

BAB VIII

8.1

Kita tahu : dalam termodinamika semua proses dianggap berlangsung secara kuasistatik; setiap saat antara i dan f , sistem berada dalam keadaan seimbang. Proses demikian tidak sesuai dengan kenyataan dalam alam, dimana semua proses berlangsung secara tidak kuasistatik : Proses alam (Natural Processes) bersifat spontan, dari suatu keadaan tak seimbang sistem beralih ke keadaan seimbang yang lain melalui keadaan-keadaan yang bukan keadaan seimbang.

Fakta kedua yang harus diingat bahwa dalam alam semua proses disertai efek-efek berikut :

- Gesekan : Gaya antarsa benda-benda yang bergerak, bersentuhan satu dengan yang lain.
- Viskositas : gesekan antara partikel-partikel fluida;
- Hambatan listrik : semacam gesekan/hambatan yang dialami elektron-elektron dari inti-inti dalam kawat logam
- Histeresis : semacam hambatan dalam zat magnetik

Dengan perantara peristiwa-peristiwa ini sistem dapat berelaksasi dari suatu keadaan tidak seimbang ke keadaan seimbang. Peristiwa ini juga disebut efek disipasi, karena pada peristiwa itu energi hilang dari sistem masuk ke lingkungan (To dissipate = menghilang)., sudah menjadi kenyataan bahwa efek-efek ini tidak mungkin dicegah seluruhnya secara serempak.

Proses yang bersifat kuasistatik dan tidak disertai efek disipasi dikatakan bersifat reversibel. Dan setiap proses yang tidak memenuhi persyaratan ini disebut non-reversibel. Jelaslah bahwa semua peristiwa alam bersifat non-reversibel. Hal ini dapat dibuktikan dengan memperhatikan sesuatu proses alam, dan mencoba membalikannya. Pada pembalikan ini akan ternyata bahwa hukum ke-2 dilanggar, karena itu pembalikan tersebut tidak mungkin terjadi.

Proses-proses alam yang terpenting dapat dikategorikan menjadi lima kelompok besar :

Kelompok ke-1 Usaha Isotermik



Proses dimana usaha yang kita adakan pada sistem secara isotermik diubah menjadi kalor, yang kemudian diteruskan ke keliling

Misalnya : Cairan kental yang tidak diisolasi kita aduk (Contoh lain ; lihat buku Zemansky)

Semua proses dalam kelompok ini dapat digambarkan dengan hukum ke-1 sebagai berikut (Sistem ideal)

$dQ = C_v dT + p dV$; Karena Isotermik $dT = 0$, maka $dQ = PdV$

atau, jadi usaha yang kita adakan pada fluida seluruhnya menjadi kalor, yang kemudian didisipasikan ke lingkungan. Proses ini akan berarti bahwa lingkungan dapat melepaskan Q Joule tadi, yang oleh sistem akan dikonversikan seluruhnya menjadi W . Ini bertentangan dengan hukum ke-2

Kelompok ke-2 Usaha Adiabatik



Proses-proses dimana usaha yang kita adakan diubah menjadi energi dalam sistem secara adiabatik.

Misalnya : Fluida kental yang terisolasi kita aduk. (contoh lain ; lihat buku Zemansky)

Semua proses dalam kelompok ini dapat digambarkan dengan hukum ke-1 sebagai berikut : (Sistem gas ideal)

$Q = (U_f - U_i) - W$.. karena adiabatik, maka $W = U_f - U_i$;

Usaha luar yang diadakan pada sistem seluruhnya diubah menjadi energi dalam; proses ini non-reversibel, sebab seandainya reversibel ini akan berarti bahwa sistem dapat menyerahkan kembali energi tersebut dan mengubahnya 100 % menjadi usaha. Ini bertentangan dengan hukum ke-2
Atau dapat juga dilihat sebagai berikut :

Seandainya reversibel, maka kita akan dapat memperoleh usaha dari 1 sumber kalor saja; hal ini di"larang" hukum ke-2

Kelompok ke-3: Proses-proses dimana energi dalam diubah menjadi usaha, yang kemudian berubah lagi menjadi energi dalam

Contoh : Ekspansi bebas

Kelompok ke-4 : Proses konduksi dan radiasi kalor

Kelompok ke-5 : Proses-proses kimiawi (Lihat buku Zemansky)

Semua proses alam bersifat non-reversibel ; proses reversibel tidak kita dapatkan di alam. Namun demikian ide ini tetap dipakai dalam termodinamika (Seperti halnya dalam mekanika dimana selalu dimisalkan katrol tidak bergesekan, tali tidak mempunyai masa dan sebagainya)

Apa arti usaha luar bergantung secara kuasistatik ?

Pada proses demikian, perubahan volum haruslah berlangsung sedemikian lambatnya hingga sistem setiap saat berada dalam keadaan seimbang ; gas mengembang dan menekan pegas (lihat Bab 4.2)

Bagaimanakah membayangkan pertukaran kalor secara kuasistatik ?

Pada proses demikian, suhu sistem harus diubah sedemikian lambatnya hingga sistem setiap saat tetap berada dalam keadaan seimbang. Ini akan berarti bahwa kita harus menyediakan tak terhingga banyaknya R.K yang suhunya masing-masing berbeda sedikit sekali (Lihat Bab 5.2)

T_i ; $T_i + dT$; $T_i + 2 dT$;

Dan sistem berturut-turut harus dikontakkan dengan masing-masing RK itu. Bandingkan cara pertukaran kalor ini dengan pertukaran kalor secara isotermik; untuk ini sistem perlu dikontakkan pada 1 RK saja.

Mengingat hal diatas, maka jelaslah pada siklus-siklus yang dikenal, dibagian siklus dimana terdapat pertukaran kalor dan terjadi ΔT , harus disediakan ∞ banyaknya RK, kalau proses itu diinginkan berlangsung secara kuasistatik.

Sebaliknya hanya pada siklus carnot didapatkan bahwa siklus carnot dapat dijalani secara kuasistatik dengan memakai 2 buah RK saja (Mengapa ?)

Inilah keunggulan siklus carnot terhadap siklus-siklus lain.

Kalau dimisalkan bahwa semua efek disipasi dapat dihilangkan maka kita lihat : hanya siklus carnot yang mendekati siklus reversibel dengan baik.

Kesimpulan :

- Dalam alam tidak ada proses yang bersifat reversibel, sesuai dengan hukum ke-2. berarti, apabila dicoba dibalikkan,, hukum ke-2 akan terlanggar.
- Namun demikian, dalam Termodinamika semua proses dianggap reversibel, agar dapat digambarkan secara matematis melalui fungsi keadaan.

Pada suatu diagram, seperti P-V, T-V, dan P-T, 1 titik = 1 keadaan keseimbangan tertentu.



1 Kurva = serangkaian titik= proses reversibel.

Jelas bahwa ada ∞ proses reversibel yang mungkin antara 2 keadaan I dan f

- c. Bagaimana menggambarkan proses no-reversibel ?
Sebenarnya tidak mungkin; dipakai kurva putus-putus

8.2.

Dalam bab VII dilihat bahwa setiap mesin kalor memerlukan dua buah RK (paling sedikit) untuk dapat beroperasi. Tidak mungkinlah mesin kalor bekerja dengan hanya 1 RK. Karena itu efisiensi mesin kalor selalu lebih kecil dari 1 (Hukum ke-2).

Pula telah kita tinjau berbagai mesin kalor, masing-masing dengan efisiensinya sendiri.

Diatas telah dibicarakan syarat-syarat agar suatu proses bersifat reversibel. Kalau kita perhatikan kembali siklus-siklus yang ada, misalnya siklus Otto dan siklus Diesel, akan tampak bahwa semua siklus itu bersifat non-reversibel.

Siklus Otto



Kalor Q_1 dan Q_2 , masing-masing diserap dan diserahkan dalam proses isokhorik yang disertai perubahan suhu. Supaya pertukaran energi ini dapat berlangsung secara reversibel, maka diperlukan tak berhingga banyaknya RK. Tetapi yang tersedia hanya 2 RK maka jelas siklus Otto tidak dapat bersifat reversibel.

Siklus Diesel



Pertukaran kalor disini juga berlangsung hanya antara 2 RK sedangkan yang diperlukan banyak. (Perpindahan kalor secara isobarik dan isokhorik ini disertai perubahan suhu).

Sekarang ingin kita tinjau apakah mungkin didapatkan mesin yang bekerja secara siklus antara 2 RK saja, dimana pertukaran kalor ternyata terjadi pada proses isotermik, hingga hanya memerlukan 2 RK saja. Kalau seandainya efek-efek disipasi dianggap tidak ada, maka siklus Carnot memang bersifat reversibel.

Siklus ini sangat menarik, karena memiliki beberapa keunggulan :

- Merupakan siklus dasar, yang penting artinya dalam teori
- Satu-satunya siklus yang proses-prosesnya paling mendekati sifat reversibel
- Efisiensinya tidak bergantung pada bahan bakar yang digunakan
- Memiliki efisiensi terbesar apabila dibandingkan dengan yang lain untuk RK yang sama (Teorema Carnot)

Siklus Carnot terdiri dari dua proses adiabatik dan dua proses isotermik pada T_1 dan T_2 ($T_2 > T_1$)

a-b : kompresi adiabatik : suhu naik dari T_2 menjadi T_1 .



Kalau gas ideal yang dipakai memiliki kapasitas kalor tetap, maka berlaku : $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_a}{V_b} \right)^{\gamma-1}$

b-c : pada proses ini sistem menyerap keluar dari RK yang bersuhu T_1 :

$$\int_b^c dQ_1 = \int_b^c [C_v dT + P dV] = nRT_1 \int_b^c \frac{dV}{V}$$

$$Q_1 = nRT \ln \frac{V_c}{V_b} \text{ (Sudah positif)}$$

Maka $|Q_1| = nRT_1 \ln \frac{V_c}{V_b}$

c-d : ekspansi turun dari T_1 menjadi T_2 :

Berlaku :

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_d}{V_c} \right)^{\gamma-1}$$

d-a : Kompresi isotermik : Sistem menyerahkan kalor $|Q_2|$ secara reversibel pada RK yang bersuhu T_2 :

$$Q_2 = \int_d^a dQ_2 = \int_d^a C_v dT + PdV = nRT_2 \int_d^a \frac{dV}{V} = nRT_2 \ln \frac{V_a}{V_d}$$

Ini besaran negatif, maka $|Q_2| = nRT_2 \ln \frac{V_d}{V_a}$

$$\text{Efisiensi siklus carnot : } \eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{T_2 \ln \left(\frac{V_d}{V_a} \right)}{T_1 \ln \left(\frac{V_c}{V_b} \right)}$$

Tetapi (8.1)=(8.3), Berarti $\frac{V_a}{V_b} = \frac{V_d}{V_c}$ atau $\frac{V_c}{V_b} = \frac{V_d}{V_a}$. Maka diperoleh :

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Ciri-ciri siklus carnot :

- Dalam ungkapan η , tidak terdapat faktor-faktor yang bergantung pada zat seperti C_v , C_p dan γ , maka dapat disimpulkan bahwa siklus carnot tidak bergantung pada bahan bakar yang dipakai. Semata-mata ditentukan oleh suhu kedua RK.
- Kalau (8.5) dibandingkan dengan rumus umum efisiensi $\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$, dapatlah

$$\text{disimpulkan } \frac{|Q_1|}{|Q_2|} = \frac{T_1}{T_2}$$

Hubungan ini yang hanya berlaku untuk siklus carnot berarti bahwa kalor merupakan 'Thermometric property', (Harap diingat apa $|Q_1|$, $|Q_2|$, T_1 dan T_2 itu).

- Kesetaraan antara suhu gas ideal dan suhu termodinamika
Hubungan (8.6) mengatakan bahwa Q adalah thermometric property, dengan kata lain :

$$\frac{|Q|}{|Q_3|} = \frac{T}{T_3},$$

dengan

$|Q|$ adalah kalor yang diserap mesin carnot dari RK yang bersuhu T , dan

$|Q_3|$ adalah kalor yang diserahkan mesin carnot pada RK bersuhu T_3

(8.7) adalah definisi suhu termodinamika atau suhu mutlak (kelvin)

Apabila dibandingkan dengan (2.4) nyata kedua definisi itu setara $\frac{T}{T_2} = \frac{x}{x_2}$.

Dengan demikian maka suhu gas ideal = suhu termodinamika = suhu mutlak

Catatan : Suhu 0 K

Yang berarti bahwa reservoir kalor rendah tidak mungkin/boleh bersuhu nol kelvin.

Jadi : atas dasar hukum ke-2 suhu 0 K tidaklah mungkin



Mesin pendingin carnot

Apabila siklus carnot dijalankan dalam arah yang berlawanan dengan arah jarum jam, diperoleh siklus mesin pendingin carnot

Karena siklus carnot reversibel, maka besaran-besaran $|Q_1|$, $|Q_2|$ dan $|W|$ secara numerik tidakj berbeda dengan nilainya untuk mesin kalor. Jadi $|W| = |Q_1| - |Q_2|$. Hingga daya guna mesin pendingin carnot -

$$\omega = \frac{|Q_2|}{|W|} = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|} = (\text{Sifat siklus carnot}) = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

8.3

(dapat dibuktikan juga dengan memakai azas entropi lihat halaman 157)

Sekarang akan dibuktikan teorema carnot : bahwa diantara semua siklus yang dikerjakan antara 2 RK yang sama, siklus carnot-lah yang memiliki efisiensi tertinggi. (Disebabkan karena menggunakan siklus yang paing dekat pada siklus reversibel).

Perhatikan mesin kalor carnot R (Disingkat R karena memakai siklus yang reversibel), dan mesin kalor lain N yang tidak memakai siklus reversibel. Kedua mesin kita kerjakan antara 2 RK yang sama sedemikian rupa hingga menghasilkan usaha luar yang sama) : (Perhatikan bahwa ini slalu mungkin).

Misalkan :

	Carnot	Mesin lain
Kalor yang diserap dari RK-1	$ Q_R $	$ Q_N $
Usaha luar yang dihasilkan	$ W $	$ W $
Efisiensi	$\eta_R = \frac{ W }{ Q_R }$	$\eta_N = \frac{ W }{ Q_N }$

Maka ada tiga kemungkinan

$$\eta_N > \eta_R$$

$$\eta_N = \eta_R$$

$$\eta_N < \eta_R$$

Andaikan dahulu $\eta_R > \eta_N$ berarti $\frac{|W|}{|Q_N|} = \frac{|W|}{|Q_R|}$ atau $|Q_N| < |Q_R|$

Buat 'Gedanke experiment' berikut : sambungkan mesin N pada mesin R yang dikerjakan sebagai mesin pendingin carnot.



Yang kita dapatkan adalah suatu 'self acting device' yang bekerja antara RK-1 dan RK-2. Kalor bersih yang terambil dari RK-2 adalah $(|Q_R| - |W|) - (|Q_N| - |W|) = |Q_R| - |Q_N|$. Ini positif.

Kalor bersih yang diserahkan pada RK-1 adalah $|Q_R| - |Q_N|$ positif dan nilainya sama besar seperti nilai kalor yang terambil dari RK₂.

Maka self acting device ini, yang merupakan mesin pendingin, ternyata mampu memindahkan kalor sebanyak $|Q_R| - |Q_N|$ dari RK yang lebih dingin ke RK yang lebih panas tanpa memerlukan usaha luar.

Hal ini tidak mungkin, karena bertentangan dengan hukum ke-2.

Kesimpulan :

$\eta_N > \eta_R$ tidak mungkin karena melanggar hukum ke-2. Maka haruslah $\eta_N < \eta_R$ yang berarti Carnotlah berefisiensi tertinggi.

Latihan :

Kalau kita mulai dengan memisalkan bahwa $\eta_N < \eta_R$, kita akan sampai pada kesimpulan yang sama.

Sambungkan mesin kalor N pada mesin pendingin R.

Kalor yang keluar dari RK-2 : $(|Q_R| - |W|) - (|Q_N| - |W|) = |Q_R| - |Q_N|$ yang negatif, berarti kalor sebanyak $|Q_N| - |Q_R|$ masuk dalam RK-2

Kalor yang masuk RK-1 adalah $|Q_R| - |Q_N|$ yang negatif ; jadi kalor sebanyak $|Q_N| - |Q_R|$ keluar dari RK-1

Jadi mesin gabungan ini dapat memindahkan kalor sebanyak $|Q_N| - |Q_R|$ dari RK-1 (suhu tinggi) ke RK-2 (Suhu rendah), dan ini memang mungkin secara spontan. Maka $\eta_N < \eta_R$ mungkin $\eta_N < \eta_R$ tidak mungkin karena jelas $\eta_R = \eta_N$ juga mungkin.