

Halina Garbalińska¹, Julia Koprowicz², Gabriela Waszak³
Jarosław Strzałkowski⁴

BADANIA I ANALIZA PORÓWNAWCZA WSPÓŁCZYNNIKÓW PRZEWODZENIA CIEPŁA NAPOWIETRZONYCH I NIENAPOWIETRZONYCH BETONÓW LEKKICH I BETONU ZWYKŁEGO

Wprowadzenie

Betony zwykłe oraz lekkie, przeznaczone do wykonywania przegród zewnętrznych, muszą spełniać restrykcyjne wymogi, odnoszące się do specyficznych warunków ich eksploatacji. Wymogi te w pierwszej kolejności sprowadzają się do zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości (przede wszystkim na ściskanie), ale też zadowalającej trwałości z uwagi na wyeksponowanie przegród zewnętrznych na zmienne wpływy środowiskowe, w tym działanie mrozu. Współcześnie duży nacisk w budownictwie jest kładziony na energooszczędność, zatem beton - jako materiał ścienny - powinien mieć również swój udział w poprawie parametrów cieplnych przegród zewnętrznych.

Każdy kompozyt betonowy składa się z ziaren kruszywa rozproszonych w matrycy cementowej. Z uwagi na to, że kruszywo stanowi dominujący składnik (udział objętościowy ok. 70%), jego dobór podczas sporządzania mieszanki betonowej wywierać będzie decydujący wpływ zarówno na parametry cieplne, jak i mechaniczne. Pozostałe 30% objętości stanowi zaczyn cementowy, który spaja ziarna kruszywa drobnego oraz grubego w kompozyt o założonych właściwościach. Ingerując w celowy sposób w strukturę zaczynu, możemy modyfikować poszczególne właściwości produktu. Przykładowo - rozrzedzając matrycę cementową,

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, e-mail: Halina.Garbalińska@zut.edu.pl

² Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, e-mail: koprowicz.julia@gmail.com

³ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, e-mail: gabrysia232@wp.pl

⁴ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, e-mail: Jaroslaw.Strzalkowski@zut.edu.pl

w wyniku wprowadzenia domieszki napowietrzającej, można uzyskać poprawę mrozoodporności betonu oraz obniżenie jego sorpcyjności kapilarnej, jak również poprawę jego izolacyjności cieplnej. Domieszka napowietrzająca powoduje powstanie dużej liczby bardzo drobnych, równomiernie rozproszonych pęcherzyków powietrza. W czasie mrozów woda znajdująca się w kapilarach, zwiększając swoją objętość, ma możliwość przedostania się do pustych przestrzeni, zapobiegając tym samym rozsadzaniu betonu [1, 2]. Zmodyfikowany w tym kierunku beton cechuje się, niestety, niższymi parametrami wytrzymałościowymi w stosunku do betonu nienapowietrzonego, co szerzej omówiono w artykule [3]. Zawarto tam ocenę porównawczą wytrzymałości na ściskanie napowietrzonych i nienapowietrzonych betonów lekkich (8 receptur) oraz napowietrzonych i nienapowietrzonych betonów zwykłych (4 receptury) o analogicznych składach jak w tabeli 1. Natomiast niniejszy artykuł autorzy poświęcili ocenie skali możliwej modyfikacji kompozytów betonowych w kierunku poprawy ich termoizolacyjności w wyniku obniżenia współczynnika przewodzenia ciepła λ . Przy czym testowaniu podlegał zarówno wpływ rodzaju kruszywa grubego, jak i rozrzedzenia struktury matrycy cementowej za pośrednictwem domieszki napowietrzającej. Pełen opis badań, dotyczących surowców, mieszanek oraz stwardniałych betonów (oceny ich parametrów wytrzymałościowych i cieplnych), zawarty jest w pracy [4].

1. Przebieg badania

Do wykonania mieszanek betonowych wykorzystano trzy rodzaje kruszyw: kruszywo kamienne oraz dwa różne kruszywa lekkie - keramzyt i kruszywo popiołoporytowe. W celu wyeliminowania niekontrolowanego oddziaływania zróżnicowanego składu ziarnowego zdecydowano się na zastosowanie każdorazowo kruszyw grubych tej samej frakcji 4÷8 mm.

Dodatkowo podjęto próbę sprawdzenia możliwości, związanych z rozrzedzeniem struktury matrycy cementowej, w wyniku zastosowania domieszki napowietrzającej. W przypadku poszczególnych mieszanek, sporządzonych na bazie trzech wytypowanych kruszyw, dozowano domieszkę napowietrzającą w zróżnicowanych ilościach: 0,8%, 1,1% oraz 1,4% w stosunku do masy cementu. W każdym przypadku wykonano również mieszanki referencyjne - bez domieszki. W celu wyeliminowania wpływu rodzaju cementu użyto tego samego cementu do wykonania każdej z mieszanek.

W sumie przetestowano dwanaście receptur, które sporządzone zostały z wykorzystaniem trzech wyszczególnionych kruszyw oraz zastosowaniem czterech różnych zawartości domieszki napowietrzającej. Objaśnienia dotyczące symboli zastosowanych do opisu poszczególnych receptur przedstawiono w tabeli 1.

Do sporządzenia ww. receptur posłużono się następującymi składnikami:

- cement - CEM I 42,5 R, tzn. cement portlandzki o wczesnej wytrzymałości i klasie 42,5 MPa; cement ten wyróżnia się szybszym wzrostem wytrzymałości i dużym ciepłem hydratacji,

- woda zarobowa - woda wodociągowa z tego samego ujęcia,
- piasek - frakcji od 0 do 2 mm; produkt wietrzenia skał, który stanowi ziarna minerałów o wymiarach do 2 mm; głównym składnikiem jest kwarc,
- kruszywo kamienne - frakcji od 4 do 8 mm, otrzymywane poprzez mechaniczne rozdrobnienie naturalnych minerałów kamiennych,
- kruszywo popiołoporytowe - frakcji od 4 do 8 mm; podstawowym surowcem jest popiół lotny; kruszywo lekkie, które powstaje poprzez granulację i spiekanie w temperaturze od 1000 do 1350°C,
- keramzyt - frakcji od 4 do 8 mm; kruszywo lekkie otrzymywane poprzez wypalanie w piecu w temperaturze od 900 do 1200°C pęczniących materiałów ilastych.

TABELA 1

Podstawowe dane nt. testowanych mieszanek betonowych

Lp.	Symbol	Rodzaj kruszywa	Zawartość domieszki napowietrzającej [%]
1	B1 - 0	Kruszywo kamienne	0,0
2	B1 - 0,8		0,8
3	B1 - 1,1		1,1
4	B1 - 1,4		1,4
5	B2 - 0	Keramzyt	0,0
6	B2 - 0,8		0,8
7	B2 - 1,1		1,1
8	B2 - 1,4		1,4
9	B3 - 0	Kruszywo popiołoporytowe	0,0
10	B3 - 0,8		0,8
11	B3 - 1,1		1,1
12	B3 - 1,4		1,4

Ustalony skład mieszanek wykonanych na bazie ww. składników przedstawiono w tabeli 2.

Zanim przystąpiono do realizacji badań zasadniczych, w ramach pracy [4] wykonano także serię badań wstępnych dotyczących poszczególnych składników, z których sporządzano kolejne mieszanki betonowe. Przeprowadzono oznaczenie konsystencji normowej zaczynu cementowego, badanie początku i końca wiązania cementu, oznaczenie klasy cementu, jak również wykonano przesiew poszczególnych kruszyw. Dodatkowo przeprowadzono badania konsystencji otrzymanych mieszanek.

W ramach pracy [4] przeprowadzono m.in. badania cieplne w celu wyznaczenia:

- współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/m·K], który charakteryzuje intensywność wymiany ciepła przez dany materiał [5];

- pojemności cieplnej c_v [10^6 J/m³K], która określa zdolność pobierania oraz akumulowania ciepła pochodzącego z otoczenia [5];
- współczynnika dyfuzji termicznej a [10^{-6} m²/s], który opisuje zależność między współczynnikiem przewodzenia ciepła λ oraz pojemnością c_v [6].

TABELA 2

Ilość składników na 1 m³ mieszanki betonowej

Receptura na 1 m ³ mieszanki betonowej	Rodzaj użytego kruszywa	Kruszywo [kg]	Piasek [kg]	Cement [kg]	Woda [kg]	Domieszka [kg]
B1 - 0	Kamienne	1290,7	464,6	387,1	212,9	0,00
B2 - 0	Keramzyt	257,8	602,9	502,4	276,3	0,00
B3 - 0	Pollytag	570,0	619,6	516,4	284,0	0,00
B1 - 0,8	Kamienne	1002,6	360,9	300,7	165,4	2,41
B2 - 0,8	Keramzyt	209,7	490,4	408,7	224,8	3,27
B3 - 0,8	Pollytag	451,9	491,2	409,4	225,2	3,28
B1 - 1,1	Kamienne	1002,6	360,9	300,7	165,4	3,31
B2 - 1,1	Keramzyt	209,7	190,4	408,7	224,8	4,50
B3 - 1,1	Pollytag	451,9	491,3	409,4	225,2	4,50
B1 - 1,4	Kamienne	1002,6	360,9	300,7	165,4	4,21
B2 - 1,4	Keramzyt	209,7	490,4	408,7	224,8	5,72
B3 - 1,4	Pollytag	451,9	491,2	409,4	225,2	5,73

Badania cieplne zostały przeprowadzone za pomocą przyrządu ISOMET 2104 (rys. 1). W celu przeprowadzenia badania sporządzono 36 próbek o przybliżonych wymiarach 14 x 16 x 4 cm. Dokładne wymiary każdej próbki zostały wyznaczone za pomocą suwmiarki - tak, aby na ich podstawie móc precyzyjnie określić gęstość poszczególnych betonów.



Rys. 1. Stanowisko do badań parametrów cieplnych z wykorzystaniem aparatu Applied Precision ISOMET 2104

Przed każdym pomiarem próbki zostały starannie osączone z wilgoci oraz oczyszczone z zanieczyszczeń - w celu zapewnienia dokładnego przylegania sondy do powierzchni testowanego betonu. Dodatkowo w pomieszczeniu, w którym prowadzono pomiary, zapewnione były stabilne warunki temperaturowe (klimatyzacja, pozamykane okna i drzwi).

Badanie docelowe polegało na przyłożeniu odpowiedniej sondy pomiarowej do powierzchni badanego materiału. Zakres pomiarowy sondy ($\lambda = 0,3 \div 2,0$ W/m·K lub $\lambda = 2,0 \div 6,0$ W/m·K) dobierany był stosownie do przewidywanego poziomu przewodności cieplnej badanego materiału. Podczas pierwszego pomiaru, prowadzonego na danej próbce, wprowadzone było oznaczenie położenia głowicy pomiarowej, aby kolejne badania były zawsze przeprowadzane przy tym samym położeniu sondy na powierzchni. Po ułożeniu sondy uruchamiano aparaturę, która w czasie od 10 do 15 minut automatycznie rejestrowała wyniki pomiarów.

Pomiary cieplne wykonano w trzech odstępach czasowych, tzn. po 7 i 28 dniach dojrzewania oraz po zakończonym procesie wysychania. Badania po 7 oraz 28 dniach przeprowadzono na próbkach w stanie zawilgocenia, natomiast ostatnie pomiary wykonywano na próbkach w stanie suchym. Do tego stanu próbki doprowadzono dwuetapowo. Najpierw próbki poddano swobodnemu suszeniu w warunkach laboratoryjnych przez okres 5 tygodni. Następnie próbki suszone były w suszarce w temperaturze ok. 110°C. Dosuszanie do stałej masy trwało łącznie 6 dni.

2. Analiza wyników badań cieplnych

Po przeprowadzeniu wszystkich badań cieplnych opracowano tabelę 3, w której zawarto uśrednione wyniki z poszczególnych pomiarów składowych.

TABELA 3

Uśrednione parametry cieplne z przeprowadzonych badań

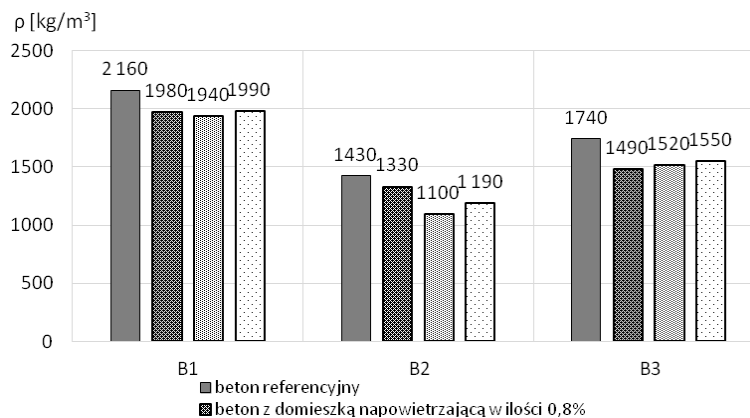
Receptura	λ [W/mK]			c_v [10^6 J/m ³ K]			a [10^{-6} m ² /s]		
	7 dni	28 dni	Próbki suche	7 dni	28 dni	Próbki suche	7 dni	28 dni	Próbki suche
B1 - 0	2,557	2,343	1,853	1,773	1,703	1,903	1,470	1,383	0,974
B2 - 0	1,313	1,290	0,829	1,823	1,743	1,680	0,727	0,739	0,493
B3 - 0	1,407	1,430	0,986	1,663	1,823	1,787	0,847	0,784	0,552
B1 - 0,8	1,920	1,913	1,430	1,887	1,833	1,743	1,020	1,043	0,821
B2 - 0,8	1,167	1,163	0,793	1,857	1,887	1,693	0,629	0,623	0,469
B3 - 0,8	1,093	1,073	0,709	1,610	1,683	1,617	0,686	0,637	0,440
B1 - 1,1	1,890	1,920	1,470	1,683	1,793	1,823	1,123	1,073	0,806
B2 - 1,1	0,752	0,737	0,446	1,807	1,780	1,650	0,417	0,414	0,270
B2 - 1,1	1,051	1,033	0,654	1,767	1,793	1,637	0,592	0,576	0,400
B1 - 1,4	1,773	2,037	1,550	1,467	1,783	1,817	1,203	1,143	0,853
B2 - 1,4	1,603	1,610	1,067	1,917	1,757	1,827	0,840	0,920	0,585
B3 - 1,4	1,103	1,110	0,735	1,700	1,693	1,687	0,648	0,656	0,436

W niniejszym artykule skupiono się na analizie przewodności cieplnej jako podstawowym parametrze, decydującym o jakości cieplnej materiałów przewidzianych do zastosowania w zewnętrznych przegrodach budowlanych.

Na przewodność cieplną materiałów wywiera wpływ przede wszystkim ich wewnętrzna struktura. Z tego względu przebadano rozmaite betony, silnie zróżnicowane rodzajem kruszywa grubego oraz porowatością matrycy cementowej. Dzięki temu przetestowano, jak duży wpływ na przewodność cieplną wywiera porowatość i związana z nią gęstość produktu.

Charakterystyczną cechą większości materiałów budowlanych jest to, że składają się one z substancji stałej oraz porów różnego rodzaju i wielkości. W takich przypadkach przenoszenie ciepła odbywa się głównie mechanizmem przewodzenia ciepła przez szkielet. Udział objętościowy substancji stałej odgrywa znaczącą rolę w procesie przewodzenia ciepła. Im większą gęstością objętościową charakteryzuje się materiał, tym większa jest jego przewodność, natomiast im ta gęstość jest mniejsza, tym przewodność jest niższa.

W odniesieniu do każdego testowanego betonu wyznaczono gęstość w stanie suchym. Beton B1 na bazie kruszywa kamiennego, niezależnie od ilości dozowanej domieszki napowietrzającej, wykazywał się dużo większą gęstością objętościową w porównaniu do betonów lekkich B2 oraz B3. Otrzymane gęstości objętościowe (rys. 2) w stanie suchym w przypadku betonów lekkich oscylowały w granicach od 1100 do 1740 kg/m³, natomiast w przypadku betonów zwykłych plasowały się w przedziale od 1940 do 2160 kg/m³.

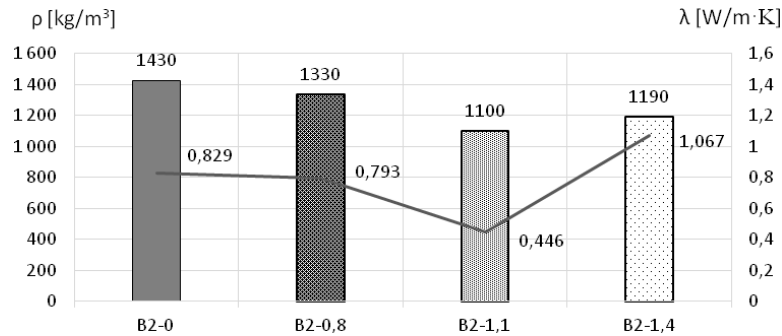


Rys. 2. Uśrednione gęstości objętościowe poszczególnych betonów w zależności od ilości domieszki

Na rysunku 3 zaprezentowano graficznie zależność pomiędzy współczynnikiem przewodzenia ciepła a gęstością objętościową - na przykładzie betonów B2, wykonanych na bazie keramzytu.

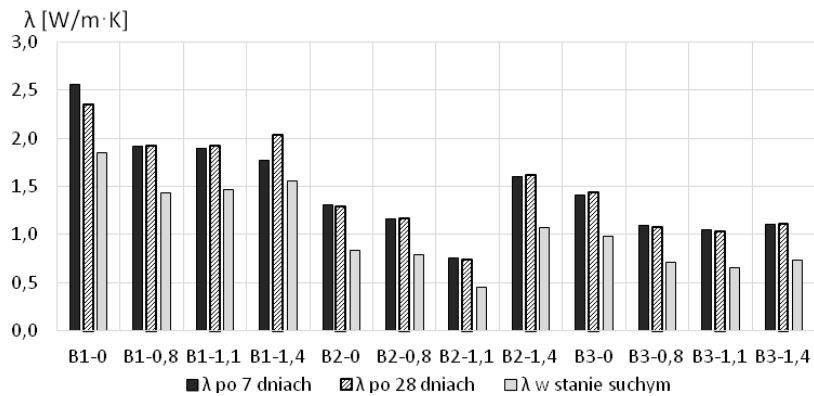
Z analizy uzyskanych danych wynika, że wartość współczynnika λ spada wraz z malejącą gęstością, obniżającą się wraz ze wzrostem ilości dozowanej domieszki.

Wyjątek stanowi receptura B2-1,4, w której odnotowano wzrost zarówno gęstości, jak i przewodności cieplnej. Spowodowane było to faktem, że struktura betonu stała się bardziej kompaktowa po dodaniu domieszki napowietrzającej w ilości 1,4%, która przy tym dozowaniu wykazała dodatkowe właściwości smarne, ujawniające się już w trakcie badania konsystencji, wyraźnie różnej od trzech pozostałych dozowań.



Rys. 3. Zależność pomiędzy gęstością objętościową a współczynnikiem przewodzenia ciepła betonów na kruszywie keramzytowym

Na rysunku 4 zaprezentowano średnie wartości współczynników λ , wyznaczone w odniesieniu do wszystkich badanych dwunastu kompozytów w trzech punktach czasowych: po 7 i 28 dniach od wykonania (kompozyty dojrzewające) oraz po stabilizacji masy w procesie suszenia (kompozyty dojrzałe w stanie suchym).



Rys. 4. Zbiorcze zestawienie współczynników przewodzenia ciepła betonów B1, B2, B3

Zestawienie zbiorcze zamieszczone na rysunku 4 dowodzi, że współczynnik przewodzenia ciepła, niezależnie od ilości dozowanej domieszki napowietrzającej, jest największy w przypadku betonów B1. Wynika to z faktu, że beton na bazie kruszywa kamiennego ma najbardziej zwartą strukturę, z uwagi na litą budowę

kruszywa kamiennego, co przekłada się na wyraźnie wyższą gęstość objętościową w stosunku do obydwu betonów lekkich.

Bez wątplenia beton B2 na bazie keramzytu uzyskuje najlepsze przewodności cieplne. Najniższym analizowanym parametrem wykazuje się beton B2-1,1, w którego przypadku współczynnik przewodzenia ciepła spada do poziomu $0,446 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Należy zwrócić również uwagę, że wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną jest znaczny. Wartości współczynnika λ wyznaczanego w badaniach przeprowadzonych po 7 i 28 dniach różnią się nieznacznie. Wyraźny spadek współczynnika przewodzenia ciepła można zauważyć, gdy tenże beton badany jest w stanie suchym. Przy czym dla betonów zwykłych spadek ten mieścił się w granicach od ≈ 20 do $\approx 25\%$, natomiast dla betonów lekkich zawierał się w zakresie od ≈ 30 do $\approx 40\%$.

Badania eksperymentalne dodatkowo wykazały, że najkorzystniejszy wpływ na przewodność cieplną ma domieszka napowietrzająca dozowana w ilości $1,1\%$ w stosunku do masy cementu. Betony wykonane przy jej zastosowaniu generalnie osiągnęły najniższe wartości współczynnika przewodzenia ciepła.

Podsumowanie

Analiza otrzymanych wyników potwierdza, że betony lekkie charakteryzują się dużo lepszymi właściwościami cieplnymi w stosunku do betonów zwykłych. Wpływ na to ma oczywiście specyficzna struktura betonu, wynikająca z zastosowanego kruszywa. Ilościowe zróżnicowanie jest znaczące i warte uwzględnienia przy doborze betonu przeznaczonego do wykonywania przegród zewnętrznych, od których oczekujemy nie tylko określonej wytrzymałości, ale również podwyższonej izolacyjności cieplnej.

Przeprowadzone badania pozwoliły wykazać, że za pomocą domieszki napowietrzającej jesteśmy w stanie uzyskać dalszą poprawę właściwości termoizolacyjnych danego betonu. Dobrym przykładem, dla zobrazowania tych możliwości, jest beton na kruszywie keramzytowym. Beton referencyjny B2-0 osiągnął wartość współczynnika przewodzenia ciepła równą $0,829 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, natomiast po wprowadzeniu najkorzystniejszej modyfikacji (dodanie domieszki napowietrzającej w ilości $1,1\%$) wartość ta wyniosła $0,446 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Dzięki wprowadzeniu do betonu domieszki uzyskano produkt charakteryzujący się dużo lepszą izolacyjnością, co we współczesnym budownictwie jest bardzo pożądaną cechą.

Należy zaznaczyć również, że wpływ zawilgocenia na badany parametr jest bardzo znaczący. Woda zawarta w sieci porów powoduje silny wzrost przewodności cieplnej w przypadku każdego z betonów, powodując tym samym pogorszenie ich walorów termoizolacyjnych. W związku z tym nasuwa się zalecenie, aby na budowie zapewnić właściwe warunki składowania wyrobów gotowych, przeznaczonych do wbudowania w przegrody, dbając restrykcyjnie o właściwe ich zabezpieczenie przed zawilgoceniem pochodzącym z otoczenia.

Literatura

- [1] Łukowski P., Domieszki do betonu, *Inżynier Budownictwa* 2007, 2, 64-66.
- [2] Michalik K., Sendeki P., Domieszki do betonów w praktyce budowlanej, *Inżynier Budownictwa* 2015, 6, 110-114.
- [3] Garbalińska H., Koprowicz J., Waszak G., Strzałkowski J., Badania i analiza porównawcza wytrzymałości na ściskanie napowietrzonych i nienapowietrzonych betonów lekkich i betonu zwykłego, *Inżynieria i Budownictwo* 2016, 12, 656-658.
- [4] Koprowicz J., Waszak G., Badania i analiza porównawcza podstawowych właściwości betonów lekkich i betonu zwykłego, Praca dyplomowa inżynierska realizowana pod kierunkiem H. Garbalińskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, czerwiec 2015.
- [5] Garbalińska H., Bochenek M., Izolacyjność termiczna a akumulacyjność cieplna wybranych materiałów ściennych, *Czasopismo Techniczne* 2011, 2, 89-96.
- [6] Garbalińska H., Strzałkowski J., Badania współczynników wyrównania temperatury betonów różnego rodzaju, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 2012, nr 283, Tom I, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 59, 203-208.

Streszczenie

Przedmiotem artykułu jest ocena wpływu rodzaju kruszywa i ilości domieszki napowietrzającej na parametry cieplne lekkich betonów na bazie keramzytu i kruszywa popiołoporytowego oraz betonu zwykłego. W pracy przetestowano łącznie dwanaście receptur, w składzie których domieszka napowietrzająca stanowiła odpowiednio 0%, 0,8%, 1,1% oraz 1,4% masy cementu. Badania cieplne wykonano metodą niestacjonarną przy użyciu aparatu Isomet 2104. Przeprowadzono je po 7 i 28 dniach dojrzewania oraz po wysuszeniu próbek do stałej masy. Analiza wyników potwierdza, że betony lekkie charakteryzują się dużo lepszymi właściwościami cieplnymi w stosunku do betonów zwykłych. Przeprowadzone badania pozwoliły również wykazać, że za pomocą domieszki napowietrzającej możliwe jest uzyskanie jeszcze lepszych właściwości termoizolacyjnych danego betonu na bazie kruszyw lekkich.

Słowa kluczowe: kruszywo, domieszki napowietrzające, parametry cieplne, beton

Research and comparative analysis of the thermal conductivity coefficients of unaerated and aerated lightweight concretes and normal concrete

Abstract

This paper describes the assessment of the impact of the aggregate type and the quantity of the aerating admixture on the thermal parameters of lightweight concretes, based on expanded clay aggregate and fly ash aggregate as well as the ordinary concrete. A total of twelve mixtures were tested, in the composition of which the aerating admixture constituted 0%, 0.8%, 1.1% and 1.4% of the cement weight. Thermal testing was carried out by a non-stationary method using the Isomet 2104 instrument. The analysis confirms that lightweight concretes have much better thermal insulating properties compared to normal concretes. The conducted research also showed that using air-entraining admixture it is possible to obtain even better thermal insulation properties of concretes based on lightweight aggregates.

Keywords: aggregate, aeration admixtures, thermal parameters, concrete