

Analiza przewodności cieplnej przegród z betonu komórkowego w zależności od zmian wilgotności

Zbigniew Suchorab ¹, Danuta Barnat-Hunek ²

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Politechnika Lubelska, e-mail: Z.Suchorab@fenix.pol.lublin.pl

² Wydział Budownictwa i Architektury, Instytut Budownictwa, Politechnika Lubelska, e-mail: d.barnat-hunek@pollub.pl

Streszczenie: Artykuł dotyczy zjawiska zawilgocenia przegród budowlanych z betonu komórkowego. Woda zwiększając przewodnictwo cieplne materiałów konstrukcyjnych, prowadzi do zwiększonych strat ciepła w okresie zimowym. Konsekwencją tego zjawiska jest obniżenie komfortu cieplnego pomieszczeń. Beton komórkowy jest materiałem, który intensywnie wchłania wodę, przy czym proces odparowania wody z gazobetonu jest znacznie dłuższy. Kapilarno-porowata struktura tego ośrodka czyni go bardzo podatnym na wpływ wody, stąd konieczna jest szczegółowa analiza wartości współczynnika przewodzenia λ w funkcji wilgotności. Przeanalizowano i porównano wpływ zmian wilgotności na parametry cieplne betonu komórkowego odmiany 400 i 600 przy wykorzystaniu technik reflektometrycznych TDR.

Słowa kluczowe: przewodność cieplna, wilgotność, techniki reflektometryczne, beton komórkowy.

1. Wstęp

W zawilgoconych budynkach następuje przyspieszona destrukcja materiałów budowlanych i elementów wyposażenia, rozwijają się procesy korozji biologicznej i chemicznej, wzrastają koszty eksploatacji. Zawilgocenie wpływa negatywnie na samopoczucie i zdrowie użytkowników oraz jest postrzegane jako coraz ważniejszy problem z punktu widzenia inżynierii środowiska.

Czas wysychania zawilgoconych elementów zależy od konstrukcji przegród oraz warunków otoczenia. Najczęściej jednak nie przekracza 3 lat i jest przyczyną zwiększonego zużycia energii cieplnej ze względu na większą przewodność cieplną przegród zewnętrznych.

W przypadku betonu komórkowego, charakteryzującego się większą porowatością, zasięg zjawiska może być jeszcze większy. Woda kapilarna ma destrukcyjny wpływ na konstrukcję, obniża parametry konstrukcyjne, cieplne materiałów oraz wytwarza niekorzystny mikroklimat w pomieszczeniach dotkniętych tym zjawiskiem. W pomieszczeniach o normalnym zawilgoceniu zjawisko kondensacji występuje również w przypadku niedostatecznej izolacyjności termicznej ścian, mostków termicznych oraz w narożach.

Woda zawarta w przegrodach budowlanych w istotny sposób wpływa na proces przepływu ciepła. Zmienia ona parametry cieplne konstrukcji – współczyn-

nik przewodzenia ciepła λ , a więc współczynnik przenikania ciepła U . Zwiększając przewodnictwo cieplne materiałów konstrukcyjnych, prowadzi do zwiększonych strat ciepła w okresie zimowym.

W dalszym ciągu wiele zagadnień, które mogą poprawić jakość środowiska wewnętrznego pomieszczeń pozostało nierozwiązanych. Należą do nich głównie zagadnienia związane z monitoringiem oraz oceną procesów wilgotnościowych zewnętrznych przegród budowlanych oraz ich wpływem na wartości parametrów cieplnych λ oraz U .

2. Cel badań

Beton komórkowy jest jednym z najpopularniejszych materiałów budowlanych, ponieważ zapewnia dużą izolacyjność cieplną, przy jednocześnie dobrych własnościach wytrzymałościowych, dlatego jest bardzo chętnie wykorzystywany jako materiał do budowy przegród zewnętrznych i wewnętrznych.

Celem poprawy parametrów cieplnych obiektów budowlanych jest minimalizacja wielkości współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(mK)], co wiąże się ze zmniejszeniem wymiany ciepła przez zewnętrzne przegrody budowlane. Od wartości tego współczynnika zależy przewodnictwo cieplne w danym materiale. Woda, będąc dobrym przewodnikiem energii cieplnej zwiększa przewodnictwo cieplne gazobetonu, obniżając jego parametry termiczne [4]. Kapilarno-porowata struktura tego ośrodka czyni go bardzo podatnym na wpływ wody, stąd koniecznym jest szczegółowa analiza wartości λ w funkcji wilgotności.

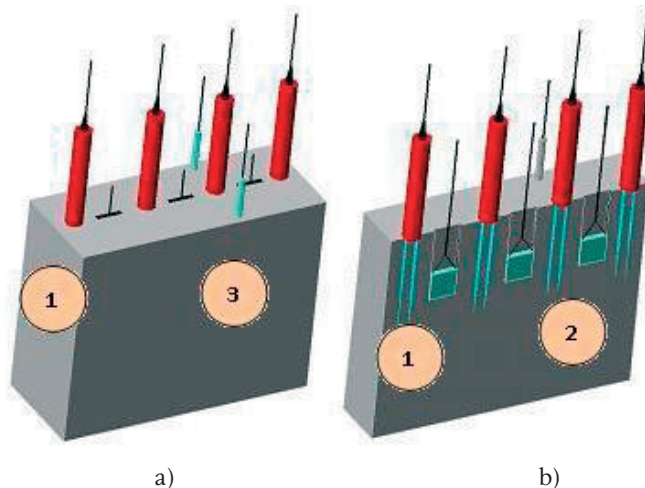
Celem wykonanego badania był pomiar wartości współczynnika przewodzenia ciepła w betonie komórkowym o gęstościach pozornych 400 oraz 600 kg/m³ w stanie suchym oraz przy różnej zawartości wody w ośrodku.

3. Metodyka badań

3.1. Materiał i aparatura badawcza

Do realizacji pomiarów wykorzystano następującą aparaturę i materiały:

- System komór klimatycznych do generowania warunków środowiskowych po przeciwnych stronach próbki.
- Aparaturę TDR, dzięki której możliwe było wyznaczanie zarówno zawartości wody w materiale budowlanym oraz temperatury – analogowe mierniki temperatury wbudowane w sondę TDR LP/mts, jak i cyfrowe mierniki Dallas.
- Ogniwa Peltier’a – wykorzystane zostały tutaj do pomiarów strumienia cieplnego.
- Psychrometr, użyty tutaj jako precyzyjny mikrowoltomierz odczytujący dane z ogniwa Peltier’a.
- Próbki betonu komórkowego o gęstościach pozornych 400 i 600 kg/m³.



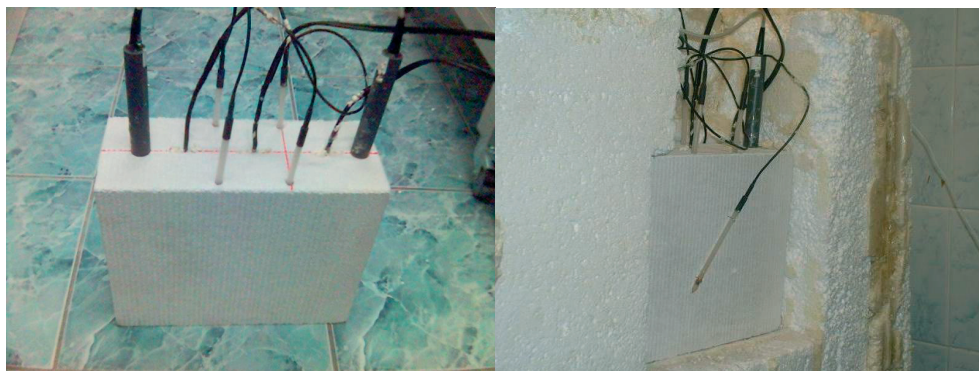
Rys. 1. Próbką betonu komórkowego 400 zastosowana do badania współczynnika przewodzenia ciepła, a) widok, b) przekrój, 1 – sondy TDR, 2 – ogniwa Peltiera, 3 – czujniki temperatury Dallas.

Fig. 1. Aerated concrete 400 sample applied for heat conductivity sample determination, a) view, b) cross-section, 1 – TDR probes, 2 – Peltier modules, 3 – temperature sensors (Dallas).

3.2. Metodyka pomiaru

W celu wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła λ przygotowano cztery próbki betonu komórkowego (dwie o gęstości 400 i dwie 600 kg/m³) i wymiarach 12×24×30 cm.

Próbki zaopatrzone w czujniki pomiarowe – sondy TDR, czujniki temperatury Dallas oraz ogniwa Peltier’a (Rys. 1, 2). Sondy TDR oraz ogniwa Peltier’a umieszczono w jednej płaszczyźnie, żeby znajdowały się w jednej izotermie oraz płaszczyźnie o jednakowej zawartości wilgoci. Dzięki temu pomiar strumienia cieplnego na każdym ogniwie Peltier’a dokonywany był w porównywalnych warunkach. Czynnikiem, który mógł spowodować różnice odczytów była niejednorodność badanych próbek.



Rys. 2. Próbką betonu komórkowego 600 zastosowana do badania współczynnika przewodzenia ciepła.

Fig. 2. Aerated concrete 600 sample applied for heat conductivity sample determination.

Zewnętrzne obrzeża próbek przygotowanych w powyższy sposób zaizolowano termicznie przy pomocy styropianu (Rys. 2), celem izolacji próbki od wpływów środowiska zewnętrznego i umieszczono na specjalnym stoliku pomiędzy komorami klimatycznymi wyposażonymi w urządzenia pomiarowe (Miernik TDR oraz Psychrometr). Minimalne szczeliny zaizolowano pianką poliuretanową, celem wyeliminowania wszelkich nieszczelności cieplnych układu.

Uruchomiono stanowisko pomiarowe – mierniki oraz mechanizm chłodząco-grzejny komór klimatycznych (komora lewa C1 generowała niskie temperatury, a komora prawa – C2 generowała temperatury wysokie). Temperatury w komorach klimatycznych sekwencyjnie zmieniano, celem weryfikacji wpływu gradientu temperatur na wartość strumienia cieplnego odczytywanego przez ogniwo Peltier’a. Dzięki temu uzyskano zależności wielkości strumienia cieplnego w zależności od gradientu temperatur. Analiza ta umożliwiła wykonanie odczytów strumienia cieplnego w różnych zakresach temperaturowych, a w konsekwencji pozwoliła na wyznaczenie wartości przewodnictwa cieplnego betonu komórkowego.

W przypadku pomiarów współczynnika λ dla betonów komórkowych w stanie suchym zastosowanie sond TDR nie było konieczne (wartość wilgotności materiału była zerowa lub zbliżona do zera). Zdecydowano się jednak z nich skorzystać celem kontroli poprawności przeprowadzanych badań. Obserwowano, czy nie wzrasta wilgotność materiału w sposób nieprzewidziany oraz wykorzystując wbudowane czujniki temperatury w sondy TDR monitorowano rozkład temperatur w próbce.

Próbki betonu komórkowego nasycone wodą uzbrojono w aparaturę pomiarową podobnie jak próbki wysuszone. Wykorzystując sondy TDR oraz ogniwo Peltier’a w układzie komór klimatycznych udało się określić wpływ wilgotności materiału na strumienie ciepła odczytane w ogniwie Peltier’a, a w konsekwencji jego wpływ na wartość współczynnika λ .

4. Analiza wyników badań

W oparciu o przeprowadzone badania wyznaczono wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ dla betonów komórkowych 400 oraz 600.

Wartości współczynników przewodzenia λ wyznaczono z zależności:

$$(q = -\lambda gradT), \quad (1)$$

w której dla realizowanego eksperymentu: q – strumień cieplny wyznaczony przy pomocy ogniwa Peltier’a [W/m^2], λ – mierzona wartość – współczynnik przewodnictwa cieplnego [W/mK], $gradT$ – gradient temperatur pomiędzy punktami pomiarowymi temperatury (w przypadku jednowymiarowego przepływu: $gradT = \Delta T/\Delta x$ [K/m]), Δx – odległość pomiędzy punktami pomiarowymi lub szerokość próbki [m].

Dla betonu komórkowego o gęstości 400 kg/m^3 uzyskano współczynnik λ dla trzech czujników odpowiednio 0,108; 0,103 oraz 0,085 W/mK . Średnia wartość tego parametru z wszystkich pomiarów wynosi 0,099. Współczynniki korelacji wynoszą odpowiednio dla każdej serii 0,996, 0,985 oraz 0,998, co może być dowodem na dobrą jednorodność badanego betonu komórkowego (odchylenie standardowe $s = 0,012\%$, współczynnik zmienności $v = 12,26\%$). Dane literaturowe [2, 5] wskazują, że wartość tego współczynnika, może w stanach suchych osiągać

wartości zbliżone do 0,1W/mK, co potwierdza słuszność przyjętej metody badawczej (według danych producenta 0,11).

Tabela 1. Zależność strumienia ciepłego zmierzona przy pomocy ogniwa Peltier'a w zależności od gradientu temperatur po przeciwnych stronach próbki w betonie komórkowym o gęstości 400 kg/m³.

Table 1. Heat flux dependence (determined using Peltier modules) on temperatures gradient on both sides of the aerated concrete 400kg/m³ sample.

Δq (K, °C)	q_1	q_2	q_3	λ_1	λ_2	λ_3
	[W/m ²]			[W/mK]		
9,8	21,00	18,71	16,55	0,107	0,095	0,084
9,9	20,96	18,43	16,45	0,106	0,093	0,083
9,8	20,53	18,08	16,16	0,105	0,092	0,082
9,9	20,99	18,45	16,56	0,106	0,093	0,084
15,5	32,85	32,83	24,96	0,106	0,106	0,081
15,8	34,02	33,91	25,93	0,108	0,107	0,082
15,8	34,75	34,54	26,35	0,110	0,109	0,083
15	34,88	34,54	24,74	0,116	0,115	0,082
9,7	20,64	20,63	16,70	0,106	0,106	0,086
7,1	14,59	14,54	12,38	0,103	0,102	0,087
6,1	13,40	12,98	11,44	0,110	0,106	0,094
4,6	10,03	10,02	8,92	0,109	0,109	0,097
wsp. korelacji (<i>r</i>)	0,996	0,985	0,998			
	średnie serii			0,108	0,103	0,085
	średnia wartość			0,099		
	odchylenie standardowe <i>s</i> [%]			0,012		
	współczynnik zmienności <i>v</i> [%]			12,26		

Tabela 2. Zależność strumienia ciepłego zmierzona przy pomocy ogniwa Peltier'a w zależności od gradientu temperatur po przeciwnych stronach próbki w betonie komórkowym o gęstości 600 kg/m³.

Table 2. Heat flux dependence (determined using Peltier modules) on temperatures gradient on both sides of the aerated concrete 600 kg/m³ sample.

ΔT (K, °C)	q_1	q_2	q_3	λ_1	λ_2	λ_3
	[W/m ²]			[W/mK]		
20,4	38,55	40,20	38,71	20,400	0,151	0,158
20,45	39,58	41,27	39,42	20,450	0,155	0,161
20,2	38,69	40,42	38,90	20,200	0,153	0,160
18,5	34,77	36,42	34,80	18,525	0,150	0,157
17,8	34,03	35,57	33,89	17,8	0,153	0,160
17,1	33,58	35,04	33,29	17,125	0,157	0,164
16,7	32,93	34,39	32,68	16,65	0,158	0,165
wsp. korelacji (ρ)	0,981	0,983	0,987			
	średnia serii			0,154	0,161	0,154
	średnia wartość			0,156		
	odchylenie standardowe <i>s</i> [%]			0,004		
	współczynnik zmienności <i>v</i> [%]			2,59		

Z kolei beton komórkowy 600 kg/m³ wykazywał średnią wartość współczynnika λ równą 0,156 W/mK dla wszystkich serii ($s = 0,004\%$, $v = 2,59\%$), natomiast wg danych producenta 0,17.

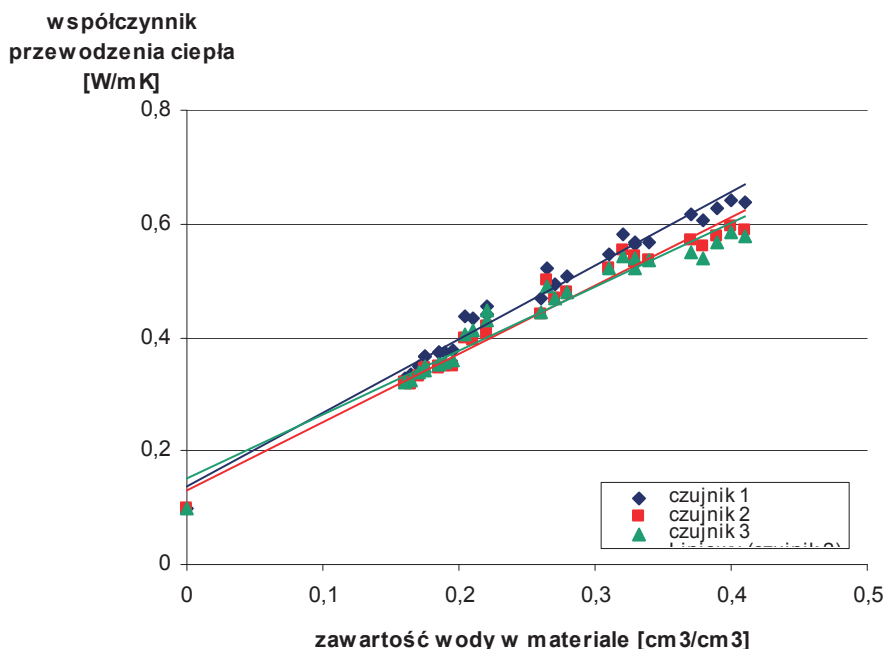
Według danych zestawionych w Tabeli 1 dla betonu komórkowego 400 współczynnik λ powinien wynosić ok. 0,10 W/mK, z kolei 600 – ok. 0,17 W/mK. Bardzo niskie wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności świadczą o znikomym błędzie pomiarowym, zwłaszcza dla odmiany 600.

W przypadku próbek nasyconych wodą i ulegającym ciągłej, monitorowanej desorpcji celem pomiaru było ustalenie współczynnika przewodzenia ciepła λ w zależności od zawartości wody w próbce θ . Istotne było, zatem w tym eksperymencie zastosowanie sond TDR, dzięki którym możliwe jest określenie wilgotności ośrodka. Uzyskano w ten sposób zestaw następujących danych w określonym czasie pomiaru: zawartość wody, gradient temperatur, strumień ciepła.

Tabela 3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności w betonie komórkowym 400.

Table 3. Heat conductivity coefficient dependence on moisture in aerated concrete 400.

zawartość wody	λ_1	λ_2	λ_3	$\bar{\lambda}$	odchylenie standardowe	wsp. zmienności
[cm ³ /cm ³]	[W/mK]				s [%]	v [%]
0,41	0,637	0,590	0,578	0,602	0,031	5,180
0,4	0,641	0,595	0,584	0,606	0,03	4,990
0,39	0,628	0,578	0,569	0,592	0,032	5,369
0,38	0,606	0,559	0,540	0,569	0,034	5,971
0,37	0,615	0,571	0,550	0,579	0,033	5,729
0,34	0,569	0,537	0,534	0,546	0,019	3,553
0,33	0,565	0,533	0,523	0,540	0,022	4,063
0,33	0,569	0,544	0,538	0,550	0,016	2,989
0,32	0,582	0,554	0,542	0,559	0,021	3,672
0,31	0,546	0,522	0,523	0,530	0,014	2,562
0,28	0,506	0,481	0,478	0,488	0,015	3,150
0,27	0,494	0,470	0,470	0,478	0,014	2,899
0,265	0,522	0,499	0,491	0,504	0,016	3,193
0,26	0,467	0,441	0,445	0,451	0,014	3,104
0,22	0,455	0,419	0,446	0,440	0,019	4,258
0,22	0,440	0,405	0,430	0,425	0,018	4,242
0,21	0,433	0,396	0,414	0,414	0,019	4,469
0,205	0,436	0,398	0,405	0,413	0,02	4,897
0,195	0,376	0,350	0,358	0,361	0,013	3,689
0,19	0,374	0,348	0,357	0,360	0,013	3,668
0,185	0,374	0,346	0,354	0,358	0,014	4,029
0,185	0,375	0,348	0,351	0,358	0,015	4,134
0,175	0,368	0,347	0,343	0,353	0,013	3,804
0,175	0,367	0,346	0,348	0,354	0,012	3,274
0,17	0,350	0,331	0,337	0,340	0,01	2,857
0,165	0,334	0,318	0,324	0,325	0,008	2,487
0,16	0,327	0,319	0,319	0,322	0,005	1,434
0	0,099	0,099	0,099	0,099	0,000	0,000
wsp. korelacji (r)	0,988	0,985	0,976	0,984		



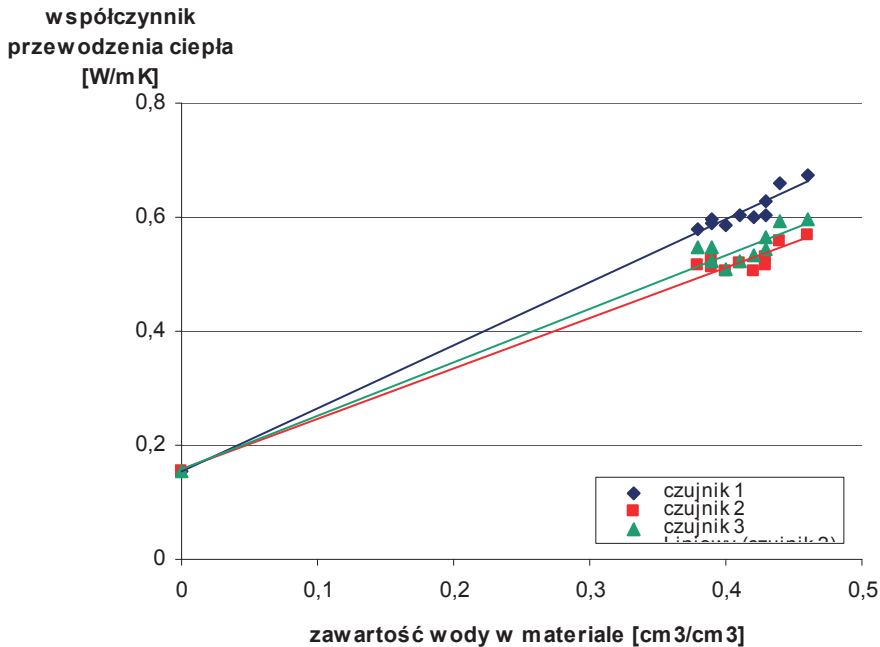
Rys. 3. Współczynnik przewodzenia ciepła w funkcji wilgotności materiału dla betonu komórkowego 400.

Fig. 3. Heat conductivity coefficient in relation to moisture in aerated concrete 400.

Tabela 4. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności w betonie komórkowym 600.

Table 4. Heat conductivity coefficient dependence on moisture in aerated concrete 600.

zawartość wody [cm ³ /cm ³]	λ_1	λ_2	λ_3	$\bar{\lambda}$	odchylenie standardowe s [%]	wsp. zmienności v [%]
0,46	0,673	0,570	0,596	0,613	0,054	8,738
0,44	0,660	0,558	0,592	0,603	0,052	8,613
0,43	0,629	0,530	0,565	0,574	0,05	8,746
0,43	0,604	0,517	0,545	0,555	0,044	8,002
0,42	0,599	0,507	0,532	0,546	0,048	8,713
0,41	0,605	0,518	0,524	0,549	0,049	8,851
0,40	0,585	0,505	0,508	0,533	0,045	8,508
0,39	0,588	0,512	0,522	0,541	0,041	7,633
0,39	0,598	0,525	0,549	0,558	0,037	6,668
0,38	0,579	0,515	0,547	0,547	0,032	5,850
0,00	0,156	0,156	0,156	0,156	0	0,000
wsp. korelacji (r)	0,996	0,992	0,988	0,994		



Rys. 4. Współczynnik przewodzenia ciepła w funkcji wilgotności materiału dla betonu komórkowego 600.

Fig. 4. Heat conductivity coefficient in relation to moisture in aerated concrete 600.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów sporządzono charakterystykę przewodnictwa cieplnego betonu komórkowego w funkcji zawartości wody. Dane przedstawia Tabela 5.

Tabela 5. Właściwości cieplne betonu komórkowego uzyskane eksperymentalnie.

Table 5. Heat parameters of aerated concrete determined experimentally.

Badany materiał	λ_{dry}	λ_{mst}
	[W/mK]	[W/mK]·[cm³/cm³]
Beton komórkowy 400	0,105	1,311
Beton komórkowy 600	0,157	0,982

5. Analiza wyników

Uzyskane wyniki można porównać z danymi eksperymentalnymi zawartymi w programie Delphin V4.1.9. Charakterystyki te sporządzono w laboratorium Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie przez zespół R. Plagge. Zaprezentowano tam dane cieplne betonu komórkowego o gęstości pozornej 600 kg/m³. Według tych danych parametr λ_{dry} w stanie suchym wynosi 0,17 W/mK, zaś parametr λ_{mst} wynosi 0,9 W/mK. Z kolei Klemm i in. [2] podają λ_{dry} betonu komórkowego 400 w stanie suchym wynosi ok. 0,1 W/mK, zaś betonu 600 ok. 0,16 W/mK, Gawin i in. [1] 0,11 i 0,16 odpowiednio.

Wartości odchylenia standardowego ($s = 0,005 - 0,054\%$) i współczynnika zmienności ($v = 1,434 - 8,851\%$), obliczone dla wszystkich pomiarów λ w omawianym eksperymencie, świadczą o niewielkim błędzie pomiarowym. Powyższe zestawienie oraz analiza statystyczna wskazują na poprawność zastosowanej metody badawczej.

6. Wnioski

Beton komórkowy 400 posiada mniejszą wartość współczynnika przewodzenia ciepła od betonu komórkowego 600. Należy to tłumaczyć mniejszą gęstością pozorną materiału przy jednakowym składzie fazy stałej. Natomiast charakteryzuje się on większą wartością jednostkowego przyrostu współczynnika λ_{mst} na $\%_{\text{vol}}$. Współczynnik przewodzenia ciepła λ gazobetonu odmiany 400 w stanie suchym jest 6,08 razy mniejszy niż w stanie nasycenia wodą, a w przypadku odmiany 600 – 3,9 razy mniejszy, co można interpretować faktem, iż woda wypełniająca pory w materiale wilgotnym miała większy wpływ na wartość tego parametru. Związane to jest z większym udziałem masowym wody, przy zbliżonej nasiąkliwości materiału.

Należy nadmienić, że beton komórkowy jest materiałem, który intensywnie wchłania wodę, ale w porównaniu np. z cegłą ceramiczną, proces odparowania wody z betonu komórkowego jest znacznie dłuższy. Zjawisko to oraz tak duży wzrost współczynnika przewodzenia ciepła w przypadku wzrostu zawilgocenia, przyczynia się do zwiększenia strat ciepła w sezonie grzewczym, obniżenia komfortu cieplno – wilgotnościowego, pogorszenia mikroklimatu środowiska wewnętrznego.

Dlatego należałoby zwiększyć rangę projektów technologii i organizacji budowy obiektów z betonu komórkowego [3], ale i innych materiałów porowatych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na dokładne opracowania dotyczące metod wykonywania robót budowlanych, w szczególności izolacyjnych czy wentylacji pomieszczeń.

Literatura

- [1] Gawin D., Kosny J., Desjarlais A., *Effect of moisture on thermal performance and energy efficiency of buildings with lightweight concrete walls*, Proc. 2000 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings “Efficiency & Sustainability, 3.149-3.160, Pacific Grove, California (USA), 20-25 August, 2000.
- [2] Klemm P. (red.), *Budownictwo ogólne. Tom 2 (Fizyka budowli)*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2005.
- [3] Stefańska E., Konferencja naukowa: *Ekologia w inżynierii procesów budowlanych. Tom II. Analiza czynników wpływających na zagrzybienie budynków*, Lublin – Kazimierz Dolny, 21-24 maja 1998.
- [4] Werszko D., *Wybrane zagadnienia z techniki cieplnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
- [5] Roels S., Sermijn J., Carmeliet J., *Modelling unsaturated moisture transport in autoclaved aerated concrete: microstructural approach*, Building Physics 2002 – 6th Nordic Symposium (Norway 2002).

The analysis of heat conductivity coefficient of the aerated concrete building barriers depending on moisture changes

Zbigniew Suchorab ¹, Danuta Barnat-Hunek ²

¹ *Environmental Engineering Faculty, Institute of Environmental Protection Engineering, Lublin University of Technology, e-mail: Z.Suchorab@fenix.pol.lublin.pl*

² *Building and Architecture Faculty, Institute of Building, Lublin University of Technology, e-mail: d.barnat-hunek@pollub.pl*

Abstract: The article is sacrificed to the aerated concrete building barriers moisture phenomenon. Water, which increases heat conductivity of building materials is the reason of the increased heat loses during the winter season. The result of this phenomenon is the decrease of indoor heat comfort parameters. Aerated concrete is a strongly water absorbing material with elongated time of water desorption. Capillary-porous structure of the described medium makes is highly prone to water influence what is the reason of the detailed analysis of heat conductivity coefficient in relation to moisture. In this article it is analyzed and compared the influence of moisture changes on heat parameters of the aerated concrete with the bulk densities of 400 and 600 kg/m³ using the reflectometric techniques TDR (Time Domain Reflectometry).

Keywords: heat conductivity, moisture, reflectometric methods, aerated concrete.