

Dariusz HEIM¹, Andrzej MROWIEC², Karol PRAŁAT²

e-mail: karol_pralat@poczta.fm

¹Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź²Wydział Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, Kalisz

Zastosowanie stanowiska badawczego małych mocy do pomiarów przewodności cieplnej cieczy o gęstości większej od wody

Wstęp

Znajomość wartości współczynnika λ wielu materiałów jest bardzo ważna w praktyce inżynierskiej oraz w badaniach eksperymentalnych. Przewodność cieplna, obok ciepła właściwego c , gęstości ρ oraz dyfuzyjności cieplnej a , jest jednym z najważniejszych parametrów fizykochemicznych substancji.

Bardzo często obliczanie wartości parametrów termofizycznych ciał stałych i cieczy jest trudne, stąd też stosuje się metody eksperymentalne do ich wyznaczenia. Metody pomiarowe współczynnika przewodności cieplnej λ opierają się na ustalonym lub nieustalonym przewodzeniu ciepła.

W pracy zastosowano modyfikację metody opartej na nieustalonym przewodzeniu ciepła charakteryzującą się dużą szybkością i stosunkowo dużą dokładnością pomiaru. Niestacjonarne metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów polegają na określeniu zależności między gęstością strumienia ciepłanego ze stałego źródła ciepła a zmieniającą się w czasie temperaturą w warunkach nieustalonego przepływu ciepła przez badany materiał [Franco, 2007]. Metoda gorącego drutu, bazująca na nieustalonym wymianie ciepła oraz jej modyfikacja nazywana metodą sondy cieplnej [Fodemski, 2001], są interesujące z powodu swojej prostoty, łatwości realizacji oraz dokładności. Metoda gorącego drutu może być stosowana zarówno dla ciał stałych, jak i cieczy [Kim i Bhowmik, 1997; Assael i in., 1998; Perkins, 2000; Turgut i in., 2009].

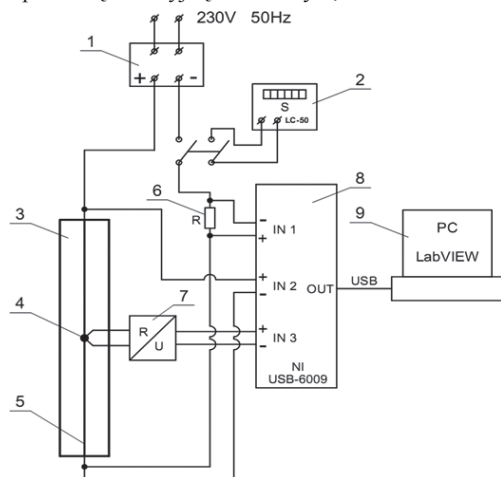
Badania doświadczalne

W niniejszej pracy przedstawiono udoskonaloną metodę pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła metodą gorącego drutu przy małych mocach emitowanych przez element grzejny.

Specjalnie na potrzeby eksperymentu wykonano analogowy precyzyjny przetwornik pomiaru temperatury R/U własnej konstrukcji.

Stanowisko badawcze

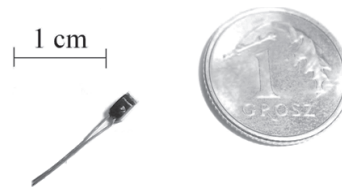
Komora badawcza o wymiarach $370 \times 28 \times 22$ mm stanowiła główną część układu pomiarowego (Rys. 1). W komorze zamontowano drut oporowy z powłoką izolacyjną o średnicy 0,2 mm.



Rys. 1. Stanowisko badawcze do pomiaru przewodności cieplnej cieczy: 1 – zasilacz prądu stałego, 2 – stoper, 3 – testowana próbka, 4 – czujnik rezystancyjny Pt500, 5 – drut grzejny, 6 – rezystor wzorcowy 100 Ω , 7 – przetwornik temperatury, 8 – rejestrator danych, 9 – komputer PC

Czujnik temperatury. Do drutu oporowego przymocowano na stałe małogabarytowy, rezystancyjny platynowy czujnik temperatury. Izolowany, miniaturowy ceramiczny czujnik Pt 500 był owinięty dwoma zwojami drutu oporowego. Część pomiarową czujnika wraz z uzwojeniem zatopiono w kropki cyny.

Stosowane przemysłowe czujniki rezystancyjne Pt 500 montowane są fabrycznie w podwójnej osłonie ochronnej. Składa się ona z osłony zewnętrznej do zabudowy w instalacji i osłony wewnętrznej chroniącej ceramiczny czujnik pomiarowy, które bardzo zwiększają wartość stałej czasowej odpowiedzi na skok jednostkowy. W opisywanych badaniach zastosowano czujnik platynowy Pt 500 bez osłon (Rys. 2). Działanie takie może spowodować uszkodzenie mechaniczne samego czujnika, lecz czasy jego odpowiedzi na zmiany temperatury w układzie pomiarowym są bardzo małe (pomijalna wartość stałej czasowej).



Rys. 2. Czujnik rezystancyjny Pt 500 stosowany w badaniach

Precyzyjny analogowy przetwornik pomiaru temperatury z wyjściem napięciowym składał się z czujnika Pt 500 z układem pomiarowym. Czujnik w układzie mostkowym zasilany był prądem stałym o wartości $I = 0,8$ mA, ze skompensowanego temperaturowo źródła prądowego LM 234, a powstałe na nim napięcie wzmacniano wykorzystując precyzyjny wzmacniacz operacyjny typu INA 122.

Komputerowe stanowisko pomiarowe. Analogowy przetwornik temperatury R/U podłączono do komputerowego stanowiska pomiarowego (Rys. 1) składającego się z wejściowego wielofunkcyjnego 14-bitowego przetwornika A/C typu NI USB-6009 firmy National Instruments z interaktywnym oprogramowaniem do rejestracji i pomiarów. Komputer PC wyposażono w sterowniki NI-DAQmx i NI-LabVIEW do obsługi modułu pomiarowego. Wyniki pomiarów, rejestrowano wykorzystując system komputerowy PC z czasem próbkowania co 0,1 sekundy.

Badane ciecze

W pracy mierzono współczynnik przewodzenia ciepła wody oraz trzech cieczy o gęstości większej od wody: kwasu octowego, gliceryny i aniliny (Tab. 1)

Tab. 1. Właściwości fizykochemiczne cieczy stosowanych w badaniach ($T = 298$ K)

Badana ciecz	ρ [kg/m^3]	c [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
Woda	998	4190	0,610
Kwas octowy	1050	2043	0,180
Gliceryna	1260	2386	0,280
Anilina	1020	2060	0,182

Zasada pomiaru

Prezentowane rozwiązanie aparatu jest rozwinięciem liniowej sondy cieplnej o stałym wydatku. Idea przyrządu polega na umieszczeniu w materiale stałego źródła ciepła zasilanego stałym prądem elektrycznym w taki sposób, że wydzielający się w czasie strumień ciepła jest stały. Wykonując dwa pomiary temperatury T w chwilach t_1 i t_2 wartość współczynnika przewodzenia ciepła można określić z zależności:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi L} \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{T_2 - T_1} = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

gdzie:

Q – ilość ciepła emitowana przez źródło ciepła [W],
 L – długość elementu grzejnego [m],
 t – czas [s],
 T – temperatura elementu grzejnego [°C].

Ilość ciepła Q emitowana przez element grzejny jest równa ilości ciepła przyjętego przez badany materiał w jednostce czasu, przy założeniu braku strat i pominięciu akumulacji ciepła w elemencie grzejnym.

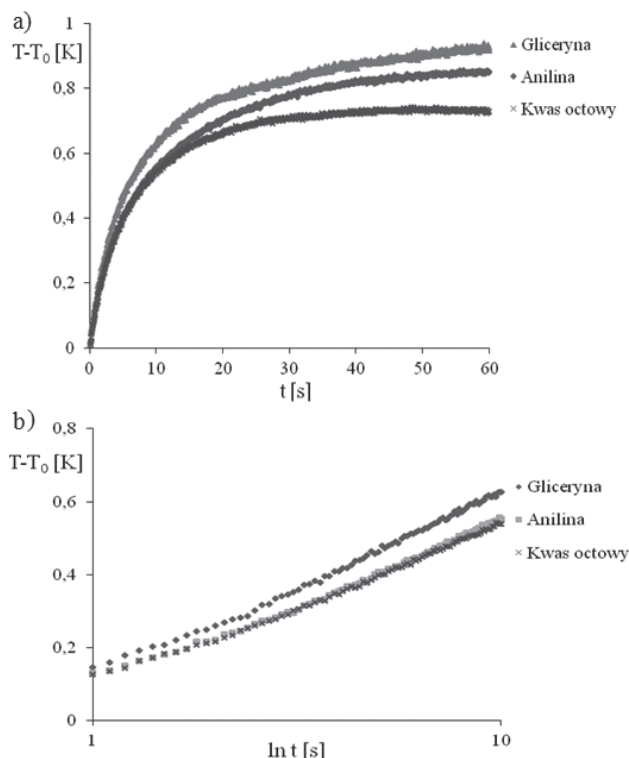
$$Q = UI \quad (2)$$

gdzie:

U – napięcie prądu [A],
 I – natężenie prądu [V].

Wyniki pomiarów

Korzystając z zaprojektowanego i zbudowanego stanowiska badawczego, wykonano pomiary współczynnika przewodzenia ciepła czterech cieczy. Dla każdej z nich wykonano po siedem pomiarów w serii dla wybranych mocy grzania z zakresu 0,2÷1,0 W. Na wykresie (Rys. 3a) przedstawiono przykładowe zależności temperatury w funkcji czasu dla mocy grzania 0,2 W. Dla funkcji $T - T_0 = f(\ln t)$ w zakresie 1÷10 [s] otrzymano zależność liniową (Rys. 3b).



Rys. 3. Wykres temperatury drutu grzejnego w funkcji czasu w trzech badanych próbkach cieczy: a) $T - T_0 = f(t)$, b) $T - T_0 = f(\ln t)$

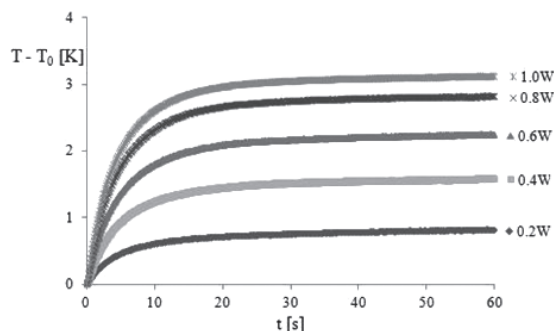
Podczas obliczeń wartości współczynnika przewodzenia cieczy, stwierdzono, że dla czasu od 1÷10 s nie występuje wpływ konwekcji na współczynnik przewodzenia ciepła [Gościak i Łach, 1998].

W niewielkiej przestrzeni wokół drutu grzejnego prądy konwekcyjne mogą być na tyle małe, że udział konwekcji w ogólnej wymianie ciepła może być pomijany. Wpływ konwekcji i przewodzenia w przestrzeni ograniczonej opisuje liczba Rayleigha:

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \beta \Delta T c \eta}{\nu^2 \lambda} \quad (3)$$

Wymianę ciepła traktuje się jako czyste przewodzenie gdy $Ra < 1000$. Dla wszystkich przebadanych cieczy podczas trwania eksperymentu wartość liczby Ra wynosiła maksymalnie 490.

Dla wszystkich badanych cieczy wykonano wykresy zależności $T - T_0 = f(t)$ dla różnych mocy grzania. Wraz ze wzrostem mocy dostar-



Rys. 4. Wykres zależności $T - T_0 = f(\ln t)$ wody dla różnych mocy grzania

czanej do drutu grzejnego rosła jego temperatura. Na wykresie (Rys. 4) pokazano przykładową zależność dla wody przy różnych wartościach mocy grzania.

Dla wszystkich przebadanych cieczy i dla każdej mocy grzania zaproponowano uogólnioną zależność

$$T - T_0 = A \ln(t) + B \quad (4)$$

Wartości przewodności cieplnej λ badanych cieczy obliczone z zależności (1) dla $t = 1 \div 10$ s zestawiono w tab. 2.

Tab. 2. Porównanie wyznaczonych wartości współczynnika λ z danymi literaturowymi ($T = 298$ K)

Badana ciecz	Współczynnik λ [W/(m·K)]	
	wartość dośw.	wartość literat.
Woda	0,639	0,610
Kwas octowy	0,190	0,180
Gliceryna	0,272	0,280
Anilina	0,191	0,182

Podsumowanie i wnioski

W pracy zastosowano bardzo dokładne stanowisko pomiarowe małych mocy do pomiaru temperatury.

Na potrzeby eksperymentu, wykonano precyzyjny analogowy przetwornik pomiaru temperatury R/U z wyjściem napięciowym, ponieważ dostępne na rynku rozwiązania przemysłowe przetworników nie spełniały oczekiwań związanych z czułością i dokładnością.

Dzięki układowi pomiarowemu, możliwy był pomiar temperatury w odstępach czasowych co 0,1 s.

Autorskie stanowisko pomiarowe pozwoliło wyznaczyć z dokładnością $\pm 5\%$, wartości współczynnika przewodzenia ciepła wzorcowych cieczy, o gęstości większej od wody.

Zaproponowany układ pomiarowy może znaleźć zastosowanie do wyznaczania przewodności cieplnej cieczy o nieznanach wartościach λ .

LITERATURA

- Assael M.J., Karagiannidis L., Malamataris N., Wakeham W.A., 1998. The transient hot-wire technique: A numerical approach. *Int. J. Thermophysics*, **19**, 2, 379-389. DOI: 10.1023/A:1022553125155
- Fodemski T., 2001. *Pomiary cieplne*, Cz. I., WNT, Warszawa
- Franco A., 2007. An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Appl. Therm. Eng.*, **27**, 2495-2504. DOI: 10.1016/j.appltherma.2007.02.008
- Gościak J., Łach J., 1998. Free convection on the horizontal heating wire, *Zesz. Nauk. Pol. Białostockiej. Mechanika*, **20**, 49-59
- Kim S.S., Bhowmik S.R., 1997. Thermophysical properties of plain yogurt as functions of moisture content. *J. Food Eng.*, **32**, 109-124. DOI: 10.1016/S0260-8774(97)00024-1
- Perkins R.A., 2000. Thermal conductivity of saturated liquid toluene by use of anodized tantalum hot wires at high temperatures. *J. Res. NIST*, **105**, 255-265. DOI: 10.6028/jres.105.029
- Turgut A., Tavman I., Tavman S., 2009. Measurement of thermal conductivity of edible oils using transient hot wire method. *Int. J. Food Prop.*, 2009, **12**, 4, 741 - 747. DOI: 10.1080/10942910802023242