

## NIESTACJONARNE POMIARY WSPÓLCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA POROWATYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

Agata SIWIŃSKA\*, Halina GARBALIŃSKA\*\*

\* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych,  
Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin,  
e-mail: siwinska@zut.edu.pl

\*\* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych  
Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin,  
e-mail: Halina.Garbalinska@zut.edu.pl

**Słowa kluczowe:** Artykuł prezentuje pomiary współczynników przewodzenia ciepła materiałów budowlanych przeprowadzone metodą niestacjonarną. Pomiary zostały zrealizowane przy pomocy miernika ISOMET2104. Badania dotyczyły sześciu materiałów budowlanych o różnym stopniu zawilgocenia, od stanu suchego do stanu nasyconego.

**Słowa kluczowe:** Przewodność cieplna, materiały budowlane, zawilgocenie, metoda niestacjonarna.

### 1. WPROWADZENIE

Stacjonarne metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła charakteryzują się długim czasem potrzebnym do przeprowadzenia pomiaru, który może wynosić nawet kilkadziesiąt godzin. Przyrządy pomiarowe wykorzystujące zjawisko ustalonego przepływu ciepła nadają się głównie do badania materiałów suchych. Odznaczają się wówczas większą dokładnością.

W przypadku badania materiałów wilgotnych wyniki mogą być obarczone znacznymi błędami, ponieważ czas przeprowadzenia pomiarów tymi metodami jest na tyle długi, że w zawilgoconej próbce następuje przemieszczanie się wilgoci połączone z przemianami fazowymi. Zjawiskom tym towarzyszą dodatkowe efekty cieplne, które powodują zafałszowanie wyników pomiarów.

Zaleca się, aby materiały o wilgotności większej niż w stanie powietrzno-suchym badać stosując tzw. szybkie metody pomiarowe wykorzystujące zjawisko nieustalonego przepływu ciepła. Metody te, jak podaje źródło [3] umożliwiają ograniczenie czasu prowadzenia pomiarów do kilkunastu minut.

Niestacjonarne metody pomiaru współczynnika przewodności cieplnej polegają na określeniu zależności między gęstością strumienia cieplnego i temperaturą w warunkach nieustalonego przepływu ciepła przez badany materiał. Powyższą zależność wykorzystuje między innymi przyrząd ISOMET2104, który posłużył do zrealizowania przedstawionego poniżej programu badawczego.

Aparat ten był wykorzystywany już wcześniej do określenia przewodności cieplnej w funkcji zawartości wilgoci. Przy jego pomocy zależność tę badali Černý, Zuda, Drchalová, Toman, Rovnaníková, Bayer, a uzyskane wyniki dotyczące szerokiego zakresu wilgotności higroskopijnej przedstawili w pracy [1].

Na tym samym aparacie badania wykonywali Michálek, Jiříčková, Pavlík i Černý, a wyniki przedstawili w pracy [5]. Przedmiotem ich badań był między innymi wpływ orientacji włókien na przewodność cieplną wełny mineralnej o różnej gęstości i zawilgoceniu. Badacze po przeprowadzeniu eksperymentu na pięciu próbkach każdego materiału zaobserwowali, że orientacja włókien oraz gęstość tylko nieznacznie wpływają na przewodnictwo cieplne [5]. W większym stopniu o przewodności cieplnej decydowało zawilgocenie materiałów.

Jiříčková i Černý w pracy [4] przedstawili wyniki badań dotyczące parametrów cieplnych i wilgotnościowych materiałów bazujących na wełnie mineralnej. Dla badanego materiału wyznaczyli izotermę sorpcji w temperaturze 20°C przy ośmiu poziomach zawilgocenia sorpcyjnego. Badania przewodności cieplnej przy wykorzystaniu aparatu ISO-MET2104 przeprowadzili w temperaturze 25°C na materiale suchym, zawilgoconym przy wilgotności względnej powietrza 95 % oraz nasączonym wodą. W zakresie zawilgo-

cenia sorpcyjnego próbek (od  $\varphi = 0\%$  do  $\varphi = 95\%$ ) badacze nie zaobserwowali wyraźnej zależności pomiędzy  $\lambda$  a zawilgoceniem. Znacząco wyższą wartość współczynnika  $\lambda$  otrzymano dla materiału nasączonego wodą.

Rezultaty uzyskiwane w innych ośrodkach badawczych przy użyciu aparatu ISOMET2104 potwierdzają jego przydatność do wyznaczania współczynnika  $\lambda$  materiałów budowlanych o różnym stopniu zawilgocenia. W związku z tym zdecydowano się na jego wykorzystanie do realizacji badań opisanych poniżej.

## 2. PRZEDMIOT BADAŃ

Program eksperymentalny obejmował wybrane materiały budowlane służące do wznoszenia i wykończenia ścian zewnętrznych. Zdecydowano się na wytypowanie do badań następujących materiałów: cegły ceramicznej (CC), cegły silikatowej (CS), betonu komórkowego (BK) oraz trzech zapraw – cementowej czystej (ZC), cementowej modyfikowanej włóknami polipropylenowymi (ZM), cementowo-wapiennej (ZCW). W przypadku pierwszych trzech materiałów skorzystano z blozków ściennych wykonanych fabrycznie. W przypadku zapraw próbki przygotowano we własnym zakresie. Poszczególne mieszanki, w przeliczeniu na  $1 \text{ dm}^3$ , sporządzono według następujących receptur:

- zaprawa cementowa (ZC): cement 490 g, woda 270 g, piasek 1519 g,  $w/c=0,55$ ;
- zaprawa modyfikowana (ZM): cement 490 g, woda 270 g, piasek 1519 g, włókna polipropylenowe o długości 3 mm 0,9 g,  $w/c=0,55$ ;
- zaprawa cementowo-wapienna (ZCW): cement 194 g, wapno 194 g, woda 336 g, piasek 1164 g,  $w/c=1,73$ ,  $w/s=0,87$ .

Badania zrealizowano na próbkach:

- zaprawy o wymiarach  $25 \times 25 \times 6 \text{ cm}$ ;
- beton komórkowy o wymiarach  $30 \times 20 \times 5 \text{ cm}$ ;
- cegła ceramiczna, cegła silikatowa  $25 \times 12 \times 6 \text{ cm}$ .

W Tabeli 1 zebrano dane nt. średniej gęstości próbek w stanie suchym.

Tabela 1. Średnia gęstość próbek do badania  $\lambda$ .

Table 1. Average density of samples for examination  $\lambda$ .

Materiał	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Cegła ceramiczna CC	1,543
Cegła silikatowa CS	1,804
Beton komórkowy BK	0,603
Zaprawa cementowa ZC	2,066
Zaprawa modyfikowana ZM	2,020
Zaprawa cementowo-wapienna ZCW	1,737

Badania współczynnika przewodzenia ciepła prowadzono na próbkach o różnym poziomie wilgotności. W każdym

przypadku badaniom poddawano materiał wysuszony do stałej masy, jak również materiał o sześciu pośrednich poziomach wilgotności sorpcyjnej oraz materiał swobodnie nasycony wodą.

Pośrednie poziomy wilgotności stymulowano za pomocą wodnych, nasyconych roztworów odpowiednio dobranych soli. Przy wilgotności względnej powietrza  $\approx 11, 33, 54, 75, 85, 98\%$  oraz przy temperaturze  $\approx 20^\circ\text{C}$  próbki wszystkich materiałów były każdorazowo kondycjonowane przez okres 12 miesięcy.

## 3. APARATURA POMIAROWA

Aparat ISOMET2104, widoczny na rys. 1, jest przenośnym instrumentem pomiarowym służącym do bezpośredniego pomiaru termicznych właściwości materiałów izotropowych [7]. Wyposażony jest w różne typy opcjonalnych sond pomiarowych: sondy igłowe do badania miękkich materiałów oraz sondy przylgowe do badania materiałów twardych.



Rys. 1. Aparat ISOMET2104.

Fig. 1. Apparatus ISOMET2104.

Pomiar aparatem oparty jest na analizie temperaturowej odpowiedzi badanego materiału. Strumień ciepła jest wytwarzany przez elektryczne ogrzewanie przy użyciu grzejnika opornika umieszczonego w sondzie i mającego bezpośredni kontakt cieplny z powierzchnią próbki. Ocena przewodnictwa cieplnego i pojemności cieplnej jest oparta na okresowych zapisach temperatury w funkcji czasu – pod warunkiem, że propagacja ciepła występuje w nieograniczonym ośrodku.

Zastosowana w przyrządzie dynamiczna metoda pomiaru zmniejsza czas pomiaru przewodnictwa ciepła do 10÷16 minut. ISOMET2104 jest wielofunkcyjnym instrumentem do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  [W/(mK)], dyfuzyjności cieplnej  $a$  [m<sup>2</sup>/s], pojemności cieplnej  $c\rho$  [J/(m<sup>3</sup>K)] oraz temperatury  $T$  [°C].

Do badań wykorzystano trzy sondy przylgowe o różnym zakresie pomiarowym przedstawionym w Tabeli 2.

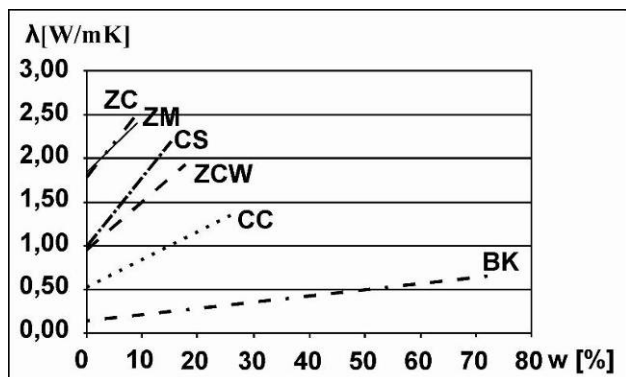
Tabela 2. Zakresy pomiarowe sond.  
Table 2. Measurement ranges of probes.

Sonda	$\lambda$ [W/(mK)]
Surface Probe API 210411	0,04 do 0,30
Surface Probe API 210412	0,30 do 2,00
Surface Probe API 210413	2,00 do 6,00

#### 4. OPIS EKSPERYMENTU

Przygotowane pod względem wilgotnościowym próbki poddawano badaniom przewodności cieplnej przy pomocy miernika ISOMET2104. W przeprowadzonym eksperymencie wykorzystano trzy sondy pomiarowe różniące się zakresem pomiarowym (Tabela 2). Badania wykonywano za każdym razem w jednym punkcie pomiarowym na każdej próbce, a mianowicie w części centralnej. W każdym miejscu pomiarowym wykonano po trzy odczyty.

Badania w przypadku każdego z sześciu materiałów dotyczyły ośmiu poziomów wilgotności, zawartych między skrajnymi wartościami, odpowiadającymi stanowi suchemu i swobodnie nasyconemu wodą. Zbiorcze zestawienie wypadkowych przebiegów prezentuje rys. 2. Przedstawia on zależności współczynników przewodnictwa cieplnego  $\lambda$  od wilgotności materiałowej  $w$  dla badanych materiałów [6].



Rys. 2. Porównanie przebiegów funkcyjnych  $\lambda(w)$  różnych materiałów budowlanych.

Fig. 2. Comparison of functions  $\lambda(w)$  of different building materials.

Przedstawione na rys. 2 zależności wykazują liniowy przebieg opisany następującymi zależnościami:

$$\text{BK: } \lambda = 0,1441 + 0,0071 \cdot w \quad (1)$$

$$\text{CC: } \lambda = 0,5332 + 0,0317 \cdot w \quad (2)$$

$$\text{CS: } \lambda = 0,9948 + 0,0783 \cdot w \quad (3)$$

$$\text{ZCW: } \lambda = 0,9584 + 0,055 \cdot w \quad (4)$$

$$\text{ZC: } \lambda = 1,7973 + 0,0779 \cdot w \quad (5)$$

$$\text{ZM: } \lambda = 1,8489 + 0,0619 \cdot w \quad (6)$$

#### 5. PODSUMOWANIE

Badania przeprowadzone na aparacie ISOMET2104 potwierdziły zależność wpływu gęstości materiału na współczynnik  $\lambda$  – wraz ze zmniejszeniem gęstości materiału następowała poprawa izolacyjności, objawiająca się spadkiem wartości współczynnika  $\lambda$ .

Uzyskane wyniki potwierdzają również negatywne oddziaływanie zawilgocenia na przewodność cieplną, przy czym należy stwierdzić, iż wpływ ten jest różny w przypadku poszczególnych materiałów. W skrajnym przypadku – przy porównaniu próbek suchych i nasyconych wodą – zaobserwowano przeszło czterokrotny wzrost  $\lambda$  dla betonu komórkowego. Najmniejszy wzrost, rzędu 1,3, zanotowano dla zaprawy cementowej i modyfikowanej. W przypadku cegły ceramicznej wyniósł on 2,7, a dla cegły silikatowej i zaprawy cementowo-wapiennej przeszło 2,0.

W obszarze wilgotności sorpcyjnej generalnie wystąpił pewien wzrost przewodności cieplnej badanych materiałów wraz ze wzrostem ich zawilgoceniem. Wyniki badań wskazują na zróżnicowany wzrost współczynnika przewodzenia ciepła dla testowanych materiałów, które poddano procesowi nasycania sorpcyjnego. Porównując wyniki uzyskane dla próbek wysuszonych z danymi dla materiałów o największym zawilgoceniu sorpcyjnym generalnie zaobserwowano wzrost  $\lambda$  o przeszło 20 %. Jedynie dla zaprawy cementowej 8 %. W największym stopniu ujawnił się on w przypadku cegły silikatowej i zaprawy cementowo-wapiennej, dla których współczynnik  $\lambda$  wzrósł o przeszło 30 %.

Ujęty w matematyczne zależności wpływ wilgoci jest różny w poszczególnych materiałach, jednak w każdym z analizowanych przypadków wraz ze wzrostem wilgotności następuje obniżenie właściwości termoizolacyjnych. Zastosowanie niestacjonarnej techniki pomiarowej potwierdziło liniową zależność między współczynnikiem przewodzenia ciepła  $\lambda$  a zawilgoceniem materiałów  $w$ . Zaproponowane opisy matematyczne wspomnianej zależności  $\lambda = f(w)$  kształtują się odmiennie dla poszczególnych materiałów. Współczynnik kierunkowy wyznaczonych prostych dla poszczególnych materiałów jest różny. Największą wartość przyjmuje w zaprawie cementowej i cegle silikatowej, najmniejszą w betonie komórkowym. Dla zaprawy cementowej i cegły silikatowej współczynnik kierunkowy prostej wyniósł prawie 0,08, a dla betonu komórkowego jedynie 0,0071.

Najlepsze dopasowanie danych do modelu zanotowano dla betonu komórkowego. W pomiarach zrealizowanych techniką niestacjonarną uzyskano w odniesieniu do tego materiału wartość  $R^2$  wynoszącą 0,9932 [6].

W pracy [2] dokonano konfrontacji przedstawionych powyżej wyników z wynikami uzyskanymi w pomiarach stacjonarnych przeprowadzonych na aparacie płytowym.

## NONSTATIONARY MEASUREMENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF POROUS BUILDING MATERIALS

**Summary:** The paper presents measurements of thermal conductivity coefficient of building materials performed by a non-stationary method. The measurements were taken by means of ISOMET2104 instrument. The research was performed on six different building materials of various levels of moisture saturation, from dry to saturated state.

### Literatura

- [1] Černý R., Zuda L., Drchalová J., Toman J., Rovnaníková P., Bayer P. Hygric and thermal properties of an alkali activated aluminosilicate material. Research in Building Physics and Building Engineering, Proceedings of the Third International Building Physics Conference, Concordia University, Montreal, Canada 2006, Taylor & Francis Group, London 2006, s. 35-42
- [2] Garbalińska H., Siwińska A.: Ocena porównawcza stacjonarnej i niestacjonarnej techniki pomiaru przewodności cieplnej. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 252, Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 47. II Konferencja Solina 2008 „Energia Odnawialna. Innowacyjne Rozwiązania, Materiały i Technologie dla Budownictwa”, s. 123-130
- [3] Golembowicz M., Pogorzelski J. A. *Metodyka badań współczynnika przewodności cieplnej suchych i wilgotnych materiałów budowlanych przy użyciu przyrządu sondowego konstrukcji ITB*. BINT ITB 22, s. 50-55
- [4] Jiříčková M., Černý R. *Hygric and Thermal Properties of Capillary Active Rock Wool Thermal Insulation*. Building Physics 2002 – 6<sup>th</sup> Nordic Symposium, s. 461-468
- [5] Michálek P., Jiříčková M., Pavlík Z., Černý R. *Hydrophilic mineral wool materials: The effect of fiber orientation*. Research in Building Physics and Building Engineering, Proceedings of the Third International Building Physics Conference, Concordia University, Montreal, Canada 2006, Taylor & Francis Group, London 2006, s. 91-95
- [6] Siwińska A. *Związek między izotermą sorpcji a współczynnikiem przewodzenia ciepła porowatego materiału budowlanego*. Rozprawa doktorska, Szczecin 2008
- [7] User's guide ISOMET model 2104

*Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego Nr 4 T07E 033 30 w latach 2006/2008.*