Hukum Termodinamika (3)

Hukum Termodinamika II

Mesin kalor (*heat engine*):

adalah sebuah peralatan yang mengambil energi panas dan beroperasi secara siklik, dan sebagian energi digunakan untuk kerja.

Secara garis besar, mesin kalor berfungsi untuk mengubah energi panas menjadi kerja.

Contoh :

mesin pembangkit listrik,

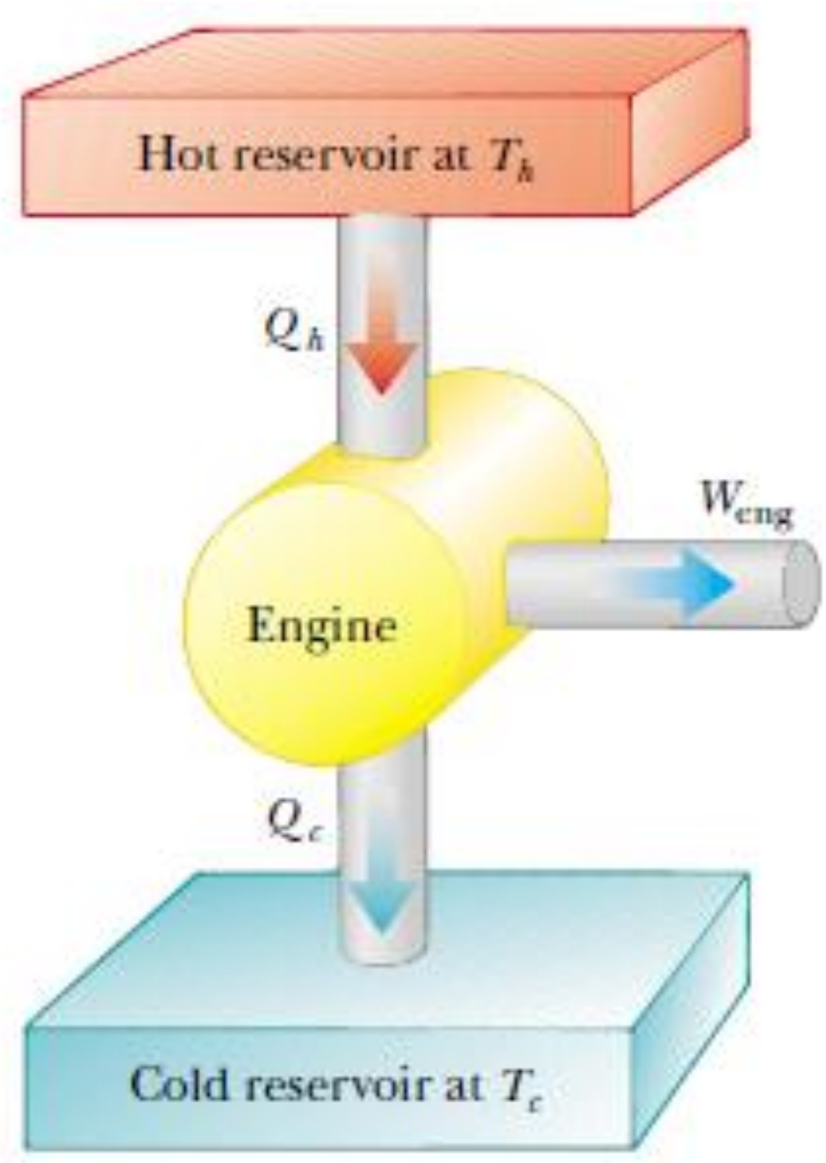
dengan membakar batubara atau bahan bakar lain, yang menghasilkan gas temperatur tinggi untuk mengubah liquid menjadi steam.

Steam ini menggerakkan turbin yang kemudian menggerakkan generator penghasil listrik.

Peralatan lain yang dimodelkan sebagai mesin kalor adalah :

menggunakan energi dari pembakaran bahan bakar untuk menggerakkan piston yang menghasilkan gerak pada mobil.

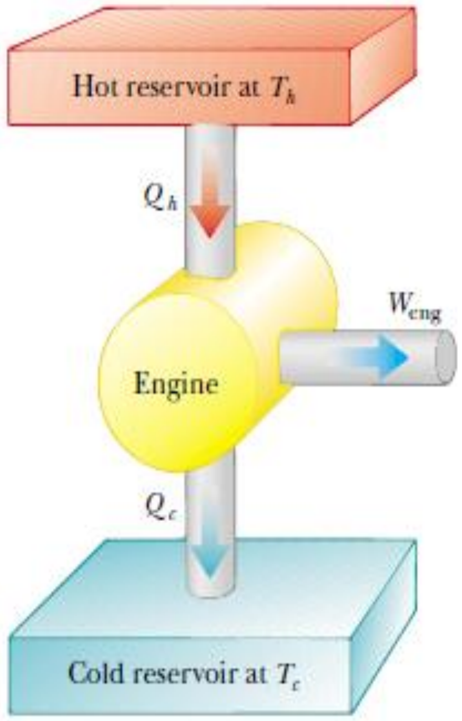
Skema mesin kalor



Mesin mengambil sejumlah energi Qh dari *hot reservoir*.

Besarnya energi dinyatakan dalam harga mutlak (bernilai positif), sedangkan arah transfer energi dinyatakan dengan tanda positif dan negatif.

Mesin melakukan kerja sebesar Weng (kerja negatif = -Weng dilakukan terhadap mesin) dan melepaskan panas sejumlah Qc ke *cold reservoir*.



"Kerja (work)" berjalan dalam suatu siklus, sehingga energi dalam (ΔE int) pada kondisi awal dan akhir sama.

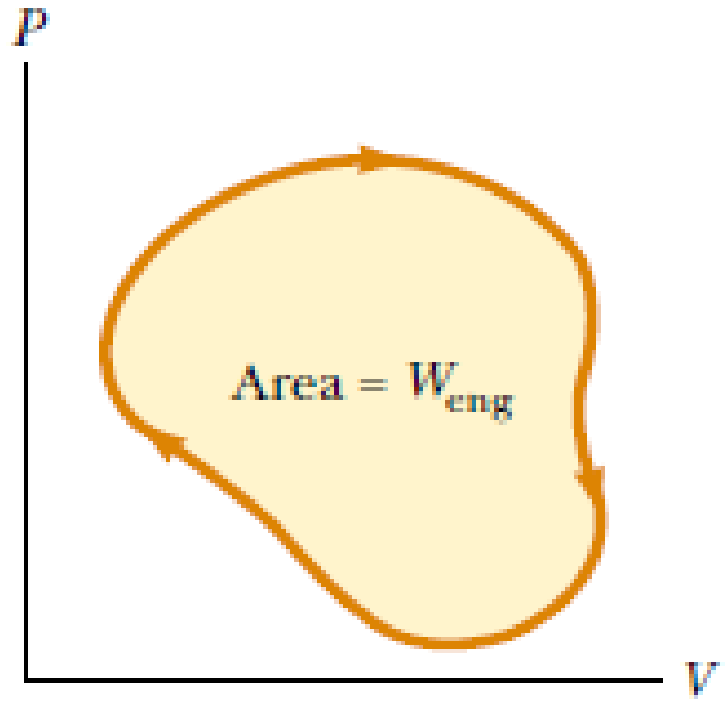
$$\Delta \mathrm{Eint} = 0.$$

Menurut Hukum 1 Termodinamika, dan dengan tidak adanya perubahan energi dalam, kerja netto "W_{eng}" yang dilakukan mesin kalor sama dengan energi netto yang ditransfer pada mesin tersebut.

$$\Delta E_{\mathrm{int}} = Q + W = Q - W_{\mathrm{eng}} = 0$$

$$W_{\mathrm{eng}} = |Q_h| - |Q_c|$$

Pada sistem yang melibatkan gas, kerja netto yang dilakukan pada suatu proses siklis adalah luas area tertutup pada kurva PV diagram.



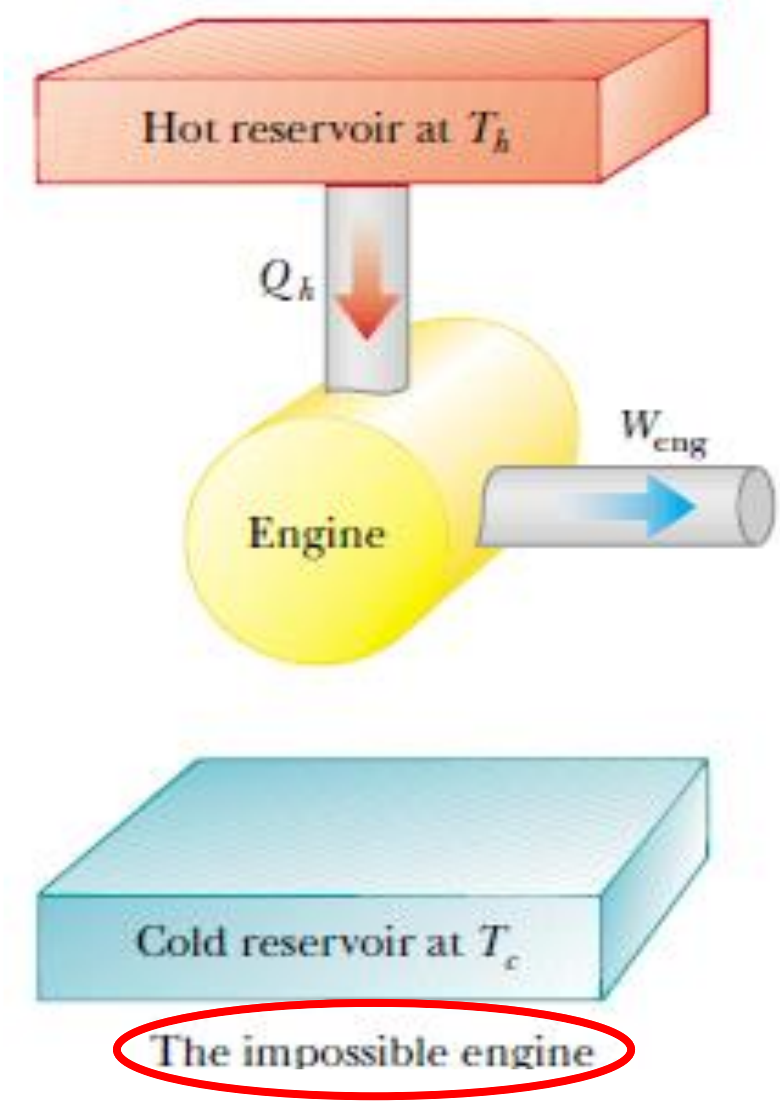
Efisiensi termal mesin kalor, e :

Rasio kerja netto yang dilakukan oleh mesin selama 1 siklus, terhadap input energi pada suhu yang lebih tinggi selama siklus tsb.

$$e = \frac{W_{\text{eng}}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}$$

Tidak mungkin membangun mesin kalor yang beroperasi pada suatu siklus, tanpa menghasilkan efek lain.

Dengan kata lain tidak mungkin seluruh energi diubah menjadi kerja dalam jumlah yang sama.



Contoh perhitungan efisiensi mesin :

An engine transfers 2.00 x 10^3 J of energy from a hot reservoir during a cycle and transfers 1.50 x 10^3 J as exhaust to a cold reservoir.

a) Find the efficiency of the engine.

b) How much work does this engine do in one cycle?

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{1.50 \times 10^3\ \text{J}}{2.00 \times 10^3\ \text{J}} = \boxed{0.250, \text{ or } 25.0\%}$$

$$W_{\text{eng}} = |Q_h| - |Q_c| = 2.00 \times 10^3\ \text{J} - 1.50 \times 10^3\ \text{J}$$

$$= \boxed{5.0 \times 10^2\ \text{J}}$$

Heat Pumps dan Refrigerators

Pada mesin kalor, arah transfer energi berjalan dari *hot reservoir* ke *cold reservoir* → natural direction.

Mesin kalor memproses energi dari *hot reservoir* menjadi kerja yang bermanfaat.

Bagaimana bila kita memerlukan transfer energi dari *cold reservoir* ke *hot reservoir*?

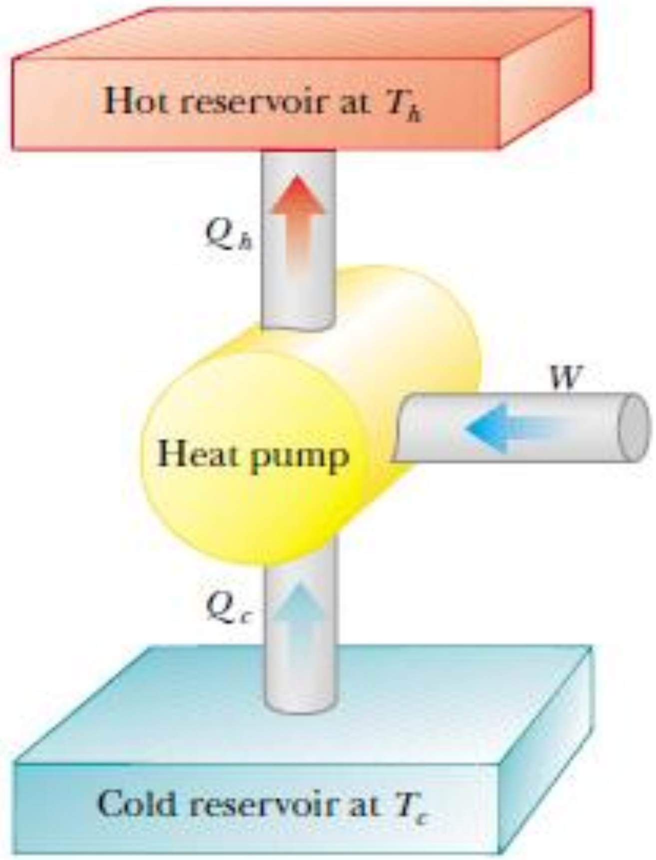
Hal ini tidak umum, sehingga perlu ada energi yang dimasukkan ke suatu alat untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

Alat yang dapat melakukan ini → heat pumps atau refrigerators.

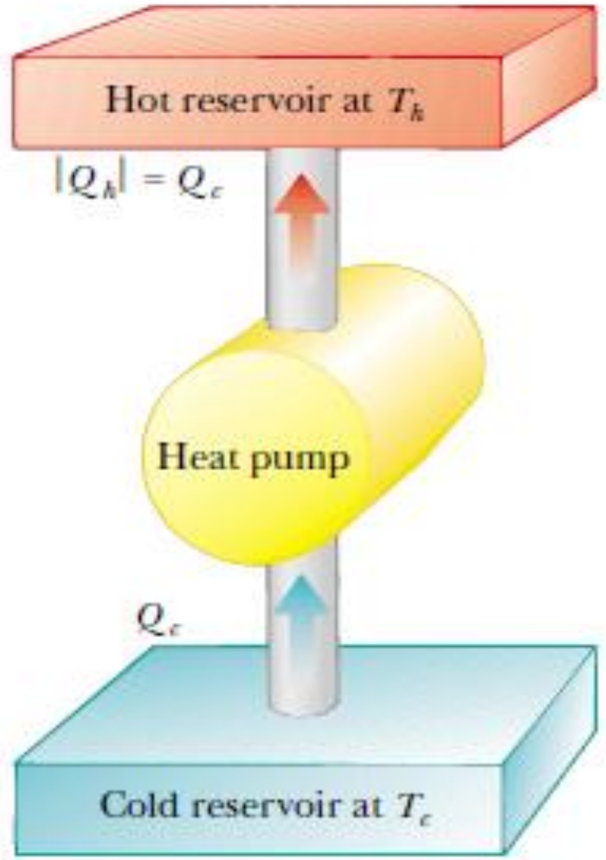
Contoh :

Pendinginan udara dalam rumah pada musim panas dengan *heat pumps* yang disebut sebagai *air conditioners (AC).*

AC mentransfer energi dari ruangan bersuhu rendah dalam ruangan ke luar rumah yang lebih panas.



Tidak mungkin membuat mesin siklis yang semata-mata mentransfer energi panas secara kontinyu dari suatu obyek ke obyek lain yang bersuhu lebih tinggi tanpa mensuplai energi melalui kerja.



Impossible heat pump

Efektivitas *heat pump* dideskripsikan sebagai coefficient of performance (COP).

Pada proses pemanasan, COP adalah rasio energi yang ditransfer ke dalam *hot reservoir* terhadap kerja yang dibutuhkan untuk mentransfer energi tsb :

$$\text{COP (heating mode)} \equiv \frac{\text{energy transferred at high temperature}}{\text{work done by heat pump}} = \frac{|Q_h|}{W}$$

Pada proses pendinginan, yang terjadi adalah pengambilan panas dari *cold reservoir*.

Refrigerator atau AC yang paling efektif adalah yang mampu menghasilkan semaksimal mungkin energi dari cold reservoir dengan sejumlah terkecil kerja.

Untuk itu COP dapat dinyatakan dalam $|Qc|$:

$$\text{COP (cooling mode)} = \frac{|Q_c|}{W}$$

Example

A certain refrigerator has a COP of 5.00. When the refrigerator is running, its power input is 500 W.

A sample of water of mass 500 g and temperature 20.0°C is placed in the freezer compartment.

How long does it take to freeze the water to ice at 0°C? Assume that all other parts of the refrigerator stay at the same temperature and there is no leakage of energy from the exterior, so that the operation of the refrigerator results only in energy being extracted from the water.

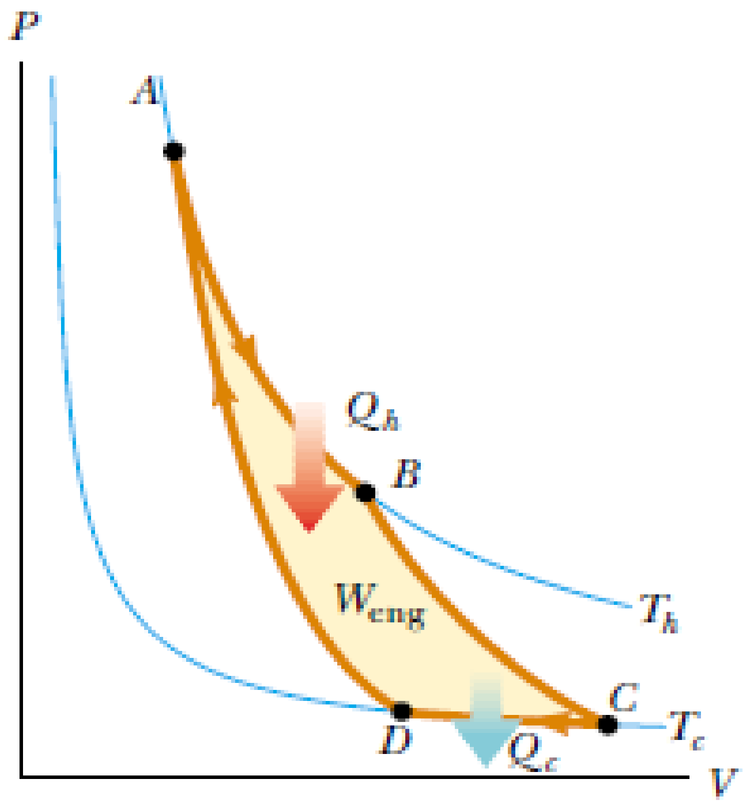
$$\left| Q_c \right| = \left| mc\,\Delta T + mL_f \right| = m \left| c\,\Delta T + L_f \right|$$
$$= (0.500\text{ kg})[(4\,186\text{ J/kg}\cdot{}^\circ\text{C})(20.0^\circ\text{C}) + 3.33 \times 10^5\text{ J/kg}]$$
$$= 2.08 \times 10^5\text{ J}$$

$$\text{COP} = \frac{\left| Q_c \right|}{W} \longrightarrow W = \frac{\left| Q_c \right|}{\text{COP}} = \frac{2.08 \times 10^5\text{ J}}{5.00}$$
$$W = 4.17 \times 10^4\text{ J}$$

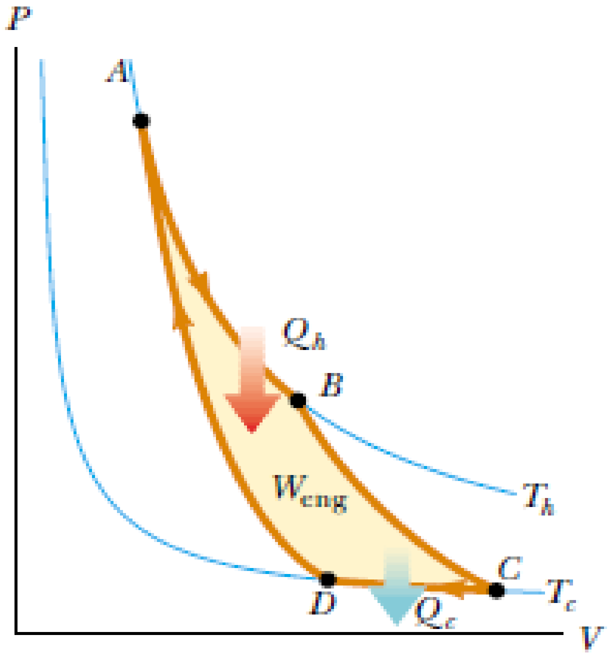
$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t} \longrightarrow \Delta t = \frac{W}{\mathcal{P}} = \frac{4.17 \times 10^4\text{ J}}{500\text{ W}} = \boxed{83.3\text{ s}}$$

The Carnot Engine

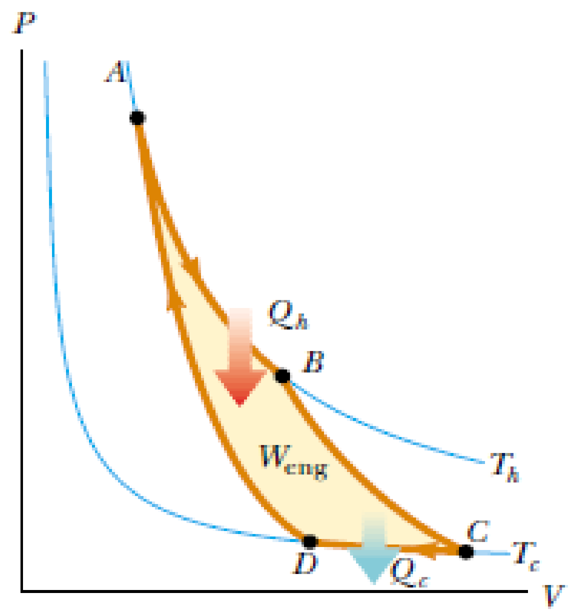
No real heat engine operating between two energy reservoirs can be more efficient than a Carnot engine operating between the same two reservoirs.



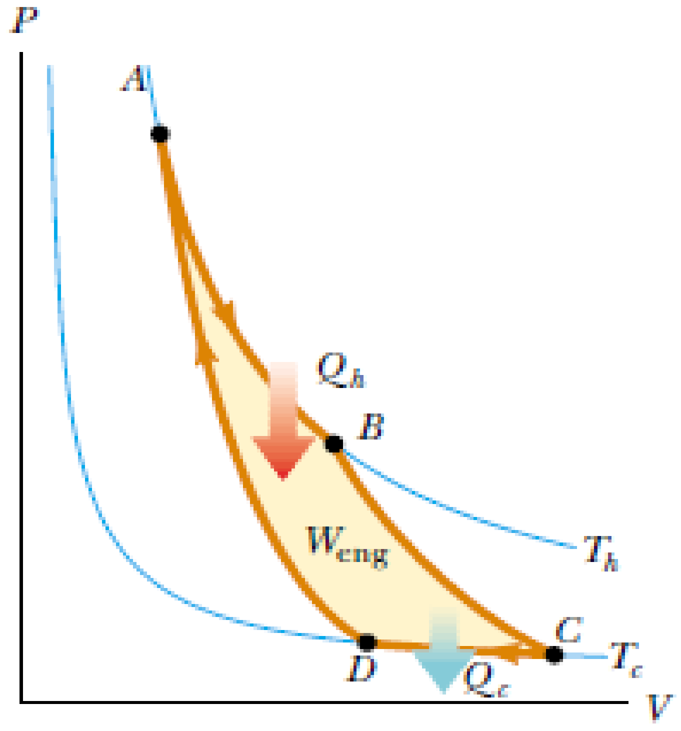
1. Process $A \rightarrow B$ is an isothermal expansion at temperature T_h. The gas is placed in thermal contact with an energy reservoir at temperature T_h. During the expansion, the gas absorbs energy $|Q_h|$ from the reservoir through the base of the cylinder and does work W_{AB} in raising the piston.



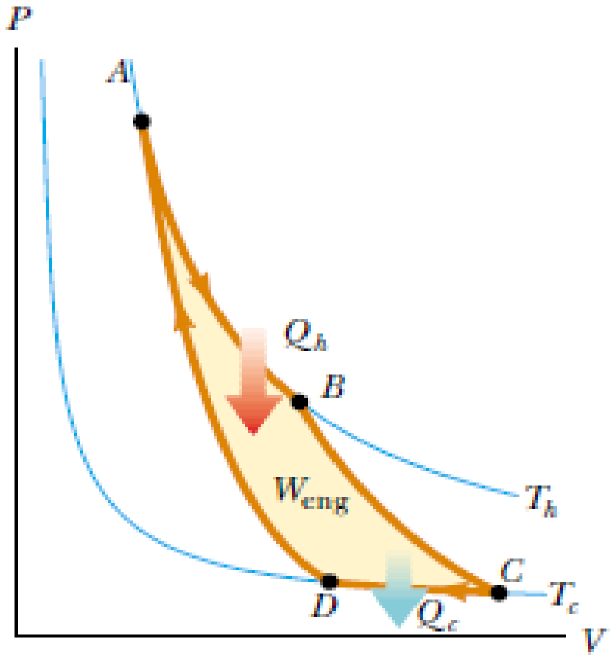
2. In process *B* → *C* the base of the cylinder is replaced by a thermally nonconducting wall, and the gas expands adiabatically—that is, no energy enters or leaves the system by heat. During the expansion, the temperature of the gas decreases from *Th* to *Tc* and the gas does work *WBC* in raising the piston.



3. In process $C \rightarrow D$, the gas is placed in thermal contact with an energy reservoir at temperature *Tc* and is compressed isothermally at temperature *Tc* . During this time, the gas expels energy |*Qc*| to the reservoir, and the work done by the piston on the gas is *WCD* .



4. In the final process $D \rightarrow A$, the base of the cylinder is replaced by a nonconducting wall, and the gas is compressed adiabatically. The temperature of the gas increases to *Th* , and the work done by the piston on the gas is *WDA*.



$$e = \frac{W_{\text{eng}}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}$$

$$\frac{|Q_c|}{|Q_h|} = \frac{T_c}{T_h}$$

$$e_{\mathrm{C}} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Example

A heat engine takes in 360 J of energy from a hot reservoir and performs 25.0 J of work in each cycle.

Find (a) the efficiency of the engine

(b) the energy expelled to the cold reservoir in each cycle.

(a) $$e = \frac{W_{\text{eng}}}{|Q_h|} = \frac{25.0\ \text{J}}{360\ \text{J}} = \boxed{0.069\,4} \text{ or } \boxed{6.94\%}$$

(b) $$|Q_c| = |Q_h| - W_{\text{eng}} = 360\ \text{J} - 25.0\ \text{J} = \boxed{335\ \text{J}}$$

Example

A particular heat engine has a useful power output of 5.00 kW and an efficiency of 25.0%. The engine expels 8000 J of exhaust energy in each cycle.

Find (a) the energy taken in during each cycle

(b) the time interval for each cycle.

(a) We have $e = \frac{W_{\text{eng}}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} = 0.250$

with $|Q_c| = 8\,000$ J, we have $|Q_h| = \boxed{10.7 \text{ kJ}}$

(b) $W_{\text{eng}} = |Q_h| - |Q_c| = 2\,667$ J

and from $\mathscr{P} = \frac{W_{\text{eng}}}{\Delta t}$, we have $\Delta t = \frac{W_{\text{eng}}}{\mathscr{P}} = \frac{2\,667 \text{ J}}{5\,000 \text{ J/s}} = \boxed{0.533 \text{ s}}$.

Example

Suppose a heat engine is connected to two energy reservoirs, one a pool of molten aluminum (660°C) and the other a block of solid mercury (- 38.9°C). The engine runs by freezing 1.00 g of aluminum and melting 15.0 g of mercury during each cycle. The heat of fusion of aluminum is 3.97×10^5 J/kg; the heat of fusion of mercury is 1.18×10^4 J/kg. What is the efficiency of this engine?

The heat to melt 15.0 g of Hg is $\left|Q_c\right| = mL_f = \left(15\times10^{-3}\ \text{kg}\right)\left(1.18\times10^{4}\ \text{J/kg}\right) = 177\ \text{J}$

The energy absorbed to freeze 1.00 g of aluminum is

$$\left|Q_h\right| = mL_f = \left(10^{-3}\ \text{kg}\right)\left(3.97\times10^{5}\ \text{J / kg}\right) = 397\ \text{J}$$

and the work output is $W_{\text{eng}} = \left|Q_h\right| - \left|Q_c\right| = 220\ \text{J}$

$$e = \frac{W_{\text{eng}}}{\left|Q_h\right|} = \frac{220\ \text{J}}{397\ \text{J}} = 0.554,\ \text{or}\ \boxed{55.4\%}$$

The theoretical (Carnot) efficiency is $\dfrac{T_h - T_c}{T_h} = \dfrac{933\ \text{K} - 243.1\ \text{K}}{933\ \text{K}} = 0.749 = 74.9\%$