

Teori Kinetik Gas Dan Distribusi Kecepatan Molekul

Heru Pratomo Al., M.Si.



PENDAHULUAN

Anda pernah mempelajari teori kinetik gas pada pelajaran fisika di SMA, dan juga telah mempelajari sifat-sifat gas pada Kuliah Kimia Fisika I. Teori kinetik gas beranjak dari teori yang lebih umum yang disebut teori kinetik. Teori kinetik menjelaskan sifat dan perilaku sistem fisika berdasarkan hipotesis terhadap sistem yang terdiri dari sejumlah besar partikel (misalnya molekul atau atom) yang bergerak.

Sebelum adanya teori kinetik gas, mungkin Anda telah mengenal teori statis gas yang diberikan oleh Newton untuk menjelaskan hukum Boyle. Teori kinetik gas pertama diajukan oleh Daniel Bernoulli tahun 1738 namun masih belum kuat dasar-dasarnya. Tahun 1850, Joule mengajukan hukum kekekalan energi yang mendukung teori kinetik. Perkembangan lebih lanjut diberikan oleh James Clerk Maxwell yang menjelaskan banyak sifat gas. Salah satu kekuatan dari teori Maxwell adalah kemampuannya untuk memprediksi fenomena transport seperti konduksi, difusi, dan viskositas panas. Teori Maxwell dikembangkan lebih lanjut oleh Boltzman.

Tahukah Anda, bahwa sebenarnya teori kinetik gas sekarang telah tamat? Namun demikian teori ini tetap dipelajari karena sederhana. Teori kinetik gas merupakan sisa-sisa petualangan ilmiah abad ke-19 dalam memahami fisika fluida, yang memiliki pengaruh besar pada fisika abad ke-20, khususnya dalam kelahiran dan perkembangan teori kuantum. Sebagai contoh, penelitian Boltzman merupakan kunci dalam solusi masalah radiasi benda hitam Planck yang menandakan awal teori kuantum di tahun 1900an. Teori kinetik gas dapat digunakan untuk menjelaskan hubungan antara teori dengan hasil eksperimen secara fisik, seperti halnya teknik-teknik yang digunakan dalam menghubungkan antara struktur dengan sifat materi.

Setelah mempelajari Modul 1, Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan asumsi dasar teori kinetik gas
2. menjelaskan gerak partikel gas dalam ruang
3. menjelaskan hubungan antara energi kinetik dan temperatur gas
4. menghitung energi kinetik gas, apabila diketahui temperaturnya
5. menghitung tekanan gas, apabila diketahui energi kinetiknya
6. menjelaskan hubungan antara tekanan, volume, dan energi kinetik gas
7. menghitung akar kecepatan rata-rata kuadrat dari molekul gas
8. menjelaskan distribusi kecepatan Maxwell-Boltzmann
9. menjelaskan kecepatan paling bolehjadi (c_{mp}) dari molekul gas
10. menghitung kecepatan rata-rata suatu molekul gas
11. menjelaskan prinsip ekipartisi energi
12. menyebutkan macam-macam gerak partikel gas
13. menentukan derajat kebebasan suatu sistem
14. menjelaskan hubungan antara kapasitas kalor dan ekipartisi energi
15. memberikan contoh cara menentukan hubungan antara kapasitas kalor dan ekipartisi energi
16. menghitung kapasitas kalor gas pada volume tetap
17. menghitung kapasitas kalor gas pada tekanan tetap
18. menghitung kecepatan efusi gas
19. menjelaskan fungsi distribusi kecepatan molekul

Untuk membantu Anda agar dapat mencapai tujuan pembelajaran di atas, maka di dalam modul ini terdapat 3 kegiatan belajar, yaitu:

Kegiatan Belajar 1: Gerak Partikel Gas dalam Ruang

Kegiatan Belajar 2: Distribusi Kecepatan Molekul

Kegiatan Belajar 3: Ekipartisi Energi dan Kapasitas Kalor Gas

KEGIATAN BELAJAR 1

Gerak Partikel Gas Dalam Ruang

❧ Pada kegiatan belajar ini, Anda akan mempelajari teori kinetik gas dengan menggunakan pendekatan gas ideal. Selanjutnya Anda juga akan mempelajari gerak partikel gas yang menyebabkan tumbukan sehingga menimbulkan tekanan pada dinding wadah. Anda juga akan mempelajari energi kinetik yang diakibatkan gerak partikel gas yang memiliki kecepatan.

A. TEORI KINETIK GAS

Teori kinetik dibangun berdasarkan ontologi atomistik. Teori ini berangkat dari anggapan bahwa atom itu ada, padahal pada masanya belum terbukti kalau atom itu ada. Baru kemudian ketika teori kinetik semakin berkembang, para filsuf sains dan ilmuwan percaya bahwa atom itu ada. Pada pertengahan abad ke-19, yang diperdebatkan kemudian bukan lagi apakah atom itu ada atau tidak, tetapi bagaimana bentuk atom. Walau begitu, teori kinetik gas kemudian kehilangan dukungan karena atom dan molekul tak kunjung terbukti keberadaannya.

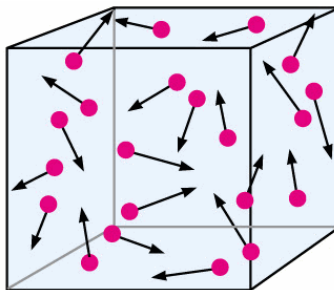
Keberadaan atom dan molekul akhirnya tak terbantahkan lagi ketika Jean Perrin (1913) melakukan eksperimen jenius untuk fenomena gerak Brown. Ia menyatakan kepastian empiris dari atom dan molekul dalam bukunya *Les Atomes*. Hal ini ditarik dari penjelasan Einstein atas gerak Brown sebagai hasil dari gerak molekul yang hanya dapat dijelaskan oleh teori kinetik dan atomisme. Tetapi, eksperimen Perrin pun memberikan kontradiksi yaitu memperkuat teori kinetik sekaligus meruntuhkannya.

Eksperimen Perrin dilakukan pada gerak Brown, sebuah gerakan yang terlihat ketika partikel-partikel berada dalam suatu cairan. Partikel-partikel yang lebih padat daripada cairan tempatnya berada, namun ketika kesetimbangan tercapai ternyata masih terdapat partikel yang tetap melayang dan tidak tenggelam. Hal ini dapat dijelaskan bila jumlah rata-rata partikel yang melayang per satuan volume diasumsikan berada dalam gerak yang acak, yang bergerak turun berdasarkan ketinggiannya. Berdasarkan asumsi ini, jumlah partikel dalam lapisan datar tipis dalam cairan yang datang dari bawah akan lebih banyak dari jumlah yang datang dari atas dan akibatnya

akan ada tekanan resultan yang mendorong partikel untuk naik. Kesetimbangan akan tercapai ketika tekanan ke atas ini seimbang dengan berat partikel.

Lalu mengapa saat kesetimbangan tetap ada bintang-bintang yang bergerak? Bintang-bintang kecil dalam fluida yang bergerak ini dianggap sebagai sebuah gerakan acak, sehingga tentu ada sesuatu yang bekerja pada bintang-bintang kecil ini yang menyebabkan terjadinya gerakan tersebut. Perrin menggunakan mikroskop ultra untuk melihat bintang yang sangat kecil ini, karena bintang-bintang ini tak dapat dilihat dengan mata atau memakai lensa. Dalam hal ini, fluida tidak dipandang sebagai medium kontinu hingga tak terbatas, melainkan fluida dipandang terdiri dari partikel-partikel kecil yang disebut atom atau molekul yang masih cukup besar untuk memiliki momentum yang menyebabkan bintang-bintang kecil tersebut bergerak.

Eksperimen Perrin juga dipandang mendukung teori kinetik gas karena asumsi dasar teori ini adalah atom dan molekul itu ada. Atom dan molekul inilah yang menyebabkan gerak Brown, selain temperatur. Selain mendukung teori kinetik, anehnya eksperimen Perrin juga memulai keruntuhan teori tersebut. Eksperimen Perrin yang membuktikan adanya molekul dan atom justru menimbulkan pertanyaan-pertanyaan terkait molekul dan atom. Eksperimen Perrin di satu sisi, mampu menunjukkan kebenaran teori kinetik yang mampu menunjukkan molekul-molekul yang bergerak yang menyebabkan adanya gerak Brown dan tekanan gas. Pada sisi lain, eksperimen Perrin juga menunjukkan luruhnya prinsip ekipartisi energi untuk derajat kebebasan vibrasional dan derajat kebebasan rotasional.



Gambar 1.1
Gerak Partikel Gas dalam Ruang

Elemen dasar teori kinetik adalah teorema ekipartisi, yang menyatakan kalau setiap derajat kebebasan sistem mengambil bagian yang setara dari energi kinetik total. Teorema ekipartisi pun digagalkan oleh pengamatan rasio kalor spesifik gas yang ternyata tidak sesuai dengan prediksi ekipartisi. Lebih lanjut, pengamatan pada spektrum gas juga menolak prinsip ekipartisi. Hal ini dapat dijelaskan dengan mekanika kuantum yang memisahkan struktur atom internal (spektra) dari derajat kebebasan mekanis.

Teori kinetik bermasalah dengan teori termodinamika. Teori kinetik tidak mampu menjelaskan kecenderungan menuju kesetimbangan yang dijelaskan oleh hukum kedua termodinamika. Usaha menjelaskan hal ini diberikan oleh Boltzmann namun harus menambah satu lagi hipotesis baru yaitu *Stosszahlansatz* (ketidak-teraturan molekul atau entropi). Hipotesis ini mengatakan kalau tidak ada korelasi statistik antara molekul sebelum dan sesudah tumbukan. Namun demikian ternyata hipotesis ini bertentangan dengan asumsi dasar teori kinetik, bahwa partikel gas bersifat deterministik sesuai hukum Newton.

Kontradiksi teori kinetik dengan hukum kedua termodinamika menjadi penghambat besar berkembangnya teori kinetik. Oleh sebab itu lahir mekanika statistik yang menyatakan bahwa penurunan entropi bukannya mustahil tetapi sangat kecil kemungkinannya, artinya kemungkinan sistem itu memiliki entropi semakin besar jauh lebih besar daripada sebaliknya.

Untuk menyederhanakan permasalahan teori kinetik gas diambil asumsi tentang gas ideal:

1. Gas ideal terdiri atas partikel-partikel (atom atau molekul) dalam jumlah yang banyak sekali.
2. Partikel-partikel gas senantiasa bergerak dengan arah random/sebarang.
3. Partikel-partikel gas tersebar merata dalam seluruh ruang yang ditempati.
4. Jarak antara partikel-partikel jauh lebih besar dari ukuran partikel-partikel, sehingga volume total partikel dapat diabaikan terhadap volume ruang yang ditempati. Atau dengan kata lain volume ruang yang tidak ditempati partikel gas sama dengan volume ruang dalam keadaan kosong (tidak berisi gas)
5. Tidak ada gaya tarik maupun gaya tolak antara partikel yang satu dengan yang lain, kecuali bila bertumbukan.
6. Tumbukan antar partikel ataupun antara partikel dengan dinding terjadi secara lenting sempurna. Partikel dianggap sebagai bola kecil yang keras, sedangkan dinding dianggap licin dan tegar.

7. Hukum-hukum Newton tentang gerak berlaku, dalam hal ini partikel bergerak relatif cepat menurut garis lurus pada kondisi tanpa adanya medan gaya.

B. TUMBUKAN PARTIKEL GAS DENGAN DINDING WADAH

Gas terdiri dari partikel-partikel yang selalu bergerak dengan kecepatan yang bervariasi, dan sangat tergantung pada temperatur sistem. Akibat gerak partikel yang menumbuk dinding wadah, maka terdapat tekanan yang dialami dinding wadah. Jadi yang dimaksudkan dengan tekanan gas adalah akibat tumbukan partikel-partikel pada dinding wadah. Gerak partikel berhubungan dengan kecepatan. Kecepatan merupakan besaran vektor, dan didefinisikan sebagai perubahan jarak pada suatu waktu tertentu. Secara matematis, dituliskan sebagai:

$$v = \frac{dl}{Dt} \quad (1.1)$$

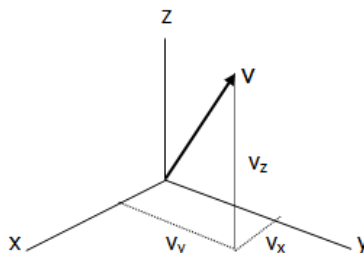
Keterangan:

v = kecepatan

l = jarak

t = waktu

Dalam sistem koordinat Cartesius, kecepatan terdiri dari komponen-komponen kecepatan pada arah x , y dan z yaitu: v_x, v_y, v_z .



Gambar 1.2
Komponen Kecepatan pada Arah x , y , dan z .

Diketahui bahwa:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Atau

$$v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2} \quad (1.2)$$

Jika diandaikan antara partikel gas tidak terjadi tumbukan, tetapi hanya terjadi tumbukan antara partikel dengan dinding wadah, maka partikel gas bergerak ke arah dinding wadah dengan momentum (p) sebesar $p = mv$, dengan m = massa partikel. Jadi untuk gerakan arah sumbu x, momentumnya $p = mv_x$. Oleh karena tumbukan dengan dinding wadah bersifat lenting sempurna, molekul ini menumbuk dinding dan memantul balik dengan laju $-v_x$, sehingga momentum balik sepanjang sumbu x menjadi $-mv_x$. Dengan demikian, perubahan momentum partikel sepanjang sumbu x setelah menumbuk dinding wadah sebesar $\Delta p = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$. Sementara itu, waktu (t) yang diperlukan oleh partikel saat bergerak antara kedua dinding wadah pada arah x yang berjarak l , adalah $t = \frac{l}{v_x}$. Agar partikel kembali

menumbuk dinding yang sama diperlukan waktu $2\frac{l}{v_x}$, sehingga jumlah

tumbukan per satuan waktu adalah $\frac{v_x}{l}$ dan perubahan momentum per satuan

waktu menjadi $2mv_x \times \frac{v_x}{l} = \frac{2mv_x^2}{l}$. Hal yang sama terjadi pada arah gerak

partikel pada sumbu y dan sumbu z. Dengan demikian perubahan momentum total per satuan waktu menjadi:

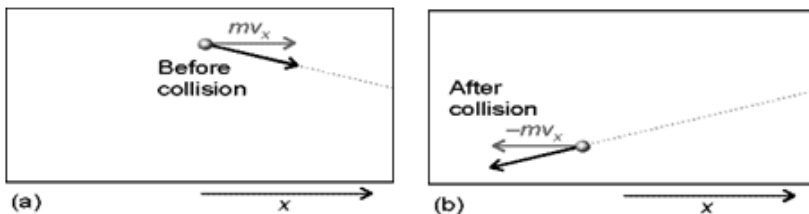
$$\Delta p = \frac{2mv_x^2 + 2mv_y^2 + 2mv_z^2}{l} \quad (1.3)$$

Padahal tiap-tiap partikel gas memiliki kecepatan gerak yang tidak sama, sehingga untuk memudahkannya diambil harga rata-ratanya, yaitu kecepatan rata-rata, $\bar{v}$. Oleh karena itu kecepatan rata-rata kuadrat dirumuskan sebagai:

$$\bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2}{N}, \quad (1.4)$$

Keterangan:

$\bar{v}^2$ = kecepatan rata-rata kuadrat
 v_1, v_2, v_3, v_n = kecepatan partikel 1, 2, 3, ..., n
 N = jumlah partikel



Gambar 1.3

Gerak molekul (a) ke arah kanan dan (b) kembali ke arah kiri

Masih ingatkah Anda akan hukum Newton II? Menurut hukum Newton II, gaya (F) ialah perubahan momentum per satuan waktu.

$$F = \frac{\text{Perubahan momentum}}{\text{waktu}} = \frac{\Delta p}{t}$$

$$= 2m\bar{v} \times \frac{\bar{v}}{l} = \frac{2m\bar{v}^2}{l} \quad (1.5)$$

Sementara itu, tekanan (P) didefinisikan sebagai gaya (F) tiap satuan luas

$$(A), \text{ sehingga } P = \frac{F}{A} = \frac{2m\bar{v}^2}{l} \times \frac{1}{A} \quad (1.6)$$

Setiap dinding kubus luasnya = l^2 , sehingga untuk seluruh dinding kubus, luasnya menjadi $A = 6l^2$ dan volume kubus adalah : $V = l^3$

$$\text{Oleh karena itu, } P = \frac{2m\bar{v}^2}{l} \times \frac{1}{6l^2} = \frac{2m\bar{v}^2}{6l^3} = \frac{m\bar{v}^2}{3V} \quad (1.7)$$

Andaikan dalam kubus itu ada N partikel, maka persamaan menjadi:

$$P = \frac{Nm\bar{v}^2}{3V} \text{ atau } PV = \frac{Nm\bar{v}^2}{3} \quad (1.8)$$

C. ENERGI KINETIK DAN AKAR KECEPATAN RATA-RATA KUADRAT

Telah Anda ketahui bahwa partikel suatu materi selalu bergerak. Gas sebagai suatu materi tentunya partikel-partikelnya juga selalu bergerak. Adanya partikel yang bergerak menimbulkan energi, yang dikenal sebagai energi kinetik. Energi kinetik sangat bergantung pada kecepatan gerak partikel dan ukuran partikel tersebut. Energi kinetik yang ditimbulkan oleh bola yang bergerak dengan kecepatan sama tentunya berbeda antara bola sepak dengan bola tenis, karena kedua bola memiliki massa yang berbeda. Demikian juga energi kinetik yang ditimbulkan oleh gerak partikel gas, sangat bergantung pada ukuran partikel gas dan kecepatan geraknya. Jika sejumlah partikel gas berada dalam suatu ruang, dan partikel tersebut saling bergerak, maka secara konsep harus dipahami adanya kecepatan rata-rata, $\bar{v}$. Energi kinetik yang ditimbulkan oleh gerak partikel gas, dirumuskan sebagai

$$E_k = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 \quad (1.9)$$

Keterangan:

E_k = energi kinetik

m = massa partikel

$\bar{v}$ = kecepatan rata-rata

Dengan demikian apabila, persamaan $PV = \frac{Nm\bar{v}^2}{3}$ dinyatakan

dengan energi kinetik, akan menjadi

$$PV = \frac{N}{3} \times 2E_k = \frac{2}{3}NE_k \quad (1.10)$$

Secara eksperimen telah Anda ketahui, bahwa persamaan gas ideal adalah:

$$PV = nRT \quad (1.11)$$

Apabila persamaan (1.10) dan persamaan (1.11) diperhatikan, maka dapat disimpulkan bahwa:

$$nRT = 2 / 3 NE_k \quad (1.12)$$

Persamaan (1.12.) mengisyaratkan adanya hubungan antara energy kinetik dengan temperatur, yaitu

$$E_k = \frac{3nRT}{2N} \quad (1.13)$$

Keterangan :

n = jumlah mol

N = jumlah partikel,

R = tetapan gas

Anda tentunya sudah memahami, bahwa dalam satu mol suatu zat terkandung sejumlah N_A partikel yang dikenal sebagai bilangan atau tetapan

$$\text{Avogadro. Jadi jika } n = \frac{N}{N_A}, \text{ persamaan menjadi } E_k = \frac{3RT}{2N_A} \quad (1.14)$$

Masih ingatkah Anda, bahwa hasil bagi antara tetapan gas dengan bilangan Avogadro dikenal sebagai tetapan Boltzman? Secara matematis hubungan antara bilangan Avogadro (N_A), tetapan gas (R) dan tetapan Boltzman(k), dituliskan sebagai

$$k = \frac{R}{N_A} . \quad (1.15)$$

Nilai tetapan tersebut, adalah:

Tetapan gas, $R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

Bilangan Avogadro, $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ partikel mol}^{-1}$

Tetapan Boltzman, $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J partikel}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

Akhirnya, jika ditata ulang akan diperoleh hubungan antara energi kinetik dengan temperatur,

$$E_k = \frac{3}{2} kT . \quad (1.16)$$

Persamaan terakhir menunjukkan bahwa energi kinetik sangat bergantung pada temperaturnya.

Sebelumnya Anda juga telah memahami bahwa energi kinetik berhubungan dengan kecepatan, seperti pada persamaan (1.9), yaitu

$$E_k = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 .$$

Melalui persamaan (1.9) dan persamaan (1.14) dapat dirumuskan akar kecepatan rata-rata kuadrat (*root mean square velocity* = v), yaitu :

Akar kecepatan rata-rata kuadrat

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \text{ atau } v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (1.17)$$

Masih ingatkah Anda akan pelajaran di SMA, bahwa massa molar (M) adalah massa 1 mol partikel yang besarnya sama dengan M_r gram per mo



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Bagaimana pengaruhnya terhadap energi kinetik rata-rata molekul air bila air panas dipindahkan dari ketel ke cangkir pada suhu tetap?
- 2) Apakah energi kinetik rata-rata partikel gas akan berubah jika dengan pengaruh sinar matahari menyebabkan pengaruh suhu dari 25°C menjadi 37°C ?
- 3) Bagaimana perubahan energi kinetik rata-rata molekul gas dalam suatu aerosol jika suhu dinaikkan dari 300 K menjadi 900 K?

- 4) Suatu wadah bervolume 2 L mengandung 0,625 mol gas He pada suhu 25°C . He merupakan gas monoatomik sehingga hanya memiliki energi kinetik translasional. Berapa energi kinetik totalnya? Berapa energi kinetik rata-rata per atom He? Berapa energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu dari 25°C menjadi 125°C ?
- 5) Tentukan perbandingan v_{rms} gas H_2S dan NH_3 pada suhu 25°C .

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Jika suhu tidak berubah, energi kinetik rata-rata tidak berubah.
- 2) Dengan bertambahnya suhu menyebabkan bertambahnya energi kinetik rata-rata partikel gas.
- 3) Sesuai dengan kenaikan suhunya karena kenaikan suhu menjadi tiga kali maka kenaikan energi kinetik rata-rata juga menjadi tiga kali.
- 4) $E_k = 3/2 nRT = 3/2 \cdot 0,625 \cdot 8,3145 \cdot 298,2 \text{ J} = 2,32 \cdot 10^3 \text{ J} = 2,32 \text{ kJ}$
 $E_k = 3/2 kT = 3/2 \cdot 1,38066 \cdot 10^{-23} \cdot 298,2 \text{ J} = 6,175 \cdot 10^{-21} \text{ J/atom}$
 $E_{k(25)} = 3/2 nRT = 3/2 \cdot nR \cdot 298,2 \text{ J}$
 $E_{k(125)} = 3/2 nRT = 3/2 \cdot nR^2 \cdot 98,2 \text{ J}$
 $\Delta E = 3/2 nRT (T_2 - T_1) = 3/2 \cdot 0,625 \cdot 8,3145 \cdot 100 \text{ J} = 779 \text{ J}$
- 5) 0,71



RANGKUMAN

Partikel gas bergerak menurut gerak Brown, gerak zig-zag atau acak, yang menyebabkan timbulnya energi (panas) dan momentum. Tekanan gas terjadi karena adanya gaya antar partikel gas dan dinding wadah, yang menyebabkan kecepatan gerak partikel gas menjadi berbeda. Oleh karena kecepatan gerak yang berbeda mengakibatkan distribusi energi menjadi berbeda pula. Adapun distribusi energi partikel gas telah dipelajari oleh Maxwell dan Boltzman, yang dikenal dengan distribusi Maxwell-Boltzman.

- 1) Teori kinetik gas didekripsikan melalui asumsi fundamental tentang struktur gas, yang meliputi:
- 2) Gas terdiri dari sejumlah besar partikel (atom atau molekul) yang bergerak relatif cepat menurut garis lurus (gerak Newton) pada kondisi tanpa suatu medan gaya,
- 3) Partikel-partikel gas dapat bertumbukan satu dengan yang lain, demikian juga dengan dinding wadah yang menyebabkan terjadinya tekanan gas,

- 4) Tidak ada gaya tarik-menarik antara partikel-partikel gas maupun antara partikel gas dengan dinding wadah;
- 5) Volume partikel gas sangat kecil sehingga dapat diabaikan terhadap volum total;
- 6) Energi kinetik rata-rata partikel gas sangat bergantung pada suhu.

Kecepatan merupakan suatu besaran vektor, yang didefinisikan sebagai perubahan jarak per perubahan waktu, dl/dt . Kecepatan partikel gas sangat bergantung pada suhu sistem. Jika diandaikan hanya terjadi tumbukan antara partikel gas dengan dinding wadah maka perubahan momentum partikel gas sepanjang sumbu x, y dan z masing-masing sebesar $2mv_x$, $2mv_y$ dan $2mv_z$. Perubahan momentum total per satuan waktu menjadi:

$$\Delta p = \frac{2mv_x^2 + 2mv_y^2 + 2mv_z^2}{l}$$

dan berdasarkan hukum Newton II dapat ditentukan besarnya tekanan gas, yakni:

$$P = \frac{Nm\bar{v}^2}{3V} \text{ atau } PV = \frac{Nm\bar{v}^2}{3}$$

Energi kinetik terjadi karena partikel yang bergerak, yang sangat bergantung pada kecepatan gerak dan ukuran partikel yang bergerak, yang dirumuskan sebagai

$$E_k = \frac{1}{2}m\bar{v}^2$$

Bila diterapkan untuk gas ideal maka diperoleh persamaan:

$$E_k = \frac{3nRT}{2N} \text{ atau } E_k = \frac{3RT}{2N_A}$$

dan akar kecepatan rata-rata kuadrat (*root mean square velocity* = v) dirumuskan sebagai:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \text{ atau } v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

**TES FORMATIF 1**

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Akar kecepatan kuadrat rata-rata suatu molekul gas sederhana sebanding dengan
 - A. kuadrat suhu mutlak
 - B. massa molekul gas
 - C. suhu mutlak
 - D. akar kuadrat suhu mutlak

- 2) Energi kinetik molar 0,40 mol Argon pada suhu 400 K akan sama dengan energi kinetik molar 0,30 mol Helium pada suhu
 - A. 300 K
 - B. 346 K
 - C. 400 K
 - D. 533 K

- 3) Gas oksigen dalam silinder didinginkan dari 300 K menjadi 150 K maka energi kinetik rata-rata gas oksigen menjadi
 - A. 1/4 kali lebih kecil
 - B. 1/2 kali lebih kecil
 - C. 3/4 kali lebih kecil
 - D. Tetap

- 4) Akar kecepatan kuadrat rata-rata gas CO₂ pada suhu 25° C adalah
 - A. 277
 - B. 298
 - C. 321
 - D. 411

- 5) Energi kinetik translasional 1 mol gas adalah tetap pada suhu tetap. Hal ini sesuai dengan postulat teori kinetik molekular yang mcngasumsikan bahwa
 - A. tumbukan antarpartikel gas adalah lenting sempurna
 - B. molekul-molekul gas berupa bulatan padat
 - C. antara molekul-molekul gas tidak terjadi gaya tarik-menarik
 - D. jarak antar inti merupakan jarak paling dekat antar molekul

- 6) Gas nitrogen sebanyak 0,80 mol memiliki energi kinetik translasional total yang sama dengan 0,50 mol gas metana pada suhu 400 K bila ditentukan pada suhu
- 400 K
 - 350 K
 - 300 K
 - 250 K
- 7) Sebanyak 200 mol gas CO_2 pada tekanan 1 atm dan volume $5,40 \text{ dm}^3$ memiliki energi kinetik translasional total sebesar
- 205,25 J
 - 410,5 J
 - 61,75 J
 - 821,0 J
- 8) Energi kinetik translasional rata-rata per molekul dari 200 mol gas CO_2 pada tekanan 1 atm dan volume $5,40 \text{ dm}^3$ adalah
- $4,54 \times 10^{-21} \text{ J}$
 - $4,54 \times 10^{-20} \text{ J}$
 - $4,54 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $4,54 \times 10^{-18} \text{ J}$
- 9) Akar kecepatan kuadrat rata-rata gas N_2 pada suhu 25° C adalah
- $515,35 \text{ m s}^{-1}$
 - $585,35 \text{ m s}^{-1}$
 - $645,35 \text{ m s}^{-1}$
 - $695,35 \text{ m s}^{-1}$
- 10) Gas H_2 pada suhu 80° C memiliki akar kecepatan kuadrat rata-rata sebesar....
- $2098,60 \text{ m s}^{-1}$
 - $1049,30 \text{ m s}^{-1}$
 - $524,80 \text{ m s}^{-1}$
 - $263,40 \text{ m s}^{-1}$

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan kegiatan belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

KEGIATAN BELAJAR 2

Distribusi Kecepatan Molekul

Kita sudah mempelajari bahwa teori kinetika gas memungkinkan kita untuk menghitung nilai rata-rata dari sifat gas. Selain itu, teori ini juga memungkinkan kita untuk membahas rentangan nilai di sekitar nilai rata-rata dan menghitung fraksi molekul yang mempunyai kecepatan pada jarak tertentu. Selanjutnya kita perlu mendekati beberapa sifat nilai rata-rata dan perhitungannya. Secara singkat, nilai rata-rata sifat X mempunyai nilai berapa pun dari suatu jarak nilai kontinyu, misalnya kecepatan, dirumuskan sebagai: $\langle x \rangle = \int x f(x) dx$. Fungsi, $f(x)$, yang disebut distribusi sifat X , menyatakan letaknya sifat tersebut dalam jarak X sampai $X + dX$. Jadi $f(v)$ apabila merupakan distribusi kecepatan v , maka $f(v)dv$ adalah peluang letaknya kecepatan itu dalam jarak v dan $v + dv$. Contoh nyata diberikan dalam pembahasan di bawah ini.

A. DISTRIBUSI KECEPATAN MAXWELL BOLTZMAN

Setelah kita memahami distribusi komponen kecepatan molekul dalam gas ideal, ternyata pemahaman kita sangat berguna untuk melakukan perhitungan yang berhubungan dengan laju reaksi dan sifat molekul. Dalam fisika, khususnya mekanika statistik, distribusi Maxwell-Boltzmann menggambarkan kecepatan partikel gas, yaitu partikel bergerak bebas di antara tumbukan-tumbukan kecil, tetapi tidak berinteraksi satu sama lain, dan dipengaruhi oleh temperatur sistem, massa partikel, dan kecepatan partikel. Partikel gas dapat berupa atom atau molekul.

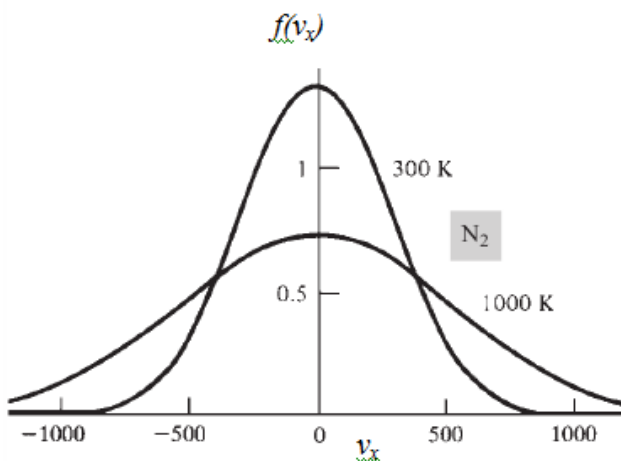
Distribusi Maxwell-Boltzmann merupakan distribusi probabilitas untuk kecepatan sebuah partikel yang berwujud gas. Ini berarti bahwa pada suhu tertentu, besaran vektor kecepatan partikel akan memiliki kecepatan yang dipilih secara acak dari distribusi, tetapi lebih cenderung berada dalam satu rentang dari beberapa kecepatan yang lain.

Penjabaran secara matematika terhadap distribusi ini relatif cukup sulit dipahami bagi mereka yang kurang menguasai teori probabilitas. Bagi Anda yang berkeinginan untuk memahaminya lebih lanjut dipersilakan untuk membaca buku teks Kimia Fisika yang dianjurkan.

Bentuk persamaan untuk distribusi kecepatan partikel yang bergerak arah sumbu x , adalah

$$f(v_x) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m v_x^2}{2kT} \right) \quad (1.18)$$

Persamaan (1.18.) dikenal sebagai distribusi kecepatan Maxwell-Boltzman.



Gambar 1.4
Distribusi kecepatan gas N_2 arah sumbu x

Selanjutnya kita dapat menurunkan distribusi kecepatan partikel yang tidak tergantung pada arah gerakannya, yang dikenal dengan distribusi kecepatan Maxwell. Secara matematika distribusi kecepatan Maxwell dinyatakan sebagai suatu fungsi :

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(-\frac{M v^2}{2RT} \right) \quad (1.19)$$

$$\text{atau } f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) \quad (1.20)$$

Keterangan :

v = kecepatan partikel

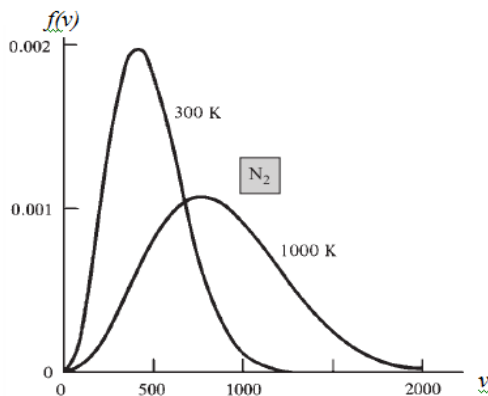
m = massa partikel

M = massa molar

R = tetapan gas

k = tetapan Boltzman

T = temperatur



Gambar 1.5
Distribusi kecepatan untuk gas N_2

B. KECEPATAN PALING BOLEH JADI DAN KECEPATAN RATA-RATA

Bagaimanakah pemahaman Anda terhadap Gambar 1.5 di atas? Pada distribusi Maxwell, menunjukkan bahwa sebagian besar partikel memiliki kecepatan tertentu pada titik maksimal. Apabila temperatur dinaikkan, titik maksimal akan bergeser ke arah kecepatan yang lebih besar, dengan bentuk kurva yang semakin melebar. Kecepatan partikel pada titik maksimal, dinamakan kecepatan paling boleh jadi (*the most probable speed* = v_{mp}), dan dapat ditentukan berdasarkan persamaan Maxwell (1.19 atau 1.20).

Pada titik optimum, harga diferensial $\frac{df(v)}{dv} = 0$.

Cobalah Anda lakukan perhitungan diferensialnya, jika benar maka Anda akan mendapatkan bahwa:

$$v_{mp} = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \quad \text{atau} \quad v_{mp} = \left(\frac{2RT}{M}\right)^{1/2} \quad (1.21)$$

Pada Kegiatan Belajar 1 sebelumnya, Anda telah mengenal istilah akar kecepatan rata-rata kuadrat, $v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ yaitu persamaan (1.17). Selanjutnya bagaimanakah hubungan antara v_{mp} dengan $\bar{v}_{rms}$? Dari kedua persamaan, yaitu (1.17) dan (1.21) Anda dapat menentukan, bahwa:

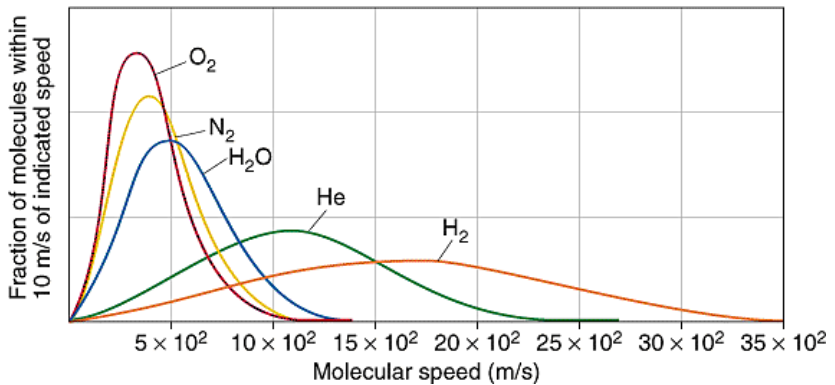
$$v_{mp} = \sqrt{\frac{1}{3}} v_{rms} \quad (1.22)$$

Dalam hal partikel gas yang bergerak, mudah dipahami bahwa sebenarnya partikel tersebut bergerak dengan kecepatan yang bervariasi, sehingga perlu ditentukan berapa besarnya kecepatan rata-rata (*average speed* = $\bar{v}$). Kecepatan rata-rata ini sangat penting untuk menentukan besarnya jalan bebas rata-rata (*mean free path*) dan densitas gas. Besarnya kecepatan rata-rata, adalah:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^3 dv$$

$$\bar{v} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \frac{1}{2(m/2kT)^2} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$$

$$\text{Atau } \bar{v} = 4 \left(\frac{8RT}{\pi M}\right)^{1/2} \quad (1.23)$$



Gambar 1.6
Distribusi molekul dengan kecepatan v dan kebergantungannya terhadap suhu dan massa

Contoh soal:

Tentukan perbandingan kecepatan rata-rata antara gas-gas oksigen dan hidrogen dalam suatu ruang tertentu.

Petunjuk jawab contoh soal:

Berdasarkan persamaan (1.23) dapat ditentukan perbandingan kecepatan rata-rata antara gas-gas oksigen dan hidrogen sebagai berikut:

$$\frac{\bar{v}_{O_2}}{\bar{v}_{H_2}} = \left(\frac{M_{H_2}}{M_{O_2}} \right)^{1/2}$$

$$\frac{\bar{v}_{O_2}}{\bar{v}_{H_2}} = \left(\frac{2}{32} \right)^{1/2}$$

$$\frac{\bar{v}_{O_2}}{\bar{v}_{H_2}} = \left(\frac{1}{16} \right)^{1/2}$$

$$\frac{\bar{v}_{O_2}}{\bar{v}_{H_2}} = \frac{1}{4}$$

C. LAJU DIFUSI DAN EFUSI GAS (HUKUM GRAHAM)

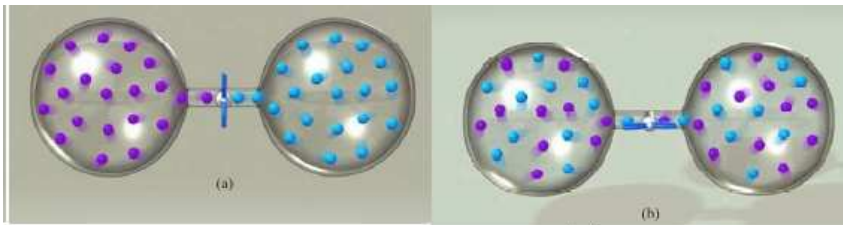
Marilah kita pikirkan bersama! Mengapa angin dari luar rumah dapat kita rasakan apabila angin tersebut masuk ke dalam rumah kita? Yah betul, semua itu terjadi karena perbedaan tekanan. Dalam hal ini, tekanan angin lebih tinggi daripada tekanan udara di dalam rumah, maka angin dapat masuk ke dalam rumah. Lalu berapa kecepatan angin yang masuk ke dalam rumah?

Apa yang terjadi apabila gas berada dalam suatu ruang yang dipisahkan dengan ruang lain yang dibatasi sekat yang memiliki lubang kecil? Gerakan partikel gas secara acak memberikan dua kemungkinan yang dapat diamati, yaitu difusi dan efusi. Difusi adalah pencampuran gas-gas sebagai hasil gerak acak dan seringnya terjadi tumbukan antar partikel, sedangkan efusi adalah lolosnya partikel gas dari suatu wadah menuju wadah yang vakum. Pada bagian ini kita akan membahas tentang laju efusi gas.

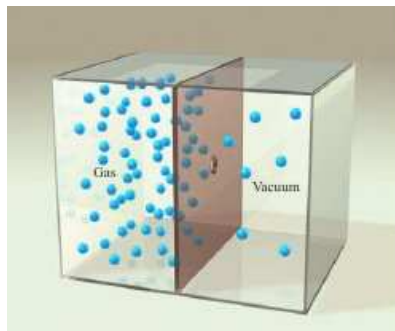
Salah satu keberhasilan teori kinetik gas adalah kemampuannya untuk menjelaskan fenomena difusi dan efusi. Hukum Graham menyatakan bahwa pada tekanan dan temperatur yang sama, banyak gas (n) yang mengalami difusi atau efusi berbanding terbalik dengan akar massa molar (M) gas tersebut.

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (1.24)$$

Ini menunjukkan bahwa partikel gas yang massanya lebih besar berdifusi lebih lambat daripada partikel gas yang lebih ringan.



Gambar 1.7
Gas berdifusi setelah kran dibuka (Atkins, 2010)



Gambar 1.8
Efusi gas dari suatu ruang menuju ruang vakum (Atkins, 2010)

Misalkan dua jenis gas dengan massa molar, M_1 dan M_2 berpindah melalui sekat berpori secara efusi ke dalam ruang hampa di sebelahnya. Pada tekanan dan temperatur yang sama, jumlah molekul kedua gas yang berpindah tiap satuan waktu, masing-masing adalah n_1 dan n_2 per satuan waktu. Jumlah molekul n_1 dan n_2 ini bergantung kepada banyaknya molekul asal N_1 dan N_2 serta kecepatan rata-rata $\bar{v}_1$ dan $\bar{v}_2$ gas bersangkutan.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{N_1}{N_2} \times \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2}$$

Pada tekanan dan temperatur yang sama, energi kinetik molekul bergantung pada massa molekul tersebut, yaitu: $\frac{1}{2} m_1 \bar{v}_1^2 = \frac{1}{2} m_2 \bar{v}_2^2$ sedangkan menurut Avogadro

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1}{M_2} \text{ sehingga } \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (1.25)$$

Jika persamaan (1.24.) disubsitusikan ke dalam persamaan (1.25) akan diperoleh

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{N_1}{N_2} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (1.26)$$

Menurut hukum Avogadro, pada tekanan dan temperatur yang sama, sejumlah gas yang volumenya sama juga akan mengandung jumlah partikel yang sama, $N_1 = N_2$, maka jelas bahwa persamaan (1.26.) sesuai dengan hukum Graham, $\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$.

Contoh soal:

Tentukan perbandingan banyak mol gas-gas nitrogen dan hidrogen yang telah mengalami difusi dalam suatu ruang tertentu.

Petunjuk Jawab contoh soal:

Berdasarkan persamaan (1.26) dapat ditentukan perbandingan banyak mol gas-gas nitrogen dan hidrogen sebagai berikut:

$$\frac{n_{N_2}}{n_{H_2}} = \left(\frac{M_{H_2}}{M_{N_2}} \right)^{1/2} \quad \frac{\bar{v}_{O_2}}{\bar{v}_{H_2}} = \left(\frac{2}{28} \right)^{1/2} \quad \frac{\bar{v}_{O_2}}{\bar{v}_{H_2}} = \left(\frac{1}{14} \right)^{1/2}$$



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Apabila energi kinetik rata-rata sebuah atom atau molekul adalah $3/2k_B T$, jelaskan apakah energi kinetik rata-rata sama dengan $1/2m\langle v \rangle^2$?
- 2) Bagaimana hubungan antara suhu dan fraksi molekul dengan kecepatan tertentu menurut Maxwell?
- 3) Tentukan kecepatan paling mungkin gas O_2 pada suhu $25^\circ C$!
- 4) Tentukan perbandingan kecepatan paling mungkin antara gas H_2 dan F_2 pada suhu $25^\circ C$!
- 5) Apabila kecepatan N_2 adalah $2.10^3 \text{ m det}^{-1}$, tentukan harga distribusi probabilitas, $p(c)$ pada suhu $27^\circ C$!

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Energi kinetik rata-rata adalah $\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = 3/2 k_B T$ dan $\langle v^2 \rangle \neq \langle v \rangle^2$.
- 2) Suhu makin tinggi, fraksi molekul dengan kecepatan tertentu makin besar.
- 3) $393,61 \text{ m det}^{-1}$
- 4) $\sqrt{19}$
- 5) Gunakan persamaan (1.18)



RANGKUMAN

Distribusi kecepatan partikel gas telah dipelajari oleh Maxwell dan Boltzmann, yang didefinisikan sebagai

$$\frac{dN}{N} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} c^2 e^{-mc^2/2kT} dc$$

Fraksi partikel dengan kecepatan tertentu sangat bergantung pada suhu. Pada suhu rendah atau suhu ruang, pola distribusi partikel gas menunjukkan pola yang langsung, sedangkan pada suhu lebih tinggi memiliki pola yang lebar. Kurva dengan pola lebih lebar menunjukkan

bahwa jumlah partikel dengan energi kinetik tinggi relatif lebih banyak. Partikel dengan energi kinetik relatif besar memungkinkan terjadinya reaksi, yakni apabila energi kinetik melampaui energi aktivasi. Energi aktivasi merupakan energi minimal yang dibutuhkan untuk berlangsungnya suatu reaksi.

Kecepatan partikel pada titik maksimum, dikenal dengan kecepatan paling mungkin (v_{mp}), yang didefinisikan sebagai:

$$v_{mp} = \left(\frac{2RT}{M} \right)^{1/2}$$

Dalam perhitungan jarak bebas rata-rata dan idensitas gas yang diperhitungkan adalah kecepatan rata-rata, yang didefinisikan sebagai:

$$\bar{v} = \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{1/2}$$



TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Kecepatan rata-rata molekul gas paling besar adalah
 - A. 1,0 mol N_2 pada 560 K
 - B. 0,20 mol CO_2 pada 440 K
 - C. 0,5 mol Ne pada 500 K
 - D. 2,0 mol He pada 140 K
- 2) Jika pada suhu 350 K kecepatan difusi gas NH_3 adalah 3,32 kali lebih cepat daripada gas X maka massa molekul gas X adalah
 - A. 45,5
 - B. 56,5
 - C. 112,0
 - D. 188,0
- 3) Pada suhu sama kecepatan difusi gas O_2 sama dengan ... kali kecepatan difusi gas Helium.
 - A. 8
 - B. 4

- C. 2,8
D. 0,35
- 4) Kecepatan rata-rata gas SO_2 pada suhu 25°C adalah
A. $278,25 \text{ m s}^{-1}$
B. $314,13 \text{ m s}^{-1}$
C. $340,79 \text{ m s}^{-1}$
D. $411,21 \text{ m s}^{-1}$
- 5) Suatu gas dalam wadah tertutup dengan volume tertentu pada suhu 250 K dan tekanan 400 mmHg dipanaskan hingga suhu 375 K sehingga tekanan menjadi 600 mmHg maka kecepatan rata-rata molekul akan bertambah dengan faktor
A. 1,22
B. 1,50
C. 2,00
D. 2.25
- 6) Pada suhu 298 K gas berikut yang memiliki kecepatan rata-rata paling kecil adalah
A. CO_2 pada $0,20 \text{ atm}$
B. He pada $0,40 \text{ atm}$
C. Ne pada $0,60 \text{ atm}$
D. CH_4 pada $0,80 \text{ atm}$
- 7) Fungsi distribusi variable x didefinisikan sebagai

$$M_n = \left(x^n \right) = \int_{-\infty}^{\infty} dx x^n f(x)$$
Maka harga M_2 adalah
A. $k_B T$
B. $k_B T / m$
C. $k_B T m$
D. $m / k_B T$
- 8) Bila fungsi distribusi didefinisikan seperti soal nomor 7 maka harga M_{2n+1} adalah
A. 0
B. 1
C. k_B
D. m

9) Pada suhu 300K H_2 memiliki kecepatan rata-rata sebesar

- A. $1,777 \text{ m s}^{-1}$
- B. $17,77 \text{ m s}^{-1}$
- C. $177,7 \text{ m s}^{-1}$
- D. 1777 m s^{-1}

10) Kecepatan paling mungkin He pada suhu 1200 K sebesar

- A. $2,2335 \text{ m s}^{-1}$
- B. $22,335 \text{ m s}^{-1}$
- C. $223,35 \text{ m s}^{-1}$
- D. $2233,5 \text{ m s}^{-1}$

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan kegiatan belajar 3. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

KEGIATAN BELAJAR 3

Ekipartisi Energi dan Kapasitas Kalor Gas

A. EKIPARTISI ENERGI

Marilah kita ingat kembali pelajaran fisika di SMA. Hukum Dalton tentang gas mengatakan, bahwa tekanan total campuran gas-gas yang tidak bereaksi sama dengan jumlah tekanan parsial komponen-komponen gas tersebut. Pada bagian terdahulu Anda sudah mempelajari tekanan gas. Apakah yang dimaksudkan dengan tekanan gas? Apabila jenis gas yang bercampur, diberi nomor sebagai 1, 2, 3 dst, maka tekanan parsial masing-masing, adalah P_1 , P_2 , P_3 , dst dengan jumlah molekul N_1 , N_2 , N_3 , dst, sehingga:

$$P_1V = N_1kT, P_2V = N_2kT, P_3V = N_3kT, \text{ dst.} \quad (1.27)$$

Tiap-tiap komponen gas memiliki massa: m_1 , m_2 , m_3 , dst., sesuai dengan persamaan $PV = \frac{Nm\bar{v}^2}{3}$ maka untuk tiap komponen,

$$P_1V = \frac{Nm_1\bar{v}_1^2}{3}, P_2V = \frac{Nm_2\bar{v}_2^2}{3}, P_3V = \frac{Nm_3\bar{v}_3^2}{3}, \text{ dst.} \quad (1.28)$$

Berdasarkan persamaan (1.27) dan (1.28), diperoleh:

$$\frac{1}{2}m_1\bar{v}_1^2 = \frac{3}{2}kT, \frac{1}{2}m_2\bar{v}_2^2 = \frac{3}{2}kT, \frac{1}{2}m_3\bar{v}_3^2 = \frac{3}{2}kT, \text{ dst.} \quad (1.29)$$

Suku di sebelah kiri dari persamaan (1.29.), yaitu $\frac{1}{2}m_1\bar{v}_1^2$ merupakan energi kinetik translasi rata-rata suatu gas. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa energi kinetik translasi suatu gas dalam campuran sama, yaitu. $E_k = \frac{3}{2}kT$, dan disebut prinsip ekuipartisi energi.

Marilah kita tinjau keadaan yang lain. Energi kinetik translasi yang berkaitan dengan molekul yang massanya m dan bergerak arah sumbu x , adalah $\frac{1}{2} m v_x^2$. Karena molekul tidak hanya bergerak ke arah sumbu x , tetapi juga arah sumbu y dan z , maka besarnya kecepatan rata-rata kuadrat, adalah $\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$.

Padahal arah x , y , dan z merupakan arah yang ekuivalen, sehingga:

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$$

Akibatnya

$$\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2 = 3\bar{v}_y^2 = 3\bar{v}_z^2$$

Energi kinetik rata-rata tiap molekul pada salah satu arah besarnya adalah sepertiga energi kinetik total, yaitu: $\frac{1}{2} m \bar{v}_x^2 = \frac{1}{6} m \bar{v}^2 = \frac{1}{2} kT$. Dengan demikian maka energi kinetik rata-rata tiap komponen, $E_k = \frac{1}{2} kT$.

Energi kinetik translasi mempunyai tiga komponen kecepatan, atau dikatakan mempunyai 3 derajat kebebasan (f). Sebenarnya molekul tidak hanya memiliki derajat kebebasan translasi, tetapi juga memiliki derajat kebebasan vibrasi dan rotasi. Energi vibrasi dan rotasi ini terutama dimiliki oleh molekul-molekul diatomik, triatomik, dan molekul-molekul poliatomik lainnya.

Derajat kebebasan menyatakan banyak bentuk energi yang dimiliki oleh molekul gas sesuai dengan jenis dan arah gerak, misalnya derajat kebebasan translasi, rotasi dan vibrasi. Jika energi kinetik rata-rata tiap molekul, $E_k = \frac{1}{2} kT$, dengan adanya f derajat kebebasan, maka energi tiap molekulnya, adalah

$$\bar{\varepsilon} = \frac{f}{2} kT \text{ dan energi total untuk } N \text{ molekul adalah}$$

$$N \bar{\varepsilon} = \frac{f}{2} N kT = \frac{f}{2} n RT.$$

Gas monoatomik memiliki derajat kebebasan, $f = 3$; gas diatomik suhu rendah (sekitar 250 K) memiliki derajat kebebasan, $f = 3$, gas diatomik suhu sedang (sekitar 500 K) memiliki derajat kebebasan, $f = 5$ dan gas diatomik

suhu tinggi (sekitar 1000 K) memiliki derajat kebebasan, $f = 7$. Besar energi kinetik dan energi dalam gas monoatomik berturut-turut sebesar:

$$E_k = f \left(\frac{1}{2} kT \right) = \frac{3}{2} kT$$

$$U = f \left(\frac{1}{2} NkT \right) = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT$$

Dalam pembahasan kita mengenai gas ideal, yang pada umumnya sifat ideal ini dimiliki oleh molekul-molekul kecil, kita dapat mengabaikan sumbangan energi kinetik vibrasi dan energi kinetik rotasi karena sangat kecil jika dibandingkan dengan energi kinetik translasinya. Namun apabila Anda ingin mempelajarinya lebih jauh, dipersilakan untuk mempelajari buku teks yang dirujuk.

B. KAPASITAS KALOR

Dalam Modul Kimia Fisika I, Anda sudah mempelajari energi dalam (U). Coba apakah Anda masih ingat apakah yang dimaksudkan dengan energi-dalam, dan apa hubungan antara energi-dalam dengan kapasitas kalor? Baik, seandainya Anda lupa, coba baca kembali Modul Anda, karena pemahaman Anda akan sangat membantu dalam pembahasan konsep kali ini. Pada pembahasan kali ini, kita akan mempelajari kapasitas kalor ditinjau dari teori kinetik gas.

Kapasitas kalor adalah energi dalam bentuk kalor yang harus ditambahkan ke dalam suatu sistem agar sistem mengalami kenaikan suhu sebesar 1 °C. Dalam keseharian, apabila kita ingin menjerang air maka kita harus memanaskannya. Jika air kita pandang sebagai sistem, maka banyaknya kalor yang harus diberikan agar suhu air naik 1 °C itulah yang disebut kapasitas kalor air. Apabila sistem berupa gas, maka kemungkinan kenaikan suhu gas dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu memanaskannya pada tekanan tetap atau memanaskannya pada volume tetap. Cobalah Anda ingat kembali apa bedanya kedua cara pemanasan tersebut pada sistem gas. Ingatlah bahwa ada kapasitas kalor pada volume tetap (c_v) dan kapasitas kalor pada tekanan tetap (c_p).

Energi-dalam adalah energi total yang dimiliki oleh suatu sistem. Dalam termodinamika, kita tidak dapat menentukan besarnya energi-dalam melainkan hanya dapat menentukan berapa perubahan energi-dalamnya. Bila dipandang sebagai model molekuler, energi-dalam merupakan jumlah energi-energi yang dimiliki oleh tiap-tiap molekul, yang besarnya adalah $U = \frac{1}{2} kT$. Mengapa?

Secara molekuler molekul memiliki energi kinetik karena molekul-molekul selalu bergerak, sedangkan energi potensialnya dapat diabaikan keberadaannya karena sangat kecil. Jika energi-dalam merupakan energi total yang dimiliki molekul, sedangkan energi total terdiri atas energi kinetik dan energi potensial, padahal energi potensialnya sangat kecil, praktis energi total tadi hanyalah energi kinetik belaka. Oleh karena itu, apabila energi kinetik $E_k = \frac{1}{2} kT$ maka besarnya energi-dalam juga sama dengan energi kinetiknya, yaitu $U = E_k = \frac{1}{2} kT$. Mudah bukan?

Untuk N molekul gas dengan f derajat kebebasan, $U = \frac{f}{2} NkT = \frac{f}{2} nRT$. Bagi sejumlah 1 mol gas ($n = 1$), maka besarnya energi dalam adalah $U = \frac{f}{2} RT$. Hubungan antara energi-dalam dengan kapasitas kalor, adalah $c_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$. Jadi apabila $U = \frac{f}{2} NkT$, maka $c_v = \frac{f}{2} Nk$. Atau apabila $U = \frac{f}{2} nRT$ maka $c_v = \frac{f}{2} nR$. Bila sistem berupa gas sebanyak 1 mol, maka kapasitas kalornya disebut kapasitas kalor molar gas. Jadi hipotesis tersebut akan benar kalau untuk setiap 1 mol gas, maka kapasitas kalor molarnya adalah $c_v = \frac{f}{2} R$. Dalam Modul Kimia Fisika I, Anda telah mempelajari bahwa untuk gas ideal berlaku $c_p = c_v + R$, sehingga $c_p = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) R$. maka besarnya $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{f+2}{f}$. Untuk membuktikannya, marilah cermati Tabel.

Tabel 1.1
Hubungan antara f , c_p/R , c_v/R , dan γ

f	c_p/R	c_v/R	γ
3	2,5	1,5	1,667
4	3	2	1,500
5	3,5	2,5	1,400
6	4	3	1,333
7	4,5	3,5	1,284

Selanjutnya bandingkan Tabel 1.1. dengan hasil eksperimen pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2
Data eksperimen beberapa jenis gas

Gas	γ	c_p/R	c_v/R	$(c_p - c_v)/R$
He	1,66	2,5	1,51	0,991
Ne	1,64	2,5	1,52	0,975
Ar	1,67	2,51	1,51	1,005
Xe	1,69	2,49	1,48	1,01
Rn	1,67	2,50	1,50	1,00
H ₂	1,40	3,47	2,47	1,00
O ₂	1,40	3,53	2,52	1,01
N ₂	1,40	3,50	2,51	1,00
CO	1,42	3,50	2,50	1,00
NO	1,43	3,59	2,52	1,07
Cl ₂	1,36	4,07	3,00	1,07
CO ₂	1,29	4,47	3,47	1,00
NH ₃	1,33	4,41	3,32	1,10
CH ₄	1,30	4,30	3,30	1,00
Udara	1,40	3,50	2,50	1,00

Berdasarkan Tabel 1.1. dan Tabel 1.2. ternyata dapat disimpulkan bahwa dalam batas-batas tertentu, perhitungan berdasarkan teori kinetik gas sangat sesuai dengan fakta hasil eksperimen, yaitu harga $\frac{c_p - c_v}{R} = 1$.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Satu mol gas HBr berada dalam suatu wadah pada tekanan 1 atm dan suhu 400K.
 - A. Tentukan fungsi partisi translasi gas HBr!
 - B. Jika tekanan wadah diperkecil menjadi 0,5 atm, tentukan fungsi partisi translasi gas HBr sekarang!
- 2) Tentukan fungsi partisi gas argon pada tekanan 1 atm dan suhu 300K. Bandingkan bila ditentukan pada suhu 1000K!
- 3) Bila diketahui jarak antar inti molekul HBr adalah 0,142 nm, tentukan fungsi partisi rotasi pada suhu 300K!
- 4) Jika diketahui jarak ikatan keseimbangan dalam molekul A_2 adalah 0,074 nm ($B_e = 20,3243 \text{ cm}^{-1}$) dan frekuensi vibrasi adalah $2553,8 \text{ cm}^{-1}$, tentukan fungsi partisi total molekul A_2 pada tekanan 1 atm dan suhu 1000K!
- 5) Bila diketahui jarak antarinti molekul HBr adalah 0,142 nm, tentukan kapasitas panas molar molekul HBr pada volume tetap dan tekanan tetap!

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) A. $5,98 \cdot 10^6 N_{av}$
 B. $11,96 \cdot 10^6 N_{av}$
- 2) $1,01 \cdot 10^7 N_{av}$
 $2,05 \cdot 10^8 N_{av}$, fungsi partisi translasi berbanding lurus terhadap suhu, makin tinggi suhu makin besar fungsi partisi translasi.
- 3) 24,63
- 4) $2,08 \cdot 10^8 N_{av}$
- 5) $20,785 \text{ J K}^{-1}$



Energi suatu partikel didistribusikan secara merata ke semua jenis gerak partikel itu. Suatu partikel dapat mengalami gerak translasi, vibrasi maupun rotasi. Oleh karena itu, dikenal adanya energi translasi, vibrasi maupun rotasi. Pembahasan energi suatu partikel merupakan pembahasan tentang sifat keadaan partikel itu. Sifat keadaan suatu sistem dapat dipahami melalui fungsi partisi. Fungsi partisi merupakan inti mekanika statistik tentang partikel sistem, sehingga sifat sistem seperti energi dalam, U , entropi, S , dan tekanan, P dapat diungkap dengan menggunakan fungsi partisi. Sesuai dengan jenis gerak partikel, fungsi partisi dibedakan menjadi fungsi partisi translasi, rotasi, dan vibrasi.

Suatu partikel yang terdiri dari N atom memiliki derajat kebebasan total sebanyak $3N$. Untuk gerak translasi dan rotasi, tiap derajat kebebasan memiliki energi sebesar $\frac{1}{2} kT$, sedangkan untuk gerak vibrasi meliputi 2 komponen, yakni energi kinetik dan potensial sehingga setiap derajat kebebasan memiliki energi sebesar kT . Partikel gas dapat berupa molekul monoatomik, diatomik, maupun triatomik. Molekul triatomik dapat berupa molekul linear maupun nonlinear. Gas monoatomik memiliki 3 derajat kebebasan, yang meliputi derajat kebebasan translasional, yang masing-masing memiliki energi sebesar $\frac{1}{2} kT$, sehingga energi translasi total untuk 1 molekul monoatomik sebesar $\frac{3}{2} kT$. Gas diatomik memiliki 6 derajat kebebasan, yang meliputi 3 derajat kebebasan translasional, 2 derajat kebebasan rotasional, dan 1 derajat kebebasan vibrasional. Molekul gas triatomik linear memiliki 9 derajat kebebasan yang terdiri dari 3 derajat kebebasan translasional, 2 derajat kebebasan rotasional, dan 4 derajat kebebasan vibrasional, yang masing-masing memiliki energi sebesar $3(\frac{1}{2} kT)$, $2(\frac{1}{2} kT)$, dan $4(kT)$. Molekul N -atomik linear memiliki derajat kebebasan vibrasional sebesar $(3N-5)$. Molekul gas triatomik nonlinear memiliki 9 derajat kebebasan yang terdiri dari 3 derajat kebebasan translasional, 3 derajat kebebasan rotasional, dan 3 derajat kebebasan vibrasional, yang masing-masing memiliki energi sebesar $3(\frac{1}{2} kT)$, $3(\frac{1}{2} kT)$, dan $3(kT)$. Molekul N -atomik nonlinear memiliki derajat kebebasan vibrasional sebesar $(3N-6)$.

Kapasitas kalor secara umum didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan kalor dan perubahan suhu (turunan kalor terhadap suhu) atau hubungan antara sejumlah kalor yang dipindahkan dan perubahan suhu yang secara matematik dapat dituliskan sebagai:

$$C = dq/dT$$

Kapasitas kalor sering juga dikatakan sebagai tenaga yang harus ditambahkan sebagai kalor untuk menaikkan temperatur benda sebanyak satu derajat (banyak energi kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu sistem sebanyak satu derajat).

Biasanya dinyatakan untuk per mol zat. Kapasitas kalor suatu gas dapat digunakan sebagai ukuran kemampuan gas untuk menyimpan energi. Makin banyak jumlah atom dalam suatu partikel gas, makin besar kemampuan atom-atom untuk menyimpan energi, terutama pada derajat kebebasan vibrasional sehingga kapasitas kalor gas menjadi makin besar.

Kapasitas kalor dibedakan menjadi dua macam, yakni kapasitas kalor yang diukur pada tekanan tetap, C_p dan yang diukur pada volume tetap, C_v , yang masing-masing didefinisikan sebagai:

$$C_p = (\partial H / \partial T)_p$$

$$C_v = (\partial U / \partial T)_v$$

Untuk n mol gas sempurna (ideal), hubungan antara C_p dan C_v dapat diturunkan sebagai :

$$C_p - C_v = nR$$



TES FORMATIF 3

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Fungsi partisi untuk gerak translasional molekul N_2 yang bergerak bebas sepanjang satu dimensi dari suatu wadah berbentuk kubus yang bervolume 1 L dan suhu 25°C adalah
 - A. $5,26 \times 10^9$
 - B. $5,26 \times 10^8$
 - C. $5,26 \times 10^7$
 - D. $5,26 \times 10^6$
- 2) Gas monoatomik memiliki derajat kebebasan sebesar
 - A. 1
 - B. 2
 - C. 3
 - D. 4

- 3) Gas monoatomik dapat mengalami gerak
 - A. translasi
 - B. vibrasi
 - C. rotasi
 - D. translasi dan rotasi
- 4) Gas diatomik dapat mengalami gerak
 - A. translasi dan rotasi
 - B. translasi dan vibrasi
 - C. rotasi dan vibrasi
 - D. translasi, rotasi, dan vibrasi
- 5) Gas triatomik memiliki derajat kebebasan sebesar
 - A. 6
 - B. 7
 - C. 8
 - D. 9
- 6) Pada suhu sama molekul triatomik linear dan nonlinear memiliki selisih energi ...
 - A. 0,5 kT
 - B. 1,0 kT
 - C. 1,5 kT
 - D. 2,0 kT
- 7) Molekul gas monoatomik hanya melakukan gerak translasi sehingga memiliki kapasitas kalor pada volume tetap sebesar..... $J K^{-1}$.
 - A. 4,672
 - B. 6,235
 - C. 9,353
 - D. 12,471
- 8) C_p selalu memiliki harga lebih besar dibandingkan C_v sebab....
 - A. pada tekanan tetap sistem dapat melakukan kerja ekspansi
 - B. pada tekanan tetap terjadi perubahan entalpi
 - C. pada tekanan tetap terjadi perubahan energi dalam
 - D. pada volume tetap terjadi perubahan entalpi
- 9) Untuk n mol gas sempurna berlaku hubungan
 - A. $C_v - C_p = nR$
 - B. $C_p - C_v = nR$

C. $C_v - C_p = R$

D. $C_p - C_v = R$

10) Diketahui tetapan rotasi B untuk H_2 sebesar $60,80 \text{ cm}^{-1}$, maka fungsi partisi rotasi untuk molekul H_2 pada suhu 300 K adalah

A. 1,8925

B. 2,8487

C. 3,7850

D. 5,6775

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 3 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 3.

$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$
--

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 3, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

- 1) D.
- 2) B.
- 3) B.
- 4) D.
- 5) A.
- 6) D.
- 7) A.
- 8) A
- 9) A
- 10) A

Tes Formatif 2

- 1) D.
- 2) D.
- 3) D.
- 4) B. dengan $M = 64.10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$.
- 5) A.
- 6) A.

7) B. $M_n = \left(x^n \right) = \int_{-n}^{+n} dx x^n f(x)$

$$M_2 = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2 + \infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dx x^2 e^{-mx^2/2k_B T}$$

- 8) $M = 4.10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$.
- 9) D
- 10) $M = 4.10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$.

Tes Formatif 3

- 1) A
- 2) Molekul dengan N atom memiliki derajat kebebasan sebesar 3N.
- 3) A
- 4) Molekul dengan 2 atom (*diatomic*) memiliki derajat kebebasan sebesar
- 5) $3 \times 2 = 6$, yang terdiri atas 3 derajat kebebasan translasi, 2 derajat rotasional, dan 1 derajat kebebasan vibrasional.

- 6) A. Molekul triatomik liar memiliki 9 derajat kebebasan, yang terdiri dari 3 derajat kebebasan translasi, 2 derajat kebebasan rotasional, dan 4 derajat kebebasan vibrasional, yang masing-masing memiliki energi kinetik sebesar $3(1/2 k_B T)$, $2(1/2 k_B T)$ dan $4(k_B T)$ sehingga energi kinetik total sebesar $6,5 k_B T$. Molekul triatomik nonlinear memiliki 9 derajat kebebasan, yang terdiri dari 3 derajat kebebasan translasi, 3 derajat kebebasan rotasional, dan 3 derajat kebebasan vibrasional, yang masing-masing memiliki energi kinetik sebesar $3(1/2 k_B T)$, $3(1/2 k_B T)$, dan $3(k_B T)$ sehingga energi kinetik total sebesar $6 k_B T$. Dengan demikian, memiliki selisih sebesar $0,5 k_B T$.
- 7) D. dengan $R = 8,314 JK^{-1}mol^{-1}$
- 8) A
- 9) B
- 10) A.

Daftar Pustaka

- Atkin, Peter and Paula, Julio de. 2010. *Physical Chemistry 9th*. London : Oxford University Press.
- Atkins, P.W. 2001. *The Elements of Physical Chemistry 3rd*. Oxford : Oxford University Press.
- Isana SYL dan Endang Widjajanti. 2008. *Modul Kimia Fisika III*. Jakarta: Universitas Terbuka.
- Maron, S.H and Lando, J.B. 1974. *Fundamental of Physical Chemistry*. New York: Macmillan Publishing Co. Inc.
- Moore, W.J. 1983. *Basic Physical Chemistry*. London: Prentice Hall International, Inc.
- White, J. E. 1987. *Physical Chemistry*. New York: HBJ Publishers.