



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt „Plan rozwoju Politechniki Częstochowskiej”

współfinansowany ze środków UNII EUROPEJSKIEJ w ramach EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU SPOŁECZNEGO
Numer Projektu: POKL.04.01.01-00-59/08

KATEDRA FIZYKI

WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI

I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA



LABORATORIUM Z FIZYKI TECHNICZNEJ

ĆWICZENIE NR 8

WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA I PRZENIKALNOŚCI CIEPLNEJ WYBRANYCH MATERIAŁÓW



Politechnika Częstochowska, Centrum Promocji i Zastosowań Nauk Ścisłych

ul. Dąbrowskiego 73 pok. 178, 42-200 Częstochowa

tel./ fax. +343250324, e-mail: imi@imi.pcz.pl, <http://www.cns.pcz.pl>

I. Zagadnienia do opracowania

1. Mechanizmy przekazywania ciepła
2. Prawo Fouriera
3. Współczynnik przenikalności cieplnej oraz współczynnik przewodzenia ciepła dla różnych materiałów
4. Przenikanie ciepła przez ścianę płaską
5. Gradient temperatury, gęstość strumienia ciepła
6. Czynniki wpływające na wartość współczynnika przewodzenia ciepła

II. Wprowadzenie teoretyczne

Mechanizmy przekazywania ciepła. Wyróżnia się trzy podstawowe sposoby przekazywania ciepła: *przewodzenie*, *konwekcję* i *promieniowanie*.

przewodzenie - przekazywanie energii od jednej cząstki do drugiej, za pośrednictwem ruchu drgającego tych cząstek. Proces ten trwa dopóty, dopóki temperatura ciała nie zostanie wyrównana w całej rozpatrywanej objętości. Dotyczy to bezpośredniego kontaktu ciała z ciałem, części ciała z ciałem.

konwekcja (wnikanie) - wiąże się z ruchem konwekcyjnym gazów lub cieczy, wywołanym bądź różnicą gęstości (różnicą temperatur), bądź przez wymuszenie czynnikami zewnętrznymi.

promieniowanie - przekazywanie ciepła w postaci energii promieniowania, którego natura jest taka sama jak energii świetlnej. Energia cieplna przekształca się w energię promieniowania, przebywa określoną przestrzeń z prędkością światła, aby w innym miejscu przekształcić się całkowicie lub częściowo w energię cieplną.

Podstawowym prawem opisującym przewodzenie ciepła jest **prawo Fouriera**:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T = -\lambda \nabla T$$

(2.1)

$q \left[\frac{W}{m^2} \right]$ - gęstość strumienia ciepła,

$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ - współczynnik przewodzenia ciepła (zwany też przewodnością cieplną),

$\operatorname{grad} T \equiv \nabla T = \left[\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right] \left[\frac{W}{K} \right]$ - gradient temperatury.

Gęstość strumienia ciepła q to wielkość wektorowa, opisująca szybkość i kierunek przepływu ciepła. Jej wartość określa ilość ciepła przepływającego w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia się ciepła.

Każdemu punktowi w przestrzeni możemy przyporządkować określoną temperaturę. Mówimy, że w przestrzeni określone jest skalarne pole temperatury $T = T(x, y, z, t)$. **Gradient temperatury** jest wektorem wskazującym kierunek najszybszego wzrastania temperatury. Jeśli jakiś element ośrodka charakteryzuje się dużymi gradientami temperatury oznacza to, że w tym obszarze występują znaczne różnice temperatur. W **stanie ustalonym** wielkości charakteryzujące układ nie zmieniają się w czasie, a więc np. $T = T(x, y, z)$. W stacjonarnym przypadku jednowymiarowym $T = T(x)$, zaś $\operatorname{grad} T = \frac{dT}{dx}$.

Współczynnik przewodzenia ciepła λ charakteryzuje łatwość przewodzenia ciepła przez dany materiał. Dobrymi przewodnikami ciepła nazywamy materiały, dla których wartość współczynnika przewodzenia ciepła duża, natomiast materiały będące izolatorami cieplnymi charakteryzują się małymi wartościami λ . Typowe wartości oraz zakresy wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla różnych materiałów podane są na rysunku 2 oraz w tabeli 1.

Rys. 2 Zakresy wartości współczynników przewodzenia ciepła.

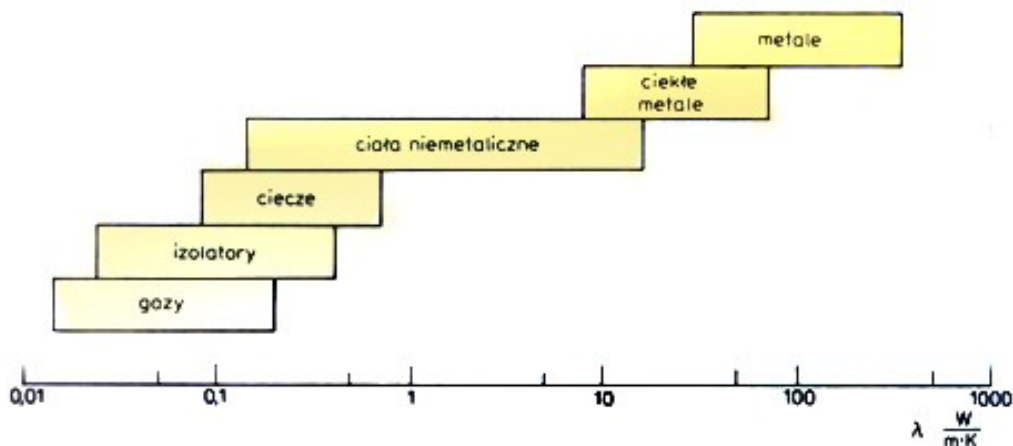


Tabela 1. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła wybranych materiałów:

drewno (świerk, sklejka) $\lambda = 0.14 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$

sztuczne tworzywo spienione,
o gęstości 15-30 kg/m^3 $\lambda = 0.035 - 0.041 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$

szkło $\lambda = 0.7 - 1.1 \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$

Stacjonarne przewodzenie przez ściankę płaską przy $\lambda = const$

Rozważmy stacjonarne przewodzenie ciepła przez jednorodną płaską ścianę o grubości d i powierzchni A . Temperatury na zewnętrznych powierzchniach ścianki są stałe i wynoszą odpowiednio T_{sw} i T_{sz} (rys. 3). W takim wypadku przewodzenie ciepła odbywa się wyłącznie w jednym kierunku (w poprzek ścianki) jest to więc przypadek jednowymiarowy, dla którego prawo Fouriera (2.1) ma następującą postać

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

(2.2)

Rozwiązujemy równanie (2.2) bezpośrednio całkując stronami:

$$q dx = -\lambda dT$$

$$\int_0^d q dx = - \int_{T_{sw}}^{T_{sz}} \lambda dT$$

$$q d = -\lambda (T_{sw} - T_{sz})$$

$$q = \frac{\lambda}{d} (T_{sw} - T_{sz}) = const \tag{2.3}$$

Strumień ciepła przepływającego przez całą ściankę wynosi zatem

$$P = Aq = \frac{A\lambda}{d}(T_{sw} - T_{sz}) \quad (2.4)$$

Widzimy, że ilość ciepła przewodzonego przez ścianę w jednostce czasu jest proporcjonalna do

- pola powierzchni ściany A
- współczynnika przewodzenia ciepła λ
- różnicy temperatur obu powierzchni ściany $(T_{sw} - T_{sz})$

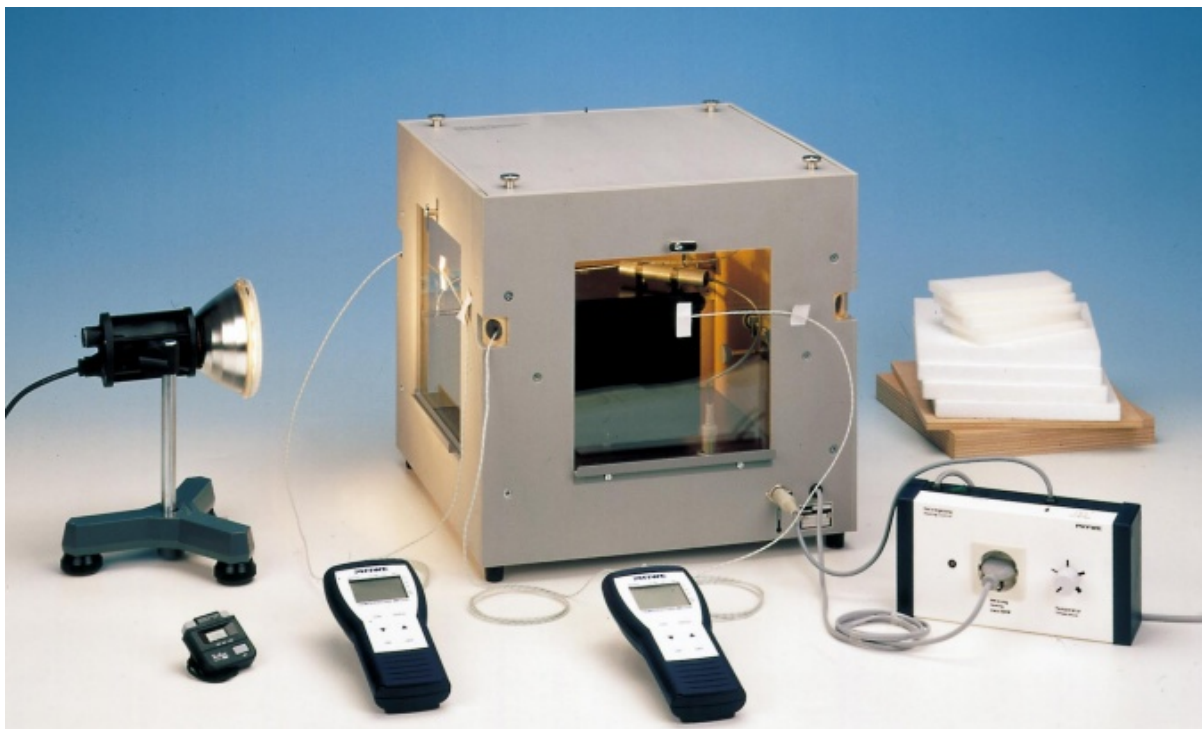
i odwrotnie proporcjonalna do grubości ściany d . Kierunek przepływu ciepła określony jest przez kierunek i zwrot wektora \vec{P} (rys. 3).

III. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest, przy znanych 4 temperaturach mierzonych wewnątrz i na zewnątrz komory oraz na obu stronach ścianki/zespołu ścianek, wyznaczenie współczynnika przenikalności cieplnej k oraz współczynnika przewodzenia ciepła λ dla pojedynczej ścianki oraz współczynnika przewodzenia ciepła badanego materiału λ_m w przypadku zespołu materiałów.

IV. Układ pomiarowy

Rys. 1 Zestaw eksperymentalny.



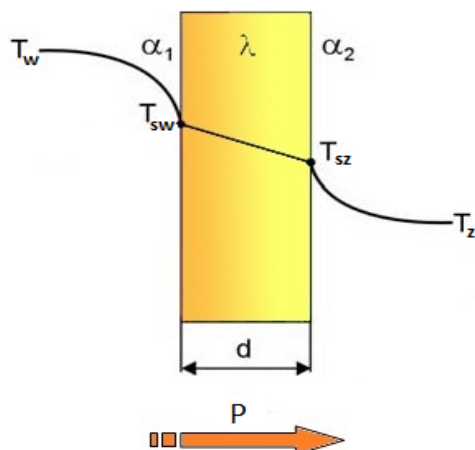
W zestawie znajdują się: komora z możliwością demontażu górnej pokrywy, montowalne ścianki: drewniana 1, 2, 3 cm, styropianowe 2 cm, szyba 5 mm, szyba zespolona. Oraz ponadto: 4 termopary na dwóch miernikach, termostat, lampa halogenowa.

Do przeprowadzenia ćwiczenia potrzebne będą: komora, ścianki: drewno 1, 2 cm, styropian 2 cm, szkło 5 mm; dwa mierniki do 4 termopar, termostat.

V. Zasada pomiaru

Wyznaczenie współczynnika przenikalności cieplnej k .

Rys. 2 Przepływ ciepła przez pojedynczą ściankę.



Natężenie przepływu ciepła (ilość ciepła wymieniona w jednostce czasu) powietrze-ściana wewnątrz komory wynosi:

$$P = \alpha_1 A (T_w - T_{sw})$$

(5.1)

Natężenie przepływu ciepła (ilość ciepła wymieniona w jednostce czasu) ściana-powietrze na zewnątrz komory wynosi:

$$P = \alpha_2 A (T_{sz} - T_z)$$

(5.2)

Natężenie przepływu ciepła (ilość ciepła wymieniona w jednostce czasu) w ścianie wynosi:

$$P = \frac{\lambda}{d} A (T_{sw} - T_{sz})$$

(5.3)

A – powierzchnia [m^2]

α – współczynnik konwekcyjnej wymiany cieplnej [$\frac{W}{Km^2}$]

α_1 – czynnika wewnętrznego

α_2 – czynnika zewnętrznego

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$\frac{W}{Km}$]

d – grubość próbki [m]

T_w – temperatura wewnątrz komory [K]

T_{sw} – temperatura ścianki wewnętrznej [K]

T_{sz} – temperatura ścianki zewnętrznej [K]

T_z – temperatura na zewnątrz komory [K]

P – natężenie przepływu ciepła [W]

Dla przypadku naturalnego ruchu powietrza w niezamkniętym pokoju, współczynnik

$\alpha_2 = 8.1 \left[\frac{W}{K m^2} \right]$, więc strumień energii cieplnej q wynosi:

$$q = \frac{P}{A} = \alpha_2 (T_{sz} - T_z)$$

(5.4)

Korzystając ze współczynnika materiałowej przenikalności cieplnej Λ ,

Λ – współczynnik materiałowej przenikalności cieplnej $\left[\frac{W}{K m^2} \right]$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d} = \alpha_2 \frac{(T_{sz} - T_z)}{(T_{sw} - T_{sz})} \quad (5.5)$$

przedstawimy zależność odwrotności współczynnika przenikalności cieplnej $1/k$ jako kombinację:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda} \quad (5.6)$$

Pamiętając, że

$$P = \alpha_1 A (T_w - T_{sw})$$

wyznamy α_1 :

$$\alpha_1 = \frac{P}{A} \frac{1}{(T_w - T_{sw})}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 \frac{(T_{sz} - T_z)}{(T_w - T_{sw})} \quad (5.7)$$

Korzystając z równania (5.5) i (5.7) wyrazimy (5.6) w następującej postaci:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_2 \frac{(T_{sz} - T_z)}{(T_w - T_{sw})}} + \frac{1}{\alpha_2} + \alpha_2 \frac{(T_{sz} - T_z)}{(T_{sw} - T_{sz})}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_2} \left[\frac{(T_w - T_{sw})}{(T_{sz} - T_z)} + 1 + \frac{(T_{sz} - T_z)}{(T_{sw} - T_{sz})} \right]$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_2} \left[\frac{T_w - T_{sw} + T_{sz} - T_z + T_{sw} - T_{sz}}{T_{sz} - T_z} \right]$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_2} \left[\frac{T_w - T_z}{T_{sz} - T_z} \right]$$

zatem ostatecznie, współczynnik przenikalności cieplnej k wyraża się wzorem:

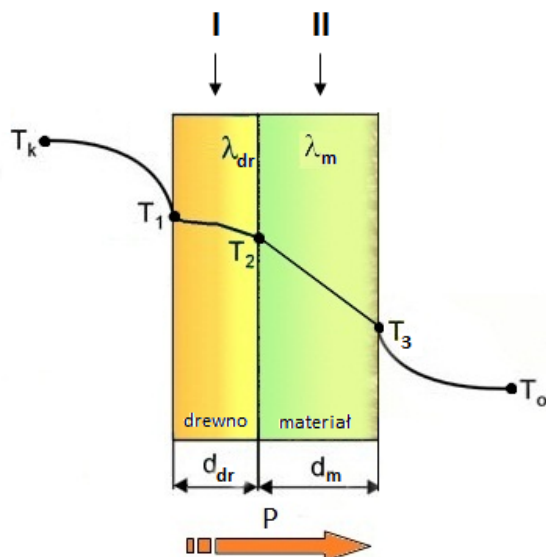
$$k = \alpha_2 \left[\frac{T_{sz} - T_z}{T_w - T_z} \right] \quad (5.8)$$

Aby wyznaczyć współczynnik przewodzenia ciepła λ , należy przekształcić wzór (5.5) do postaci:

$$\lambda = \alpha_2 d \left[\frac{T_{sz} - T_z}{T_{sw} - T_{sz}} \right] \quad (5.9)$$

Wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła λ .

Rys. 4 Przepływ ciepła przez dwie ścianki (zespół materiałów).



Natężenie przepływu ciepła (ilość ciepła wymieniona w jednostce czasu) w ścianie wynosi:

$$P = \frac{\lambda}{d} A (T_{sw} - T_{sz})$$

Dla ścianki I natężenie to będzie wynosiło:

$$P = \frac{\lambda_{dr}}{d_{dr}} A (T_1 - T_2)$$

Dla ścianki drugiej natomiast:

$$P = \frac{\lambda_m}{d_m} A (T_2 - T_3)$$

Porównując natężenia przepływu ciepła, przy znanej wartości $\lambda_{dr}, d_m, d_{dr}$ możemy wyznaczyć współczynnik przewodzenia ciepła λ_m badanego materiału II:

$$\frac{\lambda_{dr}}{d_{dr}} A(T_1 - T_2) = \frac{\lambda_m}{d_m} A(T_2 - T_3)$$

$$\lambda_m = \lambda_{dr} \frac{d_m (T_1 - T_2)}{d_{dr} (T_2 - T_3)} \quad (5.10)$$

Wartości eksperymentalne współczynnika λ_{dr} należy znaleźć w tab. 1.

VI. Przebieg ćwiczenia

Wyznaczenie współczynnika przenikalności cieplnej k :

1. Zdjąć pokrywę komory i zamontować ścianki.
2. Przykleić 4 termopary odpowiednio na każdą stronę 2 ścianek (rys. 3).
(pierwsza ścianka – jedna termopara po wewnętrznej stronie wprowadzona otworem znajdującym się na krawędzi komory i przyklejona na wysokości otworu, druga termopara po zewnętrznej stronie ścianki; druga ścianka – analogicznie).
Sprawdzić, czy obie termopary są przyklejone do tej samej ścianki. 10-cio centymetrowy koniec termopary kleić szeroką taśmą klejącą, w taki sposób aby termopara leżała w płaszczyźnie ścianki bez naprężenia, a jej koniec (część bez izolacji) musi przylegać do ścianki i nie odstawać. W przypadku styropianu można zastosować pinezkę, która przycisnie wyginającą się termoparę.
3. Zamknąć komorę.
4. Włączyć mierniki (zielonym przyciskiem, a następnie zielonym znakiem tick) i termostat przyciskiem z tyłu urządzenia.
5. Rozpocząć pomiar i notować temperatury T_{sw} i T_{sz} .
Miernik w trybie nagrywania REC wyświetla w trybie ciągłym, natomiast w trybie zwykłym wyłącza się po 10 min. Wznowienie wyświetlania poprzez ponowne włączenie miernika.
Należy pamiętać, że $T_{sw} > T_{sz}$ i należy je odpowiednio zanotować.
Odczytu wskazań mierników należy dokonywać co 5 min do momentu uzyskania temperatury ustalonej wewnątrz komory (ok. 1h). Temperatura ustalona jest osiągnięta wtedy, kiedy wskazania mierników pokazują stałą lub lekko oscylującą temperaturę (max. o kilka dziesiątych stopnia Celsjusza).
6. Zmierzyć temperaturę panującą w środku T_w i na zewnątrz komory T_z .
Odkleić termoparę z zewnętrznej strony ścianki z okna 1 i zmierzyć nią temperaturę otoczenia T_z oraz temperaturę wewnątrz komory T_w wkładając ją w otwór na krawędzi komory. Poczekać chwilę do ustalenia się stałej temperatury.

Wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła λ :

1. Zdjąć pokrywę komory i zamontować zespół ścianek składającą się z dwóch ścianek: wzorcowej drewnianej 2cm oraz styropianu 2cm/szyby 5mm.
Ścianą wzorcową będzie ściana drewniana o znanym współczynniku przewodzenia ciepła λ i grubości d (patrz tabela 1), natomiast dla pozostałych ścian będziemy szukali współczynnika przewodzenia ciepła λ_m .
2. Przykleić 3 termopary (rys. 4).
3. Notować temperatury T_1 , T_2 i T_3 .

Notować wskazania miernika. Należy upewnić się, czy $T_1 > T_2 > T_3$.

VII. Tabele pomiarowe

Tabela pomiarowa 1 (wyznaczenie współczynnika przenikalności cieplnej k)

L.p.	czas [min]	Ścianka - drewno $d= 0.01 [m]$		temperatury stałe	
		T_{sw} strona ścianki wewnętrzna	T_{sz} strona ścianki zewewnętrzna	T_w wnętrze komory	T_z na zewnątrz komory
1.	5				
2.	10				
3.	15				
4.	20				
5.	25				
6.	30				
7.	35				
8.	40				
9.	45				
10.	50				
11.	55				
12.	60				

L.p.	czas [min]	Ścianka - drewno $d= 0.02 [m]$		temperatury stałe	
		T_{sw} strona ścianki wewnętrzna	T_{sz} strona ścianki zewewnętrzna	T_w wnętrze komory	T_z na zewnątrz komory
1.	5				
2.	10				
3.	15				
4.	20				
5.	25				
6.	30				
7.	35				
8.	40				
9.	45				
10.	50				
11.	55				
12.	60				

Tabela pomiarowa 2 (wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła λ)

L.p.	czas [min]	Ścianka - <i>styropian</i> $d= 0.02 [m]$		temperatury stałe	
		T_{sw} strona ścianki wewnętrzna	T_{sz} strona ścianki zewewnętrzna	T_w wnętrze komory	T_z na zewnątrz komory
1.	5				
2.	10				
3.	15				
4.	20				
5.	25				
6.	30				
7.	35				
8.	40				
9.	45				
10.	50				
11.	55				
12.	60				

L.p.	czas [min]	Ścianka - <i>szkło</i> $d= 0.005 [m]$		temperatury stałe	
		T_{sw} strona ścianki wewnętrzna	T_{sz} strona ścianki zewewnętrzna	T_w wnętrze komory	T_z na zewnątrz komory
1.	5				
2.	10				
3.	15				
4.	20				
5.	25				
6.	30				
7.	35				
8.	40				
9.	45				
10.	50				
11.	55				
12.	60				

VII. Opracowanie wyników

Wyznaczyć współczynnik przenikalności cieplnej k oraz współczynnik przewodzenia ciepła λ dla pojedynczej ścianki (drewno 0.01m i 0.02m) oraz współczynnik przewodzenia ciepła badanego materiału λ_m (styropian 0.02m i szkło 0.005m) w przypadku zespołu materiałów.

Należy skorzystać ze wzorów zawartych w rozdziale V. Po wyznaczeniu w/w współczynników zestawić je w tabeli 2 w zaznaczonych polach. Należy pamiętać, aby wykonywać obliczenia w stanie ustalonym!

Wy tłumaczyć, na czym polega przenikanie ciepła, a na czym przewodzenie ciepła.

Dla jakich materiałów współczynnik przewodzenia ciepła λ oraz współczynnik przenikalności cieplnej k oraz jest największy, a dla jakich najmniejszy i dlaczego.

Tabela 1. Zestawienie współczynników k oraz λ .

materiał	grubość d [m]	k $\left[\frac{W}{K m^2}\right]$	λ $\left[\frac{W}{K m}\right]$
drewno	0.01		
drewno	0.02		
styropian	0.02		
szkło	0.005		

VIII. Rachunek błędów

Porównać wyniki eksperymentalne z wynikami tablicowymi zawartymi w tabeli 1.

Podać przyczynę rozbieżności tych wyników.

IX. Literatura

1. Materiały firmy PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, „Laboratory Experiments” 2005
2. R. Respondowski, Laboratorium z Fizyki, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1994