



Wykład FIZYKA I

13. Termodynamika fenomenologiczna cz. I

Dr hab. inż. Władysław Artur Woźniak
Katedra Optyki i Fotoniki
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska

<http://www.if.pwr.wroc.pl/~wozniak/fizyka1.html>



TERMODYNAMIKA

- **Termodynamika** – dział fizyki, zajmujący się **energią wewnętrzną** układu.

- **Energia wewnętrzna** (oznaczana zwykle jako U lub E_w) w termodynamice – całkowita energia układu będąca sumą: *energii potencjalnej i kinetycznej makroskopowych części układu*, energii kinetycznej cząsteczek, energii potencjalnej oddziaływań międzycząsteczkowych i wewnątrzcząsteczkowych, etc. [Wikipedia PL] ???

Energia termiczna (zwana też potocznie *energiją cieplną*) – część energii wewnętrznej układu, która jest związana z chaotycznym ruchem cząsteczek układu. [Wikipedia PL] ???

- In thermodynamics, the **internal energy** is one of the two cardinal state functions of the state variables of a thermodynamic system. It refers to energy contained within the system, while excluding the kinetic energy of motion of the system as a whole and the potential energy of the system as a whole due to external force fields. It keeps account of the gains and losses of energy of the system. [Wikipedia ENG] !!!



TERMODYNAMIKA

- Podstawowe wielkości termodynamiki fenomenologicznej: **objętość, ciśnienie i temperatura.**
- **Temperatura** definiowana w ramach termodynamiki klasycznej (makroskopowej), to parametr opisujący **stan równowagi termodynamicznej** układu.
- Budowa wszystkich urządzeń do pomiaru temperatury bazuje na **zerowej zasadzie termodynamiki**:
jeżeli ciało 1 i ciało 2 znajdują się w równowadze termodynamicznej i ciało 2 i 3 są również w takiej równowadze, to ciała 1 i 3 są także w tej samej równowadze termodynamicznej w której byłyby, gdyby były w kontakcie ze sobą.



SKALE TEMPERATUR

- **Bezwzględna skala temperatur – skala Kelvina** – oparta jest na definicji punktu „0” jako „zera” energii kinetycznej, kiedy ustaje wszelki ruch cząsteczek, i jednostce temperatury – kelwinie (K) – równym stopniowi Celsjusza. „Zero bezwzględne” to ok. -273 stopnie w bardziej znanej na co dzień skali Celsjusza.
- **Skala Celsjusza** została stworzona na bazie dwóch punktów, charakterystycznych dla wody: temperaturze zamarzania (przyjętej za „0”) i temperaturze wrzenia (jako „100”). Jednostką jest więc $1/100$ tego przedziału, zwana stopniem Celsjusza ($^{\circ}\text{C}$).
- W krajach anglosaskich powszechnie używana jest **skala Fahrenheita** (oparta na idei Rømera) – jeden stopień tej skali ($^{\circ}\text{F}$) równa się $5/9$ stopnia Celsjusza.
- Inne spotykane skale temperatur – **Rømera, Reaumura, Rankine’a** – mają już dziś tylko znaczenie historyczne.



SKALE TEMPERATUR

Celsius in Fahrenheit :	Celsius * 1.8 + 32
Celsius in Kelvin :	Celsius + 273.15
Celsius in Rankine :	Celsius * 1.8 + 491.67
Celsius in Reaumur :	Celsius * 0.8
Fahrenheit in Celsius :	(Fahrenheit - 32) * (5/9)
Fahrenheit in Kelvin :	(Fahrenheit - 32) * (5/9) + 273.15
Fahrenheit in Rankine :	Fahrenheit + 459.67
Fahrenheit in Reaumur :	(Fahrenheit - 32) * (4/9)
Kelvin in Celsius :	Kelvin - 273.15
Kelvin in Fahrenheit :	(Kelvin - 273.15) * 1.8 + 32
Kelvin in Rankine :	Kelvin * 1.8
Kelvin in Reaumur :	(Kelvin - 273.15) * 0.8
Rankine in Celsius :	(Rankine * (5/9)) - 273.15
Rankine in Fahrenheit :	Rankine - 459.67
Rankine in Kelvin :	Rankine * (5/9)
Rankine in Reaumur :	(Rankine * (4/9)) - 218.52
Reaumur in Celsius :	Reaumur * 1.25
Reaumur in Fahrenheit :	Reaumur * 2.25 + 32
Reaumur in Kelvin :	Reaumur * 1.25 + 273.15
Reaumur in Rankine :	Reaumur * 2.25 + 491.67



TERMOMETRY

- Budowa termometrów oparta jest na jej definicji makroskopowej, wiążącej inne, mierzalne parametry gazu doskonałego – **ciśnienie** i **objętość** – z szukaną **temperaturą**, bądź na pomiarze innych wielkości fizycznych, których wartość zależy od temperatury
- **Termometry „objętościowe”** związane są ze zmianą wymiarów ciała ze zmianą temperatury (rozszerzalność liniowa).
Najprostszym przykładem jest termometr rtęciowy. Dokładniejszym przyrządem tego typu jest termometry gazowy stałego ciśnienia. Pomiar temperatury polega na pomiarze objętości (wymiaru liniowego) rozszerzającego się ośrodka.
- **Termometry gazowe stałej objętości** bazują na pomiarze zmian ciśnienia ze zmianą temperatury.
Służą do pomiarów niskich temperatur.



TERMOMETRY

- **Termorezysty** – to elementy elektryczne, które mierzą zmiany temperatury poprzez pomiar związanej z nią zmiany oporu przewodnika bądź półprzewodnika.
- **Termopary** to układy dwóch przewodników, na stykach których wytwarza się napięcie termoelektryczne, proporcjonalne do różnicy temperatur obu styków (zjawisko Seebecka).
- **Pirometry** mierzą temperaturę poprzez pomiar (porównanie) emisji promieniowania ciała, którego temperaturę chcemy określić, z emisją ciała doskonale czarnego – nadają się do pomiaru wysokich temperatur i do pomiarów „na odległość”.
- **Bolometry** również bazują na fakcie, że emisja promieniowania danego ciała jest proporcjonalna do jego temperatury.
- Układy **bimetalii** służą raczej jako dwustanowe przełączniki termiczne, niż termometry, ale też pełnią rolę „mierników” temperatury.



TEMPERATURA I CIEPŁO

- **Energia termiczna to energia wewnętrzna**, na którą składa się energia kinetyczna i potencjalna atomów, cząsteczek i innych ciał mikroskopowych, tworzących układ. (eee... patrz slajd drugi!)
- **Ciepło** jest energią przekazywaną między układem z jego otoczeniem na skutek istniejącej między nimi różnicy temperatur. To raczej proces przekazywania energii termicznej, niż sama energia.
- Energia może być przekazywana między ciałami także w postaci **pracy** (za pośrednictwem sił). Ciepło i praca nie są właściwościami układu, mają sens tylko podczas opisywania procesów **przekazywania energii** między ciałami.



CIEPŁO

- **Jednostką** ciepła jest więc jednostka energii, czyli **dżul**.

Początkowo używano jednak jednostek, opartych na procesie ogrzewania wody:

kaloria (1 cal) to ilość ciepła, potrzebna do podniesienia temperatury 1g wody od 14,5 °C do 15,5 °C;

brytyjska jednostka cieplna (*british thermal unit* – *Btu*) zdefiniowana jest jako ilość ciepła niezbędna do podniesienia temperatury 1lb (funta) wody od 63 °F do 64 °F.



POCHŁANIANIE CIEPŁA

- **Pojemność cieplna** ciała wyraża ilość ciepła pobraną lub oddaną przez to ciało przy zmianie jego temperatury:

$$C \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

(Uwaga na słowo „**pojemność**”: ciało można podgrzewać bez końca – chyba, że nastąpi zmiana fazy...)

- **Ciepło właściwe**: pojemność cieplna na jednostkę masy ciała:

Przykład:

woda: ciepło właściwe 4190 J/kg·K

$$c \equiv \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$



POCHŁANIANIE CIEPŁA

- **Molowe ciepło właściwe:** gdy ilość substancji podajemy w molach, nie w kilogramach.

1 mol = $6,02 \cdot 10^{23}$ jednostek elementarnych (cząstek, atomów)

UWAGA: Pojemność cieplna, ciepło właściwe i molowe zależy od warunków, w których dzieje się przekazywanie ciepła. Dla ciał stałych i cieczy jest to w praktyce stałe ciśnienie i objętość – dla gazów mogą to być różne wartości, w zależności od parametru, który jest ustalony (*p* lub *V*).



CIEPŁO PRZEMIAN FAZOWYCH

- Podczas pochłaniania/oddawania ciepła, zamiast zwiększania temperatury, może dojść do **przemiany fazowej**: zmiany stanu skupienia między stałym, ciekłym i gazowym:
 - **Topnienie**: ciało stałe \rightarrow ciecz;
 - **Krzepnięcie (zestalenie)**: ciecz \rightarrow ciało stałe;
 - **Parowanie**: ciecz \rightarrow gaz;
 - **Skraplanie (kondensacja)**: gaz \rightarrow ciecz;
 - **Sublimacja**: ciało stałe \rightarrow gaz;
 - **Resublimacja**: gaz \rightarrow ciało stałe.



CIEPŁO PRZEMIAN FAZOWYCH

- Ilość energii, która w postaci ciepła trzeba przekazać jednostkowej masie substancji, aby uległa ona przemianie fazowej, jest nazywana **ciepłem przemiany** (ciepło parowania, ciepło topnienia itd.):

$$c_{\text{przemiany}} \equiv \frac{\Delta Q}{m}$$

(różne zwyczajowe oznaczenia).

Przykład:

woda: ciepło topnienia 333kJ/kg; ciepło parowania 2256kJ/kg

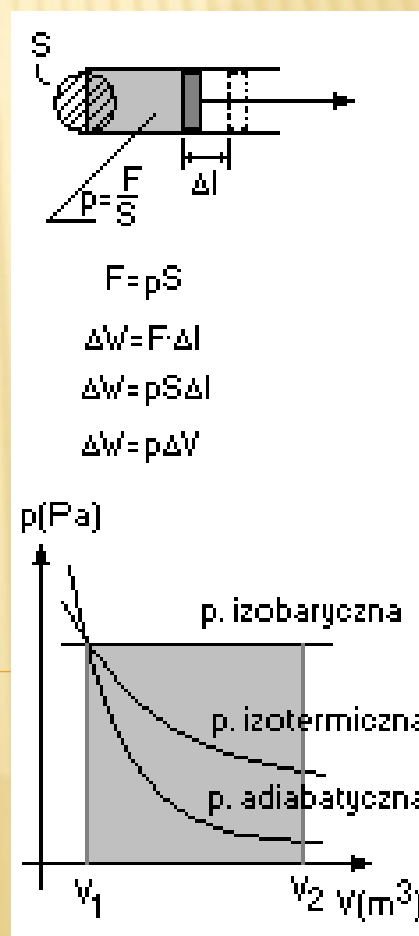
PRACA A CIEPŁO

- Wymiana energii ciała z otoczeniem: praca a ciepło.

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = pSds = pdV$$

$$W = \int dW = \int pdV$$

Przykłady obliczania graficznego pracy dla różnych przemian.



PIERWSZA ZASADA TERMODYNAMIKI

- Ilości wykonywanej **pracy** oraz pobieranego **ciepła** są **różne** i zależą od rodzaju przemiany.
Ale okazuje się, że **różnica** tych dwóch wielkości jest **jednakowa!**

- Pierwsza zasada termodynamiki: $dE_w = \Delta Q - \Delta W$

Energia wewnętrzna układu **wzrasta**, jeżeli układ **pobiera** energię w postaci ciepła i **maleje**, kiedy wykonuje on **pracę**.

(Uwaga: tylko dE_w jest różniczką, bo energia wewnętrzna jest **funkcją stanu**; symbol Δ przy ciepłe i pracy użyto dla oznaczenia **zmian** tych wielkości.)

- Pierwsza zasada termodynamiki jest **rozszerzeniem zasady zachowania energii** na układy nieizolowane: energia może być przekazywana układowi lub zabierana z układu w postaci ciepła i pracy.



PROCESY TERMODYNAMICZNE

Przypadki szczególne procesów termodynamicznych:

- **Przemiana adiabatyczna:**

Warunek: $\Delta Q = 0$ (brak wymiany ciepła z otoczeniem)

Wynik: $dE_w = -\Delta W$ (układ wykonuje pracę kosztem energii wewnętrznej albo praca wykonywana nad układem zwiększa jego E_w)

- **Stała objętość ($dV=0$):**

Warunek: $\Delta W = 0$ (nie ma zmiany objętości, więc układ nie wykonuje pracy)

Wynik: $dE_w = \Delta Q$ (układ pobiera lub oddaje ciepło, i zwiększa lub zmniejsza swoją E_w)

- **Cykl zamknięty:**

Warunek: $dE_w = 0$ (energia wewnętrzna, jako funkcja stanu, zależy tylko od stanu początkowego i końcowego)

Wynik: $\Delta Q = \Delta W$ (wypadkowa praca wykonana przez układ jest równa pobranemu ciepłu, albo praca wykonana nad układem powoduje oddanie ciepła)

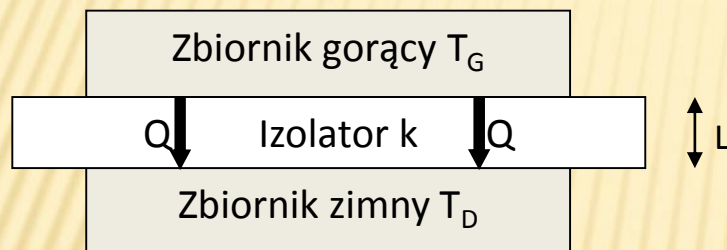
- **Rozprężanie swobodne:**

Warunek: $\Delta Q = \Delta W = 0$ (adiabatyczne rozprężanie bez zmiany ciśnienia)

Wynik: $dE_w = 0$ (energia wewnętrzna pozostaje niezmienną; w praktyce proces nierealizowalny ze względu na brak równowagi termodynamicznej między stanami przejściowymi, wynikający ze zmian ciśnienia)

MECHANIZMY PRZEKAZYWANIA CIEPŁA

• Przewodnictwo ciepłne:



$$P_{przew} \equiv \frac{Q}{t} = kS \frac{T_G - T_D}{L}$$

Substancja	k [W/(m·K)]
Stal nierdzewna	14
Aluminium	235
Miedź	401
Srebro	428
Powietrze (suche)	0,026
Szkło okienne	1,0
Drewno sosnowe	0,11
Wełna mineralna	0,043
Pianka poliuretanowa	0,024

MECHANIZMY PRZEKAZYWANIA CIEPŁA

- **Konwekcja (unoszenie):**

Kiedy płyn (woda, gaz) znajduje się w kontakcie z ciałem o wyższej temperaturze, część płynu przylegająca do gorącego ciała ogrzewa się i zwiększa swą objętość, co prowadzi do spadku gęstości i w efekcie istnienia sił wyporu porusza się, a w jej miejsce napływa kolejna porcja płynu.

(Przykłady: płomień świecy, prądy konwekcyjne wykorzystywane przez szybowce, konwekcja energii na Słońcu.)

- **Promieniowanie ciepłe:**

Wymiana ciepła z otoczeniem za pomocą fal elektromagnetycznych (głównie w podczerwieni).

$$P_{prom} = \sigma \varepsilon S T^4$$

gdzie: $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ jest stałą Stefana-Boltzmann, ε jest zdolnością emisyjną ciała (0 do 1; może zależeć od długości fali), S jest powierzchnią ciała a T jego temperaturą.