

Właściwości fizyczno-mechaniczne autoklawizowanych kompozytów geopolimerowych

Physical and mechanical properties of autoclaved geopolymer composites

mgr inż. Dominika Konstańczuk¹⁾mgr inż. Dawid Halicki¹⁾dr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska^{1)*}

ORCID: 0000-0003-1760-3943

prof. dr hab. inż. Michał Boltryk¹⁾

ORCID: 0000-0003-2468-8324

DOI: 10.15199/33.2023.01.03

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki podstawowych badań: wytrzymałości na zginanie i ściskanie; nasiąkliwości wagowej i gęstości objętościowej autoklawizowanych kompozytów geopolimerowych z dodatkiem recyklatu geopolimerowego. Jako zmienne przyjęto: zawartość recyklatu z geopolimerów, stanowiącą część mieszanki popiołowo-żuźlowej oraz współczynnik aktywator/spoiwo. Wyniki wskazują, że zastosowanie materiału z recyklingu geopolimerów poprawia badane cechy kompozytów.

Słowa kluczowe: geopolimer; recykling; autoklawizacja; mieszanka popiołowo-żuźłowa.

Abstract. The article presents the results of basic tests: bending and compressive strength, water absorption by weight and volumetric density of autoclaved geopolymer composites with the addition of geopolymeric recydate. A variable content of geopolymer recydate was assumed as part of the ash-slag mixture and a variable activator/binder ratio. The results indicate that the use of geopolymer recycled material improves the examined properties of composites.

Keywords: geopolymers; recycling geopolymer addition; autoclaving, fly ash-slag mix.

Geopolimery to materiały cieszące się na świecie coraz większą popularnością, ponieważ stanowią bardziej ekologiczne rozwiązanie niż betony cementowe, gdyż do ich produkcji nie wykorzystuje się cementu [1]. Jak podano w [2], przy produkcji 1 tony klinkieru cementowego następuje emisja ok. 835 kg CO₂. Z kolei w przypadku syntezy geopolimerów wydziela się go 4 – 8 razy mniej i zużywa 2 – 3 razy mniej energii [3]. Geopolimery coraz częściej wykorzystuje się jako materiał na elementy konstrukcyjne. W 2013 r. w Australii na University of Global Change Queensland zaprojektowano i wykonano, jeden z pierwszych na świecie, budynek użyteczności publicznej, w którym zastosowano elementy z betonu geopolimerowego. Geopolimery wykorzystuje się również do produkcji różnego rodzaju elementów dekoracyjnych, wyrobów galanterijnych, płytek i małej architektury. Masy geopolimerowe są łatwe w formowaniu, dzięki czemu idealnie mogą tworzyć nietypowe kształty i wzory [4]. Do produkcji geopolimerów stosuje się coraz częściej obok klasycznych dodatków pucolanowych typu popiół lotny [5], żużel wielkopiecowy czy metakaolin również inne materiały odpadowe pochodzące zarówno z przemysłu budowlanego, np. miał ceramiczny [6], pumeks [7], jak i odpady rolno-spożywcze, np. łuskę ryżową, która wg [8] wpływa na przyspieszenie wiązania i twardnienie zaczynów. Mikuła i in. [4] stosowali mączkę drzewną i sprawdzili jej wpływ na właściwości mechaniczne kompozytów geopolimerowych. Eksperyment wykazał, że dodatek 2% mączki drzewnej zmniejsza gęstość geopolimerów przy jednocze-

snym wzroście wytrzymałości na ściskanie [4]. Hwang i in. [9] przeprowadzili badania wpływu zawartości popiołów z łusek ryżowych na wytrzymałość geopolimerów. Wyniki wykazały, że próbki geopolimerowe z ich zawartością w ilości 35% masy spoiwa miały porównywalną lub większą wytrzymałość na ściskanie niż niezawierające tego dodatku [9]. Szczególnie popularnymi dodatkami do geopolimerów stały się popioły lotne i żużel wielkopiecowy, ze względu na dużą zawartość krzemionki i tlenku glinu oraz dostępność na składowiskach odpadów [5]. Naukowcy stosowali również kombinację popiołu lotnego i żużla [10]. Geopolimer z popiołu lotnego lub z wykorzystaniem żużla wielkopiecowego może osiągnąć w ciągu 48 h nawet 85% swojej końcowej wytrzymałości. Ponadto betony geopolimerowe są znacznie bardziej odporne na kwasy i sole oraz na ogień niż betony na cementie portlandzkim [10]. Geopolimery na bazie popiołu lotnego mają dużą liczbę porów, a dodanie metakaolinu na bazie np. popiołu lotnego może skutkować zagęszczeniem struktury i wzrostem ich wytrzymałości [11].

Z powodu coraz większej ilości odpadów oraz deficytu surowców naturalnych, np. kruszyw, na świecie bada się zastosowanie recyklingowych materiałów gruzobetonowych w produkcji geopolimerów. Allahverdi i Najafi [12] zastosowali gruz z cegieł odpadowych do produkcji geopolimerów i uzyskali wyniki wytrzymałości na ściskanie na poziomie 40 MPa. Z kolei Aly i in. [13] uzyskali dobre parametry wytrzymałościowe i dużą odporność na uderzenia geopolimerów z zastosowaniem zużytej gumy z opon. Stwierdzili, że geopolimery te mogą znaleźć zastosowanie w produkcji płyt podjazdowych, mostów lub pasów startowych lotnisk [13]. Ponadto Pawluczuk i in. [14] zaprezentowali badania, w których po-

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

^{*)} Adres do korespondencji: k.kalinowska@pb.edu.pl

równano wytrzymałość betonów geopolimerowych na kruźwie naturalnym i z recyklingu betonu. Wykazały one, że geopolimery na bazie kruszywa z recyklingu uzyskały 3 razy większą wytrzymałość na ściskanie niż betony geopolimerowe na bazie kruszywa naturalnego [14].

Coraz częściej obiektem badań staje się również **autoklawizacja** jako jeden ze sposobów dojrzewania geopolimerów. Błaszczński i Król [15] podają, że geopolimer poddany autoklawizacji może osiągnąć wytrzymałość na ściskanie większą niż 150 MPa [15]. W artykule [16] wykazano, że autoklawizowane geopolimery charakteryzują się większą o nawet 40% wytrzymałością niż próbki, które dojrzewały w wodzie. Jak podają ponadto, Kriven i in. [17] geopolimery dojrzewające w procesie autoklawizacji charakteryzują się mniejszą porowatością, poprawą rozpuszczalności i reaktywności składników oraz bardziej zwartą strukturą niż w przypadku dojrzewania w innych warunkach. Uzyskano nawet kilkakrotnie lepsze parametry mechaniki pęknięcia takich kompozytów [17]. Z tego samego powodu Tao Ai i in. [18] wskazują na korzystny wpływ autoklawizacji na parametry wytrzymałościowe geopolimerów z wykorzystaniem tzw. czerwonego błota (ang. *red mud*), tj. odpadu, który jest szkodliwą alkaliczną pozostałością po procesie rafinacji boksytu tlenkiem glinu [18].

Celem przedstawionych w artykule badań jest określenie podstawowych właściwości fizyczno-mechanicznych autoklawizowanych kompozytów geopolimerowych z wykorzystaniem zmielonej recyklingowej zaprawy geopolimerowej (recyklatu) jako zamiennika części mieszanki popiołowo-żuźlowej przy zmiennej zawartości aktywatora.

Materiały i metody badań

Wykonano **kompozyty geopolimerowe ze spoiwem w postaci mieszanki popiołowo-żuźlowej (MPŻ) oraz zaprawą z recyklingu geopolimerów**. Eksperyment oparto na planie czynnikowym, pełnym z dwiema zmiennymi, każda na trzech poziomach, gdzie x1, to zawartość recyklatu geopolimerowego jako częściowego zamiennika mieszanki popiołowo-żuźlowej (0%, 30% i 60% masy MPŻ), x2 – zmienny współczynnik aktywator/spoiwo (0,6; 0,65; 0,7). Zbadano 9 serii próbek (tabela 1), w których każda liczyła po 6 beleczek 40 x 40 x 160 mm. Powstałe próbki poddano autoklawizacji w temperaturze 190°C przez 4 h i ciśnieniu 1,3 MPa. Po rozformowaniu przeprowadzono badania wytrzymałości próbek na zginanie i ściskanie wg PN-EN 196-1 [19] oraz sprawdzono gęstość objętościową w stanie suchym i nasyconym wg PN-EN 12390-7 [20], a także nasiąkli-

Tabela 1. Skład mieszanki geopolimerowej
Table 1. The geopolimer mixture composition

Seria	Skład mieszanki geopolimerowej na 3 beleczki 4/4/16 cm			
	MPŻ [g]	recyklat geopolimerowy [g]	piasek normowy [g]	aktywator [g]
I				270
II	450	0		292,5
III				315
IV				270
V	315	135	675	292,5
VI				315
VII				270
VIII	180	270		292,5
IX				315

wość wagową wg PN-88/B-06250:1988 [21]. W badaniach zastosowano także piasek normowy CEN PN-EN 196-1 o granulacji < 2 mm, a także mieszankę popiołowo-żuźlową wysuszoną do stałej masy i domieloną do frakcji pyłowej (charakterystykę chemiczną mieszanki przedstawiono w tabeli 2) oraz aktywator o stężeniu 10 mol/dm³ NaOH i współczynnika Na₂SiO₃ do NaOH równym 2,5 [22]. Materiał z recyklingu geopolimerów (skład chemiczny przedstawiono w tabeli 3) pozyskano z rozkruszenia kostek geopolimerowych klasy C35/45 o wymiarach 100 x 100 x 100 mm w kruszarce szczękowej. Geopolimerowy beton źródłowy przygotowano z popiołu lotnego w ilości 400 kg/m³, kruszywa dolomitowego oraz aktywatora w postaci mieszaniny szkła wodnego i 10 mol NaOH. Recyklingowi poddano beton, który przebywał w warunkach laboratoryjnych ok. 1,5 roku. Otrzymany gruz poddano obróbce mechanicznej w bębnie Los Angeles, a po odsianiu frakcji > 4 mm, frakcję drobną < 4 mm domielano w bębnie Micro-Devala do uzyskania frakcji pyłowej < 0,063 mm. Mieszankę zagęszczano w trzech warstwach na stoliku wibracyjnym. Zaraz po zaformowaniu próbki zostały przetransportowane do autoklawu, który znajdował się w siedzibie firmy „Silikaty” w Białymstoku.

Tabela 2. Charakterystyka chemiczna mieszanki popiołowo-żuźlowej (MPŻ)

Table 2. The chemical composition of the fly ash-slag mix

Nazwa tlenku	Zawartość [%]
SiO ₂	42,3
Fe ₂ O ₃	3,78
Al ₂ O ₃	17,1
Mn ₂ O ₄	0,07
TiO ₂	0,77
CaO	11,3
MgO	5,25
SO ₃	0,13
P ₂ O ₅	0,45
Na ₂ O	0,61
K ₂ O	1,77
BaO	0,09
SrO	0,06
Reaktywny SiO ₂	24,8

Tabela 3. Zawartość ważniejszych tlenków w recyklicie geopolimerowym

Table 3. The content of major oxides of geopolimer recycle

Nazwa tlenku	Zawartość [%]
Al ₂ O ₃	2,5
SiO ₂	32,4
CaO	5,8
Fe ₂ O ₃	0,95

Analiza wyników badań

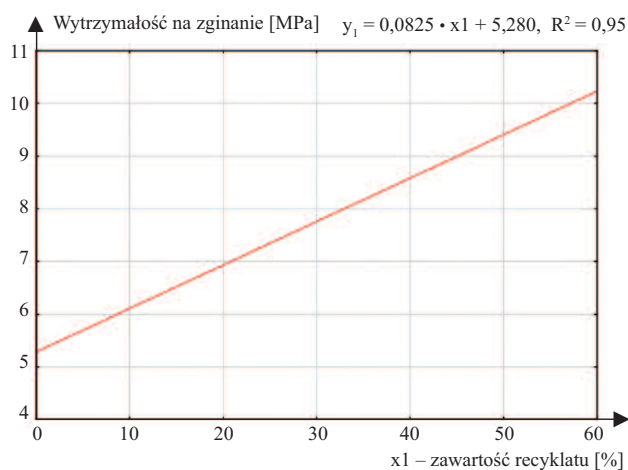
Plan przeprowadzonych badań kompozytów geopolimerowych oraz średnie wyniki zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Plan eksperymentu i wyniki badań

Table 4. Experimental plan and research results

Seria	Zmienna x1 – zawartość recyklatu geopolimerowego [%] MPŻ	Zmienna x2 – współczynnik aktywator – spoiwo	Średnie wyniki wytrzymałości [MPa]		Gęstość objętościowa w stanie [g/cm ³]		Nasiąkliwość wagowa [%masy]
			na zginanie	na ściskanie	suchym	nasyconym	
I	0	0,6	4,86	20,82	1,85	2,06	11,01
II	0	0,65	5,09	19,35	1,85	2,06	11,43
III	0	0,7	5,04	23,43	1,85	2,05	10,99
IV	30	0,6	7,82	27,70	1,84	2,02	9,99
V	30	0,65	7,74	30,37	1,85	2,05	10,85
VI	30	0,7	9,39	24,65	1,88	2,09	11,13
VII	60	0,6	10,47	37,69	1,86	2,08	8,90
VIII	60	0,65	10,06	30,50	1,84	2,01	9,68
IX	60	0,7	9,31	27,70	1,85	2,05	10,59

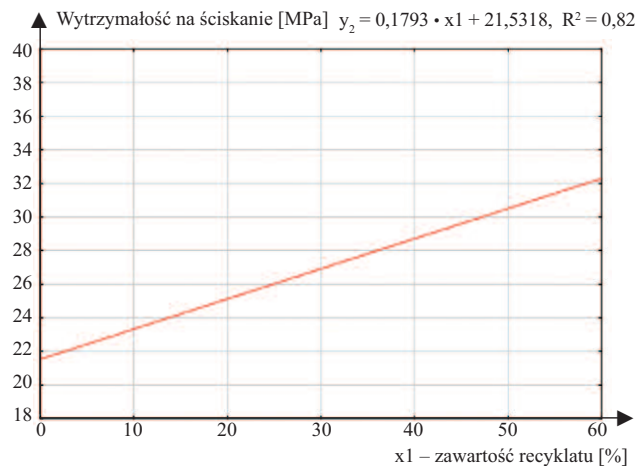
Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, że tylko czynnik x_1 miał istotny wpływ na **wytrzymałość na zginanie**, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Zmianę wytrzymałości na zginanie w zależności od zawartości recyklatu z geopolimerów przedstawia rysunek 1. Wynika z niego, że przy zmianie udziału recyklatu z geopolimerów z 0 do 60% wytrzymałość na zginanie kompozytu zwiększyła się niemal o 50%. Największą średnią wartość wytrzymałości na zginanie 9,31 – 10,47 MPa uzyskano w przypadku serii VII, VIII, IX, gdzie kompozyty wykonano z zawartością recyklatu równą 60% masy MPŻ. Natomiast najmniejszą wytrzymałość na zginanie, tj. 4,86 – 5,09 MPa, uzyskano w seriach I – III (bez dodatku recyklatu). Z kolei średnia wytrzymałość na zginanie próbek serii VII – IX była niemal o 50% większa niż serii I – III. Zaobserwować można także nieznaczny wpływ zmiany współczynnika aktywator/spoiwo na wytrzymałość na zginanie kompozytów. Najlepsze wyniki uzyskały kompozyty z największą zawartością aktywa-



Rys. 1. Zmiana wytrzymałości na zginanie w zależności od zawartości recyklatu z geopolimerów
 Fig. 1. The changes of flexural strength depending on the content of geopolymer recycilate

tora ($a/s = 0,7$), tj. serii III, VI i IX. Były one o 4% większe niż w przypadku serii II, V i VIII (przy $a/s = 0,65$) i o ponad 2% większe niż serii I, IV i VII (gdzie $a/s = 0,6$). Tak małe różnice nie pozwalają jednak uznać, że wpływ badanej ilości aktywatora jest istotny statystycznie, ale ma ona jednak wpływ na dostateczne zagęszczenie kompozytów geopolimerowych.

Wytrzymałość na ściskanie. Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, iż tylko czynnik x_1 miał istotny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Zmianę wytrzymałości na ściskanie w zależności od zawartości recyklatu z geopolimerów przedstawiono na rysunku 2. Zwiększenie zawartości recyklatu do 60% powoduje poprawę wytrzymałości na ściskanie średnio o 30%. Największą średnią wytrzymałość na ściskanie uzyskano ponownie w przypadku serii próbek VII, VIII, IX, gdzie kompozyty zawierały 60% recyklatu z geopolimerów, licząc do masy potrzebnej MPŻ. Największy wynik, tj. 37,69 MPa, odnotowano w przypadku serii VII, a najmniejsze wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskano w przypadku serii I – III (bez

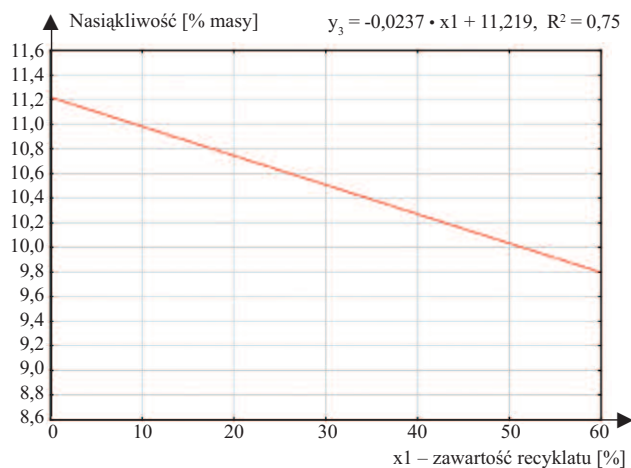


Rys. 2. Zmiana wytrzymałości na ściskanie w zależności od zawartości recyklatu z geopolimerów
 Fig. 2. The changes of compressive strength depending on the content of geopolymer recycilate

dodatku recyklatu), tj. 19,35 MPa w serii II. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek serii VII – IX jest niemal o 34% większa niż z serii I – III. Większa zawartość aktywatora ułatwiała także proces zagęszczania kompozytów, ale prawdopodobnie zakres jego zmienności był zbyt mały, aby można było wnioskować o zauważalnym wpływie na wytrzymałość na ściskanie.

Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, iż tylko czynnik x_1 miał istotny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

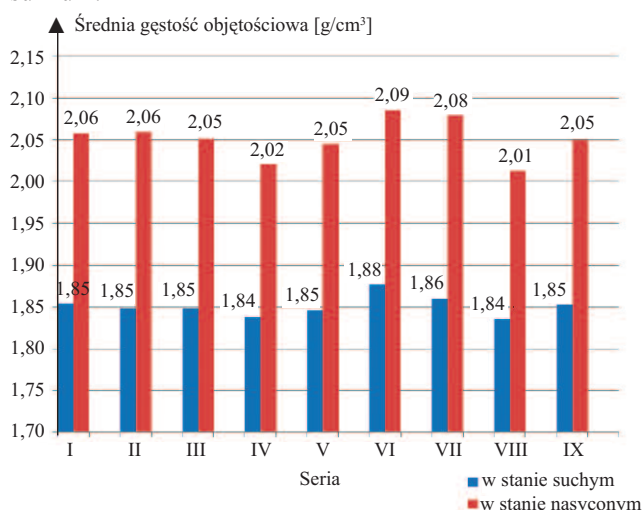
Nasiąkliwość wagowa. Zmianę nasiąkliwości wagowej kompozytów w zależności od zawartości recyklatu z geopolimerów przedstawia rysunek 3. Wynika z niego, że zwiększenie zawartości recyklatu z geopolimeru powoduje spadek nasiąkliwości kompozytów (średnio o 12% przy zwiększeniu recyklatu z 0 do 60%). Nasiąkliwość kompozytów geopolimerowych wahała się od 8,90% do 11,4% masy. Wyniki badań wskazują, że największą nasiąkliwość uzyskano w przypadku kompozytów bez recyklatu, a najmniejszą



Rys. 3. Zmiana nasiąkliwości kompozytów w zależności od zawartości recyklatu z geopolimerów
 Fig. 3. The changes of water absorption depending on content of geopolymer recycilate

(8,98% masy) w przypadku serii VII (przy najniższej zawartości aktywatora i najwyższej zawartości recyklatu z geopolimerów). Ta seria charakteryzowała się również największą wytrzymałością na zginanie i ściskanie spośród wszystkich wykonanych serii. Można zatem przypuszczać, iż frakcja z recyklingu geopolimerów uszczelniła strukturę geopolimerów, poprawiając nasiąkliwość i wytrzymałość. Podobne zjawisko zaobserwował Kriven (2018), który porównywał właściwości mechaniczne cementu portlandzkiego z kompozytami geopolimerowymi [23]. Dodatkowo korzystny efekt w postaci uszczelnienia geopolimerów przyniosła autoklawizacja, co potwierdzili również w swoich badaniach Kriven i in. [17] oraz Tao Ai i in. [18].

Gęstość objętościowa w stanie suchym i nasyconym. Wyniki gęstości objętościowej kompozytów geopolimerowych w stanie suchym i nasyconym przedstawiono na rysunku 4.



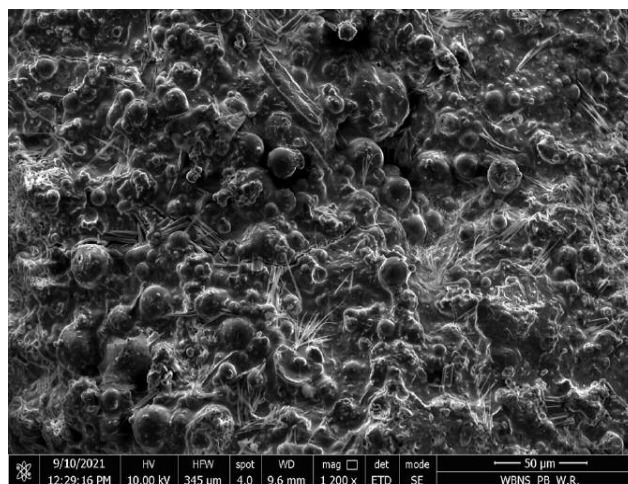
Rys. 4. Uśrednione wyniki badań gęstości objętościowej w stanie suchym i nasyconym autoklawizowanych kompozytów geopolimerowych [g/cm³]

Fig. 4 The average results of dry and saturated bulk density tests of autoclaved geopolymer composites

Gęstość objętościowa w stanie suchym wynosiła 1,84–1,88 g/cm³, a gęstość objętościowa w stanie nasyconym (2,01–2,09 g/cm³). Różnica między największą i najmniejszą średnią gęstością objętościową wynosiła 3,8% w stanie nasyconym oraz 2,1% w stanie suchym.

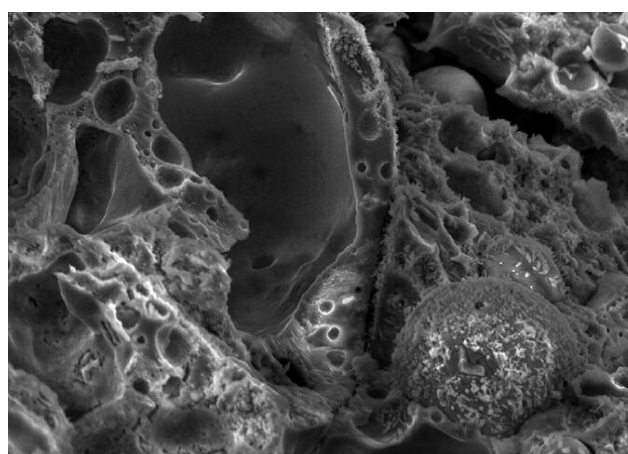
Skaningowa mikroskopia elektronowa. Na fotografiach 1–4 przedstawiono strukturę kompozytów geopolimerowych wykonanych za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej. Fotografie 1 i 2 obrazują strukturę geopolimerów dojrzewających podczas autoklawizacji oraz dla porównania w warunkach laboratoryjnych, wygrzewanych przez pierwsze 24 h po zafarmowaniu w 65°C, w suszarce laboratoryjnej.

Matryca geopolimeru dojrzewającego w warunkach autoklawizacji jest zbita i szczelna (fotografia 1), z widocznymi „zatopionymi” ziarnami popiołu lotnego, natomiast w kompozycie wygrzewanym przez 24 h w 65°C zauważalne są puste przestrzenie (fotografia 3), gdzie prawdopodobnie znajdują się pory lub nie doszło do rozpuszczenia reaktywnych skład-



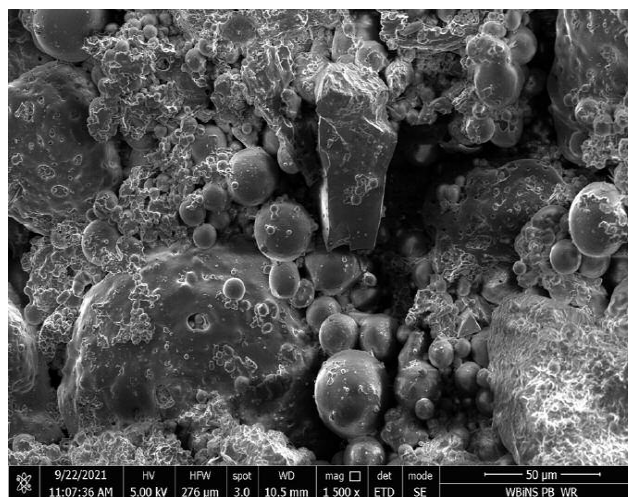
Fot. 1. Struktura autoklawizowanego geopolimeru (powiększenie 1200x)

Photo 1. The structure of an autoclaved geopolymer (mag 1200x)



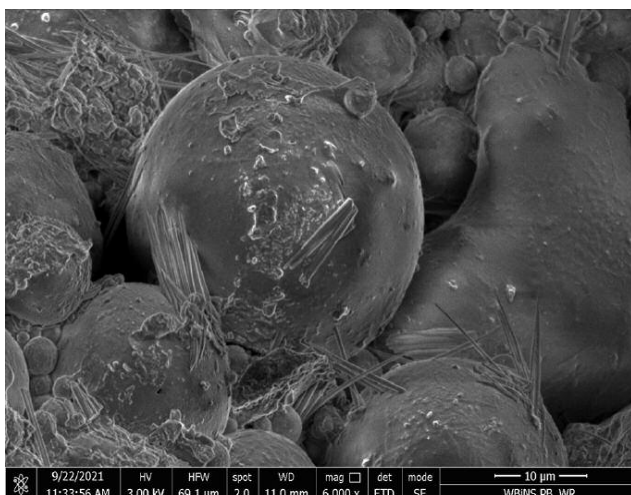
Fot. 2. Struktura autoklawizowanego geopolimeru (powiększenie 8000x)

Photo 2. The structure of an autoclaved geopolymer (mag 8000x)



Fot. 3. Struktura geopolimeru dojrzewającego przez 24 h w temperaturze 65°C (powiększenie 1500x)

Photo 3. The structure of geopolymer matured in 65°C during 24 hours (mag 1500x)



Fot. 4. Ziarno popiołu lotnego w geopolimerze dojrzewającym w 65°C przez 24 h (powiększenie 6000x)

Photo 4. The fly ash in geopolymer matured in 65°C during 24 hours (mag 6000x)

ników [17, 18], o czym może także świadczyć obecność igiełek ettryngitu okalających ziarna popiołu lotnego (fotografia 4), których nie zidentyfikowano w przypadku autoklawizacji (fotografia 2).

Wykonane zdjęcia obrazują odmienną budowę geopolimerów autoklawizowanych i dojrzewających w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 65°C przez 24 h. Rozpuszczanie składników aktywnych (krzemianów glinu i sodu) w geopolimerach autoklawizowanych jest bardziej efektywne niż podczas dojrzewania w temperaturze 65°C przez 24 h. Prawdopodobnie także składniki recyklatu geopolimerowego (szczególnie Al_2O_3 i Fe_2O_3) biorą udział w procesie polikondensacji, tworząc matrycę geopolimeru i częściowo uszczelniając ich strukturę. W celu potwierdzenia tych założeń należałoby wykonać mapowanie EDS i analizę dyfraktometryczną analizowanych kompozytów.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono podstawowe właściwości charakteryzujące geopolimery poddane procesowi autoklawizacji, wykonane na bazie dodatku w postaci mieszanki popiołowo-żuźlowej (MPŻ) oraz recyklatu z geopolimerów. Wykazano korzystny wpływ zastosowanego recyklatu na parametry fizyczno-mechaniczne kompozytów. Autoklawizacja jako proces dojrzewania geopolimerów znacznie przyspiesza proces ich produkcji oraz wpływa na poprawę szczelności struktury. Recyklat z geopolimerów może być kolejnym odpadem budowlanym nadającym się do ponownego wykorzystania. Wymagane są dalsze analizy dotyczące wykorzystania proponowanego recyklatu w kompozytach geopolimerowych.

Literatura

[1] Rajczyk K, Janus G. Mikrostruktura i właściwości geopolimerów powstających w procesie alkalicznej aktywacji popiołu lotnego. *Cement Wapno Beton*. 2021; <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.4.2>.

[2] Chatterjee AK. Nowe technologie produkcji cementu i betonu obejmujące zwracanie do procesu emitowanego dwutlenku węgla; *Cement Wapno Beton*. 2017; 5: 120 – 137.

[3] Błaszczński T, Król M. Geopolimery w budownictwie; *Izolacje*. 2013; 5: 38 – 44.

[4] Mikuła J, Lach 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.

[5] Mohajerani A, Suter D, Jeffrey-Bailey T, Song T, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Law D. Recycling waste materials in geopolymer concrete. *Clean Tech. and Env. Policy*. 2019; <https://doi.org/10.1007/S10098-018-01660-2>.

[6] Jaya NA, Abdullah M, Ahmad R. Reviews on Clay Geopolymer Ceramic Using Powder Metallurgy Method. *Mater. Sci. Forum*. 2014; <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.803.81>.

[7] Mahmood SZ. Strength and durability characteristic of pumice based geopolymer paste. 2019; <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11821.82409>.

[8] Wang R, Wang G. Przyspieszające działanie popiołu z łusek ryżowych na hydratację zaczynów cementowych z dodatkiem estru styrenowo-akrylowego. *Cement Wapno Beton*. 2018; 5: 396 – 406.

[9] Hwang CL, Huynh TP. Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Const. and Build. Mater.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.025>.

[10] Assi NL, Carter K, Deaver E, Ziehl P. Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. *J. Clean. Prod.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477>.

[11] Wu HC, Sun P. New building materials from fly ash-based lightweight inorganic polymer. *Constr. Build. Mater.* 2007; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.052>.

[12] Allahverdi A, Najafi Kani E. Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders. *Inter. J. of C. Eng.* 2008; 7 (3); 154-160.

[13] Aly AM, El-Feky MS, Kohail M, Nasr EA. Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.121>.

[14] Pawluczuk E, Kalinowska-Wichrowska K, Romero-Jimenez JR, Fernandez-Rodríguez JM, Suescum-Morales D. Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior. *J. of Build. Eng.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103317>.

[15] Błaszczński T, Król M. Właściwości spoiw glinokrzemianowych na bazie lotnych popiołów wapienych. *Przegląd Budowlany*. 2019; 7 – 8; 46 – 55.

[16] Mayhoub OA, NasrE-S AR, Yehia A, Kohail M. Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete. *Ain Shams Eng. J.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.013>.

[17] Kriven WM, Waltraud M, Jonathon BL, Gordon M. Microstructure and microchemistry of fully-reacted geopolymers and geopolymer matrix composites. *Cer. Trans.* 2003; 227-250.

[18] Ai T, Zhong D, Zhang Y, Zong J, Yan X, Niu Y. The Effect of Red Mud Content on the Compressive Strength of Geopolymers under Different Curing Systems. *Buildings*. 2021; <https://doi.org/10.3390/buildings11070298>.

[19] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczenie wytrzymałości.

[20] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.

[21] PN-88/B-06250:1988 Beton zwykły – Część 5: Beton 5.2 Nasiąkliwość betonu.

[22] Hathi GR, Sessa BS, Rama DS. Wytrzymałość betonu geopolimerowego opartego na żużlu i popiele lotnym. *Cement Wapno Beton*. 2019; 2: 85 – 91.

[23] Kriven WM. Geopolymer-Based Composites. *Com. Comp. Mater. II*. 2018; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09995-1>.

Badania zrealizowano w ramach pracy zespołowej WZ/WB-IIL/3/2020 ze środków MEIN.

Przyjęto do druku: 12.12.2022 r.