

2.1 Sistem Makroskopik dan Sistem Mikroskopik

Fisika statistik berangkat dari pengamatan sebuah sistem mikroskopik, yakni sistem yang sangat kecil (ukurannya sangat kecil $\pm$ ukuran Angstrom, tidak dapat diukur secara langsung) sebagai contoh sistem partikel tunggal. Penjelasan sistem partikel tunggal ini dapat dilakukan melalui hukum-hukum mekanika klasik maupun kuantum dan untuk jumlah yang cukup banyak dapat dibantu dengan menggunakan numerik (komputer).

Sistem makroskopik merupakan sistem dengan skala besar (dapat diukur), sistem ini dilengkapi dengan variabel makroskopik yaitu variabel yang dapat diukur (tekanan, temperatur, volume, energi, ...). Fisika statistik mencoba untuk menjembatani bagaimana keadaan mikroskopik mampu menjelaskan keadaan makroskopik.

Sebagai contoh, ketika kita mengamati sistem N partikel dalam keadaan wujud gas yang suatu saat secara tiba-tiba sistem terkondensasi sehingga sistem berada dalam keadaan fase cair. Jika kita melihat tinjauan mikroskopik, maka kita akan melihat partikel penyusun sistem pada fase gas akan berubah menjadi partikel penyusun sistem pada fase cair. Perubahan ini dapat diumpamakan sebagai proses reproduksi pertumbuhan partikel penyusun sistem pada fase cair. Mampukah fisika (mekanika, termodinamika, listrik-magnet, gelombang, ...) menjelaskan keadaan ini?. Untuk itu perlu dikembangkan konsep baru agar dapat menjelaskan keadaan tersebut.

Fisika statistik mencoba untuk menjelaskan keadaan tersebut, melalui penggunaan konsep-konsep dasar fisika (mekanika, termodinamika, listrik-magnet, gelombang, ...), perilaku sistem mikroskopik dibangun beserta syarat batas fisisnya. Untuk melakukan estimasi makroskopik berdasarkan fluktuasi perilaku sistem mikroskopik tersebut kita perlu menggunakan konsep-konsep probabilitas yang bersesuaian dengan sistem yang kita bangun. Sehingga dalam perkuliahan fisika statistik pemahaman konsep dasar fisika sangat diperlukan. Berbicara tentang sistem makroskopik, berarti kita membicarakan tentang variabel makroskopik yang menjadi ciri dari sistem tersebut. Variabel makroskopik

menjelaskan karakter fisis sistem yang informasinya didapat melalui hasil pengukuran. Pengukuran terjadi ketika sistem berada dalam setimbang dan hal ini berkaitan dengan jumlah kejadian mikro dengan peluang terbesar.

2.1 Fluktuasi Keseimbangan

Proses keseimbangan sangat penting dalam pengukuran, karena pengukuran suatu variabel dilakukan ketika sistem berada dalam keseimbangan. Bayangkan ketika anda mengukur berat benda dengan menggunakan neraca Ohaus, kapan pengukuran dilakukan? Yang anda lakukan adalah melihat jarum penunjuk berada pada **posisi setimbang** dengan kedudukan yang telah ditentukan. Ketika anda mengukur harga arus maka hal yang anda lakukan adalah melihat posisi jarum petunjuk pada angka yang tertera, setelah kira-kira jarum jam pada posisi yang seimbang dengan angka yang tertera pada amperemeter maka anda dapat melakukan pengukuran harga arus.

Dari kedua contoh di atas maka keadaan setimbang merupakan keadaan yang sangat penting pada proses pengukuran. Dalam fisika statistik untuk menyatakan keadaan setimbang dinyatakan dengan peluang maksimal, pernyataan peluang maksimal dapat dinyatakan oleh berbagai cara, diantaranya:

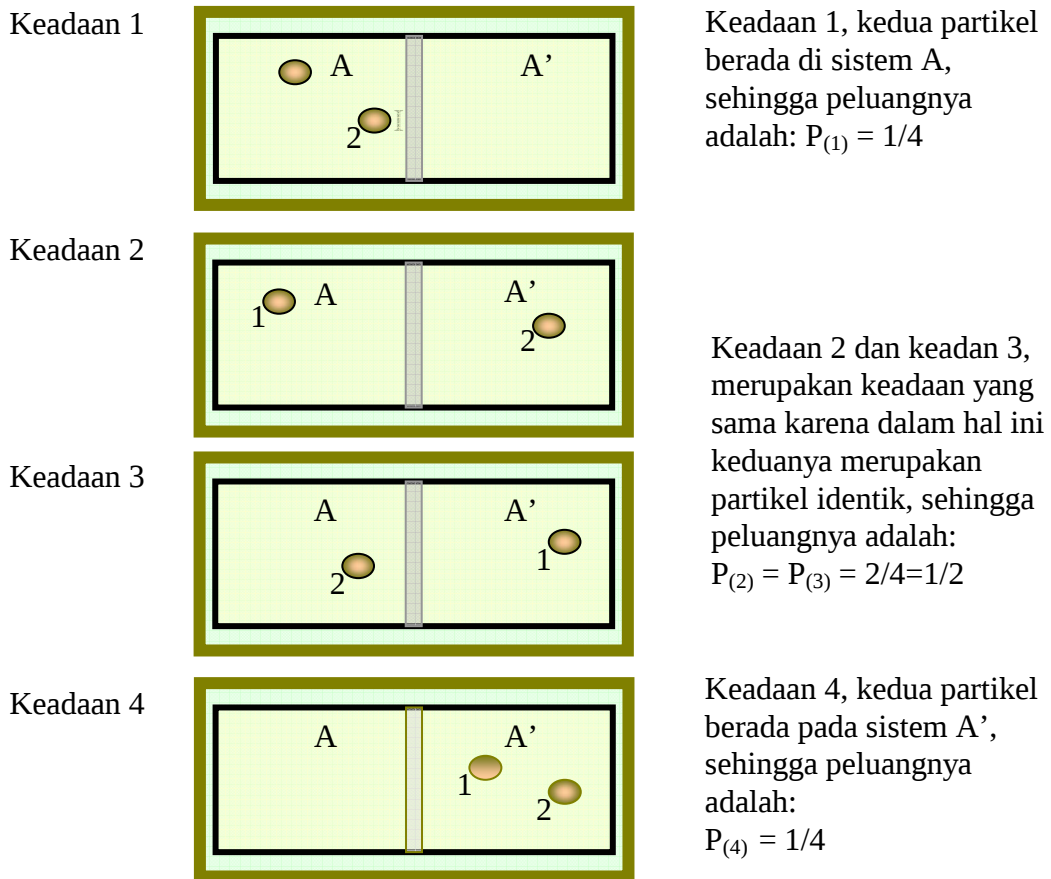
- Jumlah keadaan yang terbesar dari semua jumlah keadaan yang ada ($P_{\max}$).
- Jumlah keadaan yang diizinkan ($\Omega_{\max}$).
- Jumlah keadaan makro yang memiliki jumlah keadaan mikro terbesar ($W_{\max}$).

Ketiganya memiliki arti yang sama, namun digunakan pada kondisi yang berbeda. Sebagai contoh, keadaan setimbang adalah keadaan yang memiliki peluang terbesar dari semua jumlah keadaan yang ada.

Contoh:

Dua buah partikel identik berada dalam sistem yang terisolasi (sistem I). Sistem I ini terdiri dari dua sistem (sistem A dan A') yang dibatasi oleh dinding, dimana memungkinkan perpindahan partikel antar kedua sistem tersebut. Cara kita untuk meramalkan keseimbangan adalah meramalkan jumlah keadaan yang dapat terjadi. Dari keadaan yang ditunjukkan pada Gb.2.1, maka kita dapat menyatakan bahwa keseimbangan terjadi ketika masing-masing sistem diisi oleh sebuah partikel, dimana memiliki peluang terbesar ($P_{(2)} = P_{(3)} = \frac{1}{2}$), mengingat dalam hal

ini kedua partikel dianggap sama. Biasanya ketika kita melakukan pengukuran, yang kita lakukan adalah membandingkan dengan standar, maka dalam hal ini hanya ada dua sistem, yaitu sistem yang akan kita ukur dengan sistem yang sudah memiliki standar.



Gambar 2.1

Jumlah keadaan yang terjadi dari dua partikel yang dapat terdistribusi pada dua sistem.

Untuk itu kasus kesetimbangan dalam hal ini adalah membandingkan kesetimbangan dua sistem. Sebagai contoh keadaan setimbang termal yang dijelaskan lewat hukum ke-0 termodinamika, sehingga untuk tiga atau empat sistem kita dapat melakukannya dengan mudah.

Jika kita ingin menghitung peluang, maka terlebih dahulu kita harus mencari jumlah keseluruhan keadaan yang dapat terjadi. Untuk mencari keadaan yang dapat terjadi dapat kita bayangkan sebagai berikut :

- Jika kita memiliki 3 partikel identik, maka jumlah keadaan yang dapat terjadi ada 8 keadaan, yakni sebagai berikut :

Keadaan ke	Partikel 1	Partikel 2	Partikel 3
1	A	A	A
2	A'	A	A
3	A	A'	A
4	A	A	A'
5	A'	A'	A
6	A'	A	A'
7	A	A'	A'
8	A'	A'	A'

- Jika kita memiliki 4 partikel identik, maka jumlah keadaan yang dapat terjadi ada 16 keadaan, yakni sebagai berikut :

Keadaan ke	Part. 1	Part. 2	Part. 3	Part. 4
1	A	A	A	A
2	A'	A	A	A
3	A	A'	A	A
4	A	A	A'	A
5	A	A	A	A'
6	A'	A'	A	A
7	A'	A	A'	A
8	A'	A	A	A'
9	A	A'	A'	A
10	A	A	A'	A'
11	A	A'	A'	A
12	A	A'	A'	A'
13	A'	A	A'	A'
14	A'	A'	A	A'
15	A'	A'	A'	A
16	A'	A'	A'	A'

}

*

Dari gambaran di atas tentu kita akan mengalami kesulitan apabila jumlah partikel yang kita gunakan sangat banyak, untuk itu kita perlu meramalkan pola untuk menentukan jumlah keadaan. Dengan memperhatikan bahwa:

- untuk 3 partikel jumlah keadaannya $8 \rightarrow 2 \times 2 \times 2 = 8 \rightarrow 2^3 = 8$
- untuk 4 partikel jumlah keadaannya $16 \rightarrow 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16 \rightarrow 2^4 = 16$
- sehingga untuk n partikel $\rightarrow$ jumlah kombinasi $J_k = 2^N$

Dengan demikian penentuan harga peluang akan menjadi lebih mudah, misal peluang tidak terdapat satupun partikel di sistem A yakni:

$$P_0 = \frac{1}{2^N} \quad (2.1)$$

Hal ini karena hanya ada satu kejadian dari 2^N kejadian yang mungkin.

Untuk menyatakan peluang keadaan suatu kejadian tentu kita harus mengetahui jumlah *kombinasi* kejadian dari semua kejadian yang dapat kita mainkan, sebagai contoh lihat pola penyebaran untuk 4 partikel di atas, peluang terbesar ketika setiap sistem memiliki 2 partikel, maka kita memerlukan jumlah kombinasi untuk menempatkan 2 partikel di setiap sistem. Sehingga pernyataan peluang menjadi:

$$P_{(n)} = \frac{C_n^N}{2^n}; \quad (2.2)$$

jumlah kombinasi dirumuskan:

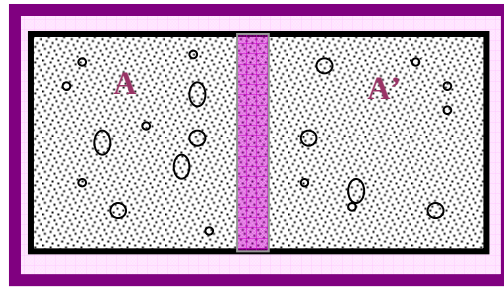
$$C_n^N = \frac{N!}{(N-n)!(n)!}; \quad (2.3)$$

dengan N adalah jumlah semua unsur yang tersedia, dan n adalah jumlah semua unsur yang dikombinasikan.

Sebagai contoh, peluang menempatkan 2 dari 4 unsur yang tersedia adalah:

$$P_{(2)} = \frac{\frac{4!}{(4-2)!(2)!}}{2^4} = \frac{\frac{4.3.2.1}{2!2!}}{16} = \frac{6}{16} = \frac{3}{8}$$

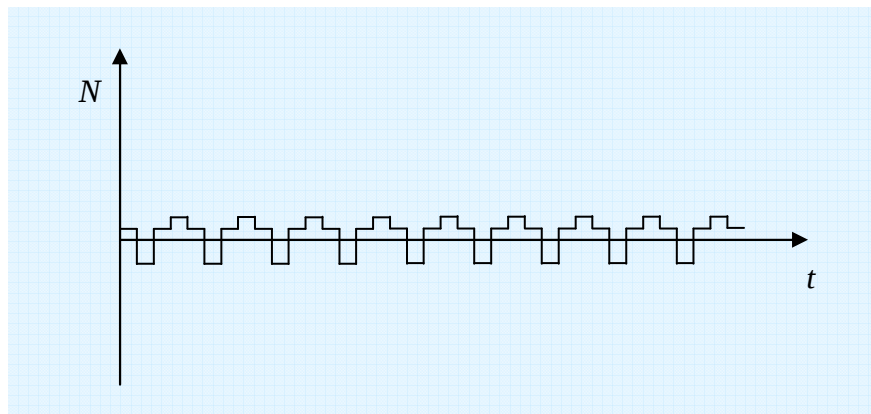
Ditinjau suatu sistem tertutup seperti tampak pada Gb. 2.2 memiliki jumlah total partikel untuk kedua sistem adalah N . Karena sistem gabungan ini terisolasi maka jumlah total partikel tidak berubah (konstan). Misal jumlah partikel dalam sistem A adalah n dan jumlah partikel dalam sistem A' adalah n' .



Gambar 2.2

Jumlah partikel total konstan $N = n + n'$

Keadaan kesetimbangan akan diperoleh jika masing-masing sistem A dan A' memiliki jumlah partikel yang sama atau hampir sama, sehingga keadaan setimbang dapat diramalkan ketika sistem A dan A' memiliki partikel $n \approx n' \approx \frac{1}{2} N$, untuk menggambarkan keadaan ini dapat dilihat grafik fluktuasi jumlah partikel untuk sistem A' sebagai fungsi dari waktu, sebagai berikut :



Gambar 2.3

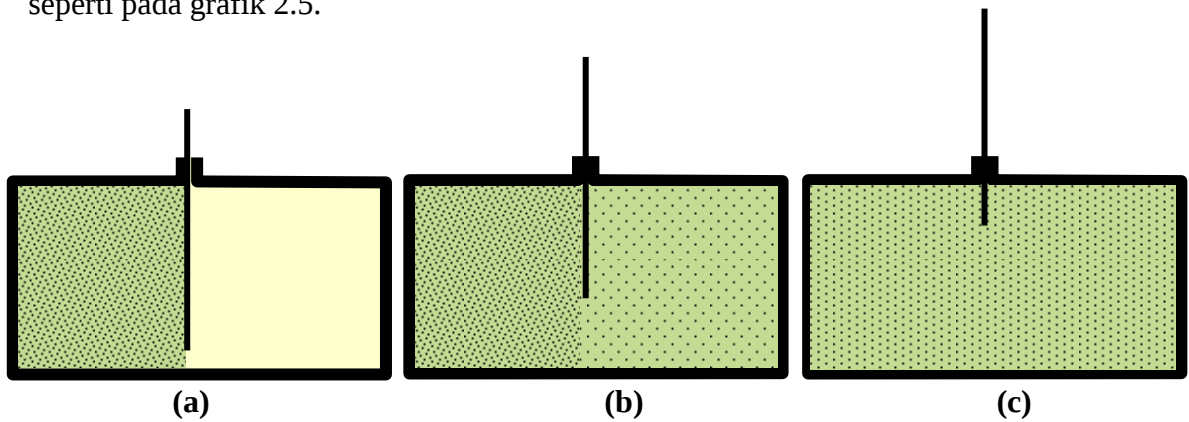
Grafik kecenderungan penyebaran partikel pada posisi kesetimbangan

Sehingga untuk jumlah partikel yang cukup banyak, kita tidak dapat secara pasti mendapatkan harga $n = n' = \frac{1}{2} N$. Namun yang kita dapatkan adalah harga yang mendekati $\frac{1}{2} N$.

2.2 Pendekatan Kesetimbangan

Jika kita mengamati sistem yang akan mengalami kesetimbangan, maka proses yang terjadi secara mikroskopik dapat digambarkan seperti pada Gb. 2.4. Gambar tersebut menunjukkan penyebaran partikel yang menuju proses kesetimbangan ketika sekat dibuka. Jumlah partikel kedua sistem dapat dinyatakan melalui grafik pada Gb.2.5. Waktu relaksasi t_r adalah waktu yang diperlukan untuk mencapai kesetimbangan. Ketika dinding penghalang mulai

dibuka (Gb. 2.4a) partikel bergerak ke arah tekanan yang lebih kecil sampai kesetimbangan tercapai (Gb. 2.4c), keadaan penyebaran partikel dapat tergambar seperti pada grafik 2.5.



Gambar 2.4

Penyebaran partikel menuju proses kesetimbangan.



Gambar 2.5

Grafik $N=f(t)$ dalam menentukan waktu relaksasi

Latihan soal

1. Sebuah sistem terdiri dari 5 partikel yang mempunyai spin $\frac{1}{2}$ (dalam keadaan *up* dan *down*). Pengukuran dilakukan dengan meninjau partikel keadaan *up*(+). Tentukanlah konfigurasi dan probabilitas yang dapat terjadi untuk:
 1. tidak ada partikel dalam keadaan *up*
 2. hanya ada 1 partikel dalam keadaan *up*
 3. hanya ada 2 partikel dalam keadaan *up*

4. ada 3 partikel dalam keadaan *up*
5. ada 4 partikel dalam keadaan *up*
6. ada 5 partikel dalam keadaan *up*

Dari tabel di samping terdapat:

- 1 konfigurasi untuk keadaan 0
- 5 konfigurasi untuk keadaan 1
- 10 konfigurasi untuk keadaan 2
- 10 konfigurasi untuk keadaan 3
- 5 konfigurasi untuk keadaan 4
- 1 konfigurasi untuk keadaan 5

No	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	Konfig.	Keadaan
1	-	-	-	-	-	1	0
2	+	-	-	-	-	5	1
	-	+	-	-	-		
	-	-	+	-	-		
	-	-	-	+	-		
3	-	-	-	-	+	10	2
	+	+	-	-	-		
	+	-	+	-	-		
	+	-	-	+	-		
	+	-	-	-	+		
	-	+	+	-	-		
	-	+	-	+	-		
	-	+	-	-	+		
4	-	-	+	+	+	10	3
	-	+	-	+	+		
	-	+	+	-	+		
	-	+	+	+	-		
	+	-	-	+	+		
	+	-	+	-	+		
	+	-	+	+	-		
	+	+	-	-	+		
5	+	+	+	-	-	5	4
	+	-	+	+	+		
	+	+	-	+	+		
	+	-	+	+	+		
6	+	+	+	+	+	1	5
	+	+	+	+	+		

Berdasarkan data di atas, jumlah peluangnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

Keadaan	$\sum$ konfigurasi	Peluang
0	1	1/32
1	5	5/32
2	10	10/32
3	10	10/32
4	5	5/32
5	1	1/32

2. Dua buah sistem A dan Aⁱ dapat berinteraksi satu dengan yang lainnya, sistem A memiliki 5 partikel dan memiliki spin $\frac{1}{2}$ dengan harga momen magnetik terukur μ_o . Sedangkan sistem Aⁱ memiliki 4 partikel dengan spin $\frac{1}{2}$ dengan harga momen magnetik terukur μ_o . Jika sistem tersebut berada dalam medan magnet eksternal B dan pengukuran dilakukan saat energi sistem yang terukur adalah $E = 5\mu_o.B$, tentukan konfigurasi yang dapat di bentuk?.

Jawab: syarat agar terjadinya suatu konfigurasi adalah :

$$E_T = -M_T B$$

$$5\mu_o.B = -M_T B$$

$$M_T = -5\mu_o$$

untuk

$$n_A = 5 \rightarrow \pm\mu_o \rightarrow \text{spin } \frac{1}{2},$$

$$n_A^i = 4 \rightarrow \pm\mu_o \rightarrow \text{spin } \frac{1}{2},$$

dengan tabel sebagai berikut:

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_1^i	σ_2^i	σ_3^i	σ_4^i	M_A	M_A^i	M_T
+	-	-	-	-	+	-	-	-	$-3\mu_o$	$-2\mu_o$	$-5\mu_o$
+	+	-	-	-	+	-	-	-			
-	-	+	-	-	+	-	-	-			
-	-	-	+	-	+	-	-	-			
-	-	-	-	+	+	-	-	-			
+	-	-	-	-	-	+	-	-			
-	+	-	-	-	-	+	-	-			
-	-	+	-	-	-	+	-	-			
-	-	-	+	-	-	+	-	-			

-	-	-	-	+	-	+	-	-	$-3\mu o$	$-2\mu o$	$-5\mu o$	
+	-	-	-	-	-	-	+	-				
-	+	-	-	-	-	-	+	-				
-	-	+	-	-	-	-	+	-				
-	-	-	+	-	-	-	+	-				
-	-	-	-	+	-	-	+	-				
+	-	-	-	-	-	-	-	+				
-	+	-	-	-	-	-	-	+				
-	-	+	-	-	-	-	-	+				
-	-	-	+	-	-	-	-	+				
-	-	-	-	+	-	-	-	+				
-	-	-	-	+	-	-	-	+				
+	+	-	-	-	-	-	-	-	$-\mu o$	$-4\mu o$	$-5\mu o$	
+	-	+	-	-	-	-	-	-				
+	-	-	+	-	-	-	-	-				
+	-	-	-	+	-	-	-	-				
-	+	+	-	-	-	-	-	-				
-	+	-	+	-	-	-	-	-				
-	+	-	-	+	-	-	-	-				
-	-	+	+	-	-	-	-	-				
-	-	-	+	+	-	-	-	-				
-	-	+	-	+	-	-	-	-				
-	-	-	-	-	+	+	-	-	$-4\mu o$	$-\mu o$		
-	-	-	-	-	+	-	+	-				
-	-	-	-	-	-	-	-	+				
-	-	-	-	-	-	+	+	-				
-	-	-	-	-	-	+	-	+				
-	-	-	-	-	-	-	+	+				

3. Suatu sistem gas ideal yang menempati ruangan bervolume 1 cm^3 mengandung molekul O_2 . Jika berat gas yang diukur pada temperatur kamar dan tekanan 1 atm (10^6 dyne/cm^2) adalah 2,52 gram, tentukanlah: (bilangan Avogadro adalah banyaknya partikel untuk tiap 1 mol zat dan dilambangkan dengan N_a)

- energi sistem terukur!
- kecepatan rata-rata dari setiap molekul!

Jawab :

$$M_r = 32 \text{ gram / mol} \longrightarrow M_r \text{ O}_2 = 16 \text{ gram / mol}$$

$$M_r \text{ O}_2 = 16 + 16 = 32 \text{ gram / mol}$$

$$\text{Jumlah mol gas O}_2 = \frac{2,52 \text{ gram}}{32 \text{ gram/mol}} = 0,07875 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned}\text{Banyaknya molekul } O_2 &= \frac{2,52 \text{ gram}}{32 \text{ gram/mol}} \times N_a = \frac{2,52 \text{ gram}}{32 \text{ gram/mol}} \times 6,02 \times 10^{23} \\ &= 4,74 \times 10^{22} \text{ molekul}\end{aligned}$$

$$\bar{P} = \frac{2}{3} n \bar{e}_k$$

$$n \text{ (Jumlah molekul persatuan volume)} = \frac{N}{V} = \frac{4,74 \times 10^{22}}{1} = 4,74 \times 10^{22} \text{ molekul/cm}^3$$

$$\bar{e}_k \text{ (Energi kinetik rata – rata tiap molekul)} = \frac{3 \bar{P}}{2 n} = \frac{3}{2} \frac{10^6}{4,74 \times 10^{22}} = 3,16 \times 10^{-15} \text{ erg}$$

Maka:

$$\text{a. Energi sistem yang terukur adalah } E_T = \bar{e}_k \cdot N = 3,16 \times 10^{-15} \times 4,74 \times 10^{22}$$

$$E_T \approx 1,50 \times 10^8 \text{ erg}$$

$$\text{b. } \bar{e}_k \text{ (Energi kinetik rata – rata tiap molekul)} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$$

$$m \text{ (massa tiap molekul)} = \frac{\text{massa 1 mol}}{\text{bil. Avogadro}} = \frac{32}{6,02 \times 10^{23}} = 5,32 \times 10^{-23} \text{ gram}$$

$$\text{Kecepatan rata-rata tiap molekul } \bar{v} = \sqrt{\frac{2 \bar{e}_k}{m}}$$

$$\bar{v} = \left[\frac{2 \times 3,16 \times 10^{-15}}{5,32 \times 10^{-23}} \right]^{\frac{1}{2}} \approx 1,09 \times 10^4 \text{ cm/s}$$