

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2019), 28 (1), 153–160  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2019), 28 (1)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2019), 28 (1), 153–160  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2019), 28 (1)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.1.14

**Karol PRAŁAT, Mirosław GRABOWSKI, Wojciech KUBISSA,  
Roman JASKULSKI, Justyna CIEMNICKA**

Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska  
Faculty of Civil Engineering, Mechanics and Petrochemistry, Warsaw University of Technology

## **Zastosowanie stanowiska pomiarowego do badań przewodnictwa cieplnego materiałów budowlanych metodą „gorącego drutu”**

### **Application of experimental setup for the thermal conductivity measurement of building materials using the “hot wire” method**

**Słowa kluczowe:** przewodnictwo cieplne, stanowisko pomiarowe, metoda „gorącego drutu”  
**Key words:** thermal conductivity, experimental setup, “hot wire” method

#### **Wprowadzenie**

Przewodzenie ciepła jest zjawiskiem nieodwracalnym i jest przejawem reakcji układu termodynamicznego na zakłócenie stanu równowagi. Reakcja ta zmierza do zlikwidowania powstałego zakłócenia. Jeżeli wyłącznym przejawem braku równowagi termodynamicznej jest nierównomierność temperatury układu, to jedynym zjawiskiem nieodwracalnym będzie przepływ ciepła. Jeżeli zakłócenie stanu równowagi nie ma charakteru trwałego lub ciągłego, to zainicjowany w

nim proces przewodzenia ciepła sprawia, że temperatura w poszczególnych punktach układu będą zmieniać się w czasie. Cecha zmienności temperatury w czasie charakteryzuje nieustalone przewodzenie ciepła. Jeżeli jednak zakłócenie jest stałe, to po dostatecznie długim czasie następuje tzw. stan ustalony, w którym temperatura w różnych punktach układu nie jest jednakowa, ale jest niezmienna w czasie (Dos Santos, 2008).

Współczynnik przewodnictwa cieplnego ( $\lambda$ ) jest wielkością termofizyczną określającą zdolność materiału do przewodzenia ciepła. Jego wartość liczbową jest ilością ciepła przewodzonego w ciągu 1 s przez przekrój o powierzchni 1 m<sup>2</sup> przy jednostkowym gradiencie temperatury. W zależności od rodzaju materiału

wartości liczbowe ( $\lambda$ ) mogą się różnić nawet o kilka rzędów wielkości.

Znajomość wartości współczynnika przewodności cieplnej ( $\lambda$ ) wielu materiałów jest bardzo ważna podczas praktyki inżynierskiej oraz w badaniach eksperymentalnych. Obok ciepła właściwego ( $C_p$ ), gęstości ( $\rho$ ) oraz dyfuzyjności cieplnej ( $a$ ), jest jednym z najważniejszych parametrów fizykochemicznych substancji. Obecnie wiele ośrodków badawczych (Kim i Bhowmik 1997; Yamasue, Susa, Fukuyama i Nagata 2000; Prałat 2016; Heim, Mrowiec i Prałat 2016; Heim, Mrowiec, Prałat i Mucha 2018) zajmuje się poszukiwaniem nowych metod oraz udoskonalaniem już istniejących stanowisk pomiarowych, pozwalających coraz dokładniej wyznaczać wartości współczynników  $\lambda$ .

Przewodnictwo cieplne jest bardzo ważnym parametrem w budownictwie. W dobie oszczędności energii oraz ochrony środowiska poszukuje się nowych materiałów izolacyjnych o bardzo małej wartości  $\lambda$ . Obecnie produkcja materiałów budowlanych wkracza w erę wytwarzania nowych materiałów kompozytowych, w których strukturę wbudowywane są mikro oraz nanomateriały, takie jak: polimery, aerozele, mikrosfery czy geopolimery (Strzałkowski i Garbalińska 2016; Chen, Ng, Li, i Kwan 2017; Heim, Mrowiec, Prałat i Mucha, 2018). Takie działania naukowe i przemysłowe determinują poszukiwanie nowoczesnych i szybkich metod pomiarowych właściwości termicznych.

W niniejszej pracy przedstawiono pomiar przewodnictwa cieplnego ( $\lambda$ ) gipsu, wykonany na zaprojektowanym stanowisku z zastosowaniem metody „gorącej nici”.

## **Materiały i metody**

Bardzo często badanie właściwości termofizycznych ciał stałych i cieczy odbywa się metodami eksperymentalnymi. Metody pomiarowe współczynnika przewodności cieplnej ( $\lambda$ ) można podzielić na te, które oparte są na ustalonym lub nieustalonym przewodzeniu ciepła.

Zasada pomiaru przewodności cieplnej metodą ustaloną polega na określeniu strumienia ciepła ( $Q$ ) przewodzonego przez próbkę badanej substancji o dokładnie znanych wymiarach oraz na pomiarze spadku temperatury w ściance próbki o izotermicznych powierzchniach. Pewną wadą technik opartych na ustalonym przewodzeniu ciepła jest dość długi czas niezbędny do uzyskania stanu ustalonego i następnie do wykonania pomiarów. Metody oparte na nieustalonym przewodzeniu ciepła charakteryzują się dużą szybkością i stosunkowo dużą dokładnością pomiaru. Niestacjonarne metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów polegają na określeniu zależności między gęstością strumienia cieplnego wydatkowanego ze stałego źródła ciepła a zmieniającą się temperaturą w czasie, w warunkach nieustalonego przepływu ciepła przez badany materiał (Ramires i inni, 2000; Franco, 2007; Heim, Prałat i Mrowiec, 2014).

Prezentowane w pracy rozwiązanie stanowiska pomiarowego jest rozwinięciem tzw. liniowej sondy cieplnej o stałym wydatku. Idea pomiaru polega na umieszczeniu w materiale stałego źródła ciepła, zasilanego stałym prądem elektrycznym w taki sposób, że wydzielający się w czasie strumień ciepła jest stały.

Teoretyczne podstawy metody „gorącego drutu” podali Van der Held oraz Van Drunen (1949). Pole temperatury opisuje równanie Fouriera (1), gdzie  $\vartheta$  oznacza temperaturę względną,  $r$  promień, a  $t$  czas:

$$c_p \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Szybkość nagrzewania się drutu jest zależna od właściwości ośrodka, w jakim się on znajduje. Przy założeniu pomijalnie małej średnicy drutu grzejnego ( $2r$ ) w stosunku do jego długości ( $L$ ) oraz przy następujących warunkach granicznych uzyskujemy rozwiązanie ogólne (2):

- warunek początkowy:  $t = 0$ ,  
 $r$ :  $\vartheta = \vartheta_0 = 0$ ,
- warunki brzegowe:  $t \geq 0$ ,  $r = \infty$ :  
 $\vartheta = \vartheta_\infty = 0$   
 $r \rightarrow 0$ ,  $q = -2\pi r \lambda (\partial \vartheta / \partial r)_{r \rightarrow 0} = \text{const.}$

$$\begin{aligned} \vartheta &= \frac{q}{4\pi\lambda} \int_x^\infty \frac{1}{x} \exp(-x) dx = \\ &= \frac{q}{4\pi\lambda} \left( -C - \ln x + \frac{x}{1 \cdot 1!} - \frac{x^2}{2 \cdot 2!} + \dots \right) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$$x = r^2 / (4at),$$

$C = 0,5772$  – stała Eulera,

$a = \lambda / (c_p \rho)$  – współczynnik dyfuzji termicznej [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$q = Q / L$  – jednostkowa moc drutu grzejnego [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

Dla bardzo małych wartości  $x$  wartość całki może być zapisana jako  $C - \ln x$ , a równanie (2) przyjmuje wówczas postać (3):

$$\vartheta = \frac{q}{4\pi\lambda} \left( \ln \frac{4at}{r_0^2} - 0,5772 \right) \quad (3)$$

Wykonując dwa pomiary temperatury ( $T$ ) w  $t_1$  i  $t_2$  wartość współczynnika przewodzenia ciepła można określić z zależności (4):

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

gdzie:

$Q$  – moc cieplna drutu grzejnego [W],

$L$  – długość elementu grzejnego [m],

$t$  – czas [s],

$T$  – temperatura elementu grzejnego [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Ilość ciepła emitowana przez element grzejny jest równa ilości ciepła przejętego przez badany materiał w jednostce czasu, przy założeniu braku strat i pominięciu akumulacji ciepła w elemencie grzejnym. Moc źródła obliczono z zależności (5):

$$Q = U \cdot I \quad (5)$$

gdzie:

$U$  – napięcie prądu [V],

$I$  – natężenie prądu [A].

Metoda „gorącego drutu”, której założeniem jest nieustalona wymiana ciepła, należy do jednej z najbardziej interesujących metod z powodu swojej prostoty i łatwości realizacji oraz dokładności. Może być ona stosowana zarówno dla ciał stałych, jak i cieczy (w tym drewna, gruntu, produktów spożywczych, olejów, smarów). Polega ona na ułożeniu drutu grzejnego wewnątrz badanego materiału i pomiarze jego temperatury

w funkcji czasu. Idea eksperymentu zakłada umieszczenie w materiale źródła ciepła, zasilanego prądem elektrycznym w taki sposób, że wydzielający się w czasie strumień ciepła jest stały. Pomiar odbywa się, zatem w warunkach nagrzewania materiału pośrednio poprzez określenie tempa nagrzewania. W układzie  $T - \ln t$  po tzw. okresie przejściowym zależność przyjmuje charakter liniowy.

Na potrzeby pomiarów przewodności cieplnej ( $\lambda$ ) wykonano sterowane komputerowo stanowisko eksperymentalne. Podstawowym jego elementem była próbka gipsowa o wymiarach  $50 \times 50 \times 305$  mm, zawierająca osiowo umieszczony grzejnik z drutu oporowego Kanthal, o średnicy 0,2 mm. Do grzejnika zamocowane zostały w sposób trwały dwa miniaturowe rezystancyjne czujniki temperatury typu Pt100 (rys. 1). Charakterystyczną cechą platynowych czujników rezystancyjnych jest przyrost ich rezystancji w funkcji temperatury. W niewielkim przedziale wartości temperatury przyrost ten traktować można jako liniowy. Termorezystory platynowe przyjęto jako laboratoryjne wzorce pomiarowe ze względu na pomiary z niepewnością dochodzącą do  $\pm 0,01$  K.

Czujniki temperatury współpracowały z modułem pomiarowym NI-9217 firmy National Instruments, który następnie

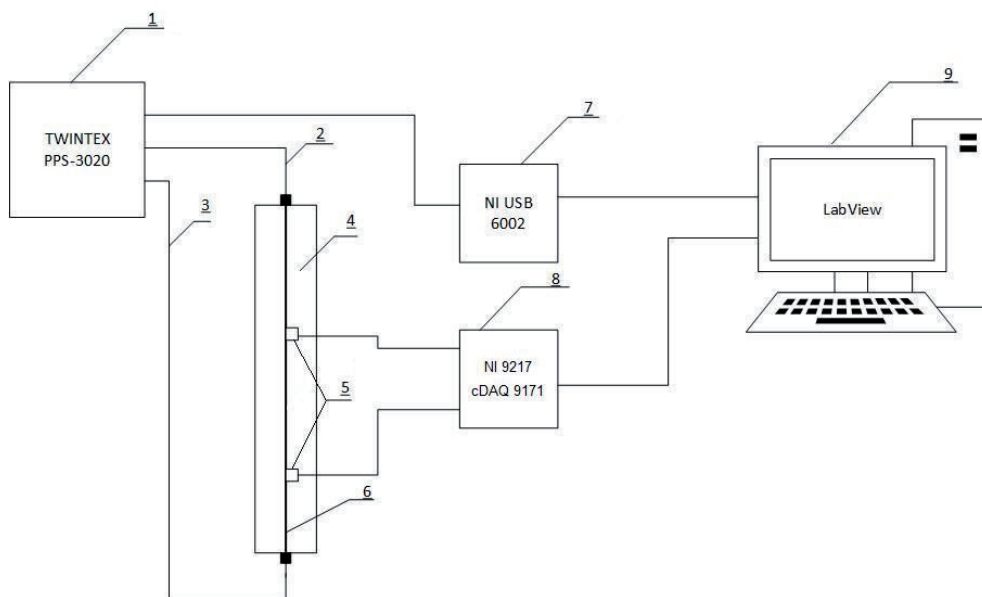


RYSUNEK 1. Małogabarytowy czujnik rezystancyjny Pt100 zastosowany w badaniach  
FIGURE 1. Small-sized Pt100 resistance sensor used in experiment

połączono z modułem pośredniczącym cDAQ 9171 przekazującym zakodowany sygnał temperatury do komputera sterującego procesem. Moduł pomiarowy NI-9217 ma możliwość konfiguracji dwóch trybów pracy: próbkowanie pomiaru z dużą rozdzielczością lub próbkowanie z dużą częstotliwością. W wykonanych eksperymentach stosowano próbkowanie z dużą rozdzielczością, a częstotliwość próbkowania wynosiła 0,01 s. Moduł NI-9217 cechuje także duża odporność na zakłócenia. Grzejnik z drutu oporowego był zasilany przez programowalny zasilacz TWINTEX PPS 3020, o dużej dokładności i stabilności. Błąd stabilizacji napięcia nie przekraczał 0,1%, a błąd stabilizacji prądu 0,2% wartości zadanej.

Zasilacz sterowany był napięciowo wielofunkcyjnym 32-bitowym przetwornikiem NI USB 6002. Zarówno zadawanie napięcia, jak i ograniczanie natężenia prądu płynącego przez grzejnik polegało na wysłaniu do zasilacza napięciowego sygnału sterującego o małej wartości. W trakcie pracy zasilacz przekazywał do modułu USB 6002, sygnały napięciowe dokładnie skorelowane z rzeczywistymi wartościami napięcia i natężenia prądu zasilającego. Zarówno moduł NI USB 6002, jak i NI-9217 (za pośrednictwem cDAQ 9171) były podłączone do komputera sterującego procesem i akwizycją danych pomiarowych (rys. 2).

Do obsługi stanowiska zostało napisane dedykowane oprogramowanie w środowisku LabView, które umożliwiało zadawanie napięcia i ustawianie ograniczenia prądu zasilającego, a więc pośrednio mocy grzejnej, odczyt rzeczywistych parametrów, a także ich zapis na dysk komputera. Program umożliwiał



RYSUNEK 2. Stanowisko do pomiaru przewodnictwa cieplnego ( $\lambda$ ) metodą „gorącego drutu”: 1 – regulowany zasilacz prądu stałego, 2, 3 – przewody zasilające, 4 – badana próbka, 5 – czujniki Pt100, 6 – drut grzejny, 7 – rejestrator danych, 8 – moduł wejściowy czujnika temperatury rezystancji, 9 – komputer

FIGURE 2. Experimental set up to measure thermal conductivity ( $\lambda$ ) based on “hot wire” method: 1 – regulated DC power supply, 2, 3 – power wires, 4 – tested sample, 5 – Pt100 sensors, 6 – heating wire, 7 – data recorder, 8 – resistance temperature detector input module, 9 – PC computer

również wybór odpowiednich sekwencji czasowych zasilania i rejestracji danych. Schemat przepływu danych w programie sterującym przedstawiono na rysunku 3.

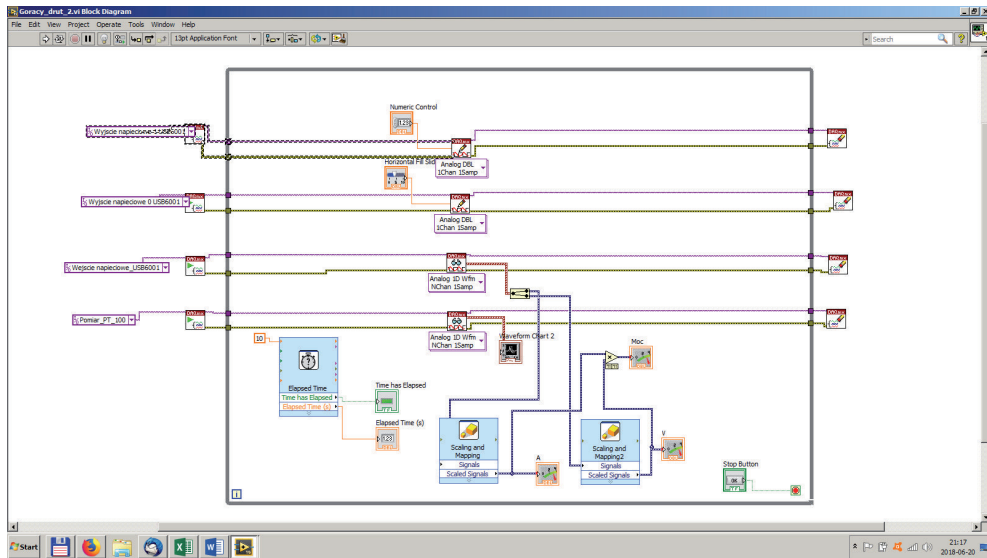
Materiałem wyjściowym w badaniach przewodności cieplnej był naturalny proszek gipsowy (Nida Gips) powszechnie dostępny na rynku i spełniający wymagania standardowe. Ilość siarczanu wapnia ( $\text{CaSO}_4$ ) w gipsie wynosiła 91%.

Próbka gipsowa została wykonana poprzez wymieszanie czystego gipsu z wodą w stosunku wagowym w/g wynoszącym 0,75, przy zastosowaniu wolnobrotowego mieszadła w czasie 1 min w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Przed zalaniem formy płynnym gipsem, w jej osi został

umieszczony cienki drut oporowy z zamocowanymi czujnikami rezystancyjnymi Pt100. Próbka następnie była suszona w warunkach powietrzno-wilgotnościowych w temperaturze  $20\text{--}22^\circ\text{C}$  i wilgotności  $52 \pm 2\%$  przez 60 dni. Po tym czasie zmierzono wartość przewodnictwa cieplnego.

## Wyniki badań

Właściwości próbki gipsowej po 60 dniach suszenia do suchej masy charakteryzowały się gęstością na poziomie  $1026 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  oraz porowatością wynoszącą 56,3%. Podczas pomiaru przewodności cieplnej zastosowano



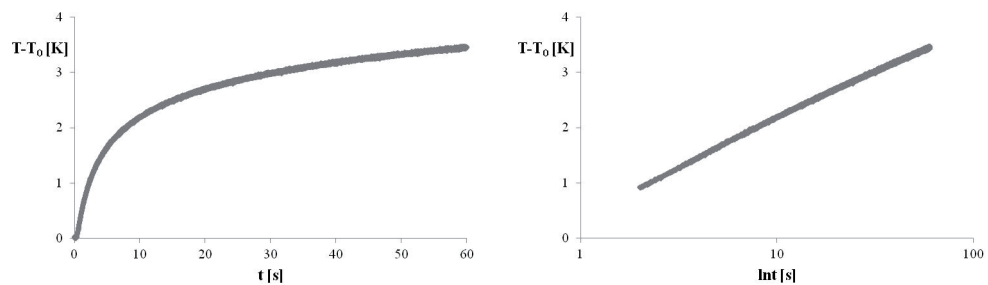
RYSUNEK 3. Schemat przepływu danych w programie sterującym  
 FIGURE 3. Data flow diagram in the control program

element grzejny o małej mocy (1 W). Pomiar temperatury trwał 1 min i był rejestrowany w odstępach czasowych co 0,01 s. Dla badanej próbki gipsowej wykonano wykresy zależności  $T - T_0 = f(t)$  oraz  $T - T_0 = f(\ln t)$  (rys. 4a oraz 4b) i wyznaczono współczynnik kierunkowy prostej  $S$ .

Uzyskane eksperymentalnie dane gęstości, porowatości oraz przewod-

nictwa cieplnego obliczonego ze wzoru (6) zamieszczono w tabeli. Dodatkowo wartość przewodnictwa cieplnego gipsu porównano z danymi literaturowymi. Eksperymentalna wartość ( $\lambda$ ) różniła się od wartości literaturowej o 3,7%.

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi L} \cdot \frac{1}{S} = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{1}{S} \quad (6)$$



RYSUNEK 4. Wykres zmiany temperatury drutu grzejnego w funkcji czasu (a), w funkcji logarytmu naturalnego czasu (b)  
 FIGURE 4. Graph of change temperature of heating wire as a function of time (a), as a function of natural logarithm of time (b)



TABELA. Gęstość ( $\rho$ ), porowatość ( $p$ ) i przewodnictwo cieplne ( $\lambda$ ) próbki gipsowej po 60 dniach  
 TABLE. Density ( $\rho$ ), porosity ( $p$ ) and thermal conductivity ( $\lambda$ ) of gypsum specimen after 60 days

Materiał budowlany Building material	Parametr Parameter			
	$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	$p$ [%]	$\lambda_{exp.}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$\lambda_{lit.}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Gips Gypsum	1025	56,3	0,3407	0,3537

Na podstawie pomiarów zaproponowano ogólną zależność (7):

$$T - T_0 = A \cdot \ln t + B \quad (7)$$

i wyznaczono wartości stałych równania A oraz B, wynoszące odpowiednio 0,7278 i 0,4938.

Praca stanowi pewien przyczynek dla dalszych planowanych eksperymentów, zawiera wyniki badań pojedynczego pomiaru, dlatego analiza statystyczna nie jest możliwa.

$\lambda = 0,3407$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] różniła się o 3,7% z wartością literaturową.

3. Dzięki zaprojektowanemu stanowisku pomiarowemu możliwe będą pomiary przewodnictwa cieplnego kompozytów gipsowych modyfikowanych mikro- i nanocząstkami, m.in. aerożelami, mikrosferami czy polimerami. Wykonane stanowisko może być również wykorzystanie w badaniach innych materiałów budowlanych, takich jak: betony, grunty, minerały czy kruszywa.

## Wnioski

1. Na potrzeby badań przewodnictwa cieplnego gipsów zbudowano stanowisko pomiarowe bazujące na niestacjonarnej metodzie pomiaru „gorącego drutu”. Wykorzystano bardzo precyzyjny zestaw urządzeń do pomiaru temperatury drutu grzejnego oraz jej rejestracji. Podczas eksperymentu zastosowano element grzejny o małej mocy (1 W). Bardzo dużą zaletą eksperymentu był pomiar temperatury w odstępach czasowych co 0,01 s oraz bardzo krótki czas całego pomiaru wynoszący zaledwie 1 min.
2. Za pomocą autorskiego stanowiska eksperymentalnego możliwy był pomiar przewodnictwa cieplnego próbki gipsowej. Uzyskana wartość

## Literatura

- Chen, J.J., Ng, P.L., Li, L.G. i Kwan, A.K.H. (2017). Production of high-performance concrete by addition of fly ash microsphere and condensed silica fume. *Procedia Engineering*, 172, 165-171.
- Dos Santos, W.N. (2008). Advances on the hot wire technique. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 15-20.
- Franco, A. (2007). An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2495-2504.
- Heim, D., Mrowiec, A., Pralat, K. i Mucha, M. (2018). Influence of Tylose MH1000 Content on Gypsum Thermal Conductivity. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3), 04018002. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002177
- Heim, D., Pralat, K. i Mrowiec, A. (2014). Zastosowanie stanowiska badawczego małych

mocy do pomiarów przewodności cieplnej cieczy o gęstości większej od wody. *Inżynieria Aparatura Chemiczna* 53, 21-22.

- Heim, D., Mrowiec, A. i Prałat, K. (2016). Analysis and interpretation of results of thermal conductivity obtained by the hot wire method. *Experimental Techniques*, 40(2), 513-519.
- Kim, S.S. i Bhowmik, S.R. (1997). Thermophysical properties of plain yogurt as functions of moisture content. *Journal of Food Engineering*, 32(1), 109-124.
- Prałat, K. (2016). Research on thermal conductivity of the wood and analysis of results obtained by the hot wire method. *Experimental Techniques*, 40(3), 973-980.
- Ramires, M.L., Nieto de Castro, C.A., Perkins, R.A., Nagasaka, Y., Nagashima, A., Assael, M.J. i Wakeham, W.A. (2000). Reference data for the thermal conductivity of saturated liquid toluene over a wide range of temperatures. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 29(2), 133-139.
- Strzałkowski, J. i Garbalińska, H. (2016). Thermal and strength properties of lightweight concretes with the addition of aerogel particles. *Advances in Cement Research*, 28(9), 567-575.
- Van der Held, E.F.M., and Van Drunen, F.G. (1949). A method of measuring the thermal conductivity of liquids. *Physica*, 15(10), 865-881.
- Yamasue, E., Susa, M., Fukuyama, H. i Nagata, K. (2002). Thermal conductivities of silicon and germanium in solid and liquid states measured by non-stationary hot wire method with silica coated probe. *Journal of Crystal Growth*, 234(1), 121-131.

## Streszczenie

**Zastosowanie stanowiska pomiarowego do badań przewodnictwa cieplnego materiałów budowlanych metodą „gorącego drutu”.** W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła

( $\lambda$ ) gipsu. Podczas pomiarów wykorzystano metodę „gorącej nici”, która należy do jednej z najbardziej interesujących metod z powodu swojej prostoty, łatwości realizacji oraz dokładności. W pomiarach wykorzystano platynowy czujnik Pt100, który z układem pomiarowym tworzy precyzyjny przetwornik pomiaru temperatury z wyjściem napięciowym. Pomiar rejestrowano za pomocą komputerowego systemu pomiarowego z czasem próbkowania co 0,01 s.

## Summary

**Application of experimental setup for the thermal conductivity measurement of building materials using the “hot wire” method.** Results of experimental research have been presented in this article, determining the coefficient of thermal conductivity ( $\lambda$ ) of gypsum. During measurements, a “hot wire” method was used, which belongs to the most interesting method because of its simplicity, easiness of realization and precision. Platinum Pt100 sensor was used during measurements, which both with measuring system creates precise temperature measuring converter with voltage output. Measurements were registered with the help of computer measuring system, with sampling time every 0.01 s.

### Authors' address:

Karol Prałat, Mirosław Grabowski, Wojciech Kubissa, Roman Jaskulski, Justyna Ciemnicka  
Politechnika Warszawska  
Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii,  
ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock  
Poland

e-mail: Karol.Pralat@pw.edu.pl  
Miroslaw.Grabowski@pw.edu.pl  
Wojciech.Kubissa@pw.edu.pl  
Roman.Jaskulski@pw.edu.pl  
ciemna89@vp.pl