

# Właściwości cieplne

## 5.1. Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi właściwościami cieplnymi, metodami ich wyznaczania oraz mechanizmami przepływu ciepła.

## 5.2. Wstęp teoretyczny:

### 5.2.1 Podstawowe właściwości cieplne

Do podstawowych właściwości cieplnych zaliczyć można:

- **ciepło właściwe** – niesie ze sobą informację o ilości energii w postaci ciepła niezbędnej do zwiększenia temperatury jednego kilograma danej substancji o jeden stopień Kelvina. Jego wartość dla danej substancji zależy od jej temperatury. W przypadku gazów (jako ośrodków ściśliwych) przyjmuje różną wartość w zależności od tego, czy podczas podgrzewania blokuje się zmianę objętości czy ciśnienia. Najczęściej spotykane oznaczenie:  $c_p$  Jednostka:  $J/(kg \cdot K)$ ,
- **współczynnik przewodności cieplnej** – charakteryzuje jednowymiarowy proces przewodzenia energii w postaci ciepła przez daną substancję. Najczęściej spotykane oznaczenie:  $\lambda$  ; Jednostka:  $W/(m \cdot K)$ ,
- **współczynnik wnikania ciepła** – charakteryzuje proces wnikania ciepła na granicy dwóch faz (płyn – ciało stałe). Jest właściwy nie tyle dla konkretnej substancji, czy ośrodka, co dla pary ośrodków i ich konkretnego stanu (np. ruchu jednego z tych ośrodków, lub obu – np. dla układu ciec-z-gaz). Najczęściej spotykane oznaczenia:  $\alpha$  ,  $h$  ; Jednostka:  $W/(m^2 \cdot K)$ ,
- **współczynnik rozszerzalności cieplnej** – jego wartość jest odniesieniem bezwzględnego liniowego odkształcenia powodowanego zmianą temperatury o jeden stopień Kelvina do jednostki długości. Najczęściej spotykane oznaczenie:  $\alpha$  ,  $\alpha$  ,  $\beta$ ; Jednostka:  $1/K$ ,
- **dyfuzyjność cieplna** – znany także pod nazwą współczynnika wyrównywania temperatury. Charakteryzuje zdolność materiału do transportu ciepła w obrębie swojej objętości. Jego wartość jest wprost proporcjonalna do współczynnika przewodności cieplnej a odwrotnie proporcjonalna do iloczynu gęstości i ciepła właściwego. Najczęściej spotykane oznaczenie:  $D$  ,  $a$  ; Jednostka:  $m^2/s$ ,

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (19)$$

gdzie:  $a$  – współczynnik dyfuzyjności cieplnej [ $m^2/s$ ],  
 $\lambda$  – współczynnik przewodności cieplnej [ $W/m \cdot K$ ],  
 $c_p$  – ciepło właściwe [ $J/kg \cdot K$ ],  
 $\rho$  – gęstość (masa właściwa) [ $kg/m^3$ ],

- **entalpia właściwa** – mówi o ilości energii w postaci ciepła, jaka zgromadzona jest w jednostce masy danej substancji przy stałym ciśnieniu. Jej wartość ściśle zależy od temperatury Najczęściej spotykane oznaczenie:  $i$  ; Jednostka:  $J/kg$ ,
- **liczba Prandtla** – jest to liczba kryterialna, która stanowi powiązanie lepkości płynu z jej właściwościami cieplnymi. Jej wartość jest wprost proporcjonalna do iloczynu ciepła właściwego i lepkości dynamicznej, zaś odwrotnie proporcjonalna do współczynnika przewodności cieplnej. Oznaczenie:  $Pr$  ; Jednostka: *brak*,

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (20)$$

gdzie:  $Pr$  – liczba Prandtla [-],  
 $\mu$  – lepkość dynamiczna [ $Pa \cdot s$ ],

- **liczba Nusselta** – jest to liczba kryterialna, która charakteryzuje dynamikę przekazywania ciepła na granicy płynu i ciała stałego, łącząc zjawisko konwekcyjnej wymiany ciepła z jego przewodzeniem.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (21)$$

gdzie:  $Nu$  – liczba Nusselta [-],  
 $\alpha$  – współczynnik wnikania ciepła [W/m<sup>2</sup>·K],

- **ciepło przemiany fazowej** – jest to wielkość informująca o ilości energii w postaci ciepła jaka jest wymagana do dostarczenia lub odebrania, w celu wywołania zmiany stanu skupienia danej substancji. Wyróżnia się: ciepło parowania, ciepło skraplania, ciepło krystalizacji, ciepło topnienia, ciepło sublimacji i ciepło resublimacji. Najczęściej spotykane oznaczenie:  $r$  Jednostka: J/kg,

### 5.2.2 Sposoby wyznaczania wybranych właściwości cieplnych

Przepływ energii w postaci ciepła ma miejsce zawsze w kierunku przeciwnym do gradientu temperatur materii, w której ma miejsce. Wymiana ciepła może zachodzić za pośrednictwem trzech procesów: **przewodzenia, promieniowania i konwekcji.**

Każdy materiał biologiczny, tak jak i każda inna materia we wszechświecie jest przewodnikiem energii w postaci ciepła, gdyż każda istniejąca cząstka jest w stanie odebrać i oddać pewną porcję energii. Jednak sprawność procesu jej przewodzenia zależy od właściwości materiału. Jak wspomniano wyżej – jednowymiarowy proces przewodzenia ciepła przez daną substancję charakteryzuje współczynnik przewodności cieplnej, którego wartość, w układzie, w którym brak konwekcji i promieniowania wyznaczyć można na podstawie zależności (25):

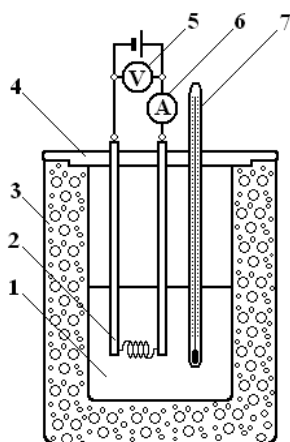
Wiedząc, że: 
$$\Delta Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta T \cdot S \cdot \tau \quad (22)$$

i stosując podstawienie: 
$$\frac{\Delta Q}{S \cdot \tau} = q \quad (23)$$

otrzymujemy strumień ciepła: 
$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta T \quad (24)$$

stąd: 
$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{\Delta T} \quad (25)$$

gdzie:  $\Delta Q$  – porcja (zmiana) energii w postaci ciepła [J],  
 $\Delta T$  – różnica temperatur na drodze wymiany ciepła [K],  
 $\delta$  – droga przewodzenia ciepła (np. grubość przegrody) [m],  
 $S$  – pole powierzchni wymiany ciepła [m<sup>2</sup>],  
 $\tau$  – czas [s],  
 $q$  – strumień ciepła [W/m<sup>2</sup>],



Rys.6.1: Kalorymetr: 1 – badana substancja, 2 – grzałka, 3 – izolacja termiczna, 4 – pokrywa, 5 – woltomierz, 6 – amperomierz, 7 – termometr;

W rzeczywistości jednak niemal niemożliwe jest uzyskanie układów, w których brakuje zjawiska konwekcji i promieniowania, dlatego precyzyjne wyznaczenie przewodności cieplnej i wielu innych właściwości cieplnych jest niezwykle trudne i niemal niewykonalne bez wykorzystania specjalistycznej aparatury.

Nieco łatwiej wyznaczyć doświadczalnie choćby przybliżoną wartość ciepła właściwego danej substancji. Można do tego celu posłużyć się kalorymetrem, który przedstawiono na rysunku 6.1. Zakładając, że substancja znajdująca się w kalorymetrze jest układem odizolowanym i temperatura rośnie równo w całej objętości (wskazane mieszanie!), można przyjąć, zgodnie z definicją ciepła właściwego, że aby ogrzać jej masę  $m$ , od temperatury  $T_1$  do temperatury  $T_2$ , należy doprowadzić do tej substancji ilość ciepła określoną wzorem (26):

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (26)$$

Ilość ciepła z kolei, można wyznaczyć znając moc grzałki, lub mierząc napięcie i natężenie doprowadzanego do niej prądu (w celu wyznaczenia tej mocy) oraz w obu przypadkach mierząc czas nagrzewania substancji od temperatury  $T_1$  do temperatury  $T_2$ . Wówczas:

$$\Delta Q = I \cdot U \cdot \tau = P \cdot \tau \quad (26)$$

stąd:

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{I \cdot U \cdot \tau}{m \cdot (T_2 - T_1)} \quad (27)$$

gdzie:  $\Delta Q$  – porcja (ilość) energii w postaci ciepła dostarczona do układu (substancji) [J],  
 $I$  – natężenie prądu zasilającego grzałkę [A],  
 $U$  – napięcie zasilającego grzałkę [V],  
 $P$  – moc elektryczna dostarczana grzałce [W],  
 $m$  – masa badanej substancji [g],  
 $T_1, T_2$  – początkowa i końcowa temperatura substancji [K]  
 $\tau$  – czas ogrzewania substancji [s],

Można jednak pominąć pomiary parametrów prądu elektrycznego a zamiast tego odnieść się do pomiarów dla substancji o ciepłe właściwym doskonale znanym, np. wody. Wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowego pomiaru w takich samych warunkach z użyciem wspomnianej wody o znanej masie  $m_w$ . Wówczas ciepło właściwe substancji badanej można wyznaczyć ze wzoru (28):

$$c_p = \frac{m_w \cdot \tau \cdot c_{pw}}{m \cdot \tau_w} \quad (28)$$

gdzie:  $c_{pw}$  – ciepło właściwe wody [J],  
 $m_w$  – masa wody [g],  
 $\tau_w$  – czas ogrzewania substancji [s],

Analogiczny wzór można zastosować podczas chłodzenia substancji i wody, co zaproponował jako pierwszy już Izaak Newton.

Często w praktyce, do określania przybliżonych wartości współczynnika przewodności cieplnej i ciepła właściwego (szczególnie materiałów biologicznych) wykorzystuje się równania empiryczne takie jak równanie (29) pozwalające wyznaczyć wartość ciepła właściwego dla nie zamrożonych produktów spożywczych.

$$c_p = \sum c_{pi} \cdot x_i = 1.6 \cdot x_c + 2.0 \cdot x_b + 2.0 \cdot x_t + 1.1 \cdot x_p + 4.2 \cdot x_w \quad (29)$$

gdzie:  $x_c, b, t, p, w$  – udział masowy: cukrów, białka, tłuszczu, popiołu i wody [g/g],

