

dr inż. Bogdan Langier¹⁾

ORCID: 0000-0001-5143-6013

dr inż. Jacek Halbiniak¹⁾

ORCID: 0000-0002-2299-5913

dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz¹⁾

ORCID: 0000-0001-5114-7932

dr hab. inż. Izabela Major, prof. PCz^{1)*}

ORCID: 0000-0003-1234-9317

Badanie wybranych właściwości betonu z popiołem lotnym ze współspalania biomasy drzewnej i węgla kamiennego

Research of selected properties of concrete with fly ash obtained from the co-combustion of wood biomass with hard coal

DOI: 10.15199/33.2022.12.34

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu dodatku popiołu lotnego uzyskanego ze współspalania biomasy drzewnej oraz węgla kamiennego na wybrane właściwości betonów. Przeprowadzono analizę właściwości modyfikowanych mieszanek betonowych obejmujących konsystencję oraz zawartość powietrza. Badania stwardniałego betonu obejmowały określenie gęstości, wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, nasiąkliwości, głębokości penetracji wody pod ciśnieniem oraz mrozoodporność po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. Na podstawie badań stwierdzono, że stosowanie popiołu lotnego ze współspalania węgla z biomasą drzewną pozwala na uzyskanie betonów mrozoodpornych.

Słowa kluczowe: beton modyfikowany; popioły lotne; mrozoodporność.

Abstract. The paper presents an analysis of the effect of the addition of fly ash obtained from the co-combustion of wood biomass with hard coal on selected properties of concrete. The properties of modified concrete mixtures were tested, including consistency and air content. For the hardened concrete, the tests included the determination of density, compressive strength after 28 days, water absorption, depth of water penetration under pressure and frost resistance after 150 cycles of freezing and thawing. Based on the research, it was found that the use of fly ash from the co-combustion of coal with wood biomass allows to obtain frost-resistant concretes.

Keywords: modified concrete; fly ashes; frost resistance.

Zasadniczym elementem zrównoważonego rozwoju jest pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych (OZE), szczególnie z biomasy, która stanowi trzecie co do wielkości na świecie ich źródło. Pozwala to m.in. na zagospodarowanie odpadów oraz ograniczenie emisji CO₂ i wydobycia paliw kopalnianych prowadzące do zmniejszenia szkód środowiska naturalnego. Biomasę mogą stanowić odpady gospodarki komunalnej, produkty uboczne przemysłu leśnego, a także odpady z produkcji rolniczej w postaci słomy i szybko rosnących roślin energetycznych. Bardzo ważnym aspektem jest poznanie właściwości tak powstałych popiołów lotnych, a szczególnie ich wpływu na uzyskiwane parametry charakterystyczne i użytkowe wyrobów powstałych z ich zastosowaniem [1 ÷ 3].

W danych literaturowych można znaleźć informacje na temat zmiany właściwości popiołów ze współspalania biomasy drzewnej z węglem kamiennym [4 ÷ 7]. Zmienia się ich skład chemiczny, który może doprowadzić do obniżenia aktywności pucolanowej. Zawartość biomasy w różnych technologiach spalania znacznie się różni i wynosi od ok. 5% w kotłach pyłowych do nawet 20% w przypadku wykorzystania kotłów fluidalnych. Do ograniczeń wpływających na stosowanie biomasy zaliczyć można obecność zanieczyszczeń oraz brak jej stabilności w zakresie niektórych cech fizykochemicznych oraz brak stabilności wilgotności, której wartość może osiągać nawet kilkadziesiąt procent [8 ÷ 10]. Łaskawiec i inni [1] wykazali, że popioły lotne ze współspalania biomasy drzewnej i węgla kamiennego mogą być wykorzystywane przy produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego bez spadku wytrzymałości betonu.

Pozytywny wpływ popiołów lotnych ze współspalania biomasy drzewnej i węgla kamiennego na właściwości betonów potwierdzono również w pracy [11]. W badaniach wykazano, że popiół lotny z biomasą (o zawartości 80%) wykazuje dobre właściwości pucolanowe i może być stosowany jako dodatek mineralny do kompozytów betonowych. Ponadto pozytywnie wpływa na ograniczenie przepuszczalności chlorków w badanych betonach już w 28 dniu ich dojrzewania, co znacznie poprawia ich trwałość.

W [12] przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie cementów – bez dodatków oraz z dodatkiem popiołu krzemionkowego, jak również z dodatkiem popiołu krzemionkowego z biomasą. Analiza wykazała, że największą wytrzymałość uzyskał cement bez dodatków, natomiast cement z dodatkiem popiołu krzemionkowego z biomasą najmniejszą średnią wytrzymałość po 2, 28, 90 i 180 dniach. Po 180 dniach cement z dodatkiem

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: izabela.major@pcz.pl

popiołu z biomasą osiągnął o 7% mniejszą wytrzymałość w porównaniu z cementem bez dodatków. Wykazano, że dodatek popiołów lotnych z biomasą wydłuża proces hydratacji cementu, przesuwając początek czasu wiązania oraz obniża początkową wytrzymałość cementu, jak również zwiększa jego porowatość.

Na jakość popiołów z biomasą i możliwość ich zastosowania w materiałach o matrycy cementowej duży wpływ ma odpowiednie wstępne przygotowanie biomasy, które następuje jeszcze przed jej spalaniem oraz odpowiednia temperatura i czas spalania. Ziarna popiołów z biomasy mogą mieć nieregularny kształt i chropowatą powierzchnię, co negatywnie wpływa na urabialność i konsystencję mieszanki betonowej. Odpowiednie połączenie biomasy (10 – 20%) z mikrokrzemionką (5%) umożliwiło uzyskanie betonów o wysokiej wytrzymałości oraz dużej odporności na środowisko siarczanowe [13]. Poprawę parametrów mechanicznych betonów z dodatkiem popiołów z biomasą przedstawiono w [14]. Biomasę uzyskaną z przemysłu celulozowo-papierniczego wprowadzano jako częściowy zamiennik cementu. Betony, w których zastępowano cement popiołami z biomasy w ilości 10 ÷ 18%, uzyskały większą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu z betonem referencyjnym (bez dodatku biomasy). W [15] uzyskano obiecujące wyniki badań, gdzie jako częściowy zamiennik kruszywa lekkiego zastosowano kruszywo pochodzące z popiołów z biomasą.

Pozytywny wpływ popiołów z biomasy na właściwości betonów i cementów potwierdziło wielu badaczy, niemniej dalej jest to obszar intensywnych badań i eksperymentów, dotyczących ich wpływu na cechy fizyczne, mechaniczne i chemiczne materiałów o matrycy cementowej. Badania wskazują, że mimo pewnych ograniczeń w stosowaniu biomasy jest ona znaczącym substytutem paliw kopalnych, co szczególnie wyraźnie widać w obecnej dobie kryzysu energetycznego. Zagospodarowanie popiołów lotnych powstałych ze współspalania biomasy i węgla kamiennego stało się kolejnym wyzwaniem dla ośrodków badawczych. Warto wspomnieć, że popioły lot-

ne powstałe ze spalania węgla z biomasą drzewną mogą mieć podobne zastosowanie jak popioły ze spalania samego węgla.

W artykule zaprezentowano badania wybranych właściwości betonu modyfikowanego różną ilością dodatku uzyskanego ze współspalania biomasy drzewnej z węglem kamiennym. Określono m.in. wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu; głębokość penetracji wody pod ciśnieniem oraz nasiąkliwość i mrozoodporność, a także konsystencję mieszanki betonowej oraz zawartość powietrza. Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest zagospodarowanie takich popiołów w przemyśle materiałów budowlanych.

Charakterystyka badań betonów

Badania przeprowadzono na betonie żwirowym wykonanym z cementu portlandzkiego CEM I 4,5R, mieszanki naturalnych kruszyw żwirowych, popiołu lotnego ze współspalania węgla kamiennego z biomasą w postaci drewna odpadowego, domieszki upłynniającej w ilości 1% m.c. oraz domieszki napowietrzającej w ilości 0,1% m.c. Zastosowana domieszka upłynniająca nowej generacji jest wytwarzana na bazie modyfikowanych polikarboksylanów i pozwala w znaczny sposób zredukować ilość wody, a ponadto jest kompatybilna z domieszką napowietrzającą. Popiół lotny, powstający ze współspalania węgla kamiennego z biomasą drzewną pochodzącą z gospodarki leśnej (zrębki drzewne, drzewa iglaste, z korą, bez igliwia, z przemysłu leśnego), zastosowany w badanych betonach został poddany analizie składu chemicznego za pomocą spektrometru rentgenowskiego XRF. Skład pierwiastkowy popiołu lotnego uzyskany w badaniach przedstawiono w tabeli 1. Stwierdzono największą zawartość dwutlenku krzemu wynoszącą 51,4%, co stanowi ponad połowę jego składu. Tlenek glinu i wapnia występował na poziomie ok. 12%, natomiast zawartość tlenu potasu wynosiła ok. 8%. Program realizowanych badań zakładał przeprowadzenie analizy na 8 seriach betonu żwirowego modyfikowanego

Tabela 1. Zawartość tlenków i chloru w popiele lotnym

Table 1. The content of oxides and chlorine in fly ash

Składnik	Zawartość [%]	Składnik	Zawartość [%]
SiO ₂	51,40	Cl	1,61
Al ₂ O ₃	12,46	Fe ₂ O ₃	1,38
CaO	11,41	Na ₂ O	0,47
K ₂ O	8,16	TiO ₂	0,25
SO ₃	4,78	MnO	0,24
MgO	3,42	ZnO	0,05
P ₂ O ₅	2,13	SrO	0,04

dodatkiem popiołu lotnego z domieszką napowietrzającą. Do serii kontrolnej P0 wprowadzono popiół lotny w ilości 10, 15 i 20% masy cementu. Serie te oznaczono jako P10, P15 i P20.

Popiół lotny dodawano jako zamiennik kruszywa. W przypadku wszystkich czterech serii betonów, obejmujących serię kontrolną oraz serie z dodatkiem popiołu lotnego, zastosowano domieszkę napowietrzającą w ilości 0,4% m.c. (próbki z literą N). W ten sposób uzyskano 8 serii, których skład ilościowy przedstawiono w tabeli 2.

Wszystkie serie zostały poddane badaniom:

- konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka;
- zawartości powietrza metodą ciśnieniową;
- wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania;
- wytrzymałości betonu na ściskanie po wygrzaniu w temperaturze 195°C;
- gęstości objętościowej betonu;
- wysokości podciągania wody pod ciśnieniem;
- mrozoodporności po 150 cyklach.

Wyniki badań

Badania mieszanki betonowej.

Oznaczenie stopnia ciekłości mieszanki betonowej realizowano metodą opadu stożka zgodnie z normą PN-EN 12350-2:2019-07 [16]. Wyniki przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 1. Widoczny jest trend spadku ciekłości mieszanki betonowej wraz ze zwiększającą się zawartością zastosowanego popiołu lotnego. W przypadku mieszanek bez domieszki napowietrza-

Tabela 2. Skład badanych betonów

Table 2. Composition of tested concretes

Seria	Cement (CEM I 42,5R)	Woda	Popiół lotny	Piasek	Żwir 2-8	Żwir 8-16	Kruszywo łącznie	Superplas- tyfikator	Domieszka napowietrzająca
P0	338	152,1		594	693	693	1980	3,06	–
P0N	338	152,1		594	693	693	1980	3,06	0,34
P10	338	152,1	33,8	580,2	676,9	676,9	1934	3,06	–
P10N	338	152,1	33,8	580,2	676,9	676,9	1934	3,06	0,34
P15	338	152,1	50,7	573,2	668,9	668,9	1911	3,06	–
P15N	338	152,1	50,7	573,2	668,9	668,9	1911	3,06	0,34
P20	338	152,1	67,6	540,2	630,4	630,4	1801	3,06	–
P20N	338	152,1	67,6	540,2	630,4	630,4	1801	3,06	0,34

jając (DN) opad stożka zmniejszył się z 90 mm (seria P0) do 70 mm (seria P20), natomiast mieszanek napowietrzonych ze 125 mm (seria P0N) do 105 mm (seria P20N). Zmiana konsystencji mieszanek betonowych wyrażona opadem stożka nie powodowała zmiany klasy konsystencji. Mieszanom betonowym bez dodatku popiołów przypisano klasę konsystencji

Zarówno w przypadku mieszanek bez popiołu lotnego, jak i z dodatkiem popiołów linie trendu wskazują na spadek wartości badanej cechy. Jest ona wyraźniejsza w mieszanekach betonowych z popiołem lotnym, w których zawartość powietrza zmniejszyła się z 5,9% w przypadku serii P0N do wartości 4,7% w serii P20N. W betonie bez dodatku DN, o zawartości popiołu lot-

nego do 15% nie stwierdzono istotnej różnicy w zawartości powietrza, jednak przy 20% zawartości popiołu uzyskuje się wyraźnie mniejszą zawartość powietrza w badanej mieszance betonowej.

Badania betonu. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2019-07 [18]. Wyniki badania oraz klasę wytrzymałości betonów zestawiono w tabeli 5. Na rysunku 3 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.

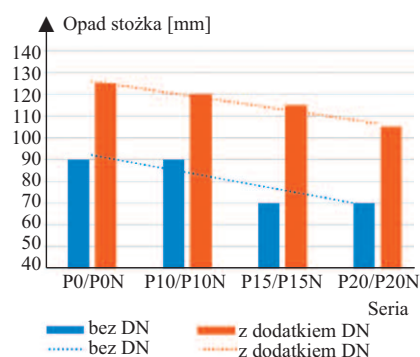
Wprowadzenie do mieszanki betonowej popiołu lotnego spowodowało niewielki przyrost wytrzymałości betonów na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, szczególnie betonów bez domieszki napowietrzającej. W przypadku betonów z domieszką napowietrzającą można zauważyć istotniejszą tendencję poprawy wytrzymałości w wyniku dodania popiołu lotnego, a największy przyrost średniej wytrzymałości na ściskanie odnotowano w serii P20N i wyniósł on 5,3 MPa w stosunku do serii P0N. Linia trendu przebiega wyraźniej w górę w porównaniu z linią trendu betonów bez DN.

Na rysunku 4 przedstawiono zmianę wytrzymałości na ściskanie betonów bez i z domieszką napowietrzającą wyrażoną w procentach, wyni-

Tabela 3. Konsystencja mieszanki betonowej

Table 3. Consistency of the concrete mix

Charakterystyka	Seria							
	P0	P0N	P10	P10N	P15	P15N	P20	P20N
Opad stożka [mm]	90	125	90	120	70	115	70	105
Klasa konsystencji	S2	S3	S2	S3	S2	S3	S2	S3

Rys. 1. Konsystencja mieszanki betonowej
Fig. 1. Consistency of the concrete mix

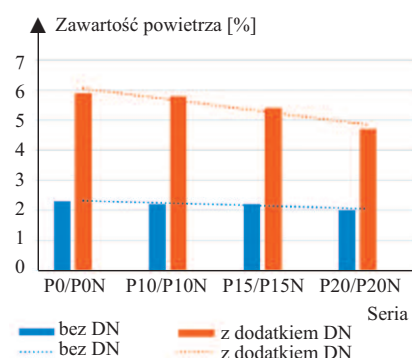
S2, natomiast mieszanom z dodatkiem popiołów klasę S3.

Badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej zostało przeprowadzone metodą ciśnieniową wg normy PN-EN 12350-7:2019-08 [17], a wyniki przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunku 2.

Tabela 4. Zawartość powietrza w mieszance betonowej

Table 4. Air content in the concrete mix

Parametr	Seria							
	P0	P0N	P10	P10N	P15	P15N	P20	P20N
Zawartość powietrza [%]	2,3	5,9	2,2	5,8	2,2	5,4	2,0	4,7

Rys. 2. Zawartość powietrza w mieszance betonowej określona metodą ciśnieniową
Fig. 2. Air content in the concrete mix determined by the pressure method

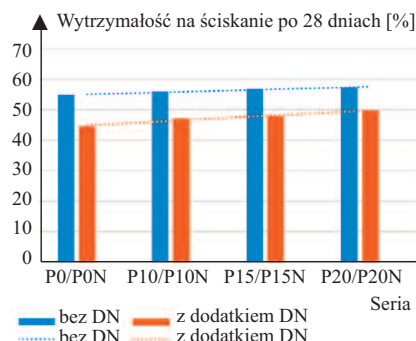
kającą ze wzrostu zawartości popiołu lotnego w składzie betonów. Stwierdzono szczególnie korzystne oddziaływanie popiołu na wytrzymałość betonów serii z domieszką napowietrzającą.

Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-8:2019-08 [19]. Wyniki przedstawiono w tabeli 6 oraz na rysunku 5. Uzyskane wyniki badań betonów bez domieszki napowietrzającej (DN) wskazują na niewielką zmianę wyniku, który kształtuje się korzystniej, ale w przypadku serii

Tabela 5. Średnia wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania betonu

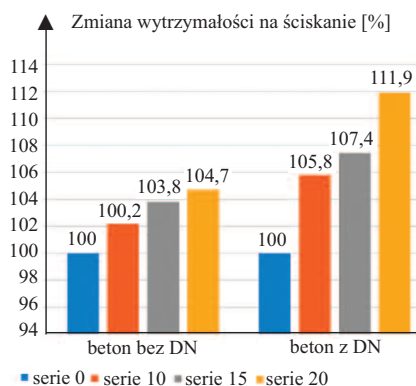
Table 5. Mean compressive strength after 28 days of concrete maturation

Parametr	Seria							
	P0	P0N	P10	P10N	P15	P15N	P20	P20N
f_{cm} [MPa]	54,8	44,5	56,0	47,1	56,9	47,8	57,4	49,8
Klasa wytrzymałości	C40/50	C30/37	C45/55	C35/45	C45/55	C35/45	C45/55	C35/45



Rys. 3. Wytrzymałość betonu na ściskanie

Fig. 3. Compressive strength of concrete



Rys. 4. Wpływ zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość betonu na ściskanie

Fig. 4. Influence of fly ash content on concrete compressive strength

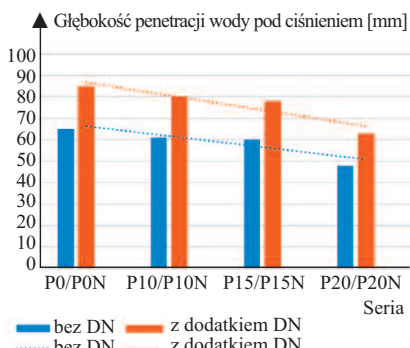
P20, z 20% zawartością popiołu lotnego, daje się zauważyć wyraźniejsze uszczelnienie betonu. Podobną zależność można wskazać w przypadku betonów z domieszką napowietrzającą.

Badanie absorpcji wody pod ciśnieniem atmosferycznym przeprowadzono na próbkach przygotowanych zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2019-07 [20]. Próbki stopniowo zanurzano

Tabela 6. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w betonie

Table 6. Water penetration depth under pressure in concrete

Parametr	Seria							
	P0	P0N	P10	P10N	P15	P15N	P20	P20N
Głębokość penetracji wodą [mm]	65	85	61	80	60	78	48	63



Rys. 5. Badanie penetracji wody pod ciśnieniem w betonie

Fig. 5. Water penetration test under pressure in concrete

w wodzie i pozostawiono do nasycenia do stałej masy. Następnie zważono i wysuszono w suszarce w temperaturze 95°C. W tabeli 7 i na rysunku 6 zestawiono wyniki badania. Oznaczenie nasiąkliwości wodą wykazało, że wraz ze zwiększaniem się zawartości popiołu lotnego w składzie betonów następował wzrost jej wartości. Największą nasiąkliwość wykazały betony serii P20 (4,9%) oraz P20N

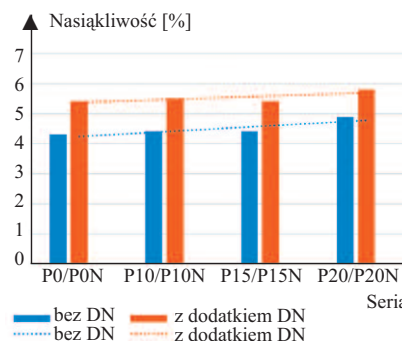
Tabela 7. Nasiąkliwość betonu wodą

Table 7. Water absorption of concrete

Parametr	Seria							
	P0	P0N	P10	P10N	P15	P15N	P20	P20N
Nasiąkliwość [%]	4,3	5,4	4,4	5,5	4,4	5,4	4,9	5,8

(5,8%). Wyznaczone linie trendu pokazują większą tendencję do wzrostu absorpcji wody w betonach bez dodatku DN.

Badanie trwałości mrozowej betonów zrealizowano w przypadku 150 cykli zamrażania/odmrażania zgodnie z normą PN-B-06265: 2022-08 [21]. W tabeli 8 przedstawiono uzyskany w badaniu spadek wytrzymałości na ści-



Rys. 6. Nasiąkliwość betonu wodą

Fig. 6. Water absorption of concrete

skanie po przeprowadzeniu 150 cykli badawczych. Rysunek 7 prezentuje wyniki badania spadku wytrzymałości po badaniu mrozoodporności metodą bezpośrednią. Wskazano na niekorzystne oddziaływanie dodatku popiołów lotnych ze współspalania węgla z biomasą na beton narażony na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Zarówno w betonach bez domieszki napowietrzającej, jak i z DN linie trendu są porównywalne. Największy spadek wytrzymałości uzyskano w przypadku serii z 20% ilością popiołu. Należy jednak podkreślić, że wszystkie badane serie betonów uzyskały wyniki pozwalające stwierdzić, że jest to beton mrozoodporny, gdyż spadek wytrzymałości nie przekroczył 20%, a w badaniu ubytku masy w każdym przypadku odnotowano 0%.

Wnioski

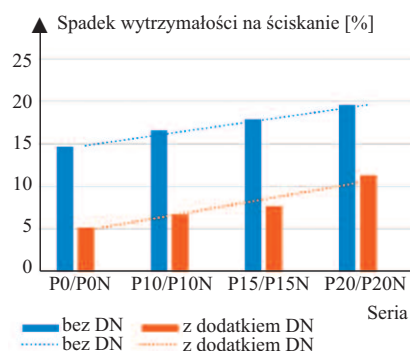
Przeprowadzone badania wybranych właściwości betonów zawierających dodatek w postaci popiołu lotnego powstającego ze współspalania węgla kamiennego z biomasą drzewną pochodzącą z gospodarki leśnej (zrębki drzewne), wykazały, że dodatek ten może być stosowany w technologii betonów podobnie jak popioły lotne powstałe ze spalania samego węgla.

Pomimo odnotowanego spadku wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności wraz ze zwiększaniem zawartości popiołu lotnego powstającego ze współspalania węgla

Tabela 8. Mrozoodporność betonu po 150 cyklach

Table 8. Frost resistance of concrete after 150 cycles

Parametr	Seria							
	P0	P0N	P10	P10N	P15	P15N	P20	P20N
Spadek masy [%]	0	0	0	0	0	0	0	0
Spadek wytrzymałości [%]	14,7	5,2	16,6	6,7	17,9	7,7	19,6	11,3



Rys. 7. Mrozoodporność betonu (spadek wytrzymałości) po 150 cyklach

Fig. 7. Frost resistance of concrete (decrease of strength) after 150 cycles

z biomasą, zastosowanie nawet 20% popiołu pozwala zaliczyć badane betony do mrozoodpornych [22].

Dodatek użytego do badania popiołu lotnego wpływa na ciekłość mieszanki betonowej, powodując jej nieznaczne pogorszenie. Największy spadek opadu stożka odnotowano w przypadku próbek z 20% zawartością popiołu lotnego, który wyniósł 22,2% w betonie bez domieszki napowietrzającej oraz 16% w betonach z DN. Nawet tak wyraźne różnice w bezpośrednim pomiarze opadu stożka nie zmieniły klasy konsystencji mieszanek betonowych.

Stwierdzono korzystne oddziaływanie przyjętego do badań popiołu lotnego na inne właściwości betonu. Użytko poprawę wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, największą w przypadku betonów zawierających popiół lotny w ilości 20%. Wzrost ten w betonie serii P20N w odniesieniu do serii P20 wyniósł 11,9%.

Zaobserwowano pozytywny wpływ popiołu lotnego powstającego ze współspalania węgla z biomasą pochodzącą z gospodarki leśnej (zrębki drzewne, drzewa iglaste, z korą, bez igliwia, z przemysłu leśnego), na szczelność betonu. W przypadku próbek o zawartości 20% popiołu lotnego zastosowanego ja-

ko zamiennik kruszywa uzyskano spadek głębokości penetracji wody o 26,1% w serii bez DN oraz o 25,9% w serii z dodatkiem DN.

Literatura

- [1] Łaskawiec K, Michalik A, Zapotoczna-Sytek G. Badania nad zastosowaniem popiołów lotnych ze współspalania biomasy drzewnej i węgla kamiennego do wytwarzania betonu komórkowego, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. 2011; 4 (7): 146 – 162.
- [2] Łaskawiec K, Górka B, Szymczak J, Zapotoczna-Sytek G. Zastosowanie popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy do wytwarzania betonu komórkowego. Popioły z energetyki. XVI międzynarodowa konferencja. 2009 Zakopane, Polska Unia UPS.
- [3] Projekt badawczy nr N506 066 31/3156 – Popioły lotne powstające przy współspalaniu biomasy z węglem w kotłach pyłowych – badania rozpoznawcze pod kątem ich utylizacji w przemyśle materiałów budowlanych – Sprawozdanie COBRPB CEBET.
- [4] Vuthaluru HB. Thermal behaviour of coal/biomass blends during co-pyrolysis. Fuel Processing Technology. 2003; [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(03\)00112-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(03)00112-7).
- [5] Biagini E, Lippi F, Petarca L, Tognotti L. Devolatilization rate of biomasses and coal-biomass blends: an experimental investigation. Fuel. 2002; [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00204-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00204-6).
- [6] Zhou X, Mahalingam S. A suitable mixture reaction for diffusion flames of wood pyrolysis gas. Combustion and Flame. 2003; [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00550-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00550-3).
- [7] Małolepszy J, Tkaczewska E. Wpływ popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na proces hydratacji i właściwości cementu, IV Konferencja Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wisła, 2006, Wydawnictwo Polski Cement Sp. z o.o., Kraków. 2006: 591 – 602.
- [8] Wójcik W, Popiel P, Ławicki T. Analiza wzrostu zawartości części palnych w popiele i żużlu przy współspalaniu biomasy z pyłem węglowym, III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska. Komitet Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, 2009: 273 – 278.

[9] Kubica K, Ściążko M, Raińczak J, Współspalanie biomasy z węglem, Konferencja Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej (17; 05-08.10.2003; Zakopane, Polska).

[10] Hausteina E, Grabarczyk L. Wpływ współspalania biomasy z węglem kamiennym na wybrane właściwości fizyczno-chemiczne popiołu lotnego. Polityka Energetyczna. 2013; 15 (2): 87 – 103.

[11] Kosior-Kazberuk M. Odporność betonów zawierających popiół lotny ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na wnikanie jonów chlorkowych. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2010; 1: 131 – 136.

[12] Małolepszy J, Tkaczewska E. Wpływ popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na proces hydratacji i właściwości cementu. IV Konferencja Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność, 2006, https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2006/malolepszy_tkaczewska.pdf

[13] Thomas BS, Yang J, Mo KH, Abdalla JA, Hawileh RA, Ariyachandra E. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review. Journal of Building Engineering. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102332>.

[14] Barbosa R, Lapa N, Dias D, Mendes B. Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances. Construction and Building Materials. 2013; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.031>.

[15] Aungathichart O, Nawaukaratharnant N, Wasanapiarnpong T. The potential use of cold-bonded lightweight aggregate derived from various types of biomass fly ash for preparation of lightweight concrete. Materials Letters. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133019>.

[16] PN-EN 12350-2: 2019-07 Badania mieszanek betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

[17] PN-EN 12350-7: 2019-08 Badania mieszanek betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe.

[18] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[19] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.

[20] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu Cz. 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

[21] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.

[22] Katzer J, Halbiniak J, Langier B, Major M, Major I. Influence of Varied Waste Ceramic Fillers on the Resistance of Concrete to Freeze-Thaw Cycles. Materials. 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14030624>

Przyjęto do druku: 04.10.2022 r.