

Ćwiczenie 1

POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ

1.1. Podstawy teoretyczne

Wymiana ciepła może odbywać się na drodze trzech różnych mechanizmów:

- przewodzenia,
- konwekcji,
- radiacji.

Przewodzenie (kondukcja) jest to przenoszenie ciepła przy bezpośrednim zetknięciu cząstek ciał wymieniających ciepło, które zderzając się ze sobą przekazują sobie energię kinetyczną drgań. Jest to mechanizm występujący w ciałach stałych i cieczech.

Konwekcja (unoszenie ciepła) występuje wtedy, gdy poszczególne makroskopowe cząstki ośrodka, w których odbywa się ruch ciepła, zmieniają swoje położenie. Rozróżnia się przy tym dwa rodzaje konwekcji: swobodną i wymuszoną. Przy konwekcji swobodnej ruch ośrodka jest wynikiem różnic gęstości spowodowanych wzrostem objętości przy ogrzewaniu. Przy konwekcji wymuszonej ruch ośrodka spowodowany jest różnicą ciśnienia ogólnego (w przypadku powietrza może ona być wynikiem działania wiatru lub wentylatorów). Konwekcja zachodzi głównie w cieczech i gazach.

Promieniowanie (radiacja) jest to mechanizm przenoszenia ciepła, który odbywa się na odległość i zachodzi za pośrednictwem fal elektromagnetycznych, przy czym następuje tu dwukrotna zmiana postaci energii tj. cieplnej na elektromagnetyczną na powierzchni ciała wymieniającego ciepło i elektromagnetycznej na cieplną na powierzchni ciała pochłaniającego ciepło.

Rozkład temperatury w ośrodku można znaleźć z równania przewodnictwa cieplnego, które otrzymuje się z bilansu energii, postaci

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(\mathbf{q}), \quad (1.1)$$

gdzie: \mathbf{q} – gęstość strumienia ciepła, $[\text{J}/(\text{m}^2\text{s}) = \text{W}/\text{m}^2]$,

T – temperatura bezwzględna, $[\text{K}]$,

ρ – gęstość ośrodka, $[\text{kg}/\text{m}^3]$,

c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości, $[\text{J}/(\text{kg K})]$,

t – czas, $[\text{s}]$,

∇ – operator gradientu.

W przypadku ustalonym otrzymamy zależność

$$\nabla(\mathbf{q}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{q}(\mathbf{x}) = \text{const.}, \quad (1.2)$$

z której wynika, że strumień ciepła jest stały.

Równanie (1.1) nie jest równaniem domkniętym i należy do niego dołączyć warunek początkowy określający rozkład temperatury w ciele w chwili początkowej $t = 0$

$$T(\mathbf{x}, t = 0) = T^*(\mathbf{x}), \quad (1.3)$$

oraz warunki brzegowe opisujące wymianę ciepła z otoczeniem. Najprostszy z nich to warunek brzegowy I rodzaju, kiedy dany jest rozkład temperatury na brzegu ciała

$$T(\mathbf{x}, t) = \tilde{T}(\hat{\mathbf{x}}, t) \quad \text{gdy} \quad \hat{\mathbf{x}} \in \beta, \quad (1.4)$$

gdzie β oznacza brzeg obszaru. Kolejny warunek brzegowy (II rodzaju) dotyczy przypadku gdy dany jest strumień ciepła na brzegu ciała

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}, t) = \tilde{\mathbf{q}}(\hat{\mathbf{x}}, t) \quad \text{gdy} \quad \hat{\mathbf{x}} \in \beta. \quad (1.5)$$

Jeżeli wymiana ciepła pomiędzy ciałem a otoczeniem odbywa się przez konwekcję to ma się do czynienia z warunkiem brzegowym III rodzaju (przypadek ten może wystąpić przy wymianie ciepła pomiędzy ciałem stałym i gazem lub pomiędzy ciałem stałym i cieczą), który opisany jest prawem Newtona

$$\mathbf{q}(\hat{\mathbf{x}}, t) \cdot \mathbf{n}(\hat{\mathbf{x}}) = \alpha(T_o - T) \quad \text{gdy} \quad \hat{\mathbf{x}} \in \beta, \quad (1.6)$$

gdzie: \mathbf{n} – wektor normalny do brzegu ciała,

T_o – temperatura otoczenia, $[\text{K}]$,

α – współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję, $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$.

W przypadku radiacyjnej wymiany ciepła z otoczeniem warunek (1.6) przyjmuje postać

$$\mathbf{q}(\hat{\mathbf{x}}, t) \cdot \mathbf{n}(\hat{\mathbf{x}}) = \alpha_r(T_o - T) \quad \text{gdy} \quad \hat{\mathbf{x}} \in \beta, \quad (1.7)$$

gdzie α_r jest współczynnikiem wymiany ciepła przez radiację w $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$.

Materiały budowlane posiadają strukturę kapilarno-porowatą, a więc składają się z substancji stałej oraz porów i kapilar względnie pustek między ziarnami lub włóknami. Pory te wypełnione są wilgotnym powietrzem i wodą porową. Wewnątrz przestrzeni powietrznych oprócz przewodzenia ciepła przez powietrze zachodzić może również konwekcja (w luźnych materiałach włóknistych), a między ściankami porów odbywa się wymiana ciepła przez promieniowanie. Jednak wymiana ciepła przez przewodzenie ma tu charakter dominujący i w praktyce przyjmuje się, że przewodzenie jest jedynym mechanizmem przenoszenia ciepła w materiałach budowlanych.

Kondukcyjny strumień ciepła opisany jest prawem Fouriera

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T, \quad (1.8)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodności cieplnej, $[\text{W}/(\text{m K})]$,

z którego wynika, że przepływ ciepła odbywa się w kierunku niższej temperatury.

Współczynnik przewodności cieplnej λ jest to ilość ciepła przenikająca przez przegrodę o powierzchni jednego m^2 i grubości jednego m w ciągu jednej sekundy przy różnicy temperatur po obu jej stronach równej jednemu stopniowi. Wartość współczynnika λ zależy od struktury badanego materiału, jego wilgotności oraz temperatury. W zakresie temperatur spotykanych w budownictwie wpływ temperatury na przewodność cieplną jest niewielki i dlatego w praktyce budowlanej pomija się go. Istotny i wyraźny wpływ na przewodność cieplną wywiera natomiast wilgotność materiału. Wzrost przewodności wraz z wilgotnością materiału tłumaczy się unoszeniem ciepła przez migrującą wilgoć oraz wypełnianiem się porów wodą zważywszy, że λ powietrza wynosi 0,025, a wody 0,50 $\text{W}/(\text{m K})$.

Współczynnik przewodzenia ciepła materiałów budowlanych można oznaczać różnymi metodami, które dzielą się na dwie zasadnicze grupy:

- metody ustalonego strumienia ciepła (metody stacjonarne),
- metody nie ustalonego strumienia cieplnego (niestacjonarne).

W metodach niestacjonarnych wykonuje się pomiary temperatury i czasu przy zmiennym strumieniu cieplnym. Zaletą tych metod jest więc krótki czas prowadzenia pomiarów, w związku z czym są one odpowiednie do badania wpływu wilgoci na przewodność cieplną. Jednakże mankamentem niektórych metod tej grupy jest konieczność wykonywania dodatkowych pomiarów ciepła właściwego i gęstości badanego materiału

W metodach ustalonego strumienia cieplnego strumień ciepła przechodzący przez próbkę materiału powinien być stały, a temperatura powierzchni ustalona. Współczynnik przewodzenia ciepła badanego materiału określa się mierząc gęstość strumienia cieplnego i różnicę temperatur po obu stronach próbki. Metody te charakteryzują się długim czasem potrzebnym do przeprowadzenia pomiaru, który wynosi od kilku do kilkudziesięciu godzin. Metody stacjonarne są dokładne tylko przy badaniu materiałów suchych. W przypadku materiałów wilgotnych można popełnić duże błędy, ponieważ długotrwały pomiar powoduje przemieszczanie się wilgoci, wskutek czego zwiększa się przepływ ciepła. Można temu zapobiec wykonując pomiar przy małej różnicy temperatur.

Do oznaczania przewodności cieplnej metodą stacjonarną stosuje się najczęściej aparaty płytowe, przystosowane do badania materiałów w postaci płyty. Rozwiązania konstrukcyjne są różne, lecz wszystkie są oparte na podobnej zasadzie: do jednej powierzchni badanej próbki dostarczany jest ściśle określony i stały strumień ciepła, a druga powierzchnia jest chłodzona w celu odebrania tego ciepła. Na takiej zasadzie działa między innymi aparat Poensgena czy też aparat Bocka.

1.2. Przebieg badania

1.2.1. Wprowadzenie

W przypadku przepływu jednowymiarowego ciepła, który to przypadek odpowiada warunkom pomiarów prawo Fouriera (1.8) i równanie bilansu energii (1.1) przyjmą postać

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1.9)$$

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(q), \quad \Rightarrow \quad \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1.10)$$

przy czym w równaniu (1.10) przyjęto, że współczynnik przewodności cieplnej jest wielkością stałą ($\lambda = \text{const.}$). Natomiast w przypadku ustalonego równania (1.9) i (1.10) redukują się do postaci

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{H}, \quad (1.11)$$

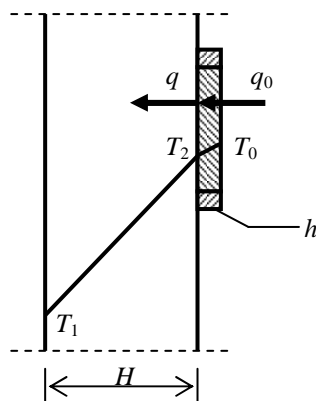
$$\frac{\partial}{\partial x}(q) = 0, \Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (1.12)$$

gdzie: q – gęstość strumienia ciepła przepływającego przez próbkę, [W/m^2],
 T_1, T_2 – temperatury obydwu powierzchni próbki, [K],
 H – grubość próbki, [m].

Z równania (1.12) wynika, że rozkład temperatury w przegrodzie jest liniowy.

1.2.2. Metoda ścianki pomocniczej

Metoda ta stosowana jest do badań przewodności cieplnej materiałów lub oporu cieplnego przegród wielowarstwowych zarówno na próbkach laboratoryjnych, jak i w wykonanych już przegrodach.



Rys. 1.1. Schemat pomiaru współczynnika przewodności cieplnej metodą ścianki pomocniczej.

Pomiar opiera się na założeniu, że gęstość strumienia cieplnego q w warunkach ustalonych, przepływającego przez badaną próbkę lub przegrodę, jest równa gęstości strumienia cieplnego q_0 przepływającego przez ściankę pomocniczą, której współczynnik przewodności cieplnej λ_0 jest znany. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.1.

W przypadku przepływu ustalonego gęstości strumieni ciepła w badanej płycie i w ściance pomocniczej są odpowiednio dane zależnościami

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{H}, \quad q_0 = -\lambda_0 \frac{T_0 - T_2}{h}, \quad (1.13)$$

co wobec ich równości prowadzi do relacji

$$-\lambda \frac{T_2 - T_1}{H} = -\lambda_0 \frac{T_0 - T_2}{h} \Rightarrow \lambda = \lambda_0 \frac{T_0 - T_2}{T_2 - T_1} \frac{H}{h}. \quad (1.14)$$

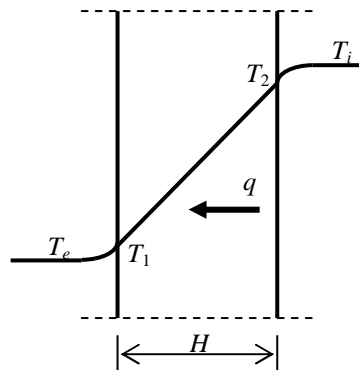
Ścianka pomocnicza składa się z płytki pomocniczej i płytki ochronnej (izolacji), mającej na celu zabezpieczenie przed odpływem ciepła na boki czyli zagwarantowanie jednowymiarowej wymiany ciepła. Pole powierzchni badanej płyty powinno być odpowiednio duże w stosunku do grubości badanej warstwy, tak aby przepływ ciepła był prostopadły do powierzchni (stosunek długości boku próbki do jej grubości przyjmuje się 5:1). Powierzchnia płytki pomiarowej powinna być odpowiednio mniejsza od powierzchni płyty badanej. Pomiar różnicy temperatur powierzchni badanej ścianki wykonuje się najczęściej termoelementami. Pomiar temperatur powierzchni można też wykonać przy wykorzystaniu laserowego miernika służącego do tego celu.

Założenie równości gęstości strumieni cieplnych q i q_0 jest słuszne jedynie wtedy, gdy opór cieplny warstwy dodatkowej jest mały w porównaniu z oporem warstwy badanej. Z tych względów nie zaleca się stosować tej metody dla elementów o małej oporności cieplnej.

1.2.3. Metoda ustalonego strumienia cieplnego

Przewodność cieplną można także badać przy wykorzystaniu dwudzielnej komory klimatycznej, której objętość podzielona jest na dwie części w których zaprogramować można różne parametry klimatyczne, w tym temperaturę powietrza otoczenia. Próbkę badanego materiału umieszcza się w ściance pomiędzy dwoma przestrzeniami komory. Przepływ ciepła warunkowany jest różnicą temperatur po obu stronach próbki. Po zamocowaniu próbki należy odczekać pewien czas (kilka godzin) tak aby w

próbce ustalił się rozkład temperatury (rys. 1.2). Do próbki przymocowane są specjalne sondy gęstości strumienia ciepła i temperatury za pomocą których ustalić można temperatury obu powierzchni próbki i gęstość przepływającego strumienia ciepła. Wykorzystując wspomniane czujniki rejestruje się wartości temperatur powierzchni i strumienia ciepła przez około pół godziny w odstępach 5-cio minutowych.



Rys. 1.2. Rozkład temperatury w próbce materiału.

Przy pomiarze współczynnika przewodności cieplnej tą metodą musimy zadbać o to aby eksperyment dotyczył problemu:

- stacjonarnego i bezźródłowego,
- przepływ był jednowymiarowy,
- materiał był możliwie jednorodny i suchy.

1.3. Opracowanie wyników i oszacowanie błędu pomiaru

Współczynnik przewodności cieplnej oblicza się z przekształconego wzoru (1.11)

$$\lambda = \frac{qH}{T_2 - T_1}, \quad (1.15)$$

gdzie: q – gęstość strumienia ciepła przepływającego przez próbkę, [W/m^2],

T_1, T_2 – temperatury obydwu powierzchni próbki, [K],

H – grubość próbki, [m].

Natomiast błąd pomiaru można oszacować przy wykorzystaniu zależności

$$\delta\lambda = \left(\frac{H}{\Delta T} \delta q + \frac{q}{\Delta T} \delta H + \frac{qH}{(\Delta T)^2} \delta\Delta T \right), \quad \Delta T = T_2 - T_1, \quad (1.16)$$

gdzie: δq - błąd pomiaru strumienia ciepła,

δH - błąd przy wyznaczaniu grubości próbki,

$\delta\Delta T$ - błąd przy określaniu przyrostu temperatury równy podwojonemu błędowi urządzenia do pomiaru temperatury.

Opór cieplny warstwy materiału można obliczyć ze wzoru

$$R = \frac{H}{\lambda} = \frac{T_2 - T_1}{q}. \quad (1.17)$$

1.4. Zakres opracowania

Opracowanie powinno zawierać:

- opis eksperymentu wraz z podaniem warunków pomiaru (temperatury i wilgotności powietrza otoczenia) oraz rodzaju badanego materiału (wymiarów próbki, gęstości),
- omówienie wzoru opisującego współczynnik przewodnictwa cieplnego λ ,
- tabelę pomiarów zawierającą (t, T_1, T_2, q),
- wykres zależności temperatur powierzchni $T_1(t)$ i $T_2(t)$ oraz strumienia ciepła $q(t)$ od czasu,
- obliczenia współczynnika przewodnictwa cieplnego λ w poszczególnych chwilach czasowych i oszacowanie błędu pomiaru,
- omówienie wyników i obliczenie uśrednionej wartości λ .