

mgr inż. Adam Nietupski¹⁾
 prof. dr hab. inż. Michał Boltryk¹⁾
 ORCID: 0000-0003-2468-8324
 dr inż. Edyta Pawluczuk¹⁾
 ORCID: 0000-0002-8806-8637
 dr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska^{1)*}
 ORCID: 0000-0003-1760-3943
 mgr inż. Szymon Spodziej²⁾
 ORCID: 0000-0001-5049-8837

Propozycja wykorzystania betonów geopolimerowych do prefabrykatów o podwyższonej izolacyjności cieplnej

The proposal of use geopolymer concrete for prefabricated elements with increased thermal insulation

DOI: 10.15199/33.2022.04.06

Streszczenie. W artykule zaproponowano zastosowanie geopolimerów na bazie kruszywa sztucznego do produkcji elementów prefabrykowanych o podwyższonej izolacyjności. Przeprowadzono eksperyment o zmiennej zawartości popiołu lotnego (PL) i mieszanki popiołowo-żuźlowej (MPŻ) oraz różnym stężeniu aktywatora NaOH. Zastosowana metoda zagęszczania w postaci wibroprasowania umożliwia wytworzenie drobnowymiarowych elementów ściennych i stropowych o dobrych właściwościach izolacyjnych przy wytrzymałości na ściskanie ok. 15 MPa.

Słowa kluczowe: prefabrykaty drobnowymiarowe; beton geopolimerowy; mieszanka popiołowo-żuźłowa (MPŻ); kruszywo lekkie.

Abstract. The article proposes the use of geopolymers on artificial aggregate for prefabricated elements with increased insulation. An experiment was carried out with a variable content of fly ash (PL) and a mixture of ash and slag (MPŻ) and a different concentration of NaOH activator. The applied method of compaction in the form of vibropress allows the production of small-sized wall and ceiling elements with good insulating properties and a compressive strength of about 15 MPa.

Keywords: small-size prefabricated elements; geopolymer concrete; fly ash-slag mix (MPŻ); lightweight aggregate.

Beton geopolimerowy jest bardziej przyjazną dla środowiska odmianą niż beton tradycyjny, ponieważ do jego produkcji nie stosuje się cementu. Zamiast tego wykorzystywane są materiały odpadowe, takie jak np. popiół lotny czy żużel wielkopiecowy [1]. Synteza geopolimerów następuje w obecności silnej zasady – z reguły stężonego wodorotlenku sodu lub potasu, przy czym konieczne jest zwykle dostarczenie energii z zewnątrz. Rozpoczęcie reakcji następuje po podwyższeniu temperatury powyżej 35°C. Za optymalną uważa się temperaturę 60 – 90°C [2], co sprzyja stosowaniu tego materiału w zakładach prefabrykacji, chociażby ze względu na możliwość utrzymania stałych warunków pielęgnacji. Oprócz niewątpliwych walorów ekologicznych, a także dużej trwałości geopolimerów [3], coraz częściej są one wykorzystywane do produkcji elementów

prefabrykowanych, np. warstwowych płyt ściennych [4], płyt dachowych i stropowych [5].

W artykule zaprezentowano wyniki eksperymentu badawczego polegającego na modyfikacji składu betonu geopolimerowego z przeznaczeniem na drobnowymiarowe elementy prefabrykowane o podwyższonej izolacyjności termicznej. Analizowano trzy zmienne czynniki: zawartość dodatków pucolanowych; zawartość mieszanki popiołowo-żuźlowej oraz stężenie aktywatora NaOH. W celu poprawienia parametrów izolacyjnych zastosowano popiołoporytowe kruszywo sztuczne.

Materiały i metody badań

W badaniach zastosowano popiół lotny krzemionkowy (PL) z Elektrociepłowni Ostrołęka o właściwościach pucolanowych spełniający wymagania normy PN-EN 450-1 [6]. Mieszanka popiołowo-żuźłowa (MPŻ) jest odpadem paleniskowym w postaci mieszanki popiołu lotnego spod elektrofiltrów oraz żużla z odzūżlaczy mokrego składowania, powstającym w Elektrociepłowni

„Kozienice”. Zawartość wybranych tlenków w PL i MPŻ przedstawiono w tabeli 1, a właściwości fizyczne w tabeli 2.

Tabela 1. Zawartość wybranych tlenków w PL i MPŻ

Table 1. Chemical composition of selected oxides of PL and MPŻ

Skład chemiczny	PL [%]	MPŻ [%]
SiO ₂	54,6	42,3
Fe ₂ O ₃	4,97	3,78
Al ₂ O ₃	25,3	17,1
Reaktywny SiO ₂	42,36	24,8
Reaktywny CaO	1,84	< 0,01

Tabela 2. Właściwości fizyczne PL i MPŻ

Table 2. Physical-mechanical properties of PL and MPŻ

Cecha	PL	MPŻ
Gęstość właściwa [g/cm ³]	2,13	2,35
Gęstość nasypowa [g/cm ³]	1,15	1,22
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm ² /g]	3700	2450

Przed badaniem mieszankę MPŻ wysuszono do stałej masy, a następnie domielono w młynku kulowym przez 30 min. Do badań zastosowano kruszywo sztuczne popiołoporytowe frakcji 0 – 2 mm, 1 – 4 mm i 4 – 8 mm.

¹⁾ Politechnika Białostocka; Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

²⁾ Politechnika Warszawska; Wydział Inżynierii Lądowej

* Adres do korespondencji: k.kalinowska@pb.edu.pl

Metoda badań

Do aktywacji popiołu lotnego i impregnacji powierzchniowej kruszywa grubego zastosowano roztwór wodorotlenku sodu o stężeniu 8, 10 i 12 mol/dm³. Z przyczyn ekologicznych i technologicznych zaniechano używania dodatkowo szkła wodnego stosowanego powszechnie w innych badaniach [7], które zwiększa koszt produkcji geopolimerów. Kolejność dozowania składników była następująca: do mieszarki wsypywano odważoną ilość kruszywa popiołoporytowego frakcji 4 – 8 mm, następnie dodawano roztwór NaOH o określonym stężeniu, w ilości zgodnej z planem eksperymentu. Po 10 s mieszania wsypywano odpowiednią ilość popiołu lotnego, MPŻ i pozostały roztwór NaOH. Po 60 s mieszania wsypywano do mieszarki pozostałe frakcje kruszywa. Całość składników mieszano przez kolejne 60 s. Następnie formowano próbki sześciennie o wymiarach 100 x 100 x 100 mm, zagęszczając je na stanowisku do wibroprasowania. Po zaformowaniu próbki w formach były przechowywane przez 24 h pod przykryciem w warunkach powietrzno-suchych w temperaturze 20°C. Następnie umieszczano je w suszarce laboratoryjnej na 24 h w temperaturze 65°C. Po okresie dojrzewania próbki rozformowywano i przechowywano przez kolejne 26 dni na rusztach nad powierzchnią wody. Po 28 dniach od zaformowania próbek ustalono właściwości fizyczno-mechaniczne lekkiego betonu geopolimerowego. Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano zgodnie z normą [8], nasiąkliwości wg [9], gęstości pozornej wg [10], a współczynnika przewodności cieplnej na podstawie [11].

Badania

Plan badań przygotowano na bazie trzech zmiennych: X₁ – zawartość dodatków pucolanowych (PL+MPŻ) w ilości 200, 400 i 600 kg/m³; X₂ – zawartość MPŻ w dodatkach pucolanowych – 0, 50 i 100% oraz X₃ – stężenie aktywatora NaOH – 8, 10, 12 mol/dm³. W tabeli 3 przedstawiono plan badań cztertnastu serii z wartościami zmiennych rzeczywistych i kodowanych. Seria 15 została wykonana w celu porównania, jak seria 11, przy czym zawierała kruszywo nieimpregnowane.

Tabela 3. Plan eksperymentu
Table 3. Design of the experiment

Seria	Zmienne rzeczywiste			Zmienne kodowane		
	X ₁ [kg/m ³]	X ₂ [%]	X ₃ [mol/dm ³]	x ₁	x ₂	x ₃
1	200	0	8	-1	-1	-1
2	600	0	8	1	-1	-1
3	200	100	8	-1	1	-1
4	600	100	8	1	1	-1
5	200	0	12	-1	-1	1
6	600	0	12	1	-1	1
7	200	100	12	-1	1	1
8	600	100	12	1	1	1
9	200	50	10	-1	0	0
10	600	50	10	1	0	0
11	400	0	10	0	-1	0
12	400	100	10	0	1	0
13	400	50	8	0	0	-1
14	400	50	12	0	0	1
15	400	0	10	kruszywo sztuczne nieimpregnowane		

Ilość NaOH do impregnacji przyjęto jako 28% masy kruszywa popiołoporytowego frakcji 4 – 8 mm. W tabeli 4 przedstawiono receptury mieszanek geopolimerowych wg planu eksperymentu oraz wyniki badań kompozytów geopolimerowych.

Tabela 4. Receptury mieszanek geopolimerowych na 1m³ oraz wyniki badań
Table 4. Recipes of geopolymer mixtures for 1 m³ and test results

Seria	PL [kg]	MPŻ [kg]	NaOH [dm ³]	NaOH do impregnacji [dm ³]	Kruszywo popiołoporytowe			Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Nasiąkliwość WA [%]	Gęstość D [kg/m ³]
					0 – 2 mm [kg]	1 – 4 mm [kg]	4 – 8 mm [kg]			
1*	200	0	100	150,9	269,5	269,5	539,0	2,54	25,6	1210
2	600	0	300	88,7	158,4	158,4	316,8	6,85	18,6	1470
3	0	200	100	150,9	269,5	269,5	539,0	4,47	23,1	1280
4*	0	600	300	88,7	158,4	158,4	316,8	7,68	19,1	1540
5	200	0	100	150,9	269,5	269,5	539,0	3,10	20,4	1350
6	600	0	300	88,7	158,4	158,4	316,8	8,14	17,8	1330
7	0	200	100	150,9	269,5	269,5	539,0	3,86	20,4	1380
8*	0	600	300	88,7	158,4	158,4	316,8	10,66	17,1	1540
9	100	100	100	150,9	269,5	269,5	539,0	6,69	19,5	1280
10	300	300	300	88,7	158,4	158,4	316,8	12,02	15,2	1380
11*	400	0	200	124,7	222,6	222,6	445,2	14,24	18,5	1470
12	0	400	200	124,7	222,6	222,6	445,2	16,38	17,8	1520
13	200	200	200	124,7	222,6	222,6	445,2	14,45	15,4	1470
14	200	200	200	124,7	222,6	222,6	445,2	15,47	14,2	1410
15	400	0	200	0	222,6	222,6	445,2	7,23	28,3	1350

* serie, w przypadku których wykonano badanie współczynnika przewodzenia ciepła λ
Oznaczenia: WA – nasiąkliwość; D – gęstość

Wyniki badań i ich analiza

Średnie wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, nasiąkliwości oraz gęstości pozornej podano w tabeli 4, a w tabeli 5 równania regresji opisujące zmianę cech lekkiego betonu geopolimerowego w zależności

Tabela 5. Równania regresji
Table 5. Regression equations

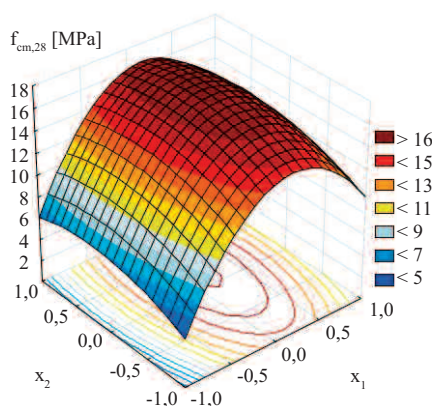
Właściwość	Wzór funkcji	Wartość
Wytrzymałość na ściskanie f _{cm,28} [MPa]	= 16,86 + 2,47 · x ₁ + 0,82 · x ₂ + 0,52 · x ₃ - 7,50 · x ₁ ² - 1,55 · x ₂ ² - 1,9 · x ₃ ²	0,98
Nasiąkliwość WA [%]	= 15,02 - 2,12 · x ₁ - 1,19 · x ₃ + 2,33 · x ₁ ² + 3,13 · x ₂ ²	0,97
Gęstość objętościowa D [kg/m ³]	= 1438,7 + 7,60 · x ₁ + 43,0 · x ₂ - 10,88 · x ₁ ²	0,96

od zmiennych kodowanych z uwzględnieniem tylko statystycznie istotnych współczynników równania.

Z analizy wynika, że wszystkie analizowane zmienne mają statystycznie istotny wpływ na wytrzymałość na ściskanie lekkiego betonu geopolimerowego oraz na nasiąkliwość przy poziomie istotności α = 0,05.

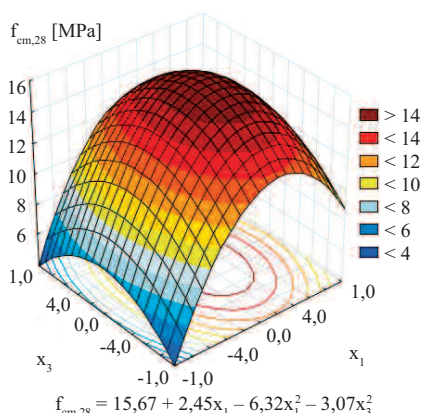
Wytrzymałość na ściskanie geopolimeru po 28 dniach w zależności od analizowanych czynników przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Z rysunku 1 wynika, że zwiększenie ilości dodatków pucolanowych z 200 do 400 kg/m³ spowodowało 1,5-2-krotny (w zależności od zawartości MPŻ) wzrost wytrzymałości betonu geopolimerowego na ściskanie po

28 dniach. Natomiast dalsze ich zwiększenie do 600 kg/m³ wywołało spadek wytrzymałości średnio o ok. 30%. Jest to efekt wzrostu wodożądności spoiwa i niewłaściwego wymieszania składników oraz zagęszczenia mieszanki geopolimerowej. Zwiększenie zawartości



$$f_{cm,28} = 16,86 + 2,47x_1 + 0,82x_2 - 7,50x_1^2 - 1,55x_2^2$$

Rys. 1. Zmiana wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach w zależności od zawartości dodatków pucolanowych (x_1) i zawartości MPŻ (x_2) przy stężeniu aktywatora 10M ($x_3 = 0$)
Fig. 1. Changes in compressive strength after 28 days depending on the content of pozzolanic additives (x_1) and the content of MPŻ (x_2) at an activator concentration of 10M ($x_3 = 0$)



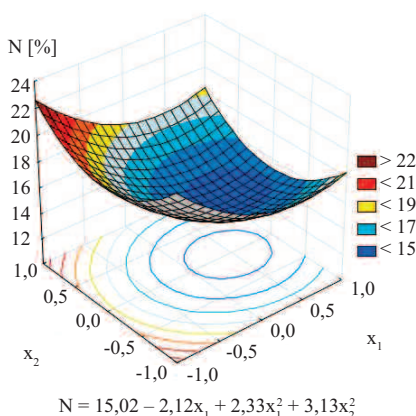
$$f_{cm,28} = 15,67 + 2,45x_1 - 6,32x_1^2 - 3,07x_3^2$$

Rys. 2. Zmiana wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach w zależności od zawartości dodatków pucolanowych (x_1) i stężenia aktywatora (x_3) przy zawartości MPŻ równej 50% masy dodatków pucolanowych ($x_2 = 0$)
Fig. 2. Changes in compressive strength after 28 days depending on the content of pozzolanic additives (x_1) and activator concentration (x_3) with the content of MPŻ equal to 50% of the mass of pozzolanic additives ($x_2 = 0$)

MPŻ w spoiwie geopolimerowym z 0% do 50% spowodowało stopniowe zwiększenie wytrzymałości na ściskanie o 52% i 25% odpowiednio przy całkowitej zawartości dodatków pucolanowych 200 i 600 kg/m³. Natomiast rysunek 2 obrazuje, że wraz ze wzrostem stężenia aktywatora z 8M do 10M nastąpiło zwiększenie wytrzymałości na ściskanie o 54 i 26% przy zawartości dodatków pucolanowych odpowiednio 200 i 600 kg/m³. Przy zastosowaniu aktywatora o stężeniu 12M odnotowano

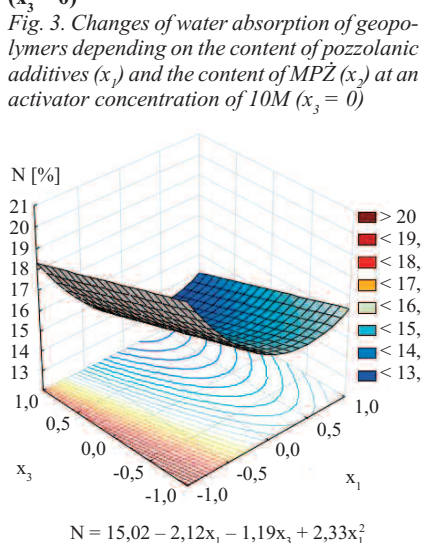
spadek wytrzymałości na ściskanie w porównaniu ze stężeniem 10M o 12 – 20%. Oznacza to, że wysokie stężenie NaOH wywołuje problemy z urabialnością mieszanki geopolimerowej. Dodatkowo należy zauważyć, że zaimpregnowanie kruszywa zwiększyło wytrzymałość na ściskanie betonu prawie dwukrotnie.

Nasiąkliwość lekkich betonów geopolimerowych w zależności od badanych zmiennych przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Z rysunku 3 wynika, że



$$N = 15,02 - 2,12x_1 + 2,33x_1^2 + 3,13x_2^2$$

Rys. 3. Zmiana nasiąkliwości betonu geopolimerowego w zależności od zawartości dodatków pucolanowych (x_1) i zawartości MPŻ (x_2) przy stężeniu aktywatora 10M ($x_3 = 0$)
Fig. 3. Changes of water absorption of geopolymers depending on the content of pozzolanic additives (x_1) and the content of MPŻ (x_2) at an activator concentration of 10M ($x_3 = 0$)



$$N = 15,02 - 2,12x_1 - 1,19x_3 + 2,33x_1^2$$

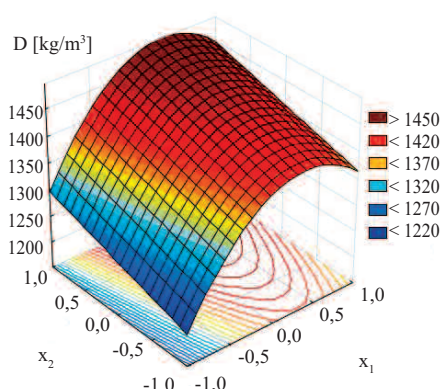
Rys. 4. Zmiana nasiąkliwości betonu geopolimerowego w zależności od zawartości dodatków pucolanowych (x_1) i stężenia aktywatora (x_3) przy zawartości MPŻ 50% masy dodatków pucolanowych ($x_2 = 0$)
Fig. 4. Changes of water absorption of geopolymers depending on the content of pozzolanic additives (x_1) and activator concentration (x_3) with the content of MPŻ equal to 50% of the mass of pozzolanic additives ($x_2 = 0$)

wzrost zawartości dodatków pucolanowych z 200 do 400 kg/m³ spowodował zmniejszenie nasiąkliwości z 23 do 18%. Natomiast zwiększenie ich ilości w betonie geopolimerowym do 600 kg/m³ skutkowało nieznacznym wzrostem nasiąkliwości. Podobnie zwiększenie ilości MPŻ z 0 do 50% wywołało korzystny efekt w postaci obniżenia nasiąkliwości z 18 do 15%. Dalszy wzrost MPŻ skutkował ponownym wzrostem nasiąkliwości kompozytu o ok. 3%. Zaobserwowano również nieznaczny, stopniowy spadek nasiąkliwości o ok. 2% wraz ze zwiększaniem stężenia aktywatora z 8M do 12M (rysunek 4). Kluczowym czynnikiem decydującym o nasiąkliwości betonu lekkiego jest więc zawartość dodatków pucolanowych w kompozycie oraz zawartość w nich mieszanki MPŻ. Najmniejszą nasiąkliwość uzyskano w przypadku serii 14, o zawartości dodatków pucolanowych 400 kg/m³ (przy 200 kg/m³ MPŻ) oraz przy stężeniu aktywatora 12M. Impregnacja kruszywa grubego spowodowała zmniejszenie nasiąkliwości z 28,3 do 18,5%.

Gęstość objętościowa. Z analizy statystycznej wynika, że stężenie aktywatora nie wpływa istotnie na gęstość objętościową betonu geopolimerowego. Na rysunku 5 przedstawiono zmianę gęstości kompozytu w zależności od badanych zmiennych kodowanych. Wynika z niego, że wraz ze wzrostem zawarto-

ści dodatków pucolanowych w kompozycie oraz zawartość w nich mieszanki MPŻ. Najmniejszą nasiąkliwość uzyskano w przypadku serii 14, o zawartości dodatków pucolanowych 400 kg/m³ (przy 200 kg/m³ MPŻ) oraz przy stężeniu aktywatora 12M. Impregnacja kruszywa grubego spowodowała zmniejszenie nasiąkliwości z 28,3 do 18,5%.

ści dodatków pucolanowych w kompozycie oraz zawartość w nich mieszanki MPŻ. Najmniejszą nasiąkliwość uzyskano w przypadku serii 14, o zawartości dodatków pucolanowych 400 kg/m³ (przy 200 kg/m³ MPŻ) oraz przy stężeniu aktywatora 12M. Impregnacja kruszywa grubego spowodowała zmniejszenie nasiąkliwości z 28,3 do 18,5%.



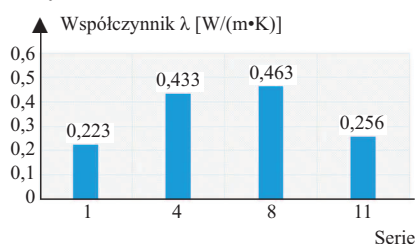
$$D = 1438,7 + 76,0x_1 + 43,0x_2 - 108,8x_1^2$$

Rys. 5. Zmiana gęstości objętościowej betonu geopolimerowego w zależności od zawartości dodatków pucolanowych (x_1) i zawartości MPŻ (x_2) przy stężeniu aktywatora równym 10M ($x_3 = 0$)
Fig. 5. The changes of density of geopolymers depending on the content of pozzolanic additives (x_1) and the content of MPŻ (x_2) at an activator concentration of 10M ($x_3 = 0$)

ści dodatków pucolanowych w kompozycie oraz zawartość w nich mieszanki MPŻ. Najmniejszą nasiąkliwość uzyskano w przypadku serii 14, o zawartości dodatków pucolanowych 400 kg/m³ (przy 200 kg/m³ MPŻ) oraz przy stężeniu aktywatora 12M. Impregnacja kruszywa grubego spowodowała zmniejszenie nasiąkliwości z 28,3 do 18,5%.

ści dodatków pucolanowych z 200 do 400 kg/m³ nastąpił wzrost gęstości objętościowej betonu geopolimerowego średnio o ok. 15%. Przy zwiększeniu ilości dodatków pucolanowych do 600 kg/m³ odnotowano nieznaczne zmniejszenie gęstości, co jest jednoznaczne ze wzrostem nasiąkliwości i pogorszeniem wytrzymałości na ściskanie. Wzrost ilości MPŻ w spoiwie spowodował zwiększenie gęstości betonu o 6 – 7%, co wynika z większej gęstości MPŻ w porównaniu z popiołem lotnym.

Badanie współczynnika przewodzenia ciepła λ wykonano w przypadku wybranych serii o różnej zawartości dodatków pucolanowych i stężeniu aktywatora. Badanie przeprowadzono na trzech próbkach o wymiarach 300 x 300 x 50 mm z serii 1, 4, 8 i 11. Średnie wyniki współczynnika λ przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Współczynnik przewodzenia ciepła λ wybranych serii kompozytów

Fig. 6. The thermal conductivity index λ for selected series of composites

Najmniejszą wartość współczynnika λ wynoszącą 0,223 W/m·K uzyskano w przypadku serii 1, zawierającej najwięcej kruszywa lekkiego, a nieznacznie większą w przypadku serii 11. Natomiast największy współczynnik przewodzenia równy 0,463 W/m·K osiągnęła seria 8, zawierająca najwięcej spoiwa i najmniej kruszywa lekkiego. Otrzymałe wyniki wskazują, że kluczowa, w przypadku badanej cechy, jest ilość sztucznego kruszywa popiołoporytowego w 1 m³ mieszanki geopolimerowej. Tak małą, jak w serii 1 czy 11, wartość współczynnika λ uzyskano dzięki dobrej porowatości kruszywa sztucznego i matrycy geopolimerowej. Dodatkowo w serii 11 zastosowano większą ilość dodatków pucolanowych, dzięki czemu uzyskano mniejszą nasiąkliwość oraz znacznie lepszą wytrzymałość na ściskanie (ok. 14 MPa) w porównaniu z serią 1.

Podsumowanie i wnioski

Mieszanka popiołowo-żużlowa (MPŻ) wykazuje istotny wpływ na właściwości lekkich betonów geopolimerowych na sztucznym kruszywie popiołoporytowym. Ze względu na znaczną zawartość glinokrzemianów zarówno w krzemianowych popiołach lotnych, MPŻ, jak i w kruszywie sztucznym możliwe jest stosowanie aktywatora jedynie w postaci roztworu NaOH o stężeniu 10 mol/dm³. W celu poprawy jakości strefy przejściowej pomiędzy kruszywem sztucznym a zaczynem geopolimerowym wskazana jest wcześniejsza impregnacja sztucznego kruszywa roztworem NaOH.

Analiza wyników badań wytrzymałości na ściskanie lekkich betonów geopolimerowych po przyspieszonym dojrzeniu w temperaturze 65°C oraz po 28 dniach twardnienia wykazała istotny wpływ zawartości MPŻ na tę właściwość. Wzrost wytrzymałości na ściskanie lekkich betonów geopolimerowych następuje do ilości 50% MPŻ. Badania wykazały, że przy najkorzystniejszym składzie można uzyskać lekkie betony geopolimerowe o wytrzymałości na ściskanie nawet ponad 16 MPa. Zawartość MPŻ ma także istotny wpływ na nasiąkliwość masową kompozytów geopolimerowych – wraz ze wzrostem zawartości MPŻ do 50% w mieszance geopolimerowej zmniejsza się również ich nasiąkliwość. Na podstawie analizy statystycznej wyników badań gęstości pozornej betonów geopolimerowych ustalono, że obecność MPŻ zwiększa gęstość pozorną o 6 – 7% w porównaniu z kompozytami z popiołem lotnym. Badania współczynnika przewodności cieplnej kompozytów wykazały, że najniższą wartość współczynnika przewodności cieplnej równą 0,223 W/m·K uzyskano w przypadku serii 1, zawierającej najmniej spoiwa geopolimerowego aktywowanego NaOH o stężeniu 8M, czyli przy największej zawartości kruszywa sztucznego. W przypadku serii 11 współczynnik λ był zbliżony do serii 1, ale uzyskana duża wytrzymałość na ściskanie rzędu 14 MPa pozwala zakwalifikować ten kompozyt do lekkich betonów kruszywowych klasy LC 12/13. Uzyskana gęstość pozorna geopolimeru z serii 11

równa 1470 kg/m³ pozwala zaliczyć go do klasy gęstości D1,6 wg normy PN-EN 12390-7:2011.

W wyniku zrealizowanego eksperymentu uzyskano materiał konstrukcyjno-izolacyjny, zawierający 400 kg dodatków pucolanowych w 1 m³, po 223 kg kruszywa sztucznego frakcji 0 – 2 mm i 1 – 4 mm oraz 445 kg kruszywa frakcji 4 – 8 mm, przy stężeniu NaOH równym 10M, o bardzo dobrych właściwościach termicznych z przeznaczeniem na drobnowymiarowe elementy prefabrykowane. W przypadku, gdy istnieje potrzeba uzyskania większej wytrzymałości do celów konstrukcyjnych należy stosować dwa aktywatory: sodowe szkło wodne i wodorotlenek sodu.

Literatura

- [1] Mikula J, Łach M. Geopolimery. Nowa przyjazna środowisku alternatywa dla betonu na bazie cementu portlandzkiego. Przykłady wdrożenia i wyniki badań. W: Rozwiązania proekologiczne w zakresie produkcji. Tom 1, Politechnika Krakowska, Kraków, 2014.
- [2] Rajczyk K, Janus G. Cement Wapno Beton; 2021; 279 – 293; doi: <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.4.2>.
- [3] Wei PK, Ramli M, Ban Ch. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. Constr. Build. Mater. 2015; 370 – 395; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.065>.
- [4] Huang J-O, Dai J-G. Flexural performance of precast geopolymer concrete sandwich panel enabled by FRP connector, Comp. Struct. 2020; 248; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112563>.
- [5] Rajendran M, Akasi M. Performance of Crumb Rubber and Nano Fly Ash Based Ferro-Geopolymer Panels under Impact Load. KSCE J Civ Eng. 2020; 1810 – 1820; <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0854-z>.
- [6] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [7] Wardhono A, Gunasekara C, Law DW, Sujeewa S. Comparison of long-term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. Constr. Build. Mater. 2017; 143: 272 – 279.
- [8] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [9] PN-88/B-06250:1988 Beton zwykły.
- [10] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.
- [11] PN-EN ISO 6946-10:2017 Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczania. *Badania wykonane w ramach projektu badawczego nr WZ-WB-IIL/3/2020 finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki oraz w wyniku realizacji projektu GeCon na podstawie umowy Ministerstwa Edukacji i Nauki SKN/SP/495908/2021.*

Przyjęto do druku: 04.04.2022 r.