

Modyfikacja właściwości kompozytów geopolimerowych z kruszywem z recyklingu betonu z przeznaczeniem na ustrój nośny mostu

Modification of the properties of geopolymer composites with aggregate from recycled concrete intended for the load-bearing structure of the bridge

mgr inż. Krzysztof Duch (ORCID: 0000-0002-9581-4984), dr inż. Edyta Pawluczuk (ORCID: 0000-0002-8806-8637) – promotor, Politechnika Białostocka

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1339

Streszczenie: Artykuł jest streszczeniem pracy magisterskiej dotyczącej badania i zastosowania w budownictwie betonów geopolimerowych z dodatkiem kruszywa z recyklingu. Zaprezentowano badania optymalizacyjne z dwoma zmiennymi: zawartość kruszywa z recyklingu i granulowanego mielonego żużla wielkopiecowego. Wybrany na podstawie badań materiał o najwyższej wytrzymałości i najlepszych parametrach przyjęto do zaprojektowania elementu mostu.

Słowa kluczowe: beton geopolimerowy, kruszywo z recyklingu, ekologia, projekt mostu.

Abstract: The article is a summary of the master's thesis on the study and application of geopolymer concretes with the addition of recycled aggregate in construction. Optimization studies with two variables were presented: the content of recycled aggregate and granulated ground blast furnace slag. The material with the highest strength and the best parameters selected on the basis of tests was adopted to design the bridge element.

Keywords: geopolymer concrete, recycled aggregate, ecology, bridge design.

1. Wprowadzenie

Chociaż dzisiejsze technologie pozwalają na konstruowanie obiektów coraz bardziej zaawansowanych technologicznie, z wykorzystaniem coraz nowocześniejszych materiałów, z zastosowaniem urządzeń przeradzających konstrukcje mostowe w fascynujące obiekty, to jednocześnie nieustannie poszukiwane są materiały bardziej ekologiczne, bardziej wytrzymałe, wydajniejsze. Wzrasta zapotrzebowanie zwłaszcza na takie materiały, do produkcji których wykorzystywać można produkty odpadowe oraz takie, których produkcja emituje mniejszą ilość dwutlenku węgla.

Jednym ze sposobów na zagospodarowanie odpadów budowlanych jest recykling betonu, co zostało zaproponowane w niniejszej pracy jako element materiałowy wykorzystany w projektowaniu ustroju nośnego mostu. Kolejny zaś przykład zastosowania odpadów to użycie granulowanego mielonego żużla wielkopiecowego, co również stało się przedmiotem badań.

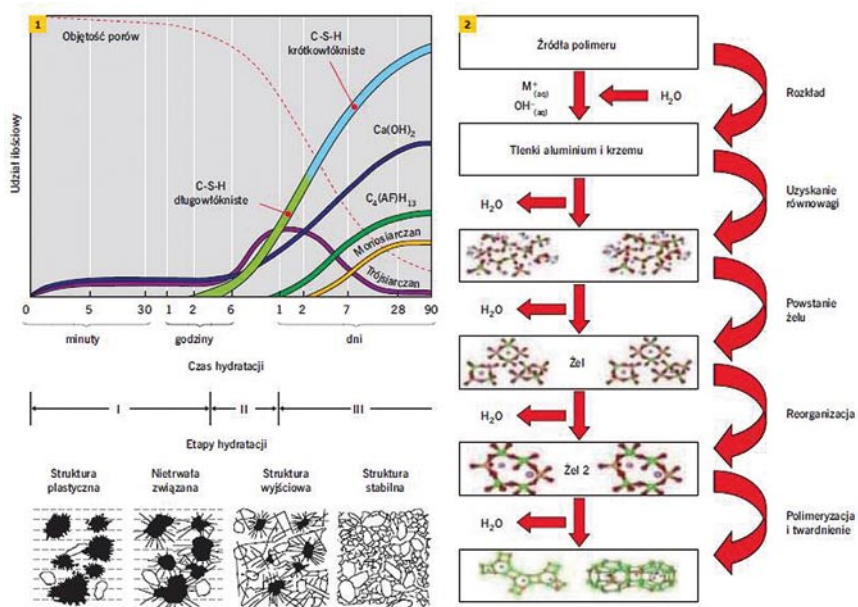
Celem pracy było zbadanie wpływu granulowanego mielonego żużla wielkopiecowego oraz kruszywa z recyklingu na właściwości betonów geopolimerowych oraz wykonanie projektu ustroju nośnego mostu kolejowego nad określoną przeszkodą z wykorzystaniem materiału

otrzymanego w wyniku badań, którego parametry okazały się najlepsze.

2. Powstawanie i zastosowanie geopolimerów

Procesy, które zachodzą przy powstawaniu betonu klasycznego z wykorzystaniem cementu portlandzkiego różnią się od procesów wytwarzania betonu geopolimerowego. Proces hydratacji cementu portlandzkiego można podzielić na trzy zasadnicze etapy. Jednym z kluczowych etapów jest hydratacja właściwa, która prowadzi do rozpuszczenia w wodzie rozpuszczalnych związków, które tworzą masę plastyczną. W dalszym etapie odbywa się krystalizacja produktów owej hydratacji, co powoduje twardnienie masy plastycznej [1]. Jeśli chcemy porównać proces polimeryzacji, to zachodzi on inaczej, składa się bowiem z następujących po sobie reakcji, a nie reakcji przenikających się jak w poprzednim przypadku. Dodana woda na początku wydziela się w każdej fazie [2]. Substancja przechodzi ze stanu sproszkowanego do żelu, a następnie po rozpoczęciu polimeryzacji do ciała stałego. Proces ten jest prowadzony dosyć intensywnie, przez co beton geopolimerowy szybciej uzyskuje wytrzymałość nominalną. Jednym z prostszych sposobów otrzymania spoiwa geopolimerowego stosowanym do wytwarzania

Rys. 1. Etapy hydratacji cementu oraz polimeryzacji [1, 5]



takiego betonu są popioły lotne. Należy jednak pamiętać, że nie każdy popiół lotny nadaje się do użytku i mieć na uwadze aspekty środowiskowe czy ewentualne działanie radioaktywne [3, 4]. Schemat polimeryzacji i etapy hydratacji pokazano na rysunku 1.

Zaawansowane i skomplikowane operacje techniczne przy produkcji i dojrzewaniu betonu geopolimerowego powodują, że dany beton ma głównie zastosowanie w prefabrykacji takich materiałów, jak: płyty ściennie, płyty chodnikowe, krawężniki drogowe, kostki brukowe, słupy, cegły czy belki stropowe.

W samej Polsce stosowanie tych betonów nie jest jeszcze dosyć powszechne. W innych krajach wprowadza się takie rozwiązania również przy warstwie ścieralnej nawierzchni dróg czy budynkach masywniejszych [6].

3. Przygotowanie mieszanki betonowej

W celu przygotowania mieszanki geopolimerowej w pierwszej kolejności odmierzone wszystkie składniki do wykonania zarobu. Po zważeniu suche składniki wsypywano do mieszarki, a po dodaniu ich wszystkich, mieszano je przez 90 sekund. Po upływie tego czasu mieszarkę wyłączono, aby dolać przygotowany aktywator i mieszankę znów wymieszano tym razem przez 150 sekund. Później ręcznie ze ścianek mieszarki pozostałości składników i ponownie włączono mieszalnik na 60 sekund. Po całym procesie mieszania, wizualnie mieszanka wyglądała na jednorodną, co przedstawiono na rysunku 2.

Użyto trzech rodzajów form, o bokach wewnętrznych 10x10x10 cm (do badania wytrzymałości na ściskanie, mrozoodporności, gęstości i nasiąkliwości), o takich samych wymiarach, ale ze specjalną nakładką na pręty (do badania pull out) oraz formy o wymiarach 10x10x50 cm (do badania wytrzymałości na zginanie).

Mieszankę betonową układano w trzech warstwach. Każdą z warstw zagęszczano przez 45 sekund na stoliku wi-



Rys. 2. Gotowa mieszanka geopolimerowa do wykonania próbek



Rys. 3. Próbkę po zagęszczeniu i zdjęciu nadmiaru mieszanki w celu wyrównania powierzchni

bracyjnym. Ostatnią warstwę, po dokonanych zagęszczeniu, wyrównano i nadmiar mieszanki zdjęto za pomocą kielni, co pokazano na rysunku 3.

Po okresie 24 godzin próbki bez użycia żuźla wielkopiecowego przenoszono do suszarki w celu ich wygrzania. Temperaturę ustawiono na 80°C. Aby zapobiec parowaniu wody z próbek, formy przykryto folią. Prawie wszystkie próbki z żuźlem wielkopiecowym (wyjątkiem jest część próbek do badań po siedmiu dniach na ściskanie) nie były wygrzewane. Po okresie 24 godzin wygrzewania formy wyjmowano z suszarki i po chwilowym wystygnięciu rozformowano (serie z samym popiołem). Formy z użyciem żuźla wielkopiecowego rozformowywano już po okresie dobowego dojrzewania

pod folią w laboratorium (nie wymagały wygrzewania). Następnie próbki przeniesiono do zamkniętego zbiornika, gdzie były przechowywane na rusztach nad wodą.

4. Materiały i metodyka badań

4.1. Granulowany mielony żużel wielkopiecowy

Granulowany mielony żużel wielkopiecowy został otrzymany jako produkt uboczny podczas wytapiania surówki w wielkim piecu hutniczym w hucie „Katowice”. Skład chemiczny otrzymanego żużla pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny granulowanego mielonego żużla wielkopiecowego [%] [7]

Skład chemiczny żużla wielkopiecowego	
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

4.2. Kruszywa naturalne

Do utworzenia próbek użyto piasku rzeczno-flukanego z miejscowości Kundzin o frakcji 0/2 mm oraz kruszywa żwirowego odpowiednio o frakcjach: 2/4, 4/8 i 8/16 mm.

4.3. Popiół lotny

Produkcja odbyła się poprzez mechaniczne lub elektrostatyczne wydzielenie pylastych cząstek z gazów wydobywających się z elektrowni. Ponadto popiół mógł zostać poddany różnym obróbkom: suszeniu, przesiewaniu, mieleniu czy mieszaniu. Popiół lotny użyty do wytworzenia danej mieszanki pochodził z elektrociepłowni w Ostrołęce.

4.4. Aktywator alkaliczny

Aktywator do mieszanki betonowej sporządzono ze szkła wodnego oraz wodorotlenku sodu. Szkło wodne w stosunku do wodorotlenku sodu zostało użyte w proporcjach 2,5:1. Aktywator dodawano do mieszanki w stosunku do popiołu lotnego równym 0,65:1.

4.5. Plan eksperymentu

Zaplanowany eksperyment zakładał wykonanie 9 serii badawczych, w których przyjęto dwa zmienne czynniki: X1 – zawartość granulowanego mielonego żużla wielkopiecowego w ilości 0%, 25 bądź 50% popiołu lotnego oraz X2 – zawartość kruszywa z recyklingu frakcji 4–16 mm (0;

50 i 100%). Przyjęto, iż stałą wartością dla każdej serii będzie stężenie aktywatora (8 mol/dm³). Plan eksperymentu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Plan eksperymentu

Seria	Wartości rzeczywiste	
	X1	X2
I	0	0
II	0	50
III	0	100
IV	25	0
V	25	50
VI	25	100
VII	50	0
VIII	50	50
IX	50	100

5. Badania i ich wyniki

W pracy magisterskiej przeprowadzono poniższe badania (według obowiązujących norm europejskich).

5.1. Badanie gęstości świeżej mieszanki

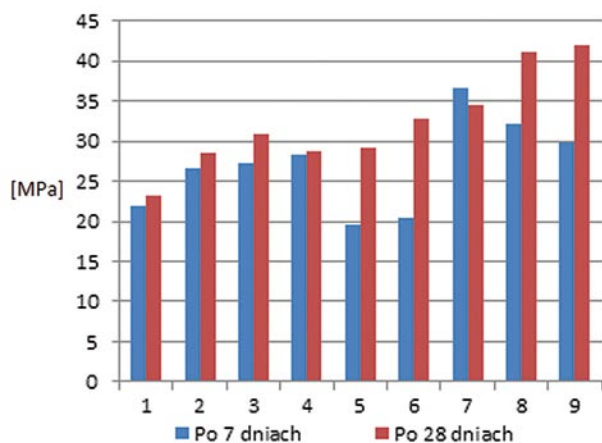
Tabela 3. Wyniki gęstości świeżej mieszanki betonowej

Numer serii	Zawartość żużla	Kruszywo z recyklingu	Wyniki gęstości mieszanki			Średnia
			Próbka I	Próbka II	Próbka III	
Seria I	0%	0%	2,052	2,069	2,091	2,071
Seria II		50%	2,108	2,121	2,126	2,118
Seria III		100%	2,097	2,118	2,137	2,117
Seria IV	25%	0%	2,098	2,110	2,121	2,110
Seria V		50%	2,067	2,088	2,103	2,086
Seria VI		100%	2,107	2,139	2,154	2,133
Seria VII	50%	0%	2,088	2,125	2,141	2,118
Seria VIII		50%	2,161	2,185	2,208	2,185
Seria IX		100%	2,105	2,130	2,138	2,124

Wyniki gęstości mieszanki geopolimerowej kształtowały się w zakresie 2,07–2,18 g/cm³ i generalnie wzrastały wraz z zawartością żużla wielkopiecowego. Jednakże wzrost ten nie był jednoznaczny, a było to spowodowane obecnością kruszywa z recyklingu (zmienna X2) o niższej gęstości niż kruszywo naturalne.

5.2. Badanie wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po okresie 7 i 28 dni dojrzewania w odpowiednich warunkach na próbkach



Rys. 4. Porównanie średnich wytrzymałości na ściskanie serii po okresie 7 i 28 dni

sześciennych o wymiarach 10x10x10 cm. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunku 4.

5.3. Badanie nasiąkliwości

Dane badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą PN-88/B-06250 [N1]. Próbkę po okresie dojrzewania poddano suszeniu w suszarce w temperaturze $65^{\circ}\text{C} \pm 2$. Próbkę były suszone do momentu uzyskania stałej masy. Następnie umieszczono je w pojemniku z wodą, która była stopniowo dolewana, aż całe próbki po kilkudziesięciu godzinach znalazły się pod wodą. Próbkę były trzymane w wodzie do czasu, kiedy ich masa po kolejnych pomiarach nie różniła się już znacząco od poprzednich pomiarów. Wyniki badania nasiąkliwości pokazano w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki badania nasiąkliwości

Numer serii	Zawartość żużla	Kruszywo z recyklingu	Średnia po nasyceniu	Średnia po suszeniu	Nasiąkliwość
I	0%	0%	2121,78	1980,71	7,12
II		50%	2136,18	1992,63	7,20
III		100%	2117,33	1969,62	7,50
IV	50%	0%	2122,74	1999,28	6,18
V		50%	2168,02	2039,80	6,29
VI		100%	2179,79	2048,15	6,43
VII	100%	0%	2183,73	2073,15	5,33
VIII		50%	2230,89	2116,84	5,39
IX		100%	2186,42	2073,25	5,46

5.4. Badanie gęstości w stanie suchym i nasycenym

Przeprowadzono badanie gęstości w stanie suchym. Próbkę betonowe do badania wysuszono w temperaturze $65^{\circ}\text{C} (\pm 2^{\circ}\text{C})$ w suszarce laboratoryjnej do stałej masy, a później

zważono. Badanie gęstości pozornej w stanie nasycenym przeprowadzono jak w stanie suchym, jednak z taką różnicą, że próbki po suszeniu włożono później do zbiornika z wodą, tak aby całe próbki pokryły się wodą. Próbkę ważono codziennie do momentu, aż ich masa była stała, czyli osiągnięto pełne nasycenie. Wyniki dla gęstości w stanie nasycenia i suchym przedstawiono w tabeli 5 i 6.

Tabela 5. Wyniki badania gęstości w stanie nasycenym

Numer serii	Zawartość żużla	Kruszywo z recyklingu	Średnia po nasyceniu
I	0%	0%	2121,78
II		50%	2136,18
III		100%	2117,33
IV	50%	0%	2122,74
V		50%	2168,02
VI		100%	2179,79
VII	100%	0%	2183,73
VIII		50%	2230,89
IX		100%	2186,42

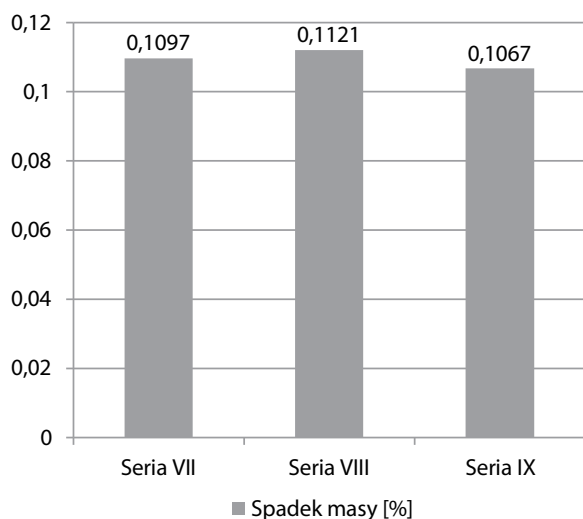
Tabela 6. Wyniki badania gęstości w stanie suchym

Numer serii	Zawartość żużla	Kruszywo z recyklingu	Średnia po suszeniu
I	0%	0%	1980,71
II		50%	1992,63
III		100%	1969,62
IV	50%	0%	1999,28
V		50%	2039,80
VI		100%	2048,15
VII	100%	0%	2073,15
VIII		50%	2116,84
IX		100%	2073,25

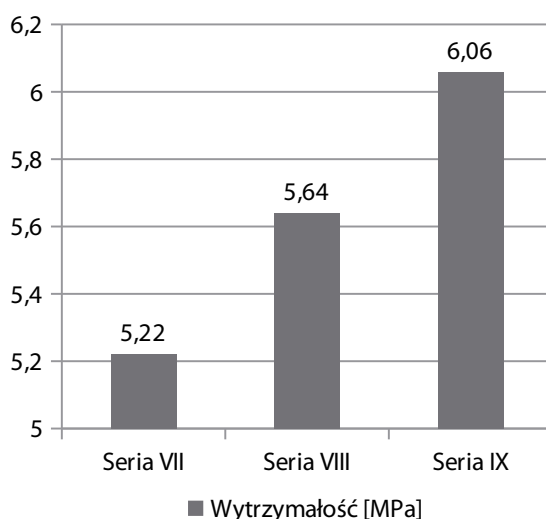
5.5. Badanie mrozoodporności

Krajowe uzupełnienie PN-B-06265 [N2] przewiduje, że ocenę mrozoodporności można było przeprowadzić dwiema metodami: zwykłą i w obecności soli odładzających. Próbkę, które dojrzewały przez okres 28 dni umieszczono w specjalnej komorze. Zostały one poddane 80 cyklom zamrażania i rozmrażania. Każdy cykl trwał odpowiednio 8 godzin (4 godziny zamrażania oraz 4 godziny odmrażania).

Po przeprowadzeniu 80 cykli zamrażania i odmrażania usunięto złuszczenia z powierzchni próbek, a następnie zważono. Średni ubytek masy jest miarą mrozoodporności. Przeprowadzono również badanie na ściskanie na próbkach po 80 cyklach zamrażania i odmrażania i sprawdzono zmianę wytrzymałości. Spadek masy po badaniu mrozoodporności dla poszczególnych serii pokazano na rysunku 5, a same próbki (i brak wyraźnych ubytków) po badaniu obrazuje rysunek 6.



Rys. 5. Spadek masy po badaniu mrozoodporności



Rys. 7. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie



Rys. 6. Przykładowe próbki po badaniu mrozoodporności

5.6. Badanie wytrzymałości na zginanie po 28 dniach

Według normy 12390-5:200 [N3] można wyróżnić dwie metody badania wytrzymałości betonu na zginanie. Pierwsza metoda – przy układzie obciążenia dwupunktowego (zginanie czteropunktowe) oraz druga metoda – przy układzie centrycznego obciążenia punktowego (zginanie trypunktowe). Badanie zostało przeprowadzone metodą drugą. Badane próbki miały przekrój o wymiarach 10x10 cm i długość 50 cm oraz dojrzewały 28 dni. W wynikach podano wytrzymałość na zginanie w MPa. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono na rysunku 7.

5.7. Badanie pull out

Przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu badano poprzez próbę wypychania metodą pull-out na specjalnie przygotowanej prasie. Teoretycznie pręty powinny być wyciągane, ale ze względu na brak odpowiednich urządzeń, pręty poddano wciskaniu. Próbki, w których pręty były zakotwione na całej szerokości (10 cm), położono

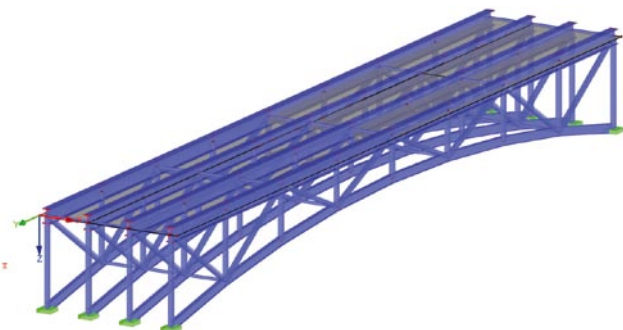
na specjalnym pierścieniu w celu stabilizacji i utworzenia przestrzeni, gdzie dany pręt mógłby być swobodnie wypychany. Próbki w fazie dojrzewania pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Próbki do badania pull-out na etapie dojrzewania

6. Wybór składu kompozytu geopolimerowego

Po wykonaniu wszystkich badań postanowiono, że na wykonanie betonu geopolimerowego na ustrój nośny mostu zostanie przyjęta receptura z serii IX (50% żużla wielkopiecowego i 100% kruszywa z recyklingu). Otrzymane wyniki z danej serii cechowały się najwyższą średnią wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach, jedną z najniższych nasiąkliwości i dobrymi wynikami na ściskanie po 80 cyklach zamrażania i odmrażania. Atutem była też dobra wytrzymałość na zginanie i dobra przyczepność do stali, którą sprawdzono przy badaniu pull out. Z otrzymanego betonu zaprojektowano płytę nośną mostu współpracującą z kratownicami. Schemat modelu z programu przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Model konstrukcji w programie komputerowym

7. Podsumowanie

Całość przeprowadzonych badań pozwoliła na sformułowanie poniższych wniosków.

- Wzrost zawartości grubego kruszywa z recyklingu z 0 do 100% wpłynął na zwiększenie wytrzymałości kompozytu na ściskanie o 27 i 28% odpowiednio po 7 i 28 dniach dojrzewania.
- Zmiana zawartości żużla wielkopieczowego z 0 do 50% masy popiołu lotnego wpłynęła na wzrost wytrzymałości na ściskanie średnio o ok. 117 i 43% odpowiednio po 7 i 28 dniach dojrzewania.
- Wraz ze wzrostem zawartości żużla wielkopieczowego z 0 do 50% zaobserwowano spadek nasiąkliwości z 7 do 5,3%, natomiast obecność kruszywa z recyklingu wpłynęła nieznacznie na jej wzrost, co było spowodowane obecnością zaprawy cementowej na powierzchni ziaren.
- Na gęstość zarówno mieszanki geopolimerowej, jak i stwardniałego kompozytu nieznaczny wpływ miała obecność żużla wielkopieczowego, z uwagi na jego gęstość wyższą w porównaniu z popiołem lotnym. Zawartość kruszywa z recyklingu była czynnikiem nieistotnym, co świadczy o zbliżonej jego gęstości do gęstości kruszywa naturalnego.
- Beton wytworzony na bazie żużla wielkopieczowego charakteryzował się dobrą odpornością na niskie temperatury, badanie mrozoodporności po 80 cyklach zamrażania i rozmrażania nie wykazało pęknięć czy ubytków na powierzchni próbek, natomiast odnotowano przyrost wytrzymałości na ściskanie o 39%. Oznacza to, iż beton taki można stosować w trudnych warunkach atmosferycznych.
- Wraz ze wzrostem zawartości kruszywa z recyklingu z 0 do 100% odnotowano wzrost wytrzymałości kompozytu na zginanie i przyczepności do zbrojenia odpowiednio o 16 i 8%.

- Wykorzystanie do produkcji kompozytu geopolimerowego żużla wielkopieczowego dało możliwość pominięcia procesu wygrzewania betonu podczas dojrzewania. Zmniejsza to znacząco koszty produkcji takiego betonu. Obróbka termiczna gruzu betonowego w 300°C jest wystarczająca, z uwagi na właściwości uzyskanego kruszywa i parametry kompozytu.
- Betony geopolimerowe stanowią dobrą alternatywę dla betonu cementowego, zarówno pod względem ekologicznym, jak i ze względu na parametry techniczne i mogą mieć szerokie zastosowanie w budownictwie, między innymi w projektowaniu ustrojów nośnych obiektów mostowych wymagających dużej wytrzymałości, niskiej nasiąkliwości i odporności na niskie temperatury. Dzięki zastosowaniu w mieszankach geopolimerowych żużla wielkopieczowego oraz kruszywa z recyklingu betonu możliwe jest wytwarzanie szeregu bardzo trwałych i wytrzymałych elementów.

Propozycja dalszych badań

Otrzymane wyniki dobrze rokują na przyszłość i w dalszych badaniach należy poszukiwać optymalnych ilości żużla wielkopieczowego oraz rozważyć stosowanie innych dodatków korzystnie wpływających na proces wiązania kompozytu geopolimerowego.

Praca została wyróżniona drugim miejscem w ogólnopolskim konkursie „Kreuj zieloną przyszłość z Cemex”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Polski Cement Sp. z o.o., Warszawa, 2010
 - [2] Błaszczński T., Łowińska-Kluge A., Experimental investigations and assessment of damages in case of swimming-pool repairs, „Archives of Civil and Mechanical Engineering 1/2007, str. 5–20
 - [3] Gupta S., Durability of Flyash Based Geopolymer Concrete, National University of Singapore, 2009
 - [4] Król M., Błaszczński T. Z., Geopolimery w budownictwie, Izolacje 5/2013, str. 38–43, Warszawa, 2003
 - [5] Hardjito D., Wallah S. E., Sumajouw D. M. J., Rangan B. V., On the development of fly ash based geopolymer concrete, ACI Material Journal 6/2004, str. 467–472
 - [6] Bołtryk M., Granatyr K., Stankiewicz N., Ecological aspects in the application of geopolymer composites on road surfaces, Białystok University of Technology, Białystok, 2019
 - [7] Raport z badań granulowanego mielonego żużla wielkopieczowego w firmie Górażdże
- [N1] PN-88/B-06250
 [N2] PN-B-06265
 [N3] 12390-5:200

Serdecznie zapraszamy autorów do publikowania
w „Przeglądzie Budowlany”

Za publikację w naszym miesięczniku uzyskuje się **70** punktów