

## BAB VII

### 7.1

Dari pengalaman (eksperimen) kita ketahui bahwa usaha dapat diubah menjadi kalor seluruhnya. Misalnya, kalau dua benda kita gosokkan satu terhadap yang lain di dalam suatu fluida (sistem), maka usaha kita yang hilang timbul sebagai kalor didalam sistem

Sekarang ingin diketahui apakah proses kebalikannya juga dapat terjadi : dapatkah kalor diubah menjadi usaha seluruhnya ? hal ini sangat penting artinya untuk kehidupan sehari-hari, karena konversi ini merupakan dasar semua mesin bakar.

Dalam suatu mesin bakar, bahan bakar menghasilkan kalor dan kalor ini dikonversikan menjadi usaha mekanis,

Kita perhatikan hukum ke-1 : Apakah menurut hukum ini konversi tersebut dapat terjadi ?

$Q = \Delta U - W$  (Perhatikan bahwa  $W$  disini mengandung tanda, akibat konvensinya).

Kalau diperhatikan suatu proses dimana energi dalam tidak dirubah :  $\Delta U = 0$ , (Untuk gas ideal ini berarti proses isothermal), maka  $Q = -W$ . jadi kita memang melihat bahwa pada suatu waktu ekspansi isothermal gas ideal,  $Q = -W$ . Jadi kalor seluruhnya dapat diubah menjadi usaha luar.

Namun apabila ditinjau dari sudut praktek, proses ini tidak dapat diambil manfaatnya. Sebab : kita menghendaki perubahan kalor menjadi usahaluar secara tidak hentinya : Selama sistem diberi kalor, sistem diharapkan dapat menghasilkan usaha.

Didalam proses ekspansi isothermal diatas, ini akan menjadi berarti bahwa piston harus bergeser terus, maka sistem akan mempunyai volum yang terbatas.



Agar secara praktis dapat berguna, konversi harus dapat berjalan tanpa henti, tanpa memerlukan volume yang tak berhingga.

Suatu jalan keluar adalah dengan menggunakan rangkaian proses, tidak hanya satu proses tunggal saja. Rangkaian proses ini ialah siklus, yakni rangkaian proses sedemikian rupa sehingga keadaan sistem pada akhir proses sama dengan keadaan awalnya, sehingga proses dapat diulang.

Keadaan diagram, siklus tergambar sebagai kurva tertutup.

Perhatikan silus-siklus dibawah ini :



Tampak berlaku tiga hal berikut :

- Jelaslah bahwa keadaan sistem akhir siklus sama dengan keadaan awalnya. Mengingat bahwa energi dalam  $U$  adalah fungsi keadaan, maka  $U_f = U_i$  atau  $\oint dU = 0$ , hingga hukum ke-1 menghasilkan  $Q = -W$
- Jelas pula bahwa selama suatu siklus, sistem melakukan sejumlah usaha dan sejumlah usaha lain diadakan padanya. Tunjukkan !.

Apabila siklus dijalani searah dengan jalannya jarum jam ('clockwise') mesin menghasilkan usaha ( $W = |W|$ ). Mesin demikian disebut mesin kalor.  
 Sebaliknya : siklus yang akan dijalani berlawanan dengan arah gerak jarum jam (counter clockwise) memerlukan usaha luar  $W = |W|$  namun tetap berlaku  $\oint dU = 0$ . Mesin ini demikian disebut mesin pendingin.

- c. Nyata pula bahwa pada sesuatu siklus terdapat cabangdimana sistem menyerap kalor, tetapi selalu terdapat bahwa pada cabang lain sistem melepas kalor.

*Mesin kalor gas ideal*

Semua eksperimen menyatakan : tidak mungkinlah mesin kalor dalam suatu siklus hanya menyerap kalor saja selain menghasilkan sejumlah usaha. Selalu akan ada bagian tertentu dari siklus dimana mesin melepas sejumlah kalor pada lingkungan. Dengan kata lain :

Mesin kalor tidak mungkin mengkonversikan seluruh kalor yang diserapnya menjadi usaha. Ketidakmungkinan ini disebut hukum ke-2 termodinamika.

Perumusan hukum ke-2 dapat juga ditentukan dari hukum ke-1 sebagai berikut :  $dQ = dU - dW$  ; apabila diintegrasikan untuk satu siklus (mesin kalor) :

$\oint dQ = \oint dU - \oint dW$  atau  $Q = 0 - W$ , dimana  $|Q|$  adalah kalor yang dikonversikan menjadi usaha.



Jadi  $|Q| = |Q_m| - |Q_k|$ , dan  
 $|W|$  = usaha yang dihasilkan mesin kalor dalam siklus.  
 = usaha siklus pada diagram P-V

Catatan : Dalam menghitung Q dan W selama satu siklus, sebaiknya digunakan harga-harga mutlak

7.2



Mesin kalor dikerjakan antara 2 RK, dengan  $T_1 > T_2$ . RK yang bersuhu lebih tinggi berfungsi sebagai pensuplai kalor, RK yang bersuhu rendah berfungsi sebagai penadah kalor.

$RK_1$  = Bahan bakar

$RK_2$  = Udara (Lingkungan)

$|Q_1|$  : Kalor yang diserap dalam satu siklus dari RK-1 yang bersuhu tinggi

$|Q_2|$  : Kalor yang diserahkan pada RK-2 yang bersuhu lebih rendah

$|W|$  : Usaha luar yang dihasilkan selama satu siklus =  $|Q_1| - |Q_2|$



Efisiensi (atau daya guna) mesin menggambarkan banyaknya usaha yang dapat dihasilkan pada penyerapan kalor tertentu, maka didefinisikan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{\text{Usaha yang dihasilkan}}{\text{Kalor yang diserap}} = \frac{|W|}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

$\eta = 0$  Berarti  $W = 0$ , dan  $|Q_2| = |Q_1|$ , semua kalor yang diserahkan kembali : ini tidak patut disebut mesin

$\eta = 1$  berarti  $|Q_2| = 0$ , jadi semua kalor yang diserap diubah menjadi usaha luar. Dalam alam ini ternyata tidak mungkin.

Jadi efisiensi mesin kalor  $0 \leq \eta < 1$ , ini tak lain adalah perumusan alternatif hukum ke-2.

### Mesin pendingin



Jikalau arah siklus dibalik terdapatlah siklus mesin pendingin

$|Q_2|$  : adalah kalor yang diserap dari RK-2 yang bersuhu rendah (Bahan yang didinginkan).

$|Q_1|$  : adalah kalor yang diserap pada RK-1 yang bersuhu lebih tinggi (=lingkungan)

$|W|$  : adalah usaha yang diperlukan untuk pemindahan ini selama satu siklus.

Pada akhir siklus :  $\oint dU = 0$ , maka dari hukum ke-1 :  $Q = -W$  atau dengan

memperhatikan gambaran diatas :

$$|W| + |Q_2| = |Q_1| \text{ atau } |W| = |Q_1| - |Q_2|$$

Kegunaan mesin pendingin adalah untuk memindahkan kalor dari benda yang bersuhu lebih rendah ke RK yang bersuhu lebih tinggi. Dengan demikian benda yang sudah lebih dingin akan terus mendingin dan benda yang suhunya sudah lebih tinggi akan terus menerima kalor.

Jadi mesin pendingin yang baik haruslah dapat mengambil kalor sebanyak-banyaknya dari benda yang dingin, dan memindahkannya ke benda lain, dengan memerlukan usaha luar sesedikit mungkin.

Ini dinyatakan oleh  $\omega$  koefisien performansi.

$$\omega = \frac{\text{Kalor yang dipindahkan}}{\text{Usaha yang diperlukan}} = \frac{|Q_2|}{|W|} = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|}$$

Dalam prakteknya, ternyata bahwa kita tidak dapat merancang mesin pendingin, yang dapat memindahkan kalor, tanpa memerlukan usaha luar. Jadi semua mesin pendingin memerlukan usaha luar dalam pengoperasiannya. Ini berarti  $W \neq 0$ , dengan  $W \neq \infty$ , melainkan mempunyai nilai terbatas.

Catatan : 'Heat Pump' dan 'Mesin Pendingin'

Dengan sebuah mesin pendingin kita ingin menurunkan suhu sesuatu benda, dengan menyerahkan sejumlah kalor  $|Q_1|$  pada benda lain. Kalau  $|Q_1|$  yang menjadi 'of interest', maka kita lihat bahwa dengan memasukkan  $|W|$  joule dalam mesin pendingin, kita dapat menghasilkan  $|Q_1| = |W| + |Q_2|$  joule ; mesin berfungsi sebagai 'Heat Pump' Sedangkan  $|Q_2|$  menjadi 'of interest', mesin bertindak sebagai mesin pendingin.

### 7.3

*Perumusan Clausius* : (Sehubungan dengan mesin pendingin). Tidaklah mungkin dapat dibuat mesin pendingin yang bekerja bersiklus yang dapat memindahkan kalor dari benda yang bersuhu rendah ke benda bersuhu lebih tinggi, tanpa memerlukan usaha luar.

*Perumusan Kelvin-Planck* : (Sehubungan dengan mesin kalor). Tidak mungkin dibuat mesin kalor yang bekerja bersiklus dan dapat menghasilkan usaha luar, hanya dengan menyerap sejumlah kalor dari satu sumber panas saja, tanpa mengeluarkan sebagian dari kalor itu lingkungannya dalam bentuk kalor. Tidak mungkinlah kalor yang diserap mesin kalor bersiklus, seluruhnya diubah menjadi usaha luar.

Dalam buku-buku teks dapat saudara baca sendiri bahwa kedua perumusan ini ekuivalen; tidak saling bertentangan.

Mesin abadi (Perpetuum mobile)

Hukum ke-1 adalah suatu pernyataan akan kekalnya energi; tidak mungkin energi hilang begitu saja, atau diciptakan begitu saja.

Suatu alat (mesin) yang dapat menciptakan energi yang dibutuhkan sendiri agar dapat berfungsi hingga menjadi 'Self Supporting' adalah bertentangan dengan hukum ke-1 ini. Mesin semacam itu (yang jelas tidak ada) dinamai mesin abadi jenis ke-1.

Mesin abadi ini (seandainya ada) akan berfungsi sebagai kalor dengan efisiensi  $\eta = 1$ , berarti tanpa membuang kalor  $|Q_2|$  sedikitpun, atau mampu berfungsi sebagai mesin pendingin tanpa memerlukan usaha luar.

Kenyataannya sehari-hari hingga kini 'membuktikan' bahwa mesin-mesin abadi memang tidak ada, dengan cara lain kedua hukum termodinamika sebenarnya adalah hukum alam.

## 7.4

Siklus Otto : Terdiri dari dua proses adiabatik dan dua proses isokhorik



o-a : 'Intake'; Gas (Bensin + udara)

masuk ke dalam silinder pada tekanan dan suhu udara luar. (Dianggap gas ideal dengan  $C_V$  dan  $C_P$  tetap)

a-b : Kompresi adiabatik ; suhu gas naik. Dan karena gas tersebut dianggap bersifat ideal berlaku persamaan adiabatik :

$$T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1}$$

Di cabang ini sistem menerima usaha.

b-c : disini api dari busi meledakkan bahan bakar. Tekanan dan suhu lebih naik lagi karena ledakkan tersebut mengintroduksi kalor ke dalam sistem

Dari hukum ke-1 :  $dQ = C_V dT + PdV$  (Karena prosesnya adalah proses isokhorik).

$$Q_1 = \int_0^c C_V dT = C_V (T_c - T_b), \text{ karena } Q_1 \text{ ini sudah positif, maka :}$$

$$|Q_m| = Q_1 = C_V (T_c - T_b). \text{ Di cabang ini tidak dihasilkan usaha}$$

c-d : Ekspansi adiabatik

Ledakkan tadi mendorong pengisap keluar, gas berekspansi hingga mendingin, sedangkan P turun. Di cabang ini usaha dihasilkan.

Berlakuah :

$$T_c V_c^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1}, \text{ tetapi } V_c = V_b, \text{ dan } V_d = V_a, \text{ hingga } T_c V_b^{\gamma-1} = T_d V_a^{\gamma-1}$$

d-a : penyerapan kalor pada RK yang dingin secara isokhorik hingga tekanan menjadi sama dengan P udara, maka :

$$Q_2 = \int_d^a dQ_2 = C_V \int_d^a dT = C_V (T_a - T_d), \text{ ini ternyata negatif. Agar menjad positif,}$$

$$|Q_2| = C_V (T_d - T_a) = |Q_k|$$

a-o : Sisa-sisa gas buangan untuk diutkar dengan bahan bakar baru

$$\text{Efisiensi termal : } \eta = 1 - \frac{|Q_k|}{|Q_m|} = \dots = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b}$$

Ke-4 suhu dalam siklus sukar diukur dalam suatu mesin. Karena itu akan mengganti dengan koordinat V yang lebih mudah dapat ditentukan,

Ambil (a)-(b), maka :

$$V_a^{\gamma-1} (T_d - T_a) = V_b^{\gamma-1} (T_c - T_b)$$

$$\frac{T_d - T_a}{T_c - T_b} = \left( \frac{V_b}{V_a} \right)^{\gamma-1}, \text{ sehingga :}$$

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \left( \frac{V_b}{V_a} \right)^{\gamma-1} = 1 - \frac{1}{\left( \frac{V_a}{V_b} \right)^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Disini  $r = \frac{V_a}{V_b}$ , dinamai nisbah kompresi. Maka bsar r, mekin tinggi efesiensi.

Pada mesin praktek r tidak melebihi nilai 10, karena kalau demikian, bahan bakar akan terbakar dengan sendiri. Hal ini menyebabkan efesiensi turun. Nilai r (selain nilai  $\gamma$ ) bergantung pada jenis bahan bakar, hinngga  $\eta$  – pun demikian.

Siklus Diesel : Dua kurva dan satu kurva isokhorik; 1 kurva isobar ;



a-b : Kompresi adiabatik, T naik

Untuk gas berlaku :

$$T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1}$$

b-c : Ekspansi Isobarik : Gas menyerap kalor

$$Q_1 = \int_b^c dQ = C_p \int_b^c dT$$

$C_p(T_c - T_b)$  = sudah positif, maka

$$Q_1 = |Q_m|$$

c-d : Ekspansi adiabatik, T Turun.

$$T_c V_c^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1} = T_d V_a^{\gamma-1}$$

d-a : Pendinginan isokhorik, gas mengeluarkan kalor.

$$Q_2 = \int_d^a dQ = C_v \int_d^a dT = C_v(T_a - T_d); \text{ Ini negatif. Setelah dipositfkan :}$$

$$|Q_2| = C_v(T_d - T_a) = |Q_k|$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{|Q_k|}{|Q_m|} = 1 - \frac{C_v(T_d - T_a)}{C_p(T_c - T_b)}; \text{ dapat diubah menjadi:}$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{\frac{1}{r_e}^{\gamma} - \frac{1}{r_k}^{\gamma}}{\gamma \left( \frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_k} \right)}$$

dimana  $r_e$  (nisbah ekspansi) adalah  $r_e = \frac{V_a}{V_c}$  dan  $r_k$  (nisbah kompresi) adalah

$$r_k = \frac{V_a}{V_b}$$

Disamping kedua siklus ini masih banyak siklus lain. Efesiensi semua siklus ini mengandung faktor  $C_p, C_v$  dan  $\gamma$ . Besaran-besaran ini adalah karakteristik untuk zat (Bahan bakar), maka efesiensi siklus bergantung pada zat yang dipakai.

Satu-satunya siklus dengan  $\eta$  yang tidak bergantung pada bahan bakar, adalah siklus carnot (lihat nanti).