

Wykład 1.

1. Uwagi wstępne

1.1. Układ termodynamiczny

1.2. Stan termodynamiczny, parametry i funkcje stanu termodynamicznego

1.3. Przemiany termodynamiczne

2. Ciepło i temperatura

2.1. Zerowa zasada termodynamiki

2.2. Bezwzględna skala temperatur Kelvina i skala Celsjusza

2.3. Termometr gazowy

2.4. Skala Fahrenheita

3. Ciśnienie

4. Rozszerzalność cieplna liniowa

5. Rozszerzalność cieplna objętościowa

6. Pochłanianie ciepła przez ciała stałe i ciecze

1. Uwagi wstępne

Termodynamika to nauka o energii i entropii lub, w innym, prostszym sformułowaniu, nauka o cieple i pracy (termo – ciepło, dynamics – praca). Przedmiotem zainteresowania termodynamiki są zatem wszelkie procesy fizyczne i chemiczne, w których mamy do czynienia z pracą i ciepłem, przetwarzaniem jednego na drugie, przesyłaniem (przekazywaniem) jednego lub/i drugiego itd. Zainteresowanie procesami implikuje zainteresowanie urządzeniami, w których te procesy mają przebiegać; tutaj jednak należy podkreślić, że nie chodzi o projektowanie urządzeń z dziedziny techniki cieplnej, ale raczej o określenie fizycznych uwarunkowań ich funkcjonowania. Chodzi tu po prostu o efektywność działania, obniżenie kosztów i negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Działanie urządzeń przetwarzających ciepło i pracę wymaga udziału tzw. czynnika termodynamicznego albo roboczego, co powoduje, że oprócz działania samego urządzenia trzeba także brać pod uwagę własności fizyczne czynnika roboczego. Termodynamika jest zatem także nauką o materiałach, a układ termodynamiczny w najogólniejszym ujęciu to nie tylko sam czynnik termodynamiczny ale także urządzenie cieplne, które go wykorzystuje.

Są zasadniczo dwie różne metody podejścia do zagadnień termodynamiki. Metoda statystyczna uwzględnia mikroskopową naturę czynnika roboczego. Jednak ze względu na ogromną liczbę atomów czy cząsteczek tworzących makroskopowe substancje materialne konieczne staje się użycie do ich opisu metody statystycznej. Druga metoda to tzw. metoda fenomenologiczna. Metoda ta poszukuje związków i zależności pomiędzy makroskopowymi wielkościami fizycznymi, charakteryzującymi układ termodynamiczny, które mogą być zweryfikowane lub wyznaczone eksperymentalnie. Istnienie takich związków i zależności czyni z termodynamiki fenomenologicznej naukę, która umożliwia ilościowy i jakościowy opis układu jak i pozwala na optymalizację procesów i przemian w nim zachodzących.

W termodynamice technicznej podstawową metodą jest metoda fenomenologiczna, jednak fizycznego uzasadnienia w wielu przypadkach dostarcza metoda statystyczna pomagając w zrozumieniu działania i własności układu.

Istnieją duże różnice w definiowaniu zakresu termodynamiki technicznej. Wydaje się, że w krajach anglosaskich termodynamice technicznej odpowiada „engineering thermodynamics”, w której zakresie, może trochę nieoczekiwanie, nie leży bynajmniej projektowanie (engineering) urządzeń cieplnych lecz, przede wszystkim, sporządzanie bilansów masy, energii (ciepła) i pracy, ale także entropii, entalpii i egzergii w działaniu tych urządzeń. Projektowanie samych urządzeń jest bardziej przedmiotem zainteresowania mechaniki. W bieżącym kursie termodynamiki technicznej przyjmiemy takie właśnie podejście.

Opracowując ten wykład korzystałem przede wszystkim z podręcznika „Fundamentals of Thermodynamics”, Richarda E. Sonntag, Clausa Borgnakke i Gordona J. van Wylena wydanego przez J. Wiley & Sons, 1998 (ozn. SBvW). Inny podręcznik, z którego także korzystałem to „Thermodynamics, an Engineering Approach”, Y.A. Cengela and A.B. Boles, McGraw Hill, 2008. Podstawy termodynamiki przedstawione zostały też w trzech rozdziałach „Podstaw fizyki”, D. Halliday’a, R. Resnicka, J. Walkera, w wydaniu polskim to rozdz. 19, 20 i 21, a w międzynarodowym rozszerzonym wydaniu 7 to rozdz. 18, 19 i 20. Termodynamice poświęcone są też rozdz. 39 do 46 Feynmana wykładów z fizyki (T.1, cz. 2 wyd. polskie). Bardziej akademickie podejście prezentuje podręcznik „Termodynamika Techniczna” Stefana Wiśniewskiego, a pożyteczny przegląd wielu zagadnień można znaleźć w podręczniku Andrzeja Teodorczyka, „Termodynamika Techniczna” dla uczniów szkół średnich.

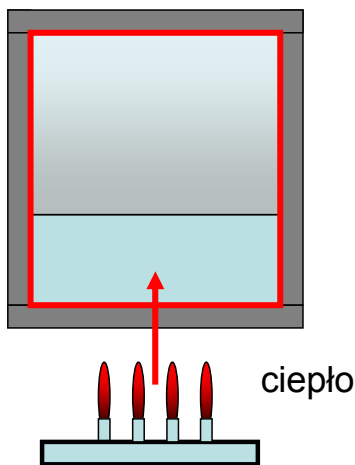
Podsumowując uwagi wstępne, stwierdzamy, że termodynamika to nauka o pracy i cieple oraz o związku między nimi. Dla termodynamiki technicznej istotne są urządzenia przetwa-

rzające pracę i ciepło, ale przede wszystkim interesuje się ona własnościami materiałów czy czynników termodynamicznych, które wiążą się z przetwarzaniem pracy i ciepła. Termodynamika poszukuje sposobów jak najwydajniejszego przetwarzania ciepła na użyteczną pracę, a najważniejszym celem termodynamiki technicznej jest wypracowanie metod sporządzania bilansów energii, pracy, ilości substancji, entropii itd. w urządzeniach cieplnych.

Termodynamika oparta jest na czterech zasadach. Zerowa zasada termodynamiki wprowadza pojęcie równowagi cieplnej i umożliwia wprowadzenie pojęcia temperatury. Pierwsza zasada termodynamiki dotyczy ciepła, pracy i energii wewnętrznej. Druga i trzecia zasada termodynamiki dotyczą entropii, innymi słowy, jakości energii.

1.1. Układ termodynamiczny

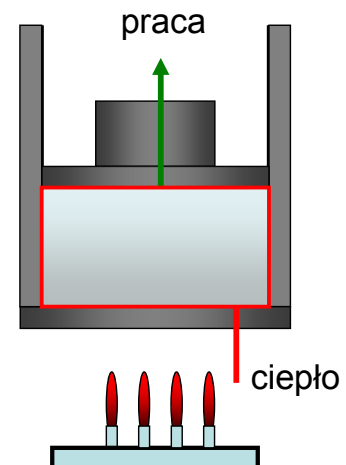
Układ (system) termodynamiczny to wydzielona przestrzeń, w której może znajdować się urządzenie(a) cieplne wraz z substancją, którą stanowi czynnik roboczy. Granice oddzielające układ z czynnikiem od otoczenia, rzeczywiste lub fikcyjne, tworzą osłonę kontrolną. Wydzieloną przez osłonę kontrolną przestrzeń często nazywa się objętością kontrolną. Układ izolowany (odosobniony, lub zamknięty) to taki, którego osłona jest nieprzenikliwa dla substancji i energii; masa i energia w układzie izolowanym są stałe. Układ może być jednostronnie zamknięty (lub otwarty); z sytuacją taką mamy do czynienia gdy np. napełniamy lub opróżniamy zbiornik. Z kolei układ otwarty (przepływowy) to taki, do którego wpływać i wypływać mogą substancja i energia (praca i ciepło). Przykładami układów przepływowych są sprężarki, nagrzewnice, silniki, turbiny, parownice, skraplarki, dysze itd. Osłony kontrolne mogą być adiabatyczne (jeśli są poprowadzone przy powierzchni idealnego izolatora) lub diatermiczne (idealny przewodnik ciepła).



Rys 1.1. Przykład zamkniętego układu termodynamicznego. Para wodna i woda w zbiorniku kotła grzewczego. Układ jest zamknięty, ale nie izolowany; do układu przez osłonę kontrolną przenika ciepło z grzejnika.

W przykładach pokazanych na Rys. 1.1 i 1.2 czynnikiem termodynamicznym jest woda i para wodna w zamkniętym zbiorniku kotła o stałej objętości (Rys. 1.1) lub w zbiorniku w kształcie cylindra zamkniętego z jednej strony przesuwnym tłokiem (Rys. 1.2). W obu przypadkach woda i para wodna stanowią także układ termodynamiczny wydzielony osłoną kontrolną pokazaną kolorem czerwonym. Osłona nie musi być realna i fizyczna; tutaj stanowi ją wyobrażona fikcyjna powierzchnia wydzielająca czynnik w zbiorniku czy cylindrze.

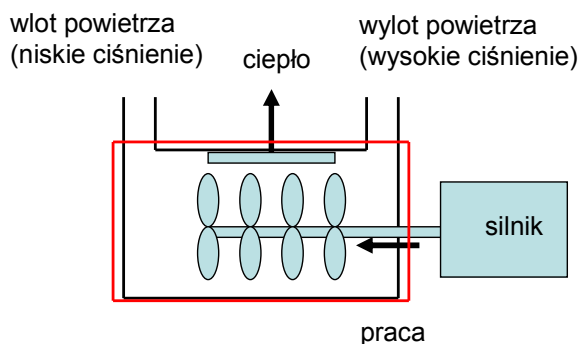
Rys. 1.2. Przykład zamkniętego (ale nie izolowanego) układu termodynamicznego. Ruchoma granica (tłok) umożliwia w tym przypadku wypływ z układu pracy, z kolei ciepło dopływa do układu z grzejnika.



W obu przykładach mamy do czynienia z układem zamkniętym, w którym znajduje się stała masa, zwana także w takich okolicznościach masą kontrolną. Układ jest zamknięty (masa w

układzie jest stała) ale nie izolowany. Oslony kontrolne są w tym przypadku przenikliwe dla ciepła; z grzejnika dopływa ciepło do czynnika, układ traci także ciepło przenikające przez ścianki zbiornika czy cylindra na zewnątrz, o ile ścianki te nie są wykonane z materiału izolującego. Dodatkowo w przykładzie pokazanym na Rys. 1.2 jedna z granic jest ruchoma (tłok) co powoduje, że czynnik roboczy może wykonać pracę przesuwając tłok. A zatem w tym przykładzie osłonę kontrolną przenikać może i ciepło i praca. Pracę wykonywaną przez przesuwający się tłok i wynikającą ze zmiany objętości czynnika roboczego, będziemy nazywali pracą objętościową.

Na Rys. 1.3 pokazano przykład układu otwartego, przepływowego. Oslonę kontrolną tego układu przenika strumień czynnika termodynamicznego na wejściu (wlot) i na wyjściu (wylot). Do otoczenia jest przekazywane ciepło od sprężonego czynnika (powietrza); osłonę kontrolną przenika także praca dostarczana przez zewnętrzny w stosunku do układu silnik napędzający turbinę sprężającą powietrze.



Rys. 1.3. Sprężarka, przykład otwartego, przepływowego układu termodynamicznego. Czerwona kreska definiuje objętość kontrolną, zawierającą urządzenie i przepływający czynnik termodynamiczny.

Matematyczny opis układu termodynamicznego, w którym masa substancji (czynnika) jest stała, nazywamy sformułowaniem masy kontrolnej. Sformułowaniem objętości kontrolnej będziemy nazywali opis matematyczny takiego układu, w którym możliwy jest przepływ masy, ciepła i pracy. Oczywiście, sformułowanie masy kontrolnej jest szczególnym przypadkiem sformułowania objętości kontrolnej.

1.2. Stan termodynamiczny, parametry i funkcje stanu termodynamicznego

Warunkiem, by można było określić stan termodynamiczny czynnika roboczego w rozpatrywanym układzie jest, by układ znajdował się w stanie równowagi termodynamicznej (lub bardzo blisko równowagi). Stan równowagi termodynamicznej to stan równowagi termicznej (układ charakteryzuje jedna temperatura; brak gradientów temperatury) i stan równowagi mechanicznej (układ charakteryzuje jedna wartość ciśnienia, brak gradientów ciśnienia). W specjalnych warunkach mogą być także inne wymagania (np. stan równowagi chemicznej; brak zmian składu chemicznego czynnika termodynamicznego). Możemy wówczas wykonać pomiar i określić wartości temperatury i ciśnienia a także innych parametrów stanu jak objętość właściwa, objętość, masa, gęstość, energia, itd. Parametry stanu dzielimy na ekstensywne (globalne), charakteryzujące całą objętość czynnika i na intensywne (lokalne), które mogą się zmieniać w różnych częściach układu. Parametrami ekstensywnymi są np. całkowita objętość V , masa m , energia wewnętrzna U , entalpia H , entropia S (na ogół, ale nie zawsze oznacza się je dużymi literami). Wartości tych parametrów rosną liniowo z masą czynnika. Parametrami intensywnymi są ciśnienie i temperatura. Są parametry takie jak objętość właściwa, gęstość, energia wewnętrzna właściwa, entalpia czy entropia właściwe, które z globalnych stały się lokalne (po podzieleniu przez objętość albo przez masę czynnika w układzie; parametry te najczęściej, ale nie zawsze, oznaczamy małymi literami).

Dwa parametry, intensywne lub ekstensywne, wystarczają do określenia stanu danego układu (może to być np. ciśnienie i temperatura czynnika); oznacza to, że wyniki wszelkich doświadczeń (czyli pomiarów wartości innych parametrów termodynamicznych, np. objętości właściwej) wykonanych na dwóch próbkach substancji scharakteryzowanych takimi samymi wartościami wybranych parametrów (czyli w takim samym stanie termodynamicznym) będą w granicach błędu pomiarowego takie same. To oznacza, że te inne parametry stanu nie są, tak naprawdę, niezależnymi parametrami, lecz funkcjami stanu co znaczy, że ich wartości są zdefiniowane i zależą od wartości parametrów określających stan termodynamiczny układu.

Dwa parametry wystarczą do określenia stanu układu tylko wtedy, gdy parametry te są niezależne. Warunek ten nie będzie spełniony np. dla wody i pary w równowadze termodynamicznej (powiemy wtedy, że mamy mieszaninę wody nasyconej i pary nasyconej); każdej wartości ciśnienia w takim układzie odpowiada bowiem jedna wartość temperatury. To oznacza, że temperatura i ciśnienie nie są parametrami niezależnymi. Przy tej samej wartości ciśnienia i, w konsekwencji, temperatury, możemy mieć ciecz nasyconą bez pary lub parę nasyconą bez cieczy i nieskończenie wiele stanów pośrednich. Do określenia stanu takiej mieszaniny potrzeba innego niezależnego parametru. W tym przypadku niezależnym drugim parametrem może być np. objętość właściwa lub tzw. jakość pary (tzw. stopień suchości).

1.3. Przemiany termodynamiczne

Jeśli jeden z parametrów układu zmienia się, mówimy o zmianie stanu układu. Zbiór następujących po sobie stanów charakteryzujących dany układ to przemiana termodynamiczna zachodząca w tym układzie. Oczywiście mamy tutaj pewną trudność; z jednej strony aby mówić o stanie (czy stanach) musimy mieć w układzie równowagę trwałą (brak zmian) aby móc określić ten stan, z drugiej zaś jeśli zachodzi przemiana to nie ma równowagi w układzie. Rozwiązaniem jest idealizacja procesu przemiany termodynamicznej; idealna przemiana termodynamiczna zachodzi tak wolno (quasi-statycznie), że odchylenie od stanu równowagi jest nieskończenie małe i w każdej chwili układ jest bardzo blisko stanu równowagi trwałej (mówimy wówczas o przemianie quasi-równowagowej). Nie każda przemiana quasi-statyczna jest przemianą quasi-równowagową; jednak każda przemiana quasi-równowagowa musi przebiegać quasi-statycznie (być przemianą quasi-statyczną).

Przemiana odwracalna to przemiana, którą można odwrócić; tzn. może ona przebiegać od stanu 1 do stanu 2, ale także od stanu 2 do stanu 1, przy czym stany 1 i 2 muszą określać nie tylko stan układu ale także stan otoczenia układu. Przemiana odwracalna musi być przemianą quasi-równowagową i quasi-statyczną. Nieodwracalność w przemianie prowadzi do wzrostu entropii. Wynika ona albo z nierównowagowych procesów wyrównywania ciśnienia, temperatury, gęstości, stężenia (skończone różnice tych parametrów w różnych częściach układu) lub ze zjawisk dyssypacji (strat) energii, nawet jeśli przebiegają one quasi-równowagowo. Zjawiska nieodwracalne mogą wystąpić w samym układzie lub w jego otoczeniu; mówimy wówczas o przemianie odwracalnej zewnątrz i wewnątrz.

Bardzo ważne dla praktycznych zastosowań są tzw. obiegi czyli przemiany cykliczne (cykle). Są to przemiany, dla których stan końcowy jest jednocześnie stanem początkowym; sekwencja przemian zaczyna się i kończy na tym samym stanie termodynamicznym.

2. Ciepło i temperatura

Ciepło to energia termiczna (część energii wewnętrznej zawartej w danej substancji tworzącej układ) przekazana pomiędzy jednym układem a drugim na skutek istniejącej pomiędzy nimi różnicy temperatur. Tradycyjną jednostką ciepła jest 1 cal (kaloria). Ponieważ ciepło jest energią, nie ma potrzeby używania innych jednostek niż powszechnie przyjęte jednostki ener-

gii; okazało się, że przekazanie między dwoma układami 1 cal ciepła odpowiada przekazaniu energii 4,1860 J. Przepływy ciepła występują tylko wtedy, gdy istnieje różnica temperatur ale nie oznacza to, że nasze odczucia „zimna” i „ciepła” będą jednoznaczne z „wyższą” i „niższą” temperaturą obu układów. Dwa układy o tej samej temperaturze mogą dawać różne odczucia „ciepła” i „zimna”. Bardziej obiektywnej miary temperatury dostarczają pewne własności fizyczne obu układów, które zależą od temperatury.

Zachodzące zbieżnie, choć w przeciwnych kierunkach, zmiany tych własności, towarzyszą przepływowi ciepła z jednego układu do drugiego. Wyrównanie się temperatur oznacza osiągnięciu równowagi termicznej i ustanie procesu przepływu ciepła; oba układy mają tę samą temperaturę, a i ich zależne od temperatury własności fizyczne osiągają stałe wartości charakterystyczne dla końcowej temperatury.

2.1. Zerowa zasada termodynamiki

Pomiar temperatury poprzez rejestrowanie zmian własności fizycznych wybranego układu (termoskopu) jest możliwy dzięki zerowej zasadzie termodynamiki. Zasada ta mówi, że jeśli termoskop jest w równowadze termicznej z jednym układem (ciałem A) i jest także w równowadze termicznej z drugim układem (ciałem B), to oba ciała A i B są także w stanie równowagi termicznej ze sobą. Oznacza to, że możemy stwierdzić równość temperatur dwóch różnych ciał nie doprowadzając do kontaktu między nimi i że możemy zdefiniować temperaturę poprzez zależne od temperatury własności fizyczne termoskopu. Wybór i wycechowanie jakiegoś termoskopu poprzez przypisanie mu odpowiedniej skali czyni z niego termometr i taka właśnie była historia różnych termometrów i różnych przyjętych skal temperatur.

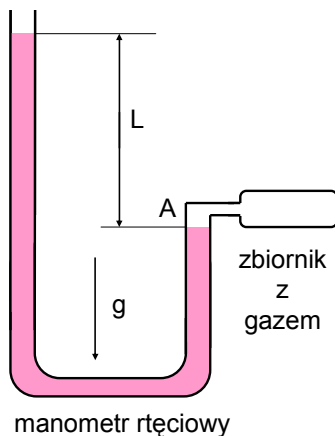
2.2. Bezwzględna skala temperatury Kelvina i skala Celsjusza

Bezwzględna skala temperatury (skala Kelvina) jest zdefiniowana w oparciu o jeden punkt odniesienia, tzw. punkt potrójny wody (jest to stan równowagi termodynamicznej wody, lodu i pary wodnej w zamkniętym izolowanym zbiorniku, ciśnienie = 611,73 Pa, $T_3 = 273,16$ K). Przyjęcie, że 1 Kelwin to $1/273,16$ temperatury w punkcie potrójnym wody pozwala zredefiniować związaną ze skalą Kelvina skalę Celsjusza:

$$T_C = T - 273,15^\circ\text{C},$$

która będzie zgodna z wcześniejszymi definicjami tej skali, gdyż temperatura w punkcie potrójnym wody wyniesie $0,01^\circ\text{C}$ a temperatura wrzenia wody pod ciśnieniem normalnym (woda i para w równowadze termodynamicznej pod ciśnieniem 1 atm), $100,00^\circ\text{C}$.

2.3. Termometr gazowy



Termometr gazowy to w istocie manometr cieczowy, mierzący ciśnienie względne w zbiorniku o stałej objętości, w którym znajduje się niewielka ilość gazu doskonałego.

Rys. 1.4. Uproszczony schemat termometru z gazem doskonałym o stałej objętości. Poziom rtęci (lub innej cieczy) w manometrze w punkcie A jest stały by zapewnić stałą objętość gazu w kolbie pomiarowej.

Zbiornik pomiarowy jest najpierw w kontakcie termicznym z układem, którego bezwzględną temperaturę T chcemy zmie-

rzyć, a potem z układem odniesienia (lód-woda-para wodna; punkt potrójny wody). Ponieważ dla gazu doskonałego ciśnienie gazu P jest proporcjonalne do temperatury gazu w skali bezwzględnej T , $P \sim T$ mamy:

$$T = C \cdot P$$

$$T_3 = C \cdot P_3$$

gdzie P i P_3 to ciśnienia gazu doskonałego w termometrze gazowym, zmierzone przy pomocy manometru wchodzącego w skład termometru gazowego. (P_3 nie jest równe 611,73 Pa !):

$$P = P_0 + \rho g L$$

$$P_3 = P_0 + \rho g L_3$$

Ostatecznie mamy:

$$T = T_3 \cdot \left(\frac{P}{P_3} \right) = (273,16 \text{ K}) \cdot \left(\frac{P_0 + \rho g L}{P_0 + \rho g L_3} \right),$$

gdzie L i L_3 to wysokości słupka rtęci (cieczy) mierzącej ciśnienie gazu w termometrze gazowym dla pomiaru właściwego i cechującego. P_0 to zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne, którego dokładny bezwzględny pomiar musi być także wykonany.

2.4. Skala Fahrenheita

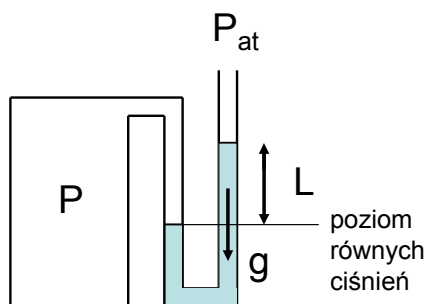
Skala Fahrenheita (Daniel Gabriel Fahrenheit, ur. 1686 w Gdańsku) jest stosowana w krajach anglosaskich, a stopień Fahrenheita jest jednostką stosowanego w tych krajach w technice cieplnej tzw. angielskiego układu jednostek. Związek skali Fahrenheita ze skalą Celsjusza jest następujący:

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

Zauważmy, że 0°C odpowiada 32°F , 100°F odpowiada $37,8^\circ \text{C}$, a 0°F odpowiada ok. -18°C .

3. Ciśnienie.

Ciśnienie w płynie (cieczy lub gazie) jest jednakowe we wszystkich kierunkach; definiujemy je jako siłę wywieraną przez płyn, np. na ściankę zbiornika, prostopadle do jej powierzchni, na jednostkę powierzchni. Jednostką ciśnienia w układzie SI będzie paskal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$). W praktyce stosuje się 1 kPa (1000 Pa) lub 1 MPa (10^6 Pa). Inne jednostki, które można spotkać to $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ i $1 \text{ mmHg} = 1 \text{ Tr (tor)}$, 1 atm (atmosfera fizyczna) $\approx 101,32 \text{ kPa}$ (tzw. normalne ciśnienie fizyczne) i 1 at (atmosfera techniczna) $= 1 \text{ kg/cm}^2 \approx 98,1 \text{ kPa}$. Do pomiarów ciśnienia stosujemy manometry; dla przykładu, na Rys. 1.5, pokazano manometr cieczowy, mierzący względne ciśnienie w zbiorniku z gazem.



Rys. 1.5. Manometr cieczowy mierzący względne ciśnienie gazu w zbiorniku. Wyznaczenie P wymaga pomiaru L , a także znajomości ciśnienia atmosferycznego P_{at} .

Bezwzględne ciśnienie w zbiorniku wyniesie:

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

gdzie ρ to gęstość cieczy w manometrze, g przyspieszenie ziemskie, L to różnica słupków cieczy w manometrze i P_{at} to ciśnienie zewnętrzne (atmosferyczne).

4. Rozszerzalność cieplna liniowa

Rozszerzalność cieplną liniową danego ciała opisuje wzór:

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

gdzie ΔL to zmiana długości, L długość danego ciała a ΔT zmiana temperatury. α to współczynnik rozszerzalności liniowej, którego wartość dla wybranych materiałów w temperaturze pokojowej (ok. 20°C) jest podana w poniższej tabeli:

TABELA 1.

Material	α [$10^{-6}/K$]
Lód	51
Ołów	29
Aluminium	23
Mosiądz	19
Miedź	17
Beton	12
Stal	11
Szkło (zwykłe)	9
Szkło (pyreks)	3,2
Diamant	1,2
Inwar	0,7
Kwarc	0,5

5. Rozszerzalność cieplna objętościowa

Rozszerzalność cieplną objętościową danego ciała opisuje wzór:

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

gdzie β to współczynnik rozszerzalności objętościowej, V objętość początkowa danego ciała a ΔT to zmiana temperatury. Można łatwo pokazać, że

$$\beta = 3\alpha ,$$

gdyż

$$\Delta V = (L_1 + \alpha L_1 \Delta T) \cdot (L_2 + \alpha L_2 \Delta T) \cdot (L_3 + \alpha L_3 \Delta T) = L_1 L_2 L_3 + L_1 L_2 L_3 (3\alpha) \Delta T + \dots$$

$$\Delta V \cong 3\alpha V \Delta T$$

6. Pochłanianie ciepła przez ciała stałe i ciecze

Jeśli badana substancja nie przechodzi w trakcie przekazywania ciepła zmiany stanu skupienia (zmiany fazy), to ciepło będzie powodować tylko zmianę temperatury. Wówczas ilość ciepła pochłonięta przez dane ciało będzie równa:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

gdzie C to pojemność cieplna danego ciała. Mamy także:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta T$$

gdzie m to masa ciała, a c jego ciepło właściwe w $\text{J/kg}\cdot\text{K}$. Jeśli m jest liczbowo równa masie cząsteczkowej lub atomowej M , to ilość danej substancji nazywamy molem (dla masy M wyrażonej w gramach na mol) lub kilomolem (kmol) dla masy M wyrażonej w kg/kmol . Ciepło właściwe będzie wówczas ciepłem właściwym molowym w $\text{J/mol}\cdot\text{K}$ (lub $\text{kJ/kmol}\cdot\text{K}$). W tabeli poniżej podano wartości ciepła właściwego i ciepła właściwego molowego dla wybranych materiałów:

TABELA 2

Material	c [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]	c [$\text{J/mol}\cdot\text{K}$, ($\text{kJ/kmol}\cdot\text{K}$)]
Ołów	128	26,6
Wolfram	134	24,8
Srebro	236	25,5
Miedź	386	24,5
Aluminium	900	24,4
Mosiądz	380	
Granit	790	
Szkło	840	
Lód (-10°C)	2200	
Rtęć	140	
Alkohol etyl.	2430	
Woda morska	3900	
Woda	4190	

Jednostką pojemności cieplnej może być cal/K lub J/K , a ciepła właściwego $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ lub, dla ciepła właściwego molowego, $\text{J/mol}\cdot\text{K}$ (lub $\text{kJ/kmol}\cdot\text{K}$).

Jeśli badana substancja w trakcie ogrzewania zmienia stan skupienia to wówczas jej temperatura będzie na ogół stała, a zaabsorbowana ilość ciepła będzie zależeć od masy substancji m :

$$\Delta Q = c_{zf} \cdot m$$

gdzie c_{zf} to ciepło zmiany fazy. Ciepło zmiany fazy może być ciepłem topnienia (gdy stały stan skupienia przechodzi w stan ciekły) lub ciepłem parowania (gdy ciekły stan skupienia przechodzi w lotny). Wartość ciepła topnienia (parowania) będzie zależeć od temperatury

przejścia fazowego a ta z kolei będzie zależała od ciśnienia. W tabeli poniżej podano temperatury zmiany fazy i ciepło przemiany dla wybranych materiałów pod ciśnieniem normalnym:

TABELA 3

Substancja	Temp zmiany fazy, K	Ciepło przemiany, kJ/kg
Topnienie		
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
Wrzenie		
Wodór	20,3	455
Tlen	90,2	213
Rtęć	630	296
Woda	373	2256
Ołów	2017	858
Srebro	2323	2336
miedź	2868	4730

Dla przemiany zachodzącej w odwrotnym kierunku (krzepnięcie i skraplanie) ciepło przemiany będzie takie samo.