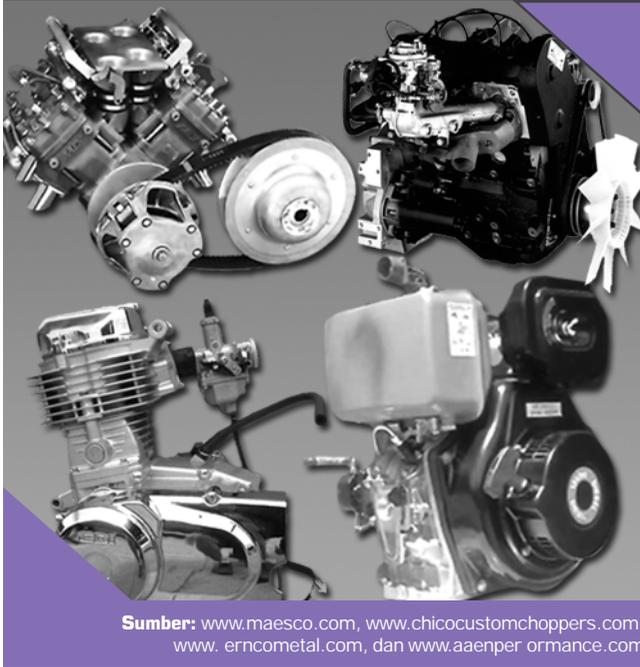


B a b 9

Termodinamika

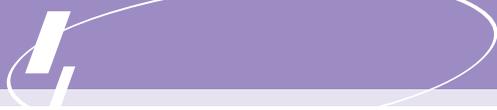


Pada bab ini, Anda akan diajak untuk dapat menerapkan konsep termodinamika dalam mesin kalor dengan cara menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan hukum termodinamika.

Kehadiran mesin sebagai alat pengubah energi kalor menjadi energi mekanik atau usaha telah mengubah kehidupan manusia menjadi lebih mudah, lebih cepat, dan lebih efisien. Mesin pabrik, mesin kapal, mesin kereta api, mesin mobil serta mesin motor telah meringankan usaha yang dibutuhkan manusia untuk beraktivitas dan membuat suatu produk. Tahukah Anda peralatan lain yang menggunakan mesin pengubah energi kalor menjadi usaha dalam prinsip kerjanya?

Mesin-mesin kalor tersebut ada yang menggunakan bahan bakar solar dan dikenal sebagai mesin diesel serta ada pula yang menggunakan bahan bakar bensin. Khusus untuk mesin berbahan bakar bensin, dikenal mesin dua tak dan mesin empat tak. Bagaimanakah cara mesin kalor bekerja? Tahukah Anda jenis usaha yang dilakukan mesin kalor dalam proses kerjanya? Prinsip yang mendasari cara kerja mesin kalor secara umum dapat Anda pelajari dalam pembahasan Bab 9 tentang termodinamika ini.

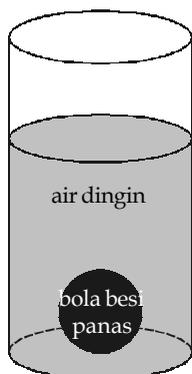
- A. Usaha dan Proses dalam Termodinamika**
- B. Hukum Pertama Termodinamika**
- C. Hukum Kedua Termodinamika**



A Usaha dan Proses dalam Termodinamika

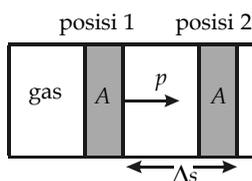
Soal Pramateri

1. Besaran-besaran apa sajakah yang dapat diamati pada suatu gas yang berada di dalam suatu ruangan tertutup?
2. Apakah yang dimaksud dengan proses isothermal, isokhorik, dan isobarik pada gas?



Gambar 9.1

Bola besi dan air merupakan sistem yang diamati. Adapun, udara luar merupakan lingkungannya.



Gambar 9.2

Ketika gas ideal di dalam tabung dipanaskan, gas tersebut memuai sehingga piston berpindah sejauh Δs .

Termodinamika adalah cabang ilmu Fisika yang membahas tentang hubungan antara panas (kalor) dan usaha yang dilakukan oleh kalor tersebut. Dalam melakukan pengamatan mengenai aliran energi antara panas dan usaha ini dikenal dua istilah, yaitu *sistem* dan *lingkungan*. Apakah yang dimaksud sistem dan lingkungan dalam termodinamika? Untuk memahami penggunaan kedua istilah tersebut dalam termodinamika, perhatikanlah **Gambar 9.1** berikut. Misalkan, Anda mengamati aliran kalor antara bola besi panas dan air dingin. Ketika bola besi tersebut dimasukkan ke dalam air. Bola besi dan air disebut sistem karena kedua benda tersebut menjadi objek pengamatan dan perhatian Anda. Adapun, wadah air dan udara luar disebut lingkungan karena berada di luar sistem, tetapi dapat memengaruhi sistem tersebut. Dalam pembahasan termodinamika, besaran yang digunakan adalah besaran makroskopis suatu sistem, yaitu tekanan, suhu, volume, entropi, kalor, usaha, dan energi dalam.

Usaha yang dilakukan oleh sistem (gas) terhadap lingkungannya bergantung pada proses-proses dalam termodinamika, di antaranya proses isobarik, isokhorik, isothermal, dan adiabatik.

Kerjakanlah 9.1

Cobalah Anda tuliskan sepuluh contoh peristiwa yang melibatkan sistem dan lingkungannya dalam buku latihan Anda.

1. Usaha Sistem terhadap Lingkungannya

Pada pembahasan Bab 4, Anda telah mempelajari definisi usaha (W) yang dilakukan pada benda tegar, yaitu

$$W = F \cdot s$$

Bagaimanakah cara menghitung usaha pada gas? Tinjaulah suatu gas yang berada dalam tabung dengan penutup berbentuk piston yang dapat bergerak bebas, seperti terlihat pada **Gambar 9.2**. Ketika gas tersebut dipanaskan, piston akan berpindah sejauh Δs karena gas di dalam tabung memuai dari volume awal V_1 menjadi volume akhir V_2 . Gaya yang bekerja pada piston adalah $F = pA$. Jika luas penampang piston (A) dan tekanan gas dalam tabung (P) berada dalam keadaan konstan, usaha yang dilakukan oleh gas dinyatakan dengan persamaan

$$W = pA \Delta s$$

Oleh karena $A \Delta s = \Delta V$, persamaan usaha yang dilakukan gas dapat ditulis menjadi

$$W = p \Delta V \quad (9-1)$$

atau

$$W = p(V_2 - V_1) \quad (9-2)$$

dengan: p = tekanan gas (N/m^2),

ΔV = perubahan volume (m^3), dan

W = usaha yang dilakukan gas (joule).

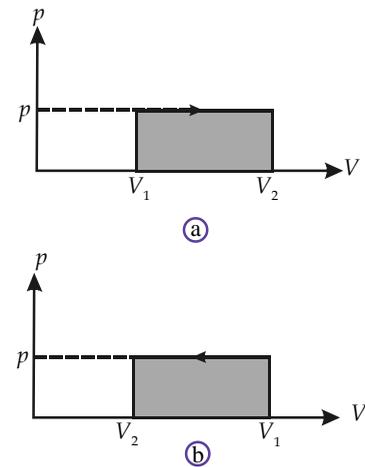
Nilai W dapat berharga positif atau negatif bergantung pada ketentuan berikut.

- Jika gas memuai sehingga perubahan volumenya berharga positif, gas (sistem) tersebut dikatakan melakukan usaha yang menyebabkan volumenya bertambah. Dengan demikian, usaha W sistem berharga positif.
- Jika gas dimampatkan atau ditekan sehingga perubahan volumenya berharga negatif, pada gas (sistem) diberikan usaha yang menyebabkan volume sistem berkurang. Dengan demikian, usaha W pada tersebut sistem ini bernilai negatif.

Usaha yang dilakukan oleh sistem dapat ditentukan melalui metode grafik. Pada **Gambar 9.3a** dapat dilihat bahwa proses bergerak ke arah kanan (gas memuai). Hal ini berarti $V_2 > V_1$ atau $\Delta V > 0$ sehingga W bernilai positif (gas melakukan usaha terhadap lingkungan). W sama dengan luas daerah di bawah kurva yang diarsir (luas daerah di bawah kurva $p - V$ dengan batas volume awal dan volume akhir)

Selanjutnya perhatikan **Gambar 9.3b**. Jika proses bergerak ke arah kiri (gas memampatkan), $V_2 < V_1$ atau $\Delta V < 0$ sehingga W bernilai negatif (lingkungan melakukan usaha terhadap gas). $W = -$ luas daerah di bawah kurva $p - V$ yang diarsir

Cobalah Anda tinjau kembali **Persamaan (9-1)**. Dari persamaan tersebut dan grafik hubungan tekanan (p) terhadap (V) pada **Gambar 9.3**, Anda dapat menyimpulkan bahwa suatu sistem dikatakan melakukan usaha (W berharga positif) atau sistem diberi usaha (W berharga negatif), jika pada sistem tersebut terjadi perubahan volume (ΔV).

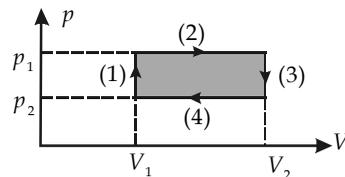


Gambar 9.3

- Grafik P-V suatu gas yang mengalami pemuaian (melakukan ekspansi)
- Grafik P-V suatu gas yang mengalami pemampatan (diberi kompresi)

Kerjakanlah 9.2

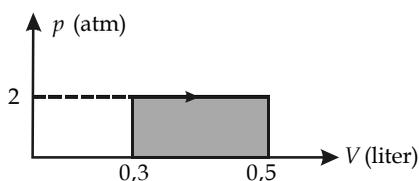
Suatu gas yang mengalami proses termodinamika memiliki grafik $p - V$ sebagai berikut.



Menurut pemahaman Anda, bagaimanakah usaha pada gas yang terdapat pada proses 1, proses 2, proses 3, dan proses 4? Diskusikanlah hal tersebut bersama teman-teman Anda.

Contoh 9.1

Suatu gas dipanaskan pada tekanan tetap sehingga memuai, seperti terlihat pada gambar.



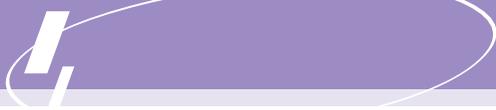
Tentukanlah usaha yang dilakukan gas. ($1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$)

Jawab

Diketahui: $p = 2 \text{ atm}$, $V_1 = 0,3 \text{ L}$, dan $V_2 = 0,5 \text{ L}$.

$$1 \text{ liter} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

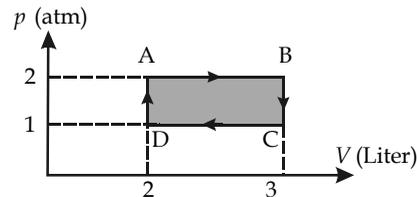
$$W = p (\Delta V) = p (V_2 - V_1) \\ = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (0,5 \text{ L} - 0,2 \text{ L}) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 60 \text{ Joule.}$$



Contoh 9.2

Gambar berikut menunjukkan suatu siklus termodinamika dari suatu gas ideal. Tentukanlah usaha yang dilakukan gas:

- dari keadaan A ke B,
- dari B ke C,
- dari C ke D,
- dari D ke A, dan
- dari A kembali ke A melalui B, C, dan D



Jawab

Diketahui: $p = p_B = 2 \text{ N/m}^2$, $p_D = p_C = 1 \text{ N/m}^2$, $V_A = V_D = 2 \text{ m}^3$, dan $V_B = V_C = 3 \text{ m}^3$.

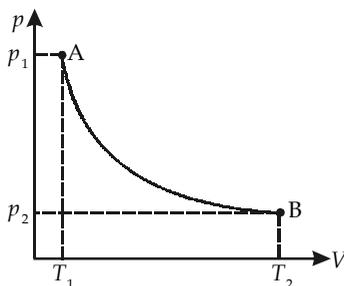
- $W_{AB} = p (V_B - V_A) = (2 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (3 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 200 \text{ joule}$
- $W_{BC} = p (V_C - V_B) = 0$
- $W_{CD} = p (V_D - V_C) = (1 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (2 - 3) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = -100 \text{ joule}$
- $W_{DA} = p (V_A - V_D) = 0$
- $W_{ABCD} = W_{\text{siklus}} = 200 \text{ Joule} + 0 - 100 \text{ Joule} + 0 = 100 \text{ joule}$

selain itu, dapat ditentukan dengan cara

$$\begin{aligned} W_{ABCD} &= W_{\text{siklus}} = \text{luas arsiran} \\ &= (2 - 1) \times 10^5 \text{ N/m}^2 (3 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 \\ &= 100 \text{ joule.} \end{aligned}$$

2. Proses dalam Termodinamika

Terdapat empat proses dalam gas pada bahasan termodinamika. Pada pembahasan Bab 8, Anda telah mengenal tiga proses, yaitu isothermal, isobarik, dan isokhorik. Proses yang keempat adalah proses adiabatik. Usaha yang terdapat pada gas yang mengalami proses-proses termodinamika tersebut akan diuraikan sebagai berikut.



Gambar 9.4

A-B merupakan proses isothermal.

a. Proses Isotermal

Proses isothermal adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada suhu tetap. Menurut Hukum Boyle, proses isothermal dapat dinyatakan dengan persamaan

$$pV = \text{konstan}$$

atau

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Dalam proses ini, tekanan dan volume sistem berubah sehingga persamaan $W = p \Delta V$ tidak dapat langsung digunakan. Untuk menghitung usaha sistem dalam proses isothermal ini digunakan cara integral. Misalkan, pada sistem terjadi perubahan yang sangat kecil sehingga persamaan usahanya dapat dituliskan sebagai

$$dW = pdV \tag{9-3}$$

Jika **Persamaan (9-3)** diintegrasikan maka dapat dituliskan

$$\int dW = \int pdV$$

Dari persamaan keadaan gas ideal diketahui bahwa $p = \frac{nRT}{V}$. Oleh karena itu, integral dari **Persamaan (9-3)** dapat dituliskan menjadi

$$\int dW = \int \frac{nRT}{V}$$

Jika konstanta nR , dan besaran suhu (T) yang nilainya tetap dikeluarkan dari integral, akan diperoleh

$$\int dW = n R T \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = n R T \ln V \Big|_{V_1}^{V_2}$$

$$W = n R T (\ln V_2 - \ln V_1)$$

$$\boxed{W = n R T \ln \frac{V_2}{V_1}} \quad \text{atau} \quad \boxed{W = n R T \ln \frac{p_2}{p_1}} \quad (9-4)$$

Contoh 9.3

Sepuluh mol gas helium memuai secara isothermal pada suhu 47°C sehingga volumenya menjadi dua kali volume mula-mula. Tentukanlah usaha yang dilakukan oleh gas helium.

Jawab

Diketahui: $T = 47^\circ\text{C} = (47 + 273) \text{ K} = 320 \text{ K}$ dan $V_2 = 2V_1$.

Usaha yang dilakukan gas pada proses isothermal:

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = (10 \text{ mol}) (8,31 \text{ J/mol})(320 \text{ K}) \ln \frac{2V}{V} = 26.592 \ln 2 = 18.428 \text{ joule}$$

b. Proses Isokhorik

Proses isokhorik adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada volume tetap. Menurut Hukum Gay-Lussac proses isokhorik pada gas dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{p}{T} = \text{konstan}$$

atau

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Oleh karena perubahan volume dalam proses isokhorik $\Delta V = 0$ maka usahanya $W = 0$.

c. Proses Isobarik

Proses isobarik adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada tekanan tetap. Menurut Hukum Charles, persamaan keadaan gas pada proses isobarik dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{V}{T} = \text{konstan}$$

atau

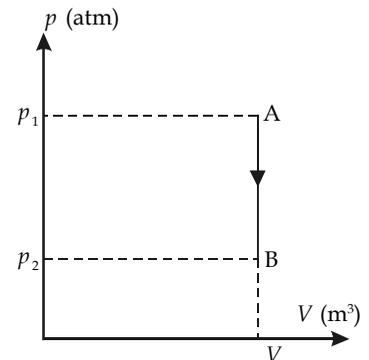
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Oleh karena volume sistem berubah, sedangkan tekanannya tetap, usaha yang dilakukan oleh sistem dinyatakan dengan persamaan

$$\boxed{W = p \Delta V = p (V_2 - V_1)} \quad (9-5)$$

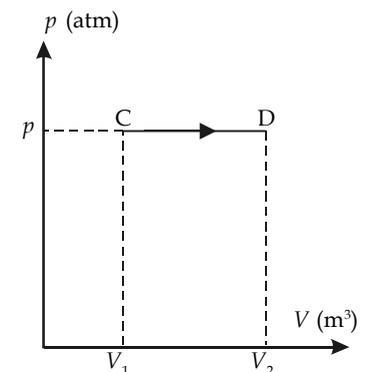
Contoh 9.4

Suatu gas yang volumenya 1,2 liter perlahan-lahan dipanaskan pada tekanan tetap $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ hingga volumenya menjadi 2 liter. Berapakah usaha yang dilakukan gas?



Gambar 9.5

A-B merupakan proses isokhorik.



Gambar 9.6

C-D adalah proses isobarik.

Kata Kunci

- Efisiensi mesin kalor
- Energi dalam
- Hukum Pertama Termodinamika
- Kalor
- Kapasitas kalor
- Lingkungan
- Mesin Carnot
- Proses adiabatik
- Reservoir kalor
- Siklus Carnot
- Sistem

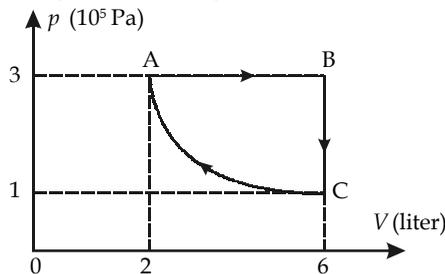
Jawab

Diketahui: $V_1 = 1,2 \text{ L}$, $V_2 = 2 \text{ L}$, dan $p = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.
 $1 \text{ liter} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$

Usaha yang dilakukan gas pada tekanan tetap (isobarik) adalah
 $W = p (V_2 - V_1) = (1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (2 - 1,2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 120 \text{ joule}$

Contoh 9.5

Suatu gas ideal mengalami proses siklus seperti grafik $p - V$ berikut.



Tentukanlah:

- usaha gas dari A ke B,
- usaha gas dari B ke C,
- usaha gas dari C ke A, dan
- usaha netto gas dalam satu siklus.

Jawab

Diketahui: $p_A = p_B = 3 \times 10^5 \text{ Pa}$, $p_C = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_A = 2 \text{ L}$, dan $V_B = V_C = 6 \text{ L}$.

- Proses A ke B adalah proses isobarik. Usaha dari A ke B dapat dihitung dengan persamaan $W_{AB} = p(V_B - V_A)$
 $= 3 \times 10^5 \text{ Pa} (6 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1.200 \text{ joule}$
- Proses B ke C adalah proses isokhorik. Oleh karena $V_C = V_B$, usaha yang dilakukan gas $W_{BC} = 0$
- Proses dari C ke A adalah isothermal. Oleh karena $p_C V_C = p_A V_A$, usaha dari C ke A adalah

$$W_{CA} = nRT \ln \frac{V_A}{V_C} = p_C V_C \ln \frac{V_A}{V_C} = p_A V_A \ln \frac{V_A}{V_C} \quad (\text{ingat: } pV = nRT)$$

$$W_{CA} = (1 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(6 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \ln \frac{2}{6} = -415,8 \text{ joule}$$

- Usaha netto gas dalam satu siklus ABCA :

$$W_{\text{siklus}} = W_{AB} + W_{BC} + W_{CA} = 1.200 \text{ joule} + 0 + (-415,8 \text{ joule}) = 784,2 \text{ joule}$$

d. Proses Adiabatik

Proses adiabatik adalah suatu proses perubahan keadaan gas di mana tidak ada kalor (Q) yang masuk atau keluar dari sistem (gas). Proses ini dapat dilakukan dengan cara mengisolasi sistem menggunakan bahan yang tidak mudah menghantarkan kalor atau disebut juga *bahan adiabatik*. Adapun, bahan-bahan yang bersifat mudah menghantarkan kalor disebut bahan diatermik

Proses adiabatik ini mengikuti persamaan Poisson sebagai berikut

$$p V^\gamma = \text{konstan}$$

atau

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad (9-6)$$

Oleh karena persamaan gas ideal dinyatakan sebagai $pV = nRT$ maka **Persamaan (9-4)** dapat ditulis

$$T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)} \quad (9-7)$$

dengan $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ = konstanta Laplace, dan $\frac{C_p}{C_v} > 1$. C_p adalah kapasitas kalor

gas pada tekanan tetap dan C_v adalah kalor gas pada volume tetap. Perhatikan diagram $p - V$ pada **Gambar 9.7**. Dari kurva hubungan $p - V$ tersebut, Anda dapat mengetahui bahwa:

- 1) Kurva proses adiabatik lebih curam daripada kurva proses isotermal.
- 2) Suhu, tekanan, maupun volume pada proses adiabatik *tidak* tetap.

Oleh karena sistem tidak melepaskan atau menerima kalor, pada kalor sistem proses adiabatik Q sama dengan nol. Dengan demikian, usaha yang dilakukan oleh sistem hanya mengubah energi dalam sistem tersebut. Besarnya usaha pada proses adiabatik tersebut dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$W = \frac{3}{2} nR(T_1 - T_2) = \frac{3}{2} (p_1 V_1 - p_2 V_2) \quad (9-8)$$

Contoh 9.6

Sebuah mesin memiliki rasio pemampatan 12 : 1 yang berarti bahwa setelah pemampatan, volume gas menjadi $\frac{1}{12}$ volume awalnya. Anggap bahan bakar bercampur udara pada suhu 35°C , tekanan 1 atm, dan $\gamma = 1,4$. Jika proses pemampatan terjadi secara adiabatik, hitunglah tekanan pada keadaan akhir dan suhu campuran.

Jawab

Diketahui: $V_2 = \frac{1}{12} V_1$, $T_1 = 35 + 273 = 308 \text{ K}$, dan $p_1 = 1 \text{ atm}$.

Untuk menentukan tekanan akhir p_2 , gunakan rumus

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \rightarrow p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \rightarrow p_2 = 1 \left(\frac{V_1}{\frac{1}{12} V_1} \right)^{1,4} = (12)^{1,4} = 32,4 \text{ atm}.$$

Suhu campuran atau suhu akhir T_2 diperoleh sebagai berikut:

$$T_1 V_1^{(\gamma-1)} = T_2 V_2^{(\gamma-1)} \rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_2 = 308 \text{ K} (12)^{1,4-1} = 308 \text{ K} (12)^{0,4} = 832 \text{ K} = 559^\circ\text{C}$$

Contoh 9.7

Usaha sebesar $2 \times 10^3 \text{ J}$ diberikan secara adiabatik untuk memampatkan 0,5 mol gas ideal monoatomik sehingga suhu mutlaknya menjadi 2 kali semula. Jika konstanta umum gas $R = 8,31 \text{ J/mol K}$, tentukanlah suhu awal gas.

Jawab

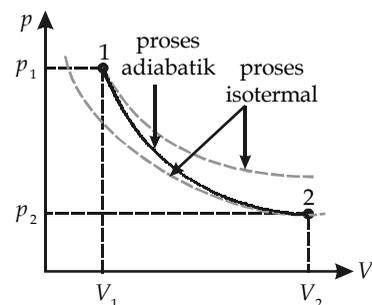
Diketahui: $W = 2 \times 10^3 \text{ J}$, $T_2 = 2T_1$, dan $n = 0,5 \text{ mol}$.

$$W = \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) = \frac{3}{2} n R (2T_1 - T_1)$$

$$= \frac{3}{2} n R T_1$$

$$T_1 = \frac{2W}{3 n R} = \frac{2(2 \times 10^3 \text{ joule})}{3 \times 0,5 \text{ mol} \times 8,31 \text{ J/molK}} = 321 \text{ K}$$

Jadi, suhu awal gas adalah 321 K.



Gambar 9.7

Pada proses adiabatik, kurva $p - V$ lebih curam dibandingkan dengan kurva $p - V$ pada proses isotermal.

Loncatan Kuantum



T (cean Thermal nergy onversion) adalah sebuah pembangkit tenaga listrik mini. Mesin ini bekerja berdasarkan perbedaan suhu antara permukaan laut yang hangat dan kedalaman laut yang dingin. Pusat pembangkit listrik ini bebas polusi.

Quantum Leap

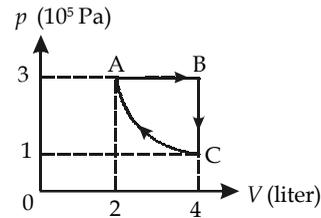
The mini T cean Thermal nergy onversion power plant pictured here is a heat engine that operates on the temperature difference between warm surface water and cold deep water. This is a nonpolluting power plant.

Sumber: conceptual physics, 1998

Soal Penguasaan Materi 9.1

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Suatu gas ideal monoatomik di dalam ruang tertutup memiliki tekanan $1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ dan volume 40 liter. Jika gas memuai secara isobarik sehingga volumenya menjadi 50 liter, gas akan menyerap kalor dari lingkungan sebesar 2 kJ. Tentukanlah:
 - a. usaha yang dilakukan gas, dan
 - b. perubahan energi dalam gas.
2. Suatu gas ideal mengalami proses menurut siklus, seperti diagram p - V berikut.



Tentukanlah kerja yang dihasilkan pada proses berdasarkan siklus tersebut.

B Hukum Pertama Termodinamika

Dari pembahasan materi Bab 8, Anda telah mengetahui bahwa suhu gas berhubungan dengan energi kinetik yang dimiliki oleh gas tersebut. Anda juga telah mempelajari hubungan antara energi kinetik dan energi dalam yang dimiliki oleh gas. Perubahan energi dalam dapat terjadi jika terjadi perubahan suhu (energi dalam akan meningkat jika suhu gas (sistem) meningkat atau pada gas diberikan kalor). Apakah perubahan energi dalam dapat terjadi pada gas yang diberi atau melakukan usaha mekanik?

Hubungan antara kalor yang diterima atau dilepaskan suatu sistem, usaha yang dilakukan pada sistem, serta perubahan energi dalam sistem yang ditimbulkan oleh kalor dan usaha tersebut dijelaskan dalam Hukum Pertama Termodinamika.

Hukum Pertama Termodinamika adalah perluasan bentuk dari Hukum Kekekalan Energi dalam mekanika. Hukum ini menyatakan bahwa:

"Jumlah kalor pada suatu sistem sama dengan perubahan energi dalam sistem tersebut ditambah usaha yang dilakukan oleh sistem."

Dengan demikian, meskipun energi kalor sistem telah berubah menjadi energi mekanik (usaha) dan energi dalam, jumlah seluruh energi tersebut selalu tetap. Secara matematis, Hukum Pertama Termodinamika dituliskan sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + W \quad (9-9)$$

dengan: Q = kalor yang diterima atau dilepaskan oleh sistem,

$\Delta U = U_2 - U_1$ = perubahan energi dalam sistem, dan

W = usaha yang dilakukan sistem.

Perjanjian tanda yang berlaku untuk **Persamaan (9-9)** tersebut adalah sebagai berikut.

1. Jika sistem melakukan kerja maka nilai W berharga positif.
2. Jika sistem menerima kerja maka nilai W berharga negatif
3. Jika sistem melepas kalor maka nilai Q berharga negatif
4. Jika sistem menerima kalor maka nilai Q berharga positif

Contoh 9.8

Delapan mol gas ideal dipanaskan pada tekanan tetap sebesar $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ sehingga volumenya berubah dari $0,08 \text{ m}^3$ menjadi $0,1 \text{ m}^3$. Jika gas mengalami perubahan energi dalam gas sebesar 1.500 J , berapakah kalor yang diterima gas tersebut.

Jawab

Diketahui: $p = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $V_1 = 0,08 \text{ m}^3$, $V_2 = 0,1 \text{ m}^3$, dan $\Delta U = 1.500 \text{ J}$.

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = \Delta U + p(V_2 - V_1)$$

$$= 1.500 \text{ joule} + 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (0,1 - 0,08) \text{ m}^3 = 1.500 \text{ joule} + 4.000 \text{ joule} = 5.500 \text{ J}$$

Contoh 9.9

Suatu sistem mengalami proses isobarik. Pada sistem dilakukan usaha sebesar 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem ΔU dan kalor yang diserap sistem = 150 joule, berapakah besarnya ΔU ?

Jawab

Diketahui: $W = -100 \text{ joule}$ (dilakukan usaha), dan $Q = 150 \text{ joule}$ (sistem menyerap kalor).

Menurut Hukum Pertama Termodinamika

$$\Delta U = Q - W = 150 \text{ joule} - (-100 \text{ joule}) = 250 \text{ joule}.$$

1. Perubahan Energi Dalam

Perubahan energi dalam ΔU tidak bergantung pada proses bagaimana keadaan sistem berubah, tetapi hanya bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir sistem tersebut.

Anda telah mengetahui bahwa proses-proses dalam termodinamika terbagi atas empat jenis, yaitu isothermal, isokhorik, isobarik, dan adiabatik. Perubahan energi dalam terjadi pada setiap proses tersebut dijelaskan sebagai berikut.

a. Proses Isothermal

Anda telah memahami bahwa proses isothermal merupakan suatu proses yang terjadi dalam sistem pada suhu tetap. Besar usaha yang dilakukan sistem proses isothermal ini adalah $W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$. Oleh karena $\Delta T = 0$, menurut Teori Kinetik Gas, energi dalam sistem juga tidak berubah ($\Delta U = 0$) karena perubahan energi dalam bergantung pada perubahan suhu. Ingatlah kembali persamaan energi dalam gas monoatomik yang dinyatakan dalam persamaan $\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$ yang telah dibahas pada Bab 8. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses isothermal ini dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + W = 0 + W$$

$$Q = W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{9-10}$$

b. Proses Isokhorik

Dalam proses isokhorik perubahan yang dialami oleh sistem berada dalam keadaan volume tetap. Anda telah memahami bahwa besar usaha pada proses isokhorik dituliskan $W = p\Delta V = 0$. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses ini dituliskan sebagai

$$Q = \Delta U + W = \Delta U + 0$$

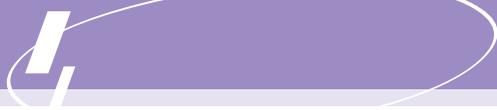
$$Q = \Delta U = U_2 - U_1 \tag{9-11}$$

Jelajah Fisika



Hero atau Heron membuat mesin uap pertama yang disebut aeolipile. Mesin ini terdiri atas sebuah pemanas yang terletak di bawah suatu kuali dan memiliki dua lubang angin. Uap yang dialirkan ke dalam kuali akan keluar dari lubang angin sehingga akan memutar kincir. Aeolipile tidak memiliki fungsi praktis.

Sumber: Jendela Iptek, 1997



Jelajah Fisika

Energi Dalam



Sumber: www. rewed.co ee.com

Energi dalam secangkir kopi hanya bergantung pada keadaan termodinamikanya (seberapa banyak kopi dan air yang dikandungnya, dan berapa suhunya). Energi tersebut tidak bergantung pada proses persiapan kopinya, yaitu lintasan termodinamika yang membawanya ke keadaan yang sekarang.

Sumber: Fisika niversitas, 2000

Dari **Persamaan (9-11)** Anda dapat menyatakan bahwa kalor yang diberikan pada sistem hanya digunakan untuk mengubah energi dalam sistem tersebut. Jika persamaan energi dalam untuk gas ideal monoatomik disubstitusikan ke dalam **Persamaan (9-11)**, didapatkan perumusan Hukum Pertama Termodinamika pada proses isokhorik sebagai berikut.

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T \quad (9-12)$$

atau

$$Q = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) \quad (9-13)$$

c. Proses Isobarik

Jika gas mengalami proses isobarik, perubahan yang terjadi pada gas berada dalam keadaan tekanan tetap. Usaha yang dilakukan gas dalam proses ini memenuhi persamaan $W = P \Delta V = p(V_2 - V_1)$. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses isobarik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = \Delta U + p(V_2 - V_1) \quad (9-14)$$

Untuk gas ideal monoatomik, **Persamaan (9-14)** dapat dituliskan sebagai

$$Q = \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) + p (V_2 - V_1) \quad (9-15)$$

d. Proses adiabatik

Dalam pembahasan mengenai proses adiabatik, Anda telah mengetahui bahwa dalam proses ini tidak ada kalor yang keluar atau masuk ke dalam sistem sehingga $Q = 0$. Persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk proses adiabatik ini dapat dituliskan menjadi

$$Q = \Delta U + W$$

$$0 = \Delta U + W$$

atau

$$W = - \Delta U = -(U_2 - U_1) \quad (9-16)$$

Berdasarkan **Persamaan (9-16)** tersebut, Anda dapat menyimpulkan bahwa usaha yang dilakukan oleh sistem akan mengakibatkan terjadinya perubahan energi dalam sistem di mana energi dalam tersebut dapat bertambah atau berkurang dari keadaan awalnya.

Persamaan Hukum Pertama Termodinamika untuk gas ideal monoatomik pada proses adiabatik ini dituliskan sebagai

$$W = - \Delta U = - \frac{3}{2} n R (T_2 - T_1) \quad (9-17)$$

2. Kapasitas Kalor

Kapasitas kalor gas adalah banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu gas sebesar 1°C , untuk volume tetap disebut C_v dan untuk tekanan tetap disebut C_p .

Secara matematis, kapasitas kalor (C) dinyatakan dengan persamaan

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (9-18)$$

Pada gas, perubahan suhu dapat dilakukan dengan proses isobarik atau proses isokhorik. Dengan demikian, kapasitas kalor gas dapat dibedakan menjadi dua, yakni kapasitas kalor pada tekanan tetap (C_p) dan kapasitas kalor pada volume tetap (C_v). Perumusan kedua pada kapasitas kalor tersebut secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T} \text{ dan } C_v = \frac{Q_v}{\Delta T} \quad (9-19)$$

Jika besaran Q_p dan Q_v dimasukkan ke dalam persamaan Hukum Pertama Termodinamika, akan didapatkan persamaan berikut.

a. Pada proses isokhorik

$$Q_v = \Delta U + W \quad (9-20)$$

Oleh karena dalam proses ini volume sistem tetap ($\Delta V = 0$) maka usaha sistem $W = 0$ sehingga didapatkan persamaan

$$Q_v = \Delta U \quad (9-21)$$

b. Pada proses isobarik

$$Q_p = \Delta U + W$$

Oleh karena dalam proses ini tekanan sistem tetap ($\Delta p = 0$), usaha sistem $W = p \Delta V$. Dengan demikian, persamaan Hukum Pertama Termodinamika dapat dituliskan

$$Q_p = \Delta U + p \Delta V \quad (9-22)$$

Dengan melakukan substitusi **Persamaan (9-21)** ke **Persamaan (9-22)** dapat dituliskan persamaan

$$Q_p = \Delta U + p \Delta V \text{ atau } Q_p - Q_v = p \Delta V \quad (9-23)$$

Selanjutnya, jika **Persamaan (9-19)** disubstitusikan **Persamaan (9-23)** akan diperoleh persamaan

$$(C_p \Delta T) - (C_v \Delta T) = p \Delta V$$

$$(C_p - C_v) \Delta T = p \Delta V$$

$$C_p - C_v = \frac{p \Delta V}{\Delta T} \quad (9-24)$$

Berdasarkan persamaan keadaan gas ideal $pV = nRT$, **Persamaan (9-24)** dapat dituliskan menjadi

$$C_p - C_v = nR \quad (9-25)$$

Untuk gas monoatomik, energi dalam gas dinyatakan dengan persamaan

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T$$

Dengan demikian, kapasitas kalor pada proses isokhorik ($Q_v = \Delta U$) dapat dituliskan sebagai

$$C_v = \frac{3}{2} nR \quad (9-26)$$

Perlu Anda

Ketahui

Umumnya memasak melibatkan proses isobarik. Hal ini disebabkan karena tekanan udara di atas panci, wajan, atau dalam oven microwave tetap konstan sementara makanan dipanaskan.

Sumber: Fisika universitas, 2000



Besar C_p dapat ditentukan dari **Persamaan (9-25)** sehingga diperoleh

$$C_p = C_v + nR$$

$$C_p = \frac{3}{2}nR + nR$$

$$C_p = \frac{5}{2}nR \quad (9-27)$$

Kerjakanlah 9.3

Cobalah Anda buat di dalam buku latihan Anda, besarnya C_p dan C_v untuk gas diatomik pada suhu rendah, suhu sedang, dan suhu tinggi. Kemudian, bandingkanlah jawaban Anda dengan teman sebangku Anda. Diskusikanlah jawaban Anda tersebut dengan guru Fisika Anda.

Jelajah Fisika

Sadi Carnot



Sumber: www.ai.it

Sadi Carnot ialah seorang ilmuwan yang lahir di Paris, Prancis. Sebagian besar waktunya ia gunakan untuk menyelidiki mesin uap. Pada 1824, ia mempublikasikan esai yang berjudul *leçons sur la puissance motrice du feu*. Penemuannya menjadi dasar ilmu termodinamika dan memberikan manfaat besar terhadap kehidupan manusia.

Sumber: www.all-illustrations.com

Contoh 9.10

Gas nitrogen bermassa 56×10^{-3} kg dipanaskan dari suhu 270 K menjadi 310 K. Jika nitrogen ini dipanaskan dalam bejana yang bebas memuai, diperlukan kalor sebanyak 2,33 kJ. Jika gas nitrogen ini dipanaskan dalam bejana kaku (tidak dapat memuai), diperlukan kalor sebesar 1,66 kJ. Jika massa molekul relatif nitrogen 28 g/mol, hitunglah kapasitas kalor gas nitrogen dan tetapan umum gas.

Jawab

Diketahui: $m = 56 \times 10^{-3}$ kg, $\Delta T = 40$ K, dan $M_r = 28$ g/mol = 28×10^{-3} kg/mol.

a. Proses tekanan tetap pada gas:

$$Q_p = 2,33 \text{ kJ} = 2.330 \text{ J}$$

$$Q_p = C_p (\Delta T)$$

$$2.330 \text{ J} = C_p (40 \text{ K}) \rightarrow C_p = 58,2 \text{ J/K}$$

Proses volume tetap pada gas:

$$Q_v = 1,66 \text{ kJ} = 1.660 \text{ J}$$

$$Q_v = C_v (\Delta T)$$

$$1.660 \text{ joule} = C_v (40 \text{ K}) \rightarrow C_v = 41,5 \text{ J/K}$$

b. Tetapan umum gas R dihitung sebagai berikut.

$$C_p - C_v = nR = \frac{m}{M_r} R \rightarrow R = \frac{M_r}{m} (C_p - C_v)$$

$$R = \frac{28 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}{56 \times 10^{-3} \text{ kg}} (58,2 - 41,5) \text{ J/K} = 8,35 \text{ J/mol K}$$

3. Siklus Carnot dan Efisiensi Mesin

Keadaan suatu sistem dalam termodinamika dapat berubah-ubah, berdasarkan percobaan besaran-besaran keadaan sistem tersebut. Namun, besaran-besaran keadaan tersebut hanya berarti jika sistem berada dalam keadaan setimbang. Misalnya, jika Anda mengamati suatu gas yang sedang memuai di dalam tabung, temperatur dan tekanan gas tersebut di setiap bagian tabung dapat berubah-ubah. Oleh karena itu, Anda tidak dapat menentukan suhu dan temperatur gas saat kedua besaran tersebut masih berubah. Agar dapat menentukan besaran-besaran keadaan gas, gas harus dalam keadaan *reversibel*. Apakah yang dimaksud dengan proses reversibel? Proses reversibel adalah suatu proses dalam sistem di mana sistem hampir selalu berada dalam keadaan setimbang.

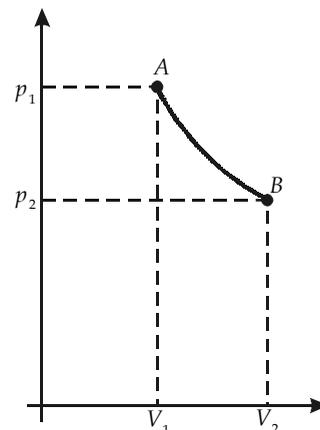
Perhatikanlah **Gambar 9.8**. Dari grafik p - V tersebut, suatu gas mengalami perubahan keadaan dari A ke B. Diketahui bahwa pada keadaan A sistem memiliki tekanan p_1 dan volume V_1 . Pada tekanan B, tekanan sistem berubah menjadi p_2 dan volumenya menjadi V_2 . Jika gas tersebut mengalami proses reversibel, keadaan gas tersebut dapat dibalikkan dari keadaan B ke A dan tidak ada energi yang terbuang. Oleh karena itu, pada proses reversibel, kurva p - V yang dibentuk oleh perubahan keadaan sistem dari A ke B dan dari B ke A adalah sama.

Dalam kenyataannya, sulit untuk menemukan proses reversibel karena proses ini tidak memperhitungkan energi yang hilang dari dalam sistem (misalnya, gesekan). Namun, proses reversibel memenuhi Hukum Pertama Termodinamika.

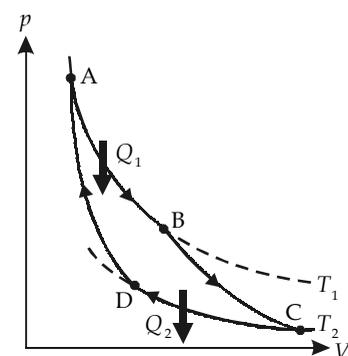
Tahukah Anda yang dimaksud dengan siklus termodinamika? Siklus termodinamika adalah proses yang terjadi pada sistem sehingga akhirnya sistem kembali pada keadaan awalnya.

Prinsip siklus termodinamika ini kali pertama dijelaskan oleh seorang insinyur Perancis bernama **Sadi Carnot** dan disebut siklus Carnot. Siklus Carnot adalah suatu siklus ideal reversibel yang terdiri atas dua proses isothermal dan proses adiabatik, seperti terlihat pada **Gambar 9.9**.

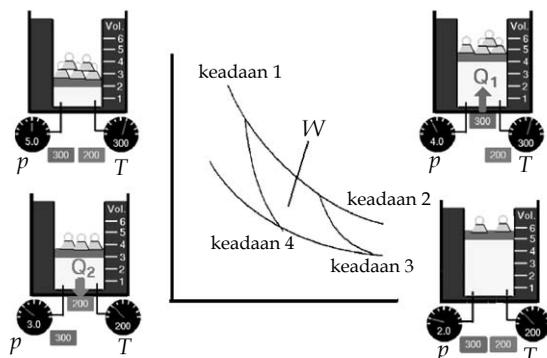
Siklus Carnot ini merupakan salah satu prinsip dasar siklus termodinamika yang digunakan untuk memahami cara kerja mesin Carnot. Perhatikanlah **Gambar 9.10** berikut.



Gambar 9.8
Perubahan keadaan gas dalam siklus reversibel.



Gambar 9.9
Siklus Carnot



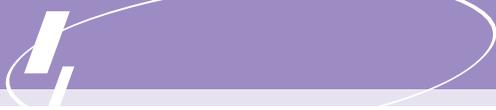
Sumber: www.nasa.gov

Pada gambar tersebut suatu gas ideal berada di dalam silinder yang terbuat dari bahan yang tidak mudah menghantarkan panas. Volume silinder tersebut dapat diubah dengan cara memindahkan posisi pistonnya. Untuk mengubah tekanan gas, diletakkan beberapa beban di atas piston. Pada sistem gas ini terdapat dua sumber kalor yang disebut reservoir suhu tinggi (memiliki suhu 300 K) gas memiliki temperatur tinggi (300 K), tekanan tinggi (4 atm), dan volume rendah (4 m³).

Berikut urutan keempat langkah proses yang terjadi dalam siklus Carnot.

- Pada langkah, gas mengalami ekspansi isothermal. Reservoir suhu tinggi menyentuh dasar silinder dan jumlah beban di atas piston dikurangi. Selama proses ini berlangsung, temperatur sistem tidak berubah, namun volume sistem bertambah. Dari keadaan 1 ke keadaan 2, sejumlah kalor (Q_1) dipindahkan dari reservoir suhu tinggi ke dalam gas.
- Pada langkah kedua, gas berubah dari keadaan 2 ke keadaan 3 dan mengalami proses ekspansi adiabatik. Selama proses ini berlangsung, tidak ada kalor yang keluar atau masuk ke dalam sistem. Tekanan gas diturunkan dengan cara mengurangi beban yang ada di atas piston. Akibatnya, temperatur sistem akan turun dan volumenya bertambah.
- Pada langkah ketiga, keadaan gas berubah dari keadaan 3 ke keadaan 4 melalui proses kompresi isothermal. Pada langkah ini, reservoir suhu rendah (200 K) menyentuh dasar silinder dan jumlah beban di atas piston bertambah. Akibatnya tekanan sistem meningkat, temperaturnya

Gambar 9.10
Siklus Carnot pada mesin Carnot.



Jelajah Fisika

Lokomotif Uap



Sumber: www.midcontinent.org

Lokomotif uap ini bekerja dengan menggunakan hukum pertama termodinamika. Saat panas dihasilkan oleh batubara atau kayu yang dibakar dalam mesin lokomotif, sebagian energi menaikkan suhu air (yang mendidih dan menghasilkan uap) dalam mesin. Sisa energi dipakai guna mengekspansikan uap untuk menghasilkan kerja dan menggerakkan lokomotif.

Sumber: Fisika universitas, 1998

konstan, dan volume sistem menurun. Dari keadaan 3 ke keadaan 4, sejumlah kalor (Q_2) dipindahkan dari gas ke reservoir suhu rendah untuk menjaga temperatur sistem agar tidak berubah.

- d. Pada langkah keempat, gas mengalami proses kompresi adiabatik dan keadaannya berubah dari keadaan 4 ke keadaan 1. Jumlah beban di atas piston bertambah. Selama proses ini berlangsung, tidak ada kalor yang keluar atau masuk ke dalam sistem, tekanan sistem meningkat, dan volumenya berkurang.

Menurut kurva hubungan p - V dari siklus Carnot, usaha yang dilakukan oleh gas adalah luas daerah di dalam kurva p - V siklus tersebut. Oleh karena siklus selalu kembali ke keadaannya semula, $\Delta U_{\text{siklus}} = 0$ sehingga persamaan usaha siklus (W_{siklus}) dapat dituliskan menjadi

$$W_{\text{siklus}} = \Delta Q_{\text{siklus}} = (Q_1 - Q_2) \quad (9-28)$$

dengan: Q_1 = kalor yang diserap sistem, dan
 Q_2 = kalor yang dilepaskan sistem.

Ketika mesin mengubah energi kalor menjadi energi mekanik (usaha). Perbandingan antara besar usaha yang dilakukan sistem (W) terhadap energi kalor yang diserapnya (Q_1) disebut sebagai *efisiensi mesin*. Persamaan matematis efisiensi mesin ini dituliskan dengan persamaan

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% \quad (9-29)$$

dengan η = efisiensi mesin.

Oleh karena usaha dalam suatu siklus termodinamika dinyatakan dengan $W = Q_1 - Q_2$ maka **Persamaan (9-30)** dapat dituliskan menjadi

$$\eta = \left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right) \times 100\% \quad (9-30)$$

Pada mesin Carnot, besarnya kalor yang diserap oleh sistem (Q_1) sama dengan temperatur reservoir suhu tingginya (T_1). Demikian juga, besarnya kalor yang dilepaskan sistem (Q_2) sama dengan temperatur reservoir suhu rendah mesin Carnot tersebut. Oleh karena itu, **Persamaan (9-30)** dapat dituliskan menjadi

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \times 100\% \quad (9-31)$$

Dari **Persamaan (9-31)** tersebut, Anda dapat menyimpulkan bahwa efisiensi mesin Carnot dapat ditingkatkan dengan cara menaikkan temperatur reservoir suhu tinggi atau menurunkan temperatur reservoir suhu rendah.

Kerjakanlah 9.4

Selain siklus Carnot, terdapat dua siklus termodinamika lainnya, yakni siklus Otto dan siklus Diesel. Buatlah sebuah makalah yang menerangkan tentang kedua siklus tersebut dan aplikasinya pada mesin Otto dan mesin Diesel. Kemudian, presentasikanlah makalah yang Anda buat tersebut.

Contoh 9.11

Sebuah mesin gas ideal bekerja dalam suatu siklus Carnot antara suhu tinggi T_1 °C dan dan suhu rendah 127°C. Jika mesin menyerap kalor 60 kkal pada suhu tertinggi dan membuang kalor 48 kkal, hitunglah:

- usaha yang dihasilkan dalam satu siklus,
- efisiensi mesin tersebut, dan
- besarnya suhu tinggi T_1 .

Jawab

Diketahui: $T_2 = 127^\circ \text{C}$, $Q_1 = 60 \text{ kkal}$, dan $Q_2 = 48 \text{ kkal}$.

- Berdasarkan Hukum Pertama termodinamika:

$$W = Q_1 - Q_2 = 60 \text{ kkal} - 48 \text{ kkal} = 12 \text{ kkal}$$

- Efisiensi mesin Carnot

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \frac{12 \text{ kkal}}{60 \text{ kkal}} \times 100\% = 20\%$$

- Efisiensi mesin dalam bentuk suhu dinyatakan dengan persamaan

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \rightarrow 20\% = \left(1 - \frac{400 \text{ K}}{T_1}\right) \times 100\%$$

$$\frac{400 \text{ K}}{T_1} = 1 - 0,2 \rightarrow T_1 = \frac{400 \text{ K}}{0,8} = 500 \text{ K} = 227^\circ \text{C}$$

Contoh 9.12

Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi bersuhu 800 K memiliki efisiensi 40%. Agar efisiensi maksimumnya naik menjadi 50%, tentukanlah kenaikan suhu yang harus dilakukan pada reservoir suhu tinggi.

Jawab

Diketahui: $T_1 = 800 \text{ K}$, $\eta_1 = 40\%$, dan $\eta_2 = 50\%$.

Cara umum

- Efisiensi mesin semula $\eta_1 = 40\%$

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_2}{T_1} \rightarrow 40\% = 1 - \frac{T_2}{800 \text{ K}} \rightarrow \frac{T_2}{800 \text{ K}} = 0,6 \rightarrow T_2 = 480 \text{ K}$$

- Agar efisiensi menjadi $\eta_2 = 50\%$ untuk $T_2 = 480 \text{ K}$

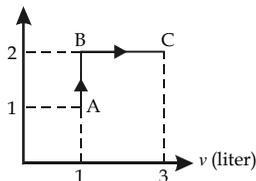
$$\eta_2 = 1 - \frac{T_2}{T_1} \rightarrow 50\% = 1 - \frac{480 \text{ K}}{T_1} \rightarrow \frac{480 \text{ K}}{T_1} = 0,5 \rightarrow T_1 = 960 \text{ K}$$

Jadi, temperatur suhu tinggi harus dinaikkan menjadi 960 K.

Soal Penguasaan Materi 9.2

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

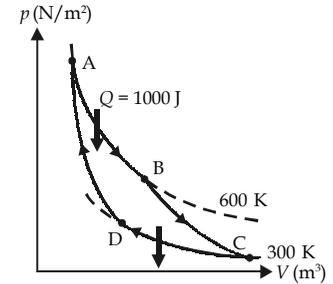
- Suatu gas monoatomik mengalami proses termodinamika seperti grafik berikut ini.



- Tentukanlah:
- Usaha yang dilakukan gas selama proses ABC
 - Perubahan energi dalam
 - Kalor yang diserap selama proses ABC
- Suatu gas ideal diekspansikan secara adiabatik sehingga volumenya menjadi dua kali volume mula-mula. Pada proses tersebut gas melakukan kerja sebesar 1.860 joule.
 - Berapakah kalor yang diterima gas?
 - Berapakah perubahan energi dalam gas?

Solusi Cerdas

Suatu mesin Carnot bekerja di antara suhu 600 K dan 300 K serta menerima kalor sebesar 1.000 joule (seperti terlihat pada gambar). Usaha yang dilakukan mesin dalam satu siklus adalah



- 300 J
- 400 J
- 500 J
- 600 J
- 700 J

Penyelesaian

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{600 \text{ K} - 300 \text{ K}}{600 \text{ K}} \times 100\% = 50\%$$

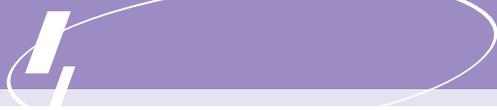
$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{W}{1.000 \text{ J}}$$

$$= 500 \text{ joule}$$

Jawab: c

Soal UAN Fisika 2004/2005



3. Dua mol gas monoatomik didinginkan pada tekanan konstan $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ sehingga volumenya mengecil dari $0,1 \text{ m}^3$ menjadi $0,05 \text{ m}^3$. Kemudian, gas tersebut mengalami proses ekspansi isothermal sampai volumenya berubah menjadi $0,1 \text{ m}^3$.
 - a. Berapakah usaha yang diterima gas?
 - b. Berapakah kalor yang diserap gas?
4. Empat mol gas monoatomik (dianggap gas ideal) pada sebuah mesin mengalami proses reversibel dalam suatu siklus berikut ini.
 - 1) Ekspansi isothermal dari volume $0,02 \text{ m}^3$ menjadi $0,04 \text{ m}^3$ pada temperatur 127°C .
 - 2) Pada volume tetap, gas didinginkan sampai suhu 27°C .
 - 3) Gas dikompresi secara isothermal pada suhu 27°C sehingga volumenya menjadi $0,02 \text{ m}^3$.
 - 4) Pada volume tetap, gas dikompresi sampai kembali ke keadaan semula.
 Tentukan:
 - a. Besarnya usaha yang dilakukan mesin dalam suhu siklus.
 - b. C_v dan C_p dari gas monoatomik tersebut.

C Hukum Kedua Termodinamika

1. Entropi

Pada pembahasan mengenai siklus Carnot dan mesin Carnot, proses termodinamika yang terjadi selama proses tersebut mampu mengubah seluruh energi kalor menjadi usaha dan tidak ada energi yang hilang. Siklus termodinamika yang telah dibahas pada subbab B merupakan siklus ideal yang tidak pernah ditemui dalam kehidupan nyata.

Sebagai contoh sederhana, misalkan Anda memasukkan sebuah bola besi panas ke dalam bejana yang berisi air dingin. Anda tentunya telah memahami bahwa kalor akan berpindah dari bola besi ke air sehingga suhu keduanya sama atau dikatakan keduanya telah berada dalam kesetimbangan termal. Namun, jika Anda membalik proses ini dengan cara memasukkan bola besi dingin ke dalam air panas, mungkinkah suhu bola besi tersebut naik dan suhu air turun dan keduanya mencapai kesetimbangan termal yang sama, seperti pada keadaan sebelumnya?

Proses termodinamika yang melakukan proses aliran kalor dari benda (reservoir) bersuhu rendah ke benda (reservoir) bersuhu tinggi, seperti yang dimisalkan tersebut tidak mungkin terjadi secara spontan (tanpa ada usaha yang diberikan ke dalam sistem).

Hal inilah yang kemudian diteliti oleh Clausius dan Kelvin-Planck sehingga menghasilkan rumusan Hukum Kedua Termodinamika. Berikut pernyataan Kelvin-Planck dan Clausius.

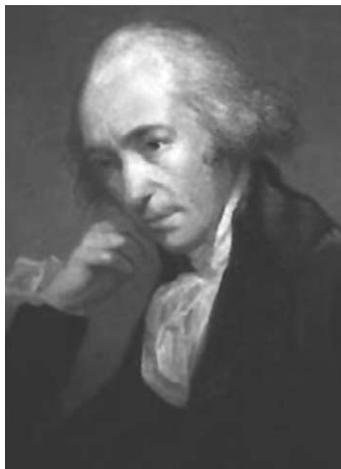
- a. Menurut Clausius, kalor tidak dapat berpindah dari benda bersuhu rendah ke benda bersuhu tinggi tanpa adanya usaha luar yang diberikan kepada sistem.
- b. Menurut Kelvin-Planck, tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam suatu siklus dan menghasilkan seluruh kalor yang diserapnya menjadi usaha.

Dalam menyatakan Hukum Kedua Termodinamika ini, Clausius memperkenalkan besaran baru yang disebut *entropi* (S). Entropi adalah besaran yang menyatakan banyaknya energi atau kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha. Ketika suatu sistem menyerap sejumlah kalor Q dari *reservoir* yang memiliki temperatur mutlak, entropi sistem tersebut akan meningkat dan entropi reservoirnya akan menurun sehingga perubahan entropi sistem dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (9-32)$$

Jelajah Fisika

James Watt (1736–1819)

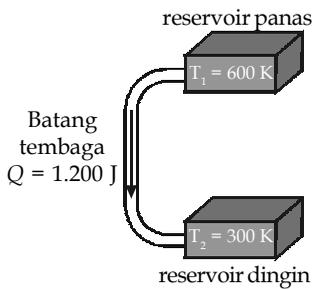


Watt adalah seorang ilmuwan dan insinyur besar yang berasal dari Britania. Ia menciptakan mesin uap pertama, yang menjadi kekuatan utama terjadinya Revolusi Industri Eropa.

Sumber: www.ai.it

Persamaan (3-2) tersebut berlaku pada sistem yang mengalami siklus reversibel dan besarnya perubahan entropi (ΔS) hanya bergantung pada keadaan akhir dan keadaan awal sistem.

Contoh 9.13



Gambar di samping menunjukkan bahwa 1.200 J kalor mengalir secara spontan dari reservoir panas bersuhu 600 K ke reservoir dingin bersuhu 300 K. Tentukanlah jumlah entropi dari sistem tersebut. Anggap tidak ada perubahan lain yang terjadi.

Jawab

Diketahui $Q = 1.200 \text{ J}$, $T_1 = 600 \text{ K}$, dan $T_2 = 300 \text{ K}$.
Perubahan entropi reservoir panas:

$$\Delta S_1 = \frac{-Q_1}{T_1} = \frac{-1.200 \text{ J}}{600 \text{ K}} = -2 \text{ J/K}$$

Perubahan entropi reservoir dingin:

$$\Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{1200 \text{ J}}{300 \text{ K}} = 4 \text{ J/K}$$

Total perubahan entropi total adalah jumlah aljabar perubahan entropi setiap reservoir:

$$\Delta S_{\text{sistem}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -2 \text{ J/K} + 4 \text{ J/K} = +2 \text{ J/K}$$

2. Mesin Pendingin (refrigerator)

Kalor dapat dipaksa mengalir dari benda dingin ke benda panas dengan melakukan usaha pada sistem. Peralatan yang bekerja dengan cara seperti ini disebut mesin pendingin (*refrigerator*). Contohnya lemari es dan pendingin ruangan (*Air Conditioner*). Perhatikan **Gambar 9.11**. Dengan melakukan usaha W pada sistem (pendingin), sejumlah kalor Q_2 diambil dari reservoir bersuhu rendah T_2 (misalnya, dari dalam lemari es). Kemudian, sejumlah kalor Q_1 dibuang ke reservoir bersuhu tinggi T_1 (misalnya, lingkungan di sekitar lemari es).

Ukuran kemampuan sebuah mesin pendingin dinyatakan sebagai koefisien daya guna (*koefisien performansi*) yang diberi lambang K_p dan dirumuskan dengan persamaan

$$K_p = \frac{Q_2}{W} \quad (9-33)$$

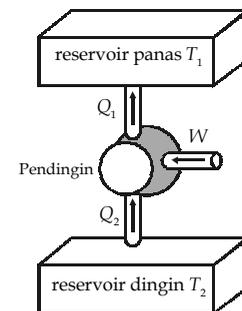
Oleh karena usaha yang diberikan pada mesin pendingin tersebut dinyatakan dengan $W = Q_1 - Q_2$, **Persamaan (9-33)** dapat ditulis menjadi

$$K_p = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \quad (9-34)$$

Jika gas yang digunakan dalam sistem mesin pendingin adalah gas ideal, **Persamaan (9-34)** dapat dituliskan menjadi

$$K_p = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (9-35)$$

Lemari es dan pendingin ruangan memiliki koefisien performansi dalam jangkauan 2 sampai dengan 6. Semakin tinggi nilai K_p , semakin baik mesin pendingin tersebut.



Gambar 9.11

Skema kerja mesin pendingin (refrigerator).

Kata Kunci

- Entropi
- Hukum Kedua Termodinamika
- Mesin pendingin

Contoh 9.14

Sebuah lemari es memiliki koefisien performansi 6. Jika suhu ruang di luar lemari es adalah 28°C , berapakah suhu paling rendah di dalam lemari es yang dapat diperoleh?

Jawab

Diketahui: $K_p = 6$, dan $T_1 = 28^\circ\text{C}$.

Koefisien performansi maksimum diperoleh sebagai berikut: $K_p = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$ dengan T_1 adalah suhu tinggi dan T_2 adalah suhu rendah. Dari persamaan tersebut diperoleh

$$\begin{aligned}(K_p) T_1 - (K_p) T_2 &= T_2 \\ (K_p) T_1 &= (1 + K_p) T_2 \\ T_2 &= \frac{K_p}{(K_p + 1)} T_1\end{aligned}$$

Dari soal diketahui $T_1 = (28 + 273)\text{ K} = 301\text{ K}$ dan $K_p = 6,0$ sehingga suhu paling rendah di dalam lemari es T_2 dapat dihitung.

$$T_2 = \frac{6,0}{1 + 6,0} \times (301\text{ K}) = 258\text{ K atau } -15^\circ\text{C}.$$

Soal Penguasaan Materi 9.3

Kerjakanlah di dalam buku latihan Anda.

1. Satu kilogram es pada 0°C dicairkan dan diubah menjadi air pada 0°C . Hitunglah perubahan entropinya, asumsikan bahwa peleburan berlangsung secara reversibel.
2. Sebuah mesin Carnot yang mengambil 2.000 J kalor dari reservoir pada 500 K , melakukan kerja dan membuang sejumlah panas ke reservoir pada 350 K . Tentukanlah:
 - a. perubahan entropi selama ekspansi isothermal,
 - b. perubahan entropi selama kompresi isothermal, dan
 - c. perubahan entropi total dalam mesin.
3. Sebuah *refrigerator* membutuhkan usaha $68,2\text{ kJ}$ untuk membuat es batu dari 1 liter air pada suhu 10°C . Tentukanlah:
 - a. energi panas yang harus dikeluarkan, dan
 - b. koefisien performansi refrigerator.

Pembahasan Soal *SPMB*

Sebuah mesin Carnot menerima 2.000 J dari reservoir panas dan melepaskan 1.750 J pada reservoir dingin. Dengan demikian, efisiensi mesin tersebut adalah

- 6,25%
- 10%
- 12,5%
- 25%
- 87,5%

Penyelesaian

Informasi yang diketahui dari soal:

$$Q_1 = 2.000 \text{ J}$$

$$Q_2 = 1.750 \text{ J}$$

Usaha yang dilakukan oleh mesin Carnot adalah

$$W = Q_2 - Q_1$$

$$\text{Efisiensinya: } \eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{2.000 - 1.750}{2.000} \times 100\%$$

$$\eta = 12,5\%$$

Jawab: c

Soal UMPTN, 1995

Rangkuman

- Sistem** dalam termodinamika adalah bagian ruang atau benda yang menjadi pusat perhatian pengamatan.
- Lingkungan** dalam termodinamika adalah segala sesuatu yang berada di luar sistem dan memengaruhi sistem.
- Hukum Pertama Termodinamika** menyatakan bahwa jumlah energi yang diberikan pada sistem sama dengan perubahan energi dalam sistem ditambah usaha yang dilakukannya
$$Q = \Delta U + W$$
- Pada proses isokhorik, $\Delta W = 0$
 - Pada proses isothermal, $\Delta U = 0$
 - Pada proses adiabatik, $Q = 0$
- Hukum Kedua Termodinamika** memberi batasan terhadap perubahan energi yang dapat berlangsung atau tidak dapat berlangsung.

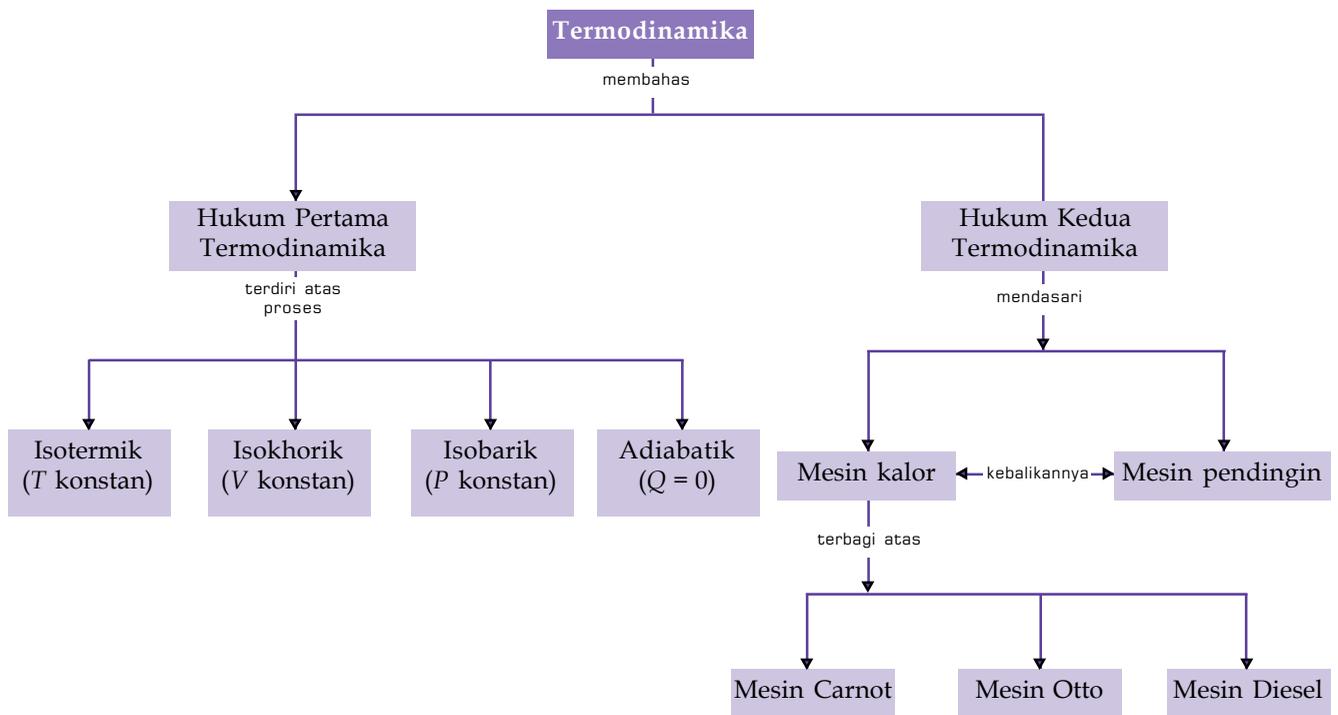
- Entropi** adalah suatu ukuran banyaknya kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha.

$$\Delta S = \left(\frac{Q}{T} \right)$$

- Mesin kalor** mengubah energi termal menjadi usaha dengan cara memindahkan kalor dari reservoir bersuhu tinggi ke reservoir bersuhu rendah.
- Efisiensi mesin kalor**
$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$
- Mesin pendingin** memerlukan usaha untuk memindahkan kalor dari reservoir bersuhu rendah ke reservoir bersuhu tinggi.
- Efisiensi mesin pendingin**

$$K_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Peta Konsep



Kaji Diri

Setelah mempelajari bab Termodinamika, Anda diharapkan dapat menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan Hukum Termodinamika. Jika Anda belum mampu menganalisis perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan Hukum Termodinamika, Anda belum menguasai materi bab

Termodinamika dengan baik. Rumuskan materi yang belum Anda pahami, lalu cobalah Anda tuliskan kata-kata kunci tanpa melihat kata kunci yang telah ada dan tuliskan pula rangkuman serta peta konsep berdasarkan versi Anda. Jika perlu, diskusikan dengan teman-teman atau guru Fisika Anda.