



Badanie współczynnika przewodzenia ciepła w materiałach z dodatkiem PCM-ów (PCM - Phase Change Materials)

AUTOR: Ewa Skawińska^{a,*}

REKOMENDOWANE PRZEZ: Zbigniew Gnutek

^a Zakład Termodynamiki, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Politechnika Wrocławska

* Adres do korespondencji: ewa.skawinska@pwr.edu.pl, tel. 71 320 30 91

STRESZCZENIE

Materiały ulegające przemianom fazowym obecnie poddawane są szerokiej analizie w zakresie możliwości ich wykorzystania. Opracowywane są modele symulujące wpływ materiałów zmiennofazowych (ang. PCM – Phase Change Materials) na wydajność cieplną budynku. Jednakże jako dane wejściowe brane są pod uwagę właściwości termiczne PCM-ów w typowych zakresach temperatur stosowanych w budownictwie. Według autorki referatu wprowadzone założenie prowadzi to do błędnych wyników symulacji.

Na podstawie wstępnych rozważań stwierdzono, że gdy skład materiału ulega zmianie, jego właściwości cieplne muszą być mierzone w celu prawidłowego wykorzystania ich w narzędziach symulacyjnych.

W referacie przedstawiono stanowisko doświadczalne oraz sposób wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła.

SŁOWA KLUCZOWE: *współczynnik przewodzenia ciepła, materiały zmiennofazowe, wymiana ciepła*

1. WPROWADZENIE

W ostatniej dekadzie w literaturze [1, 2] zauważyć można wzmożone zainteresowanie materiałami zmiennofazowymi zwanymi dalej PCM (ang. PCM – Phase Change Materials). Wzrost ten wynika z tego iż tego typu materiały mają szeroki potencjał wykorzystania. Materiały zmiennofazowe w trakcie procesu topnienia lub krzepnięcia mogą skutecznie pochłaniać lub uwalniać duże ilości ciepła tzw. ciepła utajonego. W trakcie wymiany ciepła utajonego temperatura PCM-u utrzymywana jest na stałym poziomie. Dlatego też PCM jest bardzo obiecującym wyrobem, który może być stosowany w systemach magazynowania energii cieplnej.

Jednym z sektorów przemysłu w którym trwają intensywne prace nad możliwością wykorzystania PCM-ów jest budownictwo. Idea zastosowania tego typu materiałów w ścianach budynków pojawiła się już w latach 80. obecny wzrost zainteresowania spowodowany jest potrzebą zmniejszenia zużycia energii oraz kosztów na potrzeby ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji.

Obecnie wznoszone są budynki o lekkiej konstrukcji nośnej, w których funkcje izolacyjne pełnią materiały o bardzo niskim cieple właściwym i gęstości, co prowadzi do konieczności dogrzewania pomieszczeń w okresie zimowym i chłodzenia w okresie letnim. Alternatywnym rozwiązaniem jest użycie PCM-ów. Łącząc PCM z materiałami ściennymi można sterować temperaturą w pomieszczeniu poprzez absorpcję i uwalnianie ciepła utajonego na zewnątrz.

Badania nad wpływem materiału zmiennofazowego zastosowanego w okładzinie ściennej (tj. zaprawach tynkarskich) na temperaturę w pomieszczeniu wykonano w Niemczech w pobliżu Weimaru. Przeprowadzono doświadczenie w dwóch jednakowych testowych pomieszczeniach, w jednym z nich ściany pokryto tynkiem z dodatkiem materiału zmiennofazowego. Natomiast w drugim zastosowano zwykły tynk bez żadnych domieszek. W doświadczeniu dokonano pomiaru temperatur w ciągu doby. Otrzymane wyniki pozwoliły na potwierdzanie założenia, że PCM ma wpływ na zmianę temperatury w pomieszczeniu. W ciągu dnia otrzymano obniżenie temperatury o 3 K w stosunku do pokoju bez PCM-u [3]. Oprócz wymienionego doświadczenia prowadzone są badania nad możliwością zastosowania materiałów zmiennofazowych w systemach ogrzewania podłogowego czy też sufitowych systemach aktywnego chłodzenia [4].

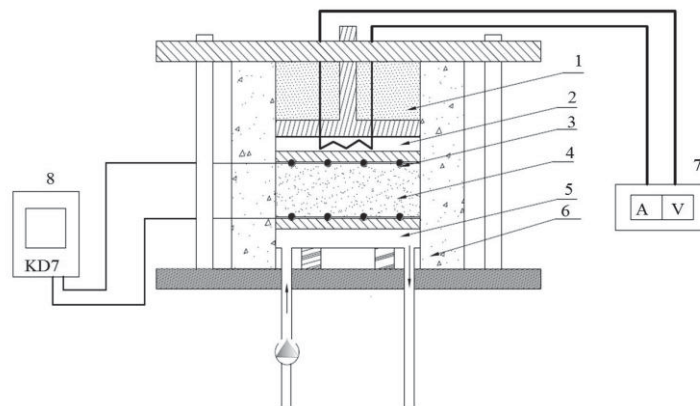
Powszechnie wiadomo, że właściwości termofizyczne materiałów budowlanych będą miały silny wpływ na zużycie energii w budynku. W związku z tym konieczne jest zbadanie nie tylko możliwości wykorzystania PCM jako materiału zwiększającego pojemność cieplną ale i jego wpływu na właściwości ciepłe takie jak przewodność cieplna [5].

Celem tej pracy jest przedstawienie stanowiska oraz sposobu pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła nowego materiału kompozytowego na bazie gipsu budowlanego zawierającego 10 % udział materiału zmiennofazowego wytwarzane przez firmę Rubitherm.

Praca ta jest częścią większej aktywności naukowej na temat wykorzystania materiałów zmiennofazowych w konstrukcjach budowlanych oraz ich wpływu na właściwości badanego materiału, a w szczególności na współczynnik przewodzenia ciepła.

2. STANOWISKO POMIAROWE

Zaprojektowano stanowisko badawcze umożliwiające zbadanie wpływu materiału zmiennofazowego na współczynnik przewodzenia ciepła. W związku z tym że materiałem nośnym dla PCM-u jest materiał budowlany, projekt stanowiska oparto na aparacie płytowym opisanym w normie ISO 8302. Układ pomiarowy został tak zaprojektowany, aby współczynnik przewodzenia ciepła mógł być wyznaczany dla różnych materiałów w zwartej formie. Schemat ideowy stanowiska przedstawiono na rys. 1.



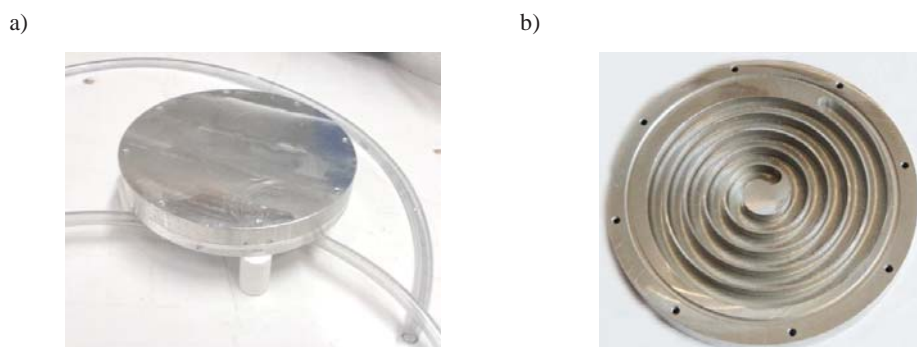
Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego: 1 – izolacja z wełny mineralnej, 2 – grzałka płaska, 3 – termoelementy, 4 – materiał kompozytowy, 5 – wymiennik ciepła, 6 – izolacja styropianowa, 7 – autotransformator, 8 – rejestrator temperatury

Zaprojektowany aparat przeznaczony jest do wytwarzania wewnątrz próbki w kształcie walca i średnicy 150 mm o płaskich, równoległych powierzchniach, jednokierunkowego strumienia ciepła o stałej gęstości w warunkach stanu ustalonego. Kształt walca zastosowano w celu uniknięcia mostków termicznych.

Wymiana ciepła wymuszona jest poprzez organicznie próbki dwiema płaskimi izotermicznymi powierzchniami nazywanymi dalej zespołem grzejnym i chłodzącym. Zespół grzejny (rys. 2) stanowi płaska grzałka oporowa (2) o średnicy 150 mm (rys. 1) podłączoną do układu umożliwiającego regulację jej mocy (8). Zespół chłodzący (rys. 3a, b) stanowi wymiennik ciepła (5) wykonany z materiału o wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła (aluminium). Przez wymiennik przepływa woda o stałej temperaturze.



Rys. 2. Zespół grzejny



Rys. 3. (a), (b) Zespół chłodzący

Pomiędzy próbką a zespołem grzejnym i chłodzącym umieszczona jest okrągła płyta aluminiowa w celu zapewniania równomiernego rozkładu temperatury. W elemencie tym nawiercono otwory o średnicy około 1,5 mm w których umieszczono termopary po 4 na każdą ze stron. Zastosowanie takiego rozwiązania podyktowane jest koniecznością uzyskania jednorodnej powierzchni próbki i aparatu (powinny być idealnie płaskie). Wprowadzenie termopar bezpośrednio przy powierzchni próbki spowodowałoby niejednorodność powierzchni, a co za tym idzie opory kontaktu nie byłyby równomiernie rozłożone między próbką a płytami zespołu grzejnego i chłodzącego. Konsekwencją niejednorodności powierzchni byłby nierównomierny rozkład strumienia ciepła oraz nierównomierne pole temperatur w próbce.

Aby zapewnić dobry kontakt cieplny oraz dokładną odległość między płytami aparatu zastosowano układ powtarzalnej stałej siły dociskowej. Całość aparatu jest zaizolowana i umieszczona w pomieszczeniu z możliwością kontrolowania temperatury otoczenia.

3. WYKONANIE BADAŃ

Zaprojektowane stanowisko wykonano w celu zbadania wpływu PCM-ów na współczynnik przewodzenia ciepła. Do wstępnych badań wybrano PCM o temperaturze topnienia bliskiej temperaturze pokojowej. Materiał zmiennofazowy zastosowany w tym badaniu została wyprodukowany przez firmę Rubitherm:

- numer modelu: PX27,
- temperatura topnienia wynosi: 25-28 °C,
- ciepło topnienia: 102 kJ/kg,
- gęstości wynosi: 0,65 kg/dm³.

Stabilny kształt uzyskany jest poprzez pochłanianie PCM-u w porowatej stałej substancji, która utrzymuje swój kształt, bez wycieków, nawet kiedy PCM się topi. W wykorzystywanym PCM-ie nośnikiem jest krzemionka hydrofilizowana. Jako materiał budowlany wybrano gips budowlany, ze względu na swoją wysoką wytrzymałość, łatwość obróbki i dobre osiągi ognioodporne.

Przed wykonaniem próbki docelowej konieczne było stworzenie procedury przygotowującej ją do badań. W związku z tym że głównym składnikiem próbki jest materiał budowlany procedurę oparto o normę: PN EN 13279 – 2 Spoiwa gipsowe i tynki gipsowe część 2.

Procedura opiera się na trzech głównych punktach:

- przygotowanie materiału;
- wykonie próbki;
- sezonowanie.

3.1. PRZYGOTOWANIEM MATERIAŁU DO BADAŃ

W zależności od typu materiału budowlanego procedurę wykonania próbki należy poprzedzić wyznaczeniem stosunku woda/ spoiwo zgodnie z procedurą określoną w normie PN EN 13279 – 2.

Stosunek woda/ spoiwo R wyznacza się ze wzoru:

$$R = \frac{100}{m_1 - m_0} \quad (1)$$

gdzie:

m_0 - masa naczynia szklanego + masa wody w g;

m_1 - masa naczynia szklanego + masa wody + masa spoiwa w g.

Poniżej przedstawiono procedurę wyznaczania wielkości R dla spoiw gipsowych.

Określenie wartości ułamkowej woda/spoiwo polega na wlaniu 100 g wody do cylindrycznego szklanego naczynia o wymiarach zgodnych z normą [6]. Następnie należy wyznaczyć masę - m_0 , z dokładnością do $\pm 0,5$ g. W kolejnym kroku zasypujemy równomiernie powierzchnię wody spoiwem gipsowym w taki sposób, aby po 30 s zaczyn gipsowy osiągnął pierwsze oznakowanie, a po 60 s drugie oznakowanie. Po osiągnięciu przez spoiwo gipsowe wysokości większej niż 2 mm powyżej powierzchni wody kończymy zasypywanie. Należy podać czas zasypywania. W kolejnym kroku ustalamy masę m_1 , z dokładnością do $\pm 0,5$ g. Badanie powinno być powtarzane, co najmniej 2 razy.

Z przeprowadzonego doświadczenia na gipsie budowlanym z 10% udziałem PCM otrzymano $R = 0,53$.

Wykonanie próbki poprzedzone jest również wyznaczeniem wilgotność w danej chwili. Wilgotność ma ogromny wpływ na przewodność cieplną materiału - wzrasta w miarę jej wzrostu.

Zawartość wody w materiale (w danej chwili), określa się wzorem:

$$W = \frac{m_w - m_s}{m_s} \quad (2)$$

gdzie:

m_w – masa próbki materiału w stanie wilgotnym (w danej chwili) [kg],

m_s – masa próbki materiału w stanie suchym (kiedy kolejne ważenia w odstępach dobowych nie wykazują różnic – wysuszonej do stałej masy) [kg].

Temperatura suszenia wyrobów gipsowych wynosi około 70°C.

3.2. WYKONANIE PRÓBKII

Przed przystąpieniem do przygotowania próbki (próbek) określa się pożądaną ilość PCM-u (PX 27). Ilość ta określana jest na podstawie udziałów objętościowych substancji. Następnie umieszczamy gips budowlany i PCM w suszarce laboratoryjnej w celu usunięcia wody związanej powierzchniowo. Usunięcie wody spowoduje zmniejszenie wagi. Tak wysuszone materiały mieszamy w tym samym pojemniku. Po zmieszaniu, wlewamy określoną ilość wody do pojemnika i mieszamy ponownie. Tak przygotowaną mieszaninę wlewamy do wcześniej przygotowanej formy. W celu usunięcia wszystkich pęcherzyków powietrza wypełnioną formę należy podnieść na wysokość 10 mm i opuścić [6]. Po zastygnięciu należy usunąć nadmiar zaprawy. Próbkę wyciągnąć z formy po uzyskaniu odpowiedniej wytrzymałości.

Powierzchnię próbki do badań należy wyrównać, używając do tego papieru ściernego, aż do uzyskania dobrego kontaktu między próbką i aparatem. Powierzchnie powinny być równoległe na całej grubości próbki, z tolerancją do 2%.

Na rys. 4a i 4b przedstawiono próbki wykonane zgodnie z opisaną procedurą.

a)



b)



Rys. 4.(a) Próbka 1 - wykonana z czystego gipsu budowlanego,
(b) Próbka 1a - z dodatkiem 10% materiału zmiennofazowego

3.3. SEZONOWANIE

Po określeniu masy próbki (próbek), należy je wysuszyć do osiągnięcia stałej masy w stałej temperaturze (przez 7 dni w 23 °C i wilgotności około 50 %). Następnie należy je osuszyć w temperaturze 40 ±2 °C do stałej masy, a później schłodzić do temperatury pokojowej. Względą stratę masy oblicza się na podstawie masy określonej przed i po suszeniu.

W związku z tym iż wilgoć znacznie wpływa na współczynniki przewodzenia ciepła należy zapobiec pochłanianiu znaczących ilości wilgoci z powietrza w laboratorium. Zaleca się, aby próbka była umieszczana w aparacie pomiarowym bezpośrednio, po okresie suszenia.

4. PRZEPROWADZANIE DOŚWIADCZENIA

Przygotowano do badań zgodnie z wyżej określoną procedurą dwie próbki:

- **1** – wykonana z czystego gipsu budowlanego,
- oraz **1a** – wykonaną w 90 % z gipsu i w 10 % z PCM-u.

Tak przygotowane próbki poddano badaniu w aparacie płytowym, opisanym w punkcie 2 tego referatu.

Reprezentowany sposób wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła opiera się na bezpośrednim pomiarze zadanych wielkości tj.: U - napięcia, I - natężenia, ΔT - przyrost temperatury, δ - grubości, A - pola powierzchni.

Wartość strumienia przewodzonego ciepła wyznaczona jest jako iloczyn napięcia i natężenia prądu przepływającego przez grzałkę oporową. Strumień ciepła pomniejszony jest o straty od strony zespołu grzejnego oraz pobocznic o około 20 %. Wartość ta została określona doświadczalnie. Po uwzględnieniu wielkości mierzonych współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczamy z równia:

$$\lambda = f(U, I, T, \delta, A) = \frac{U \cdot I \cdot \delta}{A \cdot \Delta T}, \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (3)$$

gdzie:

U - napięcia prądu przepływającego przez grzałkę [V],

I - natężenia prądu przepływającego przez grzałkę [A],

ΔT - przyrost temperatury [K],

δ - grubości próbki [m],

A - powierzchnia wymiany ciepła [m²]

Główną zaletą takiej metody pomiaru jest prostota wzorów obliczeniowych. Natomiast do wad zaliczyć trzeba stosunkowo długi czas oczekiwania na stan ustalony wymiany ciepła w próbce.

W celu wyznaczenia wpływu PCM-ów na współczynnik przewodzenia ciepła wykonano trzy serie pomiarów dla każdej z próbek dla dwóch mocy: 1,8 W i 2,46 W. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła próbki 1

	1	2	3	$\bar{\lambda}$
Moc	W/(m · K)	W/(m · K)	W/(m · K)	W/(m · K)
1,80 W	0,439	0,426	0,431	0,432 ±0,08
2,46 W	0,450	0,445	0,448	0,447 ±0,08

Tabela 2. Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła próbki 1a

	1	2	3	$\bar{\lambda}$
Moc	W/(m · K)	W/(m · K)	W/(m · K)	W/(m · K)
1,80 W	0,277	0,284	0,280	0,280 ±0,08
2,46 W	0,298	0,302	0,285	0,285 ±0,08

5. WNIOSKI

We wszystkich seriach pomiarowych zauważono, że monitorowane temperatury na powierzchni zespołu grzejącego lub chłodzącego były zbliżone do siebie w każdej chwili pomiaru z tolerancją $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Taka jednorodność potwierdza wcześniejsze założenie o braku mostków termicznych i braku niejednorodności powierzchni.

Zauważono również, że otrzymana wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla próbki wykonanej z gipsu budowlanego koreluje z wielkością podawaną w normie [7] dla tego typu materiału (tj. $\rho=1200\text{ kg/m}^3$; $\lambda=0,43\text{ W/m}\cdot\text{K}$). Taki wynik pozwala założyć, że zaprojektowano stanowisko działa poprawnie i może być wykorzystane w dalszych badaniach. Otrzymane wyniki potwierdziły również to, że współczynnik przewodzenia ciepła zależy w znacznej mierze od różnicy temperatur.

Odnosnie próbki z dodatkiem materiału zmiennofazowego (próbka 1a) otrzymano około 30 % spadek współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od próbki odniesienia 1. Pozwala to stwierdzić, że PCM wpływa w znacznym stopniu na przewodność cieplną materiału kompozytowego, co prowadzi do konieczności pomiaru tej wielkości w zależności od typu i udziału materiału zmiennofazowego.

6. PODSUMOWANIE

Praca ta jest częścią większej aktywności naukowej na temat wykorzystania materiałów zmiennofazowych w konstrukcjach budowlanych oraz ich wpływu na właściwości badanego materiału w szczególności na współczynnik przewodzenia ciepła. Autorka niniejszego referatu przeprowadziła wstępne badania na gipsie budowlanym z dodatkiem 10% udziału PCM-u.

Badania przedstawione w niniejszej pracy skierowane były na dwa główne cele: (1) przedstawienie oraz sprawdzenie stanowiska umożliwiającego pomiar przewodności cieplnej oraz (2) rozwój i charakteryzacja nowego materiału budowlanego, oparte go na włączeniu PCM-u do zapraw tynkarskich, wykorzystywanych w wewnętrznych powierzchniach ścian w celu zwiększenia komfortu cieplnego budynków.

LITERATURA

- [1] **Cabezaa L. F., Castell A., Barrenechea C., de Gracia A., Fernández A.I.**, *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1675–1695, 2011.
- [2] **Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D.**, *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 318–45, 2009.
- [3] **Conrad Voelker** *Temperature reduction due to the application of phase change materials*”, *Energy and Buildings* 40, 937–944, 2008.
- [4] **Zhou D., Zhao C.Y., Tian Y.**, *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*, *Applied Energy* 12, 593–605, 2012.
- [5] **Heim D., Clarke Joe A.**, *Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r*, *Energy and Buildings* 36, 795–805, 2004.
- [6] **PN EN 13279 – 2.**
- [7] **EN ISO 10456.**