

# B a b 8

## Teori Kinetik Gas



Sumber: encarta encyclopedia

Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep termodinamika dalam mesin kalor dengan cara mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik.

Seseorang yang ingin menerbangkan sebuah balon udara-panas akan memanaskan udara di dalam balon tersebut agar balon dapat terbang ke angkasa. Pemanasan tersebut mengakibatkan temperatur udara di dalam balon meningkat dan memaksa sebagian udara keluar dari bagian bawah balon yang terbuka. Tahukah Anda mengapa balon udara-panas tersebut hanya dapat terbang saat udara di dalamnya dipanaskan?

Penggunaan balon udara-panas merupakan salah satu contoh aplikasi dari sifat gas saat energi kinetiknya meningkat dan kerapatan rata-ratanya sama dengan udara di sekeliling balon sehingga balon dapat melayang di langit. Apa sajakah sifat-sifat gas tersebut? Bagaimanakah aplikasi sifat tersebut dalam teknologi? Anda dapat mengetahui jawaban pertanyaan tersebut pada pembahasan Bab 8 mengenai teori kinetik gas.

- A. Persamaan Gas Ideal**
- B. Prinsip Ekuipartisi Energi**



## A Persamaan Gas Ideal

### Soal Pramateri

1. Ketika Anda memompa ban sepeda, Anda memasukkan gas atau udara ke dalam ban dengan cara menekan piston pompa. Menurut pemahaman Anda, besaran Fisika apakah yang dapat diukur pada proses tersebut?
2. Udara dapat bergerak dari tempat bersuhu tinggi ke tempat bersuhu rendah. Menurut Anda, mengapa hal tersebut dapat terjadi?

### 1. Gas Ideal

Anda tentu telah mengetahui bahwa setiap zat, baik itu zat padat, cair, maupun gas, terdiri atas materi-materi penyusun yang disebut atom. Sebagai partikel penyusun setiap jenis zat yang ada di Bumi dan di seluruh alam semesta, atom-atom berukuran sangat kecil dan tidak dapat dilihat, walaupun menggunakan alat yang paling canggih. Oleh karena itu, gaya yang ditimbulkan oleh interaksi antarpartikel dan energi setiap partikel hanya dapat diamati sebagai sifat materi yang dibentuk oleh sejumlah partikel tersebut secara keseluruhan. Analogi pernyataan ini dijelaskan sebagai berikut. Misalkan, Anda memiliki sejumlah gas oksigen yang berada di dalam tabung tertutup. Jika Anda ingin mengetahui gaya-gaya yang bekerja pada setiap atom oksigen, Anda hanya dapat mengamati perilaku seluruh gas oksigen yang ada di dalam tabung dan menganggap bahwa hasil pengamatan Anda sebagai penjumlahan dari gaya-gaya yang bekerja pada setiap atom gas oksigen.

Sifat mekanika gas yang tersusun atas sejumlah besar atom-atom atau molekul-molekul penyusunnya dijelaskan dalam teori kinetik gas. Dalam menjelaskan perilaku gas dalam keadaan tertentu, teori kinetik gas menggunakan beberapa pendekatan dan asumsi mengenai sifat-sifat gas yang disebut *gas ideal*.

Sifat-sifat gas ideal dinyatakan sebagai berikut.

1. Jumlah partikel gas sangat banyak, tetapi tidak ada gaya tarik menarik (interaksi) antarpartikel.
2. Setiap partikel gas selalu bergerak dengan arah sembarang atau acak.
3. Ukuran partikel gas dapat diabaikan terhadap ukuran ruangan tempat gas berada.
4. Setiap tumbukan yang terjadi antarpartikel gas dan antara partikel gas dan dinding bersifat lenting sempurna.
5. Partikel gas terdistribusi merata di dalam ruangan.
6. Berlaku Hukum Newton tentang gerak.

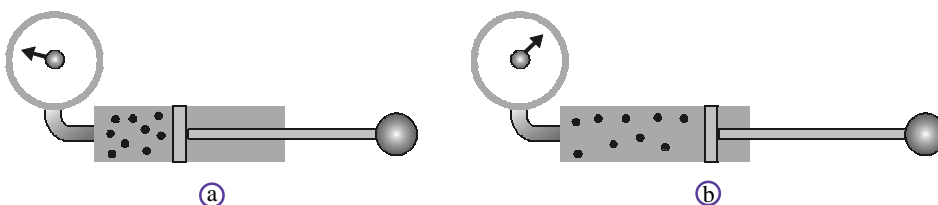
Pada kenyataannya, tidak ditemukan gas yang memenuhi kriteria gas ideal. Akan tetapi, sifat itu dapat didekati oleh gas pada temperatur tinggi dan tekanan rendah.

### 2. Hukum-Hukum tentang Gas

Teori kinetik gas membahas hubungan antara besaran-besaran yang menentukan keadaan suatu gas. Jika gas yang diamati berada di dalam ruangan tertutup, besaran-besaran yang menentukan keadaan gas tersebut adalah volume ( $V$ ), tekanan ( $p$ ), dan suhu gas ( $T$ ). Menurut proses atau perlakuan yang diberikan pada gas, terdapat tiga jenis proses, yaitu isothermal, isobarik, dan isokhorik. Pembahasan mengenai setiap proses gas tersebut dapat Anda pelajari dalam uraian berikut.

#### a. Hukum Boyle

Perhatikanlah Gambar 8.1 berikut.



Gambar 8.1

- (a) Gas di dalam tabung memiliki volume  $V_1$  dan tekanan  $P_1$ .
- (b) Volume gas di dalam tabung diperbesar menjadi  $V_2$  sehingga tekanannya  $P_2$  menjadi lebih kecil.

Suatu gas yang berada di dalam tabung dengan tutup yang dapat diturunkan atau dinaikkan, sedang diukur tekanannya. Dari gambar tersebut dapat Anda lihat bahwa saat tuas tutup tabung ditekan, volume gas akan mengecil dan mengakibatkan tekanan gas yang terukur oleh alat pengukur menjadi membesar. Hubungan antara tekanan ( $p$ ) dan volume ( $V$ ) suatu gas yang berada di ruang tertutup ini diteliti oleh Robert Boyle.

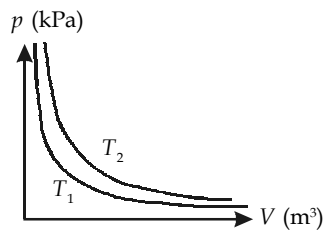
Saat melakukan percobaan tentang hubungan antara tekanan dan volume gas dalam suatu ruang tertutup, **Robert Boyle** menjaga agar tidak terjadi perubahan temperatur pada gas (isotermal). Dari data hasil pengamatannya, Boyle mendapatkan bahwa hasil kali antara tekanan ( $p$ ) dan volume ( $V$ ) gas pada suhu tetap adalah konstan. Hasil pengamatan Boyle tersebut kemudian dikenal sebagai Hukum Boyle yang secara matematis dinyatakan dengan persamaan

$$pV = \text{konstan} \quad (8-1)$$

atau

$$p_1V_1 = p_2V_2 \quad (8-2)$$

Dalam bentuk grafik, hubungan antara tekanan ( $p$ ) dan volume ( $V$ ) dapat dilihat pada **Gambar 8.2**.

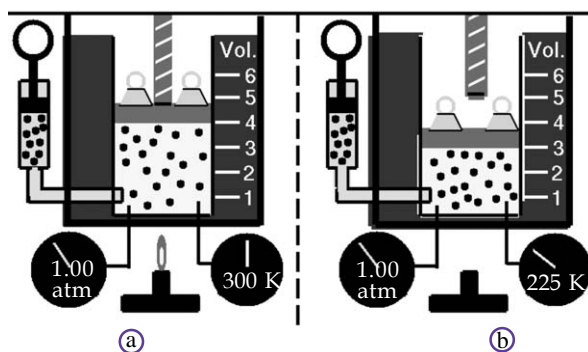


**Gambar 8.2**

Grafik  $p$ - $V$  suatu gas pada dua suhu yang berbeda, di mana  $T_1 > T_2$ .

### b. Hukum Gay-Lussac

**Gay-Lussac**, seorang ilmuwan asal Prancis, meneliti hubungan antara volume gas ( $V$ ) dan temperatur ( $T$ ) gas pada tekanan tetap (isobarik). Perhatikanlah **Gambar 8.3**.



Sumber: www.nasa.gov

**Gambar 8.3**

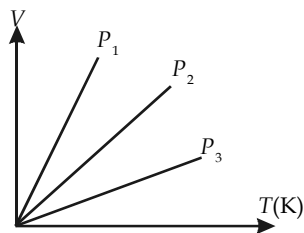
Pada tekanan 1 atm, (a) gas bervolume 4 m<sup>3</sup> memiliki temperatur 300 K, sedangkan (b) gas bervolume 3 m<sup>3</sup> memiliki temperatur 225 K.

Misalnya, Anda memasukkan gas ideal ke dalam tabung yang memiliki tutup piston di atasnya. Pada keadaan awal, gas tersebut memiliki volume 4 m<sup>3</sup> dan temperatur 300 K.

Jika kemudian pemanas gas tersebut dimatikan dan gas didinginkan hingga mencapai temperatur 225 K, volume gas itu menurun hingga 3 m<sup>3</sup>. Jika Anda membuat perbandingan antara volume terhadap suhu pada kedua

keadaan gas tersebut  $\left(\frac{V}{T}\right)$ , Anda akan mendapatkan suatu nilai konstan

$$\left(\frac{4}{300} = \frac{3}{225} = 0,013\right).$$



**Gambar 8.4**

Grafik hubungan  $V-T$ .

Berdasarkan hasil penelitiannya mengenai hubungan antara volume dan temperatur gas pada tekanan tetap, Gay-Lussac menyatakan Hukum Gay-Lussac, yaitu hasil bagi antara volume ( $V$ ) dengan temperatur ( $T$ ) gas pada tekanan tetap adalah konstan. Persamaan matematisnya dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \quad (8-3)$$

atau

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (8-4)$$

Agar Anda dapat lebih memahami Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac, lakukanlah kegiatan **Mahir Meneliti 8.1**.

### Mahir Meneliti 8.1

#### Membuktikan Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac

##### Alat dan Bahan

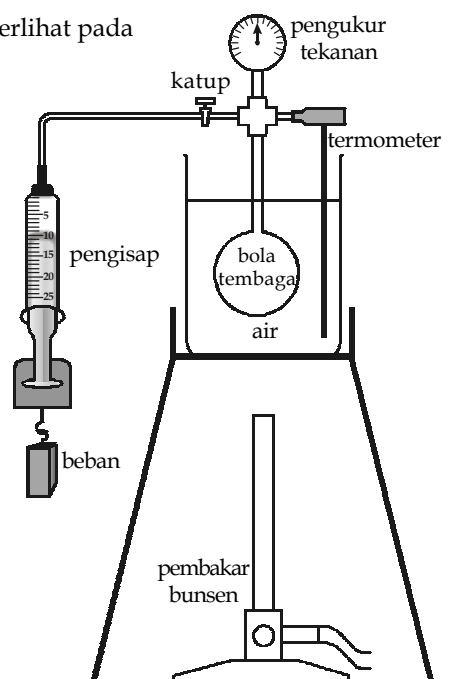
1. Bola tembaga dengan katup dan alat pengukur tekanan
2. Alat pengisap
3. Pembakar bunsen
4. Gelas kimia
5. Penyangga kaki tiga
6. Termometer
7. Beban dan jangka sorong
8. Klem dan statip

##### Prosedur

###### A. Percobaan Gay-Lussac

1. Susunlah alat-alat percobaan, seperti terlihat pada gambar.
2. Bukalah katup, kemudian tutuplah katup pada bola tembaga pada suhu kamar. Catatlah nilai tekanan gas di dalam bola tembaga yang ditunjukkan oleh alat pengukur tekanan. Catatlah kedua nilai besaran tersebut ke dalam tabel berikut.

No	Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tekanan (mmHg)



3. Benamkan bola tembaga ke dalam air es. Pastikan jumlah es yang terdapat di dalam gelas kimia cukup banyak sehingga dicapai suhu stabil sistem antara  $0-10^{\circ}\text{C}$ . Pastikan juga bahwa bola tembaga tidak menyentuh dasar gelas kimia dan air es menutupi seluruh bola tembaga.
4. Masukkan termometer ke dalam gelas kimia (perhatikan agar termometer tidak menyentuh bola tembaga dan dasar gelas kimia).

## Jelajah Fisika

**Robert Boyle**  
(1627–1691)



Sumber: www. iogra iasyvidas.com

Robert Boyle ialah seorang ilmuwan Fisika berkebangsaan Inggris. Melalui usaha dan kerja kerasnya, ia berhasil menemukan pompa vakum. Ia pun menemukan Hukum Boyle berdasarkan penelitian yang dilakukan dengan cermat dan teliti pada gas. Hukum Boyle banyak diterapkan dalam teknologi dan telah memberikan banyak manfaat dalam kehidupan manusia.

- Setelah temperatur stabil, catatlah nilai temperatur dan tekanan tersebut ke dalam tabel.
- Nyalakanlah pembakar bunsen. Kemudian, catatlah nilai tekanan dan temperatur untuk setiap kenaikan tekanan yang ditunjukkan oleh alat pengukur tekanan.
- Lakukanlah langkah ke-6 sampai air di dalam gelas kimia mendidih.
- Bagaimanakah hubungan antara suhu dan tekanan yang Anda peroleh dari data pengamatan?
- Sesuaikan hasil data pengamatan Anda dengan Hukum Gay-Lussac? Jika tidak sesuai, dapatkan Anda menjelaskan bagian apa yang menyebabkan timbulnya perbedaan tersebut? Diskusikanlah dengan teman-teman kelompok dan guru Fisika Anda.

### B. Percobaan Boyle

- Dalam percobaan Boyle ini, digunakan pompa yang memiliki katup yang dapat ditutup. Sejumlah gas yang telah ditentukan banyaknya, terperangkap di dalam pompa. Temperatur gas selalu sama dengan temperatur kamar, sedangkan tekanan gas diubah dengan cara menggantungkan beban yang berbeda-beda pada silinder pompa.
- Bukalah katup di ujung pompa, kemudian aturlah pompa agar menunjukkan volume udara sebesar  $9 \text{ cm}^3$ . Tutuplah katup pompa. Catatlah tekanan dan volume gas pada tabel berikut.

Massa (kg)	Gaya (N)	Tekanan ( $\text{N/m}^2$ )	Volume ( $\text{m}^3$ )	$\frac{1}{\text{Volume}}$ ( $1/\text{m}^3$ )
0	0	0	$9 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^5$
0,2				
0,4				
...				

Oleh karena tekanan gas yang diperhitungkan dalam percobaan ini adalah tekanan netto gas, Anda dapat menganggap tekanan udara luar pada keadaan awal gas adalah nol.

- Tambahkan beban 200 g ke dalam pengisap. Bacalah volume gas dalam pengisap. Catatlah massa dan volume tersebut ke dalam tabel di atas.
- Lakukanlah langkah ke-3 hingga massa beban mencapai 1,6 kg.
- Hitunglah tekanan di dalam pengisap dengan cara membagi gaya yang diberikan pada pengisap dengan luas penampang pengisap.
- Ukurlah diameter pengisap menggunakan jangka sorong, kemudian hitunglah luas penampang pengisap tersebut.
- Bagaimanakah hubungan antara tekanan dan volume pada percobaan tersebut?
- Sesuaikah hasil data pengamatan Anda dengan Hukum Boyle?

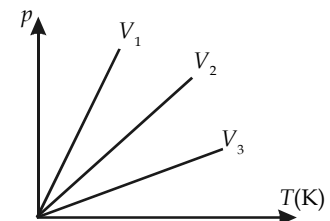
### c. Hukum Charles

Seorang ilmuwan Perancis lainnya, **Charles**, menyatakan hubungan antara tekanan ( $p$ ) terhadap temperatur ( $T$ ) suatu gas yang berada pada volume tetap (isokhorik). Hasil penelitiannya kemudian dikenal sebagai Hukum Charles yang menyatakan hasil bagi tekanan ( $p$ ) dengan temperatur ( $T$ ) suatu gas pada volume tetap adalah konstan. Persamaan matematis dari Hukum Charles dinyatakan dengan

$$\frac{p}{T} = \text{konstan} \quad (8-5)$$

atau

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (8-6)$$



**Gambar 8.5**

Grafik  $p$  -  $T$  suatu gas pada volume yang berbeda.



Anda dapat melakukan kegiatan **Mahir Meneliti 8.2** berikut secara berkelompok untuk lebih memahami Hukum Charles.

## Mahir Meneliti 8.2

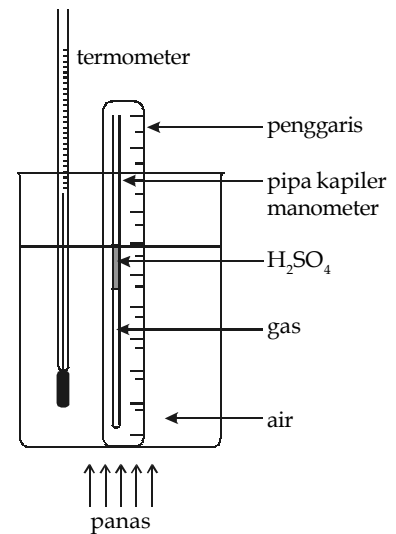
### Memahami Hukum Charles

#### Alat dan Bahan

1. Termometer
2. Air
3. Gelas kimia
4. Pemanas
5. Manometer
6. Batang pengaduk

#### Prosedur

1. Susunlah alat-alat dan bahan percobaan, seperti tampak pada gambar.
2. Catatlah suhu awal dan perbedaan tinggi yang ditunjukkan manometer.
3. Nyalakan pemanas, kemudian catatlah perbedaan tinggi raksa dalam kolom manometer setiap kenaikan suhu 5°C.
4. Agar suhu air dalam gelas kimia merata, aduklah air tersebut dengan batang pengaduk.
5. Diskusikan hubungan antara temperatur terhadap tekanan gas. Sesuailah data hasil pengamatan Anda dengan Hukum Charles?



### Kata Kunci

- Gas ideal
- Hukum Boyle
- Hukum Gay-Lussac
- Hukum Charles
- Proses isotermal
- Proses isokhorik
- Proses isobarik
- Persamaan gas ideal

### d. Persamaan Keadaan Gas Ideal

Pada proses isobarik, tekanan gas tetap, sedangkan volume dan temperatur gas berubah. Demikian juga dalam proses isokhorik dan isotermal, terdapat satu variabel atau besaran gas yang berada dalam keadaan tetap, sedangkan kedua variabel gas lainnya berubah. Bagaimanakah jika ketiga besaran yang menyatakan keadaan gas tersebut (tekanan, volume, dan suhu) berubah?

Dari ketiga hubungan antara tekanan, volume, dan suhu gas yang didapatkan dari Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac dapat diturunkan suatu persamaan yang disebut persamaan keadaan gas ideal. Secara matematis, persamaan keadaan gas ideal dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{pV}{T} = \text{konstan} \quad (8-7)$$

atau

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (8-8)$$

Oleh karena setiap proses yang dilakukan pada gas berada dalam ruang tertutup, jumlah molekul gas yang terdapat di dalam ruang tersebut dapat ditentukan sebagai jumlah mol gas ( $n$ ) yang jumlahnya selalu tetap. Anda tentu sudah mengetahui bahwa mol adalah suatu besaran yang digunakan untuk menyatakan massa suatu zat dalam gram yang besarnya sama dengan jumlah molekul zat tersebut. Dengan demikian, persamaan keadaan gas ideal dapat dituliskan menjadi

$$\frac{pV}{T} = nR \quad (8-9)$$

atau

$$pV = nRT \quad (8-10)$$

dengan:  $n$  = jumlah mol gas,  
 $R$  = tetapan umum gas =  $8,31 \times 10^3$  J/kmolK (SI) = 8,31 J/molK,  
 $p$  = tekanan (N/m<sup>2</sup>),  
 $V$  = volume (m<sup>3</sup>), dan  
 $T$  = temperatur (K).

Dari definisi mol zat yang menyatakan bahwa

$$\text{jumlah mol} = \frac{\text{massa}}{\text{massa relatif molekul}}$$

atau  $n = \frac{m}{M_r}$ , **Persamaan (8-10)** dapat dituliskan menjadi

$$pV = \left( \frac{m}{M_r} \right) RT \quad (8-11)$$

Anda telah mempelajari bahwa massa jenis suatu zat adalah perbandingan antara massa dengan volume zat tersebut. Oleh karena itu, dari **Persamaan (8-11)** dapat diperoleh persamaan massa jenis gas

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM_r}{RT} \quad (8-12)$$

Menurut prinsip Avogadro, satu mol gas mengandung jumlah molekul yang sama. Jumlah molekul gas ini dinyatakan dengan bilangan Avogadro ( $N_A$ ) yang besarnya sama dengan  $6,02 \times 10^{23}$  molekul/mol. Dengan demikian, **Persamaan (8-12)** dapat dinyatakan menjadi

$$pV = \left( \frac{N}{N_A} \right) RT \quad \text{atau} \quad pV = N \left( \frac{R}{N_A} \right) T \quad (8-13)$$

dengan:  $N$  = Banyak partikel gas, dan  
 $N_A$  = Bilangan avogadro =  $6,02 \times 10^{23}$  molekul/mol  
 =  $6,02 \times 10^{26}$  molekul/kmol.

Oleh karena nilai pada **Persamaan (8-13)** merupakan suatu nilai tetapan yang disebut konstanta Boltzmann,  $k$ , di mana  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K maka persamaan keadaan gas ideal dapat juga dituliskan menjadi persamaan berikut.

$$pV = NkT \quad (8-14)$$

### Contoh 8.1

Setetes raksa berbentuk bola memiliki jari-jari,  $r = 0,4$  mm. Berapa banyak atom raksa dalam tetesan tersebut jika diketahui  $M_r$  raksa = 202 kg/kmol dan massa jenis raksa  $\rho = 13.600$  kg/m<sup>3</sup>?

**Jawab**

Diketahui:  $r = 0,4$  mm,  $M_r = 202$  kg/kmol, dan  $\rho = 13.600$  kg/m<sup>3</sup>.

Massa raksa:

$$\begin{aligned} m &= \rho V = \rho \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \\ &= 13.600 \text{ kg/m}^3 \times \frac{4}{3} \times \pi \times (0,4 \times 10^{-3} \text{ m})^3 \end{aligned}$$

### Jangan Lupa

- Hati-hati memilih satuan. Sesuaikan satuan dengan satuan-satuan besaran yang lain. Dalam hal ini, ada kalanya diperlukan faktor konversi: 1 atm  $\sim$   $1 \times 10^5$  Pascal (a).
- Jangan lupa T adalah suhu mutlak, satuannya harus kelvin ( ).
- Jika  $m$  dalam gram dan  $r$  dalam g/mol, maka  $n$  dalam mol, tetapi jika  $m$  dalam kg dan  $r$  dalam kg/mol, maka  $n$  dalam kmol.

### Perlu Anda

#### Ketahui

Dalam keadaan standar (STP), yaitu tekanan  $p = 1$  atm =  $1 \times 10^5$  Pa, dan suhu gas  $t = 0^\circ$  C atau  $T = 273$  K, maka setiap  $n = 1$  mol (gas apa saja) memiliki volume 22,4 liter.





$$m = 3,6 \times 10^{-6} \text{ kg} = 3,6 \times 10^{-3} \text{ g}$$

Jumlah mol raksa:

$$n = \frac{m}{M_r} = \frac{3,6 \times 10^{-3}}{202} \text{ mol} = 1,78 \times 10^{-5} \text{ mol.}$$

$$\text{Banyak atom raksa } N = n N_A = (1,78 \times 10^{-5}) (6,02 \times 10^{23}) = 1,07 \times 10^{19} \text{ atom.}$$

### Contoh 8.2

Sebuah silinder mengandung 20 liter gas pada tekanan  $2,5 \times 10^6 \text{ Pa}$ . Keran yang ada pada silinder dibuka sampai tekanannya turun menjadi  $2,0 \times 10^6 \text{ Pa}$ , kemudian keran ditutup. Jika suhu dijaga tetap, berapakah volume gas yang dibebaskan pada atmosfer bertekanan  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ?

**Jawab**

Diketahui pada keadaan awal:

$$V_1 = 20 \text{ L} = 20 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ dan } p_1 = 2,5 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Keadaan akhir:

$$V_2 = \text{volume semestinya dan } p_2 = 2,0 \times 10^6 \text{ Pa.}$$

Dengan menggunakan rumus  $p_1 V_1 = p_2 V_2$  atau  $V_2 = \frac{p_1}{p_2} V_1$  maka

$$V_2 = \frac{2,5 \times 10^6 \text{ Pa}}{2,0 \times 10^6 \text{ Pa}} \times 20 \text{ L} = 25 \text{ L pada tekanan } p_2$$

Gas yang keluar dari silinder adalah  $25 \text{ L} - 20 \text{ L} = 5 \text{ L}$  pada tekanan  $p_2$ . Oleh karena tekanan udara luar  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $\Delta V$  gas yang 5 L tersebut, di udara luar menjadi:

$$p_2 (\Delta V) = p_3 V_3$$

$$(2,0 \times 10^6 \text{ Pa})(5 \text{ L}) = (1 \times 10^5 \text{ Pa}) V_3$$

$$V_3 = 100 \text{ L. Dengan demikian, volume gas yang dibebaskan adalah sebesar 100 L.}$$

### Solusi

#### Cerdas

Menurut teori kinetik gas, tekanan gas dalam ruang tertutup:

- Berbanding lurus dengan energi kinetik rata-rata partikel.
- Berbanding terbalik dengan volume gas dalam ruang.
- Berbanding lurus dengan jumlah partikel gas.
- Berbanding terbalik dengan kuadrat kecepatan partikel gas.

Pernyataan-pernyataan yang benar adalah ....

- 1 dan 2
- 1 dan 3
- 1, 2, dan 3
- 2, 3, dan 4
- 1, 3, dan 4

#### Penyelesaian

$$p = \frac{2}{3} k$$

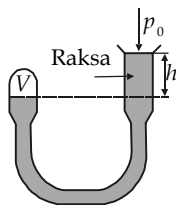
$$p = \frac{2}{3} \times \dots k$$

Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa pernyataan yang benar adalah 1, 2, dan 3.

**Jawab: c**

**Soal UNAS Fisika SMA 2003/2004**

### Contoh 8.3



Seorang siswa ingin menerapkan hukum Boyle untuk menentukan tekanan udara luar dengan menggunakan peralatan, seperti tampak pada gambar. Ia mendapatkan bahwa ketika  $h = 50 \text{ mm}$ ,  $V = 18 \text{ cm}^3$  dan ketika  $h = 150 \text{ mm}$ ,  $V = 16 \text{ cm}^3$ . Berapa mmHg tekanan udara luar di tempat siswa tersebut melakukan percobaan?

**Jawab**

Diketahui:  $h_1 = 50 \text{ mm}$ ,  $V_1 = 18 \text{ cm}^3$ ,  $h_2 = 150 \text{ mm}$ , dan  $V_2 = 16 \text{ cm}^3$ .

Sesuai dengan sifat bejana berhubungan, tekanan gas dalam V adalah:

- Keadaan 1:  $p_1 = (p_0 + h_1) \text{ mmHg} = (p_0 + 50) \text{ mmHg}$  .... (a)
- Keadaan 2:  $p_2 = (p_0 + h_2) \text{ mmHg} = (p_0 + 150) \text{ mmHg}$  .... (b)

$$\text{Menurut hukum Boyle: } p_2 V_2 = p_1 V_1 \text{ atau } p_2 = \left( \frac{V_1}{V_2} \right) p_1 = \left( \frac{18}{16} \right) p_1 \quad \dots (c)$$

Substitusikan **Persamaan (c)** ke **Persamaan (b)** sehingga diperoleh

$$\left( \frac{18 \text{ cm}^3}{16 \text{ cm}^3} \right) p_1 = p_0 + 150 \text{ mm} \rightarrow p_1 = \left( \frac{18 \text{ cm}^3}{16 \text{ cm}^3} \right) (p_0 + 150 \text{ mm})$$



Dengan memerhatikan **Persamaan (a)**, diperoleh:

$$\left(\frac{18 \text{ cm}^3}{16 \text{ cm}^3}\right)(p_0 + 150 \text{ mm}) = (p_0 + 50 \text{ mm})$$

$$16 \text{ cm}^3(p_0) + 16 \text{ cm}^3(150 \text{ mm}) = 18p_0 + 18 \text{ cm}^3(50 \text{ mm})$$
$$2p_0 = 16 \text{ cm}^3(150 \text{ mm}) - 18 \text{ cm}^3(50 \text{ mm})$$
$$p_0 = 750 \text{ mmHg}$$

Tekanan udara luar adalah 750 mmHg atau 75 cmHg.

## Soal Penguasaan Materi 8.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

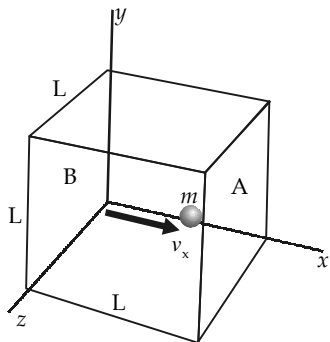
- Berapakah volume yang ditempati 1 mol gas pada temperatur  $0^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm?
- Suatu gas memiliki volume 2 L, temperatur  $30^\circ\text{C}$ , dan tekanan 1 atm. Gas tersebut dipanaskan sampai  $60^\circ\text{C}$  dan ditekan sampai volume 1,5 L. Hitunglah besar tekanan akhir gas tersebut.
- Seratus gram  $\text{CO}_2$  menempati volume 55 L pada tekanan 1 atm. Berapakah temperatur gas  $\text{CO}_2$  tersebut? Jika volume gas ditambah menjadi 80 L dan temperatur dijaga konstan, berapakah tekanan akhir gas?
- Enam belas gram oksigen ( $M_r = 32$ ) menempati ruang bervolume 5 liter pada tekanan 2 atm. Jika gas oksigen dianggap gas ideal dan  $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$ , berapakah temperatur gas tersebut?
- Sebuah tabung yang volumenya 1 liter memiliki lubang yang memungkinkan udara keluar dari tabung. Mula-mula suhu udara dalam tabung  $27^\circ\text{C}$ . Tabung dipanaskan hingga suhunya  $127^\circ\text{C}$ . Berapakah perbandingan antara massa gas yang keluar dari tabung dan massa awalnya?
- Kerapatan massa suatu gas ideal pada suhu  $T$  dan tekanan  $p$  adalah  $\rho$ . Jika tekanan gas tersebut dijadikan  $2p$  dan suhunya diturunkan menjadi  $0,5T$ , tentukanlah kerapatan massa akhir gas.
- Sejumlah gas ideal menjalani proses isobarik sehingga suhunya (dalam Kelvin) menjadi dua kali semula. Sehingga volume gas tersebut akan menjadi  $n$  kali semula. Berapakah nilai  $n$ ?
- Temperatur gas ideal yang tekanannya 800 mmHg adalah 300 K. Jika gas dipanaskan pada volume tetap hingga tekanannya menjadi 1.600 mmHg, hitunglah temperatur gas tersebut.

## B Prinsip Ekuipartisi Energi

Pada subbab A, Anda telah mempelajari hubungan antara variabel-variabel yang menyatakan keadaan suatu gas dalam ruangan tertutup. Untuk mengamati keadaan gas tersebut, dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu cara makroskopis dan mikroskopis.

Jika Anda mengamati keadaan suatu gas dalam ruang tertutup berdasarkan besaran-besaran yang dapat dilihat atau diukur secara langsung, Anda dikatakan melakukan pengamatan secara makroskopis. Namun, jika pengamatan yang Anda lakukan berdasarkan pada variabel atau besaran yang tidak dapat dilihat atau diukur secara langsung, Anda dikatakan melakukan pengamatan secara mikroskopis.

Pengamatan keadaan gas secara makroskopis telah Anda lakukan dan pelajari pada subbab A. Pada subbab B ini, Anda akan mempelajari keadaan gas yang diamati secara mikroskopis serta hubungan antara besaran makroskopis dan besaran mikroskopis.



**Gambar 8.6**

Sebuah partikel bergerak dengan kecepatan  $v_x$  dalam ruang berbentuk kubus berusuk  $L$ .

## 1. Tinjauan Tekanan Secara Mikroskopis

Berdasarkan sifat-sifat gas ideal, Anda telah mengetahui bahwa setiap dinding ruang tempat gas berada, mendapat tekanan dari tumbukan partikel-partikel gas yang tersebar merata di dalam ruang tersebut. Cobalah Anda amati gerak satu partikel yang berada di dalam ruang berbentuk kubus dengan panjang rusuk kubus  $L$ . Massa partikel tersebut adalah  $m$  dan kecepatan partikel menurut arah sumbu- $x$  dinyatakan sebagai  $v_x$  (perhatikan **Gambar 8.6**). Jika partikel gas ideal tersebut menumbuk dinding ruang, tumbukan yang terjadi adalah tumbukan lenting sempurna. Oleh karena itu, jika kecepatan awal partikel saat menumbuk dinding A adalah  $+v_x$ , kecepatan akhir partikel setelah terjadinya tumbukan dinyatakan sebagai  $-v_x$ . Perubahan momentum ( $\Delta p_x$ ) yang dialami partikel adalah  $\Delta p_x = p_{\text{akhir}} - p_{\text{awal}} = -mv_x - (mv_x) = -2mv_x$ .

Setelah menumbuk dinding A, partikel gas ideal tersebut menumbuk dinding B. Demikian seterusnya, partikel gas tersebut akan bergerak bolak-balik menumbuk dinding A dan dinding B. Dengan demikian, Anda dapat menghitung selang waktu antara dua tumbukan yang terjadi pada dinding A dengan persamaan

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x} \quad (8-15)$$

Pada saat partikel gas tersebut menumbuk dinding, partikel memberikan gaya sebesar  $F_x$  pada dinding. Pada pelajaran mengenai momentum, Anda telah mempelajari bahwa besarnya gaya yang terjadi pada peristiwa tumbukan sama dengan laju perubahan momentumnya  $\left(F = \frac{\Delta p}{\Delta t}\right)$ . Dengan demikian, besar gaya  $F_x$  tersebut dapat diketahui sebagai berikut.

$$F_x = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\frac{2L}{v_x}} \quad (8-16)$$

Jika di dalam ruang berbentuk kubus tersebut terdapat sejumlah  $N$  partikel gas, yang kecepatan rata-rata seluruh molekul gas tersebut dinyatakan dengan  $v_x$ , gaya yang dialami dinding dinyatakan sebagai  $F_{\text{total}}$ . Dengan demikian, **Persamaan (8-16)** dapat dinyatakan menjadi

$$F_{\text{total}} = \frac{N\overline{mv_x^2}}{L} \quad (8-17)$$

Anda dapat mencari besarnya tekanan ( $p$ ) yang dilakukan oleh gaya total ( $F_{\text{total}}$ ) yang dihasilkan oleh  $N$  partikel gas ideal tersebut pada dinding A.

$$p = \frac{F_{\text{total}}}{A}$$

Oleh karena luas dinding adalah perkalian antara dua panjang rusuk dinding tersebut ( $A = L^2$ ) maka persamaan tekanan pada dinding dapat ditulis dengan

$$p = \frac{F_{\text{total}}}{L^2} = \frac{N\overline{mv_x^2}}{L^3} = \frac{N\overline{mv_x^2}}{V} \quad (8-18)$$

### Perlu Anda

#### Ketahui

Karena perubahan  $p$  berbanding lurus dengan perubahan  $\rho$  (ingat hukum Boyle) maka kecepatan  $v$  tidak tergantung pada tekanan ( $p$ ) dan volume ( $V$ ).

atau

$$pV = Nmv_x^2 \quad (8-19)$$

dengan:  $p$  = tekanan pada dinding, dan  
 $V$  = volume ruang.

Dalam tinjauan tiga dimensi (tinjauan ruang), kecepatan rata-rata gerak partikel merupakan resultan dari tiga komponen arah kecepatan menurut sumbu- $x$  ( $\bar{v}_x$ ), sumbu- $y$  ( $\bar{v}_y$ ), dan sumbu- $z$  ( $\bar{v}_z$ ) yang besarnya sama. Oleh karena itu, dapat dituliskan  $\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y + \bar{v}_z$  dengan  $\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z$ . Jika setiap komponen pada kedua ruas penamaan kecepatan tersebut dikuadratkan, dapat dituliskan

$$\begin{aligned} \bar{v}^2 &= \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 \\ \bar{v}_x^2 &= \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2 \end{aligned}$$

sehingga diperoleh  $\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2$

Dengan demikian, **Persamaan (8-19)** dapat diubah menjadi

$$pV = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2 \quad (8-20)$$

atau

$$p = \frac{1}{3} \frac{N m \bar{v}^2}{V} \quad (8-21)$$

dengan:  $N$  = banyaknya partikel gas,  
 $m$  = massa 1 partikel gas,  
 $\bar{v}$  = kecepatan partikel gas, dan  
 $V$  = volume gas.

## 2. Hubungan Antara Tekanan Gas dan Energi Kinetik

Pada **Persamaan (8-20)**, Anda telah menyatakan hubungan antara besaran tekanan, volume, dan suhu (besaran makroskopis) suatu gas dengan besaran mikroskopis (massa, jumlah, dan kecepatan) partikel gas tersebut. Dari pelajaran sebelumnya, Anda juga telah mempelajari bahwa setiap benda yang bergerak memiliki energi kinetik. Bagaimanakah hubungan antara ketiga variabel makroskopis gas (tekanan, volume, dan suhu) terhadap energi kinetiknya?

Perhatikanlah kembali **Persamaan (8-18)** dan **Persamaan (8-21)**. Jika **Persamaan (8-18)** dituliskan menjadi  $p = \frac{NkT}{V}$  dan **Persamaan (8-21)**

dituliskan sebagai  $p = \frac{1}{3} \frac{N m \bar{v}^2}{V}$  maka dapat diturunkan persamaan

$$p = \frac{NkT}{V} = \frac{1}{3} \frac{N m \bar{v}^2}{V}$$

$$\frac{1}{3} m \bar{v}^2 = kT \quad (8-22)$$

## Jelajah Fisika

### Gelembung Udara



Sumber: www.cule radivers.com

Ukuran gelembung udara di dalam air berubah seiring dengan berubahnya kedalaman gelembung tersebut di dalam air. Jika seorang penyelam melepaskan gelembung udara di kedalaman air, tekanan air di kedalaman tersebut menentukan besarnya volume gelembung udara. Saat gelembung udara tersebut naik ke permukaan, tekanan air menurun sehingga volume gelembung udara pun membesar.

Sumber: ontemporary ollege hysics, 1993



**Jangan Lupa**

Kecepatan gas merupakan kecepatan rata-rata sehingga energi kinetik gas juga merupakan energi kinetik rata-rata.

Oleh karena  $EK = \frac{1}{2} mv^2$  maka **Persamaan (8-22)** dapat dituliskan menjadi

$$\frac{2}{3} \left( \frac{1}{2} mv^2 \right) = kT \text{ sehingga diperoleh}$$

$$\frac{2}{3} EK = kT \quad (8-23)$$

atau

$$EK = \frac{3}{2} kT \quad (8-24)$$

Dari **Persamaan (8-24)** Anda dapat menyatakan bahwa energi kinetik gas berbanding lurus dengan temperturnya. Jadi, jika temperatur gas naik, energi kinetiknya akan membesar. Demikian juga sebaliknya, jika suhu gas turun, energi kinetiknya akan mengecil.

Jika energi kinetik **Persamaan (8-24)** dituliskan sebagai  $EK = 3 \left( \frac{1}{2} kT \right)$ ,

besaran  $\frac{1}{2} kT$  disebut juga sebagai derajat kebebasan gas. Apakah derajat kebebasan gas itu? Derajat kebebasan berhubungan dengan kebebasan partikel gas untuk bergerak di dalam ruang. Jadi, jika energi kinetik suatu gas dinyatakan sebagai  $\frac{3}{2} kT$ , Anda dapat mengatakan bahwa gas tersebut memiliki 3 derajat kebebasan menurut sumbu- $x$ , sumbu- $y$ , dan sumbu- $z$ . Derajat kebebasan ini berlaku untuk gas monoatomik, seperti Helium (He), Argon (Ar), dan Neon (Ne). Semakin tinggi suhu suatu gas, energi kinetiknya akan semakin besar. Secara fisis, meningkatnya energi kinetik gas tersebut berhubungan dengan meningkatnya jumlah derajat kebebasan yang dimilikinya. Pada gas-gas diatomik, seperti  $H_2$ ,  $N_2$ , dan  $O_2$ , energi kinetiknya pada suhu rendah adalah  $\frac{3}{2} kT$ , pada suhu sedang  $\frac{5}{2} kT$ , dan suhu tinggi  $\frac{7}{2} kT$ .

Derajat kebebasan gas-gas diatomik pada suhu rendah diperoleh dari kebebasan gerak partikel-partikelnya saat bertranslasi menurut sumbu- $x$ , sumbu- $y$ , dan sumbu- $z$  ( $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 3v_x^2$ ). Pada suhu sedang, partikel-partikel gas diatomik tersebut dapat bertranslasi dan berotasi. Namun, rotasi yang dialami partikel gas menurut sumbu- $x$  diabaikan karena nilainya sangat kecil. Dengan demikian, energi kinetiknya,  $EK = \frac{3}{2} kT = 2 \left( \frac{1}{2} kT \right) = \frac{5}{2} kT$ . Jika temperatur gas diatomik tersebut dinaikkan lagi hingga mencapai  $\pm 1.000$  K, gerak yang dilakukan oleh partikel-partikel gas adalah gerak translasi, rotasi, dan vibrasi (bergerak pada sumbunya). Energi kinetik gas pada suhu tinggi dinyatakan dengan

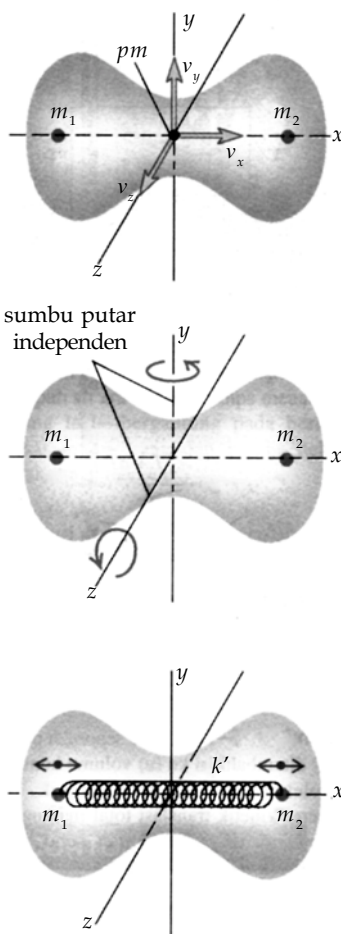
$$EK = \frac{3}{2} kT + 2 \left( \frac{1}{2} kT \right) + 2 \left( \frac{1}{2} kT \right) = \frac{7}{2} kT$$

Anda telah mempelajari dari uraian di atas, bahwa jumlah derajat kebebasan partikel gas menentukan energi yang dimiliki atau disimpan oleh gas tersebut. Peninjauan energi partikel gas inilah yang dinamakan Prinsip Ekuipartisi Energi oleh **James Clerk Maxwell**.

### 3. Energi Dalam Gas Ideal

Energi kinetik sejumlah partikel gas yang terdapat di dalam suatu ruang tertutup disebut sebagai energi dalam gas ( $U$ ). Jika di dalam ruangan tersebut terdapat  $N$  partikel gas, energi dalam gas dituliskan dengan persamaan

$$U = NEK$$



Sumber: Fisika Universitas, 2002

**Gambar 8.7**

- Derajat kebebasan sebuah molekul diatomik.
- Gerak translasi. Pusat massa memiliki tiga komponen kecepatan yang independen satu dengan yang lain.
  - Gerak rotasi. Molekul memiliki dua sumbu putar yang independen melalui pusat massanya.
  - Gerak vibrasi. Atom dan "pegas" memiliki energi kinetik dan energi potensial vibrasi tambahan.

Dengan demikian, energi dalam untuk gas monoatomik atau gas diatomik pada suhu rendah adalah

$$U = NEK = \frac{3}{2} NkT$$

Adapun, energi dalam untuk gas-gas diatomik pada suhu sedang dinyatakan dengan

$$U = \frac{5}{2} NkT$$

dan pada suhu tinggi, besar energi dalam gas adalah

$$U = \frac{7}{2} NkT$$

#### 4. Kecepatan Partikel Gas Ideal

Besaran lain yang dapat ditentukan melalui prinsip ekuipartisi energi gas adalah akar dari rata-rata kuadrat kelajuan ( $v_{rms}$  = root mean square speed) gas, yang dirumuskan dengan

$$v_{rms} = \sqrt{v^2}$$

Dari persamaan (8-24), Anda telah mengetahui bahwa  $EK = \frac{3}{2} kT$ .

Dengan demikian dapat dirumuskan bahwa

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

$$v^2 = \frac{3kT}{m}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (8-25)$$

Berdasarkan persamaan gas ideal, Anda pun telah mengetahui bahwa  $pV = NkT$ . Jika hanya terdapat satu mol gas, persamaan gas ideal tersebut dapat dinyatakan  $pV = kT$ . Dengan demikian, **Persamaan (8-25)** dapat dituliskan menjadi

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3pV}{m}} \quad (8-26)$$

Anda tentu masih ingat bahwa massa jenis ( $\rho$ ) adalah perbandingan antara massa terhadap volume zat tersebut ( $\rho = \frac{m}{V}$ ). Oleh karena itu, **Persamaan (8-26)** dapat dituliskan menjadi

$$v_{rms} = \sqrt{3p \left( \frac{V}{m} \right)}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \quad (8-27)$$

Berdasarkan **Persamaan (8-27)** tersebut, Anda dapat menyatakan bahwa massa jenis gas berbanding terbalik dengan kelajuan partikelnya. Jadi, jika massa jenis ( $\rho$ ) gas di dalam ruangan tertutup besar, kelajuan partikel gas tersebut akan semakin kecil.

#### Kata Kunci

- Besaran mikroskopis
- Besaran makroskopis
- Derajat kebebasan
- Energi dalam
- Prinsip ekuipartisi energi



### Contoh 8.4

Neon (Ne) adalah suatu gas monoatomik. Berapakah energi dalam 2 gram gas neon pada suhu 50°C jika massa molekul relatifnya  $M_r = 10$  g/mol?

**Jawab**

Diketahui:  $m = 2$  gram,  $T = 50^\circ\text{C}$ , dan  $M_r = 10$  g/mol.

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2} \frac{m}{M_r} RT \\
 &= \frac{3}{2} \times \frac{2 \text{ g}}{10 \text{ g/mol}} \times 8,31 \text{ J/molK} \times (50 + 273) \text{ K} = 805,24 \text{ J.}
 \end{aligned}$$

### Contoh 8.5

Sebuah tangki bervolume 2,4 m<sup>3</sup> diisi dengan 2 kg gas. Tekanan dalam tangki 1,3 atm. Berapakah kecepatan efektif molekul-molekul gas ini?

**Jawab**

Diketahui:  $V = 2,4$  m<sup>3</sup>,  $m = 2$  kg, dan  $p = 1,3$  atm.

$$\begin{aligned}
 v &= \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3p}{\frac{m}{V}}} = \sqrt{\frac{3pV}{m}} \\
 &= \sqrt{\frac{3 \times 1,3(1,01 \times 10^5 \text{ Pa}) \times 2,4 \text{ m}^3}{2 \text{ kg}}}
 \end{aligned}$$

$$v = 687,52 \text{ m/s.}$$

## Soal Penguasaan Materi 8.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

- Gas Helium memiliki massa molar sekitar 4 g/mol dan gas hidrogen (H<sub>2</sub>) memiliki massa molar sekitar 2 g/mol. Jika suhu gas saat itu adalah 300 K, hitunglah:
  - kelajuan rms molekul oksigen, dan
  - kelajuan molekul gas hidrogen.
- Berapakah energi kinetik translasi rata-rata 1 L gas oksigen yang ditahan pada temperatur 0°C dan tekanan 1 atm?
- Pada temperatur berapakah kelajuan rms molekul H<sub>2</sub> sama dengan 75 m/s?
- Berapakah perbandingan energi dalam gas helium dan neon yang massanya sama pada suhu 400 K?
- Suatu gas ideal berada dalam ruang tertutup sehingga kecepatannya menjadi dua kali kecepatan mula-mula. Jika suhu mula-mula 27°C, tentukanlah suhu akhir gas tersebut.
- Sejumlah contoh gas oksigen ( $M_r = 32$ ) memiliki suhu mutlak empat kali dari sejumlah contoh gas hidrogen ( $M_r = 2$ ). Tentukanlah perbandingan kelajuan efektif molekul oksigen dan molekul hidrogen.
- Massa sebuah molekul nitrogen adalah empat belas kali massa sebuah molekul hidrogen. Pada suhu berapakah molekul-molekul nitrogen pada suhu 294 K memiliki laju rata rata yang sama dengan molekul-molekul hidrogen.

## Rangkuman

- Gas Ideal** adalah gas yang memenuhi sifat-sifat berpartikel banyak, antarpartikel tidak berinteraksi, arah gerak setiap partikel sembarang, ukuran partikel terhadap ruang tempatnya dapat diabaikan,

tumbukan antarpartikel bersifat lenting sempurna, partikel gas terdistribusi merata di seluruh ruang, dan berlaku Hukum Newton tentang gerak.

2. **Hukum Boyle** berlaku pada proses isothermal

$$pV = \text{konstan}$$

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

3. **Hukum Gay-Lussac** berlaku pada proses isobarik

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \text{ atau } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

4. **Hukum Charles** berlaku pada proses isokhorik

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \text{ atau } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

5. **Hukum Boyle-Gay Lussac** merupakan penggabungan antara Hukum Boyle dan Hukum Gay-Lussac

$$\frac{pV}{T} = \text{konstan} \text{ atau } \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$$

6. **Persamaan keadaan gas ideal**

$$pV = nRT \text{ atau } pT = NkT$$

7. **Tekanan gas ideal**

$$p = \frac{1}{3} \frac{Nmv^2}{V}$$

8. **Energi dalam gas ideal**

a. Gas monoatomik

$$EK = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT$$

b. Gas diatomik

1) Pada suhu rendah:

$$U = NEK = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT$$

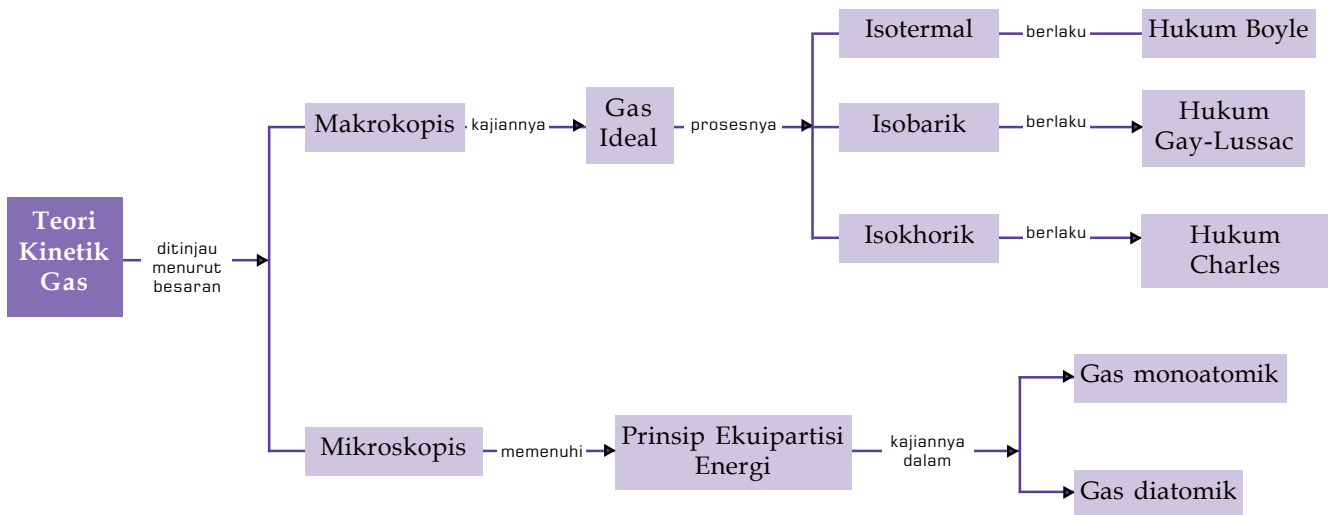
2) Pada suhu sedang:

$$U = NEK = \frac{5}{2} NkT = \frac{5}{2} nRT$$

3) Pada suhu tinggi:

$$U = NEK = \frac{7}{2} NkT = \frac{7}{2} nRT$$

## Peta Konsep



### Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Teori Kinetik Gas, Anda diharapkan dapat mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik. Jika Anda belum mampu mendeskripsikan sifat-sifat gas ideal monoatomik, Anda belum menguasai materi bab Teori Kinetik Gas dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami,

lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.