

4. USAHA

4.1

System yang berada dalam keadaan setimbang akan tetap mempertahankan keadaan itu. Untuk mengubah keadaan seimbang ini diperlukan pengaruh-pengaruh dari luar; sistem harus berinteraksi dengan lingkungannya.

Dalam termodinamika dikenal tiga cara interaksi : melalui usaha luar, melalui pertukaran kalor, dan melalui keduanya.

Perubahan yang dialami sistem dari interaksi itu selalu dianggap berlangsung secara kuasistatik. Dengan ini diartikan : perubahan itu dicapai dalam tahapan yang kecil infinit sedemikian rupa sehingga sistem senantiasa dan pada setiap saat proses tersebut berlangsung, berada dalam keadaan seimbang. Ini berarti bahwa sistem pada setiap tahapan proses tetap dapat dilukiskan oleh persamaan keadaannya.

Contoh : Jika volum suatu gas diperbesar secara kuasistatik, volumenya ditambah sedikit demi sedikit secara berkesinambungan, hingga perubahan yang diinginkan tercapai, dan pada setiap saat persamaan $f(P,V,T) = 0$ tetap berlaku.

Seandainya perubahan volum gas diperbesar secara mendadak, didalam gas akan terjadi aliran-aliran turbulen, ataupun terjadi pengembunan yang keduanya bukan keadaan keseimbangan, hingga tidak ada persamaan yang dapat menggambarkan keadaan sistem. Meskipun proses kuasistatik tidak akan kita jumpai dalam alam, idealisasi ini akan selalu digunakan dalam termodinamika, karena proses demikian sebenarnya dapat didekati sebaik-baiknya dengan mengambil pengaturan-pengaturan lingkungan seperlunya.

4.2

Pada setiap sistem, misalnya suatu gas, ada dua jenis usaha : usaha luar dan usaha dalam. Usaha dalam berarti, adanya interaksi antar partikel gas, atau terjadinya difusi dari bagian yang satu ke bagian yang lain dari sistem. Usaha dalam bukan bagian termodinamika, melainkan dikaji dalam fisika statistik. Termodinamika hanya mengenal usaha luar, yakni apabila sistem berinteraksi dengan lingkungan : gas mengembang atau menyusut. Perhatikanlah suatu gas dalam tabung yang dilengkapi pengisap tanpa massa, tanpa gesekan. Jelas bahwa untuk mendorong penghisap keluar diperlukan usaha : agar sistem dapat dikatakan melakukan usaha luar, maka haruslah ada sesuatu yang harus dilawan : misalnya gesekan, tekanan udara luar, massa pengisap, gaya gravitasi dan sebagainya. Semua gaya penentang ini dialukiskan sebagai pegas (yang dapat diatur konstanta pegasnya). Kita akan menurunkan rumus untuk menghitung usaha luar suatu gas.

Gas dalam silinder mempunyai koordinat P , V dan T .

Gas melakukan gaya pada pengisap sebesar $\vec{F} = P A \hat{x}$, sedangkan udara luar mengadakan gaya \vec{F} pada pengisap. Misalnya $F \geq \vec{F}$, maka pengisap akan terdorong keluar. Setelah bergerak sejauh $d\vec{x}$, sistem (gas) telah melakukan usaha dW , yang menurut ilmu mekanika adalah :

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{x} = F \cdot dx = P dx = PdV$$

Catatan :

- Rumus ini berlaku untuk proses kuasistatik maupun non kuasistatik

Kalau prosesnya bersifat kuasistatik maka p dapat diisikan dari persamaan keadaan sistem yang berlaku. Misalnya, apabila gas bersifat ideal, berlaku $PV = nRT$, maka p diisikan $P = \frac{nRT}{V}$

Apabila prosesnya bersifat non kuasistatik, tidak ada persamaan keadaan yang melukiskan sistem. Dalam hal ini, secara aproksimasi, sebagai P diambil P akhir proses (yang biasanya adalah tekanan udara luar).

- o Perhatikan bahwa dW tidak kita peroleh dengan mendiferensiasi suatu fungsi W . ini berarti bahwa dW bukanlah suatu diferensial eksak. dW adalah usaha luar dalam jumlah yang sangat kecil.

Dengan syarat euler dapat dibuktikan, bahwa memang dW bukan diferensial eksak, buykan diferensial yang berasal dari suatu fungsi.

$dW = pdV$ dapat ditulis $= pdV + 0 dP$, jadi $M(P,V) = P$ dan $N(P,V) = 0$. Dari sini

$\left(\frac{\partial M}{\partial V}\right)_V = 1$, sedangkan $\left(\frac{\partial N}{\partial V}\right)_P = 0$ Maka syarat Euler tidak terpenuhi.

- o Konversi tanda

Kalau sistem (Gas) mengembang (atau berekspansi), maka dV adalah positif, dan gas melakukan usaha luar pada lingkungannya, gas melakukan usaha.

Usaha dihitung negatif, jadi :

$$dW = - PdV$$

Konvensi ini adalah sejalan dengan konvensi tanda yang berlaku dalam fisika dan kimia, dimana usaha dihitung negatif, apabila energi keluar dari sistem (Dahulu usaha diberi tanda positif).

Jadi : Pada gas yang mengembang, dW negatif. Apabila gas ditekan, dW positif.

Misalkan volume gas berubah secara kuasistatik dari V_i ke V_f , maka :

$W_{if} = - \int_i^f P dV$ adalah usaha yang terlibat dalam proses itu. Kalau $V_f > V_i$, W_{if} adalah negatif; gas melakukan usaha luar, dan sebaliknya.

Pada proses kuasistatik, P diambil dari persamaan keadaan. Jadi $P = P(V,T)$.

Nyatalah bahwa :

$W_{if} = - \int_i^f P(V, T) dV$ belum dapat dievaluasi sebelum diketahui bagaimana T

bersikap selama proses tersebut. Apabila sikap T sudah dispesifikasikan terhadap V, P hanyalah fungsi V saja, dan integral mudah diselesaikan.

Catatan : Kalau P dinyatakan sebagai fungsi V saja, dan integral mudah diselesaikan.

Catatan : kalau P dinyatakan sebagai fungsi dari V, ini berarti jalan integrasi (dalam diagram dV) terdefinisi/diketahui/tertentu.

- o Diagram P-V dan W sebagai fungsi luas ; W bergantung pada jalan.



Perhatikan proses 1 yang tergambar pada diagram P-V diatas. Kurva ini juga memberi gambaran (meski tidak jelas) cara suhu T berubah (Untuk mengetahui ini, persamaan keadaan gas harus diketahui).

Menurut kalkulus $\int p dV$ tak lain adalah luas tersisir dibawah kurva. Menurut konvensi tanda yang berlaku, $W_{if}(1)$ ini adalah negatif.

Demikian pula untuk proses 2. sedangkan untuk proses 3 ; $W_{fi} = - \int_f^i p dV$ adalah positif, karena lingkungan mengadakan usaha pada sistem. Mengingat luas bagian-bagian yang diarsir diatas, nyatalah :

$$|W_1| > |W_2| \text{ dan } |W_2| = |W_3| \text{ atau } W_2 = - W_3$$



Pada gambar d tampak serangkaian proses sedemikian rupa sehingga keadaan akhir sama dengan keadaan awal. Rangkaian proses demikian disebut siklus, jelaslah : $W_{Siklus} = \text{luas siklus pada diagram P-V}$; Pada siklus yang dijalani searah jalan jarum jam, W_{siklus} adalah negatif, gas melakukan sejumlah usaha (dan sebaliknya)

Soal latihan



Dua mol gas ideal pada suhu 0°C diekspansi secara kuasistatik dari volum semula 1 liter hingga volum 4 liter

Berapakah usaha yang diperlukan (Nyatakan dalam R) apabila ; proses ini bersifat ;

- Isobarik ? (Proses AB)
- Isotermik ? (Proses AC)
- Hitunglah W_{BC} !
- Hitung juga usaha dlaam siklus ABCA !

Jawab

$$P_A = \frac{nRT}{V_A} = \frac{(2)(R)(273)}{10^{-3}} = 546.000$$

$$\begin{aligned} \text{a. } W_{AB} &= - \int_{V_a}^{V_b} p Dv = - P_A (V V_B - V_A) = -(546 \times 10^3 \text{ R})(4 - 1) \times 10^{-3} \approx -1638 \text{ R} \\ &= \text{Luas persegi panjang AB} \end{aligned}$$

$$b. W_{AC} = -\int_{V_A}^{V_C} PdV = -\int_{V_A}^{V_C} nRT_A \frac{dV}{V} = -nRT \ln \frac{V_C}{V_A} = -(2)(R)(273) \ln 4 \approx -759 R$$

= Luas dibawah kurva AC

$$c. W_{BC} = 0$$

$$d. W_{ABCA} = -\oint PdV = W_{AB} + W_{BC} + W_{CA} = (-1638 R) + 0 + (+759 R) = -879 R$$

W_{ABCA} negatif berarti gas melakukan usaha

Usaha pada sistem paramagnetik

Perhatikan sistem paramagnetik (misal Cu) yang dipotong berbentuk cincin (Rowland). Pada sistem ini akan kita adalah kerja. Caranya : dengan mengalirkan arus listrik dalam toroida yang meliliti cincin. Maka arus I menimbulkan \vec{B} (dan dalam zat akan terbentuk medan magnet \vec{H}) yang melakukan kerja pada magnet-magnet elementer, yaitu mencoba mensejajarkan hingga terjadi kemagnetan \vec{M} .

$$dW = (\vec{V} \vec{B} d\vec{H}) + (\vec{V} \vec{B} d\vec{M}) \text{ atau } dW = \frac{dW}{V} = \vec{B} d\vec{H} + \vec{V} \vec{B} d\vec{M}$$

$\vec{B} d\vec{H}$ adalah kerja persatuan volum (atau rapat kerja) yang diperlukan untuk mengubah medah \vec{H} . Dalam volum $\vec{B} d\vec{M}$ adalah kerja persatuan volum yang diperlukan untuk mengubah \vec{M} . Didalam zat paramagnetik. Kerja yang menyangkut sistem paramagnetik sendiri adalah :

$$dW = \vec{B} d\vec{M} = \mu_0 \vec{B} \cdot d\vec{M}$$

Bukti



Perhatikan magnet $\vec{\mu}$ yang berada dalam medan magnet luar \vec{B} . Jelaslah bahwa dari kedudukan I ke f, sistem melakukan usaha (spontan). Dalam pada ini magnetisasi \vec{M} bertambah ($d\vec{M}$ positif), tetapi kandungan sistem berkurang; dW negatif, sesuai rumus (4.3)

Usaha pada sistem majemuk.

Setiap sistem memiliki persamaan keadaan $f(x,y,z) = 0$. Bagaimana persamaan keadaan sistem majemuk :

Dua sistem terpisah dinding diatermik ? Bagaimanakah ungkapan dW -nya ?

a. Dua gas ideal

Sistem 1 : P, V, T

Sistem 2 : P', V', T

Maka sistem majemuk ini memiliki 5 koordinat P, V, P', V' dan T . karena masing-masing sistem secara terpisah mempunyai persamaan sendiri, $f(P, V, T) = 0$ dan $g(P', V', T) = 0$

Maka hanya ada tiga koordinat untuk sistem keseluruhan, dua diantaranya bebas, dan

$$dW = dW_1 + dW_2 = -PdV - P'dV'$$

b. Gas ideal dan zat paramagnetik

Gas ideal : P, V, T

Zat paramagnetik : \vec{B}, \vec{M}, T

Kedua sistem majemuk ini mempunyai lima koordinat

Persamaan keadaan gas ideal : $PV = nRT$

Persamaan keadaan zat paramagnetik : $\vec{M} = c \frac{\vec{B}}{T}$ (Persamaan keadaan Curie)

Ungkapan $dW = dW_1 + dW_2 = -PdV + \vec{B} \cdot d\vec{M}$

Zat dielektrik

Usaha yang diperlukan untuk mengubah polarisasi zat dielektrik

$$dW = \vec{\epsilon} \cdot d\vec{P}$$

$\vec{\epsilon}$ = medan listrik (N/C)

Dawai Tegang

Usaha yang diperlukan untuk mengubah panjang dawai tegang

$$dW = \sigma dL$$

σ = Tegangan dalam dawai (N)

Selaput tipis

Usaha yang diperlukan untuk mengubah luas selaput tipis

$$dW = \gamma dA$$

γ = Tegangan permukaan (N/m)

Sel listrik

Usaha yang diperlukan untuk mengubah muatan didalam sel listrik

$$dW = E dQ$$

E = ggl listrik (Volt)