

Termodynamika Techniczna

Wykład i ćwiczenia

Andrzej Wojtowicz

Pokój 331, konsultacje wtorek 13:00 – 15:00

**Strona domowa: www.fizyka.umk.pl/~andywojt
materiały, wyniki (kartkówki, sprawdziany,
egzaminy)**

Różne dodatkowe informacje (PWN):

http://aneksy.pwn.pl/podstawy_fizyki

UWAGA! Uczestnicy kursu Termodynamiki Technicznej dla specjalności MWT; dodatkowe materiały znajdziecie na Moodle IF (dostęp ze strony Instytutu Fizyki UMK). Proszę się zgłosić po klucz

Lektury:

Podręczniki:

- 1. Sonntag, Borgnakke, van Wylen (SBvW), Fundamentals of Thermodynamics, 5th edition**
- 2. Cengel, Boles (CB), Thermodynamics, an Engineering Approach, 4th edition**
- 3. Stefan Wiśniewski, Termodynamika Techniczna, wyd. 5, 2005.**

Lektury uzupełniające:

- 1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, cz. 2, rozdz. 19, 20, 21**
- 2. Feynmana wykłady z fizyki t. I, cz. 2, rozdz. 39 – 46**
- 3. A. Teodorczyk, Termodynamika techniczna**

WYKŁAD:

**Czwartki, 10:15 – 12:00 (przerwa 15 min.) s. 28 i co drugi piątek,
10:15 – 12:00 (przerwa 15 min) w sali 24: 15 lutego, 1, 15 marca,
12, 26 kwietnia, 24 maja, 7 czerwca i dodatkowo w środę 5
czerwca 10:15 – 11:00 (piątek w środę)**

EGZAMIN (pisemny i ustny) 13, 14 czerwca 2013

PRACOWNIA KOMPUTEROWA:

Grupa 1: czwartki, 14:15 – 15:45, PK 4

Grupa 2: piątki, 12:15 – 13:45, PK 4 co drugi piątek 10:15 – 11:45

Kartkówki (minimum 10), 1 sprawdzian 23, 24 maja

OCENY (zaliczenie ćwiczeń):

Kartkówki 10 pkt, sprawdzian (test) 40 pkt.

21 – 25 dst

26 – 30 dst. plus

31 – 35 db.

36 – 40 db. plus

41 – bdb.

Wykład 1

Uwagi wstępne, podstawowe pojęcia

Termodynamika:

nauka o energii i entropii, lub

**nauka o pracy i cieple oraz o związku pomiędzy nimi. Ważne są te
własności materiałów (czynników roboczych), które wiążą się z
przetwarzaniem $\text{praca} \leftrightarrow \text{ciepło}$**

**Termodynamika poszukuje sposobów jak najwydajniejszego
przetwarzania ciepła na użyteczną pracę**

Zasady termodynamiki

Zerowa zasada termodynamiki: pojęcie równowagi cieplnej i temperatury

Pierwsza zasada termodynamiki: ciepło, praca i energia

Druga i trzecia zasada termodynamiki: entropia

Termodynamika techniczna

**Zastosowanie termodynamiki do sporządzania bilansów energii, pracy,
entropii, egzergii i ilości substancji w urządzeniach wykorzystujących i
wytwarzających ciepło i pracę**

Układ termodynamiczny, jego otoczenie i granice (osłony)

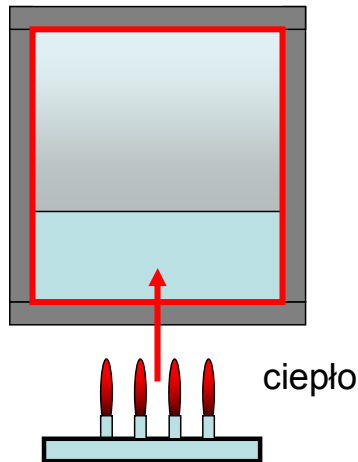
Układ (system) izolowany (odosobniony, zamknięty) – osłona kontrolna (bilansowa) nieprzenikliwa, masa i energia w układzie stałe (masa kontrolna)

**Układy jednostronnie zamknięte lub jednostronnie otwarte
(napełnianie lub opróżnianie zbiornika)**

Układy przepływowe (sprężarki, nagrzewnice, silniki, turbiny itd.)

**Osłony adiabatyczne, diatermiczne
(idealny izolator, idealny przewodnik ciepła)**

Przykład: zamknięty (nieizolowany) układ termodynamiczny

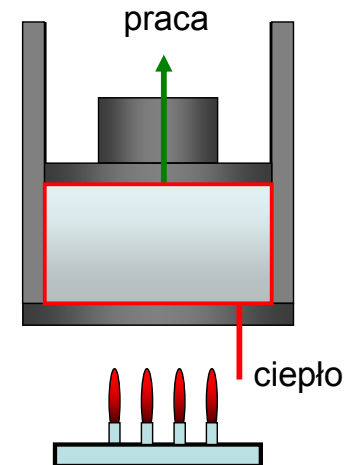


Nasycona para wodna i woda w kotle grzewczym, lub
gaz w cylindrze z tłokiem

Objętość kontrolna (czerwona linia) ruchoma lub
nieruchoma, czynnik roboczy

Ciepło/praca przenikają przez osłonę kontrolną

Sformułowanie masy kontrolnej (stała masa czynnika
roboczego w układzie)



Przykład: otwarty, przepływowy układ termodynamiczny; sprężarka powietrza

Objętość kontrolna (czerwona linia)

Przepływ masy

Przepływ ciepła

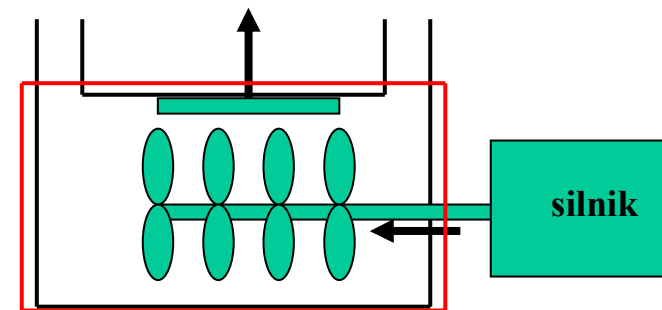
Przepływ pracy

Sformułowanie objętości kontrolnej

wlot powietrza
(niskie ciśnienie)

ciepło

wylot powietrza
(wysokie ciśnienie)



praca

Czynnik/(substancja) termodynamiczn-y(a) (robocz-y/a): stan termodynamiczny, parametry stanu

Parametry stanu: wielkości fizyczne, charakteryzujące czynnik termodynamiczny w równowadze (ciśnienie, temperatura, objętość, masa, gęstość, energia, entalpia, egzergia itd.)

Parametry ekstensywne (globalne) charakteryzują całą objętość czynnika (całkowita objętość V , energia wewnętrzna U , entalpia H , entropia S , masa M na ogół duże litery, (ale czasem masa m) ich wartość rośnie liniowo z masą czynnika)

Parametry intensywne (lokalne), mogą się zmieniać dla różnych części układu (ciśnienie, temperatura, na ogół małe litery (ale T))

Objętość właściwa, masa właściwa (gęstość), energia właściwa, entalpia właściwa (parametry globalne, które stały się lokalne)

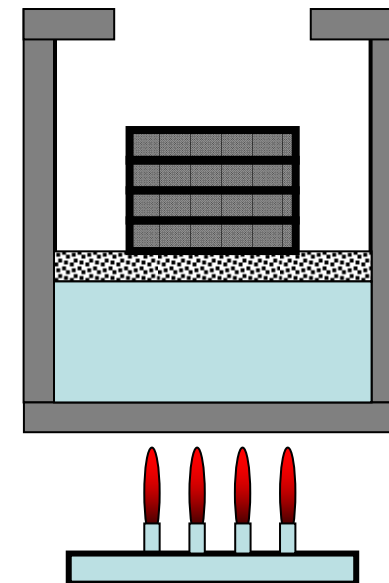
Równowaga termiczna (temperatura stała w całym układzie) i mechaniczna (ciśnienie stałe w układzie), równowaga termodynamiczna (równowaga termiczna i mechaniczna), a stan ustalony (brak zmian w czasie), równowaga chemiczna

Przemiany termodynamiczne

Przemiana równowagowa (kolejne stany równowagi trwałej) musi przebiegać bardzo powoli (quasistatycznie) – ale nie każda przemiana quasistatyczna jest równowagowa

Przemiana odwracalna może przebiegać od stanu początkowego do końcowego i na odwrót, przy czym dotyczy to układu i otoczenia.

Musi przebiegać quasistatycznie i musi być równowagowa.



Nieodwracalność prowadzi do wzrostu entropii.

Nieodwracalność w układzie może wynikać z nierównowagowych procesów wyrównywania ciśnienia, temperatury, gęstości, stężenia lub ze zjawisk dyssypacji (strat) energii, które mogą przebiegać równowagowo. Zjawiska nieodwracalne w układzie i otoczeniu (przemiany odwracalne zewnętrznie i wewnętrznie)

Przemiany cykliczne (cykle lub obiegi)
Układ powraca do stanu początkowego

ENERGIA

Energia całkowita układu, ozn. E (J, kJ)

Energia właściwa (na jednostkę masy, ozn. e (J/kg, kJ/kg))

Energia makroskopowa i mikroskopowa

Energia kinetyczna, $E_K = Mv^2/2$ i potencjalna, $E_P = Mgz$ (e_k i e_p)

Energia wewnętrzna U (wszystkie formy energii mikroskopowej)

w tym energia użyteczna (sensible energy):

energia kinetyczna ruchu postępowego cząsteczek, energia kinetyczna drgań cząsteczek, energia kinetyczna ruchu obrotowego (także spinowa)

energia ukryta (latent energy):

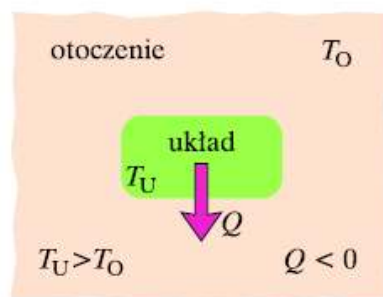
rozne formy energii potencjalnej (mikroskopowej), np. energia zmiany fazy

**Inne formy energii wewnętrznej, na ogół mniej istotne w termodynamice to
energia chemiczna, energia jądrowa**

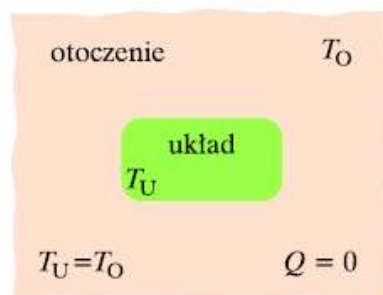
Energia termiczna to energia użyteczna i ukryta

$$E = U + E_K + E_P = U + \frac{Mv^2}{2} + Mgz$$

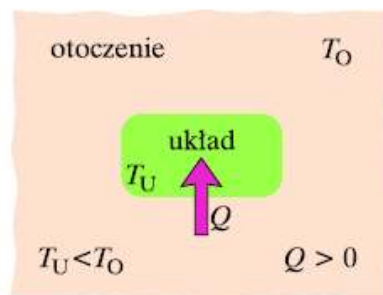
Ciepło i temperatura



a)



b)



c)

Co to jest ciepło i temperatura, jak zdefiniować temperaturę?

Ciepło jest energią termiczną przekazywaną pomiędzy układem a jego otoczeniem wskutek istniejącej pomiędzy nimi różnicy temperatur

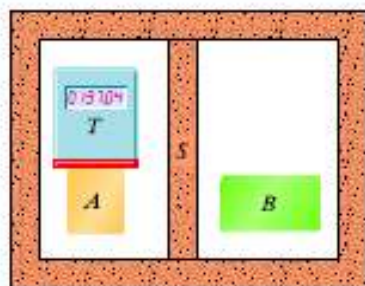
Przepływy ciepła, odczucie ciepła i zimna

$$1 \text{ cal} = 4,1860 \text{ J} = 3,969 \cdot 10^{-3} \text{ Btu}$$

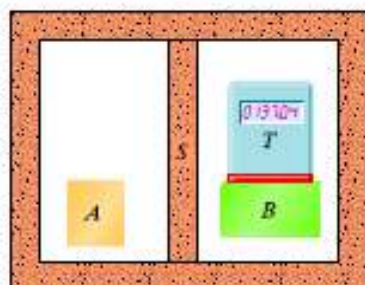
Cal (kilokaloria)

Btu (British thermal unit)

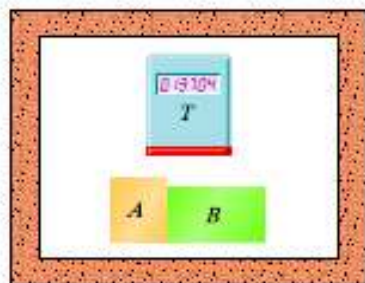
ilość ciepła potrzebna do podniesienia temperatury 1 funta wody od 63°F do 65°F



a)



b)



c)

Rys. 19.3. a) Ciało T (termoskop) i ciało A są w stanie równowagi termodynamicznej. (Ciało S to przegroda izolująca). b) Ciało T i ciało B również są w stanie równowagi termodynamicznej przy tym samym wskazaniu termoskopu. c) Jeżeli prawdziwe są sytuacje z rysunków (a) oraz (b), to zgodnie z zerową zasadą termodynamiki także ciała A i B są w stanie równowagi termodynamicznej

TEMPERATURA

Zerowa zasada termodynamiki

Brak przepływu ciepła, brak zmian – równowaga, żadne własności fizyczne nie zmieniają się w czasie po osiągnięciu stanu równowagi

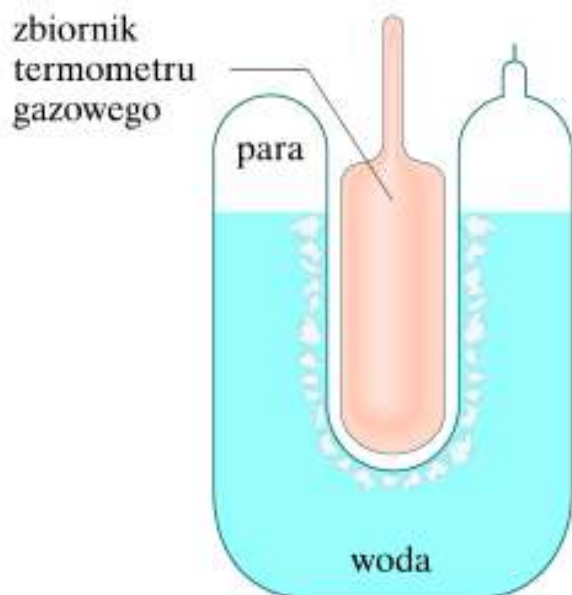
Dwa ciała mają tę samą temperaturę (są w równowadze termicznej) gdy ich własności fizyczne nie zmieniają się

Termoskop (T), co to jest?

Jeśli ciała A i B są w równowadze termicznej z trzecim ciałem (T), to są one w równowadze termicznej ze sobą nawzajem

Definicja temperatury poprzez zależność od temperatury własności fizyczne

Pomiar temperatury



© Wydawnictwo Naukowe PWN SA

Historia o tym, jak nauczono się mierzyć temperaturę, jest interesująca i niezwykła. Termometry wymyślono znacznie wcześniej niż zrozumiano, co w rzeczywistości one mierzą.
J.A. Smorodinskij, *Temperatura*, 12 tom biblioteki *Kwant*, Wydawnictwo Nauka, Moskwa, 1987.

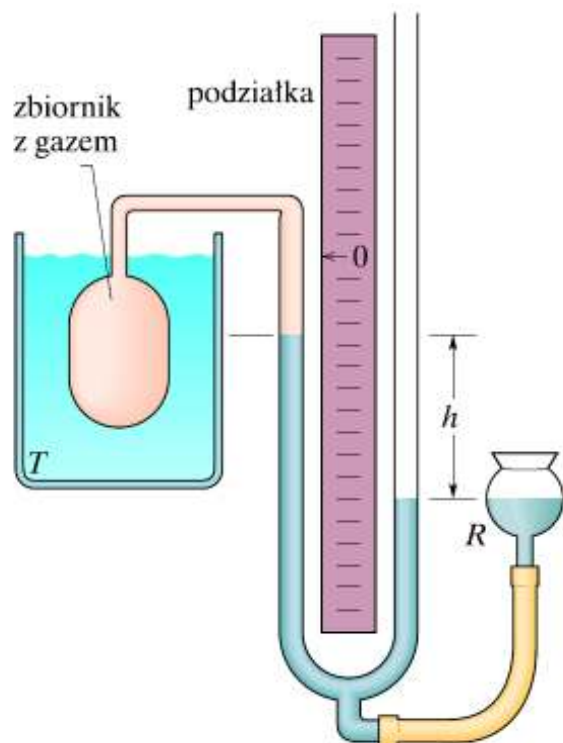
Punkt potrójny wody

Woda, lód i para wodna istnieją w równowadze termodynamicznej tylko dla jednej pary wartości ciśnienia i temperatury (611,73 Pa, 273,16 K)

$T_3 = 273.16 \text{ K}$, punkt odniesienia dla pomiaru temperatury przy pomocy termometru gazowego

1 kelwin, $1/273.16$ różnicy pomiędzy temperaturą punktu potrójnego a zerem bezwzględnym

Termometr gazowy



© Wydawnictwo Naukowe PWN SA

Termometr gazowy

Pewna ilość gazu o stałej objętości

Zbiornik z gazem zanurzony jest w cieczy, której temperaturę mierzymy

$$T = C \cdot p$$

$$p = p_0 - \rho gh$$

$$T_3 = C \cdot p_3$$

$$T = T_3 \cdot \left(\frac{p}{p_3} \right) = (273,16 \text{ K}) \cdot \left(\frac{p}{p_3} \right)$$

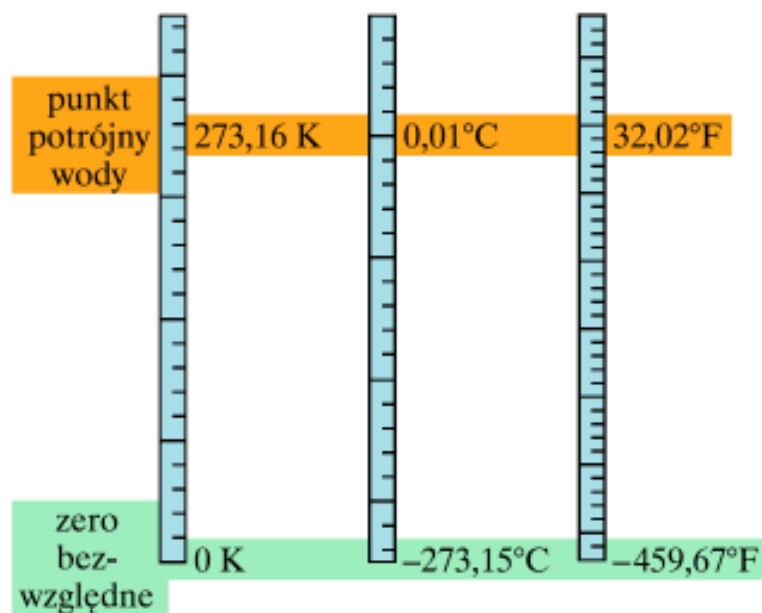
$$T = (273,16 \text{ K}) \cdot \left(\lim_{\text{ilosc gazu} \rightarrow 0} \frac{p}{p_3} \right)$$

Skale temperatur Celsjusza i Fahrenheita

Skala Celsjusza: $T_C = (T - 273,15)^\circ \text{C}$

Skala Fahrenheita: $T_F = \left(\frac{9}{5} T_C + 32 \right) ^\circ \text{F}$

Skala Fahrenheita stosowana w krajach anglosaskich. Skalę tę zaproponował Daniel Gabriel Fahrenheit w 1715 roku. Na punkt zerowy skali Fahrenheit wybrał najniższą temperaturę zimy 1708/1709 zanotowaną w jego rodzinnym mieście Gdańsku. 100° miało być jego własną temperaturą. Niestety na skutek błędu (miał wtedy stan podgorączkowy) 100° F oznacza 37,8° C.



0°C odpowiada 32°F

37,8°C odpowiada 100°F

-18°C odpowiada 0°F

Ciśnienie

1 Pa = 1 N/m² w praktyce stosuje się MPa (megapaskal)

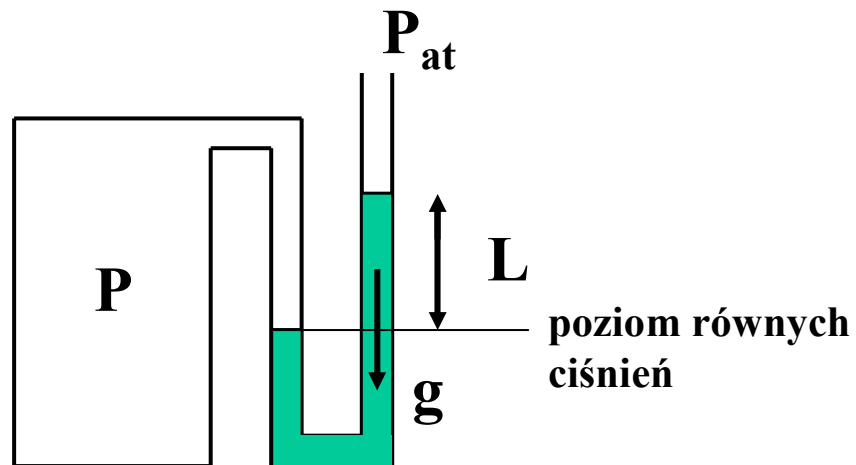
1 bar = 10⁵ Pa

1mmHg = 1 Tr (tor)

1 atm (atmosfera fizyczna) = 101325 Pa (normalne ciśnienie fizyczne) z definicji 760 mm Hg (13590 kg/m³ w 0°C)

$$13590 \cdot 0.76 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \approx 101322 \text{ Pa} = 101,32 \text{ kPa} = 0.1013 \text{ MPa}$$

1 at (atmosfera techniczna) = 1kG/cm² $\approx$ 1kg $\cdot$ 9.81m/s²/10⁴m² $\approx$ 98.1 kPa



$$P = \rho g L + P_{at}$$

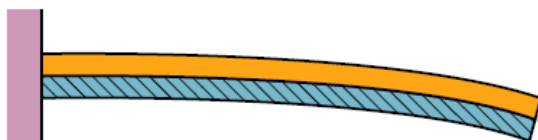
manometr

Rozszerzalność cieplna liniowa



$$T = T_0$$

a)



$$T > T_0$$

b)

© Wydawnictwo Naukowe PWN SA

**Termostat bimetaliczny
(bimetal)**

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

α współczynnik rozszerzalności liniowej

α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]

temp.
pokojowa

Lód (0°C)	51
ołów	29
aluminium	23
mosiądz	19
miedź	17
beton	12
stal	11
szkło (zwykłe)	9
szkło (pyrex)	3,2
diament	1,2
inwar	0,7
kwarc	0,5

Rozszerzalność cieplna objętościowa

$$\Delta V = \beta \cdot V \cdot \Delta T$$

β współczynnik rozszerzalności objętościowej

$$\beta = 3\alpha$$

$$\begin{aligned} V &= x \cdot y \cdot z = \\ (x_0 + \alpha x_0 \Delta T) \cdot \dots &= \\ V_0 + 3\alpha V_0 \Delta T + \dots \end{aligned}$$

SPRAWDZIAN

**Cztery prostokątne płytki
o bokach L, 2L lub 3L
uszereguj wg. zmian
wysokości i pola powierzchni**



Pochłanianie ciepła przez ciała stałe i ciecze

pojemność cieplna C

$$Q = C \cdot \Delta T = C \cdot (T_{\text{koń}} - T_{\text{pocz}})$$

ciepło właściwe c

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = c \cdot m \cdot (T_{\text{koń}} - T_{\text{pocz}})$$

Jednostką pojemności cieplnej jest cal/K lub J/K, a ciepła właściwego cal/g·K (kaloria na gram i na kelwin) lub J/kg·K

$$1 \text{ mol} = 6,02 \cdot 10^{23}$$

jednostek elementarnych danej substancji (atomów, cząsteczek)

[J/kg·K] [J/mol·K]

Pierwiastki w stanie stałym

olów	128	26,6
wolfram	134	24,8
srebro	236	25,5
miedź	386	24,5
aluminium	900	24,4

Inne ciała stałe

mosiądz	380	molowe ciepło właściwe (nie na kg, ale na mol)
granit	790	
szkło	840	
lód (-10°C)	2200	

Ciecze

rtęć	140
alkohol etyl.	2430
woda morska	3900
woda	4190

ciepło przemiany

$$Q = c_{\text{przem}} \cdot m$$

zmiana stanu skupienia

ciepło parowania, ciepło topnienia

$$c_{\text{par}} = 539 \text{ cal/g} = 40,7 \text{ kJ/mol} = 2256 \text{ kJ/kg}$$

**dla wody wrzącej pod ciśnieniem
normalnym**

$$c_{\text{top}} = 79,5 \text{ cal/g} = 6,01 \text{ kJ/mol} = 333 \text{ kJ/kg}$$

**dla wody krzepnącej pod ciśnieniem
normalnym**

<i>Substancja</i>	<i>[K]</i> <i>temp.</i>	<i>[kJ/kg]</i> <i>ciepło przemiany</i>
<i>Topnienie</i>		
wodór	14,0	58,0
tlen	54,8	13,9
rtęć	234	11,4
woda	273	333
ołów	601	23,2
srebro	1235	105
miedź	1356	207
<i>Wrzenie</i>		
wodór	20,3	455
tlen	90,2	213
rtęć	630	296
woda	373	2256
ołów	2017	858
srebro	2323	2336
miedź	2868	4730