

mgr inż. Krzysztof Duch¹⁾
ORCID: 0000-0002-9581-4984

Geopolimery zawierające materiały odpadowe

Geopolymers containing waste materials

DOI: 10.15199/33.2021.12.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości kompozytów geopolimerowych z kruszywem z recyklingu betonu. Recepturę geopolimerów modyfikowano zawartością granulowanego mielonego żużla wielkopieczowego i popiołu lotnego oraz kruszwa z recyklingu. Użytkane kompozyty geopolimerowe charakteryzowały się m.in. dużą wytrzymałością na ściskanie. Zachęca to do wykorzystania materiałów odpadów w technologii wytwarzania ekologicznych kompozytów bezcementowych, jakimi są geopolimery.

Słowa kluczowe: Geopolimery, kruszywo z recyklingu, beton ekologiczny.

Abstract. This paper presents the results of testing the properties of geopolymer composites with recycled aggregate concrete. The formulation of geopolymers was modified with a content of granulated ground blast-furnace slag, flue ash and recycled aggregate. The obtained geopolymer composites were characterized, among others, by high compressive strength. This encourages to use waste materials in technology in the technology of producing ecological cement-free composites, such as geopolymers.

Keywords: geopolymers; recycled aggregate; ecological concrete.

Współczesne budownictwo stoi przed koniecznością poszukiwania i stosowania rozwiązań przyjaznych środowisku naturalnemu. W związku z tym wymagania ekologiczne skłaniają do modyfikacji i ulepszania zarówno dotychczas stosowanych materiałów budowlanych, jak i technologii ich wytwarzania. W wielu ośrodkach naukowo-badawczych prowadzone są prace nad materiałami budowlanymi, które z jednej strony będą miały bardzo dobre parametry techniczne, a z drugiej walory ekologiczne, tzn. będą produkowane w sposób przyjazny dla środowiska i ekonomiczny.

Dynamika i zakres prac badawczych nie dziwią, jeśli przywoła się fakt, że beton – kluczowy materiał budowlany, jest po wodzie najczęściej stosowany na Ziemi. Konsekwencją tego jest ogromny wpływ, jaki na środowisko naturalne ma jego produkcja. Szacuje się, że beton (biorąc pod uwagę wszystkie etapy produkcji), odpowiada za 4 ÷ 8% światowej emisji CO₂, przy czym połowa tej emisji powstaje podczas produkcji klinkieru cementowego (głównego składnika cementu portlandzkiego). W związku z tym poszukiwania naukowe koncentrują się wokół znalezienia alternatywy dla cementu portlandzkiego. Składnikiem wyjściowym do otrzymania cementu geopolimerowego są

glinokrzemiany, których źródłem mogą być surowce naturalne (np. tuf wulkaniczny) [4] bądź odpady przemysłowe, popioły lotne – pozostałość ze spalania węgla oraz żużel wielkopieczowy, będący produktem ubocznym w hutach stali. W związku z tym, że są to materiały z odzysku, cement geopolimerowy jest wyrobem przyjaznym dla środowiska.

Dotychczas prowadzone badania nad geopolimerami wykazały, iż mają one wiele korzystnych właściwości [2], wśród których są:

- duża wytrzymałość na ściskanie;
- duża odporność na ścieranie;
- duża kwasoodporność i odporność na siarczany;
- duża odporność termiczna oraz ogniotrwałość;
- duża odporność na niską temperaturę;
- mała szkodliwość dla środowiska;
- mała emisja CO₂ podczas produkcji.

Mimo wielu zalet geopolimery nie wyparły tradycyjnego betonu cementowego i nie podbiły rynku budowlanego. Wśród powodów wymienia się kwestie ekonomiczne oraz brak spójnego modelu materiałowego. Tymczasem znalezienie lepszej wersji betonu cementowego wydaje się koniecznością. Szacuje się, że nieustanny rozwój gospodarczy spowoduje wzrost światowej produkcji tego surowca do 5 mld ton rocznie [7]! W związku z tym, wysiłki zmierzają nie do eliminacji betonu, ale jego ulepszenia.

Zaproponowane rozwiązania, polegające na modyfikacji właściwości kom-

pozytów geopolimerowych, wpisały się w aktualną potrzebę znalezienia materiału wytrzymałego i jednocześnie ekologicznego, produkowanego w sposób przyjazny dla środowiska i gwarantującego doskonałą jakość. Eksperyment badawczy polegał na wprowadzeniu do produkcji betonu granulowanego mielonego żużla wielkopieczowego i popiołu lotnego, zamiast cementu portlandzkiego, natomiast część kruszywa naturalnego zastąpiono kruszywem z recyklingu. Wykonano dziewięć różnych serii badawczych, ze zmienną zawartością wymienionych składników.

Materiały i metody badań

Granulowany mielony żużel wielkopieczowy, pozyskany z firmy „Górażdże”, został otrzymany jako produkt uboczny podczas wytapiania surówki w wielkim piecu hutniczym w hucie „Katowice”. W skład surowców wprowadzonych do pieca weszły: ruda żelaza, koks oraz topniki. W wyniku wytopu surówki żelaza w temperaturze 1400 – 1600°C uzyskano stopiony żużel wielkopieczowy na jej powierzchni. Następnie oddzielono go od surówki i poddano procesowi gwałtownego chłodzenia przez użycie wody bądź powietrza, co miało na celu otrzymanie mikrostruktury o odpowiednim poziomie aktywności [5]. Skład chemiczny granulowanego mielonego żużla wielkopieczowego przedstawiono w tabeli 1.

Popiół lotny pochodził z elektrocieplowni w Ostrołęce i spełniał wymagania

¹⁾ Politechnika Białostocka; Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku; krzysztof.duch4@wp.pl

Tabela 1. Skład chemiczny granulowanego mielonego żuźla wielkopieczowego [%] [5]

Table 1. Chemical composition of granulated ground blast furnace slag [%] [5]

Skład chemiczny [%]	
CaO	42,28
Fe ₂ O ₃	1,32
SiO ₂	39,04
Al ₂ O ₃	7,07
MgO	6,35
SO ₃	0,73
Cl ⁻	0,02
Na ₂ O	0,49
K ₂ O	0,36
Na ₂ O _{eq}	0,73

PN-EN 450-1 [3]. Został otrzymany przy spalaniu pyłu węglowego. Produkcja odbyła się przez mechaniczne lub elektrostatyczne wydzielanie cząstek pylistych z gazów wydobywających się z elektrowni. Ponadto popiół mógł zostać poddany różnej obróbce: suszeniu, przesiewaniu, mieleniu czy mieszaniu. Skład chemiczny popiołu przedstawiono w tabeli 2 [6].

Tabela 2. Skład chemiczny popiołu lotnego [6]
Table 2. Chemical composition of flue ash [6]

Skład chemiczny [%]		
Krzemionka	SiO ₂	54,6
Żelazo	Fe ₂ O ₃	4,97
Glin	Al ₂ O ₃	25,3
Mangan	Mn ₃ O ₄	0,06
Tytan	TiO ₂	1,07
Wapń	CaO	2,14
Magnez	MgO	1,8
Siarka	SO ₃	0,37
Fosfor	P ₂ O ₅	0,55
Sód	Na ₂ O	0,84
Potas	K ₂ O	2,8
Bar	BaO	0,15
Stront	SrO	0,07
Strata prażenia	Lol	4,37
SUMA		99,09

Jako kruszywa naturalnego użyto płukanego piasku rzecznoego o frakcji 0/2 mm z miejscowości Kundzin oraz kruszywa żwirowego o frakcjach: 2/4, 4/8 i 8/16 mm.

Aktywator do mieszanki betonowej sporządzono ze szkła wodnego oraz wodorotlenku sodu, których użyto w proporcjach 2,5 : 1. Dodawano go do mieszanki w ilości 0,65 : 1 w stosunku do popiołu lotnego. Badanie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach przeprowadzono na próbkach sześciennych o wymiarach 10 x 10 x 10 cm w prasie hydraulicznej zgodnie z PN-EN 12390-3:2011 [4].

Recykling gruzu

W celu uzyskania kruszywa z recyklingu, próbki betonu umieszczono w kruszarce szczękowej, a następnie prażono pozyskane kruszywo w celu oczyszczenia kruszywa naturalnego z zaprawy cementowej. Wysoka temperatura doprowadziła do złożonego efektu endotermicznego – odwodnienia krzemianu typu C-S-H, uwodnionych glinianów i glinosiarczanów wapnia oraz rozkładu gipsu. Kruszywo poddano prażeniu w piecu w temperaturze 300°C. Proces rozgrzania pieca i zasadnicze prażenie trwały po dwie godziny. Po tym czasie piec został wyłączony i następowało studzenie przez 20 h. Ułatwiło to usunięcie zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa. Kolejnym etapem obróbki kruszywa było włożenie go do komory bębna Los Angeles i podanie 500 obrotom z użyciem dwóch kul stalowych, w celu oddzielenia zaprawy od ziaren kruszywa. Użyto dwóch kul stalowych w obawie, że większa ich liczba mogłaby zniszczyć i rozbić ziarna kruszywa. Po wyjęciu z bębna kruszywa przesiano je przez sита o oczkach odpowiednio 4, 8, i 16 mm w celu uzyskania wymaganej frakcji 4/8 i 8/16 mm i określenia krzywej uziarnienia.

Wyniki badań

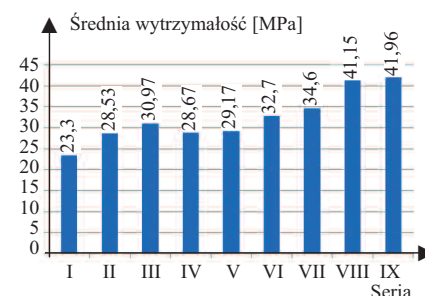
Wykonano dziewięć serii badawczych, w których przyjęto dwa zmienne czynniki: X1 – zawartość granulowanego mielonego żuźla wielkopieczowego w ilości 0 ÷ 25% bądź 50% popiołu lotnego oraz X2 – zawartość kruszywa z recyklingu frakcji 4 ÷ 16 mm w ilości 0, 50 i 100 %. Stałymi wartościami były stężenie aktywatora 8 mol/dm³ i temperatura prażenia kruszywa 300°C. Plan eksperymentu przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Plan eksperymentu [1]

Table 3. Experimental design [1]

Seria	Wartości			
	rzeczywiste		kodowane	
	X ₁	X ₂	x ₁	x ₂
I	0	0	-1	-1
II	0	50	-1	0
III	0	100	-1	1
IV	25	0	0	-1
V	25	50	0	0
VI	25	100	0	1
VII	50	0	1	-1
VIII	50	50	1	0
IX	50	100	1	1

Na rysunku pokazano średnie wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach.



Średnia wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach

Average compressive strength after 28 days

Wnioski

W wyniku zastosowania obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego w temperaturze prażenia 300°C uzyskano 57,55% kruszywa grubego o frakcji > 4 mm. Pozostałą część stanowiła zaprawa, której nie uwzględniano w badaniach. Wzrost zawartości kruszywa grubego z recyklingu z 0 do 100% wpłynął na zwiększenie wytrzymałości kompozytu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania o 28%, natomiast zmiana zawartości żuźla wielkopieczowego z 0 do 50% masy popiołu lotnego – o ok. 43%. Otrzymane wyniki są bardzo obiecujące i zachęcają do kontynuowania badań. Dalsza modyfikacja proporcji użytych składników dałaby być może jeszcze lepsze wyniki.

Literatura

- [1] Duch Krzysztof. Praca magisterska „Modyfikacja właściwości kompozytów geopolimerowych z kruszywem z recyklingu betonu z przeznaczeniem na ustrój nośny mostu”.
- [2] Górski Marcin. 2021. „Geopolimery – ekologiczne materiały przyszłości rodem ze starożytnego Egiptu”. *Inżynier Budownictwa* (5).
- [3] PN-EN 450-1 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [4] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [5] Raport z badań granulowanego mielonego żuźla wielkopieczowego w firmie „Górażdzie”.
- [6] Raport z badań popiołu lotnego w elektrocieplowni w Ostrołęce.
- [7] Watts Jonathan. *Beton – najbardziej destrukcyjny materiał świata*.

Przyjęto do druku: 09.09.2021 r.