

Porównanie metod uzdatniania mechanicznego popiołu lotnego wapiennego

Jan Ziaja¹ , Krzysztof Szerszeń² 

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

² Górażdże Cement S.A., Chorula

Streszczenie: W artykule porównano dwie metody mechanicznego uzdatniania popiołu lotnego wapiennego mogące mieć zastosowanie w skali przemysłowej. Głównym celem tych metod jest zwiększenie udziału popiołu w spoiwach/zacznach stosowanych w geoinżynierii. Do badań wykorzystano próbki popiołu pozyskanego z Elektrowni Bełchatów. Do uzdatniania użyto metody mielenia oraz metody przesiewu. Oznaczono skład chemiczny popiołu, gęstość oraz stopień zmielenia – definiowany powierzchnią właściwą wg Blaine’a, określono wielkości charakterystyczne, takie jak pozostałość na sicie 0,090 mm oraz mialkość. Do określenia wpływu aktywacji mechanicznej popiołu na jego właściwości fizyczne użyto mieszanin popiołowo-cementowych w proporcjach 30/70 i 70/30, a wyznacznikami tego wpływu były wyniki badań wodożądności oraz wskaźnika aktywności. W obydwu procesach uzyskano znaczną poprawę właściwości fizycznych popiołu lotnego wapiennego w porównaniu z próbką w stanie naturalnym.

Słowa kluczowe: popiół lotny wapienny, uzdatnianie, hydrauliczne spoiwa drogowe, wgłębne mieszanie gruntu, przesłona przeciwfiltracyjna

COMPARISON OF MECHANICAL TREATMENT THE PHYSICAL PARAMETERS OF CALCAREOUS FLY ASH

Abstract: The article compares two methods of mechanical treatment the physical parameters of calcareous fly ash which can be used on an industrial scale. The main purpose of using these methods is to increase the share of ash in the binder/slurry used in geoen지니어ing. The tests were carried out for ash samples obtained from the Bełchatów Power Plant. Grinding and sieving methods were used for the treatment. The scope of the research included the chemical composition of the ash, density and the degree of grinding – defined by the specific surface according to Blaine. The granulometric distribution and characteristic sizes such as the residue on the 0.090 mm sieve and fineness were also of the study. To determine the impact of ash milling on its physical properties, the ash-cement mixtures in the proportions of 30/70 and 70/30 were used, and the determinants were the results of water demand tests and the activity index. The significant improvement in the physical parameters of calcareous fly ash was achieved in both processes compared to the sample in its natural state.

Keywords: calcareous fly ash, treatment of fly ash, hydraulic road binders, deep soil mixing, sealing walls

1. Wprowadzenie

Zmiany związane z transformacją energetyczną w Polsce mają i będą mieć coraz większy wpływ na dostępność popiołów lotnych powstających przy produkcji energii elektrycznej. Przejście z produkcji energii z węgla na OZE, a wkrótce również na atom, spowoduje drastyczny spadek dostępności popiołów, które są szeroko stosowane w budownictwie i geoinżynierii. W niektórych aplikacjach popiół jest praktycznie niezbędnym technologicznie składnikiem do przeprowadzenia procesu budowlanego. Znaczące jego ograniczenie będzie generowało duży wzrost cen tego „odpadu” z uwagi na niską podaż. Również pogarszająca się jakość powstających popiołów, wynikająca ze zmiennego zapotrzebowania na energię z węgla, może stanowić problem w dotychczasowym ich stosowaniu. Niespełniające wymogów jakościowych popioły trafią na składowiska, co wpłynie negatywnie na środowisko. Popioły powstające w zakładach produkujących energię elektryczną czy ciepłą uzależnione są od wsadu, czyli rodzaju spalanego węgla (kamienny lub brunatny) oraz technologii spalania. Popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w konwencjonalnych paleniskach pyłowych są odpadem/produktem szczegółowo przebadanym (Giergiczny 2006, Giergiczny i Giergiczny 2010, Giergiczny i Garbacik 2012), o stosunkowo powtarzalnej jakości i szeroko stosowanym (PN-EN 197-1:2012, PN-EN 206+A2:2021-08, PN-EN 450-1:2012). Popioły powstające przez spalanie węgla kamiennego w kotłach fluidalnych nie były brane pod uwagę w niniejszym opracowaniu. Odmienną sytuację obserwuje się w przypadku popiołów lotnych z węgla brunatnego. Ich zagospodarowanie jest znikome z uwagi na dużą zmienność właściwości fizykochemicznych oraz problematyczny skład fazowy i chemiczny. Z tego powodu nie są stosowane w produkcji cementu i betonu. W stanie naturalnym są używane w niewielkich ilościach do ulepszania i osuszania gruntów w budownictwie drogowym (Krajowa Ocena Techniczna 2023, PN-EN 13282-1:2013-07, PN-EN 13282-2:2015-06) oraz w geoinżynierii i inżynierii środowiska jako spoiwa/zaczyny do przesłon przeciwfiltracyjnych w technologii głębokiego mieszania gruntu (Krajowa Ocena Techniczna 2024). Pozostała ilość jest składowana na składowisku. Dotychczas nie opracowano technologii umożliwiającej szersze zastosowanie tych popiołów. Były prowadzone badania, w których potwierdzono pozytywne efekty użycia popiołu wapiennego zarówno w cementach (Dziuk i in. 2013), jak i betonach (Giergiczny i in. 2013, Józwiak-Niedźwiedzka i in. 2011). Przyczyniało się to do wzrostu wytrzymałości na ściskanie oraz zwiększenie szczelności betonu. Ilość popiołu w zastosowanych recepturach spoiw dochodziła do 30%. Większa zawartość powodowała problemy już na etapie formowania próbek do badań (Dziuk i in. 2013). Pozytywny efekt stosowania lotnego popiołu wapiennego osiągnano dopiero po jego modyfikacji przez mielenie. W żadnym z analizowanych badań nie zastosowano innej, możliwej modyfikacji popiołu, jaką jest przesiew. W podjętej próbie badawczej zostało przyjęte założenie, że możliwe jest zwiększenie udziału popiołu wapiennego w spoiwach/zaczynach stosowanych w geoinżynierii

dzięki mechanicznemu ich ulepszeniu. W tym celu przyjęto dwie metody poprawy jakości popiołów, tj. mielenie i przesiewanie. Ulepszanie popiołu wapiennego przez jego mielenie zostało już przebadane (Szerszeń 2023). Zwiększenie miałkości w tej metodzie pozwoliło na znaczącą poprawę wytrzymałości na ściskanie próbek popiołu nawet o 100%. Wynikało to ze zwiększonej powierzchni właściwej, a także z przemielenia największych ziaren popiołu (o wielkości ponad 0,09 mm), które stanowił głównie niespalony węgiel. W metodzie przesiewu popiołu wapiennego założono, że odseparowanie największych cząstek o najmniejkorzystnym oddziaływaniu poprawi właściwości uzyskanych spoiw. Otrzymane wyniki badań porównano do wyników badań spoiw zawierających popiół wapienny przemielony (Szerszeń 2023).

2. Przedmiot i zakres badań

Próbki lotnych popiołów wapiennych zostały pobrane z bieżącej produkcji Elektrowni Bełchatów. Dostawcą węgla dla tej elektrowni jest obecnie największy w Polsce producent węgla brunatnego: Kopalnia Węgla Brunatnego Bełchatów (44,26 mln ton), co stanowi około 77% całkowitego rocznego wydobycia tego rodzaju węgla (PIG-PIB, 2023). Przy obecnej produkcji energii w Elektrowni Bełchatów powstaje ponad 4,5 mln odpadów paleniskowych rocznie (opracowanie dla Gminy Kleszczów 2015). Tylko niewielka część jest odbierana i wykorzystywana gospodarczo, pozostała ilość trafia na składowiska. Próbki badanych popiołów stanowiły odpad/produkt oferowany przez elektrownię w formie suchej i pylastej. Jako metody ulepszania popiołu przyjęto mielenie oraz przesiewanie. Badano właściwości popiołów w stanie naturalnym, po przemiale w młynku laboratoryjnym oraz po przesiewie. Dla metody przesiewu wybrano trzy charakterystyczne wielkości sit o rozmiarze oczek 0,09 mm, 0,063 mm oraz 0,045 mm. Do badań użyto dwóch partii popiołów pobranych z elektrowni w różnym okresie.

Zakres badań przedstawiony w niniejszym artykule obejmował:

- analizę składu chemicznego oraz straty prażenia zgodnie z PN-EN 196-2:2013-11, *Metody badań cementu. Analiza chemiczna cementu*;
- gęstość oraz stopień zmielenia – powierzchnia właściwa wg Blaine’a zgodnie z PN-EN 196-6:2011, *Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia*;
- skład granulometryczny zgodnie z instrukcją obsługi aparatu Mastersizer 2000;
- pozostałość na sicie 0,090 mm zgodnie z PN-EN 196-6:2011, *Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia*;
- miałkość zgodnie z PN-EN 451-2:2017-06, *Metoda badania popiołu lotnego – Część 2: Oznaczanie miałkości przez przesiewanie na mokro*;
- wodozgodność oraz wskaźnik aktywności zgodnie z PN-EN 450-1:2012, *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*.

3. Wyniki badań

Próbka z oznaczeniem *N* to próbka w stanie naturalnym, z oznaczeniem *M* to próbka zmielona, z oznaczeniem *P* – próbka przesiana z podaną wielkością oczka sita. Skład chemiczny i straty prażenia próbek popiołów ulepszanych przez przesiew był badany dla każdej wielkości oczek sita. Skład chemiczny i straty prażenia wykonane na próbkach w stanie naturalnym przyjęto jako równoznaczny dla próbek przemielonych, ponieważ proces przemiału nie zmienia składu chemicznego materiału.

W obydwu badanych metodach spoiwem odniesienia był cement portlandzki CEM 42,5 R o właściwościach przedstawionych w tabelach 1 i 2.

Tabela 1
Skład chemiczny cementu portlandzkiego CEM I 42,5R

Oznaczenie próbki	Skład chemiczny [% wag.]							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O _{eq}
CEM I 42,5R	19,7	4,7	4,0	63,9	1,6	2,9	0,062	0,61

Źródło: Szerszeń (2023)

Tabela 2
Właściwości fizyczne cementu portlandzkiego CEM I 42,5R

Początek czasu wiązania [min]	190
Stąłość objętości [mm]	0,5
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 2 dniach	27,5
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 7 dniach	48,4
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 28 dniach	57,1

Źródło: Szerszeń (2023)

W tabeli 3 zaprezentowano skład chemiczny popiołu wapiennego i straty prażenia.

Tabela 3
Skład chemiczny popiołu wapiennego i straty prażenia

Oznaczenie próbki popiołu W	Strata prażenia [% wag.]	Skład chemiczny [% wag.]									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _w	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O
PWB-1-N, PWB-1-M	4,46	28,0	30,5	10,8	24,8	2,0	1,3	3,0	<0,001	<0,01	0,13
PWB-1-P 0,045 mm	1,12	20,0	25,6	14,4	30,5	1,7	1,2	6,8	<0,001	<0,01	0,1
PWB-1-P 0,063 mm	1,46	25,1	28,0	12,3	27,4	2,2	1,3	4,0	0,019	<0,01	0,3

Tabela 3 cd.

PWB-1-P 0,090 mm	3,36	31,1	27,5	10,8	21,5	1,2	1,9	3,9	0,022	0,8	0,8
PWB-2-N, PWB-2-M	3,94	27,9	33,2	12,2	21,8	0,9	0,9	2,0	<0,001	<0,01	0,12
PWB-2-P 0,045 mm	1,02	20,4	29,0	15,5	26,5	0,6	1,2	5,7	0,018	<0,01	0,1
PWB-2-P 0,063 mm	1,12	22,1	29,9	14,2	25,4	0,7	1,1	5,4	0,020	<0,01	<0,01
PWB-2-P 0,090 mm	4,52	24,1	31,5	13,8	24,6	0,7	1,2	2,9	0,018	<0,01	0,1

Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)

Proces przemiału został przeprowadzony w młynku laboratoryjnym o wielkości nadawy około 5 kg. Czas mielenia trwał 15 minut dla każdej próbki. Po przemiale zbadano stopień zmielenia zdefiniowany powierzchnią właściwą wg Blaine'a oraz gęstość. Proces przesiewu przeprowadzono na sitach o wielkości oczka 0,09 mm, 0,063 mm i 0,045 mm. Uzyskane wartości przedstawia tabela 4.

Tabela 4

Stopień zmielenia i gęstość popiołów wapiennych

Oznaczenie próbki	Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm ² /g]	Gęstość [g/cm ³]
PWB-1-N	3510	2,80
PWB-1-M	8460	2,95
PWB-1-P 0,045 mm	4700	3,02
PWB-1-P 0,063 mm	4350	2,69
PWB-1-P 0,090 mm	4110	2,86
PWB-2-N	3910	2,84
PWB-2-M	8100	2,96
PWB-2-P 0,045 mm	4950	3,05
PWB-2-P 0,063 mm	4660	3,01
PWB-2-P 0,090 mm	4460	2,96

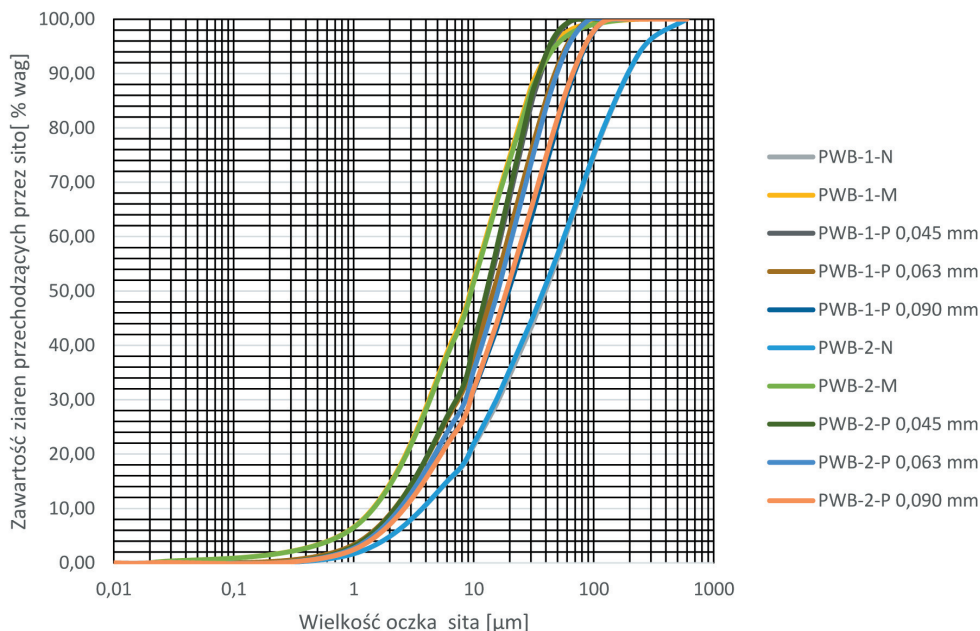
Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)

Skład granulometryczny został oznaczony przez procentową zawartość ziaren przechodzących przez sito o zdefiniowanym rozmiarze. Wyniki zestawiono w tabeli 5, a graficzne przedstawienie uziarnienia na rysunku 1.

Tabela 5
Skład granulometryczny popiołów wapiennych

Oznaczenie próbki	PWB-1-N	PWB-1-M	PWB-1-P 0,045 mm	PWB-1-P 0,063 mm	PWB-1-P 0,090 mm	PWB-2-N	PWB-2-M	PWB-2-P 0,045 mm	PWB-2-P 0,063 mm	PWB-2-P 0,090 mm
Wielkość oczka sита [mm]	Zawartość ziaren przechodzących przez sito [% wag.]									
0,007	16,3	42,1	29,60	29,02	24,04	16,5	41,4	29,58	26,36	23,91
0,010	21,5	52,2	40,08	38,26	31,68	21,9	51,6	40,48	35,37	31,96
0,016	29,8	67,7	57,90	53,01	43,83	30,7	67,1	59,11	50,14	44,94
0,032	44,7	89,1	86,34	77,79	65,39	45,8	88,2	87,60	75,81	67,17
0,045	53,2	95,1	95,42	88,58	76,99	54,1	94,2	96,05	87,37	78,44
0,063	62,2	98,0	99,47	96,04	87,66	62,8	97,3	99,57	95,56	88,51
0,090	71,9	99,1	100,00	99,80	95,96	72,3	98,8	100,00	99,77	96,24
0,125	80,5	99,5	100,00	100,00	99,69	80,8	99,4	100,00	100,00	99,71
0,300	96,3	100,0	100,00	100,00	100,00	96,3	100,0	100,00	100,00	100,00

Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)



Rys. 1. Krzywe uziarnienia z analizy sitowej popiołów lotnych wapiennych w stanie naturalnym, po przemiale i po przesiewie

Wielkości charakterystyczne uziarnienia zostały określone przez właściwości: pozostałość na sicie 0,090 mm oraz mialkość. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6
Pozostałość na sicie 0,090 mm i mialkość

Oznaczenie próbki	Pozostałość na sicie 0,090mm [% wag.]	Mialkość [% wag.]
PWB-1-N	28,1	46,8
PWB-1-M	0,9	4,9
PWB-1-P 0,045 mm	0,0	4,6
PWB-1-P 0,063 mm	0,0	11,4
PWB-1-P 0,090 mm	4,0	23,0
PWB-2-N	27,7	46,0
PWB-2-M	1,2	5,8
PWB-2-P 0,045 mm	0,0	4,0
PWB-2-P 0,063 mm	0,2	12,6
PWB-2-P 0,090 mm	3,8	21,6

Źródło: własne i Szerszeń (2023)

Kolejną badaną właściwością była wodożądność oraz wskaźnik aktywności K_7 , K_{28} i K_{90} . Do tych badań przygotowano mieszaniny o składzie: popiół wapienny (30%) i cement portlandzki CEM I 42,5R (70%) oraz popiół wapienny (70%) i cement portlandzki CEM I 42,5R (30%). Próbką odniesienia był cement CEM I 42,5R. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7
Wodożądność i wskaźnik aktywności mieszanin popiołowo-cementowych

Oznaczenie próbki	Zawartość popiołu wapiennego w mieszaninie [%]	Wodożądność [%]	Wskaźnik aktywności [%]		
			po 7 dniach	po 28 dniach	po 90 dniach
PWB-1-N	30	119,1	51,8	66,7	76,0
	70	148,4	0,8	13,3	26,2
PWB-1-M	30	102,2	78,6	105,5	107,1
	70	110,2	6,2	42,0	73,1
PWB-1-P 0,045 mm	30	100,0	78,3	93,6	91,4
	70	108,4	26,6	41,9	50,8
PWB-1-P 0,063 mm	30	106,2	77,5	93,6	103,6
	70	120,4	8,2	35,5	54,9
PWB-1-P 0,090 mm	30	108,9	68,2	85,8	91,1
	70	132,9	3,7	20,6	36,9
PWB-2-N	30	118,7	52,2	67,0	73,2
	70	137,8	3,2	9,8	23,7
PWB-2-M	30	102,7	74,2	99,4	106,5
	70	109,6	3,6	20,7	50,9
PWB-2-P 0,045 mm	30	104,4	73,6	91,6	95,5
	70	120,4	10,2	20,0	46,2
PWB-2-P 0,063 mm	30	107,6	68,2	89,7	95,8
	70	131,6	6,6	17,7	36,0
PWB-2-P 0,090 mm	30	110,2	60,7	79,7	88,1
	70	104,4	73,6	91,6	95,5

Źródło: opracowanie własne i Szerszeń (2023)

4. Omówienie wyników

Otrzymane wyniki badań stanowią podstawę do zwiększenia udziału popiołu lotnego wapiennego w recepturach spoiw/zaczników używanych w geoinżynierii i inżynierii środowiska, jak również umożliwiają zastąpienie drogich i coraz trudniej dostępnych popiołów lotnych krzemionkowych lub granulowanego żużla wielkopieczowego.

1. Straty prażenia dla wszystkich próbek badanych popiołów były poniżej 5%, co kwalifikuje je do kategorii A według normy PN-EN 450-1:2012, *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*.
2. Z analiz składu chemicznego wynika, że przebadane próbki wykazują zbliżone do siebie wartości.
3. W przypadku próbek uzdatnianych przez przesiew wraz ze wzrostem wielkości oczka sita zwiększa się strata prażenia. Świadczy to o separacji na poszczególnych sitach ziaren niespalonego węgla w postaci koksiku, który zwiększa wodozadność, zmniejsza efektywność domieszek chemicznych oraz obniża mrozoodporność.
4. Powierzchnia właściwa wg Blaine'a dla próbek w stanie naturalnym dla partii PWB-1-N wynosi $3510 \text{ cm}^2/\text{g}$, a dla partii drugiej PWB-2-N wynosi $3910 \text{ cm}^2/\text{g}$. W wyniku przemiału wartości te zwiększyły się ponad 100% i wyniosły odpowiednio $8460 \text{ cm}^2/\text{g}$ i $8100 \text{ cm}^2/\text{g}$. Świadczy to o dużej łatwości mielenia tego popiołu, co jest ważnym wskaźnikiem w jego szerszym wykorzystaniu. Przesiew również powoduje wzrost powierzchni właściwej wraz ze zmniejszaniem się oczka sita, ale maksymalnie o 30%.
5. Gęstość badanych próbek charakteryzuje się niską zmiennością i nieznacznie wzrasta w obydwu procesach ulepszania popiołu.
6. Skład granulometryczny próbek w stanie naturalnym był podobny. W wyniku przemiału uległ proporcjonalnej zmianie. Proces przesiewu odseparowywał nadziarno na każdym z granicznych wielkości oczek, które stanowiły głównie niespalone cząstki pyłu węglowego.
7. Pozostałość na sicie 0,090 mm dla próbek popiołu w stanie naturalnym jest stosunkowo wysoka i wynosi średnio 28%. Dla cementu wzorcowego to około 1%. Po przemiale wartość ta uległa znaczącej zmianie i wyniosła od 0,9% do 1,2%. W przypadku procesu przesiewu jest mniej miarodajna, ponieważ maksymalna wielkość oczka w tej metodzie została przyjęta właśnie w rozmiarze 0,090 mm.
8. Miałkość popiołu w stanie naturalnym wynosząca około 46% przekracza określoną w normie PN-EN 450-1:2012 dopuszczalną wartość $N \leq 40\%$. Po przemiale obydwie próbki spełniły warunek normowy kategorii $S \leq 12\%$, a miałkość wyniosła od 4,9% do 5,8%. Również przesiew powodował wzrost miałkości, ale w mniejszym zakresie niż przemiał.

9. Wodozadržność dla mieszanin zawierających popiół w stanie naturalnym przy zawartości 30% wynosiła około 119% i znacznie wzrosła w obydwu próbkach przy zwiększonej ilości popiołu (70%) w zaprawie badawczej odpowiednio 148,4% i 137,8%. Przy takich wartościach wodozadržności nie jest możliwe zachowanie odpowiedniej konsystencji i urabialności zaprawy w czasie. Dla mieszanin na bazie przemielonego popiołu wapiennego wodozadržność uległa znaczącej poprawie i przy zawartości 30% wyniosła 102%. Przy zwiększonej ilości popiołu (70%) wartość ta również zmalała do 110%. W procesie przesiewu podobne wyniki dotyczyły tylko próbek przesianych przez sito o maksymalnym oczku 0,045 mm. Popioły z pozostałych wymiarów oczek również zmniejszyły tę właściwość, ale w znacznie mniejszym zakresie. Wszystkie próbki wykazały jednak większą wodozadržność niż próbka odniesienia, którą był cement CEM I 42,5R.
10. Wskaźnik aktywności badanych popiołów oznaczono przy dwóch dozowaniach popiołu w składzie spoiwa: 30% i 70%. Dla popiołu w stanie naturalnym, przy zawartości popiołu 30%, po 7 dniach wartość wyniosła około 52%, po 28 dniach około 67%, a po 90 dniach 76% i 73,2%. Wartości te nie spełniały wymagań normy PN-EN 450-1:2012, która określa aktywności po 28 dniach na $\geq 75\%$, a po 90 dniach na $\geq 85\%$. Zwiększenie zawartości popiołu w badanych próbkach do 70% spowodowało drastyczny spadek aktywności próbki z popiołem PWB-1-N do 0,8%, a próbki PWB-2-N do 3,6% po 7 dniach. Po 28 dniach wartości wzrosły do 13,3% i 9,8%, a po 90 dniach do 26,2% i 23,7%. Na podstawie otrzymanych wyników należy stwierdzić, że nie jest możliwe zwiększenie udziału popiołu w stanie naturalnym w planowanych mieszaninach mineralnych. Zastosowanie przemielonego popiołu w mieszaninie, przy zawartości popiołu 30%, poprawiło wartość aktywności i po 7 dniach wyniosła ona od 78,6% i 74,2%, po 28 dniach – 105,5% i 99,4%, a po 90 dniach – 107,1% i 106,5%. Wartości te spełniły wymagania normy PN-EN 450-1:2012. Zwiększenie zawartości popiołu w badanych próbkach do 70% spowodowało znaczny spadek aktywności do 6,2% i 3,6% po 7 dniach, po 28 dniach do 42,0% i 20,7%, a po 90 dniach do 73,1% i 50,9%. Podobna zależność została otrzymana w próbkach popiołu ulepszanego przez przesiew. W tej metodzie wskaźnik aktywności zwiększał się wraz ze zmniejszeniem wymiaru oczka sita w przygotowanej próbce popiołu. Próbką odniesienia był cement CEM I 42,5R. W przeprowadzonych badaniach wskaźnika aktywności zastosowano większy udział popiołu w mieszaninie, niż wymaga tego norma PN-EN 450-1:2012, która podaje jego zawartość na poziomie 25%.

Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość zastosowania popiołu lotnego wapiennego jako zamiennika cementu w ilości minimum 30%, a w niektórych przypadkach nawet do 70% masy w spoiwach i zaczynach używanych w geoinżynierii i inżynierii śró-

dowiska. Wymaga to jednak ulepszenia popiołu przez zastosowanie jednej z metod opisanych przez autorów tego artykułu.

Literatura

- Dziuk D., Giergiczny Z., Garbacik A., 2013, *Popiół lotny wapienny jako składnik główny cementów powszechnego użytku*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, t. 12, nr 1, s. 57–69.
- Giergiczny E., Giergiczny Z., 2010, *Kategoryzacja popiołów lotnych a właściwości kompozytów cementowo-popiołowych*, Materiały Ceramiczne, t. 62, nr 1, s. 81–86.
- Giergiczny Z., 2006, *Rola popiołów lotnych wapiennych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*, Monografia – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki. Inżynieria Lądowa, t. 325, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Giergiczny Z., Garbacik A., 2012, *Właściwości cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego*, Cement – Wapno – Beton, R. 79, nr 4 s. 217–224.
- Giergiczny Z., Synowiec K., Żak A., 2013, *Ocena przydatności popiołu lotnego wapiennego jako aktywnego dodatku mineralnego do betonu*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, t. 12, nr 1, s. 83–97.
- Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A., Nowowiejski G., 2011, *Wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego na przepuszczalność betonów w odniesieniu do mediów agresywnych*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, t. 10, nr 3, s. 39–61.
- Krajowa Ocena Techniczna, 2024, *GRUNT-MIX*, ITP-PIB-KOT-2024/0012, wyd. 2, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy, Falenty.
- Krajowa Ocena Techniczna, 2023, *Spoiva hydrauliczne do mieszanek stosowanych na podbudowy dróg oraz do stabilizacji podłoża „Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE 5, Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE 12,5, Hydrauliczne spoiwo drogowe MULTICRETE 22,5*, IBDiM-KOT-2018/0130, wyd. 2, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.
- Malvern Instruments Ltd., 2007, *Mastersizer 2000 user manual (English)*. Version number: MAN0384-1-0, www.malvernpanalytical.com/en/support/product-support/mastersizer-range/mastersizer-2000 [dostęp: 1.08.2024].
- Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, 2023, *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31.XI.2022 r.*, www.pgi.gov.pl/aktualnosci/display/14549-bilans-zasobow-zloz-kopalin-w-polsce-wg-stanu-na-31-12-2022-r. [dostęp: 1.08.2024].
- PN-EN 13282-1:2013-07, *Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 1: Hydrauliczne spoiwa drogowe szybkowiązujące – Skład, wymagania i kryteria zgodności*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

- PN-EN 13282-2:2015-06, *Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 2: Hydrauliczne spoiwa drogowe normalnie wiążące – Skład, wymagania i kryteria zgodności*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 196-2:2013-11, *Metody badań cementu – Część 2: Analiza chemiczna cementu*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 196-6:2011, *Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 197-1:2012, *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 450-1:2012, *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN 451-2:2017-06, *Metoda badania popiołu lotnego – Część 2: Oznaczanie mialkości przez przesiewanie na mokro*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Gmina Kleszczów, 2005, *Plan Gospodarki Odpadami dla Gminy Kleszczów na lata 2004–2015 – Załącznik Gospodarka odpadami i składowiskami odpadów Elektrowni Bełchatów SA*, Uchwała Nr XL/413/05, Kleszczów.
- Szerszeń K., 2023, *Wpływ uzdatniania mechanicznego na parametry fizyczne popiołu lotnego wapiennego*, Nauka – Technika – Technologia, t. 7, Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 123–133.