



DOI: 10.17512/bozpe.2019.1.03

Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym
Construction of optimized energy potential

ISSN 2299-8535 e-ISSN 2544-963X



Wpływ popiołów powstałych ze spalania osadów ściekowych na podstawowe właściwości mechaniczne betonu

Alina Pietrzak¹ (*orcid id: 0000-0002-1301-874X*)

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

Streszczenie: Przedstawiono analizę wpływu dodatku popiołu, powstałego ze spalania osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków, na właściwości stwardniałego betonu. Metodą doświadczalną zaprojektowano skład mieszanki betonowej kontrolnej, którą następnie modyfikowano przy użyciu popiołu lotnego. Dla wszystkich uzyskanych serii betonów wykonano badania: wytrzymałości na ściskanie betonu po 7, 28 i 56 dniach dojrzewania, mrozoodporności dla 100 cykli zamrażania i rozmrażania, nasiąkliwości. Betony modyfikowane popiołem powstałym ze spalania osadów ściekowych charakteryzowały się porównywalną wytrzymałością na ściskanie w stosunku do betonu kontrolnego oraz odnotowały niższy spadek wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności.

Słowa kluczowe: beton, popiół, osady ściekowe, właściwości betonu

Użytkowanie treści artykułu tylko w oparciu o licencję Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0

Proszę cytować ten artykuł w następujący sposób:

A. Pietrzak, Wpływ popiołów powstałych ze spalania osadów ściekowych na podstawowe właściwości mechaniczne betonu, *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*, vol. 8, 1, 2019, 29-35, DOI: 10.17512/bozpe.2019.1.03

Wprowadzenie

W ostatnich kilku dziesięcioleciach wzrosło zainteresowanie wtórnym wykorzystaniem produktów ubocznych pochodzących z różnych gałęzi przemysłowych. Zakres stosowanych dodatków mineralnych do betonu uległ rozszerzeniu o nowe rodzaje surowców i odpadów. Biorąc pod uwagę składniki wchodzące w skład mieszanki betonowej, można stwierdzić, że powstały beton jest materiałem przyjaznym dla środowiska. Jednak zapotrzebowanie, skala, na jaką jest produkowany, stanowi duże obciążenie otaczającego nas środowiska przyrodniczego. Główny wpływ na wielkość tego obciążenia mają rodzaj i ilość użytego cementu, przy produkcji którego emitowana jest duża ilość CO₂. Zmniejszenie negatywnego wpływu produkcji betonu na środowisko uzyskuje się w wyniku optymalizacji składu

mieszanki betonowej, ograniczenia zużycia cementu między innymi poprzez użycie cementów mieszanych i zastąpienie go innymi materiałami wiążącymi (Giergiczny, 2013).

Jak wynika z przeglądu literatury, do produkcji mieszanki betonowej stosuje się popioły lotne, pyły krzemionkowe, mielone żużle wielkopieczowe, popioły z biopaliw (Halbiniak, 2012; Jura i Ulewicz, 2017; Jura i Ulewicz, 2018), polimery i odpady polimerowe (Albano, 2009; Mounanga, 2008; Pietrzak i Ulewicz, 2018). W artykule skupiono się natomiast na wykorzystaniu do produkcji betonu popiołów lotnych, powstałych przy spalaniu osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków.

W Polsce, według danych GUS, w 2016 roku w oczyszczalniach ścieków wytworzono 568 tys. Mg osadów ściekowych. Wiąże się to z dynamiczną rozbudową sieci kanalizacyjnych i zwiększonych ilości ścieków komunalnych dostarczanych do oczyszczalni (Rutkowska, 2018). Osady ściekowe, powstające w oczyszczalniach ścieków, są odpadami, których unieszkodliwienie i zagospodarowanie jest problemem światowym. Zgodnie z obowiązującą Ustawą o odpadach z 14 grudnia 2012 roku, osady ściekowe powstające w oczyszczalniach ścieków powinny zostać zagospodarowane w sposób przyjazny dla środowiska nie tylko ze względów prawnych, ale również estetycznych oraz praktycznych. Z uwagi na zawartość związków organicznych i biogennych odpady te przez wiele lat były wykorzystywane w rolnictwie jako bogate źródło substancji niezbędnych do wzrostu roślin. Jednak z powodu wspólnego odprowadzania ścieków komunalnych i przemysłowych osady ściekowe są zanieczyszczone związkami metali ciężkich, substancjami organicznymi, bakteriami chorobotwórczymi, grzybami, jajami pasożytów i innymi niebezpiecznymi substancjami. Sprawiają one, że biotechnologie w przeróbce osadów nie spełniają aktualnie obowiązujących wymagań dla zastosowań bezpośrednio w rolnictwie lub przy produkcji kompostów (Pietrzak, 2014). Jedną z metod utylizacji powstającego osadu jest jego termiczne przekształcenie. W wyniku spalania osadów powstają znaczące ilości popiołów lotnych i dennych, które należy zagospodarować zgodnie z hierarchią postępowania z odpadem, którą narzuca dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. z późniejszymi zmianami. Dyrektywa ta wskazuje, że należy przede wszystkim zapobiegać powstawaniu odpadów, następnie prowadzić procesy odzysku, w tym recyklingu, a w ostatniej kolejności poddać je procesom unieszkodliwienia i doprowadzić na składowiska. Prezentowana praca poświęcona jest możliwości zagospodarowania powstających popiołów do produkcji betonu, mieści się w obszarze technologii recyklingu odpadów.

1. Metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu popioły lotnego powstałego w wyniku spalania osadów ściekowych na wybrane cechy betonów. Do wytwarzania badanych betonów użyto: cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku płukanego,

kruszywa żwirowego o frakcji 2-8 mm oraz frakcji 8-16 mm, plastyfikatora MasterPozzolith STD i popiołu lotnego powstałego ze spalania osadów ściekowych. Skład chemiczny popiołu podano w tabeli 1. Użyty do badań popiół lotny został pozyskany z oczyszczalni ścieków znajdującej się na terenie Bydgoszczy.

Tabela 1. Skład chemiczny popiołu lotnego pobranego z oczyszczalni ścieków

Skład chemiczny, % masy						
SiO ₂	CO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
20,2 ±0,09	6,93 ±0,2	0,63 ±0,03	13,36 ±0,7	4,23 ±0,1	8,4 ±0,4	17,35 ±0,7
TiO ₂	ZnO	K ₂ O	MnO	Cr ₂ O ₃	CaO	SO ₃
0,73 ±0,04	1,03 ±0,09	2,04 ±0,2	0,13 ±0,02	0,2 ±0,02	22,56 ±0,09	2,21 ±0,2

W celu poprawy wybranych właściwości betonu lub uzyskania specjalnych właściwości wprowadzone są do betonu składniki, zwane dodatkami, w ilości przekraczającej 5% masy cementu. Dodatki należy uwzględnić w obliczeniach szczelności mieszanki betonowej. Stosowane dodatki muszą spełniać wymagania stawiane w normie PN-EN 206 -1:2014 Beton. Według tej normy, popioły lotne są dodatkami typu II i można je uwzględnić w składzie betonu, stosując koncepcję współczynnika k. Koncepcja ta opiera się na porównaniu trwałości betonu referencyjnego oraz betonu, w którym część cementu zastąpiono dodatkami typu II. Umożliwia to uwzględnienie dodatków typu II przez:

- zastąpienie współczynnika woda/cement współczynnikiem woda/(cement + k x dodatek);
- spełnienie warunku: (cement + k x dodatek) ≥ minimalna zawartość cementu wymagana z uwagi na wyspecyfikowaną klasę ekspozycji.

Zasady stosowania współczynnika k w odniesieniu do popiołu lotnego:

- maksymalna ilość popiołu lotnego, uwzględniona w wartości k powinna spełniać warunek:
 - dla cementów CEM I - popiół lotny / cement ≤ 0,33 (masowo),
 - dla cementów CEM II/A - popiół lotny / cement ≤ 0,25 (masowo),

Współczynnik k = 0,4 dla spełnionego powyżej warunku.

Wykonano 3 serie betonów. Beton kontrolny o stosunku w/c = 0,55 z domieszką plastyfikatora w ilości 0,3% masy cementu - seria SK. W kolejnych seriach beton kontrolny zmodyfikowano w składzie:

- seria 1P - stosując popiół lotny w stanie dostawy w stosunku P/C = 0,330, wprowadzając korektę ilości cementu i kruszywa;
- seria 2P - stosując popiół lotny w stanie dostawy w stosunku P/C = 0,165 wprowadzając korektę ilości cementu i kruszywa.

Skład poszczególnych mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Skład betonów poszczególnych serii (opracowanie własne)

Seria betonu	Składniki, kg/m ³				
	Cement	Woda	Kruszywo	Plastyfikator	Popiół lotny
SK	313,3	173,9	1918,2	0,94	–
S1P	279,3	173,9	1836,2	0,84	92,172
S2P	296,6	173,9	1873,5	0,89	48,94

Przy założonym stosunku wodno-cementowym metodą doświadczalną zaprojektowano mieszankę betonową tak, aby uzyskać odpowiednią konsystencję i urabialność. Dla mieszanki betonowej serii kontrolnej założono konsystencję S3 (opad stożka w granicach 100-150 mm).

Dla wszystkich serii betonów wykonano po 12 próbek sześciennych 15x15x15 cm i 10x10x10 cm. Po 7-, 28- i 56-dniowym okresie dojrzewania przeprowadzono badanie wytrzymałości na ściskanie. Po 28-dniowym okresie dojrzewania przeprowadzono również badania mrozoodporności, poddając próbki 100 cyklom zamrażania i rozmrażania, oraz nasiąkliwości.

Badania wytrzymałości na ściskanie zostały wykonane po 7, 28 i 56 dniach dojrzewania próbek w warunkach laboratoryjnych zgodnie z normą PN-EN 206: 2014. Badanie zostało przeprowadzone za pomocą maszyny wytrzymałościowej Toni Technik typu 2030.

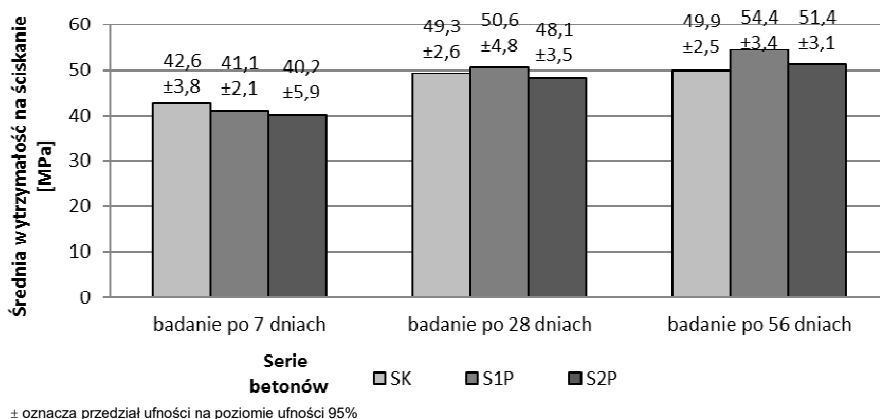
Na podstawie metodyki zawartej w normie PN-88/B-06250 przeprowadzono badanie nasiąkliwości betonów poszczególnych serii oraz badanie mrozoodporności metodą bezpośrednią dla klasy odporności F100.

2. Wyniki badań

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie zamieszczono na rysunku 1. Średnia wytrzymałość na ściskania betonu kontrolnego (SK), określona po 7 dniach, wyniosła $f_{cm} = 42,6 \pm 3,8$ MPa. Dodanie pyłu lotnego jako zamiennika cementu spowodowało obniżenie średnich wytrzymałości na ściskanie. Po 7 dniach dojrzewania największy spadek wytrzymałości na ściskanie o 5,7% w stosunku do betonu kontrolnego odnotowano dla serii S2P. Natomiast spadek wytrzymałości na ściskanie dla serii S1P wyniósł 3,7% w stosunku do serii kontrolnej.

Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu określona po 28 dniach dojrzewania dla betonu serii kontrolnej (SK) wyniosła $f_{cm} = 49,3 \pm 2,6$ MPa. Dla serii betonu, gdzie dodano popiół lotny w stosunku P/C = 0,330, zanotowano wzrost o 2,7% w stosunku do SK, natomiast w serii S2P, gdzie zastosowano popiół lotny w stosunku P/C = 0,165, zanotowano spadek o 2,4%.

Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu określona po 56 dniach dojrzewania dla betonu serii kontrolnej (SK) wyniosła $f_{cm} = 49,9 \pm 2,5$ MPa. Po 56 dniach dojrzewania dla obydwu serii modyfikowanych popiołem odnotowano wzrost wytrzymałości kolejno o 10 i 4% w stosunku do serii kontrolnej.



Rys. 1. Średnie wytrzymałości na ściskanie betonów poszczególnych serii (opracowanie własne)

Wyniki badań nasiąkliwości przedstawiono w tabeli 3. Zgodnie z normą, nasiąkliwość betonów narażonych na działanie czynników środowiskowych nie powinna być większa niż 5%, natomiast dla betonów osłoniętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych nie powinna przekraczać 9%. Zarówno beton serii kontrolnej, jak i betony modyfikowane popiołem lotnym osiągnęły nasiąkliwość w granicach 5,4-5,8%.

Wyniki badania mrozoodporności metodą bezpośrednią przedstawiono w tabeli 3. Pozytywny wynik oznaczenia uzyskuje się, gdy po wykonaniu n cykli zamrażania - rozmrażania, wymaganych przy danej klasie mrozoodporności: średni spadek wytrzymałości na ściskanie nie przekracza 20%, średni ubytek masy nie przekracza 5% oraz żadna z badanych próbek nie ulegnie pęknięciu ani zarysowaniu. Spadek wytrzymałości na przemienne zamrażanie i rozmrażanie dla serii kontrolnej był na poziomie 17,4%. Jak wynika z danych tabeli 3, serie betonu S1P i S2P modyfikowane pyłem lotnym ze spalania osadów ściekowych wykazały znacznie niższy spadek odporności na przemienne zamrażanie/odmrażanie, wynoszący odpowiednio 7,2 i 13,5% w porównaniu z serią kontrolną. Ubytek masy dla wszystkich serii betonów mieścił się w przedziale 0,10-0,20%.

Tabela 3. Wyniki badania mrozoodporności i nasiąkliwości betonów poszczególnych serii (opracowanie własne)

Seria betonu	Mrozoodporność		Nasiąkliwość %
	Średni ubytek masy ΔG , %	Średni spadek wytrzymałości na ściskanie ΔR , %	
SK	0,11±0,34	17,4±7,9	5,4±0,2
S1P	0,10±0,84	7,2±7,6	5,8±0,5
S2P	0,20±0,49	13,5±7,4	5,6±0,3

± oznacza przedział ufności na poziomie ufności 95%

Wnioski

Podsumowując, należy stwierdzić, że stosowanie popiołów lotnych powstałych ze spalania osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków w technologii betonów jest możliwe. Trudnością zastosowania jest brak uregulowań normalizacyjnych w tym zakresie. Nie ma bowiem przepisów dotyczących chemicznych i fizycznych właściwości popiołów uzyskanych ze spalania osadów ściekowych limitujących możliwości ich wykorzystania w technologii betonu.

Modyfikowane betony charakteryzowały się porównywalną wytrzymałością na ściskanie w stosunku do betonu kontrolnego oraz odnotowały niższy spadek wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności. Można stwierdzić, że wykorzystany popiół lotny nie wykazuje niekorzystnego wpływu na badane właściwości betonu.

Bibliografia

- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A. & Gutierrez, A. (2009) *Influence of concrete and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ration*. Waste Management, 29 (10), 2707-2716.
- Giergiczny, Z. (2013) *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Halbiniak, J. (2012) *Projektowanie składu betonowego z dodatkiem popiołów lotnych oraz ich wpływ na tempo przyrostu wytrzymałości*. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, 2(10), 29-36.
- Jura, J. & Ulewicz, M. (2017) *Wpływ dodatku popiołu dennego ze spalania biomasy na wybrane właściwości zapraw cementowych*. Materiały Budowlane, 5, 77-78.
- Jura, J. & Ulewicz, M. (2018) *Application of fly ash and CRT glass waste In cement mortars*. Stinetic Review - Engineering and Environmental Sciences, 27, 348-354.
- Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P. & Turery, P. (2008) *Proportioning and characterization of light weight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes*. Cement and Concrete Composites, 30, 806-814.
- Pietrzak, A. (2014) *Proekologiczne technologie w budownictwie na przykładzie „zielonego betonu”*. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, 1(13), 86-93.
- Pietrzak, A. & Ulewicz, M. (2018) *The effect of the addition of polypropylene fibres on improvement on concrete quality*. QPI 2018, MATEC Web of Conferences 183, 02011.
- Rutkowska, G., Fronczyk, J. & Wichowski, P. (2018) *Badanie możliwości wykorzystania popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych do produkcji betonów zwykłych*. Rocznik Ochrona Środowiska, 20, 1113-1128.
- PN-EN 206: 2014 *Beton - Wymagania właściwości, produkcja i zgodność*.
- PN-88/B-06250 *Beton zwykły*.

The effect of ashes generated from the combustion of sewage sludge on the basic mechanical properties of concrete

Abstract: The article presents an analysis of the impact of fly ash addition, which originated from the combustion of sewage sludge in sewage treatment plants, on the properties of hardened

concrete. The composition of control concrete mixture was designed using the experimental method, and then it was modified using fly ash. For all concrete series obtained, tests were performed: compressive strength of concrete after 7, 28 and 56 days of maturation, frost resistance for 100 cycles of freezing and thawing, and absorbability. Ash-modified concretes formed from the combustion of sewage sludge were characterized by comparable compressive strength in comparison to the control concrete and recorded a lower drop in compressive strength after the frost resistance test.

Keywords: concrete, ash, sewage sludge, concrete properties