

BAB III

KERJA DAN PANAS PADA TERMODINAMIKA

Kerja dan panas merupakan konsep yang penting dalam analisa termodinamik, dan dalam soal yang dihadapi, definisi kedua konsep diatas perlu dimengerti

A. Kerja

Secara historik, termodinamika berasal dari usaha manusia untuk mengubah panas menjadi kerja mekanik dengan cara yang seefisien mungkin. Dalam mekanika, kerja didefinisikan sebagai produk antara gaya dan jarak searah gaya yang ditempuh akibat gaya yang bekerja ini. Jadi :

$$W = \int_1^2 F \cdot dx$$

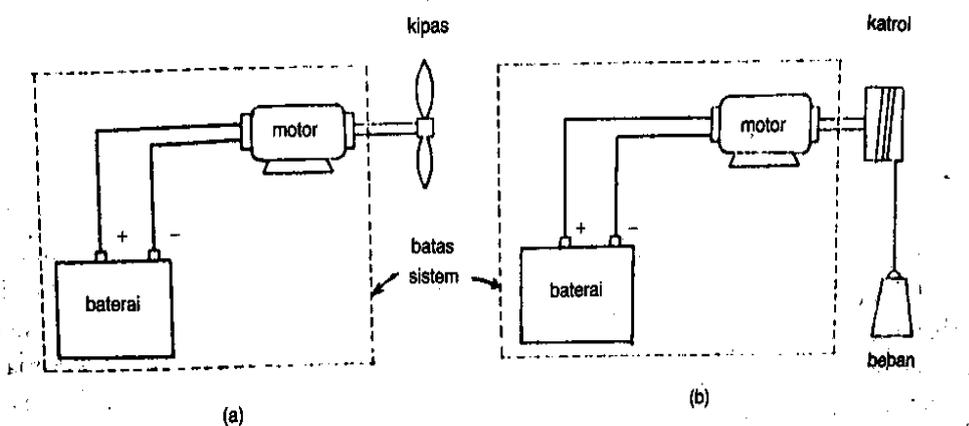
Hubungan ini sangat berguna karena dengannya kita dapat mengitung kerja yang diperlukan untuk menaikkan beban, untuk merenggangkan kawat, ataupun untuk memindahkan suatu partikel bermuatan melalui medan magnet.

Karena kita menggunakan termodinamika dari segi makroskopis, maka sangat berguna bila konsep kerja ini kita hubungkan dengan konsep sistem, sifat, dan proses. Oleh karena itu dalam tyermodinamika, kerja didefinisikan sebagai berikut : "kerja adalah interaksi antara dua sistem sedemikian hingga apa yang terjadi pada tiap sistem pada permukaan batas interaksinya dapat diulangi dengan efek tunggal di luar tiap sistem berupa perubahan tinggi suatu beban dalam medan potensial gravitasi"

Jadi suatu kerja dilakukan oleh sistem terhadap lingkungannya bila efek luar tunggal pada lingkungan (semua yang ada di luar sistem) berupa naiknya tinggi suatu beban. Perhatikan bahwa naiknya suatu beban sebenarnya adalah gaya yangbekerja malalui suatu jarak tertentu. Demikian definisi diatas sebenarnya tidak mengharuskan naiknya beban, artinya mungkin ada suatu gaya yang bekerja melalui jarak tertentu, tetapi efek tunggal yang terjadi di luar sistem dapat diganti dengan perubahan tinggi beban. Terlihat pula kemudian bahwa ada interaksi yang yang penting yang tidak dapat digolongkan sebagai interaksi yang efek tunggalnya diluar salah satu sistem yang berinteraksi berupa naik atau turunnya suatu beban.

Kerja yang dilakukan oleh sistem dianggap sebagai kerja positif, sedang kerja yang dilakukan terhadap sistem dianggap sebagai kerja negatif.

Untuk menjelaskan definisi kerja diberikan contoh berikut. Kita perhatikan suatu sistem yang terdiri atas baterai dan motor listrik, seperti terlihat pada gambar dibawah ini. Motor tersebut menggerakkan suatu kipas. Untuk mengetahui apakah terjadi kerja melewati batas sistem, dengan menggunakan definisi kerja diatas maka kipas diganti dengan suatu katrol dan beban, seperti terlihat pada gambar yang samping.



Gambar 47. Contoh kerja pada batas sistem

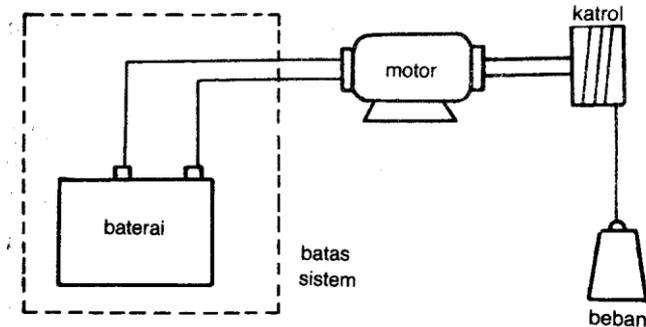
Pada waktu motor berputar, maka beban akan naik, jadi apa yang terjadi pada permukaan sistem dapat diulangi (disini perputaran poros motor), dengan efek tunggal di luar sistem berupa perubahan tinggi suatu beban.

Sekarang batas sistem diganti, yaitu hanya menyelubungi baterai (terlihat pada gambar 48) untuk mengetahui apakah terjadi interaksi kerja melewati batas sistem, kita tinjau apakah energi listrik yang mengalir melauai batas sistem merupakan suatu kerja.

Yang terlihat sebagai penghalang dalam mencapai efek tunggal diluar sistem berupa naiknya beban adalah faktor rendaman motor. Akan tetapi bila kita dapat merencanakan motor yang leboh efisien dengan kerugian bantalan maupun kerugian listrik yang lebih rendah, maka kita dapat mencapai suatu batas yang dapat memenuhi kriterium diatas. Jadi dapat disimpulkan bahwa yang terjadi pada batas sistem dapat diulangi, yaitu terjadi pengaliran energi listrik, dengan efek tunggal diluar sistem berupa perubahan tinggi beban (dalam medan potensial bumi)

Pada saat ini perlu diperjelas beberapa kata yang dipakai dalam definisi kerja secara termodinamik. Perkataan "efek tubggal" menyatakan bahwa ada jenis interaksi yang lain di antara sautu sistem dengan lingkungannya, yaitu panas, yang akan didefinisikan

kemudian, yang dapat mengakibatkan naik atau turunnya beban sebagai salah Satu sistem.



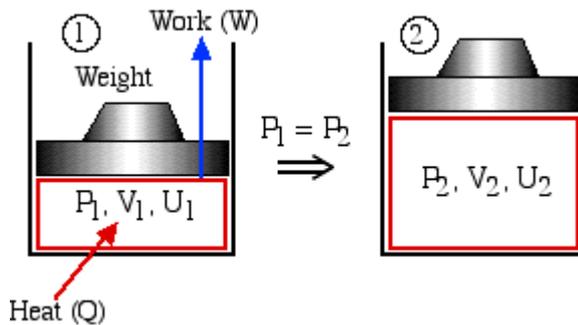
Gambar 48. Contoh terjadinya kerja melalui batas sistem karena ada arus listrik melalui batas sistem

Sebagai contoh, suatu sistem yang terdiri dari benda panas yang di hubungkan dengan air dapat menyebabkan air mewndidih. Uap air yang dihasilkan dapat digunakan untuk menjalankan mesin uap, yang selanjtnya dapat menaikkan beban. Dapat ditunjukka bahwa selalu ada efek lain yang hadir : uap air tidak kembali ke keadaan semulasetelah melalui mesin, atau lingkungannya menjadi panas. Dengan perkataan lain, penaikan beban tidak merupakan efek tunggal, dan karena itu panas tidak sama dengan kerja. Perbedaan diantaranya akan ditunjukkan oleh hukum termodinamika kedua.

Perkataan "diluar" (*external*) dalam definisi di atas menekankan kenyataan bahwa kerja didefinisikan hanya berdasar batas sistem. Bila miasalnya batas sistem yang tergambar dalam gambar 48 meliputi seluruh perlengkapan yang tergambar di sana, maka kerja manjadi nol karena tidak ada efek luar terhadap sistem ini. Perlu juga diperhatikan bahwa kerja, menurut hgakikatnya, bersifat transien. Kerja timbul selama terjadi interaksi anantara suatu sistem dengan lingkungannya, atau anantara sistem dengan lainnya, tetapi tidak timbul sebelum atau sesudah interaksi.

B. Kerja yang dilakukan pada batas yangbergerak dari suatusistem kempresibel sederhana di dalam suatu proses kuasi-seimbang (Quasi-equilibrium)

Kita tinjau suatu sistem yangterdiri dari gas di dalam silinder yang tertutup oleh pengisap, seperti terlihat pada gambar 49.



Gambar 49. Contoh kerja yang dilakukan pada batas yang bergerak dari suatu sistem di dalam proses kuasi-setimbang.

Bila satu di antara beban yang ada di atas penghisap diambil, maka penghisap akan bergerak ke atas sejauh dL . Kita dapat memisalkan proses ini sebagai proses kuasi-seimbang dan menghitung jumlah kerja W yang dilakukan oleh sistem selama proses tersebut. Jumlah gaya pada penghisap adalah pA , disini p adalah tekanan gas di dalam silinder dan A luas penampang penghisap. Jadi kerja δW adalah:

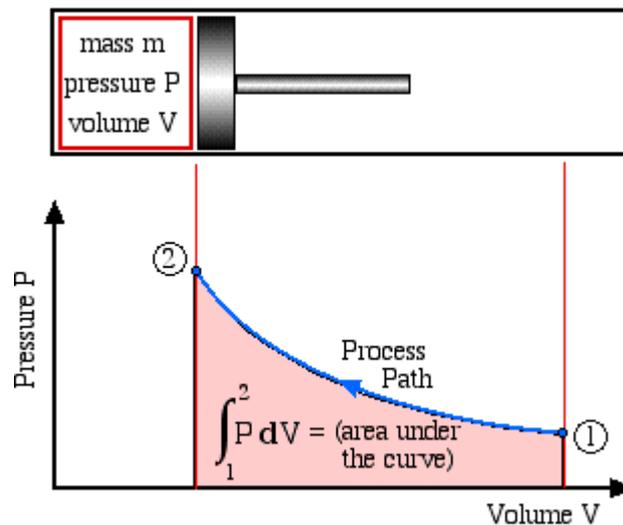
$$\delta W = p A dL$$

karena $A dL = dV$, perubahan volume dari gas, maka

$$\delta W = p dV$$

jumlah kerja yang dilakukan pada batas sistem selama suatu proses kuasi-setimbang dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan diatas dan dapat dituliskan sebagai suatu persamaan atau grafik.

Pertama-tama perhatikan pemecahan secara grafik pada contoh proses penekanan udara di dalam silinder, seperti dilukiskan pada gambar 50. mula-mula penghisap mempunyai kedudukan 1, dengan tekanan yang rendah. Keadaan sistem pada saat itu dinyatakan oleh titik 1 dalam diagram p - V sebagai (p_1, V_1) . Pada akhir proses, penghisap ada dalam kedudukan 2, sesuai dengan keadaan sistem yang dinyatakan sebagai titik 2 dalam diagram p - V (p_2, V_2) . Misalkan proses penekanan itu suatu proses kuasi seimbang, sehingga keadaan selama proses dinyatakan sebagai garis 1-2 dalam diagram p - V . Pemisalan proses kuasi-setimbang ini sangat penting karena tiap titik dalam garis 1-2 menyatakan suatu keadaan yang tertentu dan keadaan tersebut menyatakan keadaan sistem yang sebenarnya, yaitu bila penyimpangan dari keadaan setimbang kecil sekali.



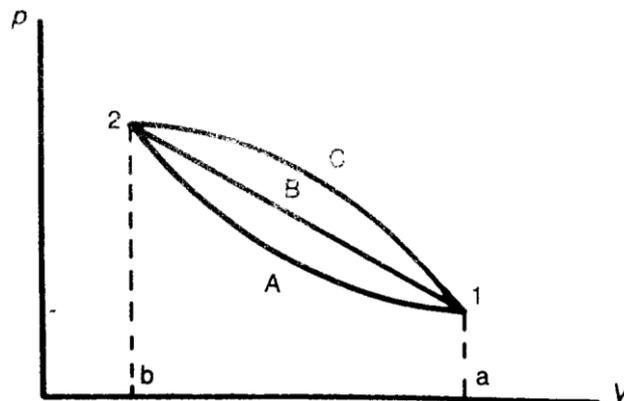
Gambar 50. Penggunaan diagram tekanan-volume untuk menunjukkan kerja pada batas sistem yang bergerak dalam proses kuasi-setimbang

Kerja di dalam udara selama proses penekanan ini dapat diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan

$${}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p \, dV$$

tanda ${}_1W_2$ menyatakan kerja yang dilakukan selama proses tersebut dari keadaan 1 ke keadaan 2. dari diagram p-V dapat disimpulkan bahwa kerja selama proses tersebut, yaitu $\int_1^2 p \, dV$, dinyatakan oleh luas daerah dibawah kurva 1-2, yaitu luas a-1-2-b-a.

selain itu ada hal lain yang penting, yang dapat disimpulkan dari gambar 51.



Gambar 51. Beberapa proses kuasi-seimbang di antara dua keadaan

Untuk mencapai keadaan 2 dari keadaan 1, dapat ditempuh beberapa proses kuasi setimbang, misalnya 1-A-2, 1-B-2, atau 1-C-2. karena luas daerah dibawah garis tersebut dalam diagram p-V menyatakan kerja

yang dilakukan dalam tiap proses, nyatalah bahwa jumlah kerja yang dilakukan dalam tiap proses bukan hanya fungsi dari keadaan ujung (end-states) proses, tetapi juga tergantung pada lintasan yang diikuti oleh proses. Oleh karena itu, kerja adalah fungsi lintasan, dan dalam matematika, δW adalah turunan yang tidak eksak.

Selain fungsi lintasan, ada fungsi titik, yang dalam matematika berhubungan dengan turunan eksak. Sifat termodinamika adalah fungsi titik, karena untuk tiap titik dalam diagram termodinamik, seperti misalnya p-V di atas, atau tiap titik pada permukaan termodinamik (misalnya dalam diagram p-V-T), sistem mempunyai sifat tertentu. Jadi ada korespondensi satu-satu antara suatu sifat tertentu dan titik dalam diagram atau pada permukaan termodinamik tersebut.

Turunan suatu fungsi titik adalah turunan eksak, integralnya memenuhi $\int_1^2 dV = V_2 - V_1$ jadi kita dapat menyatakan nilai volume pada keadaan 1 atau 2, dan perubahan volume hanya tergantung pada keadaan mula dan akhir. Tetapi kerja adalah fungsi lintasan, jadi tergantung pada lintasan kuasi-setimbang yang dilaluinya. Turunan fungsi lintasan adalah turunan tak eksak, dengan simbol δ .

Jadi kerja antara keadaan 1 dan 2 melalui proses A ditulis sebagai:

$$\int_1^2 \delta W = {}_1W_2, A$$

dan bukan:

$$\int_1^2 \delta W = W_2 - W_1$$

kerena W_2 dan W_1 tidak mempunyai arti (tidak ada korespondensi satu-satu antara kerja dengan titik dalam diagram termodinamik).

Contoh:

Perhatikan suatu sistem yang terdiri atas suatu gas yang ada di dalam silinder seperti terlihat dalam gambar 48. di atas penghisap terdapat beberapa baban kecil. Tekanan permulaan adalah kPa dan Volume awal 1 m^3

(a) Misalkan sekarang silinder dipanaskan, dan volume gas diperbesar menjadi 3 m^3 , sedangkan tekanan dijaga tetap sama. Kerja pada sistem selama proses tersebut:

$${}_1W_2 = \int_1^2 p \, dV$$

karena tekanan tetap, maka:

$$\begin{aligned} {}_1W_2 &= p \int_1^2 dV = p(V_2 - V_1) \\ &= 200 \text{ kN/m}^2 (3 - 1) \text{ m}^3 \\ &= 400 \text{ kN.m} = 400 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- (b) Misalkan keadaan mula tetap sama seperti di atas, tetapi pada waktu silinder dipanaskan, sehingga penghisap naik, beban secara beraturan dikurangi, sehingga proses berlangsung secara kuasi seimbang dan memenuhi hubungan $pV = \text{konstanta} = p_1V_1 = p_2V_2 = 3 \text{ m}^3$.

Maka:

$$P_2 = \frac{p_1V_1}{V_2} = 200/3 = 66,7 \text{ kN/m}^2$$

Dan kerja yang dilakukan :

$$\begin{aligned} {}_1W_2 &= \int_1^2 p \, dV \\ &= \text{konstanta} \int_1^2 \frac{dV}{V} = p_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= 200 \text{ kN/m}^2 \times 1 \text{ m}^3 \times \ln 3 \\ &= 220 \text{ kN.m} = 220 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- (c) Dengan keadaan mula yang sama dan volume akhir yang sama, beban dikurangi seloama proses sehingga dipenuhi hubungan berikut :

$$P V^n = \text{konstanta}$$

Maka :

$$P V^n = \text{konstanta} = p_1V_1^n = p_2V_2^n \text{ atau } p = \frac{p_1V_1^n}{V^n} = \frac{p_2V_2^n}{V^n}$$

Kerja :

$$\begin{aligned} W &= \int_1^2 p \, dV = \text{konstanta} \int_1^2 \frac{dV}{V^n} = \text{konstanta} \left[\frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right]_1^2 \\ &= \frac{\text{konstanta}}{1-n} (V_2^{1-n} - V_1^{1-n}) \\ &= \frac{p_2V_2^n V_2^{1-n} - p_1V_1^n V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n} \end{aligned}$$

untuk $n = 1,3$:

$${}_1W_2 = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-1,3}$$

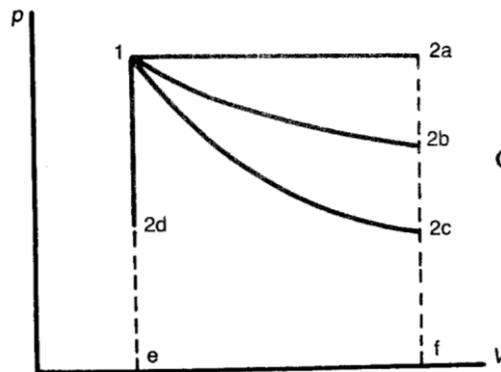
$$p_2 = 200 \times \left(\frac{1}{3}\right)^{1,3} = 47,9 \text{ kPa}$$

$${}_1W_2 = \frac{47,9 - 200}{-0,3} = 506,8 \text{ kN.m} = 506,8 \text{ kJ}$$

- (d) Bila sekarang selama pemanasan penghisap dijaga agar tidak bergerak (misalnya ditahan dengan paku), maka selama proses volumenya konstan. Dengan tidak mepedulikan apa yang terjadi

pada gas, maka kerja yang dilakukan oleh sistem sekarang sama dengan nol karena: $\int_1^2 dW = \int_1^2 p dV$ dan $dV = 0$

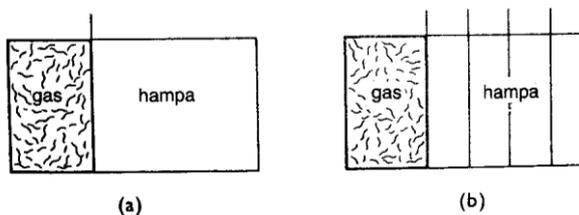
Proses ini digambarkan dalam gambar 52. Perhatikan perbedaan luas diagram di bawah garis lintasan proses yang menyatakan kerja yang dilakukan selama proses tersebut.



Gambar 52. Diagram P-v yang menunjukkan perbedaan kerja selama proses yang bermacam-macam

C. Contoh untuk $W = \int p dV$

Persamaan antara kerja dan $\int p dV$ hanya berlaku bila suatu sistem melalui suatu rentetan keadaan yang setimbang (proses yang reversibel). Untuk menunjukan bahwa $\int p dV$ tidak sama dengan kerja dalam suatu proses irreversibel, kita tinjau suatu proses ekspansi bebas seperti terlihat pada gambar 53. Di sini suatu bejana dipisahkan dalam dua ruangan oleh suatu dinding yang dapat digeserkan. Satu ruangan berisi gas, sedang yang lain hampa. Bila dinding ditarik keluar atau dipecahkan, maka gas akan mengalami proses ekspansi bebas yang tidak dilawan oleh suatu gaya pengimbang yang berlawanan arah dengan batas dinding.



Gambar 53. Proses ekspansi bebas

Bila sistem telah mencapai kedalaman akhir yang seimbang pada p_2 dan V_2 , kedua keadaan 1 (awal) dan 2 (akhir) dapat dinyatakan dalam suatu diagram p-V. akan tetapi keadaan di antaranya tidak tertentu, karena harga p dan V-nya tak diketahui, dan p di seluruh ruangan mungkin tidak sama.

Beberapa keadaan antara ini dapat dilukiskan bila proses dilakukan mengikuti suatu rentatan langkah, seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini. Di sini terdapat banyak dinding yang selama proses secara berturut-turut di tarik satu demi satu.

Setelah ting dinding ditarik, hingga dicapai keadaan setimbang, tekanan dan volume dapat diukur, dan titik yang bersangkutan dapat digambarkan pada diagram p-V. Demikian seterusnya hingga dapat digambarkan titik-titik di antara keadaan awal dan akhir. Bila dinding-dinding tersebut jumlahnya banyak sekali, maka titik titik tersebut merupakan suatu lintasan kuasi-setimbang, dan luas daerah di bawah titik-titik lintasan ini dapt dinyatakan dengan menghitung $\int_1^2 p \, dV$.

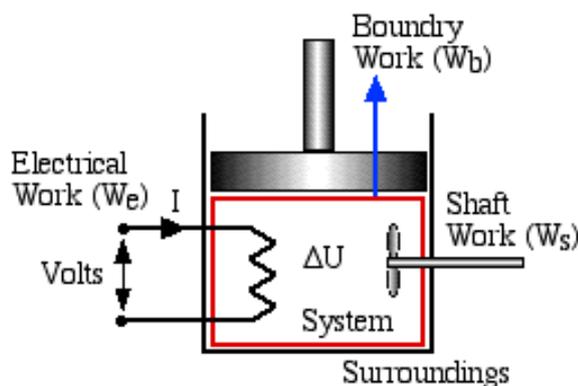
Tetapi jumlah ini tidak menyatakan kerja, karena tidak ada kerja yang dilakukan oleh sistem (karena tidak ada gaya luar yang bekerja melalui suatu jarak tertentu)

Selama suatu proses tidak reversibel, kerja yang dilakukan akan selalu kurang dari $\int p \, dV$. Demikian pula, bila kerja kompresi dilakukan pada sistem, kerja yang dibutuhkan akan selalu lebih besar dari $\int p \, dV$ kecuali bila proses tersebut reversibel. Dalam suatu proses yang reversibel, tidak ada kelebihan gaya yang digunakan untuk memberikan percepatan kepada sistem. Dengan sendirinya hal yang demikian adalah ideal.

Contoh:

Perbaikan proses yang digambarkan pada gamabr 54. suatu gas (sistem) mengembang dari volume 1500 cm^3 menjadi 2000 cm^3 dan menerima kerja 20.000 N.cm dari suatu kincir. Tekanan di dalam tetap 100 N/cm^2 . Tentukan jumlah kerja yang dilakukan oleh sistem.

Jawaban:



Gambar 54. Gas mengembang kerana terdorongnya piston akibat pemanasan gas oleh kerja kincir

Misalkan tekanan pada permukaan piston bersifat seragam pada tiap tahap proses sehingga kerja yang dilakukan pada piston sama dengan $\int p \, dV$. Untuk proses tekanan tetap, kerja yang dilakukan ini adalah:

$$P \int_{1500}^{2000} dV = 100 \times (2000-1500) = 50.000 \text{ N.cm}$$

Akan tetapi ini bukanlah kerja total yang dilakukan oleh sistem. Sistem menerima kerja sebanyak 20.000N.cm dari kincir, dan menurut konvensi yang biasa, kerja ini adalah -20.000N.cm. Jadi kerja yang dilakukan oleh sistem adalah :

$$W_{\text{tot}} = 50.000 - 20.000 = 30.000 \text{ N.cm}$$

D. Kerja dalam Suatu siklus : Diagram Indikator

Bila suatu sistem pada waktu mengalami suatu deretan proses kembali ke keadaan semula, dikatakan sistem itu telah mengalami suatu siklus. Kerja total sistem itu adalah:

$$W_{\text{siklus}} = \oint p \, dV$$

Di sini tanda \oint menyatakan suatu integrasi sepanjang suatu lintasan tertutup.

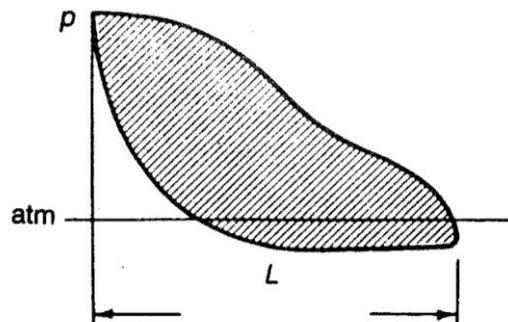
Jumlah kerja yang dilakukan oleh piston suatu mesin silinder atau kompresor dapat ditentukan dari diagram indikator. Ini adalah diagram tekanan terhadap volume (kedudukan piston) yang diperoleh dari suatu alat yang disebut indikator. Kerja yang dilakukan pada piston selama siklus adalah :

$$W_{\text{siklus}} = \oint p \, A \, dL$$

Disini A adalah luas piston, dan L adalah jarak yang ditempuh (panjang langkah). Persamaan diatas dapat ditulis dalam tekanan efektif rata-rata (p_m) sebagai:

$$W_{\text{siklus}} = p_m \, A \, L$$

Dimana L adalah panjang langkah piston. Tekanan efektif rata-rata adalah sama dengan tinggi rata-rata diagram indikator yang dikalikan dengan konstanta pegas.



Gambar 55. Diagram Indikator

Contoh:

Sebuah silinder mesin diesel dua langkah mempunyai diameter 25 cm dan langkah 40 cm. diagram indikator yang dibuat dalam percobaan dengan mesin ini mempunyai luas 26 cm^2 . konstanta pegas 400 N/cm. Tentukan : (a) tekanan efektif rata-rata; (b) Tenaga indikasi bila putaran mesin 300 putaran per menit!

Jawaban:

(a) Tekanan efektif rata-rata : $p_m = \frac{26}{25} \cdot 400 = 416 \text{ N/cm}^2$;

(b) Luas piston $A = \frac{\pi}{4} (25)^2 \text{ cm}^2 = 491 \text{ cm}^2 = 0,0491 \text{ m}^2$

4 jarak langkah $L = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$

4 daya indikasi $P = p_m L A N$

$$= \frac{416 \times 0,4 \times 491 \times 300}{60} = 408,512 \text{ Nm/det} = 408,512 \text{ kW}$$

(untuk mesin dua langkah, tiap satu putaran proses mengalami satu siklus).

E. Jenis Kerja Yang Lain

1. Batang elastik

Untuk batang elastik mengalami tarikan dan tekanan, koordinat intensif dan ekstensif adalah tegangan σ dan rengangan ϵ , dan jumlah kerja yang dilakukan adalah

$$\delta W = -\sigma d\epsilon$$

tanda negatif menyatakan bahwa bila $d\epsilon$ positif, kerja dilakukan pada batang. Untuk mengintegrasikan persamaan diatas, kita harus mengetahui hubungan antara tegangan dan rengangan untuk proses yang bersangkutan. Untuk proses isotermik, hubungan ini dinyatakan sebagai modulus elastisitas Young isotermik:

$$E_T = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

2. Kawat yang diregangkan

Bila tegangan τ , sedangkan perpanjangan yang dialami kawat = dL , maka kerja yang dilakukan adalah:

$$\delta W = -\tau dL$$

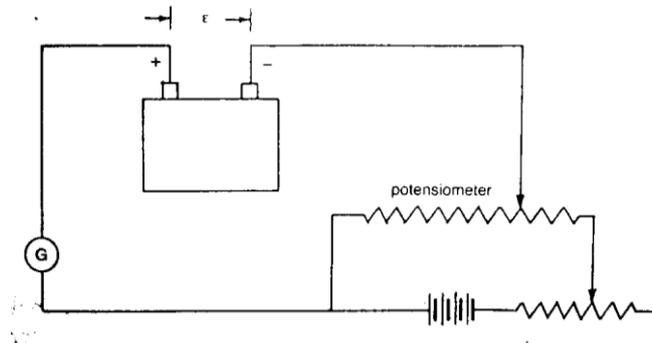
3. Lapisan Permukaan

Kita tinjau suatu lapisan permukaan dengan tegangan permukaan ϕ . Untuk perubahan luas yang kecil dA , kerja yang dilakukan adalah:

$$\delta W = -\phi dA$$

4. Sel Reversibel

Tinjau sesuatu sel reversibel dengan emf ϵ yang dihubungkan dengan suatu potensiometer, yang diperlihatkan pada gambar dibawah ini



Gambar . Transfer listrik yang reversibel

Bila pada suatu titik arusnya nol, maka potensial penyumbang pada titik tersebut sama dengan emf ϵ dari reaksi kimia. Misalkan perbedaan potensial luar dapat dibuat lebih kecil dari ϵ dan misalkan sejumlah muatan listrik yang positif, dQ_e , dialirkan melalui jaringan luar dari elektroda positif ke elektroda negatif.

Kerja yang dilakukan oleh sel:

$$\delta W = -\epsilon dQ_e$$

Tanda negatif di sisni diberikan karena bila sel melepaskan muatan melalui jaringan luar, maka dQ_e adalah bilangan negatif. Jadi muatan sel berkurang sejumlah dQ_e . Bila perbedaan potensial luar dibuat sedikit lebih besar dari ϵ , muatan listrik dibawa ke arah yang berlawanan, dan mengisi sel yang bersangkutan dengan pertambahan Q_e atau dQ_e yang positif. Dalam kedua hal di atas, kerja dinyatakan oleh persamaan $\delta W = -\epsilon dQ_e$.

Karena arus I sama dengan dQ_e/dt ; untuk t adalah waktu, persamaan $\delta W = -\epsilon dQ_e$ dapat ditulis sebagai:

$$\delta W = -\epsilon i dt$$

atau

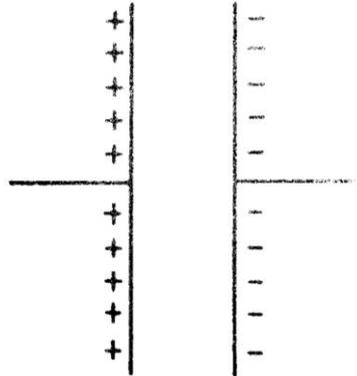
$$\frac{\delta W}{dt} = -\epsilon i$$

persamaan diatas merupakan dasar definisi dan satuan daya yang disebut watt. Satu watt adalah daya yang dihasilkan oleh arus 1 ampere yang mengalir melalui potensial 1 volt.

5. Polarisasi Dielektrik

Kita tinjau suatu isolator yang diletakkan di antara dua pelat paralel yang muatannya berlawanan seperti terlihat pada gambar di bawah ini. Molekul-molekul akan mengatur ketaknya sendiri sesuai dengan adanya medan listrik. Pada lapisan dalam material tidak terdapat muatan total, akan tetapi, karena perputaran

molekul-molekul, akan terdapat muatan total positif pada permukaan kiri dan negatif pada permukaan kanan.



Gambar . Kapasitor pelat

Bila muatan pada kedua pelat per satuan luas adalah Q_e/A dan $-Q_e/A$, maka intensitas medan listrik di antara pelat-pelat, sebelum isolator diselipkan di antaranya, sama dengan $\epsilon = Q_e/\epsilon_0 A$, di sini ϵ_0 adalah permitivitas ruang bebas. Karena muatan total persatuan luas Q'_e/A pada permukaan isolator, intensitas medan di dalam isolator, setelah diselipkan, sama dengan $\epsilon = (Q_e - Q'_e)\epsilon_0 A$. Jadi, untuk titik di dalam isolator seolah-olah terdapat muatan total persatuan luas sebesar:

$$\frac{Q_e - Q'_e}{A} \text{ dan } \frac{-(Q_e - Q'_e)}{A}$$

pada kedua pelat. Besarnya Q'_e bergantung pada bahan, tetapi tidak pernah sama atau lebih besar dari Q_e ; bila tidak, medan listrik akan menjadi nol. Data percobaan menunjukkan bahwa muatan imbas Q'_e berbandinglangsung dengan muatan pengimbas Q_e . Karena itu intensitas medan ditulis sebagai:

$$\epsilon = \frac{Q_e}{\epsilon A}$$

untuk $\epsilon = \frac{Q_e}{(Q_e - Q'_e)\epsilon_0}$ yang merupakan suatu karakteristik konstan

material yang disebut permitivitas. Angka perbandingan ϵ/ϵ_0 disebut konstanta dielektrika. Beda potensial di antara kedua pelat:

$$V = \epsilon d = \frac{Q_e}{\epsilon A} d \text{ di sini } d \text{ merupakan jarak antara kedua pelat}$$

Bila bekerja dengan listrik, sering kali diinginkan menyimpan sejumlah muatan. Karena muatan hanya dapat ditempatkan pada suatu benda dengan mentransfernya dari benda lain, diperlukan dua penghantar yang mempunyai hubungan geometrik antar satu dengan yang lainnya. Elektron-elektron dapat diambil dari satu

benda, yang menjadikan benda tersebut positif, dan memindahkan ke yang lain, dan menjadikan negatif. Kedua benda tersebut dikenal sebagai kondensator. Perbandingan jumlah muatan yang dipindahkan dengan potensial yang diperlukan untuk memindahkan muatan itu merupakan kemampuan benda untuk menyimpan muatan. Angka perbandingan ini disebut kapasitas:

$$C = \frac{Q_e}{V}$$

Karena diperlukan energi untuk mengangkut benda dari satu tempat ke tempat yang lain, suatu kapasitor atau kondensator menyimpan energi dan pada saat yang sama menyimpan muatan. Kerja δW yang dilakukan untuk memindahkan muatan dQ_e melalui suatu beda potensial V adalah:

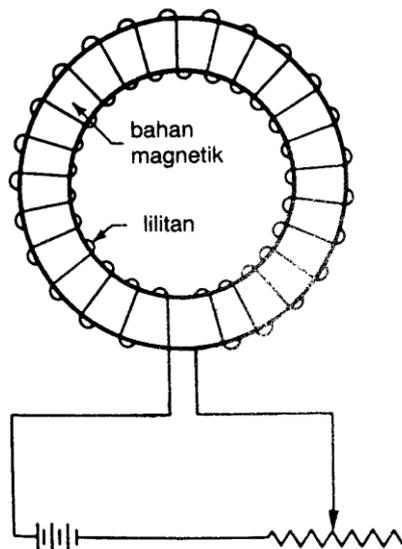
$$\delta W = V dQ_e$$

Karena $V = Q_e/C$. dan C suatu konstanta yang tergantung pada faktor geometrik. Persamaan di atas dapat diintegrasikan untuk memperoleh kerja yang dilakukan dalam memuat kapasitor.

$$W = \int V dQ_e = \frac{1}{C} \int_0^{Q_e} Q_e dQ_e = \frac{Q_e^2}{2C} = \frac{V \cdot Q_e}{2}$$

6. Magnetisasi

Kita perhatikan suatu zat di dalam medan magnet. Misalkan suatu cincin toroid dari bahan tertentu dililiti kawat seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar . Sistem Magnetik

Bila A luas penampang cincin toroid, L keliling rata-rata. N jumlah lilitan, I arus, maka medan magnet yang dinyatakan oleh intensitas medan H besarnya adalah:

$H = Ni/L$. pengaruh medan magnet pada suatu zat menyebabkan magnetisasi atau momen magnetik, M , sehingga efek keseluruhan arus listrik dalam kumparan terdiri atas pembentukan medan, dan magnetisasi zat dalam medan.

Efek total disebut induksi magnetik B , yaitu:

$$B = \mu_0(H+M)$$

Di sini M merupakan magnetisasi persatuan volume, dan μ_0 permeabilitas dari ruang bebas. Pengaruh ini secara kualitatif dapat diuraikan dengan menyatakan B dalam dua bagian: yang satu timbul langsung karena arus "luar" pada kumparan, yang lain timbul karena arus "dalam" yang bersangkutan dengan gerak keliling elektron (orbital motion) dan putaran orientasi (oriental spin) elektron dalam zat. Perbandingan antara induksi magnetik dengan kekuatan medan, disebut permeabilitas bahan, yaitu:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Misalkan terdapat arus, dalam selang dt , induksi magnetik diubah sebanyak dB . Jadi dari hukum Faraday tentang induksi elektro magnetik, di dalam kumparan diinduksikan suatu emf balik sejumlah $\epsilon = - N A dB/dt$. Selama selang dt , sejumlah muatan listrik, dQ_e , dipindahkan ke dalam jaringan, sehingga kerja yang dilakukan adalah:

$$\begin{aligned} \delta W &= \epsilon dQ_e = - NA \frac{dB}{dt} dQ_e \\ &= - NA \frac{dQ_e}{dt} dB = NA i dB \end{aligned}$$

di sini $\frac{dQ_e}{dt} = i$, arus listrik. Karena intensitas medan magnet adalah

$H = Ni/L$ persamaan di atas menjadi

$$\delta W = AL H dB = - V H dB$$

untuk $V = AL$ adalah volume. Karena $B = \mu_0 (H+M)$, maka:

$$\delta W = \mu_0 V H dH - \mu_0 V H dM$$

suku ruas kanan yang pertama menyatakan kerja yang dilakukan dalam memperbesar medan magnet dalam volume V dalam ruang hampa; suku kedua menyatakan kerja yang dilakukan untuk menambah magnetisasi bahan sebanyak dM . bila suku pertama diabaikan, kerja yang dilakukan oleh sistem adalah:

$$\delta W = - \mu_0 V H dM$$

tanda negatif menunjukkan diperlukan kerja untuk menambah magnetisasi bahan (untuk dM positif).

Penurunan di atas menunjukkan bahwa di dalam tiap kasus kita dapat menuliskan pernyataan kerja dalam bentuk umum:

$$W = F_k d\chi_k$$

Di sini F_k = gaya umum (*generalized force*)

χ_k = Perpindahan umum (*generalized displacement*)

Walaupun kerja $p dV$ merupakan kerja yang paling sering dijumpai, perlu dipahami bahwa ada beberapa jenis kerja lain yang dapat dilakukan. Tabel berikut mengikhtisarkan jenis-jenis kerja diatas.

Tabel 1. Kerja umum

Sistem	Modus	Gaya Umum	Perpindahan umum	Batasan	Kerja
Kimia	Gerak batas tegak lurus	Tekanan, P	Volume, dV	P seragam pada batas	P dV
Batang elastik	Gerak batas tegak lurus	Tegangan, σ	Regangan $d\epsilon$	Σ seragam pada penampang	$-\sigma d\epsilon$
Kawat terentang		Gaya tegang, τ	Perpanjangan, dL		$-\tau dL$
Sel reversibel		Emf, ϵ	Muatan dQ_e		$-\epsilon dQ_2$
Kondensor		Voltase, V	Muatan dQ_e		$-V dQ_e$
Nagnet		Medan magnet, H	Magnetisasi, dM		$-H dM$

F. Transfer energi dalam bentuk panas: definisi Panas

Panas adalah suatu bentuk energi yang dipindahkan melalui batas sistem yang ada pada suatu temperatur yang lebih tinggi ke sistem lain atau lingkungannya yang mempunyai temperatur lebih rendah, karena adanya perbedaan temperatur. Suatu benda tidak akan memiliki panas, akan tetapi panas dapat dikenali hanya pada waktu ia melalui batas sistem. Jadi panas adalah suatu fenomena transien.

Panas adalah suatu bentuk energi yang didefinisikan berdasarkan temperatur. Pengalaman menunjukkan bahwa bila dua benda yang temperaturnya berbeda disentuh satu sama lain, lambat laun keduanya akan mencapai suatu keadaan setimbang dan mencapai suatu temperatur yang sama. Dapat dikatakan bahwa kedua benda telah saling mempengaruhi; dengan perkataan lain panas merupakan interaksi antar sistem yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur di antara mereka. Panas dipindahkan melewati suatu permukaan batas dari suatu sistem yang temperaturnya lebih tinggi ke sistem yang temperaturnya lebih rendah, dan dapat diukur misalnya dengan mengukur jumlah massa zat tertentu yang

mengalami kenaikan temperatur dari tingkat yang satu ke tingkat yang lain.

Definisi ini mencakup suatu kenyataan yang penting yaitu bahwa panas, seperti kerja, adalah suatu besaran transien yang dapat dikenali hanya pada waktu melintasi suatu sistem yang sedang berinteraksi dengan lingkungannya atau dengan sistem lain. Panas bukanlah sifat yang dimiliki oleh suatu sistem, dan karena itu differensialnya tidak eksak. Oleh sebab itu, bila Q menyatakan panas, differensialnya dapat dinyatakan di sini sebagai δQ . Jumlah panas yang dipindahkan selama suatu proses yang dialami dari keadaan 1 ke keadaan 2 adalah:

$$Q = \int_1^2 \delta Q = Q_{1-2}$$

Dan bukan

$$Q = \int_1^2 \delta Q = Q_1 - Q_2$$

Untuk lebih jelasnya, perhatikan suatu batang tembaga panas sebagai suatu sistem dan air dingin di dalam sebagai sistem lain. Pada awalnya tiap sistem tidak memiliki panas. Sekarang, bila batang tembaga dimasukkan ke dalam air, kedua sistem mengadakan komunikasi termik, dan panas dipindahkan dari batang tembaga panas ke air dingin. Tetapi, bila temperatur kesetimbangan telah dicapai, tidak lagi terdapat perpindahan panas, dan tiap sistem tidak memiliki panas pada akhir proses.

Sebagai konvensi, bila dalam suatu interaksi panas suatu sistem menerima panas maka Q positif, dan sebaliknya, bila suatu sistem melepaskan panas, Q negatif. Bila selama suatu proses, suatu sistem dipisahkan dari lingkungannya atau dari sistem lain oleh suatu isolator sehingga perpindahan panas tak mungkin terjadi, maka proses yang berlangsung disebut proses adiabatik. Bila suatu sistem sederhana mengalami proses adiabatik, interaksi yang mungkin hanyalah interaksi kerja. Dalam proses adiabatik, $Q=0$

Satuan panas dalam sistem Inggris adalah BTU (British Thermal Unit), yang didefinisikan sebagai panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu pon (1 lbm) air sebanyak satu derajat Fahrenheit dari 60°F ke 61°F . Dalam sistem metrik, satuan panas adalah kalori. Satu kalori adalah sejumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan 1 gram air sebanyak satu derajat Celsius. Definisi yang lebih baru dan teliti dinyatakan dengan energi listrik 1 kalori internasional = 1,1867 joule absolut. Ini diperoleh dengan menggunakan ekuivalen antara panas dan kerja, yang akan diterangkan dalam bab termodinamika pertama.

G. Kesimpulan

H. Soal-soal