

PIOTR DUDA, ROMAN DUDA¹MODELOWANIE ROZKŁADU TEMPERATURY
NA STANOWISKU DO POMIARU
WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁAMODELLING OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE
POSITION TO MEASURE THE THERMAL CONDUCTIVITY

Streszczenie

Celem artykułu jest opisanie modelowania CFD rozkładu temperatury na stanowisku do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła. W pierwszej części pracy przedstawiona jest metoda pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła. Następnie opisane jest stanowisko laboratoryjne i pokazane są zmierzone temperatury na podstawie których wyznaczany jest współczynnik przewodzenia ciepła. W trzeciej części pracy przeprowadzone jest modelowanie CFD prezentowanego stanowiska z wykorzystaniem programu ANSYS FLUENT. W końcowej części pracy porównane są zmierzone i obliczone rozkłady temperatur. Wyciągnięte są wnioski odnośnie budowy stanowiska i sposobu prowadzenia pomiarów na stanowisku.

Słowa kluczowe: przewodzenie ciepła, modelowanie CFD

Abstract

The aim of this article is CFD modeling of temperature distribution in the laboratory device for the measurement of thermal conductivity. In the first part of work the description of thermal conductivity measurement method is presented. Next part describes laboratory device and shows measured temperatures and calculated thermal conductivity. In the third part of this work 3-D CFD modeling of the presented device is shown. ANSYS FLUENT software is used for this modeling. In the end of this paper the measured and calculated distributions of temperature are compared. Conclusions are shown regarding the construction of this device and method of measurement.

Keywords: heat conduction, CFD modelling

¹ Dr hab. inż. Piotr Duda, prof. PK, inż. Roman Duda.

1. Pomiary współczynnika przewodzenia ciepła w ciałach stałych

Przewodzenie ciepła jest to przekazywanie energii wewnętrznej między bezpośrednio stykającymi się częściami jednego ciała lub różnych ciał [1]. W płynach przekazywana jest energia kinetyczna atomów i cząsteczek, a w ciałach stałych energia drgań atomów w sieci krystalicznej i ruchu swobodnych elektronów. Przewodzenie ciepła przebiega na ogół zgodnie z prawem Fouriera mówiącym, że gęstość przewodzonego strumienia ciepła jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (1)$$

gdzie \dot{q} – jest wektorem gęstości strumienia ciepła; $W/(m \cdot K)$, ∇ – wektorem zwanym nabra lub operatorem Hamiltona, T – temperaturą [K], λ – współczynnikiem przewodzenia ciepła; $W/(m \cdot K)$. Prawo Fouriera obowiązuje we wszystkich stanach skupienia, a w płynach również wtedy, gdy przewodzący płyn porusza się. Stosuje się ono zarówno dla ustalonego, jak i nieustalonego przewodzenia ciepła. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła zmienia się w szerokich granicach: od 0,005 $W/(m \cdot K)$ dla gazów do ok. 500 $W/(m \cdot K)$ dla srebra będącego najlepszym przewodnikiem ciepła.

Współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczany jest bezpośrednio z definicji metodami opartymi na teorii ustalonego przewodzenia ciepła [2÷3]. W metodach tych płaska, walcowa lub kulista warstwa znajduje się pomiędzy źródłem ciepła o wyższej temperaturze a odbiornikiem ciepła o niższej temperaturze. Zaletą metod pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła w warunkach ustalonych jest prosty algorytm obliczeniowy. Do wad tych metod należy zaliczyć złożony układ kontrolno-regulacyjny stanowiska badawczego, długi czas uzyskania stanu ustalonej wymiany ciepła w próbce, konieczność zapewnienia idealnego styku powierzchni próbki z powierzchniami chłodnicy i grzejnika oraz konieczność zapewnienia dobrej izolacji cieplnej na pozostałych powierzchniach próbki. Pomiary współczynnika przewodzenia ciepła można także przeprowadzać w warunkach nieustalonego przewodzenia ciepła. Pozwala to na szybkie wykonywanie pomiarów. Wzory obliczeniowe dla tej grupy metod są bardziej skomplikowane. Szeroko rozpowszechniły się metody impulsowe badania współczynnika przewodzenia ciepła.

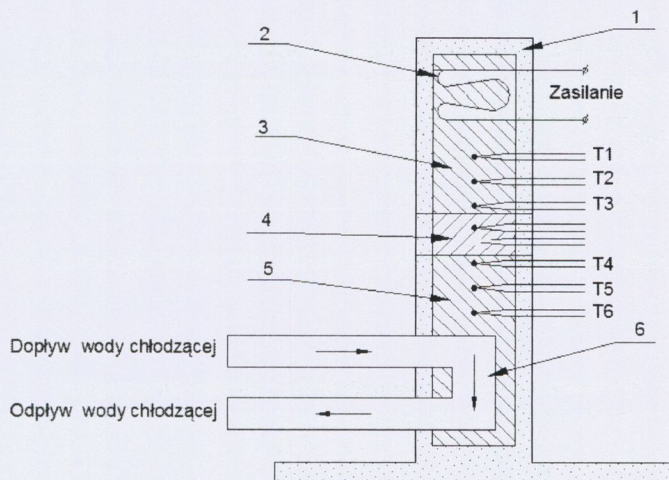
Zamodelowane zostanie stanowisko laboratoryjne na którym współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczany jest bezpośrednio z równania (1).

Po osiągnięciu ustalonego przewodzenia ciepła współczynnik przewodzenia ciepła może być wyznaczony z równania

$$\lambda_{a-b} = \frac{4 \cdot U \cdot I}{\pi \cdot D^2 \cdot \left(\frac{\Delta T_{a-b}}{\Delta x_{a-b}} \right)} \quad (2)$$

gdzie U – średnia wartość spadku napięcia na grzałce; V , I – średnia wartość natężenia prądu grzejnego; A , D – średnica próbki oraz rdzenia stanowiska, ΔT_{a-b} – różnica temperatur pomiędzy wybranymi termoparami a i b ; K , Δx_{a-b} – odległość pomiędzy wybranymi termoparami a i b ; m .

Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Aparat do badań współczynnika przewodzenia ciepła;
1 – izolacja, 2 – grzałka elektryczna, 3 – sekcja grzejna, 4 – próbka materiału badanego,
5 – sekcja chłodząca, 6 – wężownica, T1, T2, T3, T4, T5, T6 – termopary

Fig. 1. Apparatus for measurement of thermal conductivity,
1 – insulation, 2 – electric heater, 3 – heating section, 4 – sample test material,
5 – cooling section, 6 – coil, T1, T2, T3, T4, T5, T6 – thermocouple

Aparat do badań współczynnika przewodzenia ciepła składa z dwóch sekcji, sekcji gorącej i zimniej. W części gorącej zamontowana jest grzałka elektryczna o mocy 65 W (praca przy max. napięciu 240 V). Pracą grzałki steruje jednostka sterująca. Sekcja gorąca znajduje się w górnej części aparatu. Ma ona kształt walca o średnicy 25 mm i wykonana jest z mosiądzu o współczynniku przewodzenia 121 W/(m·K). Całość jest izolowana cieplnie. Termopary mają oznaczenia T1, T2, T3 i umieszczone są równomiernie co 15 mm. Sekcja chłodząca ma też kształt walca o średnicy 25 mm i jest wykonana z mosiądzu. Umiejscowiona jest w dolnej części aparatu i jest izolowana cieplnie. Na powierzchni sekcji zamontowane są 3 termopary o oznaczeniach T4, T5, T6. Termopary rozłożone są równomiernie co 15 mm. Poniżej termopar umiejscowiony jest kanał, który jest wydrążony w walcu mosiężnym. W kanale przepływa woda, która odbiera ciepło. Strumień masowy wody wynosi około 1,5 l/min.

W aparacie między sekcją grzejną a chłodzącą montuje się próbki pomiarowe. Próbki mają kształt walca o średnicy 25 mm i wysokości 30 mm. Próbki wykonane są z mosiądzu, stali i aluminium o współczynnikach przewodzenia odpowiednio 121, 25, 180 W/(m·K). Próbki oraz sekcje smaruje się pastą termoprzewodzącą, aby zapewnić jak najlepszy kontakt. Na stanowisku laboratoryjnym zostały zmierzone temperatury w poszczególnych sekcjach. Pomiar był przeprowadzony w stanie ustalonym, powierzchnie styku były dociśnięte i posmarowane pastą termoprzewodzącą. W aparacie nie była zamontowana próbka pomiarowa. Zmierzone wartości przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zmierzone wartości na stanowisku bez zamontowanej próbki

| T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | <i>U</i> | <i>I</i> |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| [K] | [K] | [K] | [K] | [K] | [K] | [V] | [A] |
| 363,75 | 352,75 | 342,05 | 329,45 | 318,15 | 308,85 | 199 | 0,220 |

Uzyskane spadki temperatur oraz współczynniki przewodzenia ciepła pokazano w tabeli 2.

Tabela 2

Wyznaczone wartości na podstawie wielkości zmierzonych

| \dot{Q} | ΔT_{1-3} | ΔT_{4-6} | Δx_{1-3} | Δx_{4-6} | $\frac{\Delta T_{1-3}}{\Delta x_{1-3}}$ | $\frac{\Delta T_{4-6}}{\Delta x_{4-6}}$ |
|--|------------------|--|------------------|------------------|---|---|
| [W] | [K] | [K] | [m] | [m] | [K/m] | [K/m] |
| 43,78 | 21,7 | 20,6 | 0,03 | 0,03 | 723,333 | 686,667 |
| $\frac{\dot{Q}}{\left(\frac{\Delta T_{1-3}}{\Delta x_{1-3}}\right)}$ | | $\frac{\dot{Q}}{\left(\frac{\Delta T_{4-6}}{\Delta x_{4-6}}\right)}$ | | λ_{1-3} | λ_{4-6} | δ_{1-3} |
| [mW/K] | | [mW/K] | | [W/(m·K)] | [W/(m·K)] | [%] |
| 0,060525346 | | 0,063757282 | | 123,5211 | 130,1169 | 2,083565 |
| | | | | | | 7,534629 |

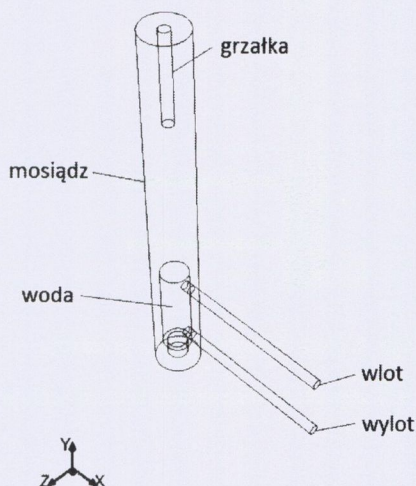
2. Modelowanie CFD

Na podstawie wymiarów geometrycznych aparatu stworzono model geometryczny urządzenia uwzględniający jego podstawowe elementy takie jak metal, obszar w którym przepływa woda oraz obszar w którym umieszczona jest grzałka. Urządzenie jest wykonane z dwóch sekcji grzejącej oraz chłodzącej, które są wykonane z mosiądzu o średnicy 25 mm oraz wysokości 100 mm każda, wygląd modelu geometrycznego przedstawiono na rys 2.

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano model oparty na bilansie energii, równaniu ciągłości i równań bilansu pędu w trzech wymiarach. Założono przepływ turbulentny a do jego analizy wykorzystano model k-ε (Viscous Standard k-ε, Scalable Wall Functions) Zdefiniowano własności materiałowe dla mosiądzu oraz wody. Zadano następujące warunki brzegowe: na wlocie prędkość przepływu 1 m/s i temperaturę 294,65 K na powierzchni grzałki wartość gęstości strumienia ciepła (Heat Flux) 43432 W/m². Zadawalające wyniki uzyskano po 233 iteracjach.

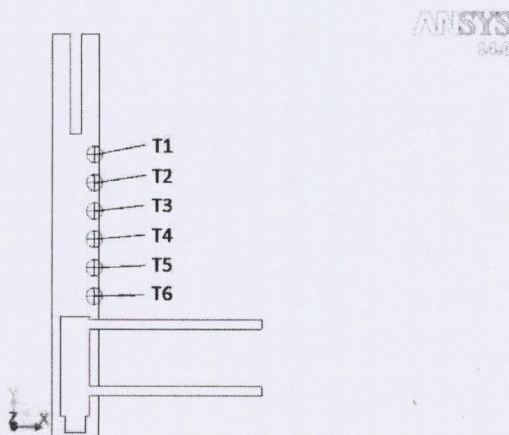
Głównym celem analizy było porównanie obliczonych wartości temperatur w punktach umieszczenia termopar ze zmierzonymi wartościami na stanowisku. Lokalizację termopar na modelu obliczeniowym pokazano na rys. 3.

Rozkład temperatury w przekroju modelu przedstawiono na rys. 4. Widać na nim niewielką zmianę temperatury w mosiądzu w kierunku promieniowym. Pomijając to można przyjąć, że rozkład temperatury w mosiądzu jest jednowymiarowy w kierunku osi aparatu.



Rys. 2. Geometria modelu

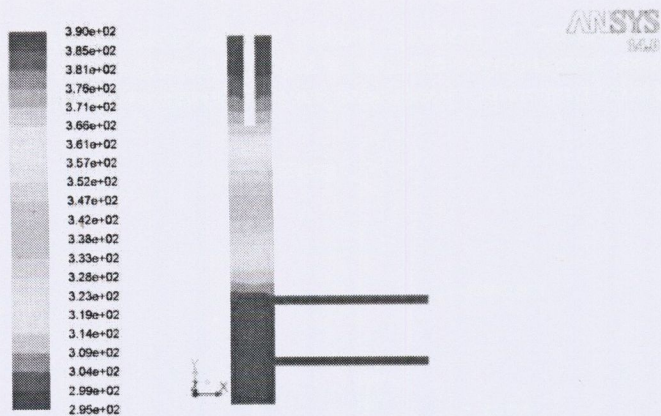
Fig. 2. Geometry of model



Rys. 3. Przekrój aparatu z usytuowaniem punktów pomiarowych

Fig. 3. Cross section of apparatus with the location of measurement points

Wartości obliczonych temperatur w punktach porównano z temperaturami uzyskanymi doświadczalnie i przedstawiono w tabeli 3.



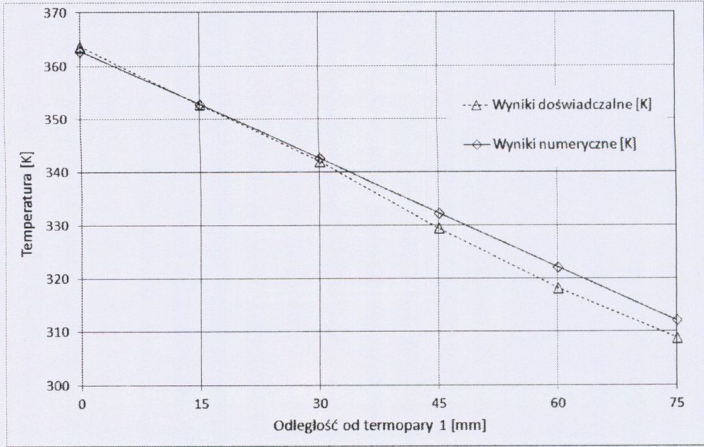
Rys. 4. Rozkład temperatur w przekroju

Fig. 4. Temperature distribution in cross section

Tabela 3

Dane z obliczeń numerycznych porównane z danymi eksperymentalnymi

| Termopary | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Wyniki doświadczalne [K] | 363,75 | 352,75 | 342,05 | 329,45 | 318,15 | 308,85 |
| Wyniki numeryczne [K] | 362,859 | 352,858 | 342,611 | 332,292 | 322,104 | 312,119 |
| $\delta_{\%}$ [%] | 0,245 | 0,031 | 0,164 | 0,862 | 1,243 | 1,058 |



Rys. 5. Wykres rozkładu temperatury

Fig. 5. The graph of the temperature distribution

Na podstawie wyników z obliczeń i doświadczenia sporządzono wykresy i pokazano je na rys. 5. Można zauważyć pojawienie się oporu kontaktowego między sekcją grzejną a sekcją chłodzoną, który pojawia się w połowie odległości pomiędzy 3 i 4 termoparą. Powoduje to powstanie różnicy temperatur od punktu 4-go do 6-go, co pokazano na rys. 5. Opór kontaktowy pojawia się pomimo posmarowania pastą termoprzewodzącą powierzchni kontaktu i wprowadzenia siły dociskającej.

Dodatkowo obliczono błąd względny procentowy

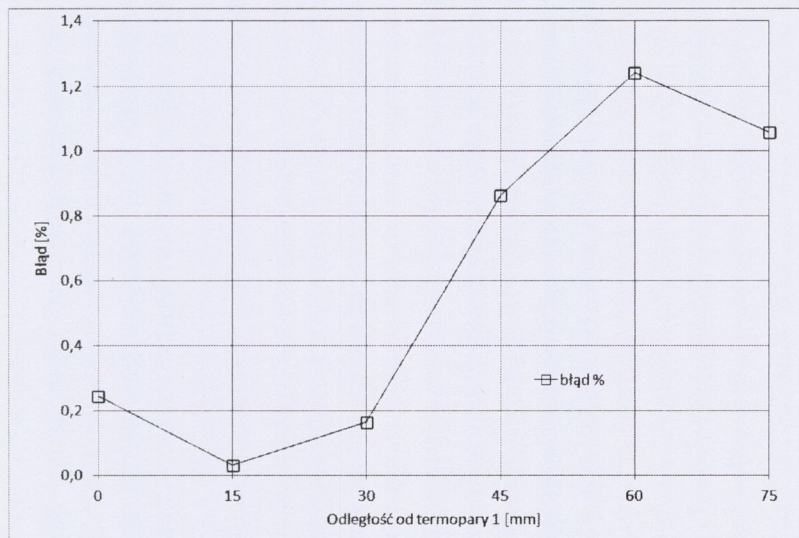
$$\delta_{\%} = \frac{|T_{npom} - T_{nnum}|}{T_{npom}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

T_{npom} – n -ta temperatura uzyskana z pomiarów; K,

T_{nnum} – n -ta temperatura uzyskana z rozwiązania numerycznego; K,

Wykres obrazujący wartość błędów w poszczególnych punktach pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Wykres wartości błędów w poszczególnych punktach [%]

Fig. 6. Error values at measurement points [%]

3. Wnioski

Zestawiając wyniki pomiarów z wynikami obliczeń (tabela 3 i rys. 5), można zauważyć, że rozkład temperatur w modelu numerycznym jest liniowy zaś w przypadku pomiarów już nie. Spowodowane jest to występowaniem na stanowisku oporu kontaktowego na styku sekcji grzejnej i chłodzonej pomimo zastosowania pasty termoprzewodzącej i i

wprowadzenia siły dociskającej obie sekcje. W modelu numerycznym należy więc wprowadzić opór kontaktowy. Kąt nachylenia prostej opisującej rozkład temperatury w sekcji grzejnej i chłodzącej jest podobny co wskazuje, że poczynione założenie o doskonałej izolacji cieplnej na powierzchni zewnętrznej aparatu jest prawidłowe. Dodatkowo na podstawie porównania doświadczalnych oraz numerycznych rozkładów temperatury możemy ocenić czy doświadczenie zostało przeprowadzone przy warunkach ustalonych, dzięki czemu za pomocą rozwiązań numerycznych możemy przewidzieć czas prowadzenia pomiarów na stanowisku doświadczalnym.

Literatura

- [1] Wiśniewski S., Wiśniewski T.: *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000.
- [2] Szydlowski H.: *Pracownia fizyczna*, PWN, Warszawa 1999.
- [3] Fodemski T.: *Pomiary cieplne część I podstawowe pomiary cieplne*, WNT, Warszawa 2001.
- [4] Ansys Fluent *Dokumentacja pakietu*.