



Przekaz energii elementy termodynamiki

Dr hab. inż. Jarosław Kanak
Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321
kanak@agh.edu.pl
<http://layer.uci.agh.edu.pl/~kanak>



THERMAL PHYSICS

- Fenomenologicznie - wielkość informująca o tym jak ciepłe/zimne jest dane ciało.
- Kinetyczno molekularnie - jest określona przez średnią energię kinetyczną ruchu cząsteczek ciała.

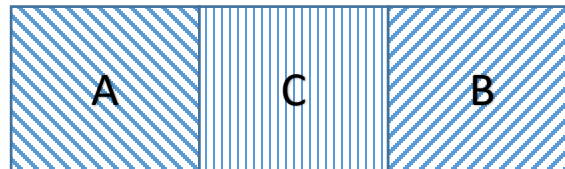
Pomiar temperatury



- Zmiana temperatury zmiany \rightarrow własności ciał \rightarrow termoskop
- Wyskalowany termoskop \rightarrow termometr

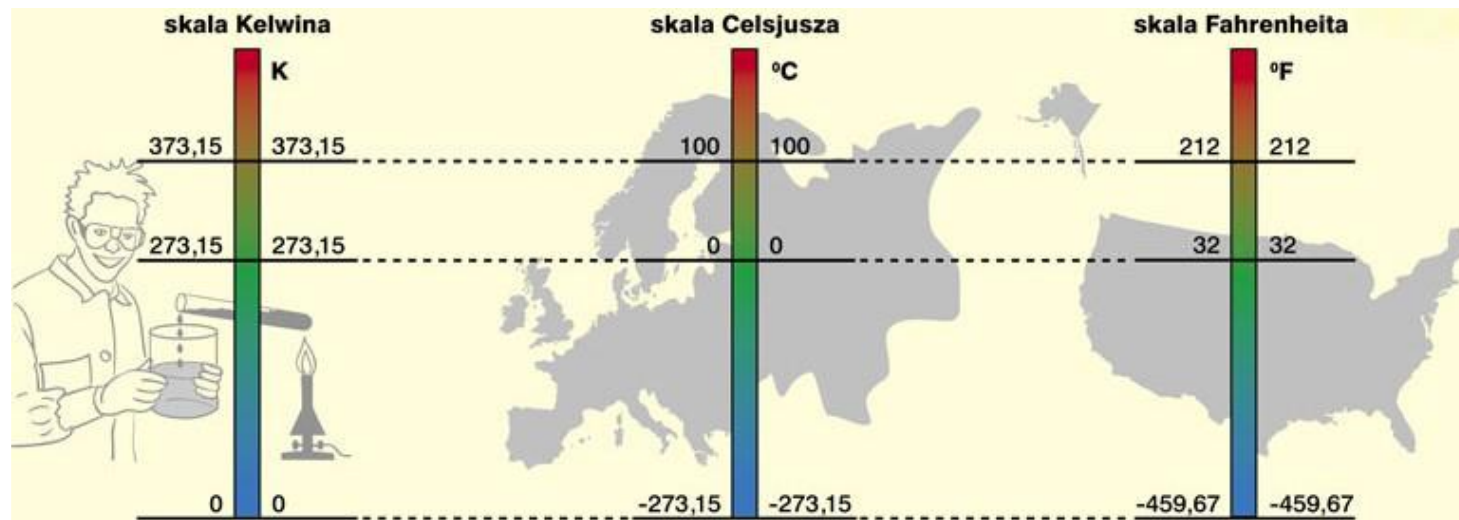


- Pomiar temperatury Zasada pomiaru opiera się na
ZEROWEJ ZASADZIE TERMODYNAMIKI



Jeżeli układ A i układ B są w równowadze termicznej z układem C, to są w równowadze termicznej względem siebie.

Skale temperatur



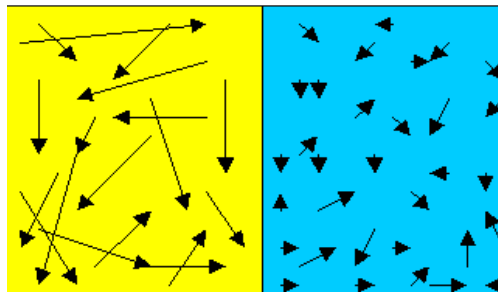
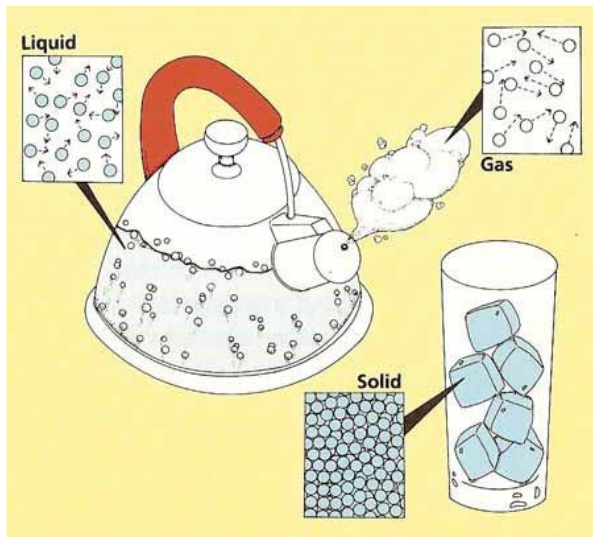
- Punkty termometryczne:
 - Wrząca woda
 - Topniejący lód
 - Temperatura ciała

punkt potrójny wody
= 273,16 K

$$T_C = T_K - 273,16 \text{ K}$$

$$\Delta T_C = \Delta T_K \quad T_F = 9/5 (T_{KC} + 32)$$

Kinetyczno-molekularna interpretacja temperatury



Gaz
gorący

Gaz
zimny

Związek energii kinetycznej cząsteczki z temperaturą:

$$\langle E_K \rangle \sim kT$$

Gdzie k – stała Boltzmana

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

- Dla cząsteczki jednoatomowej:

$$\langle E_K \rangle = \frac{3}{2} kT$$

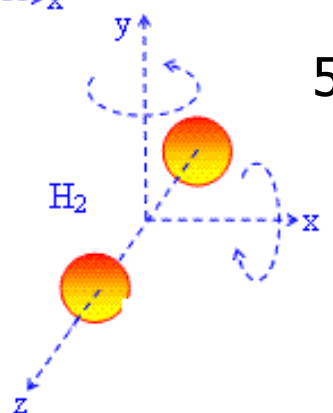
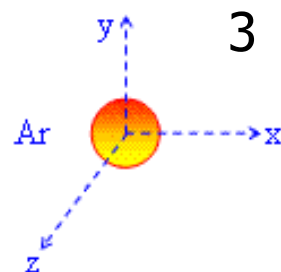
- Dla cząsteczki dwuatomowej:

$$\langle E_K \rangle = \frac{5}{2} kT$$

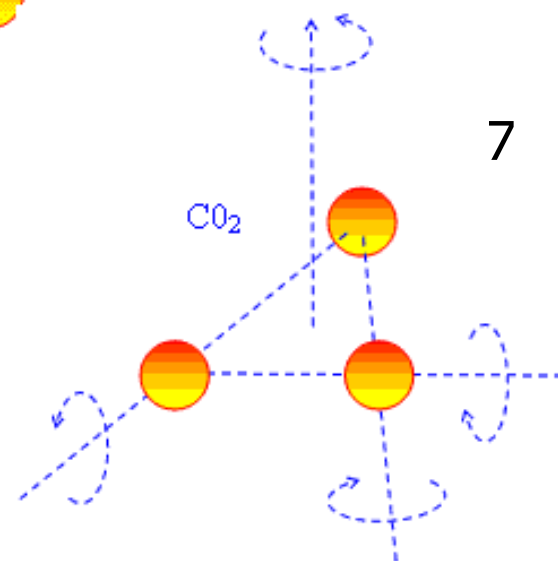
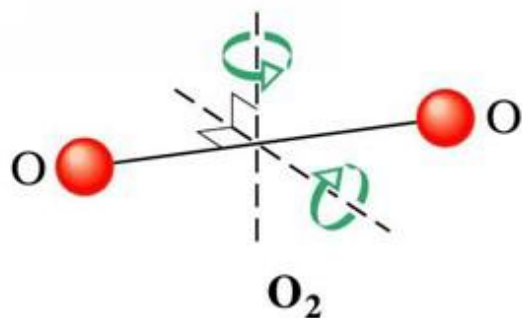


Stopnie swobody cząstek

- Liczba danych koniecznych i wystarczających do określenia położenia ciała w przestrzeni



- Dla cząsteczki dwuatomowej:



$$\langle E_K \rangle = \frac{m\langle V_x^2 \rangle}{2} + \frac{m\langle V_y^2 \rangle}{2} + \frac{m\langle V_z^2 \rangle}{2} + \frac{I_y\langle \omega_y^2 \rangle}{2} + \frac{I_z\langle \omega_z^2 \rangle}{2}$$

Zasada ekwipartycji energii

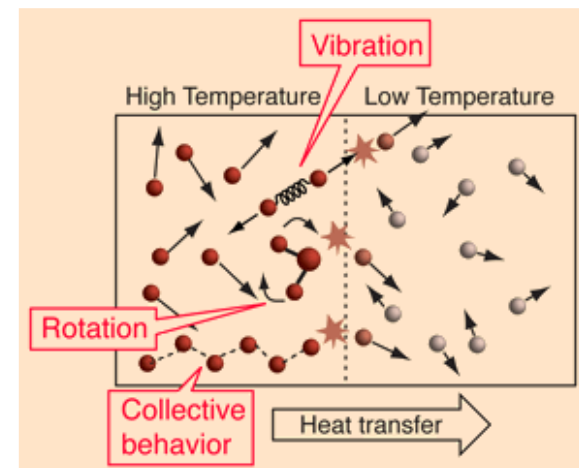
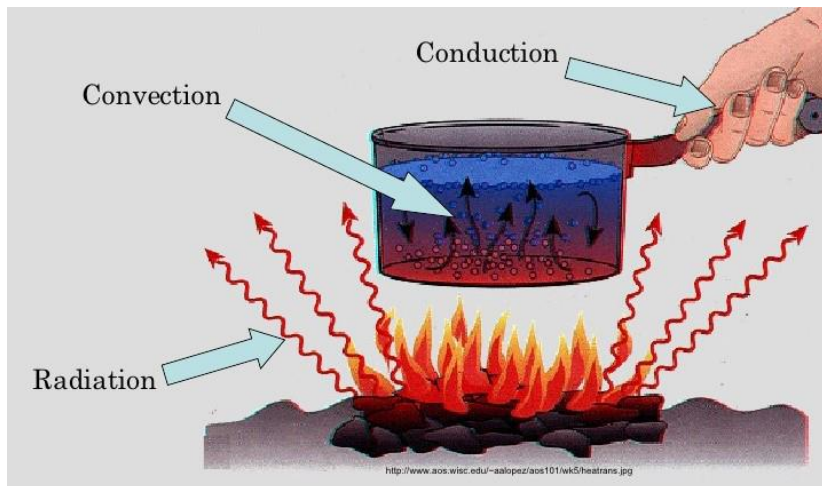


- Zgodnie z zasadą ekwipartycji energii na każdy stopień swobody przypada ta sama średnia wartość energii kinetycznej

$$\frac{m\langle V_i^2 \rangle}{2} = \frac{I_i\langle \omega_i^2 \rangle}{2} = \frac{1}{2}kT$$

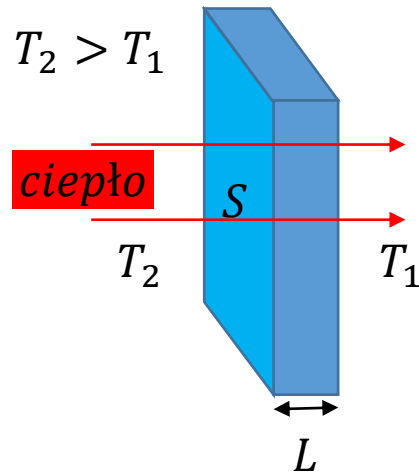
- Dla cząsteczki jednoatomowej: $\langle E_K \rangle = \frac{3}{2}kT$

- Dla cząsteczki dwuatomowej: $\langle E_K \rangle = \frac{5}{2}kT$





Przewodnictwo ciepłe



- Przepływ ciepła w jednostce czasu:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \lambda \cdot S \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$\frac{dQ}{dT} = -\lambda \cdot S \frac{dT}{dx}$$

Minus oznacza przepływ ciepła przeciwnie do gradientu temperatury.

- λ - przewodność cieplna materiału [W/m·K]

Materiał	λ [W/m·K]
stal	40
szkło	0.84
styropian	0.036
powietrze	0.025

- Dla konkretnej przegrody współczynnik przenikania ciepła:

$$U = \frac{\lambda}{L}$$

- Przykładowo, dla ścian zewnętrznych budynków mieszkalnych współczynnik przenikania ciepła nie powinien być większy niż 0,23 [W·m⁻²·K⁻¹] (do 2021 roku) 0,21 (od 2021), niezależnie od rodzaju ściany

Przykład. Obliczyć szybkość przepływu ciepła przez szybę o grubości 3 mm i wymiarach 2 m x 1,5 m, przy różnicy temperatur 1°C między jej powierzchniami.

Odp.: 840 W



I zasada termodynamiki

- O zmianach energii wewnętrznej układu wnioskujemy ze zmian parametrów określających stan termodynamiczny: p , V , T
- Istnieją dwa sposoby wymiany energii między układami w formie **CIEPŁA** lub **PRACY**

Mówi o tym I zasada termodynamiki:

$$\Delta U = Q + W$$

Energia wewnętrzna układu rośnie gdy dostarczamy ciepła lub wykonujemy nad układem pracę.

Ilość przekazanego ciepła zależy od:

- rodzaju substancji (jej ciepła właściwego)
- masy substancji
- uzyskanej różnicy temperatur

$$Q = c_w \cdot m \cdot \Delta T$$



I zasada termodynamiki

- Przy ogrzewaniu układu: $\Delta T = T_k - T_0 > 0 \Rightarrow Q > 0$ - ciepło jest pobierane przez układ
- Przy oziębianiu układu: $\Delta T = T_k - T_0 < 0 \Rightarrow Q < 0$ - ciepło jest oddawane przez układ

Stąd zasada bilansu cieplnego:

$$\Sigma Q = 0$$

- w jednym molu substancji jest $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ cząsteczek
- masa gazu $m = n \cdot \mu$ (gdzie μ masa molowa, n ilość moli)
- ciepło właściwe a ciepło molowe:

$$c_w = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

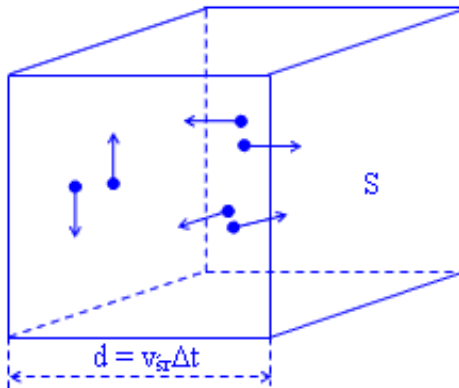
$$C = \frac{Q}{n \cdot \Delta T}$$

Równanie stanu gazu doskonałego



Gaz doskonały:

- punkty materialne
- oddziałują ze sobą tylko podczas zderzeń, które są idealnie sprężyste
- poruszają się jednostajnie prostoliniowo



Nacisk na jedną ściankę wywierany przez N cząstek:

$$\langle F \rangle = \frac{1}{3} \frac{N}{d} \langle mv^2 \rangle$$

Ciśnienie na jedną ściankę:

$$p = \frac{\langle F \rangle}{d^2} = \frac{1}{3} \frac{N}{V} \langle mv^2 \rangle = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle$$

Równanie stanu gazu doskonałego



$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle$$

$$\langle E_K \rangle = \frac{3}{2} kT \quad \longrightarrow \quad pV = NkT \quad \longrightarrow \quad \boxed{\frac{pV}{T} = \text{const}}$$

Przy przejściu między dwoma stanami gazu:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

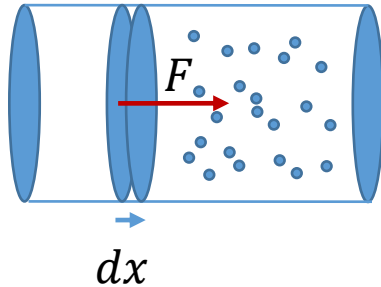
Dla jednego mola gazu w warunkach normalnych: $\frac{p_0 V_0}{T_0} = R$ $R = 8.31 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$

Dla n moli gazu w warunkach normalnych:

$$pV = nRT \quad \text{równanie Clapeyrona}$$

$$pV = \frac{m}{\mu} RT$$

Praca w termodynamice



$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{x} = p \cdot S \cdot dx = p \cdot dV$$

$$W = \int dW = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$$

W tym wypadku objętość się zmniejsza $dV < 0$ zatem aby być w zgodzie z I zasadą termodynamiki należy przyjąć że praca siły zewnętrznej:

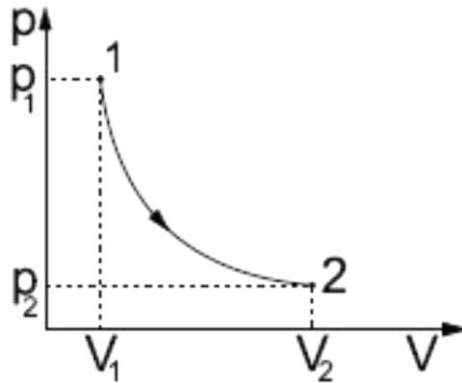
$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$$

jeżeli gaz się rozpręża: $dV > 0$ to $W < 0$

$$W = -p\Delta V$$

Uwaga! W podręcznikach anglojęzycznych często stosowana jest umowa odwrotna! (wówczas $\Delta U = Q - W$)

Przykład



Podczas rozprężania gaz przechodzi ze stanu 1 do stanu 2. Zakładamy, że $T_1 = T_2$.

Równanie Clapeyrona

$$pV = nRT \longrightarrow p = \frac{nRT}{V}$$

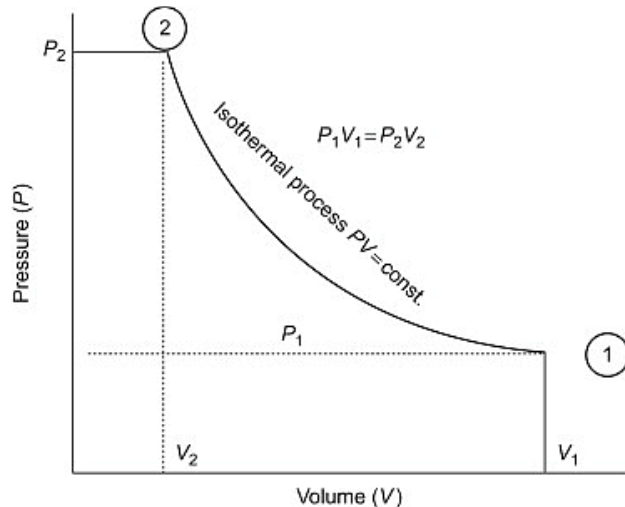
$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = -nRT \left| \ln V \right|_{V_1}^{V_2} = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} < 0$$

oznacza to, że to gaz wykonuje pracę



Przykład c.d.



Określić rodzaj gazu, którego masa 2 kg została sprężona izotermicznie w temperaturze 27 °C tak, że ciśnienie wzrosło trzykrotnie i wykonano przy tym pracę $1.37 \cdot 10^3$ kJ

Równanie Clapeyrona

$$pV = nRT \longrightarrow p = \frac{nRT}{V}$$

$$W = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$n = \frac{m}{\mu}$$

$$W = -\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$T_1 = T_2 \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \longrightarrow V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{V_1}{3} \longrightarrow W = -\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{1}{3}$$

$$1.37 \cdot 10^6 = -\frac{2}{\mu} 8.31 \cdot 300 \ln \frac{1}{3} \quad \mu = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot \text{K}}{\text{J}} = 4 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \longrightarrow \text{He}$$

Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego



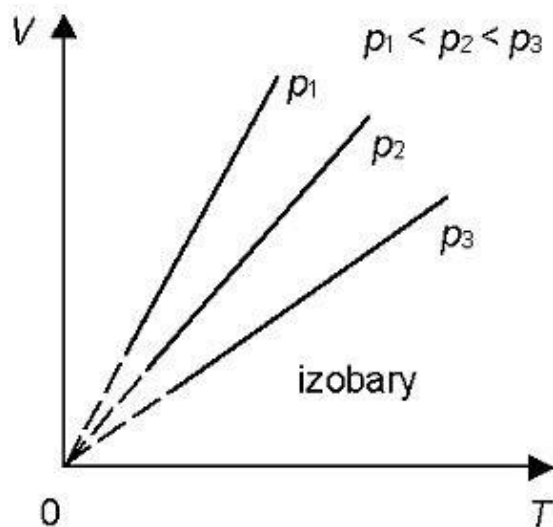
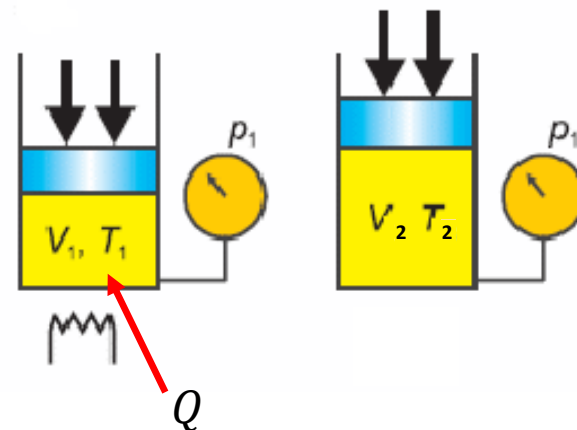
■ Izobaryczna *Gay-Lusac'a*

$$p = const$$

$$\frac{V}{T} = const$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

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



$$V = V_0(1 + \alpha\Delta T)$$

V_0 – objętość w 0 °C

α – współczynnik rozszerzalności
objętościowej gazu

$$[\alpha] = \frac{1}{deg}$$

Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego

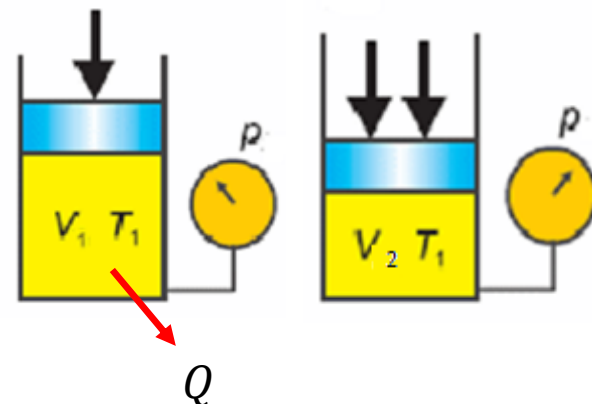


- Izotermiczna
Boyl'a-Mariotte'a $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

$$T = \text{const} \quad \longrightarrow \quad \Delta U = 0$$

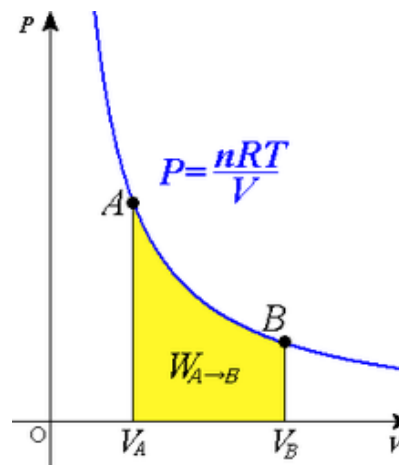
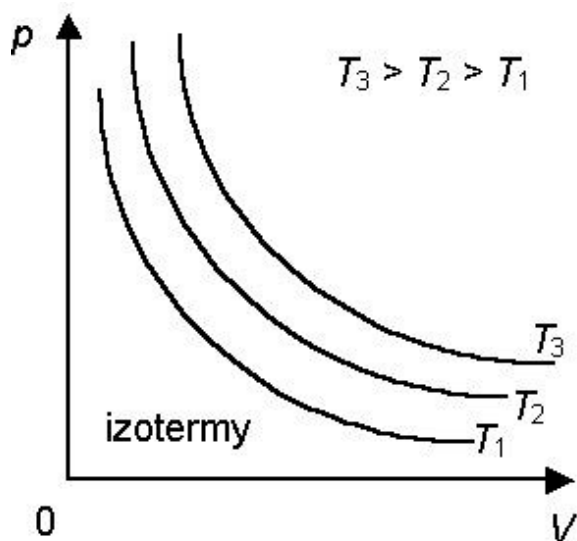
$$pV = \text{const}$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$



Układ oddaje ciepło: $Q < 0$

Pracę wykonuje siła zewnętrzna: $W > 0$



$$W = -RT \ln \frac{V_B}{V_A}$$

Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego



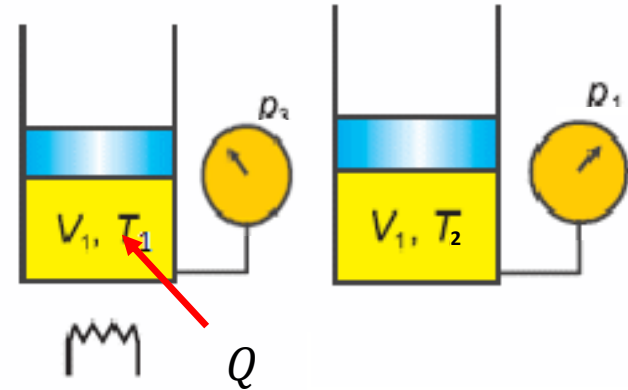
■ Izochoryczna Charles'a

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$V = \text{const}$$

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

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



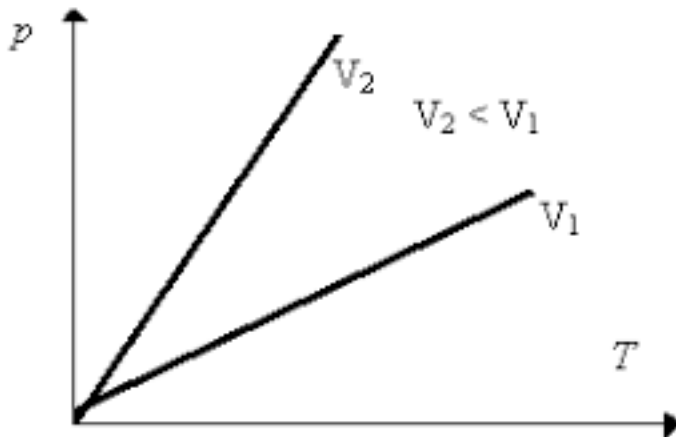
Do układu dostarczono ciepło: $Q > 0$

Układ nie wykonuje pracy: $W = 0$

$$\Delta U = Q$$

$$p = p_0(1 + \beta \Delta T)$$

β – współczynnik termicznej rozprężliwości gazu



Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego



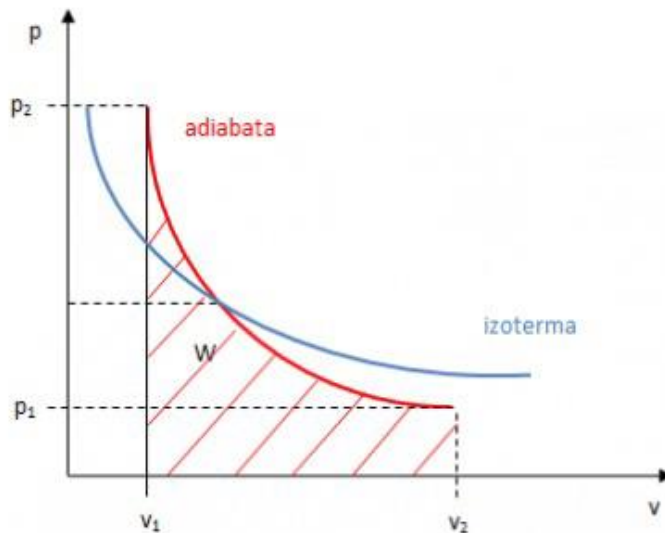
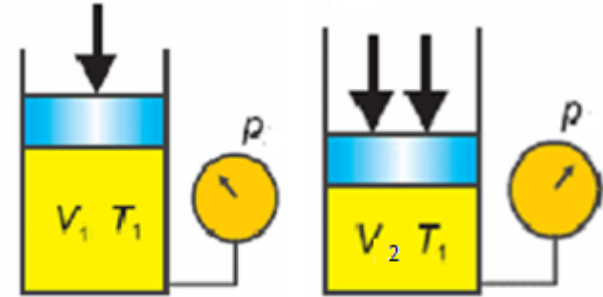
■ Adiabaticzna

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$pV^\kappa = \text{const}$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

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



Układ izolowany: $Q = 0$

Praca siły zewnętrznej: $W > 0$

$$\Delta U = W$$

Cykl Carnot'a



Izolowane ścianki
i tłok



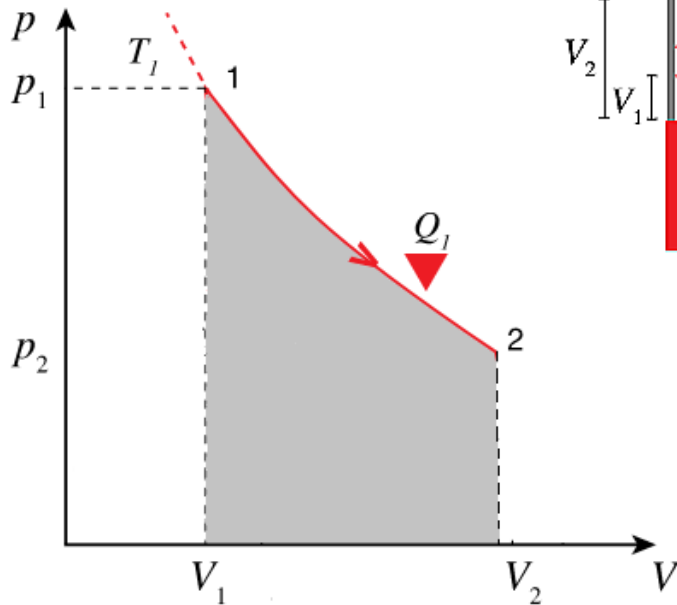
Zasada pracy silników cieplnych:
Substancja robocza dokonuje szeregu przemian termodynamicznych (cykli mniej lub bardziej zamkniętych), pobierając ciepło i w ich wyniku wykonuje pracę.

Nieskończona pojemność cieplna źródła i chłodnicy

Cykl Carnot'a



rozprężanie
izotermiczne

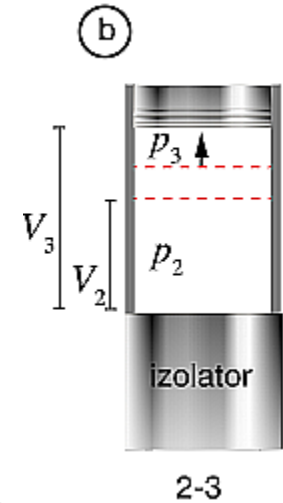
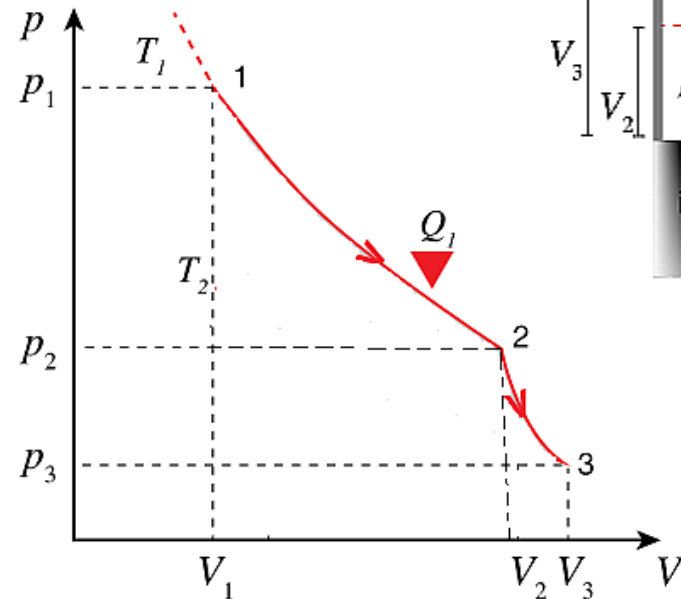


$$\Delta U = 0$$

$$Q_1 = W_1$$

gaz pobiera ciepło Q_1 i jego kosztem wykonuje pracę podnosząc tłok

rozprężanie
adiabaticzne



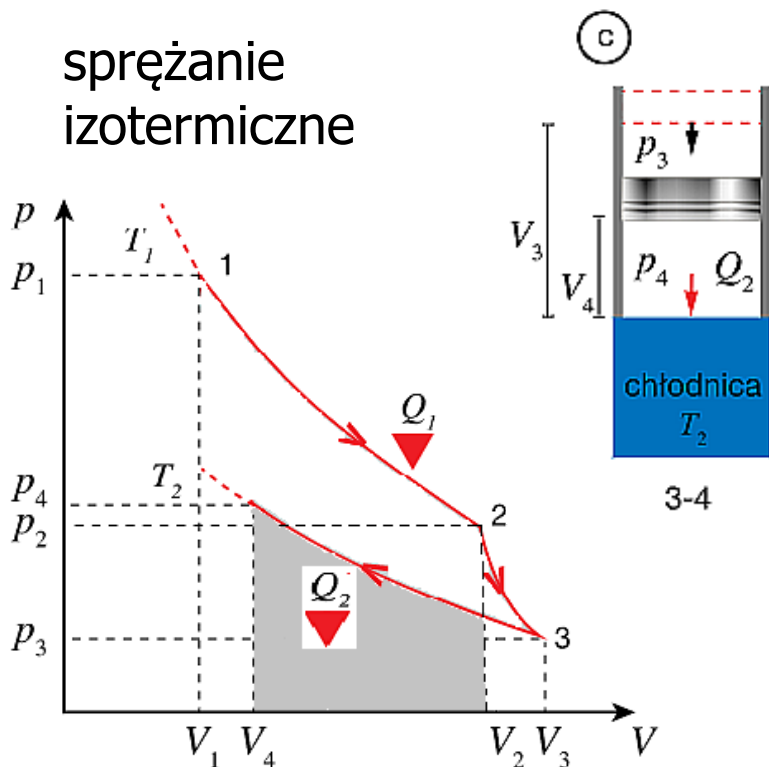
$$W_a = \Delta U$$

Gaz wykonuje pracę podnosząc tłok kosztem własnej energii i jego temperatura spada do T_2



Cykl Carnot'a

sprężanie izotermiczne

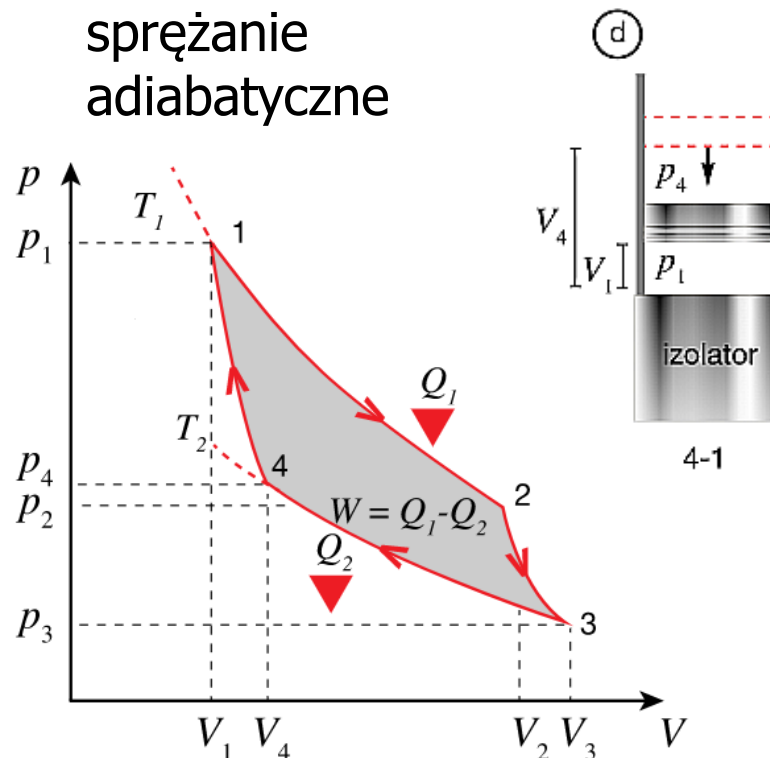


$$\Delta U = 0 \quad Q_2 = W_2$$

Pracę wykonuje siła zewnętrzna pchająca tłok, a z gazu do zbiornika przechodzi ciepło Q_2

praca wykonana w cyklu kosztem pobranego ciepła

sprężanie adiabatyczne



$$W_a = \Delta U$$

Siły zewnętrzne wykonują pracę i temperatura gazu podnosi się do T_1

$$W = Q_1 - Q_2$$

Cykl Carnot'a



Sprawność cyklu:

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

Sprawność cyklu Carnota zawsze jest mniejsza od 1 bowiem temperatura T_2 chłodnicy ma wartość większą od zera, gdyż temperatura zera bezwzględnego jest nieosiągalna



II zasada termodynamiki

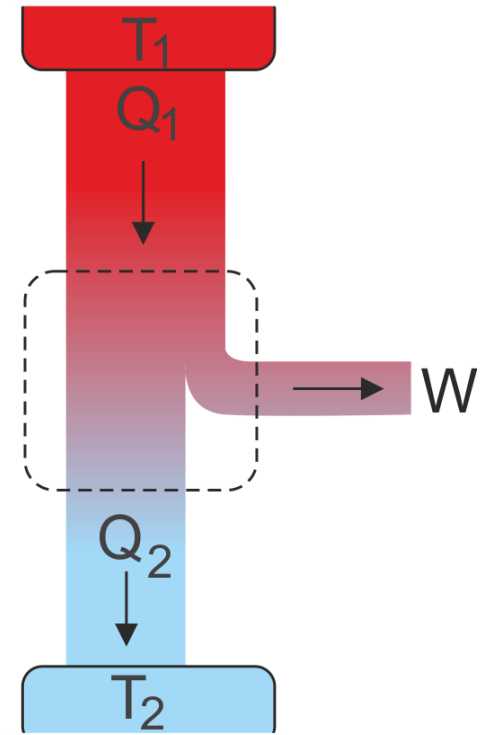
Nie istnieje proces termodynamiczny, którego jedynym wynikiem jest pobranie ciepła z danego zbiornika i całkowita zamiana tego ciepła na pracę.

Kelwin

Nie istnieje proces termodynamiczny, którego jedynym wynikiem jest pobranie ciepła od ciała o niższej temperaturze i przekazanie go do ciała o wyższej temperaturze.

Clausius

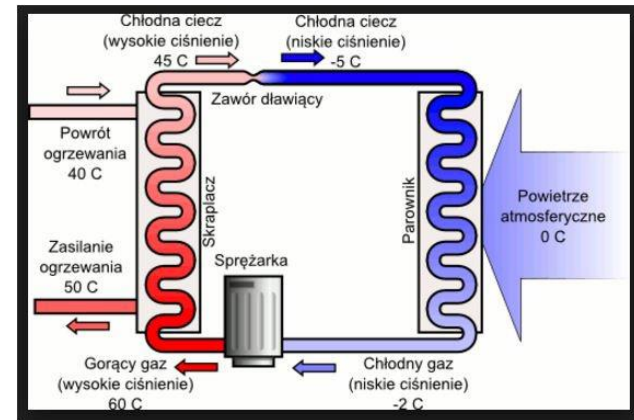
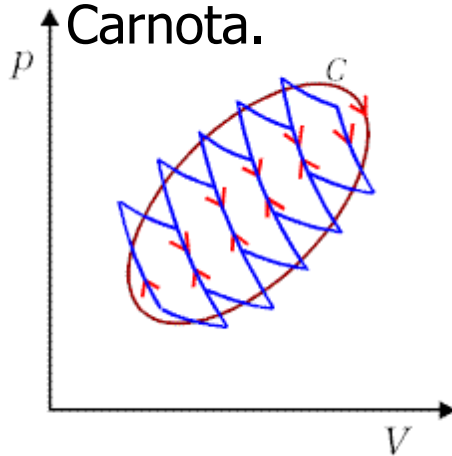
$$\beta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$





II zasada termodynamiki

Każdy proces odwracalny można przybliżyć złożeniem cykli Carnota.



Pompa ciepła ciepło jest przekazywane od ciała o temperaturze niższej do ciała o temperaturze wyższej w kierunku przeciwnym do samorzutnego przepływu ciepła. Procesowi przekazywania ciepła w tym kierunku musi towarzyszyć praca czynnika zewnętrznego (np. sprężarka w lodówce).

Sprawność silnika spalinowego (temp. Spalania mieszanki 2700 K, chłodnicy 300K) wynosi 0,56

Sprawność cyklu Carnota o temperaturze zbiornika ciepła 2700 K, i otaczającego powietrza około 300 K wynosi: 0,89

Sprawność silnika parowego (kocioł o temperaturze 373 K) to jedynie 0,21

Entropia



Entropia (S) jest miarą stopnia nieuporządkowania układu i rozproszenia energii.

Jest to termodynamiczna funkcja stanu, określająca kierunek przebiegu samorzutnych procesów, w odosobnionym układzie termodynamicznym.

Druga zasada termodynamiki mówi, że w układzie zamkniętym entropia S nie może maleć to znaczy $dS \geq 0$.

Zależy ona tylko od początkowego i końcowego stanu układu, a nie od drogi przejścia pomiędzy tymi stanami.

Entropia jest funkcją określoną dla stanu równowagi, taką że dla procesu odwracalnego:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

*dQ – ciepło dostarczane
w procesie odwracalnym*



Entropia

Entropia układu izolowanego adiabatycznie, w którym zachodzą procesy odwracalne, jest stała.

Natomiast dla układów nieizolowanych adiabatycznie wymieniających ciepło z otoczeniem entropia układu rośnie.

$$dS + dS_0 \geq 0 \quad dS_0 - \text{zmiana entropii otoczenia}$$

Przykład

Oblicz zmianę entropii w n molach gazu doskonałego podczas odwracalnego izotermicznego rozprężania gazu od objętości V_1 do objętości V_2 .

$$dU = dQ + dW = 0 \quad dQ = -dW \quad dW = pdV$$

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{pdV}{T} \quad pV = nRT \quad \longrightarrow \quad p = \frac{nRT}{V}$$

$$dS = \frac{nRdV}{V} \quad S = nR \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad V_2 > V_1 \quad \longrightarrow \quad S > 0$$

Przykład



Gumowy balonik zawierający pół mola helu umieszczono na głębokości $h = 1$ m pod powierzchnią wody o gęstości $\rho = 1000$ kg/m³. Temperatura wody i gazu w baloniku wynosi 7 °C, a ciśnienie powietrza $p_0 = 1020$ hPa.

1. Oblicz objętość balonika.
2. Po ogrzaniu wody o 20 °C i ustaleniu równowagi termodynamicznej, objętość balonika wzrosła. Dla gazu jednoatomowego jakim jest hel, ciepło molowe przy stałej objętości wynosi $c_v = (3/2)R$. Oblicz ilość ciepła, jaką pobrał hel podczas rozprężania się balonika.
3. Jeżeli rozszerzający się gaz wykonał pracę 83.1 J, oblicz przyrost energii wewnętrznej gazu w baloniku.