

Kecepatan atom gas dengan distribusi Maxwell-Boltzmann (1)

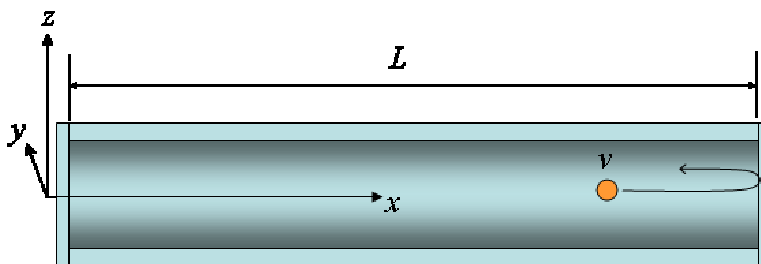
Oleh: Purwadi Raharjo

Dalam proses modifikasi permukaan bahan, kita mungkin sering mendengar teknologi pelapisan tipis (thin film). Selain pelapisan tipis, ada ada juga metoda penembakan ion gas atau elektron untuk mengubah sifat permukaan bahan itu. Penggunaan metoda CVD (Chemical Vapour Deposition), PVD (Physical Vapour Deposition), implantasi ion, ion sputtering, iradiasi berkas elektron atau berkas ion, dan lain sebagainya, sudah menjadi proses yang tidak bisa ditinggalkan dalam rekayasa permukaan bahan dewasa ini. Dari sel surya sampai layar komputer di depan anda, dari mata bor sampai semikonduktor, hampir sehari-hari kita memakai produk hasil dari modifikasi permukaan bahan tersebut.

Semua metoda yang disebutkan di atas kebanyakan menggunakan gas atau plasma (campuran ion, elektron, dan atom netral) di dalam bejana vakum. Olehkarenanya, penting bagi kita untuk memahami bagaimana gerakan atom di dalam gas, atau ion di dalam plasma. Dengan teori kinetik gas, kita bisa memperkirakan besar kecepatan atom-atom gas tersebut, dan dapat pula diperluaskan nanti untuk menjelaskan keadaan fisika ion-ion di dalam plasma. Dalam bahasan kali ini, kita akan memulai dari atom gas ideal di dalam suatu bejana.

Tentu kita sepakat bahwa energi kinetik (energi gerak) suatu atom gas ideal akan sebanding dengan suhu gas tersebut. Misalnya suatu kaleng kosong bekas yang tertutup rapat, apabila terbakar ditempat sampah, tentu sering menimbulkan ledakan bukan? Semakin tinggi suhunya, maka semakin aktif atom-atom gas dalam bejana tersebut bergerak yang akan mendorong tutup bejana agar terbuka atau memecah dinding bejana yang akhirnya menimbulkan suara ledakan. Lalu, bagaimana rumus hubungan antara energi kinetik atom dan suhu gas tersebut?.

Pertama-tama, untuk memudahkan, kita bisa bayangkan sebuah atom gas ideal yang berada dalam bejana tertutup seperti Gb. 1, sedemikian sehingga atom itu hanya bergerak pada satu sumbu saja, misalkan sumbu x .



Gb.1 Sebuah atom gas yang bergerak pada sumbu x di dalam bejana tertutup

Sesuai dengan definisinya, momentum yang dimiliki atom ini (biasa dilambangkan dengan p kecil untuk membedakan dengan notasi untuk tekanan yang dilambangkan dengan P besar) berbanding lurus dengan massa (m) dan kecepatan (v) atom itu. Jadi, momentum atom tersebut adalah

$$p = mv \quad \dots(1)$$

Andaikan setiap kali menumbuk permukaan dinding, atom itu berbalik arah secara sempurna sehingga kecepatan berubah menjadi $-v$. Maka perubahan momentum yang terjadi sebesar

$$dp = 2mv \quad \dots(2)$$

Menurut hukum Newton, gaya = perubahan momentum per satuan waktu, sebab

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad \dots(3)$$

Jika panjang tabung adalah L , maka selang waktu antar tumbukan pada permukaan dinding adalah $T = 2L/v$, yang berarti frekuensi tumbukan per detik ialah

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2L} \quad \dots(4)$$

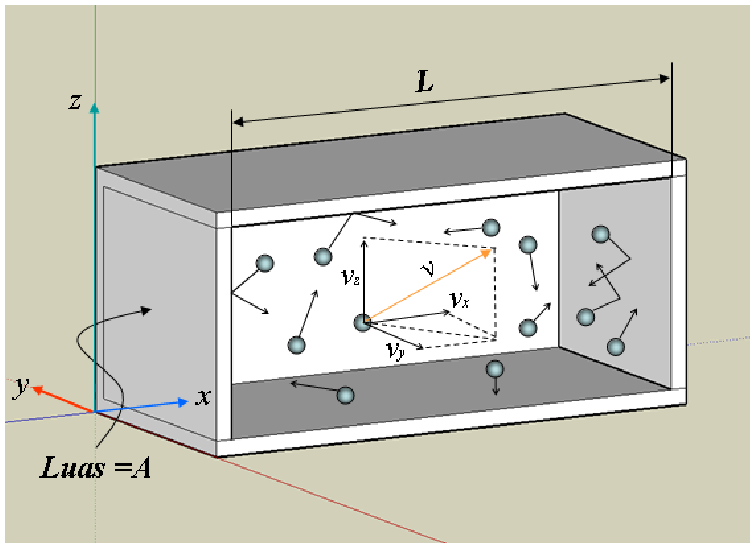
Maknanya, setiap detik akan terjadi perubahan momentum sebesar

$$\frac{dp}{dt} = 2mv \cdot \frac{v}{2L} \quad \dots(5)$$

sehingga

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{mv^2}{L} \quad \dots(6)$$

Sekarang, marilah kita bayangkan sejumlah N atom gas di dalam sebuah bejana kotak bervolume $V = LA$. L adalah panjang bejana dan A adalah luas salah satu sisi bejana.



Gb. 2 Sejumlah N atom gas di dalam sebuah bejana kotak bervolume $V=LA$

Kecepatan atom-atom tersebut pada arah sumbu x ialah $v_{1x} v_{2x} v_{3x} \dots v_{Nx}$ yang akan menumbuk dinding sebelah kanan yang luasnya A , sehingga timbul total gaya F_x yang bekerja pada dinding bejana itu. Tumbukan-tumbukan atom-atom tersebut menimbulkan tekanan P_x pada dinding tersebut sebesar

$$P_x = \frac{F_x}{A} = \frac{\sum_{i=1}^N m v_{ix}^2}{LA} = \frac{m \sum_{i=1}^N v_{ix}^2}{V} \quad \dots(7)$$

Kalau rata-rata kuadrat kecepatan dalam arah x itu dinyatakan sebagai $\langle v_x^2 \rangle$ (tanda $\langle \rangle$ menunjukkan nilai rata-rata), dengan definisinya adalah

$$\langle v_x^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2 \quad \dots(8)$$

maka hubungan di atas menjadi

$$P_x = \frac{m \sum_{i=1}^N v_{ix}^2}{V} = \frac{m N \langle v_x^2 \rangle}{V} \quad \dots(9)$$

Pada kenyataannya atom-atom tersebut bergerak dalam ruang 3 dimensi dengan kecepatan v , dimana $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ (lihat Gb.2). Namun, tekanan pada masing-masing dinding yang terdapat pada arah sumbu x, y, z umumnya sama besar. Misalkan pada suatu saat tertentu, N buah atom tersebut menumbuk dinding yang terdapat pada ketiga sumbu x, y, z , maka akan terjadi tekanan pada dinding itu sesuai dengan kecepatan yang dimiliki atom-atom pada arah masing-masing sumbu (yaitu v_x, v_y, v_z). Olehkarena tekanan pada setiap dinding adalah sama ($P_x = P_y = P_z = P$), maka bisa

diperoleh hubungan:

$$\frac{m N \langle v_x^2 \rangle}{V} = \frac{m N \langle v_y^2 \rangle}{V} = \frac{m N \langle v_z^2 \rangle}{V} \quad \dots(10)$$

atau $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle$

Sekarang kita mengetahui bahwa rata-rata kuadrat kecepatan tersebut adalah sama besar ($\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle$), maka $\langle v^2 \rangle = 3 \langle v_x^2 \rangle$, sehingga hubungan antara kecepatan dan tekanan pada dinding bejana di atas menjadi:

$$P = \frac{N m \langle v^2 \rangle}{3} \quad \dots(11)$$

Sementara itu, pada gas ideal berlaku hukum

$$PV = nRT \quad \dots(12)$$

dimana $n = N/N_A$ dengan N_A adalah bilangan Avogadro, dan R adalah konstanta gas (8.314472 JK⁻¹mol⁻¹).

Dengan memasukkan konstanta Boltzmann $k = R/N_A$, maka kita bisa menuliskan:

$$PV = \frac{N m \langle v^2 \rangle}{3} = NkT \quad \dots(13)$$

atau

$$\frac{m \langle v^2 \rangle}{3} = kT \quad \dots(14)$$

Sehingga hubungan antara energi kinetik dan suhu atom gas bisa dinyatakan sebagai

$$E_k = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT \quad \dots(15)$$

Rumus ini sering kita dapatkan dalam buku-buku SMA sehingga mungkin kita sudah familiar melihatnya.

Kecepatan rata-rata atom gas ideal

Akan tetapi pada rumus di atas, yang tertulis adalah rata-rata kuadrat kecepatan, bukan kecepatan rata-rata dari seluruh atom gas yang ada di dalam bejana. Kita hanya dapat menghitung rata-rata dari kuadrat kecepatan yaitu

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

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{3 kT}{m}} \quad \dots(16)$$

Kalau nilai ini diakarkan, maka yang didapat adalah nilai *root mean square velocity* (v_{RMS}). Meskipun nanti kita akan ketahui bahwa besarnya hampir sama, namun

sebenarnya yang ingin kita ketahui juga ialah kecepatan rata-rata dari seluruh atom itu, yaitu $\langle v \rangle$ (bukan akar dari rata-rata kuadrat kecepatan). Kecepatan rata-rata ini dihitung dari jumlah total kecepatan dari masing-masing atom dibagi dengan jumlah atom. Misalkan ada tiga buah atom gas yang kecepatannya masing bernilai 3, 4, dan 5. Maka, kecepatan rata-ratanya ($\langle v \rangle$) ialah $(3+4+5)/3=4$. Sedangkan nilai kecepatan RMS (v_{RMS})-nya ialah $\sqrt{[(3^2+4^2+5^2)/3]}=4.08$. Agak berbeda bukan?

Lalu, bagaimana kita menghitung kecepatan rata-rata dari atom gas yang sebanyak ini?

(bersambung ke bag. 2)