



**ĆWICZENIE
28**

POMIAR PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ IZOLATORÓW

Cel ćwiczenia: wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej izolatora.

Zagadnienia: transport ciepła, przewodzenie, promieniowanie, konwekcja, mechanizmy przewodzenia ciepła w ciałach stałych, współczynnik przewodności cieplnej, metoda pomiaru przewodności cieplnej izolatorów.

1. Wprowadzenie

Zjawisko transportu energii wywołane różnicą temperatur między sąsiednimi częściami ciała lub na skutek zetknięcia ze sobą ciał o różnej temperaturze, jest nazywane *przewodnictwem cieplnym*. W przypadku, gdy występuje różnica temperatur pomiędzy różnymi stykającymi się ze sobą ciałami lub elementami tego samego ciała, wówczas następuje samorzutny przepływ ciepła w kierunku od obszaru o temperaturze wyższej do obszaru o temperaturze niższej. Przepływ ciepła trwa do chwili uzyskania stanu równowagi termicznej, tzn. do momentu gdy temperatury stykających się ciał lub elementów danego ciała wyrównają się. Przepływ ciepła może odbywać się trzema sposobami: przez konwekcję (unoszenie), promieniowanie, oraz przewodzenie.

1.1 Konwekcja (unoszenie) ciepła

Zjawisko ruchu ciepła polegające na tym, że ciepło pobrane w pewnym miejscu przez cząsteczki cieczy lub gazu jest przenoszone razem z tymi cząsteczkami i oddane chłodniejszemu otoczeniu w innym miejscu, nosi nazwę *konwekcji (unoszenia)*. Zjawisko konwekcji, wiąże się ze zmianą gęstości ośrodka wraz z temperaturą. Jeżeli ciecz (np. woda) lub gaz (np. powietrze), znajdzie się w kontakcie z ciałem o wyższej temperaturze, wtedy warstwa cieczy lub gazu, która bezpośrednio przylega do gorącego ciała, ogrzewa się i - większości przypadków - zwiększa swoją objętość, co skutkuje zmniejszeniem się jej gęstości. Ogrzana część gazu lub cieczy zostaje wypchnięta ku górze, zaś inna, chłodniejsza część cieczy lub gazu z otoczenia zajmuje jej miejsce w pobliżu gorącego ciała i cały proces jest kontynuowany.

Przenoszące ciepło prądy cząsteczek cieczy lub gazów noszą nazwę *prądów konwekcyjnych (unoszenia)*. Rozróżnia się *prądy konwekcyjne naturalne*, np. powstające w atmosferze czy w oceanach oraz *sztuczne*, wytworzone mechanicznie np. przy mieszaniu cieczy.

Ilość ciepła przenoszona przez ciecz lub gaz drogą naturalnego unoszenia przewyższa zwykle wielokrotnie tę jego ilość, która przekazywana jest przez przewodzenie. Powyższe stwierdzenie stanowi wyjaśnienie powszechnie znanego faktu, iż cienkie warstwy powietrza izolują lepiej niż jego duże objętości. Powietrze zawarte np. między szybami okien, w porach cegieł czy pomiędzy włóknami tkaniny, nie ma swobody ruchu, wskutek czego nie mogą się w nim utworzyć prądy unoszenia i ciepło przenoszone jest tylko dzięki przewodzeniu, które dla powietrza jest bardzo niewielkie. Powietrze staje się jeszcze lepszym izolatorem, jeśli zostanie silnie rozrzedzone. Na tej zasadzie opiera się idea budowy termosów, czyli naczyń izolujących o podwójnych ściankach z cienkiego szkła, między którymi znajduje się powietrze pod bardzo niewielkim ciśnieniem, uniemożliwiające przenoszenie ciepła zarówno przez przewodzenie, jak i unoszenie.

1.2 Promieniowanie

Mechanizm wymiany energii w postaci ciepła między ciałem a jego otoczeniem zachodzący za pośrednictwem fal elektromagnetycznych nosi nazwę *promieniowania cieplnego*. Wymiana ciepła przez promieniowanie polega na emisji promieniowania elektromagnetycznego wytworzonego kosztem ciepła oraz na powstaniu ciepła kosztem energii promieniowania.

Jeżeli promieniowanie cieplne pada na jakieś ciało, to zostaje przynajmniej częściowo przez nie pochłonięte, zamieniając się ponownie na ciepło i podwyższając temperaturę ciała.

Ciało o wystarczająco wysokiej temperaturze emituje ze swojej powierzchni promieniowanie cieplne, które rozchodzi się zarówno w ośrodkach materialnych np. w powietrzu, jak i w próżni (dlatego promienie słoneczne mogą przenosić ciepło Słońca na Ziemię przez przestrzeń międzyplanetarną, stanowiącą prawie idealną próżnię, a więc będącą również doskonałym izolatorem cieplnym).

Wszystkie ciała mające temperaturę powyżej 0K są źródłami promieniowania. W miarę wzrostu temperatury ciała, długość fali emitowanego promieniowania odpowiadająca maksimum jego natężenia przesuwa się w stronę fal krótszych.

Moc promieniowania P_e emitowanego przez ciało w postaci fal elektromagnetycznych, czyli jego zdolność emisyjna, zależy od pola powierzchni S ciała i temperatury jego powierzchni T wyrażonej w kelwinach:

$$P_e = \alpha(T)\sigma ST^4, \quad (1)$$

gdzie $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$ jest stałą Stefana-Boltzmana, zaś $\alpha(T)$ oznacza zdolność emisyjną powierzchni ciała, która może przyjmować wartości z przedziału (0,1) w zależności od rodzaju powierzchni. Ciało, dla którego $\alpha(T) = 1$, nazywamy ciałem doskonale czarnym (CDC). CDC całkowicie pochłania padające nań promieniowanie. Ciało doskonale czarne jest modelem idealnym, które w rzeczywistości nie istnieje. Dla ciał rzeczywistych $\alpha(T) < 1$.

Moc absorbowana P_a przez ciało z otoczenia w wyniku promieniowania cieplnego można wyrazić w postaci:

$$P_e = \alpha(T)\sigma ST_o^4. \quad (2)$$

W powyższym wzorze T_o oznacza temperaturę otoczenia wyrażoną w kelwinach; zakłada się, że $T_o = const$.

Ponieważ ciało pochłaniające promieniowanie docierające z otoczenia jest zarazem jego źródłem, wypadkowa moc P_{wyp} charakteryzująca wymianę energii z otoczeniem w postaci promieniowania cieplnego jest równa

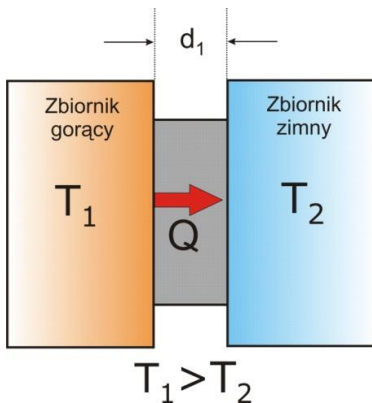
$$P_{wyp} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha(T)\sigma S(T^4 - T_o^4). \quad (3)$$

W powyższym wzorze ΔQ oznacza ilość ciepła przepływającą prostopadle do powierzchni S w czasie Δt . Moc P_{wyp} jest dodatnia, jeżeli ciało pochłania energię na drodze promieniowania, a ujemna, jeżeli ciało traci energię.

Gdy ciało i jego otoczenie mają jednakową temperaturę, ciało zyskuje od otoczenia tyle ciepła, ile traci przez promieniowanie, a zatem temperatura jego nie ulega zmianie.

1.3. Przewodzenie ciepła

Zjawisko przenoszenia ciepła od ośrodka o temperaturze wyższej do ośrodka o temperaturze niższej za pośrednictwem ciała, zwanego *wymiennikiem ciepła*, nazywamy *przewodzeniem ciepła*.



Rys. 1. Schematyczna ilustracja mechanizmu przewodnictwa cieplnego. Przepływ ciepła następuje od gorącego zbiornika o temperaturze T_1 do chłodniejszego zbiornika o temperaturze T_2 przez przewodzącą ciepło płytkę o grubości d_1 i współczynnika przewodności cieplnej k .

Jeżeli przeciwległe ścianki płytkę o polu powierzchni S i grubości d_1 , są utrzymywane w temperaturze odpowiednio T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$) przez dwa zbiorniki cieplne – gorący i zimny (patrz Rys. 1.), to nastąpi przepływ ciepła w kierunku powierzchni o niższej temperaturze. Niech Q oznacza energię przeniesioną w postaci ciepła przez płytkę od powierzchni gorącej do zimnej w czasie t . Badania doświadczalne pokazały, że ilość ciepła przewodzonego przez płytkę jednostce czasu wyraża się wzorem

$$Q = kS \frac{T_1 - T_2}{d_1}, \quad (4)$$

gdzie k jest współczynnikiem przewodności cieplnej materiału, z którego wykonano płytkę. Współczynnik k oznacza ilość ciepła przechodzącą w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni przy jednostkowym gradiente temperatury (różnica temperatury 1K przypada na jednostkę grubości). Jednostką współczynnika przewodności cieplnej w układzie SI jest $\left[\frac{W}{m \cdot K} = \frac{J}{s \cdot m \cdot K}\right]$.

Dobrymi przewodnikami ciepła to takie materiały, przez które łatwo na drodze przewodnictwa przedostaje się energia; ich wartość k jest duża. Ciała o małej wartości współczynnika przewodności cieplnej ($10^{-1} - 10^{-2} [J/s \cdot m \cdot K]$) nazywamy izolatorami.

Z mikroskopowego punktu widzenia przewodzenie ciepła w ciałach stałych odbywa się poprzez drgania sieci krystalicznej i udział elektronów przewodnictwa, przy czym należy rozróżnić przewodnictwo cieplne metali i dielektryków.

W metalach istotne znaczenie ma ruch i wzajemne oddziaływanie elektronów z pasma przewodnictwa. W ogólnym przypadku można przyjąć, że współczynnik przewodności cieplnej metalu $k = k_s + k_e$, co oznacza, że zależy od przewodnictwa związanego z drganiami sieci (k_s) i udziałem elektronów (k_e). W zakresie wyższych temperatur k_e jest około dwa rzędy większe od k_s z czego wynika, że metale są dobrymi przewodnikami ciepła. Można pokazać, że dla metali stosunek współczynnika przewodności cieplnej k i przewodnictwa elektrycznego σ_e jest liniową funkcją temperatury:

$$\frac{k}{\sigma_e} = AT, \quad A = const. \quad (5)$$

Przewodnictwo cieplne dielektryków (izolatorów) jest uwarunkowane kolektywnymi drganiami atomów przybierającymi w kryształach postać fal ($k \cong k_s$). Atom, który wykonuje drgania wokół swego położenia równowagi z amplitudą zależną od temperatury oddziałuje okresową siłą na swoich sąsiadów, powodując zwiększenie amplitudy ich drgań, które początkowo odpowiadały niższej temperaturze.

Gdy na przeciwległych powierzchniach płytki izolatora powstanie różnica temperatur, to przepływ ciepła nastąpi wskutek przekazywania energii przez atomy o większej amplitudzie drgań, będące od strony powierzchni o wyższej temperaturze. Kolektywne drgania atomów powodują fluktuacje gęstości. Fale niosące energię ruchu cieplnego po napotkaniu takiego obszaru ulegają rozproszeniu. Rozproszenie będzie tym większe, im większa jest amplituda

drgań atomów a zatem im wyższa temperatura. Prowadzi to w zakresie wysokich temperatur do relacji pomiędzy współczynnikiem przewodności cieplnej i temperaturą :

$$k \propto 1/T. \quad (6)$$

2. Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Wykorzystywana w ćwiczeniu płytka izolatora jest okrągła. W związku z powyższym, dokonując podstawienia $S = \pi r_1^2$ oraz $\Delta T = T_1 - T_2$, można wzór (4) opisujący ilość ciepła Q przechodząca przez przeciwległe powierzchnie badanej płytki izolatora, wyrazić w postaci:

$$Q = kS \frac{T_1 - T_2}{d_1} = k\pi r_1^2 \frac{\Delta T}{d_1}, \quad (7)$$

gdzie d_1 jest grubością, r_1 – promieniem badanej płytki, zaś T_1 i T_2 oznaczają temperatury przeciwległych krawędzi płytki izolatora.

Ze wzoru (7) wynika, że wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej k wymaga, między innymi, znajomości wielkości, jaką jest ilość ciepła Q przechodząca w jednostce czasu pomiędzy przeciwległymi powierzchniami płytki. Ta ilość ciepła jest bezpośrednio trudna do zmierzenia, dlatego w ćwiczeniu wyznacza się ją pośrednio - metodą stygnięcia. Wymiary d_1 i r_1 użytej płytki izolatora oraz różnica temperatur ΔT są wielkościami mierzonymi w ćwiczeniu bezpośrednio.

Układ pomiarowy składa się z trzech elementów:

- 1) źródła ciepła P_1 wykonanego z masywnego mosiężnego (lub miedzianego) bloku ogrzewanego elektrycznie do temperatury 70°C ,
- 2) odbiornika ciepła P_2 , którym jest mosiężna (lub miedziana) płyta oraz
- 3) badanej płytki izolatora P .



Rys.2. Schemat układu płyt do pomiaru przewodności cieplnej izolatora.

Zarówno źródło ciepła jak i odbiornik ciepła, posiadają tę samą geometrię jak badana płytka izolatora. Blok P_1 opiera się na kołnierzu umocowanym na trzech izolowanych słupkach. Na nim umieszcza się badaną płytkę, a

następnie odbiornik ciepła P_2 . W bloku P_1 (źródle ciepła) i płycie P_2 (odbiorniku ciepła) znajdują się spojenia termopary podłączonej do miernika temperatury. Różnica potencjałów, jaka wytworzy się między dwoma spojeniami

termopary, jest wprost proporcjonalna do różnicy temperatur ΔT między nimi. Zastosowany w układzie pomiarowym miernik temperatury wskazuje różnicę temperatur ΔT .

W ćwiczeniu, odbiornik ciepła należy umieścić bezpośrednio na źródle ciepła i rozpocząć ogrzewanie układu. W chwili, gdy odbiornik ciepła osiągnie temperaturę źródła ciepła (wskazania miernika różnicy temperatur staną się wówczas bliskie zeru) umieszcza się między nimi izolator (jak na Rys.2). Układ $P_1 - P - P_2$ ogrzewa się do momentu ustalenia się temperatury T_1 dolnego bloku P_1 i temperatury T_2 górnej płyty P_2 . Można wówczas przyjąć, że temperatura dolnej powierzchni badanej płytki P jest równa temperaturze T_1 źródła ciepła P_1 , a temperatura górnej powierzchni badanej płytki jest równa temperaturze T_2 górnej płyty P_2 . W ten sposób ustala się różnica temperatur $\Delta T = T_1 - T_2$ dolnej i górnej powierzchni badanej płytki P . Stan równowagi cieplnej w układzie $P_1 - P - P_2$ jest osiągnięty, jeśli wskazanie miernika temperatury pozostaje niezmiennie przynajmniej w ciągu kilkunastu minut. Wówczas należy odczytać z miernika różnicę temperatur ΔT odpowiadającą stanowi równowagi.

Ustalenie się temperatur w układzie zachodzi wówczas, gdy ilość ciepła przewodzona przez badaną płytkę jest równa ilości ciepła traconej na skutek promieniowania i konwekcji przez górną płytę. Aby określić tę ilość ciepła należy wyznaczyć szybkość stygnięcia n górnej płyty w pobliżu w pobliżu różnicy temperatur ΔT . W tym celu należy wyjąć badaną płytkę izolatora, umieścić odbiornik ciepła P_2 bezpośrednio na źródle ciepła P_1 i ogrzewać go do temperatury o 3°C wyższej od temperatury ΔT , odpowiadającej stanowi równowagi cieplnej (wskazania miernika różnicy temperatur będą wówczas o 3°C niższe niż ΔT).

Po ogrzaniu do żądanej temperatury należy przenieść odbiornik ciepła P_2 na specjalną podstawkę i zmierzyć szybkość stygnięcia odbiornika ciepła. W tym celu należy wykonać odczyt wskazania miernika różnicy temperatur, aż do momentu, gdy one wzrosną o około 3°C powyżej ΔT . Szybkość stygnięcia, zdefiniowaną jako pochodna temperatury po czasie $n = \frac{dT}{dt}$, można wyznaczyć metodą graficzną. W tym celu należy sporządzić wykres przedstawiający zależność wskazań miernika różnicy temperatur T od czasu t .

Jeżeli szybkość stygnięcia wynosi n , to ilość traconego ciepła w jednostce czasu jest równa $m_i c_i n$, przy czym m_i oznacza masę odbiornika ciepła, c_i - ciepło właściwe materiału, z którego wykonano odbiornik ciepła. Zakładając, że ilość ciepła przekazywanego do otoczenia jest proporcjonalna do powierzchni, można wyrazić ilość ciepła traconą przez jednostkę powierzchni płyty P_2 w jednostce czasu jako

$$Q_i = \frac{m_i c_i n}{2\pi r^2 + 2\pi dr},$$

gdzie d oznacza grubość odbiornika ciepła, zaś r - jego promień.

Biorąc pod uwagę, że po ustaleniu się temperatur T_1 i T_2 ilość ciepła przewodzona przez badaną płytkę jest równa ilości ciepła traconej przez boczną i dolną powierzchnię odbiornika ciepła, można zapisać:

$$k\pi r_1^2 \frac{\Delta T}{d_1} = \frac{\pi r^2 + 2\pi dr}{2\pi r^2 + 2\pi dr} m_i c_i n,$$

skąd

$$k = \frac{m_i c_i n d_1 (r+2d)}{2\pi r_1^2 \Delta T (r+d)}. \quad (8)$$

Wzór (8) został wyprowadzony, przy założeniu, że strumień ciepła jest prostopadły do powierzchni badanej płytki. Warunek ten jest spełniony jedynie częściowo ze względu na wypromieniowywanie ciepła z brzegów badanej płytki.

Szybkość stygnięcia płytki odbiornika w stanie stacjonarnym może być nieco różna od wyznaczonej doświadczalnie, ze względu na większy wpływ prądów konwekcyjnych na stygnięcie powierzchni górnej płytki P_2 niż dolnej. Ponadto założenie proporcjonalności wypromieniowanego ciepła do wielkości powierzchni jest pewnym przybliżeniem.

3. Zadania do wykonania

A) Pomiary:

1. Kilukrotnie, w różnych kierunkach, zmierz suwmiarką grubość d i średnicę $2r$ odbiornika ciepła P_2 oraz średnicę $2r_1$ badanego izolatora. Grubość izolatora d_1 zmierz śrubą mikrometryczną.

2. Włączyć regulator temperatury i przeprowadzić ogrzewanie układu źródło ciepła – odbiornik ciepła do temperatury 70°C.
3. Gdy odbiornik ciepła osiągnie temperaturę źródła ciepła umieścić między nimi izolator i kontynuować ogrzewanie, aż do ustalenia się stanu równowagi cieplnej. Stan równowagi cieplnej jest osiągnięty, jeśli wskazanie miernika temperatury pozostaje niezmiennie przynajmniej w ciągu kilkunastu minut. Odczytać różnicę temperatur ΔT odpowiadającą stanowi równowagi.
4. Wyjąć płytkę izolatora i położyć odbiornik ciepła P_2 bezpośrednio na źródle ciepła P_1 . Ogrzewać w ten sposób odbiornik ciepła do temperatury o około 3° wyższej od temperatury ΔT , która odpowiadała stanowi równowagi cieplnej (wskazania miernika różnicy temperatur będą wówczas o 3° niższe od ΔT).
5. Przenieść odbiornik ciepła P_2 na specjalną podstawkę i zmierzyć szybkość stygnięcia odbiornika ciepła. W tym celu włączyć stoper i co 10 s notować wskazania miernika różnicy temperatur T , aż do momentu, gdy one wzrosną o około 3° powyżej ΔT .

B) Opracowanie wyników:

1. Metodą graficzną wyznaczyć szybkość stygnięcia n , zdefiniowaną jako pochodna temperatury po czasie $n = \frac{dT}{dt}$. W tym celu należy sporządzić wykres przedstawiający zależność wskazań miernika różnicy temperatur T od czasu t . Następnie należy wykreślić styczną do wykresu $T = f(t)$ w punkcie równowagi cieplnej ΔT . Szybkość stygnięcia n jest równa nachyleniu tej stycznej, które można wyznaczyć ze wzoru:

$$n = \frac{T_k - T_p}{t_k - t_p},$$

gdzie: T_k i t_k oraz T_p i t_p oznaczają współrzędne temperatury i czasu na początku i końcu procesu stygnięcia.

2. Obliczyć niepewność wyznaczenia szybkości stygnięcia odbiornika ciepła.
3. Obliczyć współczynnik przewodności cieplnej k według wzoru:

$$k = \frac{m_i c_i n d_1 (r + 2d)}{2\pi r_1^2 \Delta T (r + d)},$$

gdzie m_i - masa odbiornika ciepła; c_i - ciepło właściwe materiału, z którego wykonano odbiornik ciepła; n - szybkość stygnięcia odbiornika ciepła; d_1, r - grubość i promień płytki badanego izolatora; d, r - grubość i promień odbiornika ciepła; ΔT - różnica temperatur w stanie równowagi cieplnej układu.

4. Obliczyć wartości niepewności wyznaczenia k .

4. Pytania:

1. Wymienić i omówić sposoby przenoszenia ciepła w ciałach stałych, cieczech i gazach.
2. Czym różnią się od siebie mechanizmy przewodzenia ciepła w metalach i dielektrykach?
3. Jaki jest sens fizyczny współczynnika przewodności cieplnej?
4. W jaki sposób można doświadczalnie wyznaczyć współczynnik przewodności cieplnej izolatora?

opracowała J.Trzmiel