



Proszę o uwagę

31. Termodynamika

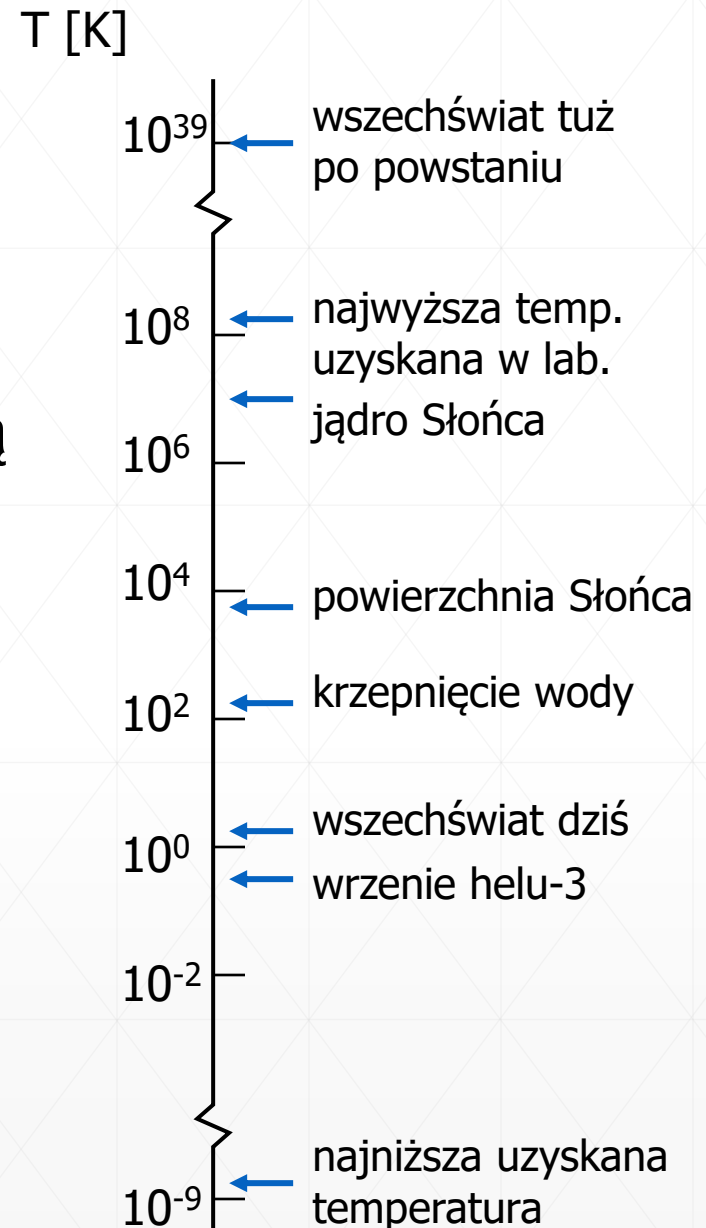
Podstawy termodynamiki:

- gaz doskonały a gaz rzeczywisty,
- przemiany gazu doskonałego,
- parametry termodynamiczne,
- zasady termodynamiki,
- ciepło, praca, energia wewnętrzna, entropia,
- silniki cieplne,
- cykl Carnota,
- pompy ciepła.



Termodynamika

- Termodynamika to dział fizyki zajmujący się energią termiczną (energiją wewnętrzną) układu
- Temperatura – podstawowe pojęcie termodynamiki
- Skala Kelvina – bezwzględna skala temperatury
- „odczuwanie temperatury” – zależne od naszych zmysłów



Podstawowe pojęcia

Masa atomowa (cząsteczkowa) - to stosunek masy atomu danego pierwiastka chemicznego (cząsteczki związku chemicznego) do masy $1/12$ atomu węgla ^{12}C .

Mol - jest taką ilością danej substancji, która zawiera dokładnie $6,02214076 \times 10^{23}$ obiektów elementarnych (atomów, cząsteczek). Liczba ta jest ustaloną wartością liczbową stałej Avogadra N_A wyrażonej w jednostce [1/mol].

Liczba (stała) Avogadro - to liczba atomów bądź cząsteczek w jednym molu substancji. W układzie SI wynosi: $N_A = 6.02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Warunki normalne – ciśnienie: 101 325 Pa i temperatura: 273,15 K

Prawo Avogadro - w warunkach jednakowego ciśnienia i temperatury jednakowe objętości różnych gazów zawierają jednakową liczbę cząsteczek.

W warunkach normalnych objętość jednego mola gazu wynosi: 22,414 dm³

Entropia - termodynamiczna funkcja stanu - określająca przebieg procesów spontanicznych w odosobnionym układzie termodynamicznym.

Termodynamiczny opis układu

- obiekty traktujemy makroskopowo nie wnikając w naturę cząstek z których się składają;
- **gaz doskonały** składa się z cząsteczek, które możemy traktować jako punkty materialne o tej samej masie i zakładamy że:
 - cząsteczki poruszają się chaotycznie i podlegają zasadom dynamiki Newtona,
 - całkowita liczba cząstek jest bardzo duża,
 - objętość cząstek gazu jest dużo mniejsza od objętości naczynia,
 - poza momentem zderzenia cząstki nie oddziałują ze sobą żadnymi siłami,
 - zderzenia są sprężyste, a czas ich trwania krótki;
- podstawowe makroskopowe parametry stanu układu to: **ciśnienie p , objętość V i temperatura T** ;
- każda zmiana w układzie termodynamicznym (choćby jednego parametru) nazywa się **procesem termodynamicznym**.

Równanie stanu gazu doskonałego

Wszystkie gazy rzeczywiste przy dostatecznie małej gęstości można opisać równaniem:

$$pV = nRT$$

równanie stanu
gazu doskonałego

gdzie n – liczba moli, R – stała gazowa, ponieważ

$$n = \frac{N}{N_A}, \quad \text{a} \quad R = kN_A$$

$$pV = NkT$$

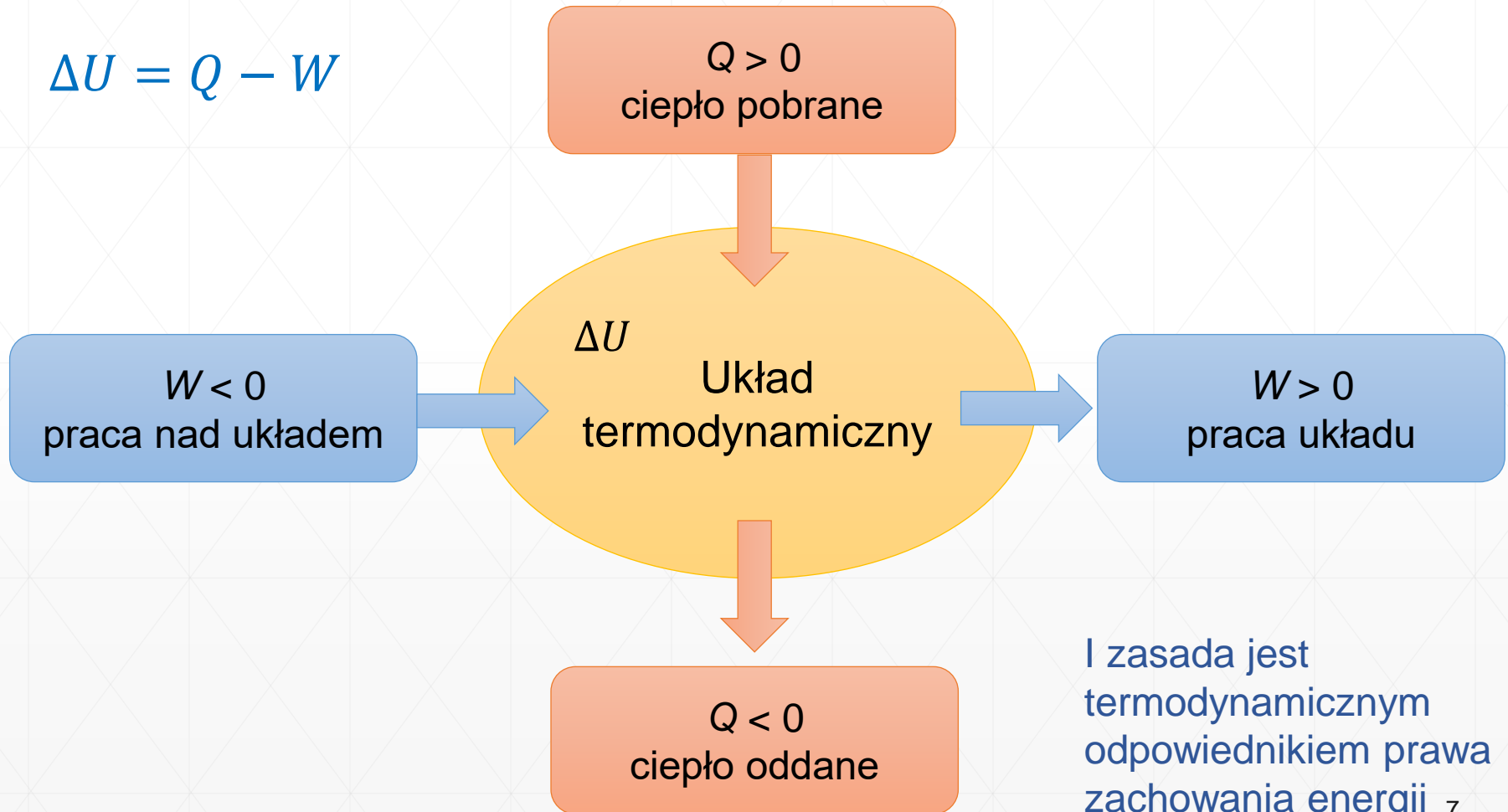
gdzie k – stała Boltzmana, N – liczba cząsteczek

Gaz doskonały to gaz, którego ciśnienie p , objętość V i temperaturę T wiąże powyższe równanie stanu

Pierwsza zasada termodynamiki

Energia wewnętrzna układu ΔU wzrasta, jeżeli układ pobiera energię w postaci ciepła Q i maleje kiedy wykonuje pracę W

$$\Delta U = Q - W$$



I zasada jest termodynamicznym odpowiednikiem prawa zachowania energii 7

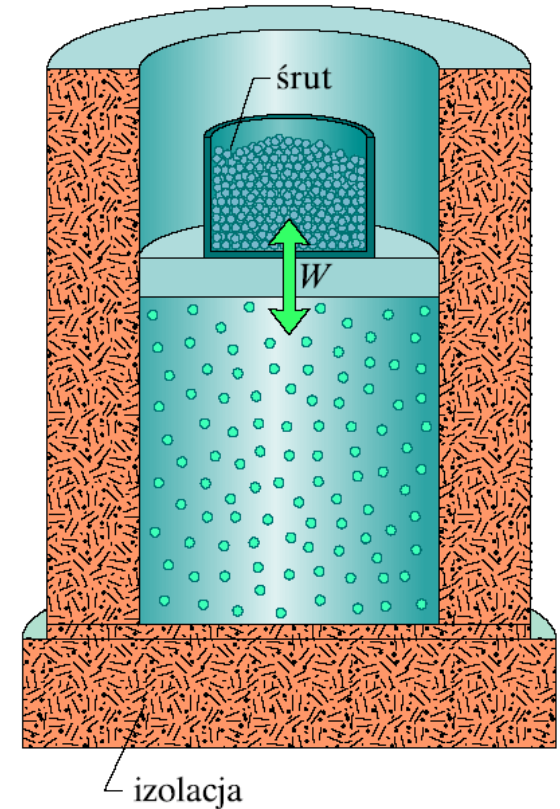
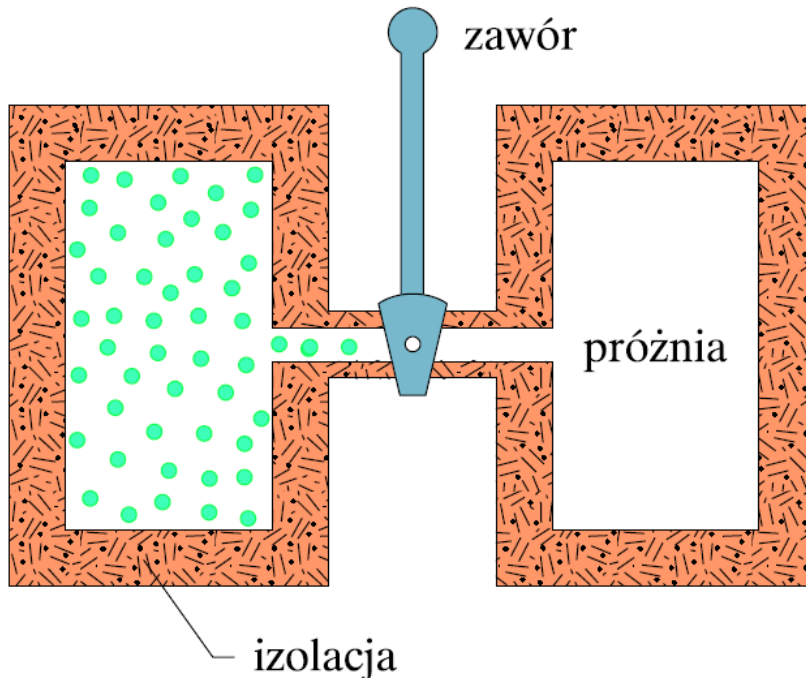
Pierwsza zasada termodynamiki

Rozpatrzmy układ: gaz zamknięty w cylindrze z ruchomym tłokiem, poprzez zdejmowanie lub dokładanie ziaren śrutu zachodzi nieznaczna przemiana (w równowadze termodynamicznej) więc

$$\Delta U = Q - W \quad \longrightarrow \quad dU = dQ - dW$$

Rozprężanie swobodne izolowanego gazu

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



Przemiana adiabatyczna

$$Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -W$$

$W > 0$ – praca wykonana przez układ

$W < 0$ – praca wykonana nad układem

Przemiany nieodwracalne

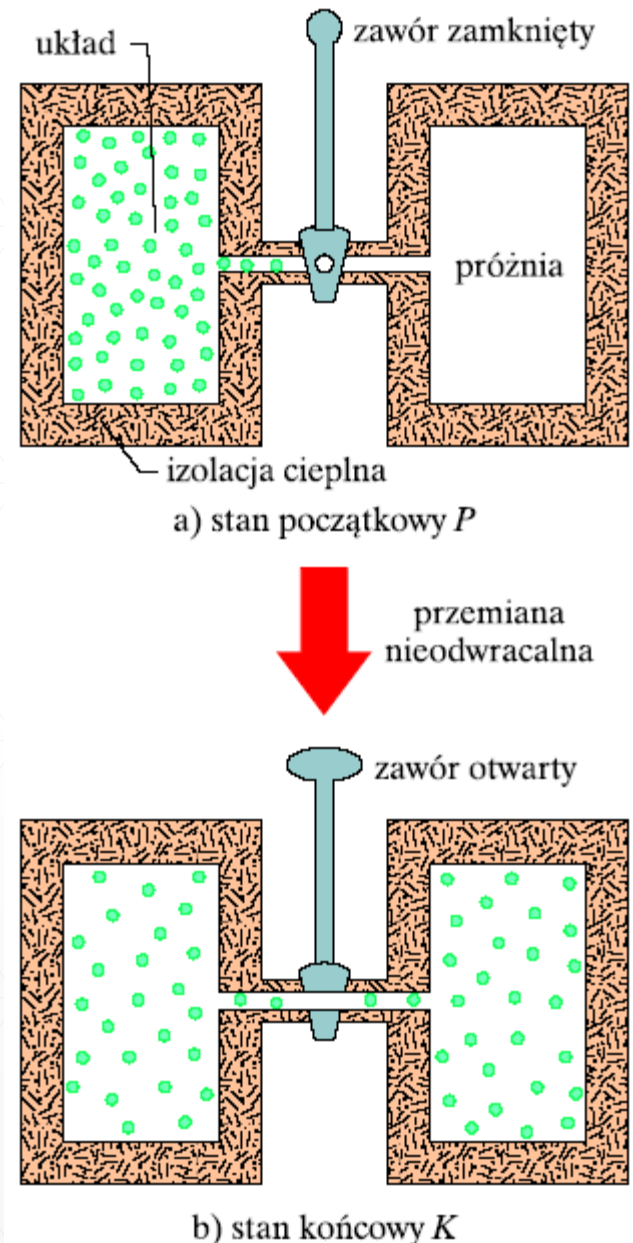
przemiany jednokierunkowe w układzie zamkniętym nazywamy **nieodwracalnymi**

o kierunku procesów nieodwracalnych decyduje zmiana **entropii** ΔS układu, (parametru stanu takiego jak T, p, V)

$$\Delta S = S_K - S_P = \int_P^K \frac{dQ}{T}$$

nie ma zasady zachowania entropii, w przemianach nieodwracalnych entropia układu zamkniętego zawsze rośnie

przy nieskończenie małej zmianie stanu układu $dS = \frac{dQ}{T}$



Przemiana odwracalna

Przy odwracalnym izotermicznym rozprężaniu gazu doskonałego zmiana entropii zależy od całkowitego ciepła dostarczonego ze zbiornika do gazu

$$\Delta S = S_K - S_P = \frac{1}{T} \int_P^K dQ = \frac{Q}{T}$$

$Q > 0$ – przy rozprężaniu entropia gazu rośnie

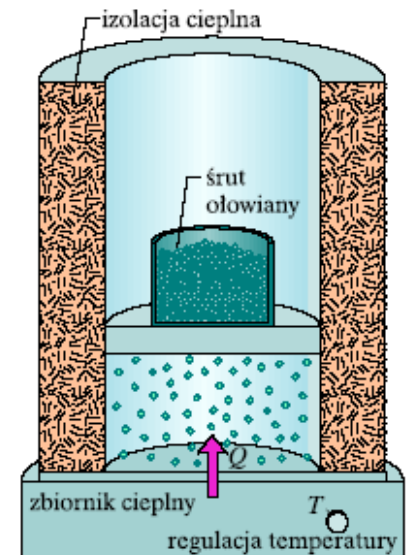
$$\Delta S_{gaz} > 0$$

przy sprężaniu $Q < 0$ (gaz oddaje ciepło) – entropia gazu maleje lecz entropia zbiornika rośnie

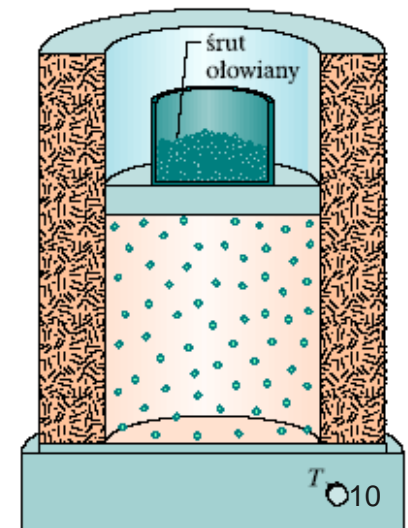
$$\Delta S_{gaz} = -\frac{|Q|}{T} \quad \Delta S_{zbiornik} = +\frac{|Q|}{T}$$

zmiana entropii układu zamkniętego (gaz + zbiornik) jest sumą obydwu wartości i jest równa zero

$$\Delta S = 0$$



a) stan początkowy P



b) stan końcowy K

Druga zasada termodynamiki

- Entropia układu zamkniętego wzrasta w przemianach nieodwracalnych i nie zmienia się w przemianach odwracalnych (entropia nigdy nie maleje)

$$\Delta S \geq 0$$

$$\text{ale } dS = dQ/T \Rightarrow$$

$$dQ \leq TdS$$

- proces nieodwracalny przebiega w kierunku wzrostu entropii
- wzrost entropii – przejście układu do stanu mniejszego uporządkowania cząsteczek (stanu większego chaosu)
- z I i II zasady termodynamiki wynika:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{l} = p(Sdl) = pdV$$

$$dU = dQ - dW \leq TdS - dW$$

$$dU = TdS - pdV$$

II zasada termodynamiki

Weźmy układ zamknięty - filiżankę z gorącą kawą o temperaturze T_F i otoczenie o temperaturze T_O . Załóżmy, że proces wymiany przez tę filiżankę ciepła z otoczeniem przebiega w stałej temperaturze. Zmiana entropii Wszechświata to zmiana entropii filiżanki, która oddaje ciepło ($-Q$) oraz całego otoczenia, które pobiera ciepło ($+Q$).



Proces taki, jak wiemy z doświadczenia, jest nieodwracalny. A więc możemy napisać:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_O} + \frac{(-Q)}{T_F} > 0$$

Widać, że nierówność powyższa jest spełniona tylko wtedy, gdy $T_F > T_O$. Filiżanka oddaje ciepło (stygnie) tylko wtedy, gdy ma wyższą temperaturę od swojego otoczenia.

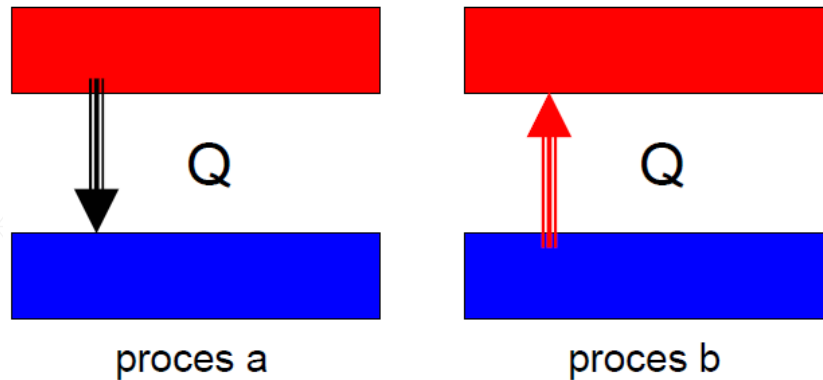
Inne sformułowanie drugiej zasady termodynamiki zostało ogłoszone w 1850 roku przez Rudolfa Clausiusa, a jego treść przedstawia się następująco:

Ciepło nie może samorzutnie przejść od ciała zimniejszego do cieplejszego.

Cały Wszechświat możemy traktować jak układ zamknięty, stąd inne sformułowanie drugiej zasady termodynamiki: **Entropia całego Wszechświata nie maleje.**

II zasada termodynamiki

Proces przekazywania ciepła pomiędzy filiżanką a otoczeniem jest zgodny z I zasadą termodynamiki, jednak zachodzi tylko w jednym kierunku.



Proces a: Ciepło Q przepływa z układu o wyższej temperaturze (filiżanka kawy) do układu o niższej temperaturze (otoczenie). Filiżanka stygnie.

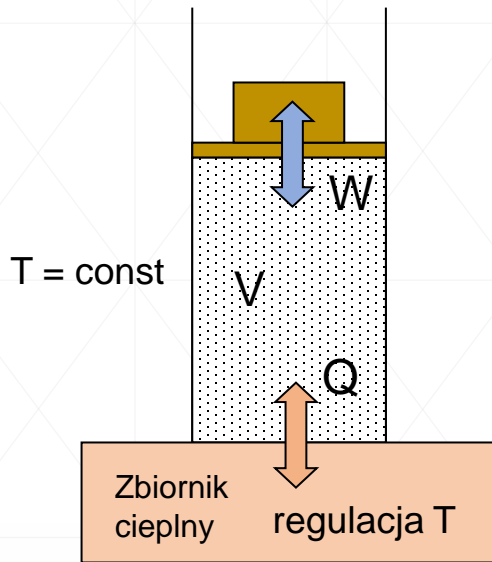
ZACHODZI

Proces b: Ciepło Q przepływa z układu o niższej temperaturze (otoczenie) do układu o wyższej temperaturze (filiżanka z ciepłą kawą). Kawa robi się gorąca!

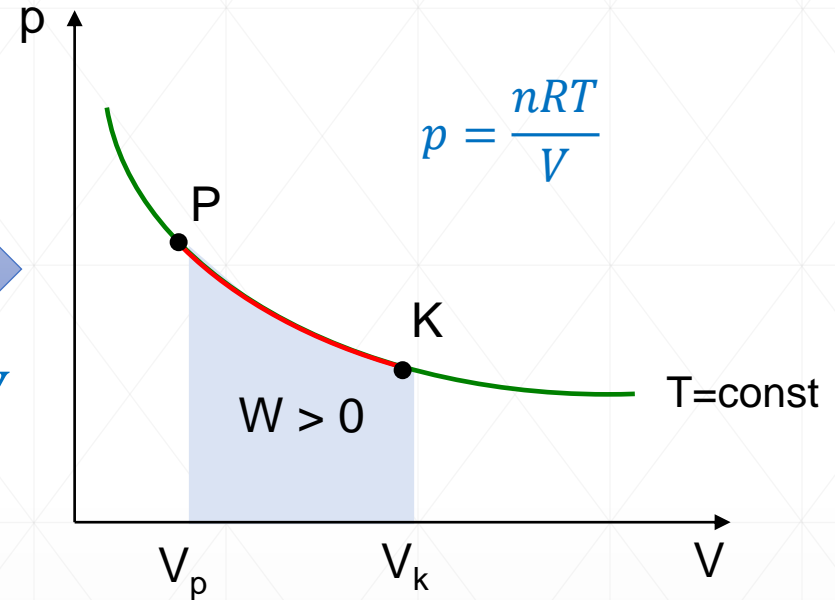
NIE ZACHODZI

Przemiana izotermiczna

Przemiana zachodząca w stałej temperaturze $T = \text{const} \Rightarrow pV = \text{const}$



$$dU = dQ - dW$$



Zmniejszając masę ciężarka układ wykonuje pracę kosztem dostarczonego ciepła przechodząc ze stanu początkowego P do stanu końcowego K

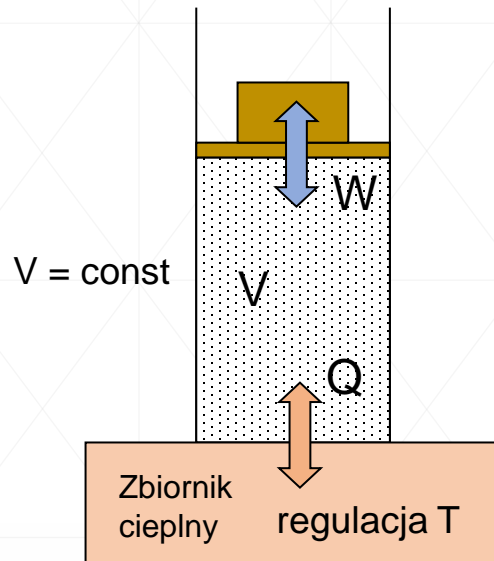
$$dW = dQ$$

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{l} = p(Sdl) = pdV \quad W = \int dW = \int_{V_p}^{V_k} p dV \quad p = \frac{nRT}{V}$$

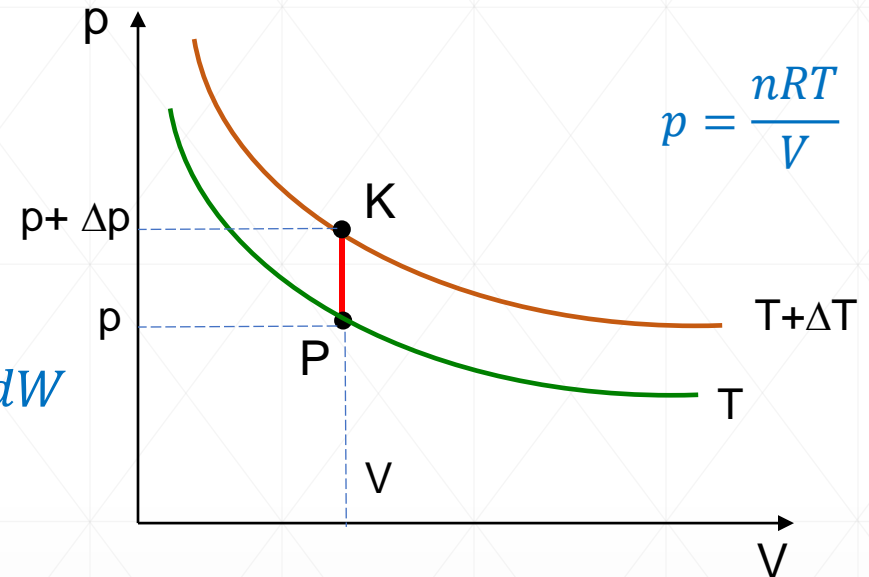
$$W = \int_{V_p}^{V_k} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_p}^{V_k} \frac{dV}{V} \quad W = nRT \ln \frac{V_k}{V_p}$$

Przemiana izohoryczna

Przemiana zachodząca w stałej objętości $V = \text{const} \Rightarrow p/T = \text{const}$



$$dU = dQ - dW$$



$$dW = p dV = 0$$

$dU = dQ$ dostarczone ciepło = zmiana energii wewnętrznej

$$dU = n C_V dT$$

C_V ciepło molowe w stałej objętości to ilość ciepła potrzebna do ogrzania 1 mola gazu o 1 stopień Kelwina

$$C_V = \frac{1}{n} \frac{Q}{\Delta T}$$

$$dU = m c_V dT$$

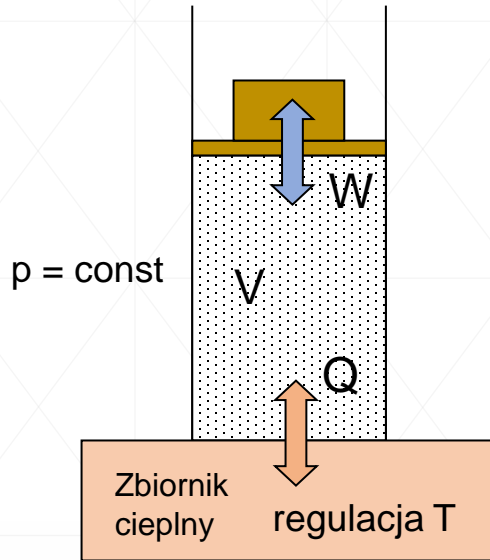
c_V ciepło właściwe w stałej objętości

$$C_V = \frac{m}{n} c_V = M c_V$$

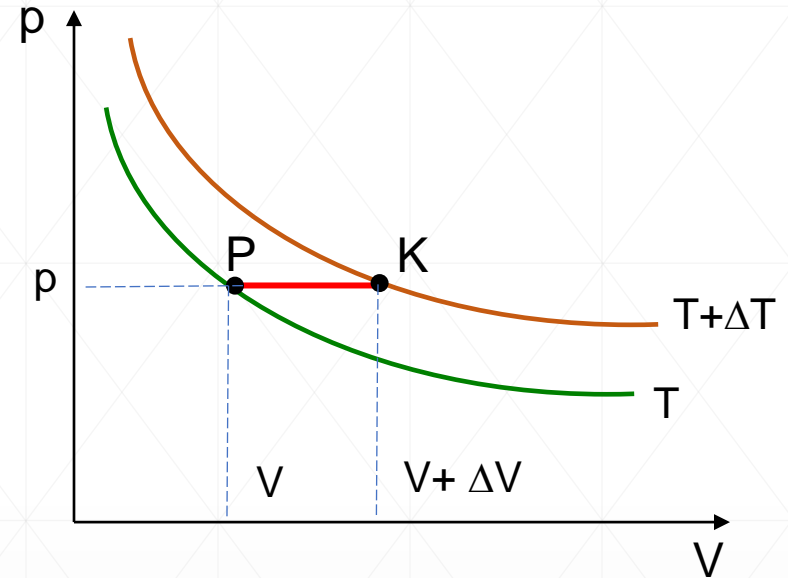
gdzie M to masa molowa

Przemiana izobaryczna

Przemiana zachodząca pod stałym ciśnieniu $p = \text{const} \Rightarrow V/T = \text{const}$



$$dU = dQ - dW$$



$$W = \int dW = \int_{V_p}^{V_k} p dV = p(V_k - V_p)$$

$$dQ = n C_p dT$$

C_p ciepło molowe pod stałym ciśnieniem
to ilość ciepła potrzebna do ogrzania
1 mola gazu o 1 stopień Kelwina

$$C_p = \frac{1}{n} \frac{Q}{\Delta T}$$

$$dQ = mc_p dT$$

c_p ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem

Ciepło właściwe

I zasada termodynamiki dla przemiany izobarycznej:

$$dU = dQ - dW \quad \longrightarrow$$
$$pV = \frac{m}{M}RT \quad \longrightarrow \quad pdV = \frac{m}{M}RdT$$

n moli

różnica ciepł właściwych

różnica ciepł molowych

$$\frac{C_p}{C_V} = \frac{c_p}{c_V} = \kappa$$

wykładnik adiabaty

$$dQ - dU = dW$$
$$mc_p dT - mc_V dT = pdV$$
$$mc_p dT - mc_V dT = \frac{m}{M}RdT$$

$$c_p - c_V = \frac{R}{M}$$

$$C_p - C_V = R$$

Przemiana adiabatyczna

Przemiana adiabatyczna zachodzi przy braku wymiany ciepła z otoczeniem

$$dQ = 0$$

$$dU = dQ - dW$$

$$dU = -dW$$

Zmiana energii wewnętrznej = wykonanej pracy

Dla 1 mola gazu doskonałego:

$$dU = C_V dT$$

$$dW = p dV$$

$$C_V dT = -p dV$$

$$pV = RT$$

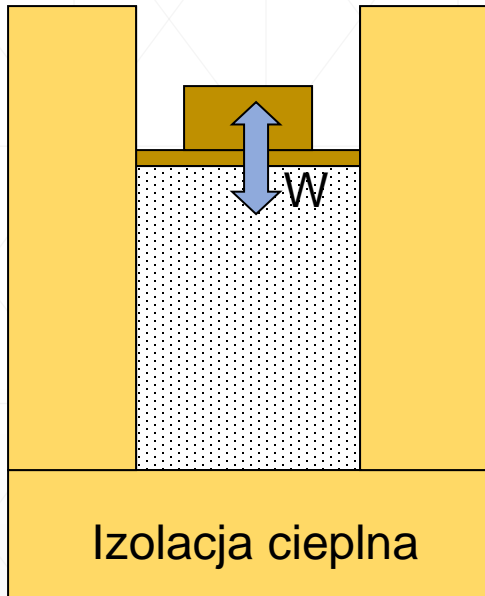
$$C_V dT = -RT \frac{dV}{V}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} C_V \frac{dT}{T} = - \int_{V_1}^{V_2} R \frac{dV}{V}$$

$$C_V \ln \frac{T_2}{T_1} = R \ln \frac{V_1}{V_2} \quad \longrightarrow \quad C_V \ln \frac{T_2}{T_1} = (C_p - C_V) \ln \frac{V_1}{V_2}$$

$$\frac{C_p}{C_V} = \kappa$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{C_p}{C_V} - 1 \right) \ln \frac{V_1}{V_2} \quad \longrightarrow \quad \ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \quad \longrightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1}$$



Przemiana adiabatyczna

$$T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1}$$

$$TV^{\kappa-1} = \text{const}$$

$$V = \frac{RT}{p}$$

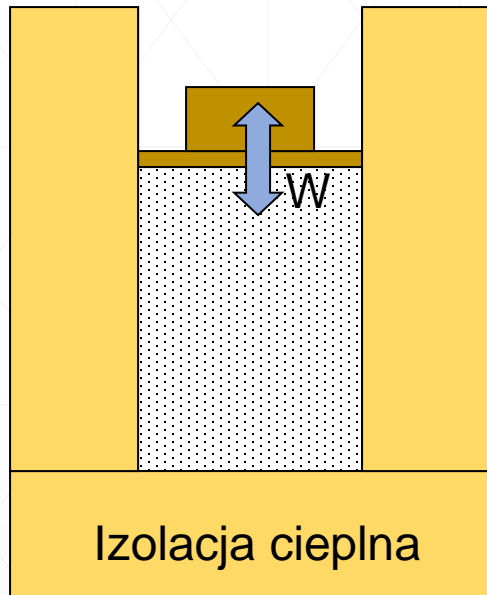
$$T_1 \left(\frac{RT_1}{p_1} \right)^{\kappa-1} = T_2 \left(\frac{RT_2}{p_2} \right)^{\kappa-1}$$

$$T_1^{\kappa} p_1^{1-\kappa} = T_2^{\kappa} p_2^{1-\kappa}$$

$$T^{\kappa} p^{1-\kappa} = \text{const}$$

Prawo Poissona dla przemiany adiabatycznej łącznie temperaturę gazu i objętość

Prawo Poissona dla przemiany adiabatycznej łącznie temperaturę gazu i ciśnienie

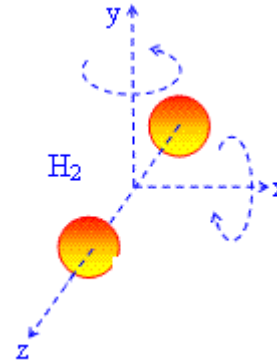


Ciepło właściwe

Energia wewnętrzna 1 mola gazu doskonałego:

$$U = \frac{i}{2}RT$$

gdzie i określa liczbę stopni swobody



Wykładnik adiabaty:

$$\kappa = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i + 2}{i} > 1$$

Liczba stopni swobody – liczba niezależnych ruchów, jakie może wykonywać ciało; najmniejsza liczba współrzędnych, jakie potrzeba, aby opisać położenie ciała.

Dla ogrzewania przy $V = \text{const}$:

$$dU = dQ = mc_V dT = C_V dT$$

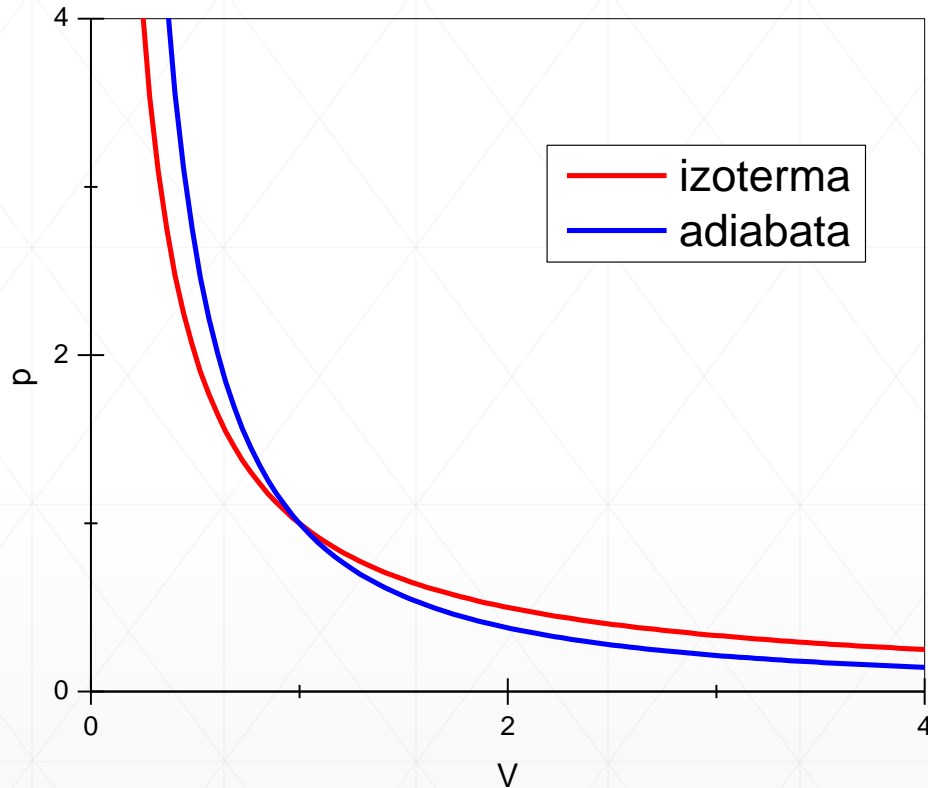
Ciepło molowe przy stałej objętości:

$$C_V = \left(\frac{dU}{dT} \right)_V \quad C_V = \frac{i}{2}R$$

$$C_p = C_V + R = \frac{i}{2}R + R = \frac{i + 2}{2}R$$

cząsteczka	i	C_V	C_p	κ
1-atomowa	3	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$	1,67
2-atomowa – sztywne wiązanie (3 translacyjne + 2 rotacyjne)	5	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$	1,40
2-atomowa – sprężyste wiązanie (3 translacyjne + 2 rotacyjne + 2 oscylacyjne)	7	$\frac{7}{2}R$	$\frac{9}{2}R$	1,29

Przemiana adiabatyczna



Izoterma

$$pV = \text{const}$$

$$dpV + pdV = 0$$

$$\frac{dp}{dV} = -\frac{p}{V}$$

Adiabata

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

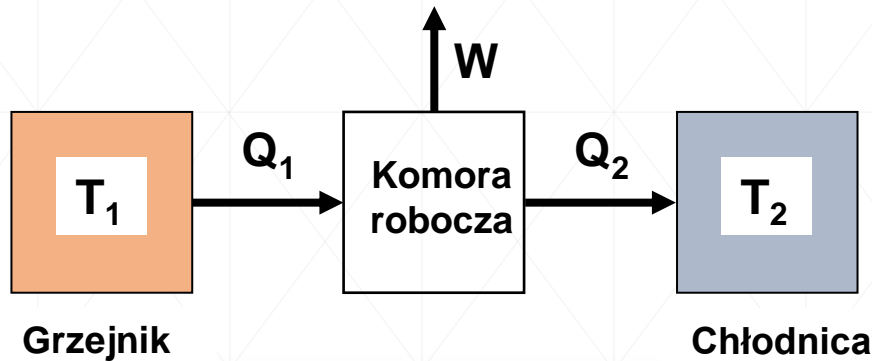
$$dpV^\kappa + p\kappa V^{\kappa-1}dV = 0$$

$$\frac{dp}{dV} = -\frac{\kappa p V^{\kappa-1}}{V^\kappa} = -\kappa \frac{p}{V}$$

Współczynnik kierunkowy adiabaty jest κ razy większy od współczynnika kierunkowego izotermy

Silniki cieplne

Silnikiem nazywamy maszynę zamieniającą jakąś formę energii na pracę. Silnik cieplny uzyskuje pracę z ciepła. Energia cieplna jest rozproszona wśród cząsteczek i nie daje się w całości zamienić na pracę.



Typowy silnik cieplny składa się z: grzejnika, komory roboczej (substancja robocza) i chłodnicy. Proces cykliczny.

Z I zasady termodynamiki wynika:

$$W = Q_1 - Q_2$$

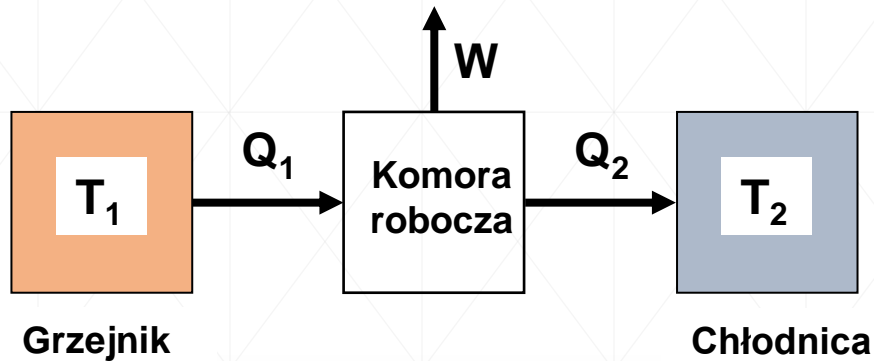
Sprawność silnika jest definiowana jako: $\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{\text{praca wykonana przez silnik}}{\text{ciepło dostarczone silnikowi}}$

Perpetuum mobile I rodzaju to silnik wytwarzający większą pracę od pobranego ciepła ($W > Q_1 - Q_2$) lub wykonujący pracę bez pobierania energii ($\eta > 1$).

Perpetuum mobile I rodzaju jest sprzeczne z zasadą zachowania energii, czyli w przypadku silników cieplnych z I zasadą termodynamiki.

Silniki cieplne

Silnik doskonały, o maksymalnej wydajności dozwolonej przez I zasadę, przetwarzałby całe ciepło Q_1 pobrane z grzejnika na pracę W ($W = Q_1$). Ciepło Q_2 byłoby równe zero i chłodnica nie byłaby potrzebna. Silnik taki stanowiłby perpetuum mobile II rodzaju.

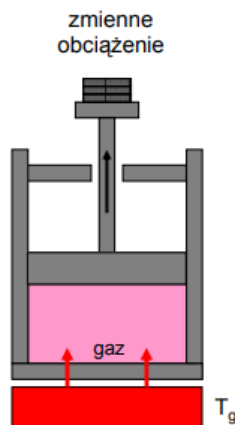
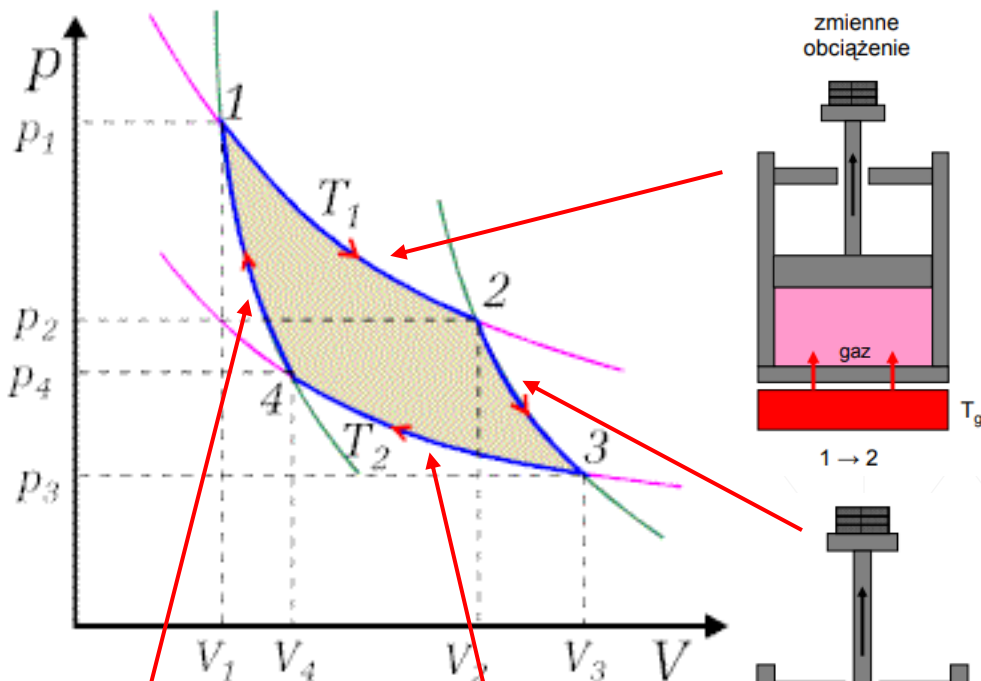


Perpetuum mobile II rodzaju to silnik termodynamiczny który przetwarza ciepło na pracę nawet w przypadku braku różnicy temperatur między źródłem ciepła a otoczeniem - chłodnicą.

Działanie tego typu maszyny nie przeczyłoby zasadzie zachowania energii (czyli równocześnie I zasadzie termodynamiki), ale byłoby niezgodne z II zasadą termodynamiki i doświadczeniem. Sprawność takiego silnika wynosiłaby 100% i całkowita entropia by nie wzrastała.

Silniki cieplne – silnik Carnota

Silnik odwracalny, w którym substancją roboczą jest gaz doskonały. Nie ma strat.



Przemiany w cyklu Carnota:

1. Izotermiczne rozprężanie gazu.

Gaz pobiera ciepło Q_1 z grzejnika (T_g) utrzymując stałą temperaturę T_1 i wykonuje pracę przesuując tłok.

2. Adiabaticzne rozprężanie gazu.

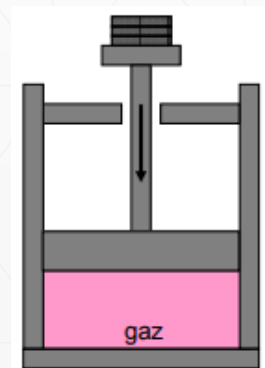
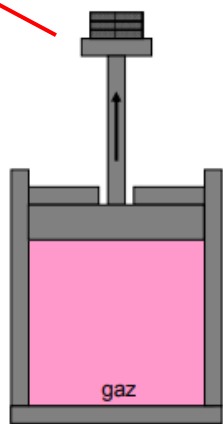
Gaz wykonuje pracę kosztem energii wewnętrznej. Temperatura spada do T_2 .

3. Izotermiczne sprężanie gazu kosztem pracy zewnętrznej.

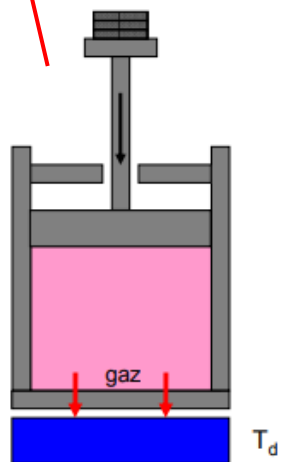
Nadwyżka ciepła (temperatura jest stała i wynosi T_2) jest odprowadzana do chłodnicy (T_d).

4. Adiabaticzne sprężanie gazu kosztem pracy zewnętrznej.

Temperatura gazu i jego energia wewnętrzna rośnie do T_1 .



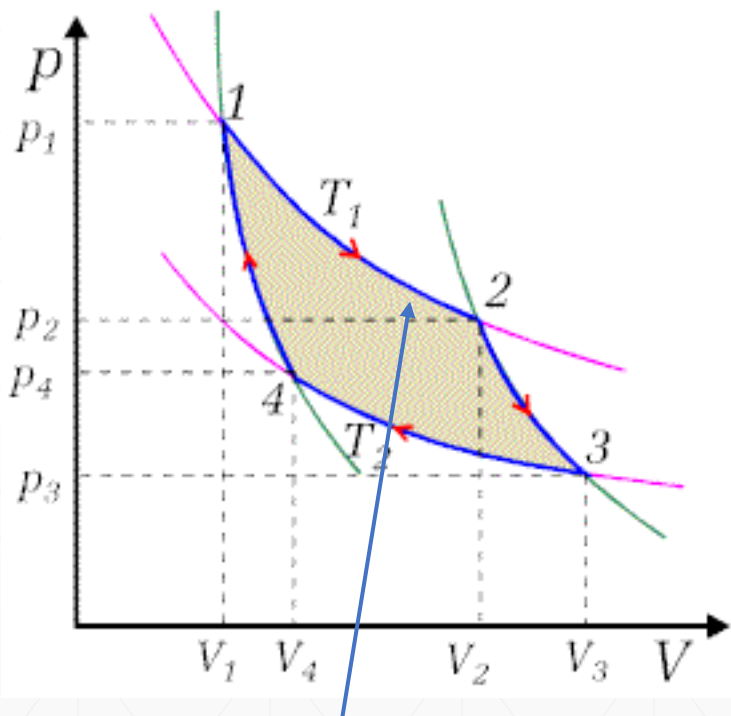
4 → 1



3 → 4

Silniki cieplne – silnik Carnota

Silnik wykonuje pracę przesuując tłok podczas suwu 1 i 2. Otoczenie wykonuje pracę sprężając gaz w komorze roboczej podczas suwu 3 i 4. **Praca użyteczna jest równa polu powierzchni pokazanemu na rysunku.**



**Pole powierzchni =
praca użyteczna**

Silnik pobiera ciepło Q_1 podczas suwu 1:

$$Q_1 = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{NkT_1}{V} dV = NkT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0$$

Silnik oddaje ciepło Q_2 podczas suwu 3:

$$Q_2 = \int_{V_3}^{V_4} p dV = \int_{V_3}^{V_4} \frac{NkT_2}{V} dV = NkT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0$$

Sprawność silnika Carnota:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Silniki cieplne – silnik Carnota

Kiedy sprawność będzie równa jedności?

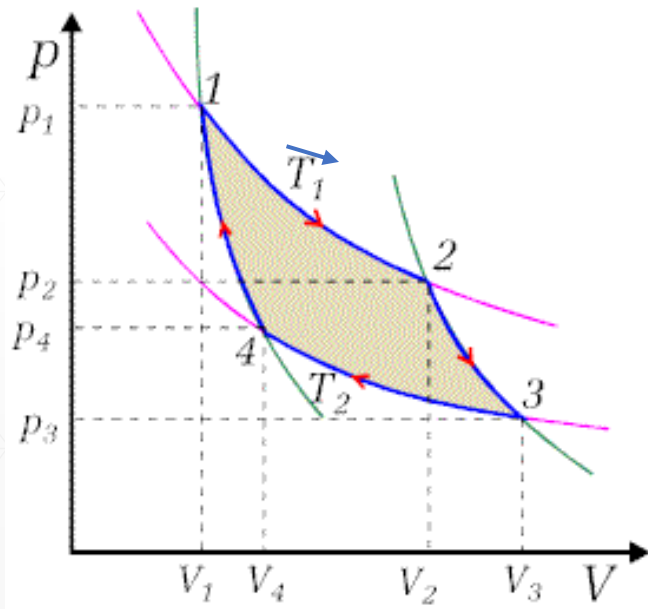
Ciepło Q_1 zostało zamienione na pracę W .

Układ musi wyłącznie pobierać ciepło.

Część ciepła musi być oddawana otoczeniu.

Sprawność jest zawsze mniejsza od jedności.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1$$



Sprawność zależy tylko od stosunku Q_2/Q_1

Jaka zależność łączy objętości: V_1 , V_2 , V_3 i V_4 ?

Dla przemiany adiabatycznej:

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

mamy także:

$$\frac{NkT}{V} V^\kappa = \text{const}; \quad \text{czyli} \quad TV^{\kappa-1} = \text{const}$$

$$T_1 V_2^{\kappa-1} = T_2 V_3^{\kappa-1}$$

$$T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_4^{\kappa-1}$$

Po podzieleniu stronami:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$Q_1 = NkT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q_2 = NkT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Silniki cieplne – silnik Carnota

Sprawność silnika Carnota (zatem każdego silnika odwracalnego) będzie:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

gdzie T_1 jest temperaturą grzejnika, a T_2 temperaturą chłodnicy.

Ponieważ ciepło Q_2 przekazane gazowi podczas sprężania izotermicznego jest w rzeczywistości ujemne, mamy:

$$\frac{Q_1}{T_1} = -\frac{Q_2}{T_2} \quad \text{albo} \quad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Wniosek: w odwracalnym cyklu zamkniętym entropia jest zachowana (nie zmienia się): $\Delta S = 0$

Cykl Carnota jest odwracalny i może przebiegać w odwrotnym kierunku (zamienione sprężanie z rozprężaniem), wówczas układ przekazuje energię cieplną od ciała o niższej temperaturze do ciała o wyższej temperaturze. Układ taki nazywany jest **pompą ciepła** i pracuje on kosztem wykonywania pracy nad nim.

Chłodziarka Carnota

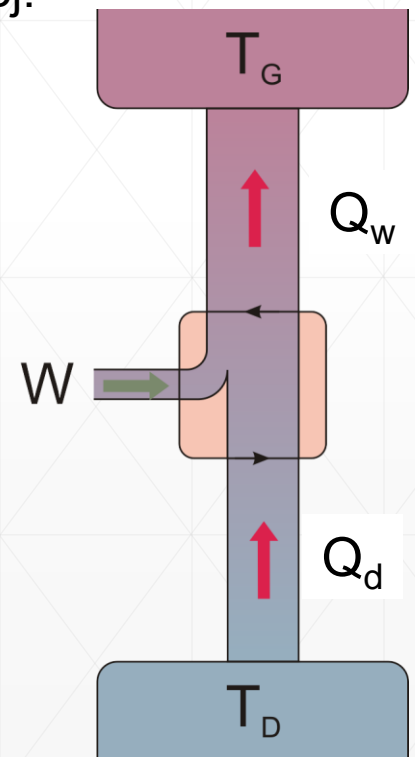
Cykl Carnota **jest odwracalny** i może przebiegać w odwrotnym kierunku (zamienione sprężanie z rozprężaniem), wówczas układ przekazuje energię cieplną od zbiornika o niższej temperaturze (parownika) do zbiornika o wyższej temperaturze (skraplacza).

Proces ten przebiega wbrew naturalnemu kierunkowi przepływu ciepła i zachodzi dzięki dostarczonej z zewnątrz energii mechanicznej.

Chłodziarka pobiera energię Q_d z dolnego źródła ciepła (zbiornika cieplnego o niskiej temperaturze) nakładem wykonanej przy tym jak pracy W .

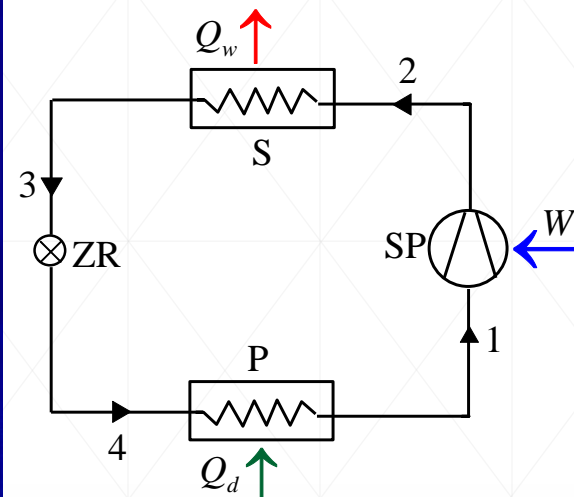
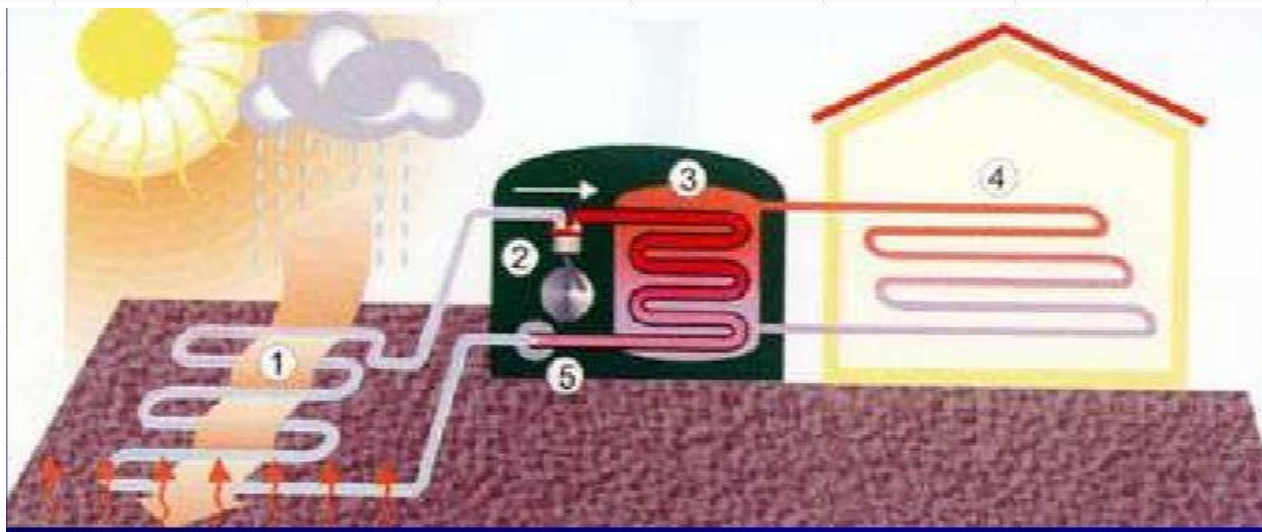
Otrzymane ciepło jest sumą pobranej energii cieplnej i wykonanej pracy:

$$W + Q_d = Q_w$$



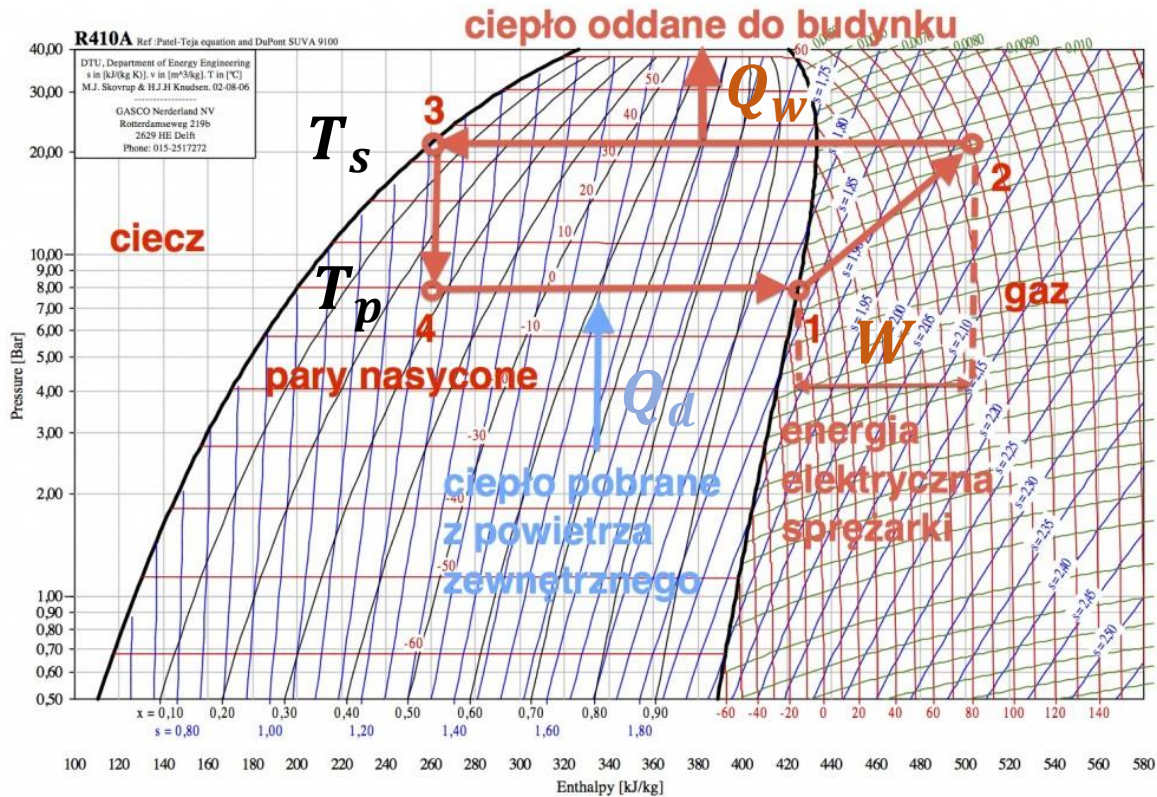
Chłodziarka jako układ energetyczny

Pompa ciepła – zasada działania



W kolektorze poziomym (1) czynnik roboczy o niskiej temperaturze wrzenia pobiera ciepło ze źródła dolnego (Q_d) i zamienia się w parowniku P w parę. Para zasysana jest do sprężarki (2) gdzie dzięki dostarczonej przez sprężarkę SP energii W zwiększa się jej ciśnienie i wzrasta temperatura. Uzyskane w ten sposób ciepło (Q_w) poprzez wymiennik S (3) oddawane jest do odbiornika (4). Para skrapla się w skraplaczu S i przeciskając się przez długą kapilarę (zawór rozprężny ZR dławiący) (5) rozpręża się i wraca do kolektora poziomego (1). Niskie ciśnienie czynnika roboczego powoduje, że obniża się jego temperatura parowania i cykl powtarza się.

Pompa ciepła – wykres przemiany



$$Q_d + W = Q_w$$

Współczynnik efektywności energetycznej - COP

$$\text{COP} = \frac{Q_w}{W} = \frac{Q_w}{Q_w - Q_d}$$

$$\text{COP} \leq \frac{T_s}{T_s - T_p} = \frac{1}{\eta}$$

Ze wzoru tego wynika, że pompy ciepła mają dużą efektywność przy małej różnicy temperatur między źródłem ciepła, a systemem grzewczym i tracą ją szybko wraz ze wzrostem tej różnicy.

$$\text{COP} \approx 3 - 5$$

- odcinek 1-2 – sprężanie (praca W) wzrost ciśnienia i temperatury pary;
- odcinek 2-3 – oddanie ciepła Q_w do odbiornika i skroplenie się pary w temp. T_s ;
- odcinek 3-4 – rozprężenie się cieczy i obniżenie temperatury parowania do T_p ;
- odcinek 4-1 – pobieranie ciepła Q_d ze źródła dolnego i zamiana w parę.

Mechanizmy przekazywania ciepła

- **Przewodnictwo cieplne** – przenoszenie energii przez drgania

Różnica temperatur $T_G - T_Z$ pomiędzy gorącym a zimnym zbiornikiem powoduje przepływ ciepła przez płytkę o grubości L i polu powierzchni S poprzez przekazywanie drgań atomów i elektronów.

Ilość energii przepływającej w jednostce czasu wynosi:

$$P_{przew} = \frac{Q}{t} = k S \frac{T_G - T_Z}{L} = \frac{T_G - T_Z}{R} \quad R = \frac{L}{k S}$$

gdzie k – przewodność cieplna właściwa materiału, R – opór cieplny

- **Konwekcja** – proces przekazywania ciepła związany z ruchem materii w gazie lub cieczy

Ruch materii wynika z różnicy gęstości (ciśnienia) wywołanej różnicą temperatur

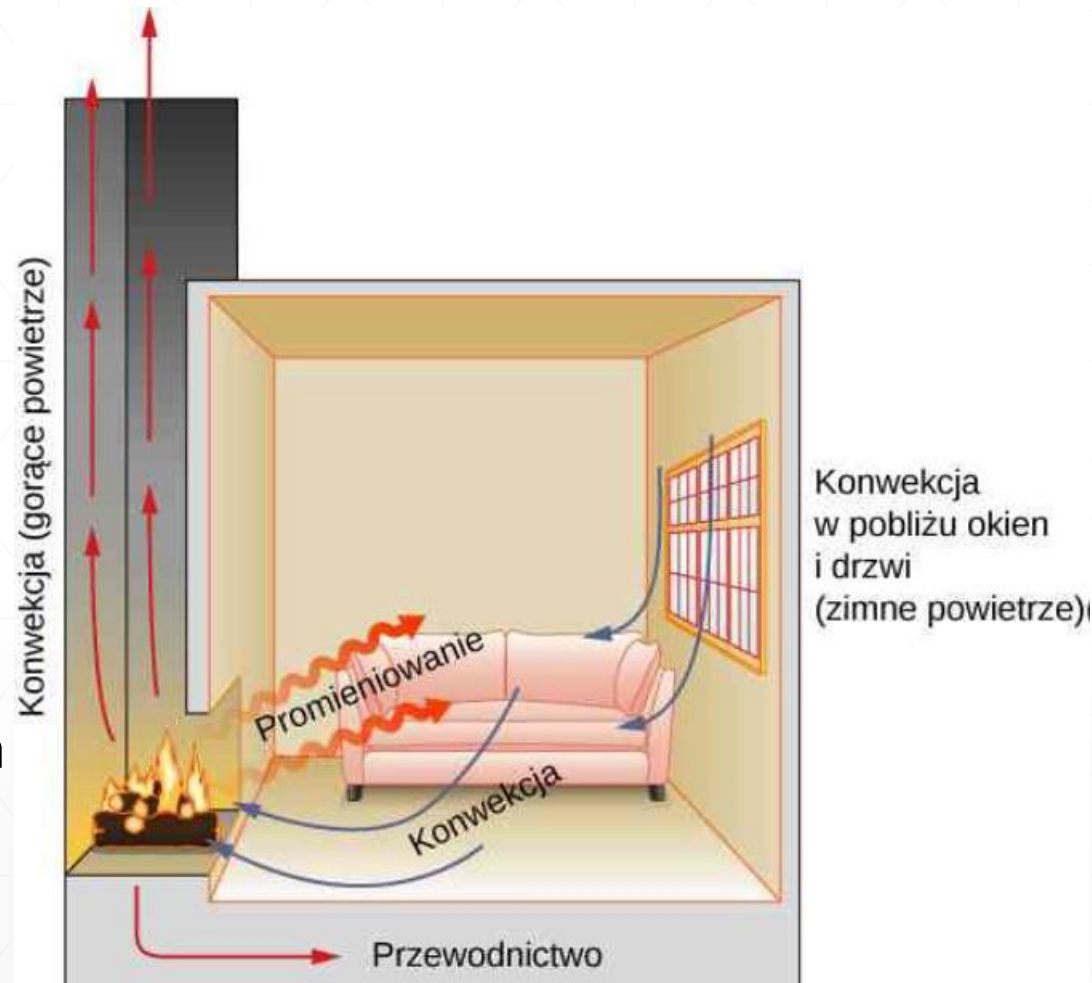
- **Promieniowanie** – wymiana energii między ciałem a jego otoczeniem za pośrednictwem fal elektromagnetycznych

Moc promieniowania emitowanego przez ciało wynosi $P_{prom} = \sigma \varepsilon S T^4$

gdzie σ – stała Stefana-Boltzmana, ε – zdolność emisyjna powierzchni ciała

Mechanizmy przekazywania ciepła

- **Przewodnictwo cieplne** – przenoszenie energii przez drgania
- **Konwekcja** – proces przekazywania ciepła związany z ruchem materii w gazie lub cieczy
- **Promieniowanie** – wymiana energii między ciałem a jego otoczeniem za pośrednictwem fal elektromagnetycznych



Podsumowanie

Zapoznaliśmy się z podstawami termodynamiki:

- definicją pojęcia gazu doskonałego;
- parametrami opisującymi stan gazu doskonałego p , V , T ;
- definicją ciepła, pracy, energii wewnętrznej, entropii;
- pierwszą i drugą zasadę termodynamiki;
- przemianami gazu doskonałego: izotermiczna, izochoryczna, izobaryczna i adiabatyczna;
- opisaliśmy budowę i działanie silników cieplnych na podstawie cyklu Carnota;
- omówiliśmy zasadę działania pompy ciepła;
- zdefiniowaliśmy mechanizmy przekazywania ciepła.



Dziękuję za uwagę