

**Mohamed AHMAD**

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu  
Katedra Budownictwa

## WYKORZYSTANIE ODPADOWYCH POPIOŁÓW LOTNYCH DO WYTWARZANIA BETONU JAKO ELEMENT BUDOWNICTWA ZRÓWNOWAŻONEGO

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wpływu dodatku mineralnego popiołu lotnego krzemionkowego na właściwości betonu. Popiół lotny został zastosowany jako zamiennik spoiwa cementowego w mieszankach betonowych ze względu na swoje właściwości pucolanowe. Do badania zaprojektowano 5 mieszanek betonowych: w jednej beton kontrolny bez dodatku popiołu lotnego, zaś w pozostałych współczynnik  $k$  (popiół lotny/cement) wynosił: 0,05; 0,11; 0,18; 0,25. Jako spoiwo cementowe zastosowany został cement portlandzki CEM I 42,5 R. Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych wykazały przydatność popiołów lotnych jako zamiennika cementu w mieszankach betonowych.

**Słowa kluczowe:** odpady przemysłowe, popiół lotny, beton, budownictwo zrównoważone

### WPROWADZENIE

Popioły lotne należą do najważniejszych odmian mineralnych surowców odpadowych zarówno w Polsce, jak i na świecie. Wytwarzane są w bardzo dużych ilościach i w znacznej części zostają składowane [1]. Powstają w przemyśle energetycznym, gdzie główne paliwa stanowią węgiel kamienny i brunatny. Ponad 80% mocy systemu energetycznego pochodzi z paliw stałych, z czego aż 55% z elektrowni użytkujących węgiel kamienny [2]. Rocznie w Polsce powstaje około 20 mln ton odpadów energetycznych [3]. Według danych statystycznych w Polsce w 2007 roku wyprodukowano ponad 17 milionów ton ubocznych produktów spalania, w tym prawie 5 milionów ton popiołu lotnego. Sposoby wykorzystywania popiołu lotnego nie różnią się istotnie w różnych regionach świata. W Polsce niewykorzystana część popiołu jest gromadzona na składowiskach, co także ma wpływ na zanieczyszczenie środowiska, zwłaszcza na jego zapylenie oraz emisję rozpuszczalnych składników do wód gruntowych [4]. Problemem są znaczne ilości już nagromadzonych popiołów lotnych tworzących zwałowiska o łącznej masie 278,7 mln ton [5]. Zasadniczo popiół lotny wykorzystywany jest w inżynierii lądowej - do budowy dróg i do celów rekultywacji terenów - w górnictwie oraz

w mniejszym zakresie w rolnictwie i leśnictwie. Używany jest również jako surowiec do produkcji cementu i materiałów budowlanych. Obecnie poziom wykorzystania odpadów ze spalania paliw stałych jest wysoki i przekracza 70%, przy czym jest bardzo zróżnicowany dla różnych grup odpadów [6]. O możliwości ich zagospodarowania decyduje skład chemiczny i mineralogiczny, który w głównej mierze zależy od składu chemicznego spalanych węgla, warunków spalania oraz typów palenisk [7].

## 1. PRODUKCJA BETONÓW Z DODATKIEM POPIOŁU LOTNEGO

Współczesny beton coraz rzadziej jest tylko mieszaniną trzech podstawowych składników - cementu, kruszywa i wody. Coraz częściej jest mieszaniną wieloskładnikową, w skład której wchodzi jeszcze domieszki chemiczne i dodatki mineralne. Do najczęściej stosowanych dodatków należą popioły lotne krzemionkowe, których właściwe stosowanie w technologii betonu wpisuje się w strategię zrównoważonego rozwoju. Dodatek ten pozwala na optymalizację zużycia cementu, w efekcie czego obniża się emisja  $\text{CO}_2$  i zużycie naturalnych surowców kopalnych do produkcji klinkieru cementowego [8]. Wykorzystanie popiołów lotnych do wytwarzania betonów niesie wiele korzyści ekologicznych i ekonomicznych, do których należy także możliwość oszczędzania energii, zagospodarowania odpadów przemysłowych oraz uzyskiwania materiałów finalnych o zmodyfikowanych właściwościach [9]. Popioły lotne jako składnik betonu powodują obniżenie zapotrzebowania na wodę i poprawiają urabialność mieszanki betonowej dzięki kulistemu kształtowi ich cząsteczek. Zmieniona dyspersja cząstek cementu ma wpływ na mikrostrukturę zaczynu, najbardziej na rozmieszczenie porów oraz na ich rozmiar. Przy mniejszym rozmiarze porów przepuszczalność zaczynu jest niższa. Popiół lotny dzięki właściwościom pucolanowym oraz zdolności „dopasowania się” mniejszych cząstek pomiędzy cząstkami cementu podwyższa wytrzymałość betonu. Ma również wpływ na polepszenie odporności betonu na czynniki agresywne [10]. Do wytwarzania betonów konstrukcyjnych powinny być stosowane wyłącznie popioły lotne posiadające właściwości pucolanowe i niewykazujące strat prażenia większych niż 5%. Dzięki zastosowaniu popiołu lotnego obniża się również zużycie cementu, co powoduje zmniejszenie kosztów produkcji betonu. Popioły lotne stosowane są także do produkcji betonów komórkowych. W tym przypadku muszą one spełniać podobne wymagania jak przy ich stosowaniu do wytwarzania cementów [11]. Maksymalna ilość popiołu stosowna do produkcji betonu jest zdefiniowana przez normę [12]. Powinna ona spełniać warunek:  $\text{popiół lotny/cement} \leq 0,33$  (masowo). Dane statyczne wykazują, że w Polsce wykorzystuje się rocznie do produkcji betonów zwykłych około 200 tys. ton popiołów lotnych [13]. Są to prawie wyłącznie popioły lotne krzemionkowe ze spalania węgla kamiennego. Popioły lotne wapienne mogą również być stosowane do produkcji betonów, pod warunkiem że ich parametry jakościowe są stabilne [14].

## 2. MATERIAŁY UŻYTE W BADANIACH LABORATORYJNYCH

Do badań laboratoryjnych użyto cementu CEM I 42,5 R [15]. Do sporządzenia mieszanek betonowych zastosowane zostały kruszywa spełniające wymagania normy [16]. Do mieszanek betonowych użyto wody pobranej z wodociągu. Spełnia ona wymagania normy [17]. Jako dodatek mineralny do mieszanek betonowych użyto popiołu lotnego krzemionkowego, spełniającego wymagania normy [18]. Do najważniejszych deklarowanych właściwości użytkowych popiołu lotnego należą straty prażenia  $\leq 5,0\%$  (kategoria A).

## 3. ZAŁOŻENIA DO PROJEKTU MIESZANKI BETONOWEJ

W tabeli 1 podane są założenia do projektu mieszanki betonowej.

Tabela 1. Założenia do projektu mieszanki betonowej

Rodzaj betonu	Właściwości projektowanego betonu	Zgodnie z normą
Klasa ekspozycji	XC1	[12]
Klasa wytrzymałości betonu	C20/25	
Konsystencja mieszanki betonowej	S3	
Opad stożka Abramsa [mm]	100÷150	

Do badań laboratoryjnych sporządzono 5 zarobów. Dodatek popiołu lotnego w mieszankach betonowych stosowany został jako zamiennik spoiwa cementowego, a jego zawartość wynosiła 5%, 10%, 15% i 20%, zaś współczynnik  $k$  (popiół lotny/cement) wynosił: 0,05; 0,11; 0,18; 0,25. Składniki na  $1 \text{ m}^3$  mieszanki betonowej po uwzględnieniu wilgotności kruszywa zostały podane w tabeli 2.

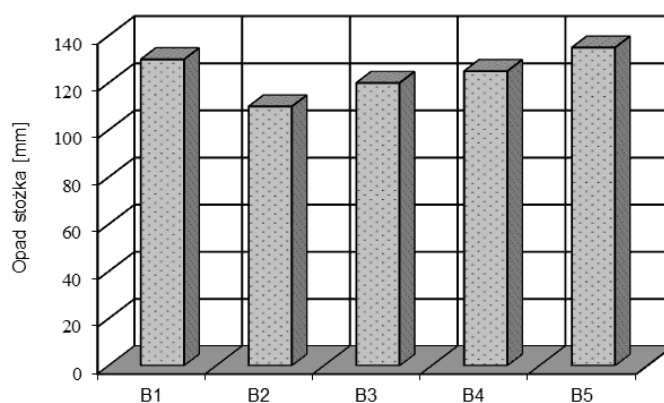
Tabela 2. Dobór składników na  $1 \text{ m}^3$  mieszanki betonowej

Składniki	Ilość składników na $1 \text{ m}^3$ [kg]				
	B1	B2	B3	B4	B5
CEM I 42,5 R	346,00	328,70	311,40	294,10	276,80
Kruszywo: – piasek 0÷4 mm – gąbry 4÷16 mm	1864,26 635,54 1228,72				
Popiół lotny	–	17,30	34,60	51,90	69,20
$k = \text{popiół lotny/cement}$	0,00	0,05	0,11	0,18	0,25
Woda zarobowa	184,00	174,21	165,04	155,87	146,70
Stosunek w/c	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
Stosunek w/s	0,53	0,50	0,48	0,45	0,42

## 4. BADANIA BETONU

### 4.1. Konsystencje mieszanek betonowych

Do oznaczania konsystencji mieszanek betonowych spośród kilku metod wybrano metodę opadu stożka zgodnie z normą [19]. Wyniki badań laboratoryjnych konsystencji poszczególnych mieszanek betonowych przedstawiono na rysunku 1. Wykazują one, że dodatek popiołu lotnego krzemionkowego poprawia urabialność i zwiększa ich płynność. Umożliwia to zmniejszenie stosunku wodno-cementowego wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego w mieszankach betonowych jako zamiennika cementu.



Rys. 1. Konsystencje mieszanek betonowych

### 4.2. Nasiąkliwość betonu

Do badania nasiąkliwości wykonano po 3 próbki z każdego zarobu o wymiarach 150x150x150 mm zgodnie z normą [20]. Badanie wykonano po 28 dniach dojrzewania betonu. Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że dodatek popiołu lotnego zmniejsza nasiąkliwość próbek betonowych. Największą nasiąkliwość - 7,26% - wykazał beton kontrolny, a najmniejszą beton z największą zawartością popiołu lotnego w mieszance betonowej - 20% ( $k = 0,25$ ). Nasiąkliwość wszystkich betonów mieści się w przedziale 5÷9%. Obniżenie nasiąkliwości betonu z dodatkiem popiołu lotnego jest efektem zmniejszenia ilości porów poprzez zdolność małych cząstek popiołu do wypełnienia przestrzeni między cząstkami cementu w mieszankach betonowych.

### 4.3. Gęstość betonu

Badanie gęstości betonu wykonano zgodnie z normą [21]. Objętości próbek betonowych określono za pomocą pomiarów nominalnych. Próbki betonowe przeznaczone do badania zostały wykonane zgodnie z wymaganiami normy [20]. Do oznaczania gęstości betonu w stanie wysuszonym próbki wysuszono do stałej

masy w suszarce z obiegiem powietrza w temperaturze  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Do zbadania gęstości betonu w stanie nasyconym próbki betonowe przez 72 godzin trzymano w wodzie o temperaturze  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Wyniki badania gęstości próbek betonowych w stanie wysuszonym i w stanie nasyconym wodą podane są w tabeli 3.

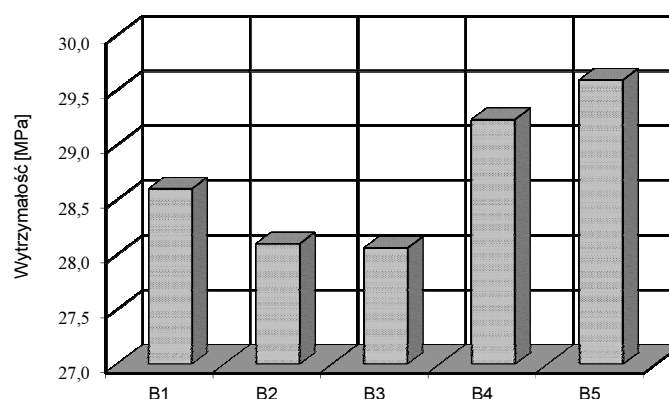
Tabela 3. Gęstość betonu w stanie wysuszonym i w stanie nasyconym wodą

Beton	Masa próbki w stanie wysuszonym [kg]	Gęstość próbek w stanie wysuszonym [kg/m <sup>3</sup> ]	Masa próbki w stanie nasyconym wodą [kg]	Gęstość próbek w stanie nasyconym wodą [kg/m <sup>3</sup> ]
B1	7,808	2313,383	8,374	2481,284
B2	7,753	2297,284	8,261	2447,605
B3	7,782	2287,967	8,222	2436,049
B4	7,761	2299,654	8,187	2425,679
B5	8,039	2382,025	8,477	2511,605

Na podstawie uzyskanych wyników badań gęstości betonu można stwierdzić, że wszystkie próbki betonowe zarówno betonu kontrolnego, jak i betonów z dodatkiem popiołu lotnego zgodnie z normą [12] można zaliczyć do betonów zwykłych. Gęstość w stanie wysuszonym wynosi  $2287,967\div 2382,025\text{ kg/m}^3$  i mieści się w przedziale  $> 2000\text{ kg/m}^3$  i  $\leq 2600\text{ kg/m}^3$  (beton zwykły).

#### 4.4. Wytrzymałość na ściskanie betonu

Badania wytrzymałości na ściskanie betonu wykonano na próbkach sześciennych o wymiarach  $150\times 150\times 150\text{ mm}$ . Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych po 28 dniach dojrzewania graficznie przedstawione są na rysunku 2. Klasyfikacja betonu pod względem jego wytrzymałości na ściskanie dokonuje się zgodnie z normą [20]. Podstawę klasyfikacji stanowi wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie określona po 28 dniach dojrzewania na próbkach sześciennych o boku  $150\text{ mm}$ . W tabeli 4 określone zostały klasy wytrzymałości betonu na ściskanie.



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonowych po 28 dniach dojrzewania

Tabela 4. Określenie klasy wytrzymałości betonu na ściskanie

Beton	Projektowana klasa	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				Klasa betonu
		Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Średnia	
B1	C20/25	27,137	28,822	29,826	28,60	C16/20
B2	C20/25	27,285	27,693	29,331	28,10	C16/20
B3	C20/25	28,312	28,031	27,850	28,06	C16/20
B4	C20/25	29,026	29,662	29,011	29,23	C20/25
B5	C20/25	27,248	30,223	31,303	29,59	C20/25

Na podstawie danych zawartych w tabeli 4 można stwierdzić, że B1 - beton kontrolny - oraz betony z dodatkiem popiołu lotnego w ilości 5% (B2) i 10% (B3) w stosunku do masy cementu nie uzyskały zakładanej klasy wytrzymałości. Klasyfikują się one do niższej klasy wytrzymałości - C16/20. Betony z dodatkiem popiołu lotnego w stosunku 15% (B4) i 20% (B5) do masy cementu wykazały wyższą wytrzymałość i zaklasyfikowane zostały do zakładanej - C20/25. Wszystkie betony wykazały przybliżone wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, a różnica pomiędzy największą wytrzymałością - 29,59 MPa (B5) - a wytrzymałością betonu kontrolnego - 28,60 MPa (B1) - wyniosła 0,99 MPa (3,46%). Zbliżona wytrzymałość na ściskanie betonu kontrolnego i betonów, w których cement został zastąpiony popiołem lotnym, wynika ze zmniejszania stosunku wodno-cementowego wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego w mieszankach betonowych. Mała wodożądność stosowanego popiołu lotnego wynika z faktu, że posiada on straty prażenia mniejsze niż 5% i dominują w nim ziarna sferyczne o mało rozwiniętej powierzchni. Betony B2 i B3 wykazały niższe wytrzymałości od betonu kontrolnego o 1,75÷1,89%. Mając na uwadze fakt, że betony z dodatkiem popiołu lotnego mają wolny przyrost wytrzymałości na ściskanie w początkowym okresie twardnienia, to wytrzymałość tych betonów po okresie 90 dni twardnienia będzie znacznie większa od wytrzymałości betonu kontrolnego po 28 dniach dojrzewania.

## WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych można wnioskować, że:

- wytrzymałość na ściskanie betonu z dodatkiem popiołu lotnego jako zamiennika cementu zależy od wielu czynników, do których należy m.in. współczynnik wodno-cementowy,
- zastąpienie cementu popiołem lotnym w mieszankach betonowych w przedziale  $k = 0,05 \div 0,25$  nie ma znacznego wpływu na kształtowanie wytrzymałości na ściskanie modyfikowanego betonu,
- kształtowanie wytrzymałości na ściskanie betonu zależy od ilości popiołu lotnego zastępującego cement,

- na kształtowanie wytrzymałości na ściskanie betonu mają również wpływ właściwości popiołów lotnych stosowanych w mieszankach betonowych,
- popioły lotne krzemionkowe są przydatne jako dodatki mineralne do wytwarzania betonów zwykłych,
- wykorzystanie i zagospodarowanie popiołów lotnych w przemyśle materiałów budowlanych ogranicza ich negatywny wpływ na środowisko naturalne.

## LITERATURA

- [1] Baliński A., Recykling odpadowych popiołów lotnych powstających ze spalania węgla kamiennego, w aspekcie wytwarzania mas formierskich, *Prace Instytutu Odlewnictwa*, XLVIII(3), Kraków 2008, 5-8.
- [2] Banaszkiewicz K., Marcinkowski T., Stosowanie popiołów lotnych odpadów flotacyjnych do zestalania odpadów zawierających metale ciężkie, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 7, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, Kraków 2008, 19-29.
- [3] GUS: Ochrona środowiska 2007, Warszawa 2007.
- [4] Żygadło M., Seweryn A., Woźniak M., Synteza zeolitów na bazie popiołów lotnych z wybranych instalacji odzysku ciepła, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 12(1), 2010, 15-26.
- [5] Rocznik statystyczny GUS, Główny Urząd Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa 2008.
- [6] Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A., Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 2005, 21(1).
- [7] Suchecki T., Zeolity z popiołów lotnych. Otrzymywanie i aplikacje w inżynierii środowiska, Wydawnictwo: Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 2005.
- [8] Giergiczny Z., Popiół lotny składnikiem betonu - normalizacja i praktyka, *Technologie*, styczeń-marzec 2009, 40-43.
- [9] Kubissa W. i in., Badanie właściwości betonów cementowych wykonanych z udziałem odpadów przemysłowych, *Konstrukcje - Elementy - Materiały, Przegląd Budowlany* 2013, 1, 35-39.
- [10] Piasta J., Piasta W.G., *Beton zwykły*, Wyd. Arkady, Warszawa 1994.
- [11] Giergiczny Z., Gawlicki M., Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu, *Mat. Konf. „Dni Betonu”*, Wisła 2004, 277-294.
- [12] PN-EN 206:2014, *Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- [13] Brylska E., Dyczek J., Gawlicki M., Wykorzystanie odpadów w przemyśle materiałów budowlanych, *Karbo* 2002, 3.
- [14] Garbacik A., Chładzyński S., Baran T., Właściwości betonu z cementów zawierających popioły lotne wapienne, *Mat. Międzynarodowej Konferencji „Ekologiczno-energetyczne kierunki rozwoju przemysłu materiałów budowlanych”*, Łądek-Zdrój 2001.
- [15] PN-EN 197-1:2012, *Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*, 2012.
- [16] PN-EN 12620+A1:2010, *Kruszywa do betonu*, 2010.
- [17] PN-EN 1008:2004, *Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu*, 2004.
- [18] PN-EN 450-1:2012, *Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*, 2012.
- [19] PN-EN 12350-2:2011, *Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka*, 2011.

- [20] PN-EN 12390-1:2013-03, Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form, 2013.
- [21] PN-EN 12390-7:2011, Badanie betonu. Część 7: Gęstość betonu, 2011.

### **USE OF FLY ASH FOR PRODUCTION OF CONCRETE AS AN ELEMENT OF SUSTAINABLE CONSTRUCTION**

In the article the results of laboratory research on influence of addition of mineral siliceous fly ash on concrete's properties were presented. Fly ash has been used as a substitute of cement binder in concrete compounds because of it's Pozzolanic properties. For research 5 cement compounds were designed: in one control concrete without the addition of fly ash, in the rest the k factor (fly ash/cement) stood at: 0,05; 0,11; 0,18; 0,25. As a cement binder, Portland cement CEM I 42,5 R was used. The results of the laboratory tests have shown the usefulness of fly ash as a substitute for cement in concrete mixes.

**Keywords:** industrial waste, fly ash, concrete, sustainable construction