

Daniel WAŁACH, Marek CAŁA, Krzysztof OSTROWSKI
Justyna JASKOWSKA-LEMAŃSKA
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

ANALIZA WPŁYWU SEPAROWANYCH POPIOŁÓW DENNYCH NA MROZOODPORNOŚĆ BETONU

Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania węgla (UPS) w postaci popiołów pochodzących z elektrowni i elektrociepłowni stanowi dziś duże wyzwanie. W przypadku UPS z kotłów pyłowych zagadnienia wpływu ich dodatku do mieszanek betonowych są powszechnie znane w odniesieniu do właściwości reologicznych, wytrzymałości, trwałości, mrozoodporności i odporności na korozję betonu. Jednak w przypadku popiołów z kotłów fluidalnych ich wpływ na powyższe właściwości nie został w chwili obecnej jednoznacznie zdefiniowany. W artykule przedstawiono wyniki badań mrozoodporności betonów zawierających różne frakcje popiołów dennych z kotłów pyłowych i fluidalnych. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zastąpienia części kruszywa bądź cementu popiołem przy zachowaniu wymagań stawianych betonom w odniesieniu do ich odporności na działanie mrozu.

Słowa kluczowe: mrozoodporność betonu, uboczne produkty spalania

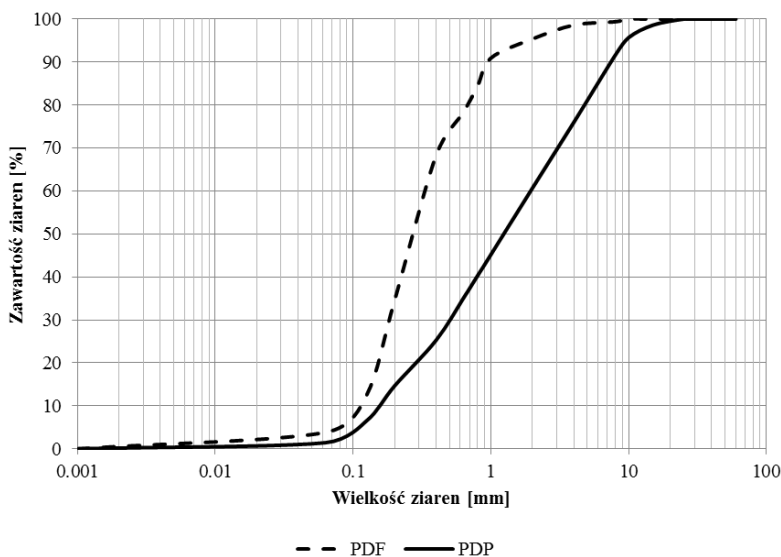
WPROWADZENIE

Polska energetyka bazuje przede wszystkim na węglu i wszystko wskazuje na to, że sytuacja ta nie ulegnie zmianie w najbliższym czasie. Stąd istotne wydaje się opracowanie kompleksowych programów zagospodarowania ubocznych produktów spalania, jakie powstają podczas produkcji energii elektrycznej w Polsce. W przypadku popiołów lotnych opracowano już szereg możliwości ich wykorzystania m.in. w produkcji cementu, betonu czy też w innych gałęziach przemysłu [1, 2]. Należy podkreślić, że właściwości popiołów z konwencjonalnych kotłów pyłowych [3] znacznie odbiegają od popiołów z kotłów fluidalnych, które charakteryzują się między innymi brakiem lub znikomą ilością szkliwa. Natomiast wyniki badań z ostatnich lat [4, 5] wskazują, że zawartość niespalonego węgla jest na takim samym poziomie jak w kotłach konwencjonalnych. W odniesieniu do popiołów dennych poszukuje się możliwości ich przemysłowego zagospodarowania. Analogicznie, jak w przypadku popiołów lotnych, zasadny wydaje się kierunek zagospodarowania popiołów dennych w szeroko rozumianej branży budowlanej, w tym do produkcji betonów. W odniesieniu do betonów zawierających popioły denne ze spalania węgla zarówno w tradycyjnych kotłach pyłowych, jak i fluidalnych podjęto już próby określenia ich właściwości mechanicznych [6, 7]. Jednak ze względu na wymagania stawiane obecnie betonom, jak też poszczególnym

składnikom mieszanki betonowej konieczne wydaje się określenie cech związanych z trwałością tego typu materiałów budowlanych. W związku z powyższym podjęto pracę, której celem było określenie wpływu dodatku popiołów dennych powstałych ze spalania węgla kamiennego w kotłach konwencjonalnych oraz fluidalnych na mrozoodporność stwardniałego betonu, której wyniki przedstawiono w niniejszym artykule. Ze względu na dotychczasowe doświadczenia autorów z popiołami dennymi, które wykazały bardzo korzystny wpływ separacji na możliwości ich gospodarczego wykorzystania, badania przeprowadzono we frakcjach popiołów poniżej i powyżej 0,63 mm.

1. CHARAKTERYSTYKA ZASTOSOWANYCH POPIOŁÓW DENNYCH

Przedmiotem badań były odpady energetyczne pochodzące ze spalania węgla w kotłach fluidalnym (PDF) oraz pyłowym (PDP), które poddano separacji na sicie o wielkości 0,63 mm. Krzywe składów ziarnowych zastosowanych popiołów przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Krzywe składów ziarnowych popiołów dennych

Popioły denne charakteryzowały się średnicami ziaren do 10 mm w przypadku popiołu dennego z kotła fluidalnego (PDF) oraz do 25 mm dla popiołu dennego z kotła pyłowego (PDP). Zawartość frakcji poniżej 0,63 mm w popiołach dennych wyniosła:

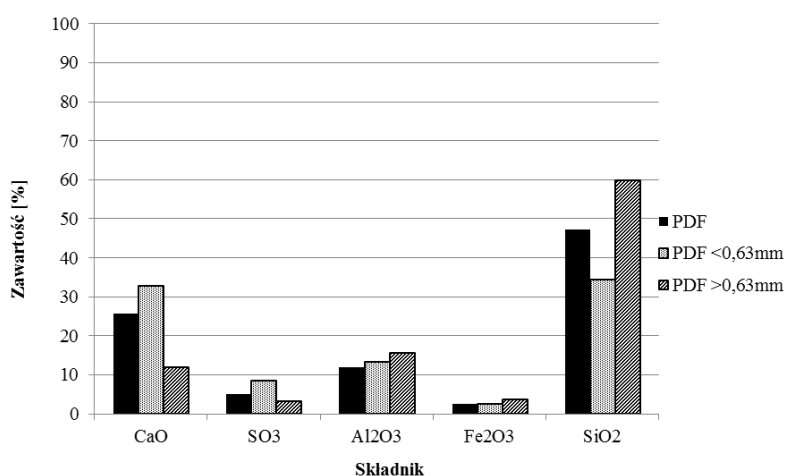
- dla PDF: 78,3%,
- dla PDP: 35,0%.

Znaczne różnice w składzie ziarnowym popiołów dennych były wynikiem technologii spalania węgla w poszczególnych kotłach oraz sposobu odbioru tych

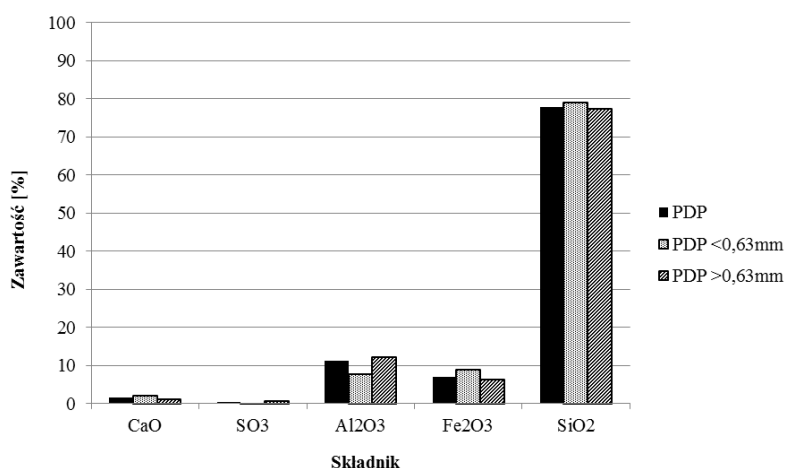
odpadów z dna paleniska. Średnia gęstość popiołu dennego fluidalnego (PDF) wyniosła $2,68 \text{ g/cm}^3$. Popiół denny z kotła pyłowego charakteryzował się niższą gęstością, wynoszącą $2,27 \text{ g/cm}^3$.

Straty prażenia popiołu dennego PDF wyniosły 4,4%, przy czym dla frakcji drobniejszej były one niższe (3,6%), natomiast dla frakcji $>0,63 \text{ mm}$ wyniosły 5,3%. Wszystkie te wartości spełniają wymagania normy PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu [8], w której maksymalne straty prażenia popiołów są określone na poziomie 9%.

Zawartość głównych składników chemicznych w przeliczeniu na tlenki, w analizowanych popiołach, w zależności od wielkości ziaren przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Zawartość głównych składników w popiele dennym PDF w zależności od wielkości ziaren



Rys. 3. Zawartość głównych składników w popiele dennym PDP w zależności od wielkości ziaren

2. PROGRAM BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu rodzaju i zawartości dwóch popiołów dennych w spoiwie cementowo-popiołowym oraz stosie okrucowym kruszywa na trwałość betonów stwardniałych związanych z jego odpornością na działanie mrozu. Wykorzystywano dwie frakcje odpadów o wielkości ziaren powyżej i poniżej 0,63 mm. Dodatek poszczególnych frakcji popiołów traktowano jako zamiennik części cementu portlandzkiego CEM I 42,5R w spoiwie lub zamiennik kruszywa w mieszance betonowej.

Do wykonania betonów wybrano naturalne kruszywa rzeczne w postaci piasku i żwirów. Komponowanie całego stosu okrucowego stosowanego do wykonania analizowanych betonów przeprowadzono w oparciu o badania własne wcześniej wykonanych mieszanek betonowych oraz właściwości separowanych frakcji popiołów PDF i PDP (PDF > 0,63, PDF < 0,63, PDP > 0,63, PDP < 0,63) i popiołów nieseparowanych. W wyniku przeprowadzonych analiz i badań laboratoryjnych mieszanek kruszywową do betonów postanowiono komponować, stosując masowe proporcje zmieszania kruszyw przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. **Proporcje masowe kruszyw stosowanych w betonie**

Beton	Mieszanka	Kruszywo	Proporcje masowe
B1	mieszanka referencyjna	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm	32% 68%
B2	15% PDF > 0,63 zamiast piasku i żwiru	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm PDF > 0,63	21% 64% 15%
B3	30% PDF > 0,63 zamiast piasku i żwiru	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm PDF > 0,63	10% 60% 30%
B4	15% PDF < 0,63 zamiast cementu	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm PDF < 0,63	32% 68% 15% m. cementu
B5	15% PDF (nieseparowanego) zamiast piasku i żwiru	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm PDF (nieseparowany)	27% 58% 15%
B6	15% PDP > 0,63 zamiast piasku i żwiru	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm PDP > 0,63	21% 64% 15%
B7	30% PDP > 0,63 zamiast piasku i żwiru	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm PDP > 0,63	10% 60% 30%
B8	15% PDP < 0,63 zamiast cementu	piasek 0/2 mm żwir 4/16 mm PDP < 0,63	32% 68% 15% m. cementu

Skład betonu referencyjnego B1 (tab. 2) został określony na podstawie przyjętej ilości cementu c i wskaźnika w/c , który założono na poziomie 0,4.

Tabela 2. Skład betonowej mieszanki referencyjnej

Składniki	kg/m ³	dm ³ /m ³
Cement CEM I 42,5R	350	–
Woda	–	140
Żwir 4/16 mm	1387,5	–
Piasek 0/2 mm	653,1	–
Plastyfikator	–	2,7

W przypadku pozostałych mieszanek (B2-B8) przyjęto założenie dotyczące stałego stosunku w/c jak dla mieszanki referencyjnej. W związku z powyższym, w celu uzyskania odpowiedniej urabialności mieszanek z dodatkiem poszczególnych frakcji popiołów dennych, konieczne było zastosowanie domieszek. Należy przy tym podkreślić, że superplastyfikator dozowano do poszczególnych mieszanek w ilościach umożliwiającym ich urabianie poprzez ułożenie ich w formach i odpowiednie zagęszczenie.

Dla każdej z wykonanych mieszanek przeprowadzono badania konsystencji metodą opadu stożka, wg PN-EN 12350-2:2001 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badania konsystencji metodą opadu stożka [9]. Oceny właściwości mieszanek betonowych dokonywano każdorazowo, wykonując zarób, z którego formowano próbki. Uzyskane wyniki badań konsystencji przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Konsystencja mieszanek betonowych oraz gęstość stwardniałego betonu

Beton	Udział plastyfikatora [dm ³ /m ³]	Konsystencja - opad stożka [mm]	Gęstość [kg/m ³]
B1	–	160	2351,6
B2	1,6	30	2318,1
B3	7,8	20	2344,0
B4	–	210	2312,5
B5	4,7	40	2434,5
B6	1,7	25	2341,5
B7	7,8	20	2271,8
B8	–	160	2325,9

3. WYNIKI BADAŃ MROZODPORNOŚCI

Badania odporności na działanie mrozu wykonano zgodnie z normą PN-88/B-06250 [10] metodą zwykłą przy użyciu automatycznej komory mrozeniowej. Badanie mrozoodporności polegało na poddaniu 3 próbek betonowych o wymiarach 150×150×150 mm, z każdej serii nasączonych wodą, 100 cyklom zamrażania (4 h w temperaturze $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) i odmrażania ($2 \div 4$ h w temperaturze $+18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$). Równocześnie, w charakterze świadków, przez cały czas badania odporności na działanie mrozu przetrzymywane były po 3 próbki z każdej serii, które również zostały poddane badaniom wytrzymałościowym. Obciążeniu cyklami zamrażania i odmrażania poddawane były próbki po 28 dniach ich dojrzewania. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki badań mrozoodporności analizowanych betonów

Beton	Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu (świadki) [MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu po mrożeniu i rozmrażaniu [MPa]	Zmiana wytrzymałości próbek [%]
B1	45,29	43,49	-3,97
B2	56,53	64,81	14,65
B3	71,47	79,25	10,89
B4	32,99	29,30	-11,18
B5	34,81	25,68	-26,22
B6	58,75	49,64	-15,51
B7	53,10	50,11	-5,63
B8	41,11	38,78	-5,68

We wszystkich badanych próbkach po 100 cyklach zamrażania-odmrażania nie stwierdzono pęknięć oraz ubytków masy większej niż 5%. Analizując wpływ zastosowanego popiołu dennego oraz jego frakcji na mrozoodporność badanych betonów, można zauważyć znacznie lepsze oddziaływanie popiołu PDF > 0,63 mm jako zamiennika piasku i kruszywa grubego. Betony zawierające ten popiół (B2 i B3) cechowały się większą odpornością na działanie mrozu niż pozostałe betony. Należy jednak zauważyć, że w przypadku mieszanek zawierających popiół nieseparowany PDF (B5) uzyskano największy spadek wytrzymałości rzędu 26%. W przypadku pozostałych mieszanek betonowych badania nie wykazały, aby w rozpatrywanym zakresie rodzaj i zawartość danej frakcji popiołów dennych miały istotny wpływ na mrozoodporność badanych betonów, powodując spadek ich wytrzymałości.

PODSUMOWANIE

Wykonanie mieszanek betonowych z częściową zamianą cementu i kruszywa popiołami dennymi wymaga szczególnej staranności, zwłaszcza w przypadku, gdy kruszywo zastępowane jest w znacznych ilościach popiołem $>0,63$ mm. Należy jednak podkreślić, że przeprowadzone badania wykazały pozytywny wpływ popiołów dennych frakcji $>0,63$ mm na właściwości wytrzymałościowe betonów, a w wybranych przypadkach również na ich mrozoodporność. Niemniej jednak, analizując uzyskane wyniki badań, można stwierdzić, że ze względu na skład chemiczny analizowanych popiołów dennych w przypadku ich wykorzystania trudno będzie spełnić kryteria stawiane betonom konstrukcyjnym. Wydaje się zatem zasadna możliwość wykorzystania separowanych dennych popiołów fluidalnych do produkcji elementów betonowych, których trwałość i czas użytkowania są ograniczone.

LITERATURA

- [1] Brandt A.M., Zastosowanie popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w betonach konstrukcyjnych, rozdział: Studia z zakresu inżynierii, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2011.
- [2] Giergiczny Z., Właściwości popiołu lotnego a trwałość betonu, Budownictwo, Technologie, Architektura 2007, lipiec-wrzesień, 44-48.
- [3] Iwanek P., Jelonek I., Mirkowski Z., Wstępne badania popiołów z kotła fluidalnego w aspekcie ich zagospodarowania, Gospodarka Surowcami Mineralnymi 2008, 24, 4/4, 91-104.
- [4] Hyncnar J., Czynniki wpływające na właściwości fizykochemiczne i użytkowe stałych produktów spalania paliw w paleniskach fluidalnych. Wydawnictwo Górnicze, Katowice 2006.
- [5] Hyncnar J., Paleniska fluidalne przykładem racjonalnego rozwiązywania problemów odpadów, Polityka Energetyczna 2006, 9, zeszyt specjalny.
- [6] Rutkowska G., Małuszyńska I., Rosa M., Badania właściwości betonu wyprodukowanego z dodatkiem popiołu lotnego, Inżynieria Ekologiczna 2014, 36, 53-64.
- [7] Wałach D., Impact of separated bottom ashes on the parameters of concrete mix and hardened concret, E3S Web of Conferences, Volume 10, 00099 (2016), SEED 2016.
- [8] PN-EN 450-1: 2012 Popiół lotny do betonu.
- [9] PN-EN 12350-2:2001 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badania konsystencji metodą opadu stożka.
- [10] PN-88/B-06250 Beton zwykły.

INFLUENCE OF SEPARATED COAL BOTTOM ASH ON FROST RESISTANCE OF CONCRETE

Management of coal combustion by-products in the form of ash from the power plant is currently big challenge. In the case of coal combustion by-products from pulverized-fuel boiler the effects of their addition to the concrete mixtures are well known in regard to the strength, durability, frost resistance and corrosion resistance

of concrete. However, in the case of ashes from fluidized bed boilers, the impact of this ashes on these parameters is not deeply defined. The article presents the results of frost resistance of concrete containing various fractions of bottom ash from pulverized-fuel boilers and fluidized bed boilers. The results indicate that it is possible to replace part of the coarse aggregate or cement by ash from power plant, while requirements with regard to frost resistance of concrete are satisfied.

Keywords: frost resistance of concrete, combustion by-products