

Adrian CIOŁCZYK*
Politechnika Śląska

SPOIWA NA BAZIE POPIOŁU LOTNEGO W BUDOWNICTWIE DROGOWYM

Streszczenie. Praca przedstawia wyniki badań dotyczących możliwości wykorzystania aktywnego popiołu lotnego jako samodzielnego spoiwa w betonach popiołowych. Podjęto próby wykonania betonów na bazie kruszyw naturalnych i antropogenicznych.

BINDERS ON THE BASIS OF FLY-ASH IN ROAD BUILDING

Summary. The study presents the results of research concerning possibilities of the active fly-ash utilization as a separate binder in ash concretes. Some attempts to make natural aggregates and anthropogenic concretes were undertaken.

1. Wprowadzenie

Ze względu na znaczne ilości wytwarzanych Ubocznych Produktów Spalania (UPS), ok. 20 mln Mg rocznie [7, 5], wiele firm i instytucji zwróciło uwagę na możliwości ich wtórnego wykorzystania. Około 350 mln Mg UPS znajduje się również na otwartych składowiskach będących zagrożeniem dla środowiska naturalnego (np. wtórne pylenie). Trwają próby wykorzystania takich materiałów do budowy dróg, co wynika z faktu, że takie inwestycje pociągają za sobą znaczne wykorzystanie materiałów naturalnych dostarczanych w miejsce wbudowania. Najpowszechniej stosowaną technologią wykorzystującą popiół lotny na skalę masową jest budowa nasypów komunikacyjnych z mieszanin popiołowo-żużlowych. Coraz ważniejszym kierunkiem zagospodarowania UPS stają się podbudowy z betonu popiołowego oraz stabilizacje. Zagadnienie to nie jest nowe, technologie, normy czy wytyczne wykorzystania gruntów antropogenicznych znane są już od kilkudziesięciu lat

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Antoni Motyczka, prof. w Politechnice Śląskiej.

[6, 2, 1], jednak dopiero w ciągu kilku ostatnich obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania wykorzystywaniem UPS jako zamienników materiałów naturalnych. Wynika to ze skokowego wzrostu zapotrzebowania na materiały budowlane. Spowodował on wystąpienie deficytu materiałowego i coraz większe zainteresowanie wykorzystaniem materiałów antropogenicznych.

Istnieją sposoby bardziej efektywnego wykorzystania własności popiołów lotnych. Przykładem może być dodatek do betonów pozwalający obniżyć ilość użytego cementu, gdzie popiół pełni różnorodne zadania. Odpowiednio dobrany może być używany jako regulator czasu wiązania, obniżać ciepło hydratacji, podnosić wytrzymałość na ściskanie, podnosić odporność betonu na korozję itd.

Idąc jeszcze dalej można spróbować wykorzystać te rodzaje popiołów, które posiadają właściwości hydrauliczne, jako samodzielne, alternatywne spoiwa w betonach konstrukcyjnych, tworzące nawierzchnie drogowe, zastępując całkowicie tradycyjne spoiwa hydrauliczne.

2. Badania właściwości mechanicznych mieszanek z popiołem lotnym zawierającym produkty odsiarczania spalin

W ramach badań wykonano próbę wykorzystania popiołu lotnego z węgla kamiennego jako spoiwa w mieszankach popiołowo-żużlowych używanych do wykonywania warstw podbudowy w technologii betonu popiołowego [3, 1].

Tabela 1

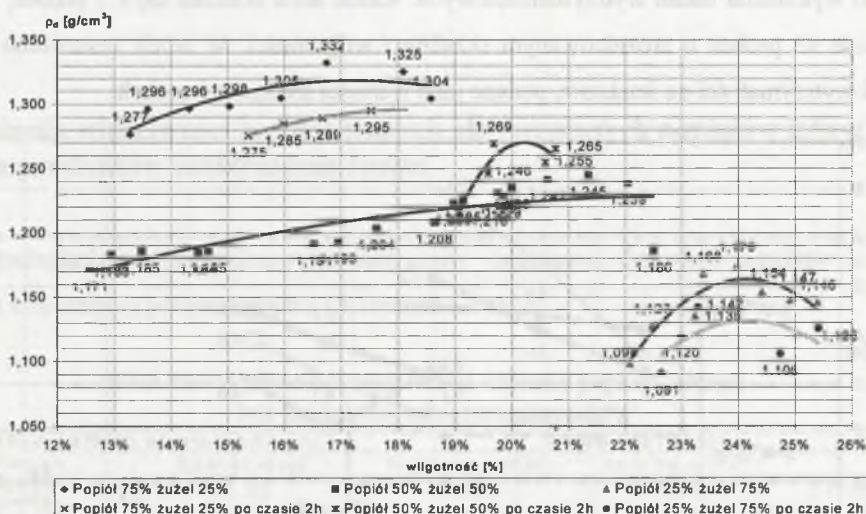
Przykładowy skład chemiczny oraz właściwości fizyczne popiołu lotnego zawierającego produkty odsiarczania spalin

Analiza składu chemicznego		Skład ziarnowy		
Tlenek	Zaw [% mas]	Wymiar oczka	poz na sicie	Σ
SiO ₂	40,52	0,063	20,00	20,00
Al ₂ O ₃	20,10	<0,063	80,00	100,00
Fe ₂ O ₃	4,43	razem	100,00	100,00
CaO	16,73	Właściwości fizyczne		
MnO	1,98	Gęstość właściwa		2,33
Na ₂ O	0,57	Gęstość nasypowa		
K ₂ O	2,50	stan luźny	766,50	
SO ₃	4,51	stan utrzęsiony	929,50	
TiO ₂	0,72			
P ₂ O ₅	0,54			
BaO	0,15			
Mn ₂ O ₄	0,09			
straty prażenia	6,73			
Σ	99,58			
wolne CaO	6,20%			

Podjęto próbę określenia wpływu ilości popiołu lotnego w stosunku do żużla elektrownianego na wytrzymałość warstwy podbudowy wykonanej z takich mieszanek. W trakcie badań stosowano mieszanki o składzie w stosunku do masy suchej składników:

- 25% popiołu lotnego i 75% żużla elektrownianego,
- 50% popiołu lotnego i 50% żużla elektrownianego,
- 75% popiołu lotnego i 25% żużla elektrownianego.

Dla powyższych mieszanek betonowych popiołowo-żużlowych określono zakres wilgotności optymalnych zgodnie z normą [9], wynikających z możliwości poprawnego zagęszczenia mieszanki. W trakcie przeprowadzania badania stwierdzono istotny wpływ zastosowanego popiołu na zmianę wilgotności próbki w czasie. Najpierw określano wilgotność mieszanki zaraz po wykonaniu mieszanki roboczej, a następnie określano wilgotność przed wykonaniem badania, tj. po 2 godzinach. Stwierdzono istotne zmniejszenie się wilgotności mieszanki, a różnice w wynikach obrazuje wykres (rys. 1).



Rys. 1. Zbiorcze zestawienie wilgotności optymalnych dla różnych składów mieszanek popiołowo-żużlowych

Fig. 1. The summary composition of optimum moistures for different ash-slag mixtures

Oznaczanie wilgotności mieszanki wykonywano zgodnie z normą [9], metodą suszenia. Wykonano alternatywne badanie wilgotności, gdzie pobrane próbki przemywano acetonem w celu usunięcia wody, ponieważ mogłaby ona w wysokiej temperaturze powodować znaczne przyspieszenie reakcji chemicznych i dodatkowo zaburzać wyniki oznaczania wilgotności przygotowanej mieszanki. Okazało się, że różnica określonej w ten sposób

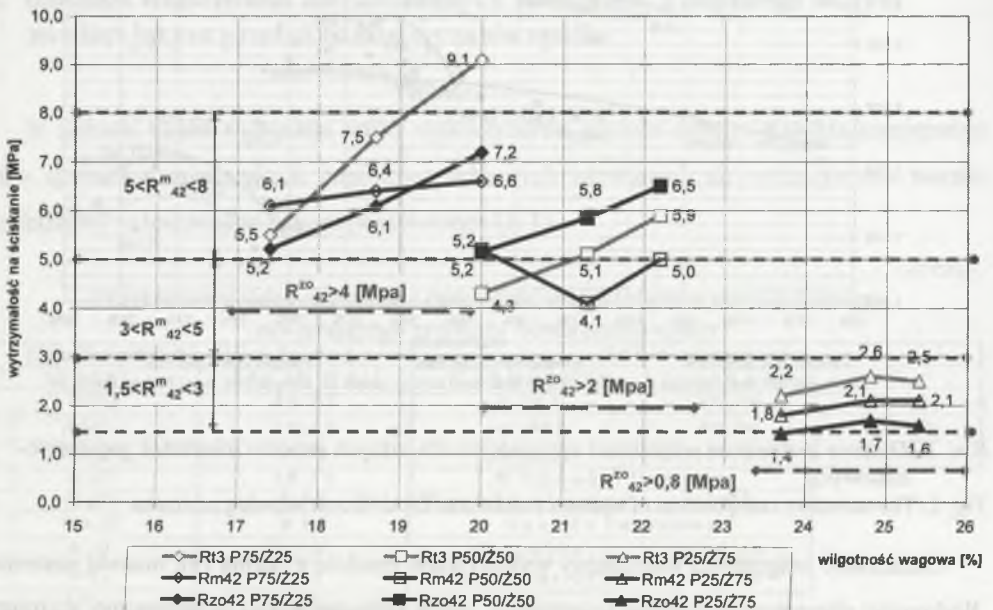
wilgotności różniła się o ok. $2 \div 3\%$ w stosunku do wilgotności określonej bez przemywania acetonem.

Tabela 2

Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych próbek betonu popiołowego

Lp.	Oznaczenie mieszanki	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
		R^t_3	R^m_{42}	R^{z0}_{42}	R^t_3/R^t_3
1	2	3	4	5	6
1	P75/Ż25/17,4	5,5	6,1	5,2	0,85
2	P75/Ż25/18,7	7,5	6,4	6,1	0,95
3	P75/Ż25/20,0	9,1	6,6	7,2	1,09
4	P50/Ż50/20,0	4,3	5,1	5,2	1,00
5	P50/Ż50/21,3	5,1	4,1	5,8	1,41
6	P50/Ż50/22,2	5,9	5,0	6,5	1,30
7	P25/Ż25/23,7	2,2	1,8	1,4	0,78
8	P25/Ż25/24,8	2,6	2,1	1,7	0,81
9	P25/Ż25/25,4	2,5	2,1	1,6	0,76

Dla tak wyznaczonych zakresów wilgotności optymalnych wykonano serie próbek w celu wykonania badań wytrzymałościowych. Każda seria składała się z 5 próbek, co dało w sumie 45 próbek o zróżnicowanym składzie i wilgotności. W tabeli zestawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, podane jako wartości średnie z 5 próbek.



Rys. 2. Zbiorcze zestawienie wytrzymałości dla różnych składów mieszanek oraz wymagań dla podbudowy, ulepszonego podłoża i warstwy wzmocniającej z betonu popiołowo-żużlowego
 Fig. 2. Strength summary composition for different mixture contents as well as requirements for enhanced subsoil and reia forcing layer from ash-slag concrete

Z analizy wyników na rys. 2 wynika, że wszystkie rodzaje mieszanek można stosować jako podbudowę, ulepszone podłoże lub warstwy wzmacniające w odpowiedniej grupie obciążenia ruchem. Mieszanki betonowe popiołowo-żużlowe spełniają wymagania zarówno ze względu na wytrzymałość na ściskanie po 42 dniach pielęgnacji, jak i mrozoodporność.

Zgodnie z wymaganiami podanymi w normie [8]:

- Mieszankę betonową popiołowo-żużlową o składzie 75% popiołu lotnego i 25% żużla elektrownianego można zastosować jako zasadniczą warstwę podbudowy dla ruchu KR3 ÷ KR6.
- Mieszankę betonową popiołowo-żużlową o składzie 50% popiołu lotnego i 50% żużla elektrownianego można zastosować jako zasadniczą warstwę podbudowy dla ruchu KR1 ÷ KR4 lub pomocniczą warstwę podbudowy dla ruchu KR5 ÷ KR6.
- Mieszankę betonową popiołowo-żużlową o składzie 25% popiołu lotnego i 75% żużla elektrownianego można stosować jako pomocniczą warstwę podbudowy dla ruchu KR1 ÷ KR4.

3. Badania właściwości mechanicznych aktywowanych popiołów lotnych bez produktów odsiarczania spalin

W badaniach przeprowadzono również próby chemicznej aktywacji popiołów lotnych z węgla kamiennego pochodzących z Elektrowni Łaziska.

Tabela 3

Skład chemiczny oraz właściwości fizyczne popiołu lotnego bez produktów odsiarczania spalin

Analiza składu chemicznego		Skład ziarnowy		
Tlenek	Zaw. st. w. [%]	Wymiar oczka	poz. na sicie	Σ
SiO ₂	52,36	0,063	31,00	31,00
Al ₂ O ₃	25,88	<0,063	69,00	100,00
Fe ₂ O ₃	7,04	razem	100,00	100,00
CaO	3,34	Właściwości fizyczne		
MgO	2,67	Gęstość właściwa	2,14	
Na ₂ O	0,80	Gęstość nasypowa		
K ₂ O	2,94	stan luźny	900,00	
SO ₃	0,76	stan utrzęsiony	1100,00	
TiO ₂	1,20			
P ₂ O ₅	0,49			
BaO	0,13			
Mn ₂ O ₄	0,11			
straty prażenia	1,74			
Σ	99,41			
wolne CaO	0,19%			

Założeniem badań było opracowanie metody uzyskiwania samodzielnego spoiwa na bazie popiołu lotnego bez produktów odsiarczenia spalin. Program badań został opracowany na podstawie normy [8]. W pierwszym kroku określono wilgotność optymalną, potrzebną do poprawnego zagęszczenia próbek z popiołu lotnego.

Próbki wykonane z aktywowanego popiołu lotnego z węgla kamiennego spełniają wymagania normy [8] zarówno dla wytrzymałości po 14 dobach pielęgnacji R_{m14} , jak również po 42 dobach, pielęgnacji R_{m42} . Badanie wykonano na próbkach walcowych $d = \phi = 8$ cm. Analiza wizualna (rys. 3) wykazała, że na powierzchni próbek nie wystąpiły żadne ubytki, a próbki są

w doskonałym stanie po 14 dobach przechowywania w wodzie. Wyniki badań na ściskanie zostały przedstawione w tabeli 4.



Rys. 3. Wygląd próbek poddanych analizie wizualnej

Fig. 3. Appearance of the serfs' samples the visual analysis

Tabela 4

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 14 dobach pielęgnacji oraz po 42 dobach pielęgnacji zgodnie z normą [8]

Badanie wytrzymałości na ściskanie po 14 dobach pielęgnacji R_{m14}								
Dodatek	Zawartość domieszki	Siła niszcząca [kN]					Średnia	Naprężenia niszczące [MPa]
		1	2	3	4	5		
cement 5%	5,0%	34,10	34,00	35,90	31,60	29,70	33,06	6,58
wapno 3%	3,0%	21,30	21,20	23,40	23,80	21,70	22,28	4,43
aktywator	0,5%	7,60	8,10	8,60	9,90	6,70	8,18	1,63
	0,75%	14,70	15,30	14,70	13,90	14,40	14,60	2,90
	1,0%	9,43	9,10	10,10	9,10	14,00	9,43	1,88
	2,0%	20,10	20,10	21,00	23,90	22,30	21,48	4,27
Badanie wytrzymałości na ściskanie po 42 dobach pielęgnacji R_{m42}								
Dodatek	Zawartość domieszki	Siła niszcząca [kN]					Średnia	Naprężenia niszczące [MPa]
		1	2	3	4	5		
cement 5%	5,0%	37,50	33,40	33,90			34,93	6,95
wapno 3%	3,0%	21,60	20,50	21,50			21,20	4,22
aktywator	0,5%	11,70	10,90	8,50			10,37	2,06
	0,75%	15,90	17,70	18,00			17,20	3,42
	1,0%	11,20	11,30	10,20			10,90	2,17
	2,0%	20,60	23,60	22,50			22,23	4,42

- wartości odrzucone - odbiegające od średniej o więcej niż 20%

Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie mieszczą się w granicach wymagań obecnie obowiązujących norm [8].

W zależności od zastosowanej ilości dodatku aktywatora:

- Mieszanke betonową popiołową można zastosować jako zasadniczą warstwę podbudowy dla ruchu KR1 ÷ KR4 lub pomocniczą warstwę podbudowy dla ruchu KR5 ÷ KR6.
- Mieszanke betonową popiołową można stosować jako pomocniczą warstwę podbudowy dla ruchu KR1 ÷ KR4.

4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że wykorzystane w doświadczeniach popioły lotne wykazują właściwości wiążące. Odpowiedni dobór składu mieszanek z popiołami lotnymi posiadającymi właściwości hydrauliczne pozwala na wykorzystanie popiołów lotnych jako samodzielnych spoiw w betonach konstrukcyjnych w nawierzchniach drogowych. Zastosowanie przedstawionych technologii pozwala wykorzystywać takie mieszanki do wykonywania podbudów drogowych, wzmocnionego podłoża lub ulepszzonego podłoża. Przedstawione wyniki dowodzą spełnienia wymagań normowych dotyczących wytrzymałości na ściskanie oraz mrozoodporności. Trzeba jednakże zwrócić uwagę na konieczność przeprowadzenia badań zmęczeniowych oraz określających trwałość warstw wykonanych na podstawie takich spoiw alternatywnych.

Analizując wyniki można zauważyć nieciągłość uzyskanych wytrzymałości na ściskanie, która powinna być dokładniej przebadana. Wymaga to zwielokrotnienia badań i zmniejszenia przedziałów dla ilości stosowanego aktywatora. Dodatkowo wzrost wytrzymałości po 14 i po 42 dobach pielęgnacji jest bardzo niewielki. Sugeruje to szybkie uzyskiwanie wytrzymałości początkowej, co mogłoby skrócić czas koniecznej przerwy technologicznej, a to byłoby bardzo pożądane ze względu na ograniczenia czasowe przy wykonywaniu robót budowlanych.

Należy również zwrócić uwagę na ok. 350 mln Mg zgromadzonych odpadów energetycznych na składowiskach. Z jednej strony jest to zagrożenie dla środowiska naturalnego (np. wtórne pylenie), ale z drugiej potencjał do zagospodarowania jako źródło materiałów budowlanych zastępujących materiały naturalne.

Przedstawione badania dowodzą, że niektóre rodzaje popiołów lotnych z węgla kamiennego mogą posiadać właściwości hydrauliczne. Należy jednak jeszcze wykonać badania trwałości betonów opartych o takie spoiwa. Popioły o takich cechach mogłyby być samodzielnymi spoiwami, alternatywnymi dla klasycznych spoiw hydraulicznych.

LITERATURA

1. Aprobata techniczna IBDiM, nr AT/2005-04-1827.
2. Bastian S.: *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*. Arkady, Warszawa 1980.
3. Chlipalski K., Ciołczyk A., Szeja K.: *Badania optymalizujące skład mieszanki PPH „UTEX” Sp. z o.o. Praca NB-170/RB-3/2005, maszynopis, Gliwice 2005.*
4. Giergiczny Z.: *Rola popiołów wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
5. *Krajowy Plan Gospodarki Odpadami*. Monitor Polski, nr 11, Warszawa 2003.
6. Pachowski J.: *Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976.
7. *Przyjazne środowisku i nowoczesne drogi*. Międzynarodowe seminaria, Warszawa, 9-10 października 1997, Instytut badawczy dróg i mostów, Warszawa 1997.
8. PN-S-06103:1997 „*Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego*”.
9. PN-B-04481:1988 „*Grunty budowlane – Badania próbek gruntu*”.

Recenzent: Dr inż. Zbigniew Giergiczny

Doc. dr hab. inż. Michał A. Glinicki