapat ke tubuhnya. Penari mulai berputar dengan kelajuan sudut 1,8 putaran/sekon. Berapakah kelajuan sudut penari ketika kedua tangannya merapat ke tubuh?

Keadaan awal (lengan terentang)

$$I_1 = 4 \text{ kg.m}^2 \quad \omega_1 = 1,8 \text{ put/s}$$

Keadaan akhir (lengan merapat tubuh)

$$I_2 = 1,2 \text{ kg.m}^2 \quad \omega_2 = \dots$$

Menurut hukum kekekalan momentum sudut:

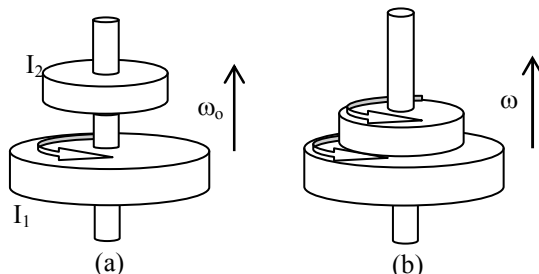
$$L_1 = L_2 \rightarrow I_1 \cdot \omega_1 = I_2 \cdot \omega_2$$

$$\omega_2 = \frac{I_1}{I_2} \cdot \omega_1 = \frac{4 \text{ kg.m}^2}{1,2 \text{ kg.m}^2} \cdot 1,8 \text{ put/s} = 6 \text{ put/s}$$



Uji Kompetensi 4

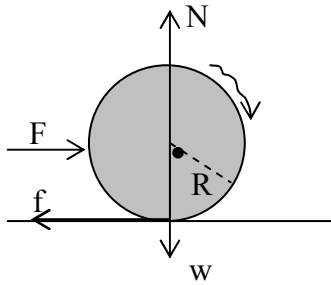
- Sebuah komedi putar berdiameter 4 m dengan momen inersia 120 kg.m² berputar dengan kelajuan sudut 0,5 putaran persekon. Empat orang anak masing-masing bermassa 25 kg tiba-tiba melompat dan duduk di tepi komedi putar. Tentukan kecepatan sudut komedi putar setelah keempat anak melompat.
- Seorang penari balet dapat berputar dengan kelajuan sudut 1,5 rps saat tangannya terentang. Momen inersia saat tangan terentang 5 kg.m². Kemudian penari balet melekatkan kedua tangan pada tubuhnya. Setelah tangan dilekatkan pada tubuhnya kelajuan sudut penari menjadi 4,5 rps. Berapakah momen inersia penari balet setelah merapatkan tangan pada tubuhnya?
- Piringan sebelah bawah pada gambar (a) mempunyai massa 440 g, jari-jari 3,5 cm dan berotasi dengan $\omega_0 = 180 \text{ rpm}$ terhadap as yang licin sempurna dan jari-jarinya dapat diabaikan. Pada mulanya piringan sebelah atas yang massanya 270 gram dan jari-jarinya 2,3 cm tidak berotasi, tetapi kemudian jatuh bebas di atas piringan di bawahnya dan akibat gesekan keduanya bergerak dengan kecepatan sudut yang sama seperti gambar (b). Berapakah kecepatan sudut ω ?





E. GERAK MENGGELINDING

- Gerak menggelinding merupakan perpaduan gerak antara gerak translasi(lurus) dan gerak rotasi.
- Perhatikan gambar berikut :



Sebuah bola didorong dengan gaya F mendatar pada bidang datar kasar. Akibat gaya gesek (f) antara bola dengan bidang, maka selain bergeser bola juga berotasi sehingga bola menggelinding. Untuk gerak translasi berlaku :

$$\sum F = m \cdot a$$

$$F - f = m \cdot a$$

Benda berotasi akibat gaya gesekan membentuk momen dengan lengan gaya R terhadap pusat bola, maka untuk gerak rotasinya berlaku :

$$\sum \tau = I \cdot \alpha$$

$$f \cdot R = I \cdot \frac{a}{R}$$

$$a = \frac{f \cdot R^2}{I}$$

a = percepatan linier (m/s^2)
 f = gaya gesekan (N)
 R = jari-jari benda (m)
 I = momen inersia ($kg \cdot m^2$)

ENERGI GERAK MENGGELINDING

- Benda yang mengalami gerak menggelinding memiliki energi kinetik translasi dan energi kinetik rotasi.

$$EK_{trans} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$EK_{rot} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

Sehingga energi gerak menggelinding adalah :

$$EK_{tot} = EK_{rot} + EK_{trans}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

EK_{tot} = energi total gerak menggelinding
 EK_{rot} = energi rotasi (J)
 EK_{trans} = energi translasi (J)
 m = massa benda (kg)
 I = momen inersia ($kg \cdot m^2$)
 v = kecepatan linier (m/s)
 ω = kecepatan sudut (rad/s)

HUKUM KEKALKAN ENERGI MEKANIK PADA GERAK MENGGELINDING

Jika momen gaya luar sama dengan nol, maka pada gerak rotasi berlaku hukum kekekalan energi mekanik :

$$EM_1 = EM_2$$

$$EP_1 + EK_{tran 1} + EK_{rot 1} = EP_2 + EK_{tran 2} + EK_{rot 2}$$

USAHA GERAK ROTASI

- Usaha yang dilakukan pada benda yang bergerak rotasi adalah usaha untuk merubah kecepatan sudutnya dan itu berarti merupakan perubahan energi kinetik rotasi.

$$W = \tau \cdot \theta = \Delta EK_{rot} = EK_2 - EK_1$$

$$W = \frac{1}{2} I \cdot \omega_2^2 - \frac{1}{2} I \cdot \omega_1^2$$

W = usaha gerak rotasi (J)

τ = momen gaya (Nm)

θ = sudut tempuh (rad)

ΔEK_{rot} = perubahan energi kinetik rotasi (J)

EK_1 = energi kinetik awal (J)

EK_2 = energi kinetik akhir (J)

I = momen inersia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

ω_1 = kecepatan sudut awal (rad/s)

ω_2 = kecepatan sudut akhir (rad/s)



Contoh Soal

- Sebuah gerinda homogen massanya 0,9 kg dan jari-jarinya 8 cm, mula-mula berputar dengan kecepatan sudut 1400 rpm. Karena pengaruh gaya gesekan akhirnya gerinda berhenti dalam waktu 35 sekon. Tentukan :
 - Berapakah usaha yang dilakukan gaya gesek untuk menghentikan gerinda?
 - Berapakah sudut yang ditempuh gerinda sebelum berhenti?

Dari data soal:

$$\omega_0 = 1400 \text{ rpm} = \frac{1400 \times 2\pi}{60} \text{ rad/s} = 146,6 \text{ rad/s}$$

$$\text{Momen inersia gerinda: } I = \frac{1}{2} MR^2 = \frac{1}{2} (0,9)(0,08)^2 = 2,88 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Energi kinetik rotasi awal:

$$EK_{ROT} = \frac{1}{2} I \omega_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,88 \times 10^{-3} \cdot (146,6)^2 = 30,95 \text{ J}$$

Energi kinetik rotasi akhir:

$$EK_{ROT} = \frac{1}{2} I \omega_f^2 = 0$$

Usaha yang dilakukan oleh gaya gesek adalah:

$$W = \tau \cdot \theta = \Delta EK_{rot} = 0 - 30,95 \text{ J} = -30,95 \text{ J}$$

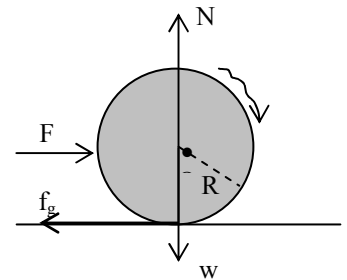
Perlambatan sudut oleh gaya gesek:

$$\omega_t = \omega_0 + \alpha t \quad \alpha = \frac{\omega_t - \omega_0}{t} = \frac{0 - 146,6 \text{ rad/s}}{35 \text{ s}} = -4,19 \text{ rad/s}^2$$

Sudut yang ditempuh gerinda dalam waktu 35 sekon:

$$\omega_t^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta$$

$$\theta = \frac{\omega_t^2 - \omega_0^2}{2\alpha} = \frac{0 - (146,6)^2}{2 \times (-4,19)} = 2565,5 \text{ rad.}$$



- Sebuah bola berongga seperti nampak pada gambar di atas ($I = \frac{2}{3} mR^2$) massanya 800 gram jari-jarinya 20 cm didorong dengan gaya mendatar 40 N seperti gambar berikut ini. Tentukan percepatan linier bola jika:

- tidak ada gaya gesekan!
- ada gaya gesekan.

Penyelesaiannya:

- Jika tidak ada gaya gesek maka bola tergelincir, artinya bola hanya melakukan gerak translasi.

$$a = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{F - f}{m} = \frac{40 \text{ N}}{0,8 \text{ kg}} = 50 \text{ m/s}^2$$

b. Jika ada gaya gesek bola akan menggelinding, artinya bola melakukan gerak translasi dan juga gerak rotasi. Gaya yang menimbulkan momen adalah gaya gesek.

$$\tau = f.R = I.\alpha \text{ atau } f.R = I.\frac{a}{R} \text{ atau } f = I.\frac{a}{R^2}$$

Untuk gerak translasi berlaku:

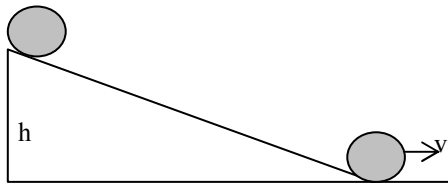
$$F - f = m.a, \text{ maka :}$$

$$F = I.\frac{a}{R^2} + m.a = \left(\frac{I}{R^2} + m\right)a$$

$$a = \frac{F}{m + \frac{I}{R^2}} = \frac{F}{m + \frac{\frac{2}{3}mR^2}{R^2}} = \frac{3F}{5m}$$

$$= \frac{3.40}{5.0,8} = \frac{120}{4} m/s^2 = 30 m/s^2$$

3. Sebuah bola pejal menggelinding menuruni bidang miring seperti gambar berikut ini. Jika bola pejal bermassa M dan jari-jarinya R , tunjukkan bahwa kecepatan linier bola saat berada di dasar bidang miring adalah $v = \sqrt{\frac{10}{7}gh}$!



Terapkan hukum kekekalan energi mekanik untuk gerak menggelinding.

$$EP = EK_{rot} + EK_{trans}$$

$$Mgh = \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}Mv^2$$

$$Mgh = \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}MR^2\right)\left(\frac{v}{R}\right)^2 + \frac{1}{2}Mv^2$$

$$Mgh = \frac{1}{5}Mv^2 + \frac{1}{2}Mv^2 \text{ atau } v = \sqrt{\frac{7}{10}gh}$$

4. Sebuah cakram pejal homogen menggelinding melalui puncak sebuah bukit dengan laju 0,8 m/s pada saat di puncak. Berapakah kelajuan cakram ketika berada 0,18 m dibawah puncak?

Terapkan hukum kekekalan energi mekanik untuk gerak menggelinding.

$$EP + (EK_{rot} + EK_{trans})_{awal} = (EK_{rot} + EK_{trans})_{akhir}$$

$$Mgh + \frac{1}{2}I\omega_0^2 + \frac{1}{2}Mv_0^2 = \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}Mv^2$$

Untuk cakram pejal: $I = \frac{1}{2}MR^2$ maka diperoleh:

$$gh + \frac{1}{4}v_0^2 + \frac{1}{2}v_0^2 = \frac{1}{4}v^2 + \frac{1}{2}v^2$$

$$gh + \frac{3}{4}v_0^2 = \frac{3}{4}v^2$$

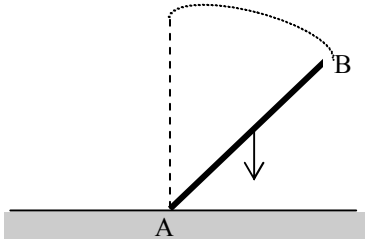
$$v = \sqrt{\frac{4}{3}gh + v_0^2} = \sqrt{\frac{4}{3}(10)(0,18) + (0,8)^2} = 1,74 \text{ m/s}$$



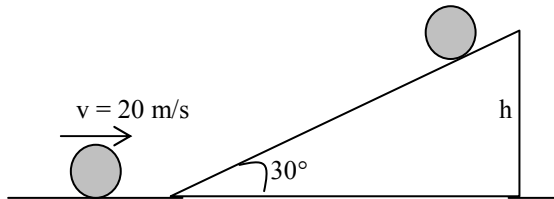
Uji Kompetensi 5

- Roda pejal bermassa 1 kg, berjari-jari 10 cm di dorong dengan gaya mendatar 100 N pada bidang datar kasar sehingga roda menggelinding. Tentukan besarnya :
 - percepatan linier roda
 - percepatan sudut roda
- Bola pejal terletak pada puncak bidang miring dengan sudut kemiringan 30° . Bola dilepas dari puncak bidang, sehingga bergerak menuruni bidang miring. Tentukan besarnya percepatan linier roda, jika bidang miring :
 - licin sempurna
 - Kasar
- Sebuah ban sepeda terpasang pada porosnya dengan jari-jari 38 cm dan momen inersia $2,7 \text{ kg.m}^2$. Ban sepeda dalam keadaan bebas berputar. Kemudian gaya luar diberikan untuk memutar ban di bagian tepi dan tegak lurus dengan jari-jari. Berapakah besar gaya yang harus diberikan agar ban sepeda dapat mencapai kelajuan sudut 690 rpm setelah melakukan 30 putaran ?

4. Batang AB yang tampak pada gambar, bermassa homogen dengan panjang 1,5 m dapat berputar dengan poros di titik A. Jika batang semula berada posisi vertikal kemudian dilepas sehingga jatuh dengan poros A tetap. Berapakan kecepatan sudut batang AB ketika tiba di lantai ?



5. Sebuah bola pejal bermassa 5 kg berjari-jari 5 cm menggelinding di atas bidang miring kasar yang membentuk sudut kemiringan 30° . Bola lepas dari puncak bidang miring yang tingginya 5 m tanpa kecepatan awal. Tentukan :
- energi total di dasar bidang miring
 - momen gaya bola
6. Pada gambar tampak sebuah bola pejal menggelinding pada lantai mendatar menuju lantai miring dengan kecepatan 20 m/s berapakah ketinggian maksimum (h) yang dapat di capai bola?



7. Dua buah silinder pejal A dan B bahan dan ukurannya sama meluncur dari puncak bidang miring yang ketinggiannya = 2 m. Jika silinder A bergerak translasi (meluncur tanpa gesekan) dan silinder B bergerak menggelinding, tentukan kecepatan masing-masing silinder saat tiba di dasar bidang miring ! Silinder mana yang lebih dulu sampai di dasar bidang miring ?
8. Benda homogen dengan momen inersia $I = k.MR^2$, dimana k adalah konstanta. Buktikan bahwa rumus untuk menentukan kelajuan akhir benda yang bergerak menggelinding dari keadaan diam di atas bidang miring dengan ketinggian h adalah:

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{k+1}}$$

EVALUASI MANDIRI



PILIHAN GANDA

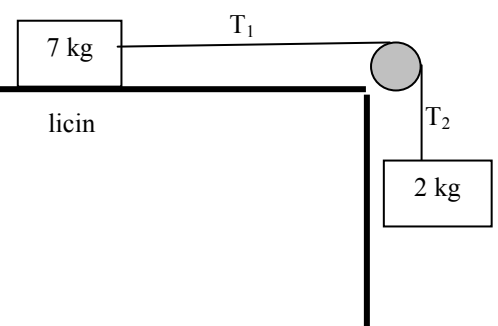
- Dimensi dari torsi adalah ...
 - ML^2T^{-2}
 - $ML^{-2}T^2$
 - ML^2T^{-2}
 - $M^{-1}L^2T^{-2}$
 - MLT
- Sebuah batang panjangnya 0,5 m ditarik tegak lurus pada ujungnya, sehingga batang berputar pada poros ujung lain. Besarnya momen gaya adalah ... Nm
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
 - 16
- Sebuah vektor gaya $F = (-5i+3j)$ N bekerja pada suatu titik poros yang memiliki vektor posisi $r = (4i+3j)$ m. Besarnya momen gayanya adalah ... Nm
 - 3
 - 4
 - 5
 - 6
 - 7

4. Sebuah titik materi berotasi dengan kecepatan sudut awal 20 rad/s menempuh sudut 100 rad, sehingga kecepatannya menjadi 60 rad/s. Jika momen inersia titik 4 kgm², maka besarnya momen gaya titik terhadap pusat rotasi adalah ... Nm
 - a. 8
 - b. 16
 - c. 32
 - d. 64
 - e. 128
5. Benda A bermassa 2m terletak pada sumbu y positif sejauh a, benda B terletak pada sumbu x positif sejauh 2a dan benda C terletak pada sumbu x negatif sejauh a dari pusat koordinat. Jika sistem diputar terhadap sumbu y, maka besarnya momen inersia sistem adalah ...
 - a. 5ma
 - b. 7ma
 - c. 5ma²
 - d. 6ma²
 - e. 7ma²
6. Sebuah batang homogen panjangnya 80 cm bermassa 1,5 diputar dengan poros pada jarak 20 cm dari salah satu ujungnya. Besarnya momen inersia batang adalah ... kgm²
 - a. 0,139
 - b. 0,931
 - c. 4,475
 - d. 9,155
 - e. 12,14
7. Sebuah roda pejal berjari-jari 70 cm bermassa 10 kg dikerjakan momen gaya 25 Nm. Besarnya percepatan sudut roda adalah ... rad/s²
 - a. 12,34
 - b. 12,11
 - c. 10,35
 - d. 10,20
 - e. 9,52
8. Sebuah silinder pejal bermassa 4 kg berjari-jari 4 cm mula-mula diam, lalu dikerjakan momen gaya sehingga kecepatan sudutnya menjadi 1200 rpm dalam waktu 20 s. Besarnya momen gaya tersebut adalah ... Nm.
 - a. $8\pi \cdot 10^{-2}$
 - b. $4\pi \cdot 10^{-2}$
 - c. $2\pi \cdot 10^{-2}$
 - d. $8\pi \cdot 10^{-4}$
 - e. $4\pi \cdot 10^{-4}$
9. Dua buah benda 4 kg dan 2 kg digantungkan pada sebuah katrol pejal yang bermassa 4 kg melalui tali yang dililitkan pada tepi katrol. Percepatan linier sistem adalah ... m/s²
 - a. 10
 - b. 5
 - c. 3,33
 - d. 2,5
 - e. 2

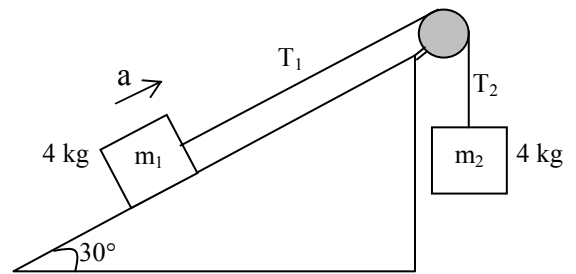
10. Perhatikan sistem berikut ini :

Jika massa katrol 2 kg, tentukan tegangan tali T₂ adalah ... N

- a. 16
- b. 14
- c. 12
- d. 10
- e. 8



11. Perhatikan gambar berikut !
 Jika massa katrol 4 kg, maka besarnya percepatan sistem adalah ... m/s^2
- 1
 - 1,5
 - 2
 - 2,5
 - 3

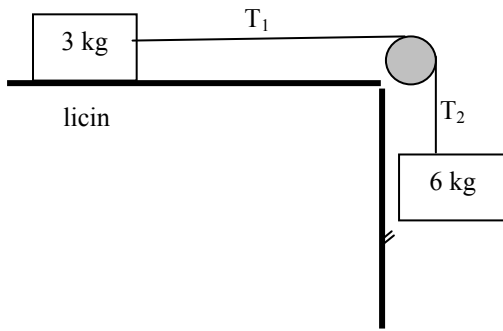


12. Sebuah bola pejal menggelinding murni dari bidang miring dengan sudut kemiringan θ . Percepatan linier bola adalah ...
- $\frac{4}{7} g \cdot \sin \theta$
 - $\frac{5}{7} g \cdot \sin \theta$
 - $\frac{6}{7} g \cdot \sin \theta$
 - $g \cdot \sin \theta$
 - $\frac{8}{7} g \cdot \sin \theta$
13. Sebuah partikel bermassa 2 gram bergerak melingkar dengan kecepatan sudut 10 rad/s^2 . Jika momentum sudutnya $8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, maka jari-jari lintasan gerak melingkarnya adalah ... cm
- 2
 - 4
 - 6
 - 8
 - 10
14. Seorang penari ballet dengan tangan terentang berputar pada kecepatan sudut ω di atas lantai licin. Jika penari tersebut melipat tangannya, momen inersianya akan berkurang 20 dari semula. Perbandingan energi kinetik rotasi saat tangan dilipat dan saat terentang adalah ...
- $3/2$
 - $2/3$
 - $5/4$
 - $4/5$
 - $3/4$
15. Sebuah silinder pejal bermassa 12 kg berjari-jari 40 cm menggelinding dengan kecepatan 5 m/s. Energi kinetik silinder adalah ...J
- 225
 - 205
 - 196
 - 147
 - 125

URAIAN

- Sebuah roda pejal berjari-jari 20 cm bermassa 15 kg berotasi pada sumbunya. Roda mula-mula diam, lalu mengalami percepatan 1 rad/s . Hitunglah :
 - momentum sudutnya
 - energi kinetik rotasi pada detik ke 5
- Sebuah roda pejal bermassa 2 kg berjari-jari 10 cm berada pada lantai kasar. Melalui sumbunya roda didorong dengan gaya 15 N, sehingga roda menggelinding. Hitunglah :
 - momen inersia bola
 - percepatan linier roda
 - percepatan anguler roda
 - kecepatan linier roda
 - kecepatan anguler roda
 - energi kinetik total gerak roda

3. Perhatikan sistem berikut :



Benda bermassa 3 kg terletak pada bidang datar kasar yang koefisien geseknya 0,2. Jika massa katrol 2 kg dan jari-jarinya 10 cm, tentukan percepatan sistem.

Bab 2



FLUIDA TIDAK BERGERAK



Standart Kompetensi

Menerapkan konsep dan prinsip mekanika klasik sistem kontinu (benda tegar dan fluida) dalam penyelesaian masalah.



Kompetensi Dasar

Menganalisis hukum-hukum yang berhubungan dengan fluida statik dan dinamik dan dapat menerapkan konsep tersebut dalam kehidupan sehari-hari.



Indikator

- Memformulasikan hukum dasar fluida statik
- Menerapkan hukum dasar fluida statik pada masalah fisika sehari-hari.



Pendalaman Materi

Fluida adalah zat yang dapat mengalir dan memberikan sedikit hambatan terhadap perubahan bentuk ketika ditekan. Yang termasuk fluida adalah zat cair dan gas. Ilmu yang mempelajari fluida tak mengalir disebut hidrostatis.



A. TEKANAN HIDROSTATIS

Tekanan adalah gaya yang bekerja tegak lurus pada suatu bidang per satuan luas bidang itu.

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

P = tekanan (N/m² = Pa)

F = gaya (N)

A = luas (m²)

Satuan tekanan yang lain adalah : atm (atmosfer), cmHg, milibar (mb), dengan konversi :

- 1 bar = 10⁵ Pa
- 1 atm = 1,01.10⁵ Pa = 75 cmHg
- 1 mb = 0,001 bar

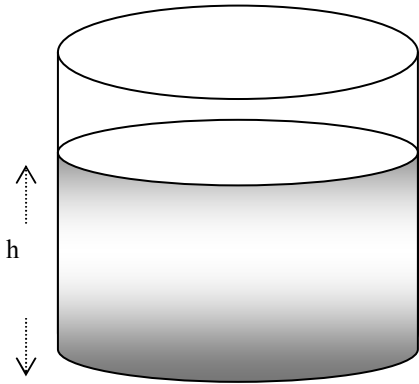
Tekanan gauge adalah selisih antara tekanan yang tidak diketahui (tekanan total) dan tekanan atmosfer (tekanan udara luar). Nilai tekanan yang diukur oleh alat pengukur tekanan menyatakan tekanan gauge, sedangkan tekanan sesungguhnya disebut tekanan mutlak.

Tekanan Mutlak =
Tekanan gauge + Tekanan Atmosfer
atau

$$P = P_{\text{gauge}} + P_{\text{atmosfer}}$$

Tekanan hidrostatis adalah tekanan yang disebabkan oleh zat alir yang diam. Zat alir yang bermassa m menekan dasar bejana dengan gaya sebesar $F = w = m.g = V.p.g$. Gaya ini tersebar merata pada

seluruh permukaan dasar bejana. Karena zat alir dalam bejana diam dan melakukan gaya ke bawah akibat berat zat alir.



Tekanan hidrostatis yang dialami suatu titik pada kedalaman h dalam suatu fluida diam yang massa jenisnya ρ adalah :

$$P_h = \frac{F}{A} = \frac{w}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{A}$$

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h$$

P_h = tekanan hidrostatis (Pa)
 ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
 h = kedalaman fluida (m)

Dengan demikian tekanan total yang dialami suatu titik pada kedalaman h di dalam fluida yang diam adalah :

$$P = P_{atm} + P_h$$

$$P = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$$

P_{atm} adalah tekanan akibat fluida lain di atasnya (dalam hal ini adalah berasal dari tekanan udara).

MASSA JENIS BENDA

Massa jenis suatu benda didefinisikan sebagai hasil bagi antara massa benda tersebut dengan volumenya.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Massa jenis relatif adalah hasil bagi dari massa jenis bahan terhadap massa jenis air, sehingga :

$$\rho_r = \frac{\rho_{\text{bahan}}}{\rho_{\text{air}}}$$



Contoh Soal

Dasar danau memiliki kedalaman 20 m. Jika massa jenis air 1 gr/cm^3 (1000 Kg.m^{-3}) dan tekanan di atas permukaan air 1 atm, tentukan tekanan total di dasar danau !

Penyelesaian :

$$P = P_{atm} + P_h$$

$$P = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$$

$$P = 1,013 \cdot 10^5 + 1000 \cdot 10 \cdot 20$$

$$P = 1,013 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^5 = 3,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$



Uji Kompetensi 1

1. Sebuah kursi bermassa 6 kg memiliki empat kaki yang luas penampangnya masing-masing 10^{-3} m^2 . Tentukan tekanan kursi terhadap lantai !
2. Sebuah botol bermassa 0,8 kg berada di atas meja. Jika diameter alas botol 8 cm, tentukan tekanan botol pada meja !
3. Seekor ikan menyelam di dasar laut yang bermassa jenis $1,013 \text{ gr/cm}^3$. Ikan mengalami tekanan hidrostatis yang sama dengan tekanan atmosfer. Tentukan kedalaman ikan tersebut !
4. Suatu zat bermassa 200 gram memiliki volume 2000 cm^3 . Tentukan massa jenisnya !
5. Suatu logam campuran terdiri dari 0,2 kg logam A yang bermassa jenis 2000 kg/m^3 dan logam B sebanyak 0,4 kg yang bermassa jenis 8000 kg/m^3 . Tentukan massa jenis rata-rata logam campuran tersebut !
6. Sebuah velg mobil anti karat bermassa 1,58 kg dan volumenya $49,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ terbuat dari bahan campuran aluminium dan besi. Jika kandungan besi pada campuran 24 %, massa jenis besi dan aluminium 7900 kg/m^3 dan 2700 kg.m^3 , tentukan :
 - a. Massa jenis campuran
 - b. Massa besi
 - c. Massa aluminium
 - d. Volume besi
 - e. Volume aluminium

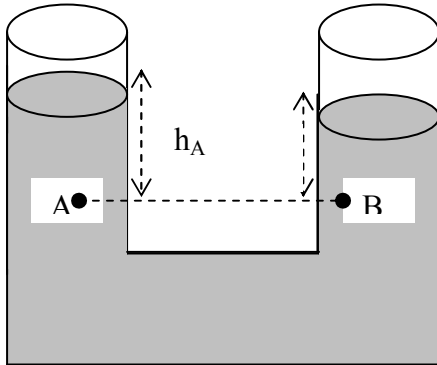
- Sebuah benda terbuat dari bahan gelas berbentuk kubus dengan rusuk 4 cm, ditengah-tengahnya berongga berbentuk bola. Jika massa gelas 120 gram dan massa jenisnya 3000 kg/m^3 , tentukan volume rongga tersebut!
- Sebuah logam berbentuk balok memiliki ukuran $0,8 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ dan massa jenis 5000 kg/m^3 . Hitunglah tekanan maksimum dan minimum yang dapat dikerjakan logam tersebut pada suatu permukaan datar !



B. HUKUM-HUKUM PADA FLUIDA TIDAK BERGERAK.

HUKUM UTAMA HIDROSTATIKA

Hukum utama hidrostatika menyatakan bahwa *semua titik yang terletak pada satu bidang datar di dalam fluida yang diam, akan mengalami tekanan hidrostatik yang sama besar dan tidak bergantung pada bentuk bejananya.*



Sesuai dengan hukum utama hidrostatika, maka tekanan di titik A sama dengan tekanan di titik B.

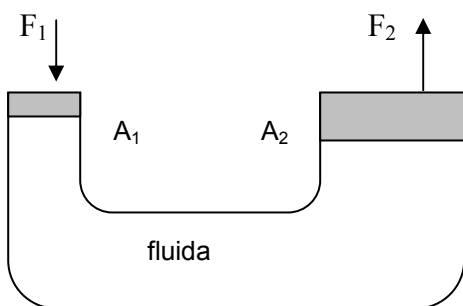
$$P_A = P_B = \rho \cdot g \cdot h_A$$

HUKUM PASCAL

"Zat alir yang berada di dalam ruang tertutup bila diberi tekanan, maka tekanan tersebut akan diteruskan ke segala arah dengan besar yang sama"

Prinsip hukum Pascal dapat diterapkan pada alat-alat seperti : dongkrak hidrolik, alat pengangkat mobil, alat pengepres, alat pengukur tekanan darah (truk hidrolik dan dongkrak hidrolik. tensimeter), rem hidrolik, pompa hidrolik, dump truck, dan lain sebagainya.

Perhatikan gambar ilustrasi dongkrak hidrolik berikut :



Jika pengisap 1 luas penampangnya A_1 di tekan dengan gaya F_1 , zat cair akan menekan ke segala arah. Tekanan ini akan diteruskan ke pengisap 2 yang luas penampangnya A_2 dengan gaya F_2 dengan sama besar, sehingga :

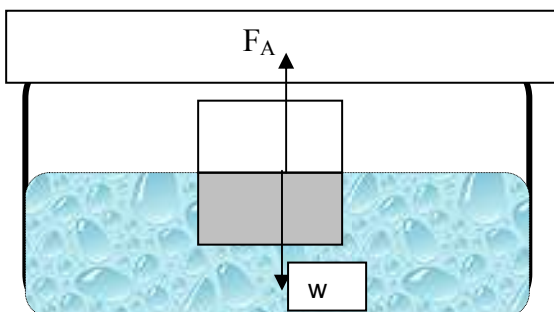
$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

F_1 dan F_2 = gaya pada piston 1 dan piston 2
 A_1 dan A_2 = luas penampang piston 1 dan 2
 P_1 dan P_2 = tekanan pada piston 1 dan 2 (Pa)

HUKUM ARCHIMEDES

"Bila sebuah benda dimasukkan ke dalam zat cair, baik sebagian maupun seluruhnya, maka benda akan mendapatkan gaya angkat ke atas (gaya archimedes) seberat volume zat cair yang dipindahkan atau seberat volume benda yang tercelup"



Besarnya gaya ke atas yang dialami oleh benda yang tercelup dalam zat cair adalah :

$$F_A = \rho_f \cdot g \cdot V'$$

F_A = gaya ke atas (N)
 ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3)
 V' = volume benda yang tercelup (m^3)

Beberapa kemungkinan yang dialami oleh benda yang berada di dalam fluida antara lain :

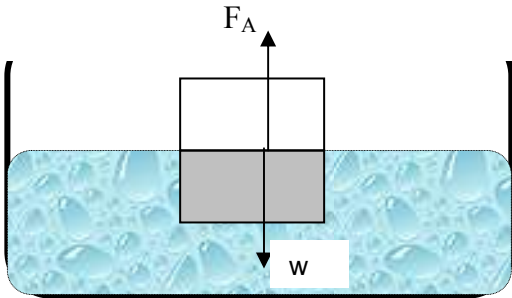
1. Terapung

Benda dikatakan terapung jika ada bagian benda yang muncul di atas permukaan fluida.

Syarat benda terapung adalah :

- berat benda (w) = Gaya ke atas (F_A)
- massa jenis benda (ρ_b) < massa jenis fluida (ρ_f)

Jadi :



$$w = F_A$$

$$\rho_b \cdot g \cdot V_b = \rho_f \cdot g \cdot V'$$

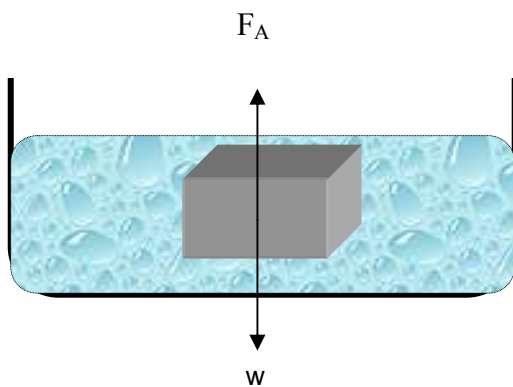
$$\rho_b \cdot V_b = \rho_f \cdot V'$$

2. Melayang

Benda dikatakan melayang jika benda tidak terletak di dasar bejana, tetapi juga tidak ada bagian benda yang muncul di permukaan fluida. Jadi semua bagian benda tercelup seluruhnya.

Syarat benda melayang adalah :

- berat benda (w) = Gaya ke atas (F_A)
- massa jenis benda (ρ_b) = massa jenis fluida (ρ_f)

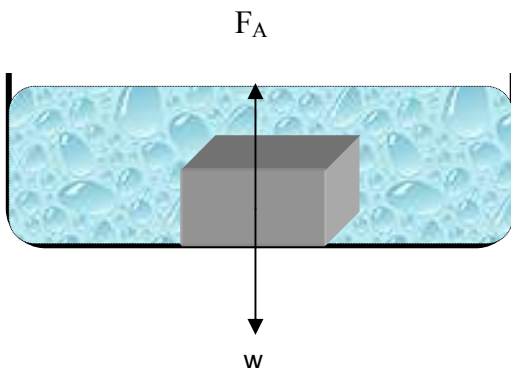


3. Tenggelam

Benda dikatakan tenggelam jika benda terletak di dasar bejana. Jadi semua bagian benda tercelup seluruhnya.

Syarat benda tenggelam adalah :

- berat benda (w) > Gaya ke atas (F_A)
- massa jenis benda (ρ_b) > massa jenis fluida (ρ_f)



Berat semu dan berat di udara

Berat benda saat ditimbang di udara lebih besar dari pada di dalam fluida, karena di dalam fluida benda mengalami gaya tekan ke atas. Hubungan antara berat benda di udara, berat benda di dalam fluida dan gaya ke atas yang dialami benda adalah :

$$w_f = w_u - F_a$$

w_f = berat benda di dalam fluida (N)
 w_u = berat benda di udara
 F_a = gaya ke atas yang dialami benda

Penerapan Hukum Archimedes

Alat dan benda yang prinsip kerjanya berdasarkan hukum Archimedes antara lain :

1. kapal selam yang dapat mengapung, melayang dan tenggelam
2. kapal laut, yang terbuat dari besi namun dapat mengapung
3. galangan kapal, untuk memperbaiki atau memeriksa bagian bawah kapal
4. jembatan ponton, yang dapat mengapung di atas air.
5. hidrometer, untuk mengukur massa jenis fluida
6. balon udara, yang dapat naik ke atas



Aktivitas 1

TERAPUNG, MELAYANG, TENGGELAM

Tujuan :

Menemukan penyebab gejala pada sebuah benda dapat terapung, melayang, tenggelam.

Alat dan bahan :

1. gelas
 2. telur mentah
 3. air
 4. garam
- sendok

Kegiatan 1

1. Tuangkan $\frac{1}{2}$ gelas air ke dalam sebuah gelas kaca bening
2. perlahan-lahan masukkan sebuah telur mentah ke dalamnya
3. amati gejala yang terjadi

Kegiatan 2

1. Perlahan-lahan masukkan 2 sendok makan garam halus ke dalam gelas yang berisi air dan telur (dari percobaan 1), lalu aduklah.
2. amati gejala yang terjadi

Kegiatan 3

1. Masukkan $\frac{1}{2}$ gelas air tawar ke dalam gelas yang berisi air garam pada kegiatan 2. (ini harus dilakukan hati-hati dan perlahan-lahan agar air tawar tidak bercampur dengan air garam.
2. amati gejala yang terjadi.

Tugas

Dari kegiatan di atas, apa yang dapat kamu simpulkan !



Contoh Soal

Mesin pengangkat mobil memiliki penampang besar dan kecil. Diameter penampang piston besar 5 kali diameter penampang kecil. Sebuah mobil bermassa 1 ton akan di angkat pada piston besar. Tentukan gaya minimal yang harus diberikan pada piston kecil !

Penyelesaian :

$$d_1 = 5 \cdot d_2$$

$$F_1 = w_1 = m \cdot g = 1000 \cdot 10 = 10.000 \text{ N}$$

$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$, sehingga persamaan Pascal menjadi :

$$\frac{F_1}{d_1^2} = \frac{F_2}{d_2^2}$$

$$\frac{10.000}{(5d_2)^2} = \frac{F_2}{d_2^2}$$

$$F_2 = 400 \text{ N}$$



Uji Kompetensi 2

1. Seorang penyelam mengalami tekanan 120.000 Pa pada saat menyelam di dalam air yang massa jenisnya 1 g/cm^3 . Tentukan kedalaman penyelam tersebut !
2. Sebuah drum tingginya 150 cm penuh berisi air yang massa jenisnya 1 g/cm^3 . Tentukan tekanan hidrostatis pada suatu titik yang letaknya $\frac{2}{5}$ dari tinggi drum !

3. Seorang penyelam sedang melakukan penyelidikan di sebuah danau yang massa jenis airnya 1 g/cm^3 . Dia mengalami tekanan sebesar $5,91 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Jika tekanan atmosfer sebesar 1 tm dan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan kedalaman penyelam!
4. Sebuah tabung berbentuk huruf U mula-mula diisi dengan air yang massa jenisnya 1 g/cm^3 . Pada kaki kiri tabung dituangkan minyak yang massa jenisnya $0,8 \text{ g/cm}^3$. Tentukan perbedaan ketinggian permukaan air dan minyak pada kedua kaki tabung ?
5. Sebuah pipa berbentuk U berisi air, lalu salah satu kaki pipa diisi minyak yang bermassa jenis $0,8 \text{ g/cm}^3$ dengan ketinggian 20 cm . Tentukan berapa beda tinggi air pada kedua kaki pipa !
6. Dalam pipa U terdapat air raksa yang massa jenisnya $13,6 \text{ g/cm}^3$. Melalui kaki kiri pipa dituangkan air setinggi 8 cm dan minyak setinggi 12 cm . Jika massa jenis air 1 g/cm^3 dan $0,8 \text{ g/cm}^3$, berapa selisih tinggi permukaan raksa pada kedua kaki pipa ?
7. Dongkrak hidrolik dengan luas penampang berdiameter 2 mm dan 100 mm . Berapa gaya yang harus dikerjakan pada penampang kecil untuk mengangkat mobil yang beratnya 6000 N ?
8. Sebuah dongkrak hidrolik perbandingan gaya piston kecil dan besar $1:4$. Jika luas penampang kecil luasnya $0,05 \text{ m}^2$, berapa luas pengisap besar ?
9. Sebuah dongkrak hidrolik memiliki luas penampang besar 5 kali luas penampang kecil. Pada penampang besar diberi beban 400 kg . Tentukan massa beban yang harus siletakkan di penampang kecil agar dongkrak dalam keadaan seimbang !
10. Sebuah balok dicelupkan ke dalam minyak yang massa jenisnya $0,8 \text{ g/cm}^3$ dan balok tercelup dua per limanya. Berapa massa jenis balok tersebut ?
11. Sebuah batu volumenya $0,5 \text{ m}^3$ tercelup seluruhnya ke dalam fluida yang massa jenisnya $1,5 \text{ g/cm}^3$. Tentukan gaya ke atas yang dialami batu !
12. Benda yang bermassa 600 gram terapung di dalam air yang massa jenisnya 1000 kg/m^3 . Jika $\frac{1}{4}$ bagian benda muncul di atas permukaan air, tentukan volume benda !
13. Sebuah benda terapung dipermukaan fluida dengan $\frac{1}{4}$ bagian muncul di atas permukaan fluida. Jika massa jenis fluida 800 kg/m^3 , tentukan massa jenis benda !
14. Berat benda di udara 40 N dan ketika di dalam air 36 N . Tentukan :
 - a. Gaya apung
 - b. Volume benda
 - c. Massa jenis benda
15. Balok aluminium yang massa jenisnya 2700 kg/m^3 dan massanya 2 kg digantungkan pada neraca pegas. Berapakah hasil bacaan neraca pegas ketika balok aluminium :
 - a. berada di udara
 - b. tercelup seluruhnya di dalam air ($\rho \text{ air} = 1 \text{ g/cm}^3$)
 - c. tercelup $\frac{1}{2}$ bagian di dalam air ?
16. Sebongkah es dengan massa jenis 920 kg/m^3 terapung di air laut yang massa jenis airnya 1030 kg/m^3 . Tentukan volume bagian es yang tercelup !
17. Sebuah balok yang tingginya 25 cm bermassa jenis 800 kg/m^3 . Saat dicelupkan ke dalam fluida yang bermassa jenis $1,25 \text{ g/cm}^3$ balok terapung. Tentukan berapa tinggi balok yang muncul di atas permukaan fluida !
18. Sebuah benda terapung di atas permukaan air yang berlapis minyak dengan 50% volume benda berada di dalam air, 30% di dalam minyak dan sisanya berada di atas permukaan minyak. Jika massa jenis air dan minyak masing-masing 1 g/cm^3 dan $0,8 \text{ g/cm}^3$, tentukan massa jenis benda !
19. Sebuah benda berbentuk kubus dengan rusuk 10 cm dan massa jenisnya $0,6 \text{ g/cm}^3$ diikat dengan tali dan dicelupkan seluruhnya ke dalam air pada sebuah bejana. Jika massa jenis air 1 g/cm^3 , tentukan besarnya tegangan tali !
20. Jembatan ponton dibuat dari drum yang terapung di atas permukaan air. Setiap drum terisi udara sehingga secara keseluruhan bermassa 20 kg dan volume rata-rata 2 m^3 . Tentukan berat beban maksimum yang dapat melewati jembatan drum tersebut !



C. TEGANGAN PERMUKAAN , KAPILARITAS & VISKOSITAS (Materi Pengayaan)

TEGANGAN PERMUKAAN

Tegangan permukaan fluida adalah kecenderungan fluida untuk meregang sehingga permukaannya seperti tertutup oleh suatu lapisan elastis. Hal ini terjadi karena adanya gaya tarik antar molekul, sehingga permukaan zat cair berperilaku sebagai selaput yang tegang. Gaya molekul di dalam selaput akan memperkecil luas permukaan. Tegangan permukaan juga dipengaruhi oleh suhu fluida. Semakin tinggi suhu fluida, semakin kecil besarnya tegangan permukaan fluida.

Beberapa contoh tegangan permukaan adalah :

1. pisau silet dan jarum yang dapat terapung di atas permukaan air, walaupun massa jenisnya lebih besar dari massa jenis air.
2. nyamuk atau hewan air yang dapat hinggap di atas permukaan air.

3. tetes air yang jatuh pada permukaan kaca berbentuk bulatan (bola).
 Besarnya tegangan permukaan yang dialami benda yang memiliki satu permukaan adalah :

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

Bila benda memiliki dua permukaan, seperti seutas kawat yang dapat meluncur pada kedua kaki kawat U, maka tegangan permukaannya menjadi :

$$\gamma = \frac{F}{2.l}$$

γ = tegangan permukaan (N/m)
 F = gaya tegangan permukaan (N)
 l = panjang benda (m)

KAPILARITAS

Kapilaritas merupakan gejala naik turunnya suatu fluida pada suatu pipa kapiler (pipa sempit). Kapilaritas dipengaruhi oleh gaya adhesi, gaya kohesi dan tegangan permukaan. Gaya adhesi adalah gaya interaksi antara dua benda yang tak sejenis, sedangkan gaya kohesi adalah gaya interaksi dua benda sejenis. Gaya tegangan permukaan akan sama dengan berat dari fluida yang naik atau turun. Contoh gejala kapilaritas adalah :

1. naiknya minyak pada sumbu kompor
2. meresapnya air pada tembok di musim hujan
3. naiknya air dari akar tanaman samapai ke daun
4. meresapnya minyak rambut dari akar rambut hingga ujung rambut

Air di dalam pipa kapiler naik dan terjadi meniskus cekung, karena adhesi antara partikel air dengan partikel gelas tabung lebih besar dari pada kohesi antar partikel air.

Raksa di dalam pipa kapiler turun dan terjadi meniskus cembung, karena adhesi antara partikel raksa dengan partikel gelas tabung lebih kecil dari pada kohesi antar partikel raksa.

Besarnya kenaikan dan turunya fluida di dalam pipa kapiler adalah :

$$y = \frac{2.\gamma.\cos\theta}{\rho.g.r}$$

y = kenaikan / penurunan fluida dalam pipa
 θ = sudut kontak ($^{\circ}$)
 ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
 r = jari-jari pipa kapiler (m)

Sudut kontak adalah sudut yang dibentuk antara permukaan zat cair dengan permukaan dinding pipa kapiler pada titik persentuhan zat cair dengan dinding pipa kapiler.

Pada peristiwa kapilaritas air (meniskus cekung) sudut kontaknya lancip ($\theta < 90^{\circ}$), sedangkan pada kapilaritas raksa (meniskus cembung) sudut kontaknya tumpul ($\theta > 90^{\circ}$).

VISKOSITAS

Viskositas merupakan ukuran kekentalan suatu fluida. Sebutir kelereng yang dijatuhkan ke dalam gelas kaca yang berisi minyak oli, maka kelereng akan mengalami perlambatan gerak, karena adanya gesekan di dalam fluida. Besarnya gaya gesekan yang dialami kelereng dalam fluida adalah :

$$F_g = 6.\pi.\eta.r.v$$

F_g = gaya gesekan benda dalam fluida (N)
 η = koefisien gesekan (N.s/m^2)
 r = jari-jari benda bola (m)
 v = kecepatan benda dalam fluida (m/s)

Sebuah kelereng yang dijatuhkan di dalam fluida kental, mula-mula kecepatannya bertambah besar, namun pada suatu kedudukan tertentu, kecepatannya akan konstan. Kecepatan kelereng paling besar

dan konstan ini di namakan dengan *kecepatan terminal* (*kecepatan batas = kecepatan terminus*) yang besarnya :

$$v_T = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g}{9 \cdot \eta} \cdot (\rho_b - \rho_f)$$

v_T = kecepatan terminal (m/s)

r = jari-jari (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

ρ_b = massa jenis benda (kg/m^3)

ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3)



Uji Kompetensi 2

1. Sebatang jarum yang massanya 2 gram dan panjangnya 5 cm dapat terapung di atas permukaan fluida. Tentukan besarnya tegangan permukaan fluida !
2. Sebatang kawat berbentuk huruf U dimasukkan kedalam air sabun, kemudian diangkat. Kawat AB bermassa 0,3 gram dan panjangnya 12 cm dihubungkan pada kedua kaki kawat U sehingga mudah bergerak naik dan turun sepanjang kawat U. Pada kawat AB digantungi beban. Jika terjadi selaput air sabun dengan tegangan permukaan $2,8 \cdot 10^{-2}$ N/m, tentukan besarnya massa beban yang digantungkan pada kawat AB agar sistem dalam keadaan seimbang.
3. Sebuah pipa kapiler berdiameter 0,9 mm dimasukkan kedalam alkohol bersuhu $20^\circ C$. Massa jenis alkohol $800 kg/m^3$. Jika sudut kontak 45° dan tegangan permukaan 0,023 N/m, tentukan besarnya kenaikan alkohol dalam pipa kapiler !
4. Sebuah pipa kapiler diameternya 0,6 mm dimasukkan kedalam air. Jika air dalam pipa naik setinggi 5 cm dan besarnya sudut kontak 30° , tentukan besarnya tegangan permukaan !
5. Berapa penurunan raksa dalam sebuah pipa yang berjari-jari 2 mm, jika sudut kontak raksa dengan kaca 150° , tegangan permukaan 0,545 N/m dan massa jenis raksa $13600 kg/m^3$?
6. Sebuah bola bermassa jenis $6,36 g/cm^3$ dan berdiameter 2 cm jatuh kedalam gliserin yang massa jenisnya $5,1 g/cm^3$ dan koefisien viskositasnya 1,4 Pa.s. Tentukan kecepatan terminal bola tersebut !
7. Sebuah bola yang massa jenisnya $2600 kg/m^3$ dijatuhkan ke dalam minyak yang massa jenisnya $950 kg/m^3$ dengan koefisien viskositas $1,2 \cdot 10^{-3}$ Pa.s. Dalam waktu 10 s, bola telah bergerak 83 cm. Tentukan jari-jari bola !
8. Hitung kecepatan maksimum sebutir air hujan yang berjari-jari 0,2 mm yang jatuh di udara ($\rho = 1,29 kg/m^3$ dan $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} kg/m.s$) !

EVALUASI MANDIRI



Pilihan ganda

1. Sebatang tembaga bermassa 15 gram dan massa jenisnya $8,9 \cdot 10^3 kg/m^3$ memiliki volume ... cm^3
 - a. 0,6
 - b. 6
 - c. 1,7
 - d. 17
 - e. 134
2. Logam campuran terbuat dari 0,04 kg logam A yang massa jenisnya $8000 kg/m^3$ dan 0,1 kg logam B bermassa jenis $10000 kg/m^3$. Massa jenis rata-rata logam campuran tersebut adalah ... kg/m^3
 - a. 9.000
 - b. 9.100
 - c. 9.200
 - d. 9.300
 - e. 9.500

3. Sebuah mobil beroda empat memiliki tekanan gauge udara di dalam ban 2 bar dan luas tiap ban yang bersentuhan dengan jalan 140 cm^2 . Massa mobil tersebut adalah ... kg
 - a. 280
 - b. 560
 - c. 840
 - d. 1.120
 - e. 1.400

4. Sebuah bak mandi berisi air penuh setinggi 20 cm. Besarnya tekanan hidrostatis yang dialami dasar bak mandi adalah ... Pa
 - a. 20.000
 - b. 2.000
 - c. 1.000
 - d. 200
 - e. 100

5. Tekanan mutlak pada kedalaman 50 m di bawah permukaan danau adalah.... Pa. (jika massa jenis air danau 1 g/cm^3 , tekanan atmosfer 10^5 Pa).
 - a. 100.000
 - b. 400.000
 - c. 500.000
 - d. 600.000
 - e. 750.000

6. Sebuah mesin pengepres hidrolik memiliki penghisap input berdiameter 10 mm dan pengisap output berdiameter 50 mm. Gaya input 80 N memberikan gaya output sebesar ... N
 - a. 3,2
 - b. 16
 - c. 200
 - d. 400
 - e. 2.000

7. Sebuah tabung U berisi air. Pada salah satu kinya dituangkan fluida setinggi 10 cm, sehingga beda ketinggian fluida dan air pada kedua kaki tabung 3 cm. Massa jenis fluida yang dituangkan tersebut adalah ... g/cm^3
 - a. 0,3
 - b. 0,7
 - c. 1
 - d. 1,2
 - e. 1,4

8. Sebuah balok kayu volumenya 10^{-4} m^3 muncul $\frac{3}{5}$ bagian bagian ketika dimasukkan ke dalam air yang massa jenisnya 1 g/cm^3 . Besarnya gaya ke atas yang dialami balok adalah ... N
 - a. 500.000
 - b. 400.000
 - c. 100.000
 - d. 0,4
 - e. 0,04

9. Bola besi seberat bermassa 0,2 kg diikatkan pada seutas kawat dan dicelupkan seluruhnya ke dalam minyak (ρ minyak = $0,8 \text{ g/cm}^3$). Jika massa jenis besi $7,9 \text{ g/cm}^3$, maka gaya tegangan kawat adalah ... N
 - a. 2,2
 - b. 2
 - c. 1,8
 - d. 1,6
 - e. 1,2

10. Neraca pegas menunjukkan angka 30 N ketika sebuah balok yang diikatkan pada neraca, tetapi menunjuk angka 21 N ketika batu dicelup seluruhnya di dalam air. Massa jenis rata-rata balok adalah ... g/cm^3
 - a. 9
 - b. 7,8
 - c. 3,33
 - d. 1,43
 - e. 0,3

11. Sebuah balok terapung pada fluida yang massa jenisnya 1200 kg/m^3 . $1/5$ bagian balok muncul di atas permukaan fluida. Massa jenis benda adalah kg/m^3 .
 - a. 600
 - b. 9.600
 - c. 1.000
 - d. 1.200
 - e. 1.600

12. Bila sebuah benda dicelupkan ke dalam air, maka $1/3$ bagian muncul di atas permukaan air. Jika benda tersebut dicelupkan ke dalam fluida yang massa jenisnya $8/9 \text{ g/cm}^3$, maka bagian yang muncul dipermukaan larutan adalah ... bagian
 - a. $\frac{1}{4}$
 - b. $\frac{1}{3}$
 - c. $\frac{1}{2}$
 - d. $\frac{2}{3}$
 - e. $\frac{3}{4}$

13. Sebuah ban dalam sebuah mobil didisi udara yang volumenya $0,1 \text{ m}^3$ dan massanya 1 kg . Jika ban digunakan sebagai pengapung di dalam air, maka ban tersebut dapat mengapungkan beban maksimum sebesar ... kg
 - a. 1001
 - b. 1000
 - c. 101
 - d. 100
 - e. 99

14. Sebatang jarum panjangnya 10 cm diletakkan pelan-pelan di atas permukaan bensin, sehingga jarum terapung dan tepat tenggelam. Jika massa jenis jarum $3,92 \text{ g/cm}^3$, tegangan permukaan bensin $0,0314 \text{ N/m}$, maka jari-jari jarum adalah ... mm
 - a. $\frac{3}{4}$
 - b. $\frac{4}{7}$
 - c. $\frac{5}{7}$
 - d. $\frac{6}{7}$
 - e. 1

15. Sebuah pipa kapiler berdiameter $\frac{2}{3} \text{ mm}$ dimasukkan tegak lurus ke dalam bejana yang berisi raksa bermassa jenis $13,62 \text{ g/cm}^3$. Sudut kontak antara raksa dan pipa 143° . Jika tegangan permukaan fluida $0,48 \text{ N/m}$, maka turunnya raksa dalam pipa adalah ... cm
 - a. 1,2
 - b. 1,69
 - c. 1
 - d. 2,27
 - e. 3

SOAL URAIAN

1. Sebuah tabung yang tingginya 1 m diisi penuh dengan air dan minyak. Jika massa jenis air dan minyak 1 g/cm^3 dan $0,9 \text{ g/cm}^3$, tentukan perbandingan tinggi air dan minyak agar tekanan hidrostatika di dasar tabung $9,6 \cdot 10^3 \text{ Pa}$!
2. Pada saat di daratan, seorang anak hanya mampu membawa balok 25 kg dengan massa jenis $2,5 \text{ g/cm}^3$. Tentukan massa balok maksimum yang mampu dibawa oleh anak ketika berada dalam air?
3. Sebuah arca perak yang massa jenisnya $10,5 \text{ g/cm}^3$ bagian dalamnya berongga dan beratnya 84000 dyne . Jika arca dicelupkan ke dalam minyak tanah yang massa jenisnya $0,8 \text{ g/cm}^3$ beratnya menjadi 74400 dyne . Hitunglah volume rongga dalam arca tersebut !
4. Sebuah logam bergerak vertikal ke bawah dengan kelajuan tetap $0,5 \text{ cm/s}$ di dalam fluida yang massa jenisnya 2 g/cm^3 . Jari-jari bola $0,9 \text{ cm}$ dan massa jenisnya 7 g/cm^3 . Hitunglah koefisien viskositas fluida tersebut !

Bab 3 FLUIDA BERGERAK

Standart Kompetensi

Menerapkan konsep dan prinsip mekanika klasik sistem kontinu (benda tegar dan fluida) dalam penyelesaian masalah.

Kompetensi Dasar

Menganalisis hukum-hukum yang berhubungan dengan fluida statik dan dinamik dan dapat menerapkan konsep tersebut dalam kehidupan sehari-hari.

Indikator

- Memformulasikan hukum dasar fluida dinamik.
- Menerapkan hukum dasar fluida dinamik pada masalah fisika sehari-hari.

Pendalaman Materi

A. ALIRAN FLUIDA.

Fluida tersusun dari partikel-partikel kecil yang masing-masing bergerak dan tunduk pada hukum-hukum tentang gerak, artinya setiap partikel fluida yang bergerak berlaku persamaan-persamaan tentang gerak, misalnya $s = v \cdot t$ (s = jarak tempuh, v = kelajuan, t = waktu tempuh). Fluida yang bergerak terus mengalir terhadap sekitarnya dinamakan fluida bergerak (fluida mengalir).

Secara umum fluida dapat dibedakan menjadi dua yaitu fluida ideal dan fluida sejati. Fluida ideal mempunyai ciri-ciri sebagai berikut :

1. non-kompresible, artinya tidak mengalami perubahan volume jika ditekan
2. Mengalir tanpa gesekan (tidak memiliki kekentalan/viskositas)
3. Alirannya stasioner (non turbulen), artinya partikel mengalir menurut garis alir (jalur) dengan kecepatan konstan.

Fluida sejati memiliki ciri-ciri kebalikan dari fluida ideal.

Karakteristik aliran fluida :

1. **aliran tunak (steady)** yang maksudnya laju pada setiap partikel fluida yang bergerak (mengalir) dan setiap saat adalah konstan, karena bila kelajuannya berubah-ubah akan mengakibatkan berbagai variabel yang lain juga berubah-ubah. Garis arus masing-masing partikel adalah sejajar yang berarti antara garis arus yang satu dengan lainnya tidak pernah saling bersilangan.
2. **aliran tak tunak (non-steady)** yang maksudnya laju pada setiap partikel dan setiap saat selalu berubah dan merupakan fungsi dari waktu.
3. **aliran berolak (rotational)** yang maksudnya adalah partikel fluida selain bergerak linier juga bergerak anguler (berotasi) dan berarti mempunyai kelajuan sudut pula.
4. **aliran tak berolak (irrotational)** yang maksudnya partikel fluida tidak memiliki kelajuan sudut.
5. aliran termampatkan (**compressible**)
6. aliran tak termampatkan (**incompressible**).
7. aliran kental (**viscous**)
8. aliran tak kental (**non-viscous**)

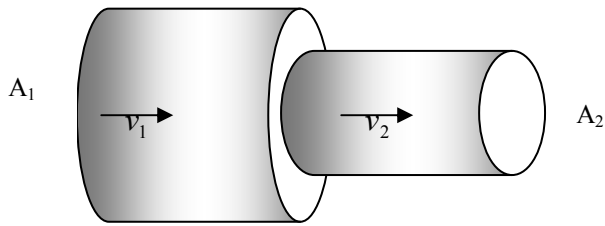
Fluida yang akan dibahas adalah yang mempunyai karakteristik berikut :

1. tidak kental
2. tak termampatkan
3. tak berolak
4. tunak.

Garis Arus (stream line) adalah lintasan tiap-tiap partikel sepanjang aliran fluida.

B. PERSAMAAN KONTINUITAS FLUIDA

Persamaan kontinuitas berbunyi : pada fluida yang tak termampatkan, hasil kali antara kelajuan aliran fluida dalam suatu pipa dengan luas penampang pipa, selalu konstan.



Menurut persamaan kontinuitas :

$A \cdot v = \text{konstan}$ atau :

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

A_1 dan A_2 = luas penampang pipa (m^2)

v_1 dan v_2 = kecepatan aliran fluida (m/s)

Jika fluida mengalir stasioner, maka dalam waktu yang sama banyaknya fluida yang mengalir pada pipa dengan penampang A_1 akan sama dengan banyaknya fluida yang mengalir pada pipa dengan penampang A_2 . Volume fluida yang mengalir dalam sebuah penampang setiap satuan waktu disebut debit (Q).

$$Q = \frac{V}{t} = A \cdot v$$

Q = debit (m^3/s)

V = volume fluida (m^3)

t = waktu fluida mengalir (s)

Contoh Soal

Saluran air pada sebuah rumah ada yang berubah dari pipa besar ke pipa kecil. Bila laju air pada pipa yang besar 10 m/s dan luas penampang pipa yang besar 10^{-4} m^2 , hitunglah laju air pada pipa yang kecil berpenampang 10^{-5} m^2 ?

Penyelesaian :

Dari data : $v_1 = 10 \text{ m/s}$, $A_1 = 10^{-4} \text{ m}^2$, dan $A_2 = 10^{-5} \text{ m}^2$, maka dapat dihitung dengan persamaan kontinuitas sebagai berikut ,

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$
$$10^{-4} \cdot 10 = 10^{-5} \cdot v_2$$

$v_2 = 100 \text{ m/s}$.

(ternyata laju aliran air dari pipa yang besar akan bertambah cepat bila penampang pipa diubah menjadi lebih kecil).

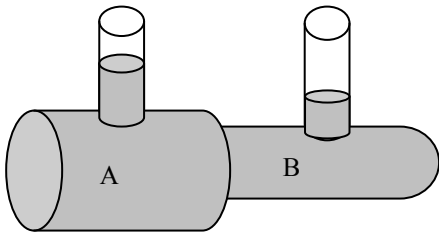
Uji Kompetensi 1

- Air mengalir melalui sebuah pipa yang luas penampangnya berbeda. Diameter penampang besar 10 cm , sedangkan pipa kecil berdiameter 6 cm . Jika kelajuan aliran air pada penampang besar 5 m/s , tentukan :
 - kelajuan aliran air pada pipa kecil
 - debit air
- Suatu zat cair mengalir melalui 3 penampang yang luasnya berbeda. Luas penampang A, B dan C masing-masing 100 cm^2 , 50 cm^2 dan 200 cm^2 . Jika kelajuan aliran zat cair di A sebesar 5 m/s , hitunglah :
 - kelajuan aliran di B dan C
 - Volume air yang mengalir di A, B dan C tiap menit
- Sebuah pipa yang luas penampangnya $A_1 = 8 \text{ cm}^2$ dan $A_2 = 10 \text{ m}^2$ dialiri air dengan debit 2 liter/sekon . Tentukan besarnya laju aliran air pada penampang A_1 dan A_2 tersebut ?
- Seorang petugas pompa bensin mengisi tangki bahan bakar sebuah kendaraan sebanyak 150 liter dalam waktu $2,5 \text{ menit}$. Jika diameter ujung pipa 4 cm^2 , berapa kelajuan bensin keluar dari pipa?
- Sebuah pipa luasnya 6 cm^2 , ujungnya mempunyai kran luasnya 2 cm^2 . Jika laju aliran air pada pipa $0,2 \text{ m/s}$, berapa volume air yang keluar selama 10 menit ?

C. PERSAMAAN BERNOULLI.

Apakah persamaan kontinuitas tetap berlaku bila diameter pipa berubah secara signifikan dan ketinggian pipa dari bidang mendatar juga berubah ? Pertanyaan tersebut terjawab dengan mempelajari analisis yang dilakukan oleh Bernoulli.

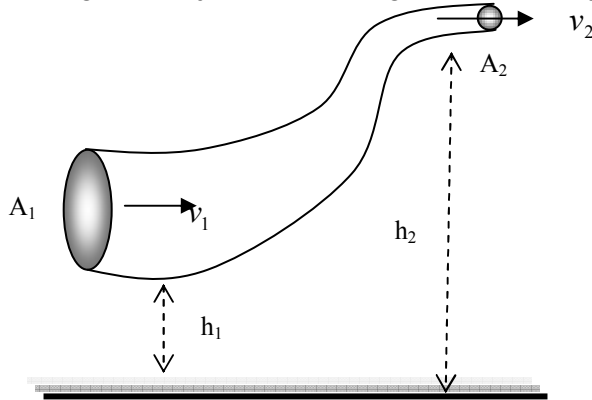
Pada zat cair yang tidak bergerak, tekanan zat cair pada kedalaman (ketinggian) yang sama adalah tetap (sama). Tetapi pada fluida bergerak, tekanan pada ketinggian yang sama akan berbeda.



Menurut persamaan kontinuitas, kelajuan aliran fluida di pipa B akan lebih besar dibanding laju aliran di A. Namun ketinggian air yang naik pada pipa B lebih rendah dibanding di A. Ini membuktikan bahwa tekanan pada pipa B lebih rendah dibanding pada pipa A. Dari percobaan tersebut, Bernoulli menyimpulkan (azas Bernoulli) bahwa :

"Fluida yang mengalir pada pipa horizontal, tekanan yang lebih besar terdapat pada bagian pipa yang kelajuannya kecil, sebaliknya tekanan yang lebih kecil terdapat pada pipa yang kelajuannya besar."

Bagaimana jika fluida mengalir pada pipa yang tidak horizontal ?



Jumlah fluida yang melewati penampang pada bagian pipa yang besar dengan ketinggian h_1 tentu akan tetap sama dengan jumlah fluida yang melewati penampang pada bagian pipa yang kecil dengan ketinggian h_2 . Bila tidak, tentu sebagian fluida lewat mana ? Jawabnya tentu mudah kalau ada kebocoran. Oleh karenanya energi kinetik fluida pada bagian yang rendah harus mampu melakukan usaha agar fluida dapat naik.

Kerja yang dilakukan fluida dari ketinggian h_1 naik ke ketinggian h_2 adalah :

$$W = (p_1 \cdot A_1 \cdot \Delta l_1 - p_2 \cdot A_2 \cdot \Delta l_2) - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

Bila $A \cdot \Delta l = V = \frac{m}{\rho}$, maka :

$$W = (p_1 - p_2) \cdot \frac{m}{\rho} - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

Usaha agar fluida naik dari h_1 ke h_2 = perubahan E_k fluida tersebut, yaitu :

$$W = \Delta E_k = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$$

$$(p_1 - p_2) \cdot \frac{m}{\rho} - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$$

$$(p_1 - p_2) \cdot \frac{1}{\rho} - g \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot v_1^2$$

$$(p_1 - p_2) - \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2$$

atau

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

yang dinamakan **Persamaan Bernoulli**.

Keterangan :

p = tekanan (N/m^2)

ρ = massa jenis fluida (Kg/m^3)

v = laju fluida (m/s^2)

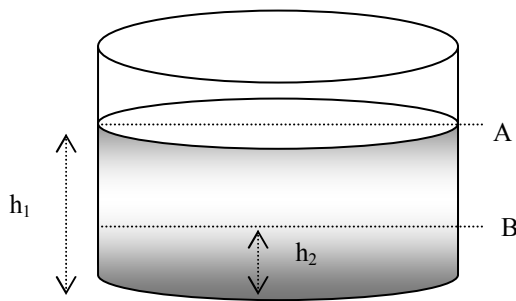
g = grafitasi (m/s^2)

h = ketinggian pipa dari bidang mendatar (m)

PENERAPAN PERSAMAAN BERNOULLI

1. Persamaan Bernoulli untuk Fluida Diam

Persamaan Bernoulli tetap berlaku walaupun fluida tidak mengalir ($v = 0$), karena dimensi tekanannya tetap ada yang disebut dengan tekanan statik. Bila mana fluidanya bergerak ($v \neq 0$) suku $\frac{1}{2} \cdot v^2$ dinamakan tekanan dinamik.



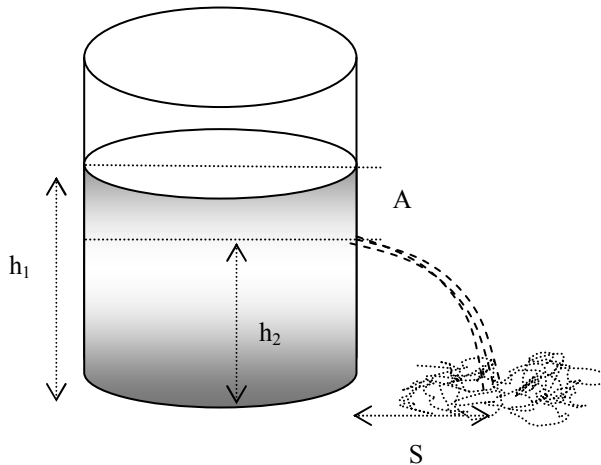
Karena fluida diam, maka $v_1 = v_2 = 0$, sehingga persamaan Bernoulli menjadi :

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

atau

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

2. Persamaan Bernoulli untuk Tangki Bocor



Pada permukaan air (titik A) kecepatan air turun relatif kecil, sehingga laju turunnya permukaan air dianggap nol. Tekanan di titik A dan B sama ($p_1 = p_2$) karena tekanan udara luar. v_2 adalah laju keluarnya air dari lubang bocor.

Dengan menerapkan persamaan Bernoulli seperti berikut ini, akan diperoleh :

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

$$\rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

$$g \cdot h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + g \cdot h_2$$

$$g \cdot h_1 - g \cdot h_2 = \frac{1}{2} v_2^2$$

sehingga

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}$$

v_2 = kecepatan air keluar dari lubang bocor

h_1 = tinggi permukaan air (m)

h_2 = tinggi lubang bocor (m)

Waktu yang digunakan untuk jatuh dari h_2 sampai di tanah adalah :

$$h_2 = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (v_0 = 0)$$

atau :

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_2}{g}}$$

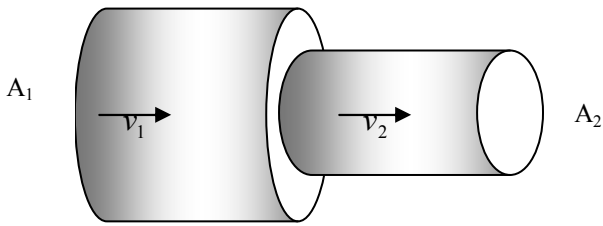
Jadi jarak jatuh air dari kaki tabung adalah :

$$S = v \cdot t = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \times \sqrt{\frac{2 \cdot h_2}{g}}$$

$$S = 2 \cdot \sqrt{(h_1 - h_2) \cdot h_2}$$

S = jarak jatuhnya air (m)

3. Persamaan Bernoulli untuk Fluida mengalir pada pipa horizontal



Karena dianggap tidak ada perbedaan ketinggian, maka $h_1 = h_2$, sehingga persamaan Bernoulli menjadi :

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

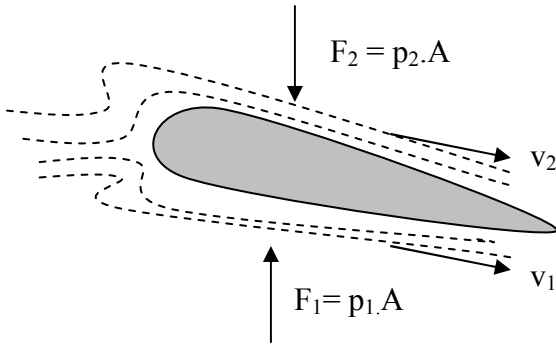
atau

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

p_1 dan p_2 = tekanan pada pipa A_1 dan A_2
 ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
 v_1 = kecepatan fluida pada pipa A_1
 v_2 = kecepatan fluida pada pipa A_2

PENERAPAN HUKUM BERNOULLI

1. Gaya angkat pesawat terbang



Pesawat terbang dapat terangkat ke udara karena kelajuan udara yang melalui sayap bagian atas lebih besar dari bagian bawah, sehingga tekanan udara bagian bawah lebih besar dibanding bagian atas.

Karena $v_2 > v_1$ maka $p_2 < p_1$ sehingga p_1 mampu mengangkat sayap pesawat terbang, sedangkan agar $v_2 > v_1$ maka mesin pesawat harus mampu berkecepatan ratusan Km/jam. Perbedaan tekanan p_1-p_2 inilah yang menimbulkan gaya angkat pesawat F_a .

$$F_a = F_1 - F_2 = (p_1 - p_2) \cdot A$$

Untuk pesawat yang terbang mendatar, maka $h_1 = h_2$, sehingga persamaan bernoulli menjadi :

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

atau

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Jadi besarnya gaya angkat pesawat adalah :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \cdot A$$

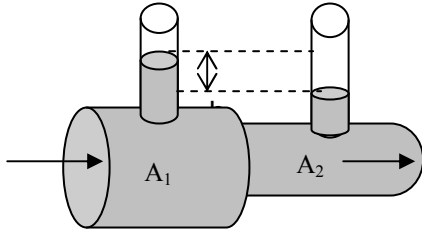
F_a = gaya angkat pesawat terbang (N)
 ρ = massa jenis udara (kg/m^3)
 v_2 = laju udara bagian atas sayap (m/s)
 v_1 = laju udara bagian bawah sayap (m/s)
 A = luas penampang sayap pesawat (m^2)

Agar pesawat dapat terangkat maka gaya angkat pesawat (F_a) harus lebih besar dari berat pesawat (w). Jika pesawat akan melayang dengan ketinggian tetap, $F_a = w$.

2. Venturimeter (materi pengayaan)

Venturimeter berfungsi untuk mengukur kelajuan aliran zat cair. Venturimeter ada dua jenis, yaitu :

a. Venturimeter tanpa manometer



Persamaan-persamaan yang berlaku pada pipa venturimeter adalah :

- Persamaan Bernoulli

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

- Persamaan kontinuitas

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2.$$

- Persamaan hidrosatis

$$P_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h.$$

Dari ketiga persamaan tersebut diperoleh kecepatan aliran fluida yang mengalir pada pipa venturimeter adalah :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \text{ dan}$$
$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

v_1 = laju aliran fluida pada pipa A_1

v_2 = laju aliran fluida pada pipa A_2

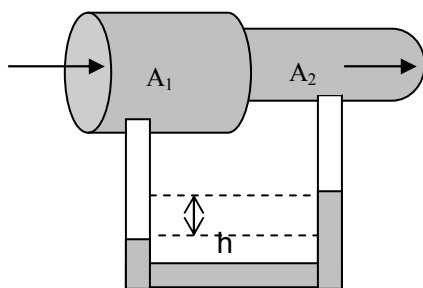
h = beda tinggi fluida kedua tabung (m)

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

A_1 = luas penampang pipa besar (m^2)

A_2 = luas penampang pipa kecil

b. Venturimeter dengan manometer



Manometer diisi dengan air raksa yang massa jenisnya ρ' , dan beda tinggi air raksa pada kedua pipa manometer = h .

Persamaan yang berlaku pada venturimeter dengan manometer adalah:

- Persamaan Bernoulli

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

- Persamaan kontinuitas

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2.$$

- Persamaan hidrosatis

$$p_1 - p_2 = (\rho' - \rho) \cdot g \cdot h.$$

Dengan :

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

ρ' = massa jenis raksa dalam manometer

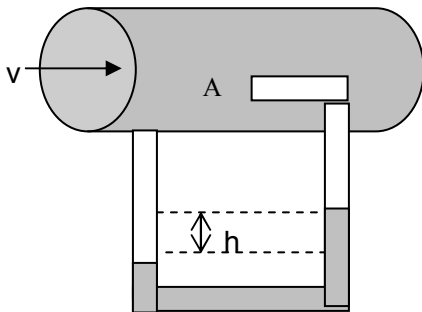
Dari ketiga persamaan tersebut diperoleh kecepatan aliran fluida yang mengalir pada pipa venturimeter adalah :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho' - \rho) \cdot g \cdot h}{\rho \cdot \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]}} \text{ dan}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho' - \rho) \cdot g \cdot h}{\rho \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}}$$

3. Pipa Pitot (Materi Pengayaan)

Pipa pitot digunakan untuk mengukur laju aliran gas. Pipa pitot dilengkapi dengan manometer raksa.



Laju aliran gas di titik A sama dengan nol. Udara yang mengalir dengan kelajuan v dan massa jenisnya sebagian kecil masuk ke pipa dan berhenti di titik A karena tertahan oleh tekanan fluida dengan ρ' di dalam pipa huruf U yang buntu. Akibatnya terdapat selisih ketinggian fluida dalam pipa U sebesar h .

Persamaan yang berlaku pada pipa pitot adalah :

- Persamaan Bernoulli

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2$$

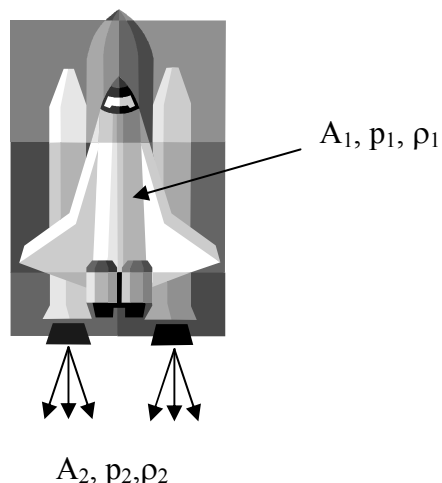
- Persamaan hidrosatis

$$P_2 - p_1 = \rho' \cdot g \cdot h.$$

Dari kedua persamaan tersebut diperoleh kecepatan aliran fluida yang mengalir pada pipa venturimeter adalah :

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot \rho'}{\rho}}$$

4. Tenaga dorong roket

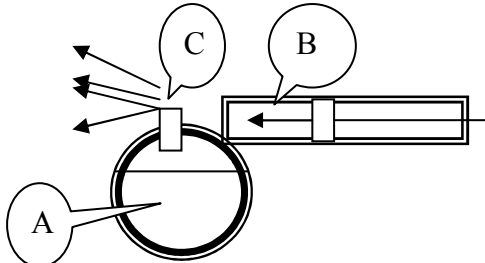


Fluida (bahan bakar) dengan keadaan A_1 , p_1 , dan ρ_1 . Luas penampang A jauh lebih besar dibanding dengan A_2 . Akibatnya v_2 sangat besar yang berarti pula p_0 sangat kecil, sehingga mampu mendorong badan roket ke atas. Kelajuan dan daya dorong fluida menyembur keluar adalah :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(\rho - \rho_0)}{\rho}} \text{ dan}$$

$$P_2 = 2 \cdot A_0 \cdot (p - p_0)$$

5. Alat penyemprot Obat Nyamuk/parfum



Karena udara yang didorong piston, maka saat melalui lubang kecil diujung pipa, laju udara sangat tinggi, akibatnya tekanan udara diatas lubang tangki fluida (A) yaitu dibagian C sangat rendah, yang menjadikan fluida terhisap ke atas dari dalam tangki. Selanjutnya fluida yang sudah dibagian C terdorong oleh aliran udara yang cepat dan terjadilah penyemprotan

6. Karburator

Hampir sama dengan alat penyemprot, karburator motor bensin juga dapat dijelaskan dengan prinsip Bernoulli. Bedanya udara tidak didorong melainkan dihisap diatas lubang main jet (sprayer) oleh ruang bakar, sehingga bensin naik dari tandon karburator untuk selanjutnya bercampur dengan udara kemudian masuk ke ruang bakar.

Contoh Soal

Pipa Venturi dengan karakteristik luas penampang pipa yang besar 100 cm^2 dan penampang pipa yang kecil 1 cm^2 , menggunakan fluida bermassa jenis 10 gram/cm^3 di dalam pipa U. Setelah udara yang dengan massa jenis 1 gram/cm^3 melewati pipa venturi ternyata selisih ketinggian fluida dalam pipa U sebesar 10 cm . Bila percepatan gravitasi 10 m/s^2 , tentukan laju udara yang terukur !.

Penyelesaian :

Diketahui :

$$A_1 = 100 \text{ cm}^2 = 0,01 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 1 \text{ cm}^2 = 0,0001 \text{ m}^2$$

$$\rho^l = 10 \text{ gr/cm}^3 = 10.000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 1 \text{ gr/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho^l - \rho) \cdot g \cdot h}{\rho \cdot \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]}} \text{ atau}$$

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho^l - \rho)g \cdot h}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

$$v_1 = 0,0001 \sqrt{\frac{2(10.000 - 1000)10 \cdot 0,1}{10.000(0,01^2 - 0,0001^2)}}$$

$$v_1 = 0,0001 \sqrt{\frac{2(9.000)}{10.000(0,01^2 - 0,0001^2)}}$$

$$v_1 = 0,0001 \sqrt{18000}$$

$$= 0,0001 \times 134,2$$

$$= 0,01342 \text{ m/s}$$

Uji Kompetensi 1

1. Air mengalir pada pipa horizontal yang luas penampangnya 40 cm^2 dengan kelajuan 3 m/s menuju pipa yang luas penampangnya 15 cm^2 . Jika tekanan pada pipa besar adalah $5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$, tentukan tekanan pada pipa kecil ?
2. Sebuah tangki berisi air setinggi 150 cm . Pada bagian samping tangki terdapat lubang bocor pada jarak 25 cm dari dasar tangki. Hitunglah :
 - a. kecepatan air keluar dari lubang bocor
 - b. jarak jatuh air di tanah
3. Fluida mamancur melalui dua lubang bocor pada sebuah tabung yang berisi air setinggi 8 cm . Lubang bocor A berada 2 cm dari dasar tabung, dan lubang B berada 6 cm dari dasar tabung. Tentukan perbandingan jarak jatuh air dari lubang A dan B !
4. Sebuah pesawat terbang luas penampang sayapnya 40 cm^2 . Kelajuan udara di bawah pesawat 60 m/s dan sisi atas 80 m/s . Jika pesawat terbang horizontal dengan kelajuan konstan dan massa jenis udara $1,2 \text{ kg/m}^3$, hitunglah:
 - a. Gaya angkat pesawat
 - b. Berat pesawat
5. Air mengalir pada sebuah venturimeter tanpa manometer. Jika luas penampang besar dan kecil venturi adalah 5 cm^2 dan 4 cm^2 , hitunglah kecepatan air yang masuk pipa venturimeter !
6. Venturimeter dilengkapi dengan manometer raksa ($\rho_{\text{raksa}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$) mempunyai diameter utama $4,5 \text{ cm}$ dan diameter pipa sempit $1,5 \text{ cm}$. Jika beda tekanan pada kedua pipa tersebut $1,35 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, tentukan :
 - a. kelajuan air pada pipa kecil
 - b. beda tinggi raksa pada kaki manometer
7. Sebuah pipa pitot digunakan untuk mengukur laju udara pada sebuah terowongan. Pipa pitot dilengkapi manometer alkohol ($\rho_{\text{alkohol}} = 800 \text{ kg/m}^3$). Jika perbedaan tinggi alkohol pada manometer 18 cm , tentukan kelajuan udara ?

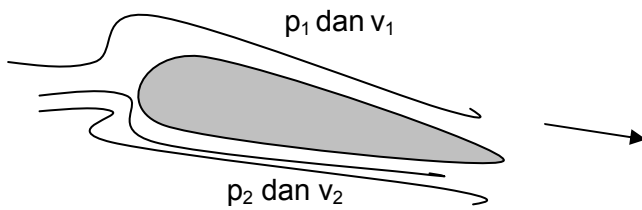
EVALUASI MANDIRI

Selesaikan soal-soal berikut kemudian pilihlah jawaban yang paling tepat.

1. Dimensi dari debit aliran adalah ...
 - a. LT
 - b. LT^{-1}
 - c. L^2T
 - d. L^2T^{-1}
 - e. L^3T^{-1}
2. Air mengalir melalui pipa mendatar dengan luas penampang yang berubah dari 200 mm^2 ke penampang 100 mm^2 . Jika laju aliran pada penampang yang besar 4 m/s , maka laju aliran pada penampang yang kecil adalahm/s.
 - a. 0,5
 - b. 1
 - c. 2
 - d. 4
 - e. 8
 - f.
3. Air mengalir pada suatu pipa yang diameter penampangnya berbeda dengan perbandingan $1 : 3$. Jika laju aliran pada pipa yang kecil 36 m/s , maka laju aliran pada pipa yang besar adalahm/s.
 - a. 2
 - b. 3
 - c. 4
 - d. 5
 - e. 6
4. Sebuah pipa besar luas penampangnya 6 cm^2 . Ujungnya dipasang kran dengan luas penampang 2 cm^2 . Laju aliran pada pipa yang besar 3 m/s , maka volume air yang keluar dari kran selama 10 menit adalahm³.
 - a. 1,08
 - b. 10,8
 - c. 108
 - d. 1080
 - e. 10.800

5. Sebuah tangki air diletakkan di tanah. Tinggi permukaan air dalam tangki 2 m. Pada ketinggian 0,2 m dari tanah terdapat lubang kecil sehingga air keluar melalui lubang tersebut. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka laju air yang keluar dari lubang adalahm/s.
 - a. 2
 - b. 4
 - c. 6
 - d. 8
 - e. 10
6. Sebuah tangki berisi air diletakkan di tanah. Tinggi permukaan air 2 m. Jika pada ketinggian 0,4 m dari tanah terdapat lubang sehingga air keluar. Jarak mendatar dihitung dari sisi tangki yang dapat dicapai air saat jatuh ke tanah adalahm.
 - a. 1,2
 - b. 1,6
 - c. 1,8
 - d. 2,2
 - e. 2,4

7. Perhatikan penampang sayap pesawat



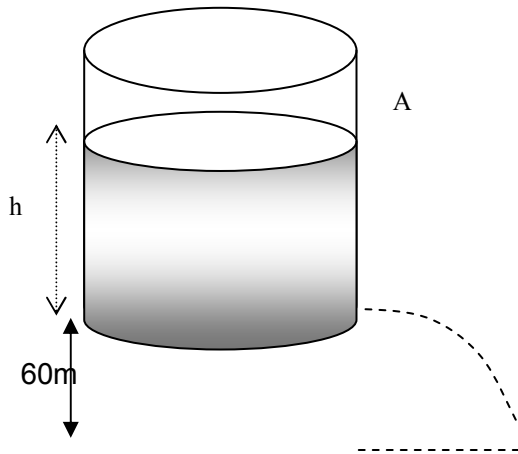
Agar sayap pesawat dapat terangkat maka ..

- a. $p_1 = p_2$ dan $v_1 = v_2$
 - b. $p_1 > p_2$ dan $v_1 < v_2$
 - c. $p_1 > p_2$ dan $v_1 > v_2$
 - d. $p_1 < p_2$ dan $v_1 > v_2$
 - e. $p_1 < p_2$ dan $v_1 < v_2$
8. Sebuah pesawat luas permukaan sayapnya 50 m^2 . Pesawat tersebut bergerak sehingga laju udara di atas sayap 100 m/s dan laju udara di bawah sayap 80 m/s. Jika massa jenis udara $1,3 \text{ Kg/m}^3$, maka Gaya angkat pada sayap pesawat sebesarNewton.
 - a. $1,17 \times 10^2$
 - b. $1,17 \times 10^3$
 - c. $1,17 \times 10^4$
 - d. $1,17 \times 10^5$
 - e. $1,17 \times 10^6$
 9. Seorang petugas pompa bensin mengisi tangki bahan bakar sebuah kendaraan sebanyak 75 liter dalam waktu 2,5 menit. Debit aliran bensin yang keluar dari ujung selang pompa adalah m^3/s .
 - a. 3×10^{-4}
 - b. 4×10^{-4}
 - c. 5×10^{-4}
 - d. 6×10^{-4}
 - e. 7×10^{-4}
 10. Sebuah pipa air berdiameter besar disambung dengan pipa berdiameter kecil. Bila kelajuan air pada pipa yang besar 4 m/s dan diameter pipa yang besar 3 kali diameter pipa yang kecil, maka kelajuan air pada pipa yang kecilm/s.
 - a. 12
 - b. 24
 - c. 36
 - d. 48
 - e. 60
 11. Bila debit aliran pada pipa 1,8 liter per sekon dan luas penampang pipa 3 cm^2 , maka laju aliran pada pipa adalah m/s.
 - a. 4
 - b. 5
 - c. 6
 - d. 7
 - e. 8

12. Air mengalir sepanjang pipa horizontal yang luas penampangnya 40 cm^2 dengan kelajuan 3 m/s menuju pipa dengan luas penampang 15 cm^2 . Jika tekanan pada pipa besar $5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$, maka tekanan pada pipa kecil adalah ... kPa
- 55,2
 - 52,5
 - 25,5
 - 25,2
 - 22,5
13. Sebuah tandon air diletakkan 80 cm dari tanah. Tandon air diisi dengan air setinggi 90 cm dan terdapat lubang bocor pada 10 cm di atas dasar tandon. Kecepatan air keluar dari lubang bocor adalah m/s
- 2
 - 4
 - 6
 - 8
 - 10
14. Sebuah tangki berisi air setinggi 150 cm dan terdapat lubang bocor pada 25 cm dari dasar tangki. Jarak jatuh air dari kaki tangki adalah ... m
- 0,5
 - 5
 - $0,5\sqrt{5}$
 - $5\sqrt{5}$
 - $\sqrt{5}$
15. Tangki berisi air setinggi 8 m . Pada ketinggian 6 m dan 2 m dari dasar tangki terdapat lubang bocor, sehingga air memancar melalui kedua lubang. Perbandingan lokasi pancuran air mengenai tanah untuk kedua lubang adalah ...
- 3:2
 - 2:3
 - 1:2
 - 2:1
 - 1:1
16. Sebuah model pesawat terbang dengan luas sayap 1 m^2 dan menimbulkan gaya angkat sebesar F . Jika luas sayap dijadikan 4 kalinya, dengan kecepatan yang sama, maka besarnya gaya angkat pesawat menjadi ...
- $\frac{1}{4} F$
 - $2F$
 - $4F$
 - $8F$
 - $16F$
17. Sebuah venturimeter memiliki luas penampang besar dan kecilnya masing-masing 18 cm^2 dan 6 cm^2 . Jika perbedaan tinggi pada kedua tabung 10 cm , maka laju arus air pada penampang besar adalah ... m/s
- $\frac{1}{2}$
 - 1
 - $2\sqrt{2}$
 - $2\sqrt{3}$
 - 4
18. Udara yang bermassa jenis $1,29 \text{ kg/m}^3$ dialirkan melalui pipa pitot yang manometernya berisi air raksa bermassa jenis $13,6 \text{ gr/cm}^3$. Perbedaan ketinggian air raksa pada manometer 3 cm , kecepatan aliran udara tersebut adalah ... cm/s
- 7873,4
 - 7853,4
 - 7833,4
 - 7823,4
 - 7803,4

19. Sebuah tangki air terbuka memiliki kedalaman 0,8 m. Sebuah lubang dengan luas penampang 5 cm² dibuat di dasar tangki. Massa air per menit yang mula-mula akan keluar dari lubang itu adalah ... liter
- 120
 - 40
 - 60
 - 60
 - 100

20. Perhatikan gambar !



- Jika air jatuh pada jarak $80\sqrt{3}$ m dari kaki tangki, maka ketinggian air dalam tangki adalah ... m
- 20
 - 80
 - $8\sqrt{3}$
 - 128
 - 160

Bab 4



TEORI KINETIK GAS

Standart Kompetensi

Menerapkan konsep dan prinsip kalor, konservasi energi dan sumber energi dengan berbagai perubahannya dalam mesin kalor.

Kompetensi Dasar

Mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik

Indikator

- Memformulasikan hukum Boyle-Gaylussac
- Memformulasikan asas ekuipartisi energi
- Memformulasikan energi dan kecepatan rata-rata partikel gas untuk gerak translasi, rotasi dan vibrasi
- Menerapkan hukum fisika untuk gas ideal pada persoalan fisika sehari-hari.

Pendalaman Materi

D. PENGERTIAN GAS IDEAL

Gas ideal adalah gas yang secara tepat memenuhi persamaan $pV = nRT$. Sebagai gambaran tentang keadaan gas ideal, kita tinjau sifat-sifat gas ideal diantaranya adalah:

1. Gas ideal terdiri dari partikel-partikel yang amat besar jumlahnya, yang tersebar merata di seluruh bagian jumlahnya, dan bergerak secara acak ke segala arah dengan kelajuan tetap,
2. Jarak antara partikel gas jauh lebih besar dari dibanding ukuran partikel,
3. tidak ada gaya di antara partikel-partikel tersebut kecuali jika bertumbukan (tumbukan dianggap lenting sempurna dan partikel dianggap bulat, licin, dan pejal), dan berlangsung sangat singkat
4. Volume partikel gas sangat kecil dibandingkan dengan wadah yang ditempatinya sehingga ukurannya dapat diabaikan
5. Hukum Newton tentang gerak berlaku

Persamaan Keadaan Gas Ideal

Hukum Boyle-Gay Lussac berlaku untuk gas ideal di dalam ruang tertutup, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{pV}{T} = n.R \text{ atau } \frac{P_1.V_1}{T_1} = \frac{P_2.V_2}{T_2}$$

Karena $n = \frac{m}{M}$ atau $n = \frac{N}{N_a}$

Maka :

Persamaan $PV = nRT$ dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$PV = \frac{N}{N_a} RT = N \left(\frac{R}{N_a} \right) T \text{ maka } \boxed{PV = N.k.T} \text{ dengan } k = \frac{R}{N_a}$$

Dari persamaan $PV = nRT$, dengan mensubstitusikan $n = \frac{m}{M}$, persamaan keadaan gas ideal menjadi :

$$PV = nRT = \frac{m}{M} RT$$

$$P = \frac{m}{V} \frac{RT}{M} = \frac{RT}{M}$$

Keterangan : m = massa total gas (kg) N = banyak partikel M = massa molekul gas (kg/kmol = gr/mol) N_a = bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ partikel/mol) n = jumlah mol (mol) P = tekanan gas ideal (Pa) V = volume gas (m^3) P_1 = tekanan gas mula-mula ($Pa = N/m^2$) P_2 = tekanan gas akhir V_1 = volume gas mula-mula (m^3) V_2 = volume gas akhir T_1 = suhu gas mula-mula ($^{\circ}K$) T_2 = suhu gas akhir R = tetap umum gas = tetapan molar gas $(R = 8314 \text{ J/kmol}^{\circ}K = 8,314 \text{ J/mol}^{\circ}K = 0,082 \text{ liter.atm/mol}^{\circ}K)$ k = tetapan Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) ρ = massa jenis gas ideal (kg/m^3)*dengan catatan :*

$$1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

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

Contoh Soal

1. Pada ban mobil dimasukkan tekanan 200 kPa pada $10^{\circ}C$ setelah berjalan 150 km, suhu dalam ban bertambah menjadi $40^{\circ}C$. Berapakah tekanan dalam ban sekarang?

Penyelesaian:

Keadaan awal

$$P_1 = 200 \text{ kPa}, \quad T_1 = 283 \text{ K}$$

$$P_2 = ?, \quad T_2 = 313 \text{ K}$$

Karena $V_1 = V_2$, maka persamaan Boyle-Gay Lussac menjadi :

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{P_1}{T_1} T_2$$

$$P_2 = \frac{200 \text{ kPa} \times 313 \text{ K}}{283 \text{ K}} = 222 \text{ kPa}$$

Jadi tekanan dalam ban menjadi 222 kPa

2. Gas ideal volumenya 10 liter suhunya $127^{\circ}C$ bertekanan 165,6 Pa. Hitunglah banyak partikelnya !

Penyelesaian :

Diketahui :

$$V = 10 \text{ L} = 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$P = 165,6 \text{ Pa}$$

$$T = 127^{\circ}C = 400^{\circ}K$$

Ditanya : $N \dots ?$

Jawab :

$$P.V = N.k.T$$

$$165,6 \cdot 10^{-2} = N \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 400$$

$$N = 3 \cdot 10^{19} \text{ partikel}$$

Uji Kompetensi 1

1. Tentukan massa sebuah atom (molekul) gas oksigen (O_2) , jika massa relatif (M_r) atom oksigen 32 gram/mol !
2. Sebuah tangki mengandung 4 kg gas O_2 ($M = 32$ gram/mol). Berapa banyaknya molekul O_2 dalam tangki tersebut ?
3. Pada keadaan standart ($T = 0^{\circ}C$ dan $P = 1 \text{ atm}$), berapa volume gas oksigen ? (jika $M = 32$ gr/mol)
4. Sebuah tangki 410 liter berisi gas Oksigen ($M = 32$ gr/mol) pada suhu $27^{\circ}C$ dan tekanan 6 atm. Tentukan massa gas Oksigen tersebut !
5. 5 mol gas helium pada suhu $10^{\circ}C$ mempunyai tekanan 3,5 atm. Hitung :
 - a. volume gas helium pada kondisi itu
 - b. suhu gas helium jika gas dimampatkan sampai pada tekanan 10 atm

6. Berapakah besar tekanan gas oksigen setelah ditekan sampai 48,8 L dan suhunya meningkat sampai 50°C, jika kondisi awal gas oksigen pada suhu 18°C mempunyai volume 70 L dan tekanan 2,1 atm ?
7. 20,78 L contoh gas argon berada pada suhu 27°C dan tekanan atmosfer 1 atm (1 atm= 10⁵ Pa). Tentukan banyaknya mol gas argon dalam contoh tersebut!
8. Sebuah pompa berisi gas oksigen pada suhu 293 K mempunyai tekanan 30 atm. Pada saat pengisap pompa diturunkan sehingga volumenya menjadi 80 L dan suhu gas menjadi 298 K. Berapakah tekanan dalam pompa sekarang jika volume pompa 100 L?
9. Tentukan massa jenis gas karbon dioksida (M = 44 gram/mol) pada suhu 17°C dan tekanan normal !
10. Sejumlah gas dalam silinder bersuhu 27°C dan bertekanan 10 atm dipanaskan dan memuai sehingga volumenya menjadi dua kali dan suhunya naik sebesar 100°C. Berapa tekanan gas pada akhir proses?

B. TEKANAN GAS IDEAL

Berdasarkan teori kinetik, molekul-molekul gas ideal bergerak secara acak sesuai Hukum Gerak Newton dan bertumbukan dengan molekul lain maupun dengan dinding bejana tempat gas berada secara elastis sempurna.

Tekanan yang dikerjakan oleh suatu gas ideal dalam ruang tertutup dapat diturunkan dengan menggunakan mekanika Newton terhadap gerak molekul-molekul gas. Karena kuadrat kelajuan seluruh molekul gas tidaklah sama, maka kita definisikan kuadrat kelajuan rata-rata molekul-molekul gas $\overline{v^2}$, di mana $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$

Sesuai dengan anggapan bahwa setiap molekul gas bergerak dalam lintasan lurus dengan kelajuan tetap, maka $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ dan $\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$ atau $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$

Selanjutnya dengan menggunakan definisi bahwa tekanan gas pada dinding wadahnya adalah gaya persatuan luas, $P = \frac{F}{A}$, sedang gaya F sama dengan perubahan momentum,

$F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$, dengan perubahan momentum tiap molekul gas $\Delta P = 2m_0v_{1x}$, kita dapat memperoleh persamaan tekanan yang dikerjakan oleh suatu gas ideal dalam wadah tertutup adalah :

$$P = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2} \text{ atau } P = \frac{1}{3}m_0\overline{v^2}\left(\frac{N}{V}\right),$$

- P = tekanan gas (Pa)
- ρ = massa jenis (kg m⁻³)
- $\overline{v^2}$ = kuadrat kelajuan rata-rata molekul gas
- m_0 = massa satu molekul gas (kg),
- $\frac{N}{V}$ = kerapatan partikel,
- N = jumlah molekul (partikel),
- V = volum wadah

Contoh Soal

Dalam sebuah bejana dengan volume 1 m³ berisi 10 mol gas mono atomic dengan anergi kinetic partikel rata-rata 1,5 x 10⁻²⁰ J. Tentukan tekanan gas dalam bejana!

Penyelesaian :

$$p = \frac{1}{3}m_0\overline{v^2}\left(\frac{N}{V}\right) = \frac{2}{3}N \frac{Ek}{V} = \frac{\frac{1}{3} \times 10 \times 6,02 \cdot 10^{23} \times 1,5 \cdot 10^{-20} \times 2}{1} = 6,02 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-2}$$

Hubungan Tekanan dan Energi Kinetik Rata-rata Partikel Gas

Energi kinetik molekul-molekul gas tidaklah sama, sehingga kita perlu mendefinisikan energi kinetik rata-rata molekul-molekul \overline{EK} ,

$$\overline{EK} = \frac{1}{2} m_0 \overline{v^2} \text{ atau } m_0 \overline{v^2} = 2\overline{EK}$$

Sehingga,

$$P = \frac{1}{3} (2\overline{EK}) \left(\frac{N}{V} \right) = \frac{2}{3} \overline{EK} \left(\frac{N}{V} \right)$$

\overline{EK} = energi kinetik rata-rata tiap partikel (J)

N = jumlah partikel

V = volume gas

Hubungan Energi Kinetik Rata-rata dengan Suhu Mutlak Gas.

$$\overline{EK} = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} .n.R.T$$

Dari persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa energi kinetik rata-rata molekul-molekul gas hanya bergantung pada suhu mutlaknya. Makin besar suhu mutlak gas, makin besar energi kinetik rata-rata.

Perhatian !

Persamaan di atas hanya berlaku untuk gas monoatomik (misalnya gas mulia : helium, neon, dan argon). Jika gas dalam soal tidak disebutkan maka kita selalu menganggap sebagai gas monoatomik.

C. KELAJUAN EFEKTIF (v_{RMS}) GAS

Misalkan dalam suatu wadah tertutup terdapat N_1 molekul bergerak dengan kelajuan v_1 , N_2 dengan kelajuan v_2 , dan seterusnya, maka kuadrat kelajuan rata-rata $\overline{v^2}$, dinyatakan sebagai berikut :

$$\overline{v^2} = \frac{\sum (N_i v_i^2)}{\sum N_i} \text{ maka}$$

$$v_{RMS} = \sqrt{\overline{v^2}}$$

Hubungan Kelajuan Efektif Gas dengan Suhu

$$\overline{EK} = \frac{1}{2} m_0 \overline{v^2} = \frac{1}{2} m_0 v_{RMS}^2$$

$$\frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m_0 v_{RMS}^2$$

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Catatan:

1. Untuk suatu gas ideal tertentu (M konstan) kelajuan efektif v_{RMS} hanya bergantung pada suhu mutlaknya (bukan pada tekanannya)
2. Untuk berbagai gas ideal pada suhu sama (konstan), kelajuan efektif v_{RMS} hanya bergantung pada massa molekulnya

Hubungan Kelajuan Efektif Gas dengan Tekanannya.

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$

P = tekanan gas (Pa)

ρ = massa jenis gas (kg m^{-3})

Contoh Soal

1. Suatu gas monoatomik A bersuhu 27°C dengan massa tiap partikel $\frac{1}{2}$ kali massa partikel B. Agar kedua macam partikel mempunyai laju yang sam, tentukan suhu gas B!

Penyelesaian :

$$E_k = \frac{3}{2}kT \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

$$T = \frac{mv^2}{3k} \rightarrow \text{suhu mutlak sebanding dengan massa partikel gas atau } T_B/T_A = m_B/m_A$$

$$m_B = 2 m_A, \text{ jadi } T_B = 2 T_A \rightarrow T_B = 2(273 + 27) = 600 \text{ K atau } T_B = 327^{\circ}\text{C}$$

2. Molekul oksigen ($M_r = 32$ gram/mol) di atmosfer memiliki laju efektif 500 ms^{-1} . Tentukan laju molekul Helium ($M_r = 4$ gram/mol) !

Penyelesaian:

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} = \sqrt{\frac{Mr_2}{Mr_1}}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{Mr_2}{Mr_1}} \times 500 = 1400 \text{ ms}^{-1}$$

Uji Kompetensi 2

- Energi kinetik 1 mol gas monoatomik dalam tangki bervolume 20 liter adalah 10^{20} J. Tentukan tekanan gas dalam tangki !
- Tentukan energi kinetik rata-rata gas yang bersuhu 27°C !
- Kelajuan sepuluh molekul dalam suatu gas adalah sebagai berikut : 100, 200, 200, 300, 400, 400, 500, 500, 600, 800 m/s. Hitung :
 - Kelajuan rata-rata
 - Kelajuan efektif gas
- Hitung kecepatan efektif molekul gas Argon ($M = 40$ gr/mol yang berada dalam wadah bersuhu 0°C !
- Gas dalam tabung yang bersuhu 300 K dipnaskan pada volume tetap, hingga kelajuan efektif molekul-molekul gas menjadi dua kali semula. Hitung kenaikan suhu yang dialami gas tersebut !
- Massa sebuah molekul nitrogen adalah empatbelas kali massa sebuah molekul hydrogen, pada suhu 294 K molekul-molekul nitrogen mempunyai kelajuan rata-rata yang sama dengan molekul hydrogen. Berapakah suhu molekul-molekul hydrogen?
- Hitung kecepatan efektif gas yang massa jenisnya 10 kg/m^3 dan berada dalam wadah bertekanan 12.10^5 Pa !

D. TEOREMA EKUIPARTISI ENERGI

Teorema ekipartisi energi berbunyi sebagai berikut :

Untuk suatu sistem molekul-molekul gas pada suhu mutlak T dengan tiap molekul memiliki f derajat kebebasan, maka energi mekanik rata-rata per molekul (\overline{EM}) atau energi kinetik rata-rata per molekul (\overline{EK}), dinyatakan oleh,

$$\overline{EM} = \overline{EK} = f \left(\frac{1}{2} kT \right), \text{ dengan } f \text{ adalah derajat kebebasan.}$$

$$\text{Gas monoatomik } f = 3 \Rightarrow \overline{EK} = 3 \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

$$\text{Gas diatomic } f = 5 \Rightarrow \overline{EK} = 5 \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

E. ENERGI DALAM GAS

Energi dalam gas didefinisikan sebagai total energi kinetik seluruh gas yang terdapat di dalam wadah tertutup. Jika ada sejumlah N molekul gas di dalam wadah, maka energi dalam gas (U) adalah

$$U = N \cdot \overline{EK} = N \cdot f \cdot \left(\frac{1}{2} kT \right) = \frac{nfRT}{2}$$

$$\text{Gas monoatomik } f = 3 \Rightarrow U = 3N \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

$$\text{Gas diatomic } f = 5 \Rightarrow U = 5N \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

Contoh Soal

Gas He ($M_r = 4 \text{ gr/mol}$) pada suhu 27°C dan volume 1 L massanya 8 gram. Tentukan energi dalam gas!

Penyelesaian:

Gas He merupakan gas monoatomik sehingga derajat kebebasannya $f = 3$

Energi dalam ditentukan dengan menggunakan rumus $U = \frac{nfRT}{2}$

$$n = \frac{m}{M_r} = \frac{8}{4} = 2 \text{ mol}$$

$$U = \frac{2 \times 3 \times 8,31 \times (273 + 27)}{2} = 7,479 \text{ J}$$

Uji Kompetensi 3

- Berapakah suhu gas He apabila suhu dalam gas sebesar 14958 J ?
- Berapakah energi kinetik rata-rata dan energi dalam 10 mol gas ideal pada suhu 2.227°C untuk :
 - gas monoatomik
 - gas diatomic
- Berapakah energi dalam 2 gr gas helium yang berada dalam suatu wadah bersuhu 47°C dan tekanan 1 atm ?
- Berapakah energi dalam gas monoatomik 5 mol apabila energi kinetik rata-rata sebesar $8,28 \times 10^{-21}$ J ?
- Berapakah energi dalam gas monoatomik He pada suhu 77°C volume 1 L, massanya 8 gram?
- Energi dalam 2 mol gas poliatomic pada suhu 500 K adalah $6,21 \cdot 10^{-21}$ J. Tentukan banyak derajat kebebasan gas tersebut !

EVALUASI MANDIRI

SOAL PILIHAN GANDA

- Menurut teori kinetik gas, tekanan gas dalam ruangan tertutup adalah....
 - sebanding dengan volume ruangan
 - berbanding terbalik dengan suhu ruangan
 - berbanding terbalik dengan massa jenis gas
 - sebanding dengan massa jenis gas
 - sebanding dengan kecepatan rata-rata partikel gas
- Jika suhu gas dinaikkan, kecepatan rata-rata partikel gas bertambah karena kecepatan gas...
 - sebanding dengan akar massa partikel
 - sebanding dengan akar suhu mutlak
 - berbanding terbalik dengan massa partikel
 - sebanding dengan suhu mutlak
 - sebanding dengan kuadrat suhu mutlak
- Energi dalam suatu gas ideal merupakan fungsi...
 - volum
 - volum dan suhu
 - tekanan
 - suhu
 - tekanan dan suhu
- Gas ideal bersuhu -73°C dipanaskan secara isokorik sehingga energi kinetik rata-rata partikelnya menjadi 4 kali lipat. Pernyataan yang tidak benar adalah....
 - laju efektif partikel menjadi 2 kali lipat
 - momentum rata-rata partikel menjadi 2 kali lipat
 - suhu gas menjadi 527°C
 - volume gas menjadi 4 kali lipat
 - energi dalam gas menjadi 4 kali lipat

4. Sebuah tabung berisi gas pada suhu 127 . tabung mempunyai lubang yang dapat memungkinkan gas keluar dari tabung. Jika tabung dipanaskan sehingga mencapai suhu 727 banyaknya gas yang tersisa dalam tabung adalah...
 - A. 25 %
 - B. 33 %
 - C. 40 %
 - D. 50 %
 - E. 75 %

5. Sebuah tabung dengan volume 8 L bertekanan 48 atm bersuhu 87°C. Jika volume tabung diubah menjadi 4 L dan suhunya dijadikan 27°C, maka tekanan gas menjadi.... atm
 - A. 40
 - B. 60
 - C. 80
 - D. 90
 - E. 160

6. Sebuah tabung yang volumenya dapat diatur mula-mula mempunyai volume 100 cm³ berisi gas dengan suhu 27°C dan tekanan 200cmHg. Jika suhu gas dijadikan menjadi 800cmHg, maka volume tabung menjadi...cm³
 - A. 25
 - B. 50
 - C. 75
 - D. 100
 - E. 200

7. Gas ideal dengan volume 120 cm³ diproses secara isobaric sehingga suhunya berubah dari 177°C menjadi 627°C . Volume gas sekarang adalah.... cm³
 - A. 30
 - B. 60
 - C. 240
 - D. 360
 - E. 480

8. Massa jenis suatu gas ideal pada suhu T dan tekanan p adalah . Jika tekanan dijadikan 2 dan suhu dinaikkan menjadi 2T, maka massa jenis gas menjadi....
 - A. 0,25
 - B. 0,50
 - C. 1,00
 - D. 2,00
 - E. 4,00

9. Sebuah tabung berisi gas pada tekanan p dan laju efektif partikel-partikelnya v. Jika ke dalam tabung dipompakan gas yang sama sehingga tekanannya menjadi 0,25p dengan suhu tetap, maka laju efektif partikel-partikelnya menjadi...
 - A. 0,25 v
 - B. 0,50 v
 - C. v
 - D. 2 v
 - E. 4 v

10. Sebuah bejana mempunyai volume 1000 L berisi 20 gram gas helium (Mr = 4 gram/mol). Jika energi kinetic rata-rata partikel gas 3 x 10⁻²⁰ J, maka tekanan gas dalam bejana adalah...Nm⁻²
 - A. 5,02 x 10²
 - B. 6,02 x 10²
 - C. 6,02 x 10³
 - D. 5,02 x 10⁴
 - E. 6,02 x 10⁴

11. Apabila massa total gas adalah x satuan dan massa molekul gas adalah y satuan. Banyaknya molekul dinyatakan dengan z. Pernyataan yang benar adalah...
 - A. z = xy
 - B. x = yz
 - C. x + y = z
 - D. x - y = z
 - E. xz = y

12. Pada suhu sedang T , partikel gas oksigen mempunyai energi kinetik rata-rata...
- $1,5 kT$
 - $2,5 kT$
 - $3,5 kT$
 - $2,5 k(T + 273)$
 - $3,5 k(T + 273)$
13. Jika laju efektif partikel gas ideal dalam ruang berubah, maka factor-faktor lain yang selalu ikut berubah adalah...
- tekanan dan volume
 - tekaanan dan massa jenis gas
 - suhu dan energi dalam
 - volume dan energi dalam
 - tekanan dan suhu
14. Massa sebuah molekul gas O_2 16 kali massa sebuah molekul H_2 pada suhu $127^\circ C$ mempunyai laju rata-rata sama dengan molekul O_2 pada suhu....K
- 25
 - 400
 - 1759
 - 2.032
 - 6.400
15. Sejumlah gas ideal dalam ruang tertutup dipanaskan secara isobaric dari suhu $127^\circ C$ sampai dengan suhu $177^\circ C$. Prosentase tambahnya volume adalah...%
- 15
 - 50
 - 75
 - 100
 - 150
16. Gas O_2 bertekanan 25 atm berada dalam silinder baja. Jika 60% dari partikel gas keluar pada proses isotermik, maka tekanan gas sekarang adalah... atm
- 4
 - 6
 - 10
 - 15
 - 25

SOAL ESSAY

- Kotak kubus dengan volume $4,5 \times 10^{-2} m^3$ diisi dengan air pada tekanan atmosfer pada suhu $20^\circ C$. Kotak ditutup dan dipanaskan sampai $180^\circ C$. Berapakah gaya tetap pada tiap sisi kotak?
- Berapakah laju efektif molekul nitrogen yang mengandung dalam volume $7,6 m^3$ pada 5 atm jika jumlah total nitrogen adalah 1800 mol?
- Gelembung molekul udara pada danau dengan kedalaman 32 m mempunyai volume $1 cm^3$. Jika suhu pada dasar danau adalah $5,5^\circ C$ dan pada permukaan atas $21^\circ C$. Berapakah volume gelembung udara sesaat sebelum sampai pada permukaan?
- Dua buah wadah bervolume V dan $4V$ dihubungkan dengan sebuah pipa kapiler (volumenya dapat diabaikan). Mula-mula kedua wadah bersuhu 280 K dan mengandung udara pada tekanan 68 cmHg. Wadah yang lebih besar dipanaskan menjadi 200 K. Berapakah tekanan dalam tiap wadah?

Bab 5



TERMODINAMIKA

Standart Kompetensi

Menerapkan konsep dan prinsip kalor, konservasi energi dan sumber energi dengan berbagai perubahannya dalam mesin kalor.

Kompetensi Dasar

Menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan hukum termodinamika

Indikator

- Menganalisis keadaan gas karena perubahan suhu, tekanan dan volume.
- Menggambarkan perubahan ke adaan gas dalam diagram P-V
- Memformulasikan hukum I termodinamika dan penerapannya
- Mengaplikasikan hukum II termodinamika pada masalah fisika sehari-hari
- Memformulasikan siklus carnot
- Merumuskan proses reversibel dan tak reversibel
- Menghitung koefisien performasi mesin pendingin

Pendalaman Materi

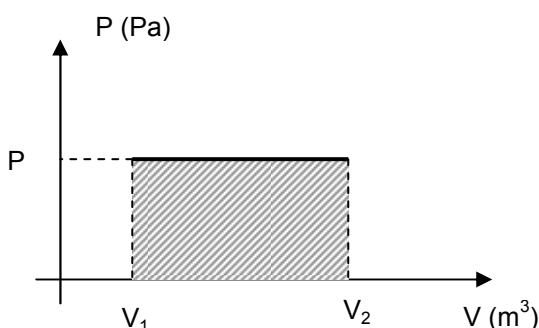
Termodinamika adalah cabang fisika yang mempelajari hukum-hukum dasar dan membahas konversi energi termal menjadi usaha yang bermanfaat. Dalam termodinamika, kumpulan benda-benda yang diperhatikan disebut sistem, sedangkan semua yang ada disekitar sistem disebut lingkungan.

A. PROSES TERMODINAMIKA

Gas yang berada dalam ruang tertutup dapat diubah keadaanya dengan melalui beberapa proses, yang disebut proses termodinamika, yaitu :

1. Proses Isobar

Yaitu proses yang berlangsung pada tekanan tetap (tekanan sama). Grafik tekanan gas (P) terhadap volume (V) adalah sebagai berikut :



Dari grafik di atas pada tekanan yang sama ($P_1 = P_2$), volume gas berubah dari V_1 menjadi V_2 . Usaha yang dilakukan gas pada proses isobar adalah :

$$W = P \cdot \Delta V = P \cdot (V_2 - V_1)$$
$$W = n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

W = luas daerah yang diarsir

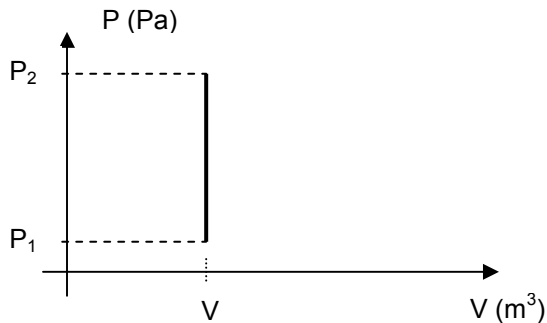
Karena tekanan sama dan suhu berubah dari T_1 menjadi T_2 , maka berlaku hukum Charles :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

W = usaha gas (J)
 P = tekanan gas (Pa)
 V_1 = volume gas mula-mula (m^3)
 V_2 = volume gas akhir (m^3)
 T_1 = suhu gas mula-mula (K)
 T_2 = volume gas akhir (K)

2. Proses Isovolum (isokhorik)

Yaitu proses yang berlangsung pada volume tetap (volume sama). Grafik tekanan gas (P) terhadap volume (V) adalah sebagai berikut :



Dari grafik di atas pada volume yang sama ($V_1 = V_2$), tekanan gas berubah dari P_1 menjadi P_2 . Usaha yang dilakukan gas pada proses isovolum adalah sama dengan nol.

$$W = P \cdot \Delta V = P \cdot (V_2 - V_1) = 0$$

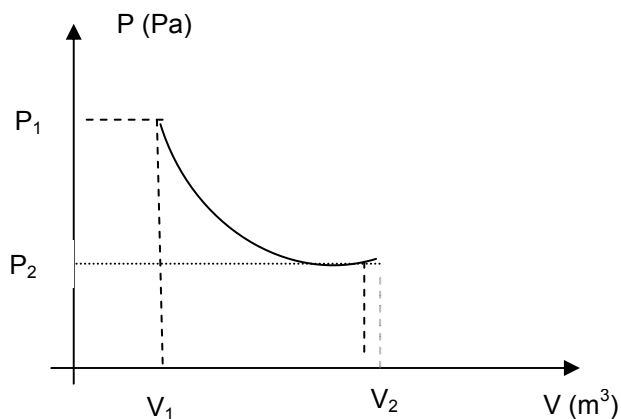
Karena volume sama dan suhu berubah dari T_1 menjadi T_2 , maka berlaku hukum Gay-Lussac :

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

P_1 = tekanan gas mula-mula (m^3)
 P_2 = tekanan gas akhir (m^3)
 T_1 = suhu gas mula-mula (K)
 T_2 = volume gas akhir (K)

3. Proses Isothermal

Yaitu proses yang berlangsung pada suhu tetap (suhu sama). Grafik tekanan gas (P) terhadap volume (V) adalah sebagai berikut :



Dari grafik di atas pada suhu yang sama ($T_1 = T_2$), volume gas berubah dari V_1 menjadi V_2 dan tekanannya berubah dari P_1 menjadi P_2 . Usaha yang dilakukan gas pada proses isothermal adalah :

$$W = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

n = mol
 R = tetapan gas umum $R = 8314 \text{ J/kmol}^\circ\text{K}$
 $= 8,314 \text{ J/mol}^\circ\text{K} = 0,082 \text{ liter} \cdot \text{atm/mol}^\circ\text{K}$
 T = suhu gas (K)

Sesuai dengan persamaan gas umum bahwa nilai :

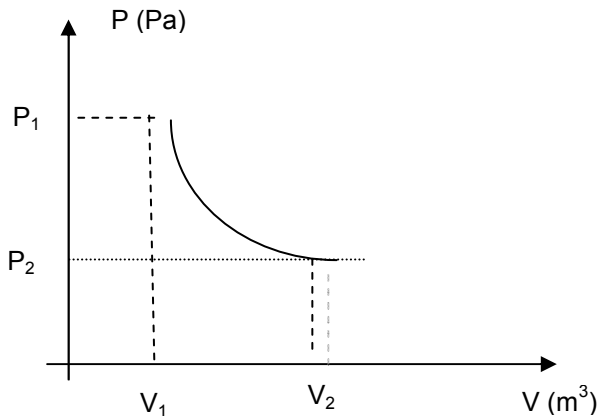
$$n.R.T = P.V$$

Karena suhu T_1 sama dengan T_2 , maka berlaku hukum Boyle :

$$P_1.V_1 = P_2.V_2$$

4. Proses Adiabatik

Yaitu proses perubahan keadaan gas dimana tidak ada kalor yang masuk maupun kalor yang keluar dari sistem ($Q = 0$). Grafik tekanan gas (P) terhadap volume (V) adalah sebagai berikut :



Dari grafik di atas pada suhu yang sama ($T_1 = T_2$), volume gas berubah dari V_1 menjadi V_2 dan tekanannya berubah dari P_1 menjadi P_2 . Usaha yang dilakukan gas pada proses adiabatik adalah :

$$W = \frac{3}{2} n.R.(T_1 - T_2)$$

Atau

$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

Karena T_1 sama dengan T_2 , maka berlaku hukum Poisson :

$$P_1.V_1^\gamma = P_2.V_2^\gamma$$

atau

$$T_1.V_1^{(\gamma-1)} = T_2.V_2^{(\gamma-1)}$$

γ = tetapan laplace.

Contoh Soal

Sebuah tabung tertutup yang volumenya 600 liter berisi gas bertekanan 6 atm. Hitung usaha yang dilakukan oleh gas jika pada tekanan tetap gas memampat sehingga volumenya menjadi setengahnya !

Penyelesaian :

$$P = 6 \text{ atm} = 6.10^5 \text{ Pa}$$

$$V_1 = 600 \text{ liter} = 600.10^{-3} = 0,6 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 300 \text{ liter} = 0,3 \text{ m}^3$$

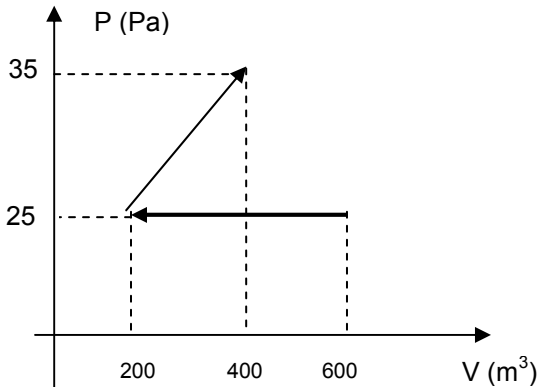
Pada proses isobar,

$$W = P. (V_2 - V_1)$$

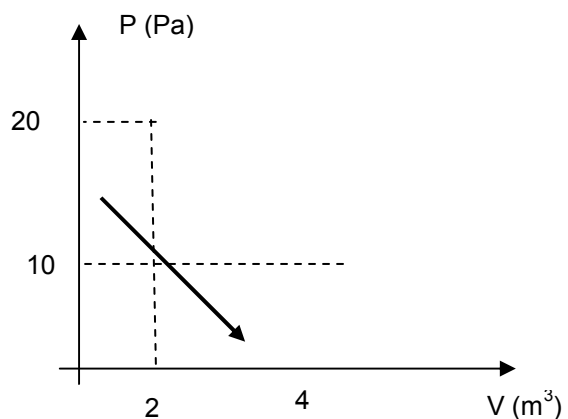
$$W = 6.10^5.(0,3-0,6) = -180.000 \text{ J} = -180 \text{ kJ}$$

Uji Kompetensi 1

- 2 mol gas mengalami perubahan suhu dari 27°C menjadi 227°C pada tekanan tetap. Jika $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$, tentukan usaha yang dilakukan gas !
- Sejenis gas ideal bervolume 3 liter pada suhu 27°C dipanaskan dengan tekanan tetap 2 atm hingga suhunya 227°C . Hitung usaha yang dilakukan gas !
- $2,5 \text{ m}^3$ gas neon bersuhu 52°C dipanaskan secara isobarik sampai 91°C . Jika tekanan gas neon $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, tentukan usaha yang dilakukan gas !
- Tentukan usaha yang dilakukan gas pada proses berikut !

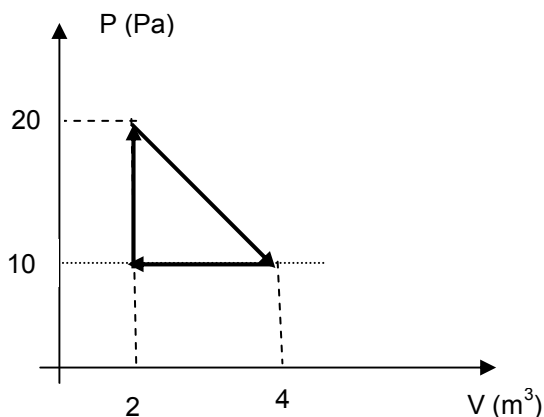


- Sebuah gas ideal mengalami dua proses isobar dan isothermal. Pada proses isobar gas 10 liter memuai menjadi 40 liter pada tekanan 2 MPa. Kemudian gas mengalami pemampatan isothermal, sehingga volumenya menjadi 20 liter dan tekanannya menjadi 4 Mpa. Tentukan usaha yang dilakukan gas tersebut !
- Gas ideal monoatomik tekanannya 10^5 Pa volumenya 3 m^3 dan suhunya 300 K. Mula-mula gas mengalami proses isokhorik hingga tekanannya menjadi $1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, kemudian gas mengalami proses isobarik hingga volumenya menjadi $4,5 \text{ m}^3$.
 - lukis grafik proses tersebut
 - hitung suhu akhir proses isovolume
 - hitung suhu akhir proses isobar
 - hitung usaha total gas
- Perhatikan proses berikut ini !



Hitung usaha yang dilakukan gas !

- Perhatikan proses berikut !



Hitung usaha yang dilakukan gas !

- 2 mol gas ideal bersuhu 27°C bertekanan 6 atm memuai secara isothermal sehingga tekanannya menjadi 3 atm. Hitung usaha yang dilakukan gas !
- $0,2 \text{ mol}$ gas gas argon memuai secara isothermal pada suhu 27°C dari volume 2,5 liter menjadi 10 liter. Tentukan usaha gas !
- Untuk menaikkan suhu 2 mol gas monoatomik menjadi 4 kali suhu semula pada proses adiabatik diperlukan usaha $5,5 \cdot 10^3 \text{ J}$. Berapa suhu awal gas ?

12. Sebuah mesin gasolin memiliki rasio kompresi = $\frac{V_1}{V_2} = 8,5$. Jika suhu campuran bahan bakar udara 30°C, berapa suhu pada kompresi maksimal, jika kompresi pada proses adiabatik dengan nilai $\gamma = 1,4$!
13. Gas ideal bersuhu 300 K mengalami proses adiabatik dengan tekanan awal 2 atm. Volume akhir gas besarnya $\frac{1}{16}$ volume awalnya. Hitunglah suhu dan tekanan akhir ! (jika $\gamma = 5/3$).
14. Sejumlah gas helium bersuhu 27°C menempati volume 5 liter pada tekanan 10^5 Pa. Gas mengalami proses pemuai adiabatik hingga volumenya menjadi 7,68 liter dan gas melakukan usaha sebesar 120 J. Jika gas dianggap gas ideal, tentukan : (jika $\gamma = 5/3 = 1,67$).
- tekanan akhir gas
 - suhu akhir gas

B. HUKUM I THERMODINAMIKA

Hukum I termodinamika menyatakan bahwa : *sejumlah kalor (Q) yang diterima gas digunakan untuk melakukan usaha (W) dan untuk merubah energi dalam gas (ΔU).*

$$Q = W + \Delta U$$

Q = kalor (J)

W = usaha (J)

ΔU = perubahan energi dalam (J)

Perjanjian :

Q positif jika sistem menerima kalor

Q negatif jika sistem melepas kalor

W positif jika sistem melakukan usaha

W negatif jika sistem menerima usaha

ΔU positif jika pada sistem terjadi penambahan energi dalam

ΔU negatif jika pada sistem terjadi pengurangan energi dalam

Energi dalam (energi thermal = energi internal = U) merupakan ukuran langsung dari suhu dan bersifat konservatif, artinya besarnya energi dalam tidak tergantung pada lintasan (proses) yang dilalui gas, namun tergantung pada keadaan awal dan akhir proses.

Untuk *gas monoatomik*, besarnya perubahan energi dalam gas adalah :

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot (P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1)$$

ΔU = perubahan energi dalam gas (J)

U_1 = energi dalam gas awal (J)

U_2 = energi dalam gas akhir (J)

n = mol

R = tetapan gas umum

ΔT = perubahan suhu (K)

T_1 = suhu awal gas

T_2 = suhu akhir gas

P_1 = tekanan awal gas (Pa)

P_2 = tekanan gas akhir

V_1 = volume awal gas (m^3)

V_2 volume gas akhir

APLIKASI HUKUM I TERMODINAMIKA

1. Pada proses Isobar

Pada proses isobar $P_1 = P_2$ ($\Delta P = 0$), sehingga

$$Q = W + \Delta U$$

$$Q = P \cdot \Delta V + \frac{3}{2} \cdot P \cdot \Delta V$$

$$Q = \frac{5}{2} \cdot P \cdot \Delta V = \frac{5}{2} \cdot P \cdot (V_2 - V_1)$$

2. Proses isovolume

Pada proses isovolume $V_1 = V_2$ ($\Delta V = 0$), sehingga $W = 0$. Jadi :

$$Q = W + \Delta U \text{ atau } Q = \Delta U$$

$$Q = 0 + \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

3. Proses isothermal

Pada proses isothermal $T_1 = T_2$ ($\Delta T = 0$), sehingga $\Delta U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T = 0$

Jadi :

$$Q = W + \Delta U$$

$$Q = W + 0$$

$$Q = W$$

$$Q = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

4. Proses adiabatik

Pada proses adiabatik $\Delta Q = 0$, sehingga :

$$W = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot (T_1 - T_2)$$

Atau

$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

C. KAPASITAS KALOR GAS

Kapasitas kalor merupakan kemampuan gas untuk menyerap atau melepas kalor tiap satuan suhu. Jadi kapasitas kalor adalah jumlah kalor yang diperlukan (Q) untuk menaikkan suhu gas (ΔT) sebesar 1 Kelvin.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

C = kapasitas kalor (J/K)

Q = kalor (J)

ΔT = perubahan suhu (K)

Kapasitas kalor gas monoatomik

1. *Kapasitas Kalor pada volum tetap (C_v)*

Pada volume tetap $\Delta V = 0$ atau $W = 0$, sehingga $Q = \frac{3}{2}n.R.\Delta T$

Jadi :

$$C_v = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{3}{2}n.R$$

2. *Kapasitas Kalor pada tekanan tetap (C_p)*

Pada tekanan tetap $W = P.\Delta V = n.R.\Delta T$ dan $\Delta U = \frac{3}{2}n.R.\Delta T$, sehingga :

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = \frac{3}{2}n.R.\Delta T + n.R.\Delta T$$

$$Q = \frac{5}{2}n.R.\Delta T$$

$$C_p = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{5}{2}n.R$$

Hubungan antara C_v dan C_p adalah :

$$C_p - C_v = n.R$$

dan

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma$$

C_p = kapasitas kalor pada tekanan tetap (J/K)

C_v = kapasitas kalor pada volume tetap (J/K)

γ = tetapan Laplace

Kapasitas kalor gas diatomik

Kapasitas kalor untuk gas diatomik dan poliatomik tergantung pada derajat kebebasan.

- pada suhu rendah ($\pm 250^\circ\text{C}$)

$$C_v = \frac{3}{2}n.R \text{ dan } C_p = \frac{5}{2}n.R$$

- pada suhu sedang ($\pm 500^\circ\text{C}$)

$$C_v = \frac{5}{2}n.R \text{ dan } C_p = \frac{7}{2}n.R$$

- pada suhu tinggi ($\pm 1000^\circ\text{C}$)

$$C_v = \frac{7}{2}n.R \text{ dan } C_p = \frac{9}{2}n.R$$

Oleh karena itu, tetapan Laplace untuk gas monoatomi dan diatomik adalah :

- untuk gas monoatomik

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{5}{3} = 1,67$$

- untuk gas diatomik

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5} = 1,4$$

Contoh Soal

Gas pada tekanan konstan $8,1 \cdot 10^4$ Pa dimampatkan dari 9 liter menjadi 2 liter. Dalam proses ini gas melepas kalor 400 J. Tentukan perubahan energi dalam gas !

Penyelesaian :

$$Q = W + \Delta U$$

$$\Delta U = Q - W = Q - P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta U = 400 - 8,1 \cdot 10^4 \cdot (2 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-3})$$

$$\Delta U = 167 \text{ J}$$

Uji Kompetensi 2

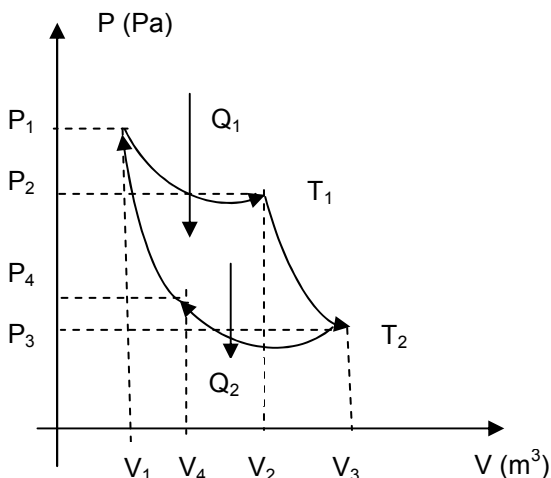
1. Sejumlah 2 mol gas ideal monoatomik suhunya dari 27°C menjadi 127°C pada tekanan tetap. Jika $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$, tentukan :
 - a. perubahan energi dalam gas
 - b. usaha yang dilakukan gas
 - c. kalor yang diperlukan
2. Tentukan perubahan energi dalam gas jika : (1 kalori = 4,2 J)
 - a. gas menyerap kalor 600 kalori dan melakukan gas usaha 400 J
 - b. gas menyerap kalor 300 kalori dan menerima usaha 450 J
3. Tentukan perubahan energi dalam gas jika sistem mengeluarkan kalor 1200 kalori pada volume tetap !
4. Di dalam sebuah tangki tertutup terdapat 0,012 mol gas monoatomik dengan suhu 300 K. Berapa kalor yang diperlukan agar suhu naik menjadi 400 K ?
5. Seseorang pejalan kaki melakukan usaha $2,5 \cdot 10^5$ J dalam suatu latihan rutin sehingga energi dalamnya berkurang $6,8 \cdot 10^5$ J. Hitung besarnya kalor yang diserap orang tersebut !

C. SIKLUS TERMODINAMIKA

SIKLUS CARNOT

Siklus Carnot adalah proses dimana gas yang melakukan proses dapat dikembalikan ke keadaan semula (bersifat reversibel) tanpa kehilangan energi, sehingga gas dapat melakukan usaha kembali. Siklus carnot disebut siklus ideal yang terdiri dari dua proses, yaitu :

1. proses isotermis, yang terdiri dari proses pemuaian isotermis dan pemampatan isotermis
2. proses adiabatik, yang terdiri dari proses pemuaian adiabatik dan pemampatan adiabatik.



Jika kita lihat siklus carnot terdiri dari 4 proses lengkap sebagai berikut :

1. Proses pemuaian isotermal

Gas yang mula-mula tekanannya P_1 , volumenya V_1 melakukan proses pemuaian isothermal pada suhu T_1 sehingga tekanannya menjadi turun menjadi P_2 dan volumenya naik menjadi V_2 . Pada proses ini sistem menyerap kalor Q_1 dari reservoir suhu tinggi T_1 dan melakukan usaha W_1 .

2. *Proses pemuaian adiabatik*

Gas yang tekanannya P_2 volumenya V_2 dan suhunya T_1 melakukan proses pemuaian adiabatik sehingga tekanannya turun menjadi P_3 , volumenya naik menjadi V_3 dan suhunya turun menjadi T_2 sambil melakukan usaha W_2 .

3. *Proses pemampatan isotermitis*

Gas yang tekanannya P_3 volumenya V_3 melakukan proses pemampatan isotermitis pada suhu T_2 , sehingga tekanannya naik menjadi P_4 , volumenya turun menjadi V_4 . Pada proses ini sistem menerima usaha W_3 dan melepas kalor Q_2 ke reservoir bersuhu rendah T_2 .

4. *Proses pemampatan adiabatik*

Gas yang tekanannya P_4 volumenya V_4 dan suhunya T_2 mengalami proses pemampatan adiabatik, sehingga tekanannya kembali menjadi P_1 , volumenya kembali menjadi V_1 dan suhunya menjadi T_1 akibat dari sistem yang menerima usaha W_4 .

Siklus Carnot merupakan dasar dari mesin ideal, yaitu mesin yang efisiensi tertinggi yang disebut dengan mesin Carnot.

Usaha yang dilakukan oleh mesin Carnot adalah :

$$W = Q_1 - Q_2 \quad \text{Karena} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

maka :

$$W = Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

- W = usaha mesin Carnot (J)
- Q_1 = kalor yang diserap dari reservoir suhu T_1
- Q_2 = kalor yang dibuang pada reservoir suhu T_2
- T_1 = suhu tinggi (K)
- T_2 = suhu rendah (K)

Dalam prakteknya dikenal mesin kalor seperti motor bakar, diesel dan mesin uap. Pada siklus Otto terdiri dari proses adiabatik dan isokhorik, sedangkan pada siklus diesel terdiri dari 3 proses, yaitu proses adiabatik, isobarik dan isokhorik.

Efisiensi mesin Carnot adalah :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \quad \text{atau} \quad \eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$$

HUKUM II TERMODINAMIKA

Hukum II termodinamika membatasi perubahan energi yang dapat terjadi dan yang tidak dapat terjadi. Hukum II termodinamika dapat dinyatakan dalam berbagai cara :

1. Pendapat Kelvin-Planck
Kalor tidak mungkin diubah seluruhnya menjadi usaha.
2. Pendapat Clausius (pernyataan mesin kalor)
Tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam suatu siklus mengambil kalor dari reservoir suhu rendah dan memberikan pada reservoir suhu tinggi tanpa memerlukan usaha dari luar.
3. Pernyataan aliran kalor
Kalor mengalir secara spontan dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah dan tidak mengalir secara spontan dalam arah kebalikannya.
4. Pernyataan entropi
Total entropi semesta tidak berubah ketika proses reversibel terjadi dan bertambah ketika proses irreversibel terjadi.

MESIN PENDINGIN (REFRIGERATOR)

Mesin pendingin merupakan peralatan yang bekerja berdasarkan aliran kalor dari benda dingin ke benda panas dengan melakukan usaha pada sistem. Contoh mesin pendingin : lemari es (kulkas) dan pendingin ruangan (AC).

Mesin pendingin mempunyai koefisien daya guna (koefisien performansi) yang besarnya :

$$K_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

- K_p = koefisien performansi mesin pendingin
- Q_2 = kalor yang diserap dari reservoir suhu T_2
- Q_1 = kalor yang diberikan pada reservoir suhu T_1
- W = usaha yang diperlukan (J)
- T_1 = suhu tinggi (K)
- T_2 = suhu rendah (K)

Contoh Soal

Mesin Carnot menyerap kalor 50 kkal dari reservoir suhu 910 K dan melakukan usaha $3 \cdot 10^4$ J. Hitunglah :

- suhu reservoir dingin
- efisiensi mesin

Penyelesaian :

$$Q_1 = 50 \text{ kkal} = 50000 \text{ kal} \times 4,2 \text{ J} = 21 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$T_1 = 910 \text{ K}$$

$$W = 3 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$a. W = Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$3 \cdot 10^4 = 21 \cdot 10^4 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{910}\right)$$

$$T_2 = 780 \text{ K}$$

$$b. \eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \frac{3 \cdot 10^4}{21 \cdot 10^4} \times 100\%$$

$$\eta = 14,3\%$$

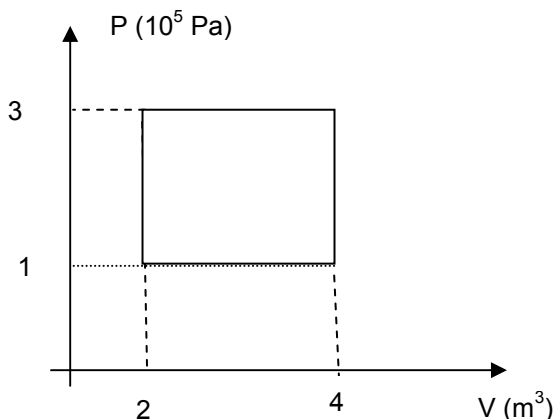
Uji Kompetensi 2

- Sebuah mesin carnot bekerja pada suhu antara 300 K dan 750 K. Tentukan efisiensi mesin!
- Mesin carnot setiap siklusnya menerima kalor sebesar 12000 J dan membuang energi 4000 J. Hitung besarnya efisiensi mesin !
- Efisiensi mesin carnot adalah 75%. Jika 5,6 kJ kalor diberikan oleh dari tandon bersuhu 1120 K dalam satu siklus, berapa kalor yang dibebaskan mesin dari tandon yang bersuhu 280 K ?
- Reservoir mesin carnot bersuhu 800 K dan 400 K, dengan melakukan usaha 1600 J. Berapa :
 - kalor yang diserap mesin carnot ?
 - kalor yang dibuang mesin carnot ?
- Mesin carnot bekerja pada suhu antara 300 K dan 800 K. Kalor yang diserap mesin dari reservoir suhu tinggi sebesar 16000 J. Berapa usaha yang dihasilkan mesin ?

EVALUASI MANDIRI

PILIHAN GANDA

- Gas yang volumenya $0,5 \text{ m}^3$ dipanaskan pada tekanan tetap hingga volumenya 2 m^3 . Jika usaha luar gas $3 \cdot 10^5 \text{ J}$, maka tekanan gas adalah ... Pa
 - $6 \cdot 10^5$
 - $2 \cdot 10^5$
 - $1,5 \cdot 10^5$
 - $0,6 \cdot 10^5$
 - $0,3 \cdot 10^5$
- Gas ideal melakukan proses seperti pada gambar berikut :

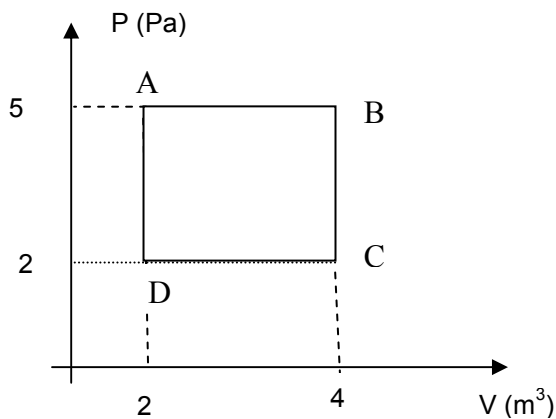


Kerja yang dihasilkan pada proses tersebut adalah ... kJ

- 200
- 400
- 600
- 800
- 1.000

3. Suhu gas ideal ($\gamma = 5/3$) dimampatkan secara adiabatik dari volume V menjadi $0,125V$. Rasio suhu gas ideal terhadap suhu awalnya adalah ...
 - a. 2
 - b. 4
 - c. 8
 - d. 16
 - e. 32
4. Gas ideal pada suhu 300 K mengalami pemuaian adiabatik sehingga volumenya menjadi dua kali volume awalnya dan kemudian di panasi sampai tekanan kembali mencapai nilai awalnya. Suhu akhir gas adalah ... K
 - a. 30 A
 - b. 400
 - c. 450
 - d. 500
 - e. 600

5. Perhatikan gambar berikut !



Sejumlah gas melakukan proses ABCDA. Jika suhu di titik C = 499 K, maka :

- 1) kalor yang diserap gas per siklus 20 J
 - 2) usaha gas 6 J
 - 3) perubahan energi dalam 2 J
 - 4) suhu di titik A = 500 K
- Pernyataan yang benar adalah ...
- a. 1, 2, 3
 - b. 1, 3
 - c. 2, 4
 - d. 4 saja
 - e. semua benar
6. Gas menerima kalor 8000 kal menghasilkan usaha 14000 J. Perubahan energi dalamnya adalah ... J
 - a. 19440
 - b. 20500
 - c. 21450
 - d. 22500
 - e. 24240
 7. Gas mengalami proses isobar pada tekanan 200 kPa sehingga volumenya naik dari 2 liter menjadi 6 liter. Kemudian gas mengalami proses isovolume pada volume 6 liter tersebut, hingga tekanannya turun menjadi 100 kPa. Jika energi kalor total yang diberikan pada gas selama proses 3100 J, maka perubahan energi dalam gas adalah ... J
 - a. -3900
 - b. -2700
 - c. 2300
 - d. 2700
 - e. 3500
 8. Sebuah mesin carnot bekerja pada suhu 300 K dan 750 K. Efisiensi mesin adalah%
 - a. 80
 - b. 75
 - c. 70
 - d. 65
 - e. 60

9. Mesin Carnot reservoir panasnya bersuhu 400 K efisiensinya 40%. Jika reservoir panasnya dinaikkan menjadi 640 K, efisiensinya menjadi ... %
- 900
 - 960
 - 1000
 - 1180
 - 1600
10. Sejumlah makanan dalam kulkas menghasilkan kalor sebesar 4200 J. Bila koefisien performansi kulkas 3,5, maka energi listrik yang diperlukan kulkas untuk memindahkan kalor yang dihasilkan makanan adalah ... J
- 12
 - 120
 - 1200
 - 12000
 - 120000

Bab 6



GELOMBANG MEKANIK

Kompetensi Dasar

- Mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum

Indikator

- Memformulasikan masalah perambatan gelombang melalui suatu medium
- Memformulasikan karakteristik gelombang transversal dan longitudinal
- Memformulasikan gejala superposisi gelombang
- Memformulasikan gejala pemantulan gelombang
- Memformulasikan interferensi gelombang
- Memformulasikan gejala dispersi gelombang
- Memformulasikan gejala difraksi gelombang
- Memformulasikan gejala polarisasi
- Mengaplikasikan sifat-sifat gelombang pada kehidupan sehari-hari
- Memformulasikan efek Doppler pada gelombang

PENDALAMAN MATERI

A. PENGERTIAN GELOMBANG

Gelombang adalah getaran yang merambat. Gelombang yang memerlukan medium untuk merambat disebut gelombang mekanik. Contoh : gelombang bunyi, gelombang air. Gelombang yang tidak memerlukan medium untuk merambat disebut gelombang elektromagnetik. Contoh : gelombang cahaya, sinar X, gelombang radio.

Berdasarkan arah getarannya, gelombang dibedakan menjadi dua, yaitu :

1. gelombang transversal dan
2. gelombang longitudinal.

Berdasarkan Amplitudonya, gelombang terbagi menjadi :

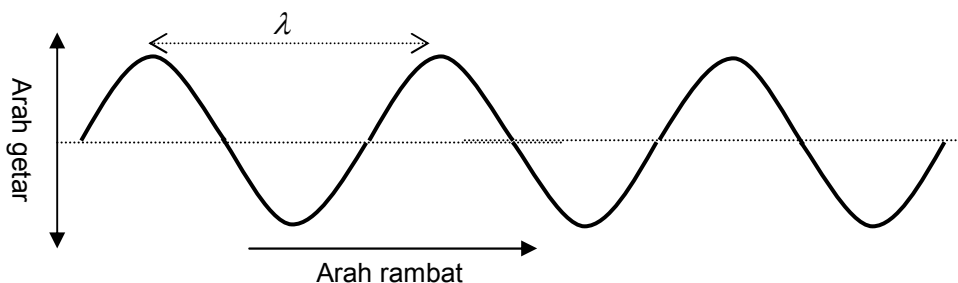
1. gelombang berjalan
2. gelombang stasioner (gelombang berdiri)

Berdasarkan medium perambatannya, gelombang terbagi menjadi :

1. gelombang mekanis
2. gelombang elektromagnetis

Gelombang Transversal

Yaitu gelombang yang arah getarannya tegak lurus dengan arah perambatannya. Contoh : gelombang tali yang diusik.



Gelombang transversal mempunyai bagian dan besaran berikut :

- puncak gelombang, yaitu titik tertinggi pada gelombang
- dasar gelombang, yaitu titik terendah pada gelombang

- bukit gelombang
- lembah gelombang
- amplitudo gelombang, yaitu simpangan terbesar gelombang/tinggi puncak gelombang.
- panjang gelombang, yaitu jarak antara dua puncak gelombang yang berturutan atau jarak antara dua dasar gelombang yang berurutan. Jadi sebuah gelombang terdiri dari sebuah bukit dan sebuah lembah gelombang.
- periode gelombang, yaitu waktu untuk menempuh 1 buah panjang gelombang.
- Frekuensi gelombang, yaitu banyaknya gelombang yang terjadi tiap detik.

Persamaan umum gelombang transversal adalah $y = A \cdot \sin \Theta = A \cdot \sin \omega t$, yang mana :

y = Simpangan getaran/gelombang (m)

A = Amplitudo gelombang (m)

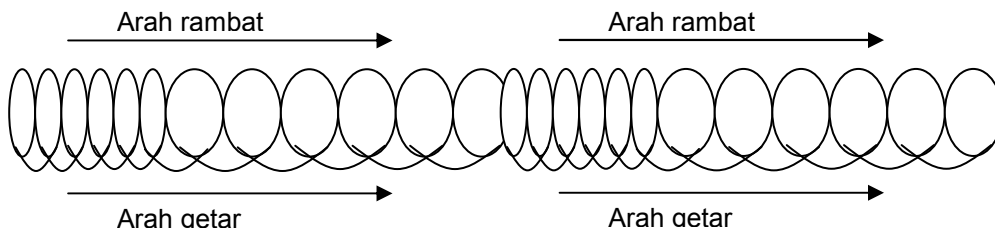
Θ = Sudut fase getaran

ω = kecepatan sudut getaran (rad/s)

t = waktu (sekon)

Gelombang Longitudinal

Yaitu gelombang yang arah getarannya searah dengan arah rambatnya. Contoh : gelombang bunyi, gelombang pegas atau slinki.



Gelombang longitudinal terdiri dari rapatan dan renggangan. Satu panjang gelombang (λ) adalah jarak antara pusat rapatan dengan pusat rapatan yang berurutan, atau jarak antara pusat renggangan dengan pusat renggangan yang berurutan.

Kecepatan Rambat Gelombang

Kecepatan rambat untuk berbagai jenis gelombang :

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T}$$

v = kecepatan rambat gelombang (m/s)

λ = panjang gelombang (m)

f = frekuensi gelombang (Hz)

T = periode gelombang (s)

Fase Gelombang

Yaitu keadaan gelombang yang berkaitan dengan simpangan dan arah rambatnya.

- Dua titik dikatakan sefase jika kedua titik memiliki jarak $1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, n\lambda$. Jadi kedua titik akan memiliki simpangan dan arah gerak yang sama.
- Dua titik dikatakan berlawanan fase jika kedua titik berjarak $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots, (2n-1) \cdot \frac{1}{2}\lambda$. Kedua titik akan memiliki arah simpangan yang berlawanan, walaupun simpangannya sama besar.

Energi dan Intensitas Gelombang

Gelombang memindahkan energi dari satu tempat ke tempat lain atau Gelombang adalah rambatan energi. Gelombang merupakan getaran yang merambat dalam suatu medium. Energi getaran merambat dari satu partikel ke partikel lain sepanjang medium, walaupun partikelnya sendiri tidak berpindah. Besarnya energi gelombang adalah :

$$EK = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \cos^2 \theta$$

$$EP = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \sin^2 \theta$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

EK = energi kinetik (J)

EP energi potensial (J)

E = energi mekanik / energi total (Joule)

k = $m \cdot \omega^2$ = konstanta (N/m)

m = massa (kg)

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ = frekuensi atau kecepatan sudut (rad/s)

f = $\frac{1}{T}$ = frekuensi gelombang (Hz)

Besarnya energi gelombang yang dipindahkan per satuan luas per satuan waktu disebut **intensitas gelombang**. Bila sumber bunyi dianggap sebagai pusat sebuah bola maka gelombang bunyi yang sampai pada seluruh bagian dari kulit bola tersebut mempunyai intensitas yang sama. Besarnya intensitas gelombang bunyi adalah :

$$I = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{P}{A}$$

I = intensitas bunyi ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s} = \text{Watt/m}^2$)

t = waktu (s)

P = daya bunyi (watt)

$A = 4\pi \cdot r^2$ = luas penampang kulit bola (m^2)

r = jarak (m)

Uji Kompetensi

1. Gelombang air laut merambat dengan kecepatan 9 m/s. Jarak antara dua dasar gelombang yang berdekatan adalah 6 m. Tentukan frekuensi dan periode gelombang !
2. Dalam waktu 30 sekon terdapat 10 gelombang laut yang melintas. Jika jarak antara puncak dan dasar gelombang yang berdekatan 6 m, tentukan cepat rambat gelombang laut tersebut !
3. Sebuah slinki menghasilkan gelombang longitudinal dengan jarak antara pusat rapatan dan pusat renggangan yang berdekatan 20 cm. Jika frekuensi gelombang 60 Hz, tentukan cepat rambat gelombang tersebut !
4. Sebuah slinki menghasilkan gelombang dengan jarak rapat dan renggangan yang berdekatan 40 cm. Bila untuk menempuh satu gelombang diperlukan waktu 0,04 s, berapa cepat rambat gelombang tersebut ?
5. Pada permukaan sebuah danau terdapat dua gabus yang terpisah satu dengan lainnya sejauh 60 cm. Keduanya naik turun bersama permukaan air dengan frekuensi 2 Hz. Bila salah satu gabus berada di puncak bukit gelombang dan yang lainnya berada di dasar gelombang, sedangkan antara kedua gabus terdapat satu bukit gelombang, tentukan cepat rambat gelombang pada permukaan danau !
6. Intensitas gelombang gempa di suatu lokasi yang berjarak 125 km dari sumber gempa adalah $4 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$. Tentukan intensitas gelombang gempa tersebut pada tempat yang berjarak 500 km dari sumber gempa !
7. Sebuah system mampu mengeluarkan gelombang bunyi dengan daya output 3140 Watt. Tentukan intensitas gelombang bunyi tersebut pada jarak 10 m dari sumber bunyi !
8. Sebuah partikel bermassa 0,5 mg bergetar pada frekuensi 60 Hz. Jika amplitudo getaran 0,8 cm, hitung energi maksimum gelombang yang dibangkitkan oleh getaran tersebut !
9. Sebuah gelombang frekuensinya 800 Hz dan amplitudonya 2 cm merambatkan energi 0,4 J. Jika amplitudo dan frekuensi gelombang turun setengahnya, berapa besar energi yang dirambatkan gelombang tersebut ?
10. Gelombang transversal memiliki frekuensi 40 Hz dan amplitudo 8 cm. Jika frekuensi gelombang dinaikkan 2 kali semula, berapa berapa besar kenaikan energi yang dirambatkannya ?

B. SIFAT-SIFAT GELOMBANG

Ada beberapa sifat gelombang yang berlaku pada gelombang mekanik maupun gelombang elektromagnetik. Sifat gelombang tersebut adalah :

1. Pemantulan (refleksi)
2. Pembiasan (refraksi)
3. Pelenturan (difraksi)
4. Perpaduan (interferensi)
5. Dispersi
6. Polarisasi

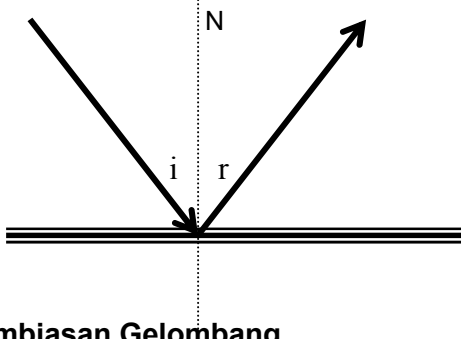
Setiap gelombang merambat dengan arah tertentu. Arah merambat suatu gelombang disebut sinar gelombang. Sinar gelombang selalu tegak lurus pada muka gelombang. Muka gelombang (front gelombang) adalah kedudukan titik yang memiliki fase yang sama pada gelombang. Jarak antara dua muka gelombang yang berdekatan sama dengan satu panjang gelombang (λ).

Pemantulan Gelombang

Gelombang yang datang dan mengenai suatu penghalang akan dipantulkan. Gelombang lurus yang datang pada permukaan bidang datar, akan berlaku hukum pemantulan gelombang, yang berbunyi :

1. Gelombang datang, gelombang pantul dan garis normal (N) terletak pada satu bidang datar.
2. Sudut gelombang datang (i) **sama dengan** sudut gelombang pantul (r.)

Perhatikan gambar berikut :

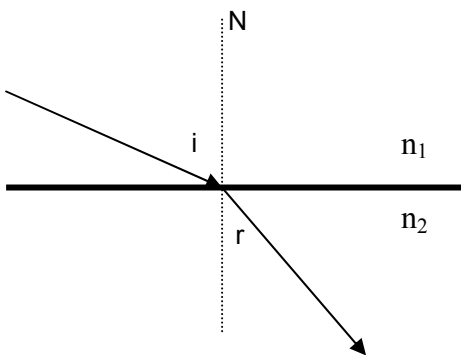


Sinar datang dengan sudut datang sebesar (i) setelah mengenai permukaan medium yang dapat memantulkan sinar, maka sinar akan dipantulkan dengan sudut pantul (r). Garis sinar datang, garis normal, dan garis sinar pantul harus terletak pada satu bidang datar (misal: bidang tersebut adalah kertas buku ini, atau papan tulis)

Pembiasan Gelombang

Pembiasan adalah peristiwa pembelokan gelombang. Seperti pada peristiwa pemantulan, gelombang yang datang menuju medium yang berbeda akan dibiaskan, dan berlaku hukum pembiasan gelombang, yang berbunyi :

1. Gelombang datang, gelombang bias dan garis normal (N) terletak pada satu bidang datar.
2. Gelombang datang dari tempat yang dalam (medium renggang) ke tempat yang dangkal (medium rapat), maka gelombang akan dibiaskan mendekati garis normal (sudut bias $r <$ sudut datang i)
3. Gelombang datang dari tempat yang dangkal (medium rapat) ke tempat yang dalam (medium renggang), maka gelombang akan dibiaskan menjauhi garis normal (sudut bias $r >$ sudut datang i).



Persamaan umum yang berlaku untuk pembiasan gelombang adalah persamaan Snellius, yaitu :

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

- n = indeks bias relatif medium 2 thd medium 1
- n_2 = indeks bias medium 2
- n_1 = indeks bias medium 1
- i = sudut gelombang datang
- r = sudut gelombang bias

- v_1 = cepat rambat gelombang pada medium 1
- v_2 = cepat rambat gelombang pada medium 2
- λ_1 = panjang gelombang pada medium 1
- λ_2 = panjang gelombang pada medium 2
- n = indeks bias udara adalah 1 (referensi)

(sudut batas/kritis) terjadi jika sinar datang dari medium dengan indeks bias besar ke medium dengan indeks bias kecil. Sudut batas adalah sudut datang ketika sudut bias $r = 90^\circ$).

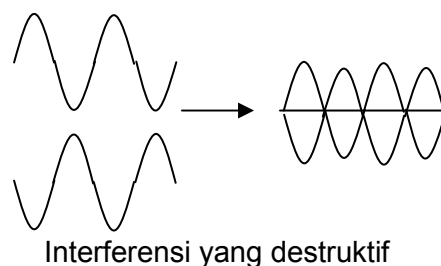
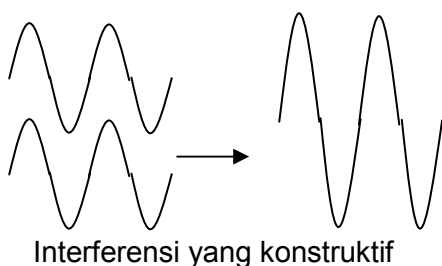
Difraksi Gelombang

Difraksi gelombang adalah pembelokan arah gelombang yang disebabkan oleh adanya penghalang berupa celah sempit. Celah bertindak sebagai sumber gelombang baru berupa titik dan gelombang yang melalui celah akan dipancarkan sebagaimana halnya gelombang sebelum melalui celah.

Interferensi Gelombang

Interferensi adalah peristiwa perpaduan dua atau lebih gelombang disuatu titik pada medium. Interferensi yang akan dibahas terbatas pada gelombang yang koheren saja, artinya gelombang-gelombang tersebut memiliki frekuensi dan cepat rambat yang sama. Dengan menggunakan prinsip superposisi (penjumlahan) gelombang, maka interferensi dapat dijelaskan.

1. Interferensi konstruktif, yaitu interferensi yang saling menguatkan, terjadi jika gelombang yang berinterferensi memiliki fase yang sama.
2. Interferensi destruktif, yaitu interferensi yang saling meniadakan, terjadi jika gelombang yang berinterferensi memiliki fase yang berlawanan.



Interferensi yang terjadi terus menerus antara gelombang datang dan gelombang pantul menghasilkan gelombang tegak (gelombang stasioner).

Dispersi Gelombang

Dispersi adalah pembelokan arah gelombang ketika merambat melalui suatu medium dan medium tersebut memberikan respon yang berbeda terhadap masing-masing gelombang yang masuk. Misalnya gelombang cahaya putih yang dilewatkan prisma, maka cahaya putih akan terurai menjadi warna-warna pelangi (merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila dan ungu).

Polarisasi Cahaya

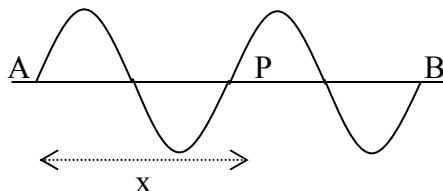
Polarisasi adalah peristiwa terserapnya sebagian arah getar gelombang sehingga hanya tinggal memiliki sebagian arah getar saja. Polarisasi hanya terjadi pada gelombang transversal saja.

UJI KOMPETENSI

1. Sebuah gelombang lurus datang dari pada bidang batas antara dua medium dengan sudut datang 30° . Jika indeks bias relatif medium 2 terhadap medium 1 adalah $\frac{1}{2}\sqrt{2}$, berapa sudut biasnya ?
2. Seberkas sinar datang pada lapisan minyak ($n = 1,45$) yang terapung di atas air ($n = 1,33$) dengan sudut datang 30° . Hitung sudut sinar keluar dari air ! (Anggaplah lapisan minyak dan air berada di udara, sehingga atasnya minyak dan bawahnya air adalah udara)
3. Pada sebuah kolam berisi penuh air, terapung sebuah benda. Jika kedalaman kolam 2 m, di manakah letak bayangan benda di dasar kolam pada saat ada sinar yang mengenai benda dengan arah sejajar permukaan air dalam kolam?
4. Seberkas sinar masuk dari udara ($n = 1$) ke dalam air dengan sudut datang 30° . Tentukan :
 - a. sudut bias di dalam air jika indeks bias air $4/3$
 - b. sudut batas air (sudut kritis)
5. Jika sudut kritis cahaya dalam suatu zat adalah 37° , tentukan indeks bias relatif medium zat !
6. Sebuah bak diisi sebagian oleh air ($n = 4/3$). Sinar datang dengan sudut 60° dari titik A dan sinar pantulnya mengenai bak di titik B (di dasar dan disudut dinding bak), sedangkan sinar biasnya mengenai titik C (di dinding bak). Jika jarak $BC = 1$ m, berapa ketinggian air dalam bak ?

C. GELOMBANG BERJALAN

Gelombang berjalan adalah gelombang mekanik yang memiliki amplitudo konstan disetiap titik yang dilalui gelombang. Perhatikan gelombang berjalan pada tali berikut ini. Titik P adalah berasal dari titik A yang merambat dari kiri ke kanan sejauh x , pada akhirnya titik A sampai juga pada titik B. Sepanjang persmbatan titik P, dapat dianalisis sebagai berikut :



$$x = v.t$$

Bila A sudah bergetar selama t , maka P sudah bergetar selama t dikurang waktu untuk merambat dari A sampai P ($t-x/v$).

$$y = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$y_p = A \cdot \sin(\omega t_p)$$

$$y_p = A \cdot \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) = A \cdot \sin\left(\omega t - \omega \frac{x}{v}\right) = A \cdot \sin(\omega t - kx)$$

Tali yang panjangnya AB digetarkan di A sehingga terjadi gelombang berjalan dengan kecepatan v dari A ke B. Setelah dalam selang waktu t , titik P yang jaraknya x dari A akan bergetar. Persamaan simpangan, kecepatan dan percepatan di titik P pada gelombang berjalan tersebut dan beberapa persamaan yang terkait adalah sebagai berikut :

$$y = A \cdot \sin(\omega t - kx)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - kx)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t - kx) = -y \cdot \omega^2$$

dengan :

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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$$

$$v = \frac{\omega}{k}$$

$$\theta = (\omega t - kx)$$

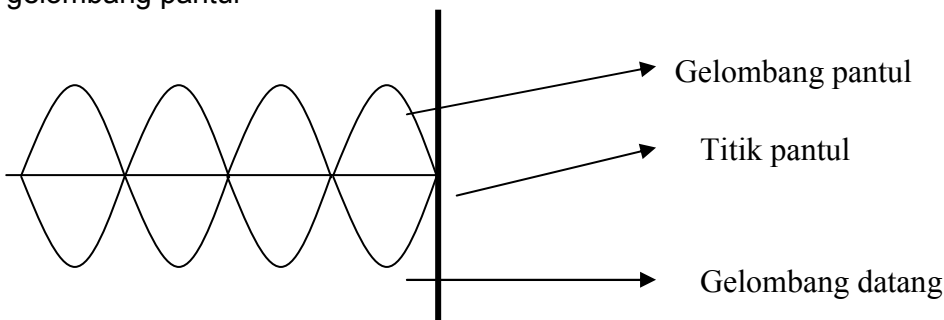
$$\varphi = \frac{\theta}{2\pi} = \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

$$\Delta\varphi = \frac{x_B - x_A}{\lambda} = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

y = simpangan (m)
 v = kecepatan rambat gelombang (m/s)
 a = percepatan gelombang (m/s²)
 A = amplitudo (m)
 ω = kecepatan sudut (rad/s)
 k = bilangan gelombang (/m)
 f = frekuensi gelombang (Hz)
 T = periode gelombang (s)
 t = waktu (s)
 x = jarak titik ke sumber getar (m)
 θ = sudut fase gelombang (°)
 φ = fase gelombang
 $\Delta\varphi$ = beda fase antara dua titik A dan B dari asal getaran.

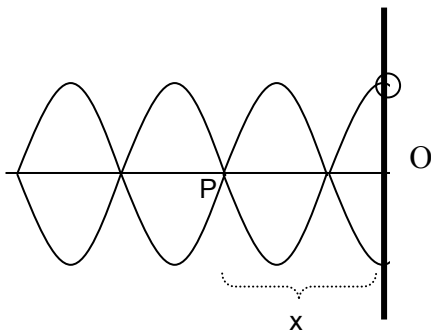
D. GELOMBANG STASIONER

Gelombang stasioner atau gelombang berdiri atau gelombang tegak atau gelombang diam adalah gelombang yang hasil interferensi dua gelombang yang memiliki amplitudo dan frekuensi sama, tetapi arah rambatnya berlawanan. Dua gelombang yang dimaksud adalah gelombang datang dan gelombang pantul



Gelombang stasioner terdiri dari perut (amplitudonya maksimum) dan simpul (amplitudonya minimum = 0)

Gelombang Stasioner Pada Dawai Ujung Bebas



Gelombang datang dengan persamaan :

$$y_1 = A \sin (kx - \omega t)$$

Gelombang yang datang dipantulkan kembali menghasilkan gelombang pantul dengan persamaan :

$$y_2 = A \sin (-kx - \omega t) = -A \sin (kx + \omega t).$$

Hasil superposisi gelombang datang dan gelombang pantul oleh ujung bebas menghasilkan persamaan gelombang stasioner dengan persamaan :

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = A \sin (kx - \omega t) + A \sin (-kx - \omega t)$$

maka :

$$y = 2A \cdot \cos kx \cdot \sin \omega t$$

Amplitudo gelombang stasioner adalah :

$$A_s = 2A \cdot \cos kx$$

Letak simpul dan letak perut gelombang stasioner ujung bebas adalah :

- Perut (amplitudo maksimum) sebesar $A_s = 2A$ terjadi jika $\cos kx = \pm 1$ atau $kx = n\pi$. Jadi letak perut **dari titik pantul** adalah pada jarak : x
- Simpul (amplitudo minimum) sebesar $A_s = 0$ terjadi jika $\cos kx = 0$ atau $kx = (2n+1)\frac{\pi}{2}$. Jadi letak simpul **dari titik pantul** adalah pada jarak : x

$$x = 0, \frac{2}{3}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots$$

$$x = n \cdot \left(\frac{1}{2}\lambda\right),$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Perut

$$x = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \dots$$

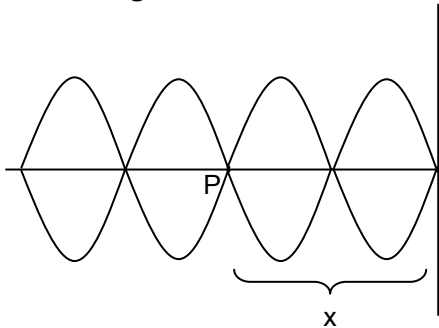
$$x = (2n+1) \cdot \frac{1}{4}\lambda$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

simpul

$n = 0$ untuk letak perut/simpul ke-1
 $n = 1$ untuk letak perut/simpul ke-2
 $n = 2$ untuk letak perut/simpul ke-3
 dan seterusnya.

Gelombang Stasioner Pada Dawai Ujung Terikat



Gelombang datang dengan persamaan :
 $y_1 = A \sin(kx - \omega t)$

Gelombang yang datang dipantulkan kembali menghasilkan gelombang pantul dengan persamaan :

$$y_2 = -A \sin(-kx - \omega t) = A \sin(kx + \omega t).$$

Hasil superposisi gelombang datang dan gelombang pantul oleh ujung terikat menghasilkan persamaan gelombang stasioner dengan persamaan :

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t)$$

maka :

$$y = 2A \cdot \sin kx \cdot \cos \omega t$$

Amplitudo gelombang stasioner adalah :

$$A_s = 2A \cdot \sin kx$$

Letak simpul dan letak perut gelombang stasioner ujung terikat adalah :

- Perut (amplitudo maksimum) sebesar $A_s = 2A$ terjadi jika $\sin kx = \pm 1$ atau $kx = (2n+1)\frac{\pi}{2}$.
 Jadi letak perut dari titik pantul adalah pada jarak x
- Simpul (amplitudo minimum) sebesar $A_s = 0$ terjadi jika $\sin kx = 0$ atau $kx = n\pi$. Jadi letak simpul dari titik pantul adalah pada jarak x

$n = 0$

$$x = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \dots$$

$$x = (2n+1) \cdot \frac{1}{4}\lambda$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Perut

ke-1

$$x = 0, \frac{2}{3}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots$$

$$x = n \cdot \left(\frac{1}{2}\lambda\right),$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

simpul

$n = 1$ untuk letak perut/simpul ke-2
 $n = 2$ untuk letak perut/simpul ke-3
 dan seterusnya.

Uji Kompetensi

- Sebuah gelombang berjalan pada tali dinyatakan dengan persamaan :
 $y = 6 \sin (0,02\pi x - 4\pi t)$ dengan x dan y dalam satuan cm dan t dalam sekon. Tentukan :
 - amplitudo
 - panjang gelombang
 - frekuensi gelombang
 - periode gelombang
 - cepat rambat gelombang
 - kecepatan getaran maksimum
 - percepatan gelombang
 - percepatan getaran maksimum
- Tali AB, ujung A digetarkan dengan frekuensi 25 Hz dan amplitudo 5 cm sehingga terjadi gelombang berjalan dengan kecepatan 4 m/s. Titik P yang berjarak 4 m dari A bergetar setelah $\frac{7}{4}$ s setelah A digetarkan. Tentukan simpangan di titik P tersebut !
- Ujung seutas tali digetarkan harmonik dengan periode 0,5 s dan amplitudo 6 cm. Getaran ini merambat ke kanan sepanjang tali dengan cepat rambat 200 cm/s. Tentukan :
 - persamaan umum gelombang
 - simpangan, kecepatan dan percepatan partikel di titik P yang berjarak 27,5 cm dari ujung tali yang digetarkan pada saat ujung getar telah bergetar 0,2 s.
 - Sudut fase dan fase partikel di titik P pada saat ujung getar telah bergetar 0,2 s
 - Beda fase antara dua titik sepanjang tali yang berjarak 25 cm.
- Sebuah gelombang frekuensinya 500 Hz bergerak dengan kecepatan 350 m/s. Tentukan :
 - jarak dua titik yang berbeda sudut fase 60° (jika $180^\circ = \pi$ rad).
 - beda fase suatu titik yang bergetar untuk interval waktu 1 ms
 - beda sudut fase suatu titik yang bergetar untuk interval waktu 1 ms
- Sebuah gelombang berjalan dengan pada seutas tali dengan persamaan :
$$y = 2 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{0,4} + \frac{x}{80} \right) \right]$$
dengan x dan y dalam cm dan t dalam sekon. Tentukan :
 - cepat rambat gelombang
 - percepatan maksimum
- Gelombang stasioner pada sebuah tali mempunyai persamaan simpangan :
 $Y = 2 \sin 5\pi t \cos 6\pi x$ (y , x dan t dalam SI). Tentukan :
 - jenis gelombang stasioner
 - cepat rambat gelombang
 - periode gelombang
 - amplitudo titik P yang berjarak 75 cm dari titik pantul
- Seutas tali panjangnya 6 m direntangkan horizontal. Salah satu ujungnya digetarkan dan ujung lainnya tetap, sehingga terjadi gelombang stasioner. Ternyata perut ke-5 berjarak 3,75 m dari titik asal getaran. Tentukan :
 - panjang gelombang stasioner
 - letak simpul ke-5 dari titik asal getaran
- Dua buah gelombang berjalan, masing-masing dengan persamaan :
$$Y_1 = 4 \sin \left(\frac{\pi}{6} x - 2t \right)$$
$$Y_2 = 4 \sin \left(\frac{\pi}{6} x + 2t \right)$$
Dengan x dan y dalam cm dan t dalam sekon. Kedua gelombang berinterferensi menghasilkan gelombang stasioner. Tentukan :
 - persamaan gelombang stasionernya
 - cepat rambat gelombang stasionernya
 - amplitudo gelombang pada $x = 21$ cm
 - letak perut dan simpul ke-3
- Seutas kawat panjangnya 1 m direntangkan horizontal. Salah satu ujungnya digetarkan naik turun dengan frekuensi 0,125 HZ dan amplitudo 16 cm, sedangkan ujung lain terikat, sehingga gelombang berjalan ke kanan dengan kecepatan 4,5 cm/s. Tentukan letak :
 - Simpul ke 4
 - Perut ke-3
- Salah satu ujung tali yang panjangnya 115 cm digetarkan harmonik naik turun, sedangkan ujung lain bebas bergerak. Jika perut ke-3 berjarak 15 cm dari asal getaran, tentukan :
 - panjang gelombang stasioner
 - letak simpul ke-2 dari asal getaran

Evaluasi Mandiri

- Persamaan antara getaran dan gelombang:
 - memiliki frekuensi
 - memiliki amplitudo
 - memiliki panjang gelombangPernyataan yang benar adalah ...
 - 1, 2
 - 1, 3
 - 1,2,3
 - 2,3
 - 2
- Gelombang frekuensinya 2 Hz dan cepat rambatnya 3 m/s. Jarak yang ditempuh gelombang dalam waktu 5 s adalah ...m
 - 5
 - 6
 - 7,5
 - 1,5
 - 3
- Suatu puncak gelombang air diamati menempuh jarak 80 cm dalam waktu 5 s. Jika jarak antara puncak ke puncak yang berdekatan 2 cm, maka frekuensi gelombang adalah ... Hz
 - 4
 - 5
 - 8
 - 10
 - 16
- Sebuah slinki panjangnya 50 cm digetarkan maju mundur dua kali per detik sehingga terjadi gelombang longitudinal. Jika pada slinki terbentuk 5 rapatan dan 4 renggangan, maka panjang gelombang dan cepat rambat gelombangnya adalah ...
 - 12,5 cm dan 25 cm/s
 - 25 cm dan 25 cm/s
 - 50 cm dan 25 cm/s
 - 25 cm dan 50 cm/s
 - 50 cm dan 100 cm/s
- Bila garputala digetarkan dengan frekuensi 340 Hz pada dawai yang panjangnya 120 cm, sehingga terjadi gelombang stasioner pada dawai. Jika terbentuk 4 perut gelombang, maka cepat rambat gelombang pada dawai adalah ... m/s
 - 102
 - 204
 - 306
 - 408
 - 510
- Frekuensi suatu pembangkit gelombang air adalah 30 Hz ketika jarak antara dua muka gelombang yang berdekatan 2 cm. Jika frekuensi pembangkit diubah, diperoleh jarak dua muka gelombang 4 cm. Frekuensi baru tersebut adalah ...Hz
 - 2
 - 4
 - 5
 - 15
 - 30
- Pada getaran harmonik, agar besar energi potensialnya sama dengan energi kinetiknya, maka besarnya sudut fase harus
 - 30° dan 120°
 - 30° dan 135°
 - 45° dan 135°
 - 45° dan 120°
 - 90° dan 135°
- Intensitas gelombang pada jarak 50 m adalah 30.000 W/m^2 . Intensitas gelombang pada jarak 25 m adalah ... W/m^2
 - 30.000
 - 60.000
 - 90.00
 - 12.000
 - 120.000

9. Jarak antara dua simpul yang berurutan pada gelombang stasioner adalah 25 cm. Jika cepat rambat gelombang 225 m/s, frekuensi gelombang adalah ... Hz.
- 25
 - 200
 - 225
 - 450
 - 475
10. Persamaan simpangan gelombang berjalan adalah : $y = 2 \sin \pi(20t - \frac{x}{25})$. Jika x dan y dalam cm dan t dalam sekon, maka cepat rambat gelombang adalah ...m/s
- 1
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
11. Persamaan gelombang berjalan adalah : $y = \sin 2\pi(\frac{t}{0,02} - \frac{x}{15})$. Jika x dan y dalam cm dan t dalam sekon, maka :
- panjang gelombangnya = 15 cm
 - frekuensinya 50 Hz
 - amplitudo 1 cm
 - cepat rambat gelombangnya 750 cm/s
- Pernyataan yang benar adalah ...
- 1,2,3
 - 1,3
 - 2,4
 - 4
 - 1,2,3,4
12. Gelombang stasioner persamaan simpangannya $y = 10 \sin 0,4\pi t \cos 5\pi x$ dalam SI. Cepat rambat gelombang itu adalah ... m/s
- 0,02
 - 0,08
 - 0,10
 - 0,12
 - 0,14
13. Gelombang stasioner persamaan simpangannya $y = 0,1 \sin 5\pi t \cos 0,9\pi x$ dalam SI. Titik P berjarak 5 cm dari titik pantul. Amplitudo di titik P adalah cm
- 0
 - 5
 - 10
 - 15
 - 20
14. Gelombang stasioner dengan persamaan $y = 0,1 \sin 20\pi t \cos 4\pi x$ dalam SI. Simpul ke-5 terhadap titik pantul berjarak ... m
- 0,5
 - 0,75
 - 1
 - 1,125
 - 1,25
15. Pada sebuah tali ujung bebas terjadi gelombang diam. Jarak 4 buah simpul yang berurutan 60 cm. Bila cepat rambat gelombang 12 m/s, besarnya frekuensi gelombang ini adalah ... Hz.
- 10
 - 20
 - 30
 - 40
 - 50



Kompetensi Dasar

- Mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang bunyi dan cahaya

Indikator

- Memformulasikan sifat-sifat dasar gelombang bunyi
- Merancang percobaan untuk mengukur cepat rambat bunyi
- Mengklasifikasikan gelombang bunyi berdasarkan frekuensinya
- Memformulasikan tinggi nada bunyi pada alat penghasil bunyi
- Memformulasikan gejala pelayangan bunyi
- Mengaplikasikan peristiwa interferensi dan resonansi bunyi pada kehidupan sehari-hari
- Membuat ulasan penerapan efek Doppler bunyi pada SONAR
- Membuat ulasan penerapan bunyi pada pengujian tak merusak (NDT)
- Memformulasikan intensitas dan taraf intensitas.

PENDALAMAN MATERI

A. SIFAT DASAR BUNYI

"Bunyi merambat sebagai gelombang", sehingga bunyi memiliki beberapa sifat, yaitu :

1. bunyi dihasilkan oleh sumber getar atau benda yang bergetar.
2. energi dari sumber bunyi dipindahkan dalam bentuk gelombang longitudinal.
3. bunyi dapat dideteksi oleh telinga atau instrumen (microphone).
4. bunyi memiliki frekuensi, periode, amplitudo dan panjang gelombang.
5. bunyi dapat merambat melalui medium sehingga bunyi dapat mengalami pemantulan (refleksi), pembiasan (refraksi), perpaduan (interferensi), dan pelenturan (difraksi).
6. bunyi termasuk gelombang mekanik, akibatnya bunyi hanya dapat merambat melalui medium berupa zat padat, cair dan zat gas.
7. Secara umum cepat rambat bunyi terbesar dalam zat padat, dan terkecil dalam zat gas.

B. CEPAT RAMBAT BUNYI

Bunyi memerlukan waktu untuk merambat dari satu tempat ke tempat lain. Secara matematis, cepat rambat bunyi dapat dituliskan :

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

v = cepat rambat bunyi (m/s)
s = jarak tempuh (m)
t = waktu (s)

Cepat rambat bunyi di udara sekitar 330 m/s.

Karena bunyi sebagai gelombang, maka cepat rambat bunyi dapat dituliskan :

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

v = cepat rambat bunyi (m/s)
 λ = panjang gelombang bunyi (m)
T = periode (s)
f = frekuensi bunyi (HZ)

Di dalam fluida (zat cair dan udara), kecepatan gelombang bunyi dirumuskan :

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}$$

B = modulus Bulk (kg/ms²)
 ρ = kerapatan medium (kg/m³)
 γ = tetapan laplace = rasio kapasitas – panas
R = tetapan gas umum (8,314 J/mol.K)
T = suhu mutlak (K)
M = massa molar gas (gram/mol)

Jika bunyi melalui batang padat dan panjang, maka laju bunyi sebesar :

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E = modulus Young (kg/ms²)

C. KLASIFIKASI BUNYI

Berdasarkan frekuensinya bunyi dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu :

1. Nada
2. Desah (noise).

Nada merupakan bunyi yang frekuensinya teratur, sedangkan desah merupakan bunyi yang frekuensinya tidak teratur. Tinggi rendah nada tergantung pada frekuensi bunyi. Semakin tinggi frekuensi, semakin tinggi nadanya. Kuat lemah nada bunyi tergantung dari amplitudonya. Semakin besar amplitudo gelombang bunyi, semakin kuat (keras) nadanya.

Berdasarkan batas pendengaran manusia, bunyi dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu :

1. Infrasonic, yaitu gelombang bunyi yang frekuensinya kurang dari 20 Hz. Infrasonik banyak dihasilkan oleh sumber getar yang cukup besar misalnya gempa.
2. Audiosonik, gelombang bunyi yang frekuensinya antara 20 – 20.000 Hz. Batas frekuensi bunyi ini dapat ditangkap oleh telinga manusia normal.
3. Ultrasonik, gelombang bunyi yang frekuensinya lebih dari 20.000 Hz. Ultrasonik biasanya dihasilkan oleh getaran kristal kuarsa dalam suatu medan listrik. Secara alami pemancar dan penerima ultrasonic dimiliki oleh anjing dan kelelawar, sehingga kedua hewan tersebut dapat mendengar bunyi ultrasonic ini dari 500000 – 100000 Hz.

Ultrasonik dapat dimanfaatkan antara lain dalam kehidupan sehari-hari, pada :

1. kaca mata tuna netra
2. fatometer (alat pengukur kedalaman laut). Kedalaman laut dapat di hitung dengan dengan persamaan :

$$h = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

h = kedalaman laut (m)

v = cepat rambat bunyi (m/s)

Δt = selang waktu pengiriman dan penerimaan pulsa ultrasonic (s)

3. pulsa ultrasonic dapat mendeteksi keretakan sambungan las logam
4. pemeriksaan USG (ultrasonografi)
5. Bor ultrasonic digunakan untuk membuat berbagai ukuran lubang gelas dan baja pada industri.
6. Gelombang ultrasonic yang dipancarkan oleh kelelawar memungkinkan hewan ini dapat terbang di malam hari tidak mengalami tabrakan.

D. EFEK DOPPLER

Efek Doppler merupakan gejala tentang perbedaan frekuensi bunyi yang terdengar dari sebuah sumber bunyi. Suatu sumber bunyi bergerak kearah pendengar, nada terdengar lebih tinggi dibandingkan ketika sumber bunyi itu diam, sebaliknya bila sumber bunyi bergerak menjauhi pendengar akan terdengar nada yang lebih rendah. Fenomena ini dikenal dengan efek Doppler, dan terjadi untuk semua jenis gelombang.

Besarnya frekuensi bunyi yang terdengar dari sebuah sumber bunyi adalah :

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \cdot f_s$$

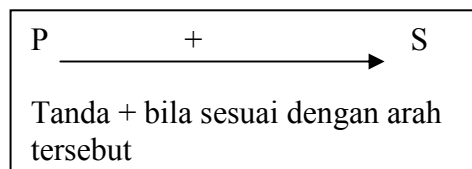
f_p = frekuensi bunyi yang terdengar(Hz)

f_s = frekuensi bunyi yang dihasilkan - sumber bunyi (Hz)

v = cepat rambat bunyi di udara (m/s)

v_p = kecepatan pendengar (m/s)

v_s = kecepatan sumber bunyi (m/s).



Perjanjian tanda + dan – pada rumus Doppler adalah sebagai berikut :

- tanda + jika pendengar mendekati sumber bunyi atau sumber bunyi menjauhi pendengar.
- Tanda – jika pendengar menjauhi sumber bunyi atau sumber bunyi mendekati pendengar.

Jika ada angin yang berhembus dengan kecepatan v_a , maka cepat rambat bunyi akan berubah yaitu bila arah angin searah dengan arah sumber bunyi ke pendengar maka $v + v_a$ dan sebaliknya.

Informasi :

Efek Doppler juga terjadi pada jenis gelombang lain, misalnya cahaya, rumus pergeseran frekuensi tidak sama tetapi efek yang ditimbulkannya sama. Aplikasi yang lain adalah dalam astronomi yang dikenal dengan pergeseran merah., dimana cahaya dari galaksi – galaksi tersebut bergeser ke arah frekuensi rendah dalam cahaya tampak. Makin besar pergeseran frekuensinya menunjukkan makin besar kecepatan menjauhnya. Semakin cepat galaksi bergerak menjauh, semakin jauh galaksi tersebut. Peristiwa efek Doppler jika laju sumber bunyi lebih besar dari laju bunyi maka akan terjadi gelombang kejut (shock wave).

A. PELAYANGAN BUNYI

Bunyi yang terdengar beralun kuat dan lemah, menunjukkan amplitudonya berubah-ubah. Perubahan amplitudo yang menyebabkan perubahan kuat dan lemah bunyi secara periodik disebut pelayangan / layangan bunyi. Terjadi pada dua gelombang bunyi yang perbedaan frekuensinya sangat kecil dan saling berinterferensi.

Jika dua gelombang bunyi yang frekuensinya hampir sama, maka interferensinya (superposisi) kedua gelombang akan menghasilkan gelombang lain yang amplitudonya maksimal dan minimal yang berurutan berubah terhadap waktu (periodik).

Secara matematis jumlah layangan tiap detik dinyatakan :

$$f_l = f_1 - f_2$$

f_l = frekuensi pelayangan (Hz)
 f_1 = frekuensi bunyi pertama (Hz)
 f_2 = frekuensi bunyi kedua (Hz)

Contoh Soal

Bila dua sumber bunyi masing – masing dengan frekuensi 2000 Hz dan 2008 Hz berbunyi dengan serentak, hitung frekuensi pelayangan bunyi !

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} f_l &= f_1 - f_2 \\ &= 2000 \text{ Hz} - 2008 \text{ Hz} \\ &= 8 \text{ Hz} \end{aligned}$$

UJI KOMPETENSI

- Pada suatu saat terjadi kilat, 10 sekon kemudian terdengar guntur oleh kita. Tentukan jarak tempat asal kilat dari kita (pengamat) jika cepat rambat bunyi di udara 320 m/s !
- Selang waktu pengiriman dan penerimaan pulsa ultrasonic yang terdeteksi oleh alat fathometer adalah 1,6 sekon. Tentukan kedalaman air di bawah kapal yang membawa alat tersebut, jika cepat rambat bunyi dalam air 520 m/s !.
- Hitung laju bunyi di udara pada suhu 27°C jika $\gamma = 1,11$ dan $M = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$!
- Frekuensi bunyi yang di dengar manusia berkisar antara 20 Hz sampai dengan 20.000 Hz. Jika laju bunyi di udara 340 m/s, hitung panjang gelombang bunyi terpanjang dan terpendeknya !
- Hitung laju bunyi di dalam air yang modulus Bulk air $2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ dan massa jenisnya 1 gr/cm^3 !
- Wati memukul pipa aluminium. Jika modulus Young pipa aluminium $27 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ dan massa jenisnya $3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, tentukan laju bunyi dalam pipa !
- Sumber bunyi bergerak dengan kecepatan 20 m/s menjauhi pendengar yang diam. Jika frekuensi sumber bunyi 720 Hz dan kecepatan perambatan bunyi di udara saa itu 340 m/s, tentukan frekuensi bunyi yang terdengar pendengar !
- Seseorang berdiri di tepi jalan. Dari kejauhan datang sebuah ambulance dengan kelajuan 72 km/jam mendekati orang tersebut, lalu melewati dan menjauhi orang tersebut. Jika frekuensi bunyi sirine yang dikeluarkan ambulance 2304 Hz dan kecepatan bunyi di udara 340 m/s, tentukan frekuensi bunyi sirine yang didengar orang tersebut pada saat :
 - ambulance mendekati orang
 - ambulance menjauhi orang
- Dua mobil A dan B bergerak berlawanan arah (saling mendekati) dengan kelajuan 36 km/jam dan 72 km/jam. Pada saat bersamaan, kedua mobil membunyikan klakson dengan frekuensi sama 1056 Hz. Jika kecepatan bunyi di udara 340 m/s, tentukan :
 - frekuensi bunyi klakson mobil A oleh sopir mobil B
 - frekuensi bunyi klakson mobil B oleh sopir mobil A

10. Sebuah kereta api membunyikan sirine dengan frekuensinya 600 Hz bergerak dengan kecepatan 20 m/s mendekati stasiun. Jika laju bunyi di udara 340 m/s, tentukan frekuensi bunyi sirine yang terdengar oleh seseorang yang duduk di stasiun, jika :
 - a. tidak ada angin
 - b. ada angin dengan laju 10 m/s searah kereta api
 - c. ada angin dengan laju 10 m/s berlawanan kereta api
11. Sebuah mobil Polisi bergerak 30 m/s sambil membunyikan sirine mengejar sepeda motor yang melaju dengan kecepatan 20 m/s. Pengendara sepeda motor mendengar bunyi sirine mobil polisi dengan frekuensi 640 Hz. Jika laju bunyi di udara 340 m/s, tentukan frekuensi bunyi sirine mobil polisi !
12. Sebuah garputala dengan frekuensi 440 Hz dimainkan secara bersamaan dengan garputala lain yang frekuensinya 437 Hz. Berapa layangan yang terjadi dalam selang waktu 10 sekon ?

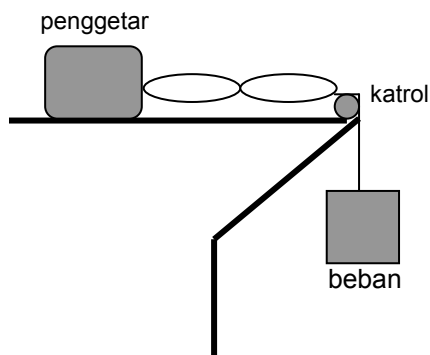
E. RESONANSI SUMBER BUNYI

Resonansi merupakan peristiwa ikut bergetarnya suatu benda yang disebabkan oleh benda lain yang bergetar. Setiap benda mempunyai frekuensi alamiah. Jika benda lain yang berada di sekitar benda tersebut bergetar dengan frekuensi getaran yang sama dengan frekuensi alamiah benda, maka akan terjadi resonansi. Sebuah gelas yang berada dekat dengan pengeras suara, maka pada frekuensi tertentu gelas dapat bergetar, karena frekuensi getaran pengeras suara beresonansi dengan frekuensi alamiah gelas, sehingga terjadi resonansi.

Sumber bunyi adalah sesuatu benda yang dapat menghasilkan bunyi. Beberapa sumber bunyi yang kita pelajari adalah sebagai berikut :

1. Resonansi Pada Dawai

Getaran pada dawai gitar atau biola merupakan gelombang stasioner ujung terikat. Cepat rambat gelombang pada dawai dapat dihitung dengan menggunakan sonometer (percobaan Melde) sebagai berikut :



Besarnya cepat rambat gelombang pada dawai adalah :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F \cdot l}{m_t}} = \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot A}}$$

v = cepat rambat gelombang (m/s)

F = gaya tegang tali / berat beban (N)

μ = massa per satuan panjang tali (kg/m) nilainya tidak berubah bila panjangnya diubah

$$\left(\mu = \frac{m_t}{l} \right)$$

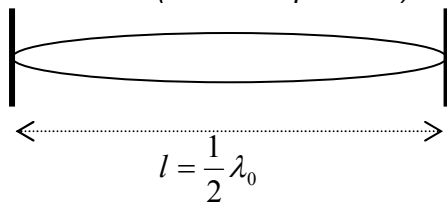
l = panjang tali (m)

ρ = massa jenis tali (kg/m³)

A = luas penampang tali (m²)

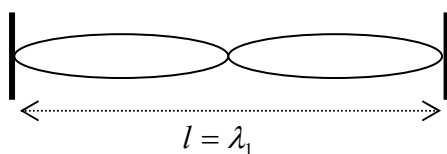
Dawai yang dipetik, akan menghasilkan nada dengan berbagai frekuensi resonansi, sebagai berikut :

a. nada dasar (harmonik pertama)



$$\text{Sehingga : } f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{2 \cdot l}$$

b. nada atas pertama (harmonik kedua)



$$\text{Sehingga : } f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{l}$$

c. nada atas kedua (harmonik ke tiga)

Coba gambar sendiri, terjadi 3 buah perut, 4 simpul dengan, dengan $l = \frac{3}{2} \lambda_2$ atau $\lambda_2 = \frac{2}{3} l$.

$$\text{Sehingga : } f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot v}{2 \cdot l}$$

Kesimpulan :

a. Frekuensi nada dasar dan nada-nada atas dawai berbanding sebagai bilangan bulat

$$f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots$$

b. Besarnya frekuensi yang dihasilkan dawai memenuhi *Hukum Marsene* berikut :

$$f_n = (n+1) \cdot f_0 = \frac{(n+1) \cdot v}{2 \cdot l} = \frac{(n+1)}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$l = (n+1) \cdot \frac{1}{2} \lambda_n$$

- f_n = frekuensi nada ke-n (Hz)
- f_0 = frekuensi nada dasar (Hz)
- l = panjang dawai (m)
- λ_n = panjang gelombang nada ke-n
- $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
- $n = 0$ untuk nada dasar
- $n = 1$ untuk nada atas pertama
- $n = 2$ untuk nada atas kedua, dst.

c. Hubungan jumlah perut dan simpul adalah :

$$\Sigma p = n + 1$$

$$\Sigma s = n + 2$$

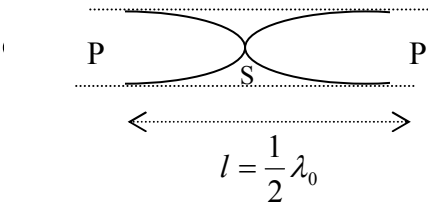
$$\Sigma s = \Sigma p + 1$$

Σp = jumlah perut
 Σs = jumlah simpul

2. Resonansi Pada Pipa Organa Terbuka

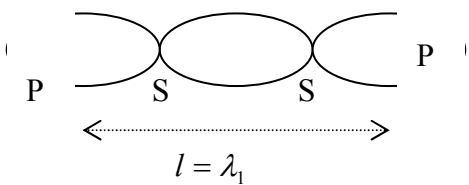
Pipa organa adalah alat yang menggunakan kolom udara sebagai sumber getar, seperti suling dan terompet. Pipa organa terbuka merupakan alat tiup berupa tabung yang kedua penampangnya terbuka. Pola gelombang yang dihasilkan pipa organa terbuka adalah :

a. Nada Dasar

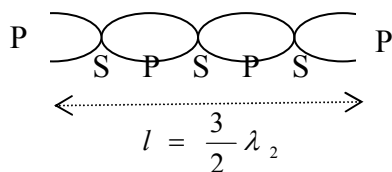


b. Nada Atas Pertama

Nada atas pertama terjadi 3 perut dan 2 simpul.



c. Nada Atas Kedua



Sama dengan resonansi pada dawai, maka :

a. Frekuensi nada dasar dan nada-nada atas dawai berbanding sebagai bilangan bulat dan memenuhi *hukum I Bernoulli* berikut :

$$f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots$$

b. Besarnya frekuensi yang dihasilkan dawai

$$f_n = (n + 1) \cdot f_0 = \frac{(n + 1) \cdot v}{2l}$$

$$l = (n + 1) \cdot \frac{1}{2} \lambda_n$$

f_n = frekuensi nada ke-n (Hz)
 f_0 = frekuensi nada dasar (Hz)
 l = panjang kolom udara (m)
 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
 $n = 0$ untuk nada dasar
 $n = 1$ untuk nada atas pertama
 $n = 2$ untuk nada atas kedua, dst.

c. Hubungan jumlah perut dan simpul adalah :

$$\Sigma p = n + 2$$

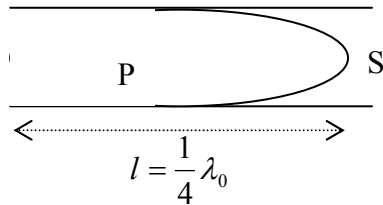
$$\Sigma s = n + 1$$

$$\Sigma p = \Sigma s + 1$$

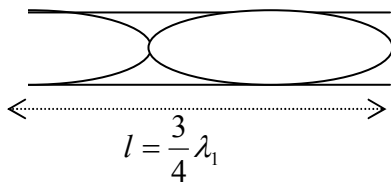
3. Resonansi Pada Pipa Organa Tertutup

Pipa organa tertutup merupakan alat tiup berupa tabung yang salah satu ujungnya terbuka dan ujung lain tertutup. Pola gelombang pada pipa organa tertutup adalah :

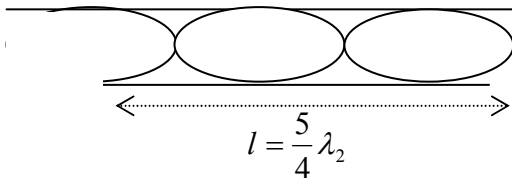
a. *Nada Dasar*



b. *Nada Atas Pertama*



c. *Nada Atas Kedua*



Dari pola gelombang tersebut disimpulkan bahwa :

a. Frekuensi nada dasar dan nada-nada atas dawai berbanding sebagai bilangan bulat dan memenuhi *hukum II Bernoulli* berikut :

$$f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots$$

b. Besarnya frekuensi yang dihasilkan dawai

$$f_n = (2n + 1) \cdot f_0 = \frac{(2n + 1) \cdot v}{4l}$$

$$l = (2n + 1) \cdot \frac{1}{4} \lambda_n$$

f_n = frekuensi nada ke-n (Hz)
 f_0 = frekuensi nada dasar (Hz)
 l = panjang kolom udara (m)
 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
 $n = 0$ untuk nada dasar
 $n = 1$ untuk nada atas pertama
 $n = 2$ untuk nada atas kedua, dst.

c. Jumlah perut dan simpul adalah sama.

$$\Sigma p = \Sigma s$$

F. ENERGI GELOMBANG BUNYI

Gelombang merupakan getaran yang merambat dalam suatu medium. Energi getaran merambat dari satu partikel ke partikel lain sepanjang medium, walaupun partikelnya sendiri tidak berpindah. Besarnya energi gelombang bunyi adalah :

$$E = \frac{1}{2} k \cdot A^2 = \frac{1}{2} m \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

E = energi (Joule)

k = $m \cdot \omega^2$ = konstanta (N/m)

m = massa (kg)

ω = frekuensi sudut = kecepatan sudut (rad/s)

A = amplitudo gelombang (m)

INTENSITAS BUNYI

Besarnya energi gelombang yang dipindahkan per satuan luas per satuan waktu disebut **intensitas gelombang**. Besarnya intensitas gelombang bunyi adalah :

$$I = \frac{E}{At} = \frac{P}{A}$$

I = intensitas bunyi ($\text{J/m}^2 \cdot \text{s} = \text{Watt/m}^2$)

t = waktu (s)

P = daya bunyi (watt)

A = $4\pi \cdot r^2$ = luas penampang medium (m^2)

r = jarak (m)

TARAF INTENSITAS BUNYI

Yaitu logaritma perbandingan antara intensitas bunyi dengan intensitas ambang penghearan manusia. Intensitas bunyi terendah yang masih dapat didengar oleh telinga manusia disebut intensitas ambang pendengaran (I_0) yang besarnya 10^{-12} W/m^2 . Intensitas bunyi tertinggi yang masih dapat didengar manusia tanpa rasa sakit disebut intensitas ambang perasaan yang besarnya 1 W/m^2 .

Besarnya taraf intensitas bunyi adalah :

$$TI = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

TI = taraf intensitas bunyi (desi Bell = dB)

I = intensitas bunyi (W/m^2)

I_0 = Intensitas ambang (10^{-12} W/m^2)

Jika terdapat *n buah sumber* bunyi identik yang taraf intensitasnya TI, maka taraf intensitas total dari n buah sumber bunyi tersebut adalah :

$$TI_{tot} = TI_1 + 10 \cdot \log n$$

TI_{tot} = taraf intensitas total (dB)

TI_1 = taraf intensitas sebuah sumber bunyi (dB)

n = jumlah sumber bunyi

Hubungan taraf intensitas suatu sumber bunyi pada jarak r_1 dan r_2 adalah :

$$TI_2 = TI_1 - 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1}$$

TI_2 = taraf intensitas bunyi pada jarak r_2

TI_1 = taraf intensitas bunyi pada jarak r_1

r_1 dan r_2 = jarak pendengaran (m)

Contoh Soal

Frekuensi nada dasar suatu pipa organa terbuka adalah 260 Hz. Lalu pipa ditiup dan terdengar nada atas pertama. Sebuah senar memberikan frekuensi 400 Hz bila panjangnya 50 cm. Senar ini dipendekkan menjadi 38 cm dan digetarkan pada tegangan yang sama. Tentukan frekuensi layangan antara senar dan pipa !

Penyelesaian :

- Pipa organa terbuka

$$f_n = (n+1) \cdot f_0 = (1+1) \cdot 260 = 520 \text{ Hz}$$

$$\text{Jadi } f_{\text{pipa}} = 520 \text{ Hz}$$

- Senar

$$f_n = (n+1) \cdot \frac{v}{2l} \quad \text{Jadi : } \frac{f_2}{f_1} = \frac{l_1}{l_2} \text{ atau } f_2 = \frac{f_1 \cdot l_1}{l_2} = \frac{50 \cdot 400}{38} = 526 \text{ Hz}$$

- Frekuensi layangan kedua sumber bunyi :
 $f_l = f_{\text{senar}} - f_{\text{pipa}} = 526 - 520 = 6 \text{ Hz}$.



1. Pada suatu percobaan dengan sonometer terjadi resonansi nada dasar senar dengan frekuensi 440 Hz. Jika panjang senar 20 cm dan gaya tegang senar 20 N, tentukan :
 - a. kecepatan rambat gelombang
 - b. panjang senar agar terjadi resonansi berfrekuensi 330 Hz dengan gaya tegang senar tetap
2. Sepotong dawai panjangnya 80 cm dan massanya 16 gram/cm dijepit kedua ujungnya dan terentang tegang dengan tegangan 800 N. Tentukan frekuensi nada atas pertama yang dihasilkan !
3. Seutas dawai menghasilkan nada dasar 45 Hz, lalu dawai diperpendek 6 cm tanpa mengubah tegangan dihasilkan frekuensi 55 Hz. Jika dawai diperpendek lagi lagi 3 cm, tentukan frekuensi terakhir yang dihasilkan !
4. Sebuah pipa organa terbuka panjangnya 60 cm menghasilkan bunyi dengan pola gelombang yang memiliki 3 simpul. Nada pipa organa tersebut beresonansi dengan pipa organa tertutup lain yang membentuk 3 simpul. Tentukan panjang pipa organa tertutup tersebut!
5. Sebuah pipa organa tertutup panjangnya 72 cm, cepat rambat bunyi 288 m/s. Tentukan frekuensi nada dasar, nada atas pertama dan nada atas kedua !
6. Tentukan panjang pipa organa terbuka yang dapat beresonansi dengan garputala yang bergetar dengan frekuensi 170 Hz, jika kecepatan bunyi di udara 340 m/s !
7. Frekuensi nada atas pertama pipa organa terbuka 500 Hz. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, tentukan : frekuensi nada dasar dan nada atas kedua yang dihasilkan pipa !
8. Sebuah tabung tertutup pada salah satu ujungnya ditiup menghasilkan nada dasar berfrekuensi 512 Hz. Jika ujung tertutup dibuka, tentukan frekuensi nada dasarnya ?
9. Hitung taraf intensitas bunyi yang intensitasnya 10^{-2} W/m^2 !
10. Berapa perbandingan intensitas dari dua sumber bunyi jika taraf intensitasnya berbeda 8 dB !
11. Jarak A ke sumber gempa dua kali jarak B ke sumber gempa. Jika intensitas gempa di B sama dengan 8000 W/m^2 , berapa besar intensitas gempa di titik A ?
12. Taraf intensitas bunyi yang dihasilkan oleh sebuah mesin jahit adalah 40 dB. Berapa taraf intensitas yang dihasilkan oleh 10 buah mesin jahit identik yang bekerja bersamaan ?
13. Sebuah sirine menghasilkan bunyi dengan taraf intensitas 40 dB. Jika beberapa jenis sirine sejenis dibunyikan bersama menghasilkan bunyi yang taraf intensitasnya 60 dB. Berapa banyak sirine tersebut ?
14. Taraf intensitas bunyi yang diterima pada jarak 3,5 m adalah 110 dB. Berapa dB taraf intensitas bunyi tersebut pada jarak 3500 m ?

Evaluasi Mandiri

1. Gelombang bunyi dengan frekuensi 256 Hz merambat di udara dengan kecepatan 330 m/s. Kecepatan rambat bunyi di udara dengan frekuensi 512 Hz di udara adalah ... Hz.
 - a. 22,5
 - b. 165
 - c. 330
 - d. 660
 - e. 1.320
2. Pada ketinggian tertentu terjadi petir. Bunyi gunturnya terdengar 1,5 s setelah kilatan cahaya. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s dan kecepatan cahaya di udara $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, maka jarak sumber petir ke pengamat adalah ... m
 - a. 267
 - b. 510
 - c. 1.240
 - d. $1,5 \cdot 10^8$
 - e. $4,5 \cdot 10^8$

3. Sebuah sumber bunyi frekuensinya 1024 Hz bergerak mendekati seorang pengamat dengan kecepatan 34 m/s. Cepat rambat bunyi di udara 340 m/s. Jika pengamat menjauhi sumber bunyi dengan kecepatan 17 m/s, maka frekuensi bunyi yang didengar pengamat adalah ... Hz
 - a. 170
 - b. 340
 - c. 460
 - d. 680
 - e. 920

4. Seorang penerbang yang pesawatnya menuju menara bandara mendengar bunyi sirine menara dengan frekuensi 2000 Hz. Jika sirine memancarkan bunyi dengan frekuensi 1700 Hz, dan cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, maka kecepatan pesawat udara tersebut adalah ... m/s
 - a. 196
 - b. 200
 - c. 216
 - d. 220
 - e. 236

5. Fathometer mencatat selang waktu 2 s sejak pulsa ultrasonic dikirim hingga diterima kembali. Cepat rambat bunyi dalam air 1500 m/s. Kedalaman laut adalah ... m
 - a. 1.000
 - b. 1.250
 - c. 1.500
 - d. 2.000
 - e. 3.000

6. Sebuah dawai ditegangkan dengan beban tertentu dan digetarkan, sehingga terjadi getaran yang merambat dengan kecepatan v . Jika panjang tali dibuat 4 kali semula, maka kecepatan rambat gelombang menjadi ...
 - a. v
 - b. $2v$
 - c. $3v$
 - d. $4v$
 - e. $5v$

7. Jika tegangan seutas dawai gitar di perbesar 4 kali semula, maka frekuensi nadanya menjadi ...
 - a. 2 kali lebih besar
 - b. 2 kali lebih kecil
 - c. 4 kali lebih besar
 - d. 4 kali lebih kecil
 - e. 16 kali lebih kecil

8. Intensitas bunyi dapat ditingkatkan dengan cara memperbesar ...
 - a. frekuensi
 - b. amplitudo
 - c. periode
 - d. frekuensi dan amplitudo
 - e. periode dan amplitudo

9. Sepotong dawai menghasilkan nada dasar f . Jika dipendekkan 8 cm tanpa mengubah tegangan dihasilkan frekuensi $1,25 f$. Jika dawai dipendekkan 2 cm lagi, maka frekuensi yang dihasilkan adalah ...
 - a. $2f$
 - b. $1,5f$
 - c. $1,33f$
 - d. $1,25f$
 - e. f

10. Sepotong dawai panjangnya 80 cm dan massanya 16 gram dijepit kedua ujungnya dan terentang tegang dengan tegangan 800 N. Frekuensi nada atas kedua yang dihasilkan adalah ... Hz.
 - a. 125
 - b. 150
 - c. 250
 - d. 300
 - e. 375

11. Nada atas pertama pipa organa terbuka yang panjangnya 40 cm beresonansi dengan pipa organa tertutup. Jika pada saat terjadi resonansi jumlah simpul pada kedua pipa sama, maka panjang pipa organa tertutup adalah ...
- 20
 - 30
 - 40
 - 50
 - 60
12. Agar taraf intensitas bunyi berkurang 20 dB, maka jarak titik ke suatu sumber bunyi harus dijadikan.... kalinya
- 200
 - 100
 - 20
 - 10
 - 2
13. Pipa organa terbuka A dan pipa organa tertutup B mempunyai panjang sama. Perbandingan frekuensi nada atas pertama antara pipa A dan B adalah ...
- 1:1
 - 1:3
 - 2:1
 - 2:3
 - 3:1
14. Sebuah sumber gelombang bunyi dengan daya 50 W memancarkan gelombang ke sekelilingnya. Intensitas radiasi gelombang pada jarak 10 m adalah ... W/m^2
- 0,04
 - 400
 - 40
 - 4000
 - 200
15. Jarak A ke sumber bunyi adalah dua per tiga kali jarak B ke sumber bunyi. Jika intensitas bunyi di A adalah I , maka intensitas di B adalah ...
- $\frac{1}{3}I$
 - $\frac{4}{9}I$
 - $\frac{2}{3}I$
 - $\frac{3}{2}I$
 - $\frac{9}{4}I$
16. Pada jarak 3 m taraf intensitas bunyi terdengar 50 dB. Taraf intensitas bunyi pada jarak 30 m dari sumber ledakan adalah ... dB
- 5
 - 20
 - 30
 - 35
 - 45
17. Taraf intensitas sebuah mesin 50 dB. Jika 100 mesin dihidupkan bersama-sama, maka taraf intensitasnya menjadi ... dB
- 20
 - 50
 - 70
 - 75
 - 150

18. Taraf intensitas sebuah mesin 60 dB. Jika taraf intensitas beberapa mesin sejenis yang berbunyi serentak besarnya 80 dB, jumlah mesin tersebut adalah Buah
- 200
 - 140
 - 100
 - 20
 - 10
19. Dua pipa organa terbuka panjangnya 1 m dan 1,02 m menghasilkan 3,3 layangan per sekon. Ketika keduanya berbunyi pada nada dasarnya, cepat rambat bunyi di udara adalah ... m/s
- 330
 - 334
 - 337
 - 340
 - 345
20. Si X berdiri di samping sumber bunyi yang frekuensinya 676 Hz. Sdebuah sumber bunyi lain dengan frekuensi 676 Hz mendekati si X dengan kecepatan 2 m/s. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, maka si X akan mendengar layangan dengan frekuensi ... Hz
- 0
 - 2
 - 4
 - 6
 - 8

Bab 8



OPTIK FISIK

Kompetensi Dasar

- Melakukan kajian ilmiah untuk mengenali gejala dan ciri-ciri gelombang elektromagnetik dan penerapannya.

Indikator

- Menjelaskan aplikasi efek Doppler seperti pada radar
- Memformulasikan peristiwa interferensi cahaya pada celah ganda
- Mengukur panjang gelombang masing-masing komponen cahaya Natrium dengan menggunakan difraksi cahaya oleh kisi difraksi
- Menjelaskan peristiwa fisika yang dapat menyebabkan peristiwa polarisasi cahaya

PENDALAMAN MATERI

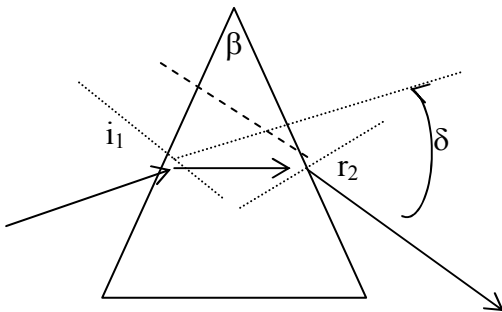
A. PERSAMAAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

B. DISPERSI CAHAYA

Dispersi adalah peristiwa terurainya cahaya putih yang melewati sebuah prisma menjadi spectrum warna (Mejikuhibiu). Dispersi terjadi akibat perbedaan indeks bias masing-masing warna.

Sudut Deviasi

Jika cahaya merambat melalui prisma akan mengalami dua kali pembiasan, yaitu saat masuk dan saat keluar dari prisma.



Sinar datang pada prisma dengan sudut datang i_1 dan dibiaskan oleh permukaan pertama prisma dengan sudut bias r_1 . Sinar bias ini akan diteruskan menuju permukaan kedua prisma dengan sudut datang i_2 dan dibiaskan oleh permukaan kedua prisma dengan sudut bias r_2 . Jika sudut puncak (sudut pembias) prisma β , maka :

$$\beta = r_1 + i_2$$

Jika sinar datang dengan sinar yang keluar prisma diperpanjang, maka kedua sinar akan membentuk sudut deviasi. Besarnya sudut deviasi pada prisma adalah :

$$\delta = i_1 + r_2 - \beta$$

Deviasi minimum terjadi jika sudut i_1 sama dengan sudut r_2 , sehingga besarnya sudut deviasi minimum adalah :

$$\delta_{\min} = 2i_1 - \beta = 2r_2 - \beta$$

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

$$i_1 = \frac{1}{2}(\beta + \delta_{\min})$$

Jika indeks bias prisma = n_p dan indeks bias medium = n_m , maka sesuai hukum Snellius diperoleh :

$$n_m \cdot \sin i_1 = n_p \cdot \sin r_1$$

atau

$$n_p \cdot \sin i_2 = n_m \cdot \sin r_2$$

atau

$$n_m \cdot \sin \frac{1}{2}(\beta + \delta_{\min}) = n_p \cdot \sin \frac{1}{2}\beta$$

Jika sudut pembias prisma β sangat kecil ($\beta < 15^\circ$), maka deviasi minimum dapat dihitung dengan ::

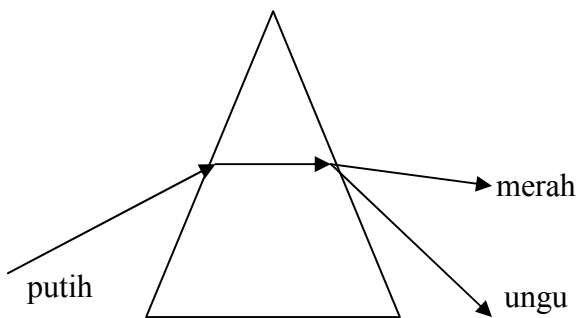
$$\delta_{\min} = \left(\frac{n_p}{n_m} - 1 \right) \cdot \beta$$

β = sudut pembias prisma
 n_p = indeks bias prisma
 i = sudut datang cahaya
 r = sudut bias

δ_{\min} = sudut deviasi minimum
 n_m = indeks bias medium tempat prisma
 δ = sudut deviasi

Sudut Dispersi

Cahaya putih yang dilewatkan prisma akan diuraikan menjadi spectrum warna, yaitu warna merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila dan ungu, sehingga cahaya putih disebut dengan cahaya *polikromatik*, karena merupakan gabungan dari berbagai warna. Sedangkan cahaya yang terdiri dari hanya satu warna disebut cahaya *monokromatik*.



Warna ungu akan memiliki sudut deviasi (penyimpangan) yang lebih besar dari warna merah. Selisih antara sudut deviasi warna ungu dan merah merupakan **sudut dispersi** cahaya.

$$D = \delta_u - \delta_m = (n_u - n_m) \beta$$

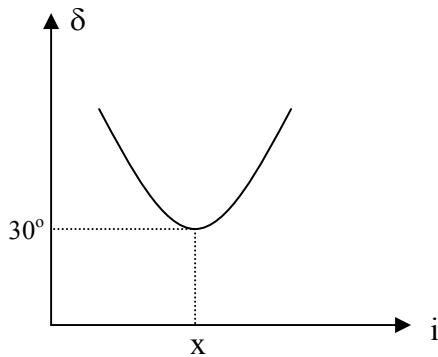
D = sudut dispersi
 δ_u = sudut deviasi warna ungu
 δ_m = sudut deviasi warna merah
 n_u = indeks bias warna ungu
 n_m = indeks bias warna merah.

Dari urutan spectrum warna, maka diperoleh sifat jika *sudut deviasi semakin besar, maka indeks bias warna semakin besar, frekuensi semakin besar, panjang gelombangnya semakin kecil, energinya semakin besar.*

Uji Kompetensi

- Seberkas sinar dengan sudut datang 45° melewati suatu prisma sama sisi yang berada di udara ($n = 1$) dan terjadi deviasi minimum. Tentukan :
 - sudut deviasi minimum
 - indeks bias prisma
- Prisma yang sudut pembiasnya 60° dan indeks biasnya 1,5 terletak di udara ($n=1$). Hitung sudut deviasi minimum prisma !
- Sebuah prisma indeks biasnya $\sqrt{3}$ sudut puncaknya 60° terletak di udara. Cahaya kuning datang pada prisma dengan sudut 60° . Tentukan sudut deviasi prisma !
- Sebuah sinar jatuh pada sisi AB sebuah prisma segitiga sama sisi ABC yang indeks biasnya $\sqrt{2}$, masuk ke dalam prisma lalu menumbuk sisi AC. Tentukan sudut deviasi minimum prisma !
- Dalam suatu percobaan digunakan prisma yang sudut puncaknya 10° . Sinar dijatuhkan pada sisi prisma. Sinar datang diatur sedemikian rupa sehingga sudut datang sinar sama dengan sudut bias keluar prisma. Ternyata sudut desviasi saat itu diukur 6° . Tentukan besarnya indeks bias prisma yang digunakan !

6. Diketahui grafik berikut :



Jika grafik tersebut hasil dari percobaan dengan prisma yang sudut puncaknya 50° , tentukan nilai dari x ?

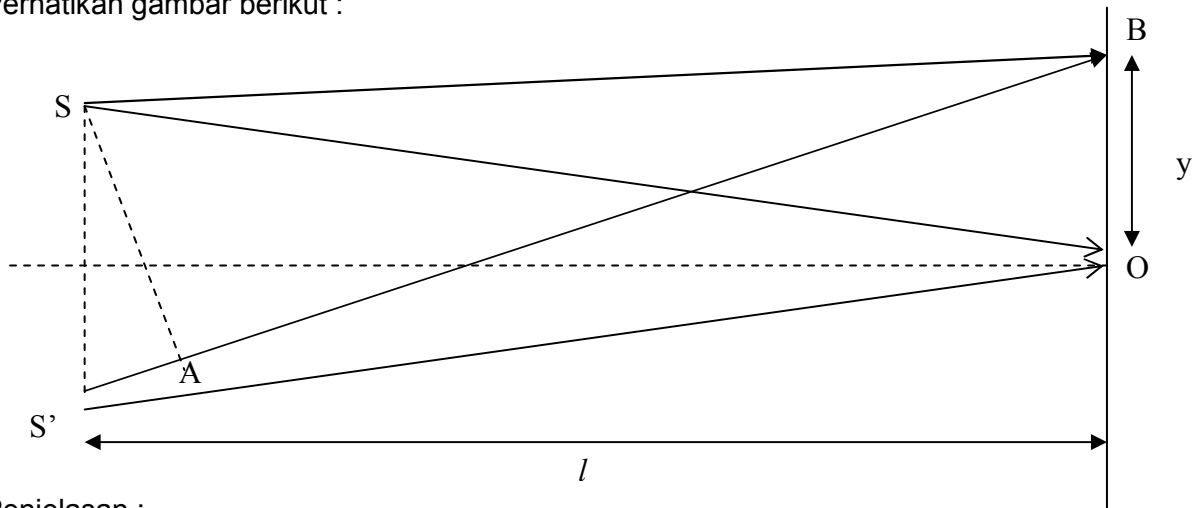
7. Berapa sudut dispersi yang terjadi antara garis spectrum merah dan ungu prisma kaca kerona yang memiliki sudut pembias 15° , jika indeks bias cahaya merah dan ungu masing-masing 1,52 dan 1,54.

INTERFERENSI CAHAYA

Interferensi cahaya adalah perpaduan dua gelombang cahaya. Jika dua cahaya bersifat koheren artinya memiliki frekuensi dan amplitudo sama serta beda fase tetap, maka hasil interferensinya berupa pola terang (interferensi maksimum) dan pola gelap (interferensi minimum).

Interferensi Celah Ganda

Interferensi celah ganda dianalisis dengan menggunakan percobaan Young. Cahaya yang berasal dari sumber cahaya dilewatkan dua celah, sehingga kedua celah berinterferensi menghasilkan garis-garis terang dan gelap saling bergantian pada layar. Interferensi terjadi jika beda lintasan ($d \cdot \sin \theta$) antara cahaya yang melalui kedua celah berbeda sebesar kelipatan bulat dari λ atau $\frac{1}{2} \lambda$. Perhatikan gambar berikut :



Penjelasan :

SS' adalah d , $SB = AB$, sehingga $S'A$ adalah beda lintasan ketika dua sinar tidak menuju ke titik O karena mengalami difraksi pada celah. Nilai $S'A$ ini digolongkan menjadi dua macam yaitu yang dapat menyebabkan interferensi maksimum dan minimum. Sudut θ sangat kecil sehingga secara matematis nilai sinusnya dapat dianggap mendekati dengan nilai tangennya. Oleh karenanya $\sin \theta$ dianggap senilai dengan y/l dan $S'A$ adalah senilai $d \cdot \sin \theta$. Titik B sebagai titik interferensi juga terjadi di seberang titik O , sehingga garis putus-putus mendatar sebagai simetrinya.

- **Interferensi maksimum (konstruktif)** terjadi terang jika kedua cahaya memiliki fase sama atau beda sudut fasenya $0, 2\pi, 4\pi, 6\pi$ rad, yaitu ketika beda lintasannya nol atau kelipatan dari panjang gelombang. Jadi interferensi maksimum terjadi jika :

$$\Delta\theta = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots = 2k\pi \text{ rad}$$

atau

$$\Delta s = (2k) \cdot \frac{1}{2} \lambda$$

sehingga :

$$d \cdot \sin \theta = (2k) \cdot \frac{1}{2} \lambda \text{ atau } \frac{d \cdot y}{l} = (2k) \cdot \frac{1}{2} \lambda$$

$$k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

- $\Delta\theta$ = beda sudut fase (rad)
- Δs = beda lintasan (m)
- λ = panjang gelombang cahaya (m)
- d = jarak antar celah (m)
- θ = sudut simpangan (deviasi)
- y = jarak terang ke- k dengan terang pusat (OB)
- l = jarak antara celah dengan layar (m)
- $k = 0$ untuk terang pusat
- $k = 1$ untuk terang orde ke-1
- $k = 2$ untuk terang orde ke-2, dst.

- **Interferensi minimum (destruktif)** menghasilkan pola / pita gelap dan akan terjadi jika kedua gelombang berlawanan fase atau berbeda sudut fase sebesar $\pi, 3\pi, 5\pi$ rad, ..., yaitu ketika beda lintasannya sama dengan bilangan ganjil kali setengah panjang gelombang. Jadi interferensi minimum terjadi jika :

$$\Delta\theta = 0,3\pi,5\pi,7\pi,\dots = (2k-1)\pi \text{ rad}$$

atau

$$\Delta s = (2k-1) \cdot \frac{1}{2} \lambda$$

sehingga :

$$d \cdot \sin \theta = (2k-1) \cdot \frac{1}{2} \lambda \text{ atau}$$

$$\frac{d \cdot y}{l} = (2k-1) \cdot \frac{1}{2} \lambda$$

$$k = 1,2,3,4,\dots$$

y = jarak gelap ke-k dengan terang pusat
 k = 1 untuk gelap ke-1
 k = 2 gelap ke-2, dst.

Jarak antara dua garis terang maupun dua garis gelap yang berurutan (berdekatan) adalah sama, yaitu dengan n = 1, dan dihitung dengan persamaan :

$$\frac{d \cdot \Delta y}{l} = \lambda$$

Δy = jarak antara dua terang berdekatan atau jarak antara dua gelap berdekatan.

Jadi jarak antara pita gelap dengan pita terang berdekatan adalah $\frac{1}{2} \lambda$.

Interferensi Lapisan Tipis (Mandiri)

Interferensi pada lapisan tipis terjadi pada embun atau gelembung air sabun yang terkena sinar matahari, atau lapisan tipis minyak tanah yang tumpah di atas air sehingga memancarkan warna-warna cahaya tertentu.

- Interferensi maksimum (terang) terjadi jika:

$$2 \cdot n \cdot d \cdot \cos r = (k - \frac{1}{2}) \lambda$$

$$k = 1,2,3,4,\dots$$

- Interferensi minimum (gelap) terjadi jika :

$$2 \cdot n \cdot d \cdot \cos r = k \cdot \lambda$$

$$k = 1,2,3,4,\dots$$

n = indeks bias lapisan
 d = tebal lapisan selaput (m)
 r = sudut bias cahaya pada lapisan
 k = orde terang atau gelap
 λ = panjang gelombang cahaya

Interferensi pada Cincin Newton

Cincin Newton merupakan pola interferensi berupa lingkaran gelap dan terang secara berurutan. Cahaya datang tegak lurus pada system optik yang terdiri dari lensa plan konveks yang diletakkan diatas kaca planparalel.

- Interferensi maksimum terjadi jika :

$$r_t^2 = (k - \frac{1}{2}) \lambda \cdot R$$

$$k = 1,2,3,\dots$$

- Interferensi minimum terjadi jika :

$$r_g^2 = k \cdot \lambda \cdot R$$

$$k = 0,1,2,3,\dots$$

r_t = jari-jari lingkaran terang ke-k
 r_g = jari-jari lingkaran gelap ke-k
 R = jari-jari lensa plankonveks

D. DIFRAKSI CAHAYA

Difraksi cahaya adalah peristiwa pelenturan cahaya ketika melewati suatu celah sempit sehingga gelombang cahaya tampak melebar pada tepi celah.

Difraksi pada Celah Tunggal

Cahaya dilewatkan pada sebuah celah sehingga pada layar terjadi pola difraksi berupa garis-garis terang dan gelap.

- Difraksi maksimum (terang) terjadi jika:

$$d \cdot \sin \theta = \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$$
$$k = 1, 2, 3, \dots$$

- Difraksi minimum (gelap) terjadi jika:

$$d \cdot \sin \theta = k \lambda$$
$$k = 1, 2, 3, \dots$$

Difraksi Pada Celah banyak (kisi)

Kisi merupakan peralatan yang memiliki banyak celah.

Pola difraksi pada kisi sama dengan pola interferensi pada celah ganda, yaitu :

- Pola difraksi maksimum, terjadi jika :

$$d \cdot \sin \theta = k \lambda$$
$$k = 1, 2, 3, \dots$$

- Pola difraksi minimum, terjadi jika :

$$d \cdot \sin \theta = \left(k - \frac{1}{2}\right) \lambda$$
$$k = 1, 2, 3, \dots$$

d = tetapan kisi / jarak antar celah kisi

$$d = \frac{1}{N}$$

N = banyak celah per satuan panjang

Pengaruh Difraksi Pada Perbesaran Optik (Mandiri)

Alat optik memiliki diafragma (bukaan cahaya) berupa lingkaran sempit yang mengurangi kemampuan pemisahan bayangan dari alat optik. Semakin besar diafragma, semakin besar daya urai alat optik.

Daya urai atau batas resolusi alat optik adalah kemampuan alat optik untuk menghasilkan bayangan yang terpisah dari dua benda yang berdekatan. Besarnya daya urai alat optik adalah :

$$d_m = \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot L}{D}$$

d_m = daya urai alat optik (m)

L = jarak benda dengan alat optik (m)

D = diameter bukaan alat optik (m)

Kriteria Rayleigh menyatakan bahwa dua benda titik dapat dipisahkan oleh alat optik jika pusat pola difraksi benda titik pertama berimpit dengan pita gelap ke-1 pola difraksi benda kedua. Besarnya sudut pemisahan atau sudut resolusi minimum yang memenuhi kriteria Raleigh adalah :

$$\theta_m = \frac{d_m}{L} = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D}$$

θ_m = sudut resolusi minimum (rad)

E. POLARISASI CAHAYA (PENGAYAAN)

Polarisasi adalah peristiwa terserapnya sebagian arah getar gelombang sehingga hanya tinggal memiliki satu arah getar saja. Peristiwa interferensi dan difraksi dapat dialami oleh gelombang transversal maupun gelombang longitudinal, tetapi polarisasi hanya dialami gelombang transversal seperti cahaya. Jika suatu gelombang hanya memiliki satu arah getar, maka disebut gelombang terpolarisasi. Cahaya dapat terpolarisasi karena peristiwa pemantulan, pembiasan dan pemantulan, bias kembar, absorpsi selektif dan hamburan.

Polarisasi Karena Pemantulan

Sinar yang datang pada cermin datar dengan sudut i akan menghasilkan sinar pantul yang terpolarisasi dengan sudut pantul r . Besarnya $i = r$. (ingat peristiwa pemantulan bab 1).

Polarisasi Karena Pembiasan dan Pemantulan

Cahaya datang dengan sudut datang i dari medium yang indeks biasnya n_1 menuju medium yang indeks bias n_2 , maka sebagian cahaya akan dipantulkan dan sebagian lagi dibiaskan. Jika antara cahaya pantul dan cahaya bias saling tegak lurus, maka dikatakan cahaya pantul terpolarisasi sempurna. Sudut datang seperti ini disebut dengan sudut polarisasi i_p atau sudut Brewster. Besarnya sudut polarisasi dihitung dengan formulasi :

$$\tan i_p = \frac{n_2}{n_1}$$

i_p = sudut polarisasi
 n_1 = indeks bias medium 1
 n_2 = indeks bias medium 2

Polarisasi Karena Bias Kembar (Ganda)

Pembiasan ganda dialami cahaya jika cahaya masuk ke medium yang memiliki dua indeks bias, seperti kalsit dan kuarsa, sehingga sinar bias pun menjadi dua, yaitu sinar biasa tak terpolarisasi dan sinar istimewa terpolarisasi.

Polarisasi Karena Absorpsi Selektif

Polarisasi dengan penyerapan selektif diperoleh dengan memasang dua buah Polaroid, yaitu polarisator dan analisator. Polarisor berfungsi untuk menghasilkan cahaya terpolarisasi linier dari cahaya tak terpolarisasi. Cahaya yang dilewatkan oleh polarisator adalah cahaya terpolarisasi vertical, sedangkan cahaya terpolarisasi horizontal akan diserap polarisor. Intensitas sinar terpolarisasi dari polarisator sama dengan setengah dari sinar tak terpolarisasi.

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

I_1 = intensitas cahaya terpolarisasi atau –
Intesitas cahaya keluar polarisator
 I_0 = intensitas cahaya mula-mula atau
Intensitas cahaya masuk polarisor.

Cahaya terpolarisasi dari polarisator diteruskan masuk ke analisator. Analisator berfungsi untuk menganalisis sinar yang dilewatkan polarisator. Analisator mengubah arah polarisasi dan mengatur besar intensitas cahaya yang akan diteruskan ke pengamat. Analisator memutar arah polarisasi dengan sudut θ melawan putaran jarum jam. Menurut Hukum Malus cahaya yang keluar dari analisator adalah I_2 yang besarnya :

$$I_2 = I_1 \cdot \cos^2 \theta = \frac{1}{2} I_0 \cdot \cos^2 \theta$$

I_2 = intesitas cahaya keluar dari analisator.
 θ = sudut antara sumbu analisator dengan
sumbu polarisor.

Pemutaran Bidang Polarisasi

Jika gelombang cahaya terpolarisasi melewati zat optik aktif misalnya larutan gula pasir, maka arah polarisasi dapat berputar. Besarnya sudut perubahan arah polarisasi cahaya θ sebesar :

$$\theta = c \cdot \alpha \cdot l$$

θ = sudut perubahan arah polarisasi ($^\circ$)
 c = konsentrasi larutan (%)
 α = sudut putar larutan ($^\circ/m$)
 l = panjang larutan (m)

F. EFEK DOPPLER PADA GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK (Pengayaan)

Gelombang elektromagnetik (cahaya) tidak perlu medium untuk merambat. Efek Doppler pada gelombang elektromagnetik dinyatakan dengan persamaan :

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \pm \frac{v}{c}}}$$

Jika sumber, pengamat dan gelombang elektromagnetik dalam satu garis lurus dan $v \ll c$, maka :

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \right)$$

f = frekuensi cahaya menurut pengamat

f_0 = frekuensi sumber cahaya (Hz)

v = kecepatan relatif antara sumber dan pengamat

c = kecepatan cahaya

Uji Kompetensi

- Pada percobaan Young digunakan dua celah yang jarak kedua celahnya 1,5 mm. Pada jarak 2 m dari celah dipasang layar. Jika sebuah cahaya yang panjang gelombangnya 600 nm dilewatkan celah, tentukan :
 - Jarak terang pertama dengan terang pusat
 - Jarak gelap ke-4 dengan terang pusat
 - Jarak terang pertama dan terang pertama yang berseberangan
 - Jarak terang pertama dengan gelap keempat
- Dua celah dengan jarak 0,2 mm disinari tegak lurus. Garis terang ke-3 terletak 7,5 mm dari garis terang pusat pada layar yang berjarak 1 m dari celah. Hitung berapa angstrom panjang gelombang sinar yang dipakai !
- Seberkas cahaya monokromatis melalui sepasang celah sempit yang berjarak 0,3 mm membentuk pola interferensi pada layar yang berjarak 0,9 m dari celah. Bila jarak dua garis gelap yang berdekatan 3 mm, berapa panjang gelombang cahaya yang digunakan ?
- Dalam percobaan Young jarak pisah sepasang celah 0,5 mm. Celah disinari dengan cahaya yang panjang gelombangnya 0,59 μm . Berapa radian sudut pisah yang dibentuk oleh dua garis gelap berdekatan ?
- Selaput tipis air sabun berindeks bias 1,33 disinari dalam arah tegak lurus dengan cahaya natrium yang panjang gelombangnya 589,3 nm. Tentukan :
 - ketebalan minimum selaput air sabun yang tampak terang
 - ketebalan minimum selaput air sabun yang tampak gelap.
- Pada percobaan interferensi cincin Newton digunakan cahaya dengan panjang gelombang 5700 $^{\circ}$. Hasil pengamatan menunjukkan jari-jari lingkaran gelap ke-10 adalah 6 mm. Hitung jari-jari kelengkungan lensa !
- Berkas cahaya dengan panjang gelombang 8000 A° datang pada celah tunggal selebar 0,2 mm. Jika pola difraksi ditangkap pada layar yang jaraknya 50 cm dari celah, tentukan :
 - jarak antara garis gelap ketiga dengan terang pusat
 - Jarak garis terang kedua dengan terang pusat.
- Cahaya monokromatik dijatuhkan pada celah tunggal yang lebarnya 0,8 mm. Jarak gelap ke-1 dengan pusat terang sama dengan 1,8 mm terlihat pada layar yang dipasang pada jarak 3 m dari celah. Hitung berapa meter panjang gelombang cahaya yang dijatuhkan pada celah tersebut !
- Seberkas cahaya jatuh tegak lurus pada kisi yang terdiri dari 5000 celah tiap cm. Sudut bias orde ke-2 adalah 30 $^{\circ}$. Tentukan panjang gelombang cahaya yang digunakan !
- Seberkas cahaya dengan panjang gelombang 5000 A° datang tegak lurus kisi. Jika spectrum orde kedua membentuk sudut 30 $^{\circ}$ dengan garis normal pada kisi, tentukan :
 - tetapan kisi
 - jumlah celah tiap cm kisi

Evaluasi Mandiri

- Urutan gelombang elektromagnetik dari frekuensi besar ke frekuensi kecil adalah ...
 - sinar X, sinar UV, sinar inframerah, cahaya
 - cahaya, sinar inframerah, sinar UV, sinar X
 - sinar inframerah, cahaya, sinar UV, sinar X
 - sinar X, sinar UV, cahaya, sinar inframerah
 - sinar X, sinar inframerah, cahaya, sinar UV

2. Kuat medan magnetic gelombang elektromagnetik adalah $6 \cdot 10^{-8}$ T. Kuat medan listriknya adalah ...
N/C
 - a. 0,5
 - b. 3
 - c. 9
 - d. 18
 - e. 21
3. Seberkas cahaya jatuh pada sisi prisma dengan sudut datang 35° menghasilkan sudut deviasi minimum 35° . Sudut puncak prisma adalah ... $^\circ$
 - a. 60
 - b. 35
 - c. 15
 - d. 10
 - e. 5
4. Jika sinar putih melewati prisma, maka deviasi sinar ungu lebih besar dari sinar merah. Hal ini disebabkan ...
 - a. indeks bias ungu lebih kecil daripada indeks bias biru
 - b. indeks bias ungu sama besar daripada indeks bias biru
 - c. kecepatan cahaya ungu lebih besar daripada cahaya biru
 - d. frekuensi ungu lebih kecil daripada biru
 - e. indeks bias ungu lebih besar daripada indeks bias biru
5. Pada percobaan Young jika jarak kedua celah dijadikan dua kali semula, maka jarak antara dua garis gelap yang berturut-turut menjadi ... kali semula
 - a. 4
 - b. 2
 - c. $\frac{1}{4}$
 - d. $\frac{1}{2}$
 - e. 1
6. Dalam percobaan Young menggunakan cahaya hijau lebar garis diamati 0,2 mm. Jika cahaya hijau diganti dengan cahaya merah, lebar garis menjadimm (*jika panjang gelombang cahaya hijau dan merah masing-masing 5200 \AA dan 6500 \AA*).
 - a. 0,31
 - b. 0,25
 - c. 0,20
 - d. 0,16
 - e. 0,13
7. Seberkas cahaya dilewatkan pada celah tunggal, menghasilkan interferensi minimum orde ke-2. Jika lebar celah $2,4 \cdot 10^{-4}$ cm, maka panjang gelombang cahaya tersebut adalah ... \AA
 - a. 4.800
 - b. 6.000
 - c. 9.600
 - d. 19.200
 - e. 20.000
8. Dua berkas cahaya monokromatis X dan Y menyinari tegak lurus kisi. Ternyata sudut deviasi maksimum orde ke-2 sinar X sama dengan sudut deviasi maksimum orde ke-3 sinar Y. Nilai perbandingan panjang gelombang sinar X dan Y adalah ...
 - a. 2:3
 - b. 3:2
 - c. 2:1
 - d. 1:2
 - e. $\text{arc sin } 1,5$
9. Cahaya monokromatis panjang gelombangnya 6000 \AA jatuh tegak lurus pada kisi yang memiliki 500000 garis per meter. Spektrum orde tertinggi yang diamati adalah ...
 - a. 3
 - b. 4
 - c. 6
 - d. 7
 - e. 8
10. Jarak antara dua lampu depan mobil 122 cm, diamati oleh mata yang diameter pupilnya 3 mm. Jika panjang gelombang cahaya lampu yang diterima mata 500 nm, maka jarak mobil maksimum dengan pengamat agar kedua lampu dapat diamati secara normal adalah ... m
 - a. 4.500
 - b. 5.000
 - c. 6.000
 - d. 7.377
 - e. 8.250

