



Badania możliwości wykorzystania popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych do produkcji betonów zwykłych

*Gabriela Rutkowska, Joanna Fronczyk, Piotr Wichowski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa*

1. Wprowadzenie

W Polsce według danych GUS (GUS 2017) w oczyszczalniach ścieków komunalnych w 2016 roku wytworzono 568.3 tys. Mg s.m. osadów ściekowych. W Krajowym Planie Gospodarki Odpadami (KPGO 2022) przewiduje się, że każdego roku ich ilość będzie wzrastała o około 2-3%. Jest to efekt dynamicznej rozbudowy w Polsce sieci kanalizacyjnej i zwiększenia ilości ścieków komunalnych dostarczanych do oczyszczalni ścieków. Zgodnie z Ustawą o odpadach z 14 grudnia 2012 roku, powstające w oczyszczalniach osady ściekowe powinny być zagospodarowane w sposób przyjazny dla środowiska. Jedną z metod utylizacji osadów jest ich termiczne przekształcanie. Produktem ubocznym prowadzenia tego procesu jest znacząca ilość popiołu, który należy zagospodarować zgodnie z hierarchią sposobów postępowania z odpadami. W Polsce wzrosła ilość komunalnych osadów ściekowych przekształcanych termicznie (dane GUS, 2000 r. – 34.1 tys. suchej masy, 2010 r. – 66.4 tys. suchej masy, a w 2015r. – 165.4 tys. suchej masy). Jedną z możliwości zagospodarowania powstających popiołów jest ich wykorzystanie do produkcji materiałów konstrukcyjnych, jakim jest beton zwykły (Rutkowska i in., 2016). Rozwiązanie takie daje korzyści ekologiczne oraz ekonomiczne. Popiół lotny pochodzący z termicznego przekształcenia osadów ściekowych jest odpadem o kodzie 19 01 14 (EU/2014/955), więc jest składnikiem znacząco tańszym niż klinkier portlandzki stos-

wany do produkcji cementu portlandzkiego. Ponadto, proces produkcji klinkieru wiąże się z wysoką emisją dwutlenku węgla (szacuje się, że na 1 kg wyprodukowanego klinkieru przypada emisja 1 kg CO₂) oraz dużym zużyciem energii, ponieważ w technologii produkcji cementu klinkier jest prażony w temperaturze 1450°C (Markiv i in. 2016). Wprowadzone przez Unię Europejską ograniczenia emisji dwutlenku węgla (Kępsys i in. 2013) zachęcają do badań nad materiałami nowej generacji zawierającymi mniejsze ilości klinkieru. Użycie ich w technologii betonu wpływa również na oszczędność paliw kopalnych i naturalnych surowców oraz na zanieczyszczenia środowiska (Deja i in. 2012, Yadav 2014, Wichowski 2017). Zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami (Dz.U. 2016 poz.108), które w zakresie swej regulacji wdrażają dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady (EU/2010/75), powstające popioły ze spalania osadów ściekowych po spełnieniu określonych wymogów mogą być wykorzystane do sporządzania mieszanek betonowych na potrzeby budownictwa, z wyłączeniem budynków przeznaczonych do stałego przebywania ludzi lub zwierząt oraz do produkcji lub magazynowania żywności. Dotychczasowe badania wskazują, że zastosowanie popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych pozwala na uzyskanie porównywalnych właściwości w stosunku do betonu wytworzonego na bazie popiołów lotnych ze spalania lub współspalania węgla (Fontes 2004, Yusur 2012, Rutkowska i in. 2017).

Głównym celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości wykorzystania popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych do produkcji betonu. Wykonano analizę porównawczą właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu zawierającego popioły lotne z termicznego przekształcania osadów ściekowych oraz popioły lotne krzemionkowe i wapienne, obecnie szeroko stosowane w technologii produkcji betonu.

2. Metodyka badawcza

Procedury projektowe oraz badawcze zostały oparte na wytycznych zawartych w aktualnie obowiązujących, krajowych normach budowlanych. Badania zostały wykonane w Laboratorium Budowlanym Katedry Inżynierii Budowlanej oraz Pracowni Procesów Fizycznych w Budownictwie Centrum Wodnego Wydziału Budownictwa i Inżynierii

Środowiska SGGW w Warszawie. Próbkę betonową do badań zaprojektowano jako beton zwykły zgodnie z PN-EN-206+A1: 2016-12. W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano mieszankę betonową klasy C20/25 o konsystencji F1 – konsystencja wilgotna. We wszystkich próbkach zachowano stały skład granulometryczny kruszywa drobnego dobranego metodą analizy sitowej oraz kruszywa grubego dobranego metodą kolejnych przybliżeń – iteracji (tabela 1). Skład mieszanki zaprojektowano wykorzystując metodę trzech równań wg Bukowskiego. Do przygotowania próbek betonowych wykorzystano kruszywo normalne o uziarnieniu 0,125-16 mm, cement portlandzki CEMI 32,5 R oraz dodatki. Jako dodatki mineralne do mieszanki betonowej zastosowano popiół lotny pochodzący z fluidalnego spalania komunalnych osadów ściekowych w oczyszczalni ścieków „Czajka” w Warszawie oraz, jako materiały porównawcze, konwencjonalny popiół lotny krzemionkowy pochodzący ze spalania węgla kamiennego w elektrociepłowni Siekierki w Warszawie i popiół wapienny ze spalania węgla brunatnego w elektrowni Bełchatów. Popioły lotne pochodzące ze współspalania węgla spełniały wymagania określone w PN-EN 450-1+A1:2012. W celu porównania właściwości betonów zwykłych wytwarzanych w tradycyjny sposób oraz betonów zawierających w swoim składzie Uboczne Produkty Spalania (UPS) w postaci popiołów lotnych – krzemionkowy, wapienny oraz z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych przygotowano cztery rodzaje próbek betonów:

1. beton bez żadnych dodatków – BZ,
2. beton z dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego – P I,
3. beton z dodatkiem wapiennego popiołu lotnego – P II,
4. beton z dodatkiem popiołu lotnego z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych – P III.

W poszczególnych próbkach z dodatkiem popiołów lotnych zastępowano 5%, 10%, 15%, 20%, 30% określonej masy cementu popiołem lotnym. Dla przyjętych założeń projektowania mieszanki betonowej betonu zwykłego przy użyciu metody trzech równań ustalono recepturę mieszanki betonowej na 1 m^3 (tabela 2).

Tabela 1. Zawartość procentowa kruszywa dobranego metodą iteracji
Table 1. Percentage contain of the aggregates selected by iterations

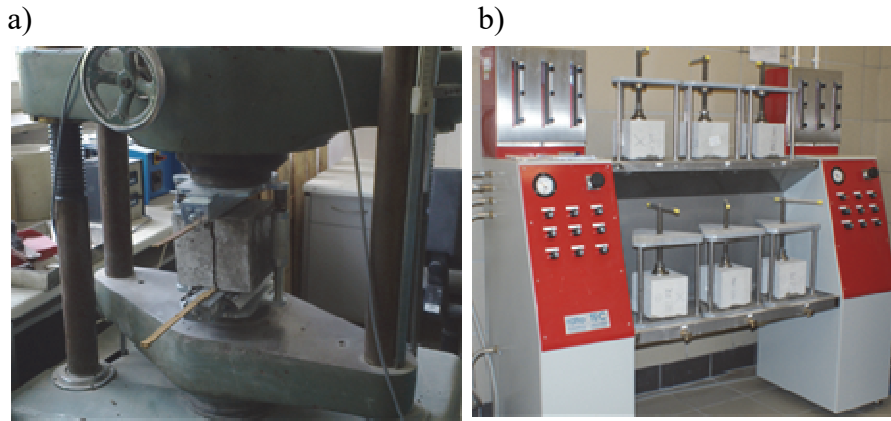
Fracja	Procentowy stosunek zmieszania frakcji (piasku i żwiru)			Skład ziarnowy	
	I etap	II etap	III etap	Piasku	Żwiru
0,0-0,125			30	1,31	0,39
0,0125-0,25				11,52	3,46
0,025-0,50				48,93	14,68
0,50-1,0				32,36	9,71
1,0-2,0				5,88	1,76
2,0-4,0		30	70		21,00
4,0-8,0	40	70			19,60
8,0-16,0	60				29,40

Tabela 2. Proporcje mieszanki betonowej według wagi
Table 2. Concrete mix proportions by weight

	Składniki mieszanki betonowej (kg/m ³)			
	Woda	Kruszywo	Cement	Popiół lotny
Beton bez dodatków	174,73	1817,25	426,33	–
Beton z dodatkiem 5% popiołu	174,73	1817,25	405,01	21,32
Beton z dodatkiem 10% popiołu	174,73	1817,25	383,70	42,63
Beton z dodatkiem 15% popiołu	174,73	1817,25	362,38	63,95
Beton z dodatkiem 20% popiołu	174,73	1817,25	341,06	85,27
Beton z dodatkiem 30% popiołu	174,73	1817,25	298,43	127,90

Konsystencja mieszanek betonowych została zbadana metodą stożka opadowego zgodnie z PN-EN 12350-2:2011, gęstość zgodnie z PN-EN 12350-6:2011 oraz zawartość powietrza metodą ciśnieniową zgodnie z PN-EN 12350-7:2011. Do badania wytrzymałości na ściskanie użyto próbek o wymiarach 100x100x100 mm. Badania przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w PN-EN 12390-3:2011 w maszynie wytrzymałościowej hydraulicznej H011 Matest. Próbkę poddano badaniom po upływie 28 i 56 dniowego okresu pielęgnacji betonu. Do badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu użyto próbek o wymia-

rach 100x100x500 mm. Badanie wykonano zgodnie z PN-EN 12390-5:2011. Do badania wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie użyto próbek o wymiarach 150x150x150 mm (rys. 1a). Doświadczenie przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w PN-EN 12390-6:2011. Głębokość penetracji wody przeprowadzono na próbkach o wymiarach 150x150x150 mm (rys. 1b), zgodnie z normą PN-88/B-06250 oraz PN-EN 12390-8:2011.



Rys. 1. Badanie betonu: a – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, b – głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Fig. 1. Concrete testing: a – tensile strength by splitting, b – water penetration height under pressure

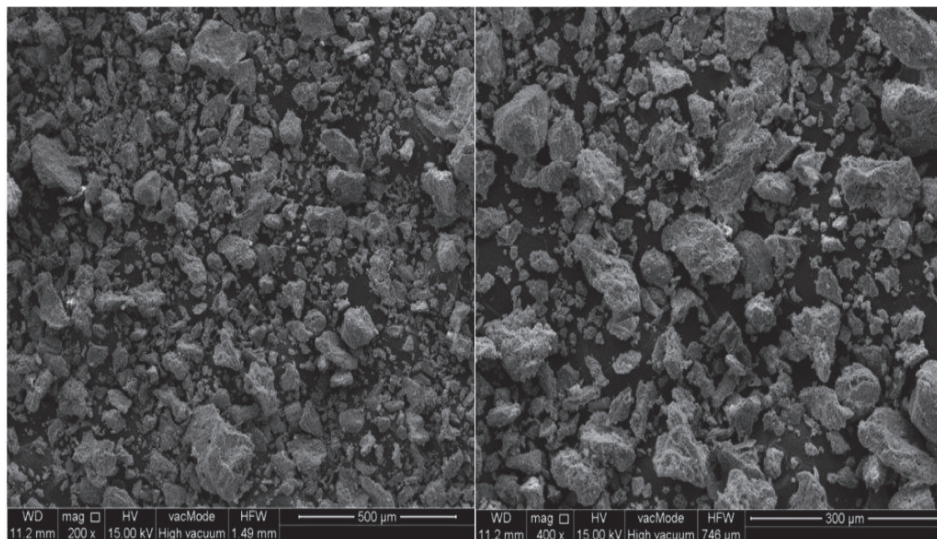
W celu rozpoznania morfologii i składu chemicznego w mikroobszarze głównych składników popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych przeprowadzono badania za pomocą mikroskopu skaningowego SEM Quanta 250 FEG firmy FEI wyposażonego w system analizy składu chemicznego oparty na dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego – EDS (ang. Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) firmy EDAX.

3. Właściwości popiołu i mieszanki betonowej

3.1. Popiół lotny

Rysunek 2 przedstawia mikrofotografie ze skaningowego mikroskopu elektronowego popiołu lotnego ze spalania osadów ściekowych. Badania wykazały, że analizowany materiał charakteryzuje się obecnością

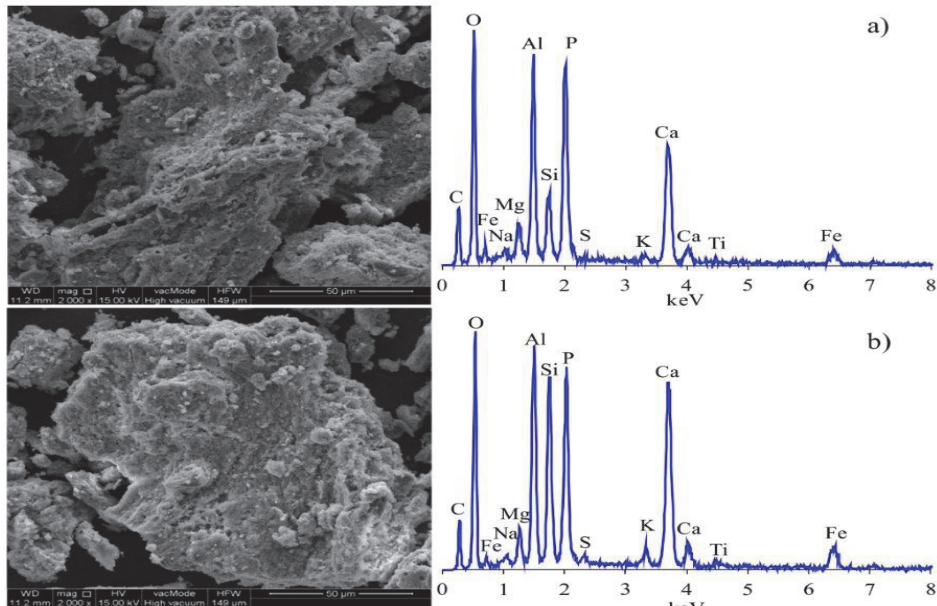
nieregularnych ziaren o silnie rozwiniętej powierzchni wskazującej na dużą porowatość materiału. Analizy chemiczne w mikroobszarze (SEM-EDS) wykazały zróżnicowanie składu pierwiastkowego. W składzie chemicznym próbek dominowały krzem, glin, fosfor, wapń i tlen, natomiast pozostałe składniki (Na, Mg, C, K, Fe, S i Ti) występowały w mniejszych ilościach (rys. 3).



Rys. 2. SEM popiołu z termicznego przekształcania osadów ściekowych
Fig. 2. SEM images of fly ash form sewage sludge combustion

Popioły krzemionkowe charakteryzują się wysoką zawartością tlenków glinu i krzemionki, natomiast popioły wapienne i z termicznego przekształcania osadów ściekowych wysoką zawartością tlenków glinu, wapnia oraz krzemionki. Na podstawie badań własnych popiołów z osadów ściekowych zaobserwowano około dwukrotnie niższą sumę zawartości dwutlenku krzemu (SiO_2 – 17,8%), tlenku glinu (Al_2O_3 – 11,1%) i tlenku żelaza (Fe_2O_3 – 6,5%) w stosunku do popiołów konwencjonalnych. Ilość ta nie spełnia wymagań zawartych w normie PN-EN 450-1:2012 (Szarek i Wojtkowska 2018). Jednak norma ta dotyczy popiołów lotnych krzemionkowych uzyskiwanych podczas spalania węgla lub współspalania węgla z odpadami. Podobne uregulowania nie zostały zaproponowane dla popiołów pochodzących ze spalania komunalnych osadów ściekowych (Milik 2016). Dodatkowo, w popiołach niekonwencjo-

nalnych zanotowano mniejszą stratę prażenia (0,5) oraz większą zawartość fosforanów (18,153%) niż w popiołach tradycyjnych.



Rys. 3. Zdjęcia SEM badanego popiołu wraz z analizą EDS

Fig. 3. SEM images of FAMSS along with EDS analysis

3.2. Mieszanka betonowa

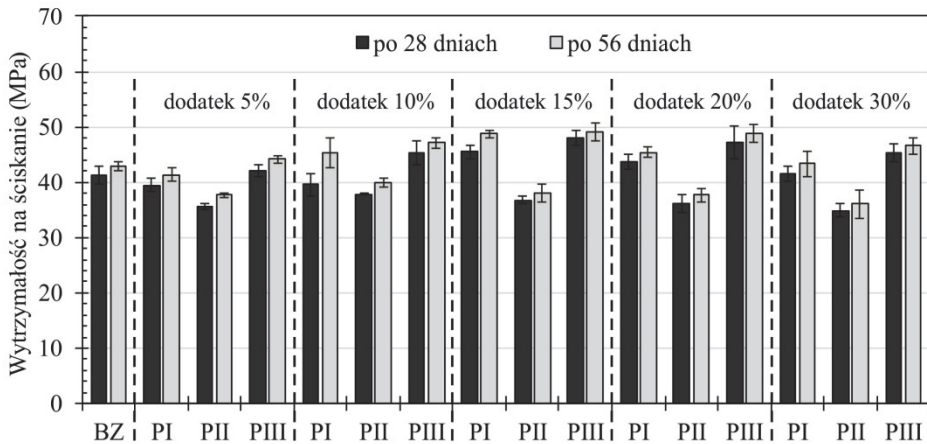
Na podstawie przeprowadzonych badań konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka dla wszystkich próbek uzyskano konsystencję wilgotną. Wyższe zawartości powietrza zanotowano w mieszankach PI i PII, natomiast niższe dla próbek PIII. Jednak dla klasy ekspozycji XO norma PN-EN 206+A1:2016-12 nie precyzuje wymagań maksymalnej i minimalnej zawartości powietrza dla betonu. Analogicznie jak dla betonów zwykłych ($2000\text{--}2600\text{ kg/m}^3$) gęstość mieszanki betonowej mieściła się w granicach od 2350 do 2387 kg/m^3 . Jak wynika z przeprowadzonych badań Monzo (2003) częściowe zastąpienie cementu popiołem lotnym ze spalania osadów ściekowych powoduje zmniejszenie urabialności mieszanki betonowej i nie zagraża bezpieczeństwu środowiska naturalnego. Związane jest to z dużą wodoznością cząstek oraz nieregularną budową samych ziaren popiołu. Ponadto, analiza procesu hydra-

tacji popiołu z osadu wykazała, że zastępując popiołem 20% masy mineralnych składników wykorzystywanych do produkcji cementu można uzyskać spoiwo spełniające wymagania stawiane cementom powszechnego użytku (Lin 2005).

4. Właściwości mechaniczne betonu

4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki pomiarów średniej wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych przy zmiennym dodatku popiołu lotnego z zaznaczonym odchyleniem standardowym pokazano na rysunku 4.

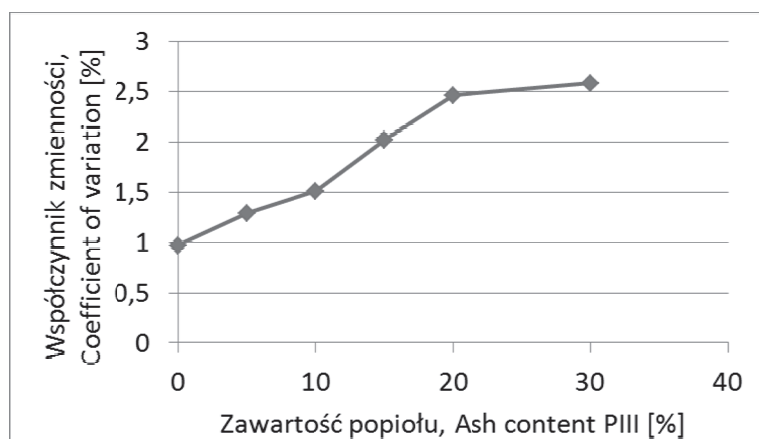


Rys. 4. Wytrzymałości na ściskanie po 28, 56 dniach dojrzewania

Fig. 4. Compressive strength after 28 and 56 days of curing

Największą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (47,9 MPa) uzyskały próbki betonu, w których cement wymieniono w ilości 15% na popiół lotny z termicznego przekształcania osadów ściekowych (PIII 15%). Natomiast najmniejszą wytrzymałość na ściskanie równą 34,9 MPa zaobserwowano dla próbek, w których cement wymieniono na popiół wapienny w ilości 30%. (PII 30%). W porównaniu do betonu referencyjnego wytrzymałość betonu PIII 15% zwiększyła się o 16,0%, natomiast wytrzymałość betonu PII 30% zmniejszyła się o 15,5%. Największą wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach (podobnie jak po 28 dniach) uzyskał beton z popiołem z termicznego przekształcania osadów ściekowych (PIII 15%), natomiast najmniejszą beton z popio-

łem wapiennym (PII 30%). Wymiana cementu na popiół z osadów wpłynęła na wzrost wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do betonu referencyjnego. Produkty termicznego przetwarzania osadów ściekowych wykazują pewną analogię do tradycyjnych dodatków mineralnych stosowanych w technologii kompozytów cementowych (popiół lotny węglowy, pył krzemionkowy, mielony granulowany żużel wielkopiecowy). Analogia ta dotyczy przede wszystkim składu i właściwości pucolanowych tych materiałów. Warto podkreślić, że popiół pochodzący ze spalania osadów ściekowych jest bogaty w związki fosforu. Przypuszcza się zatem, że powolne narastanie wytrzymałości betonów zawierających popiół ze współspalania może być spowodowane obecnością jonów fosforanowych, które opóźniają proces hydratacji cementu (Kosior-Kazberuk 2011).



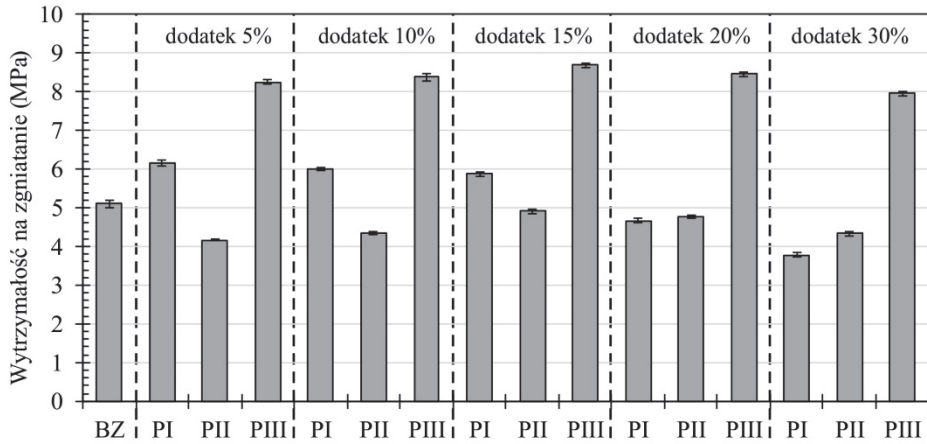
Rys. 5. Zależność współczynnika zmienności od zawartości popiołu

Fig. 5. Dependence of the coefficient of variation on ash content

Wyniki badań wytrzymałości betonów na ściskanie po 28 i 56 dniach dojrzewania wykazały małe współczynniki zmienności wynoszące poniżej 3% dla wszystkich badanych próbek. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowo zależność pomiędzy wartościami współczynnika zmienności i ilością popiołu w betonie.

4.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów średniej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu próbek betonowych przy zmiennym dodatku popiołu lotnego.



Rys. 6. Wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach dojrzewania
Fig. 6. Tensile strength by bending after 28 days of curing

Najmniejszą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach dojrzewania, równą 3,7 MPa, uzyskały próbki betonu, w których cement wymieniono w ilości 30% na popiół krzemionkowy (PI 30%). Największą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu równą 8,7 MPa charakteryzowały się próbki, w których cement wymieniono na popiół z termicznego przekształcania osadów ściekowych w ilości 15%. (PIII 15%). W stosunku do betonu porównawczego wzrost wytrzymałości betonu PIII 15% wynosił 68,6%, natomiast zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu PI 30% wynosiło 72,5%. Ponadto zauważono, że najmniejszą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu uzyskał beton z popiołem wapiennym, a największą beton z popiołem z termicznego przekształcania. Podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaobserwowano również niewielkie wartości współczynników zmienności nieprzekraczające 6%. Zastąpienie do 30% cementu popiołem nie wpływa negatywnie na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Jak podaje Monzo (2003), stosowanie dodatkowych zabiegów, takich jak mielenie popiołu na mokro przed wprowadzeniem do zaprawy czy dojrzewanie próbek w podwyższonej temperaturze, umożliwia zwiększenie zawartość popiołu do 30% masy spoiwa.

4.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

W tabeli 3 przedstawiono wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek betonowych o wymiarach 150x150x150 mm. Badania przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek.

Tabela 3. Średnia wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu
Table 3. The average tensile strength by splitting

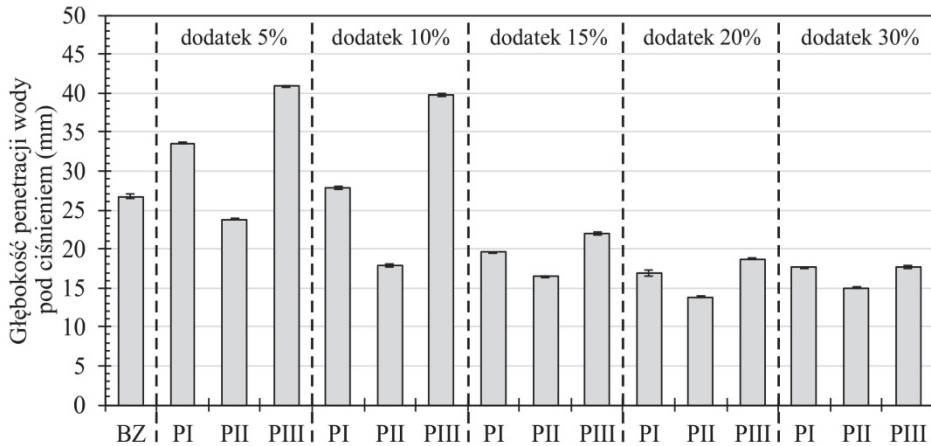
Rodzaj betonu	Średnia wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przy różnych zawartościach popiołu lotnego [MPa]					
	0%	5%	10%	15%	20%	30%
BZ	11,3	-	-	-	-	-
PI	-	7,2	8,9	8,7	8,6	8,4
PII	-	6,5	8,3	7,9	7,8	7,2
PIII	-	2,4	2,9	3,2	4,4	5,1

Największą wartość wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, równą 11,3 MPa, osiągnięto dla próbek bez dodatków popiołów. Wartości wytrzymałości próbek z dodatkiem popiołów kształtowały się w zakresie od 2,4 do 8,9 MPa. Próbki z 5% zawartością popiołu krzemionkowego charakteryzowały się średnią wartością tej wytrzymałości równą 7,2 MPa, natomiast próbki betonu z 10% zawartością popiołu 8,9 MPa. Dla próbek z 30% zawartością popiołów krzemionkowych określono średnią wartość tego parametru równą 8,4 MPa. Dodatkowo badania wykazały, że wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów z dodatkiem popiołu wapiennego była mniejsza niż dla betonów z dodatkiem popiołów krzemionkowych. Beton, w którym wykorzystano popiół z termicznego przekształcania osadów ściekowych uzyskał najmniejsze wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w porównaniu do pozostałych rodzajów betonów. Należy jednak zaznaczyć, że parametr ten zwiększał się wraz ze wzrostem procentowego udziału dodatku w mieszance. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu mają współczynniki zmienności wynoszące poniżej 8%.

4.4. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki średniej głębokości penetracji wody pod ciśnieniem w betonie niemodyfikowanym i w betonach z róż-

nymi zawartościami popiołów krzemionkowego, wapiennego i z osadów ściekowych.



Rys. 7. Wyniki głębokości penetracji wody pod ciśnieniem

Fig. 7. The results of water penetration height under pressure

Największą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem równą 40,8 mm otrzymano dla betonu z dodatkiem popiołu z termicznego przekształcania osadów ściekowych. Najmniejszą wartością (13,9 mm) charakteryzowały się betony z 20% zawartością popiołu wapiennego. Dla wszystkich rodzajów wykorzystanych popiołów lotnych zaobserwowano zmniejszającą się głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wraz ze wzrostem udziału procentowego dodatku. Według niemieckiej normy DIN 1048-5:1991-06 beton określa się jako wodoszczelny, gdy maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem dla badanych próbek mierzona na przelomach jest mniejsza niż 30 mm dla betonów znajdujących się w środowisku silnie korozyjnym lub mniejsza niż 50 mm dla pozostałych betonów.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań betonów zwykłych i betonów zwykłych zawierających dodatek popiołów lotnych pochodzących z termicznego przekształcania osadów ściekowych wykazano pozytywny wpływ wykorzystanych popiołów na właściwości betonów. Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków szczegółowych:

1. Popioły lotne pochodzące ze spalania osadów ściekowych stosowane jako dodatek wpływają pozytywnie na właściwości techniczne betonu. W pewnym zakresie mogą być również stosowane, jako zamiennik cementu. W przyszłości może to przyczynić się do szerszego ich zastosowania w budownictwie oraz do zmniejszenia produkcji cementu, co prowadzi do zmniejszenia emisji CO₂.
2. Beton zawierający w swoim składzie popioły lotne z termicznego przekształcania osadów ściekowych charakteryzował się porównywalną wytrzymałością na ściskanie do betonu zawierającego popioły lotne krzemionkowe oraz większą od wytrzymałości betonów referencyjnego i zawierającego popioły lotne wapienne. Zawartość popiołów lotnych z komunalnych osadów ściekowych do 15% skutkowała wzrostem wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu referencyjnego. Zwiększenie udziału tego popiołu powyżej 15% spowodowało nieznaczny spadek wartości tego parametru, jednak wytrzymałość na ściskanie była nadal większa od wartości uzyskanej dla próby bez popiołu.
3. Beton z dodatkiem popiołu z termicznego przekształcania osadów ściekowych wpływa pozytywnie na wzrost wytrzymałości na zginanie natomiast negatywnie na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i wodoszczelność betonów.
4. Skład chemiczny popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych w porównaniu do popiołów krzemionkowych i wapiennych jest odmienny. Brak jest jednak przepisów dotyczących chemicznych i fizycznych właściwości popiołów uzyskanych ze spalania osadów ściekowych limitujących możliwość ich wykorzystania w technologii betonu.

Literatura

- Deja, J., Antosiak, B. (2012). Degree of progress of the fly ash reaction in alkali-activated fly-ash binders. *Cement Wapno Beton* 17(79), 67-76.
- Dz.U. 2016 poz. 108 – Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 21 stycznia 2016 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstającymi w wyniku tego procesu.
- EU/2010/75 – Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r., w sprawie emisji przemysłowych – IED, (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola).

- EU/2014/955 – Decyzja Komisji z dnia 18 grudnia 2014 r. zmieniająca decyzję 2000/532/WE w sprawie wykazu odpadów zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE
- Kępsy, W., Pomykała, R., Pietrzyk, J. (2013). Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 14(1), 11-18.
- Kosior-Kazberuk, M. (2011). Nowe dodatki mineralne do betonu. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2, 47-55.
- Kosior-Kazberuk, M., Karwowska, J. (2011). Wybrane problemy zagospodarowania popiołów pochodzących ze spalania osadów ściekowych w technologii materiałów cementowych. *Inżynieria Ekologiczna*, 25, 110-123.
- Lin, K. L., Lin, Ch.Y. (2005). Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. *Cement and Concrete Research*, 35, 1999-2007.
- Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., Franus, W. (2016). Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 554-562.
- Milik, J., Pasela, R., Szymczak, M., Chalamoński, M. (2016). Ocena składu fizyczno-chemicznego osadów ściekowych pochodzących z komunalnej oczyszczalni ścieków, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18, 579-590.
- Monzó, J., Paya, J., Borrachero, M.V., Girbes, I. (2003). Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars. *Waste Management*, 23(4), 373-381.
- Ochrona Środowiska (2017). Informacje i Opracowania Statystyczne. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa.
- Pietrzak, A. (2014). Proekologiczne technologie w budownictwie na przykładzie „zielonego betonu”. *Budownictwo z zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. 1(13). 86-93.
- PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- PN-EN 12390-5:2011 Badanie betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
- PN-EN 12390-6:2011 Badanie betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do betonu.
- PN-EN 12390-8:2011 Badanie betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- PN-EN 12350-2:2011: Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- PN-EN 12350-6:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość
- PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe

- PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Część 1: Wymagania. właściwości. produkcja i zgodność
- PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje. specyfikacje i kryteria zgodności.
- PN-88/B-06250: Beton Zwykły.
- Rutkowska, G., Wichowski, P., Świgoń, K., Sobieski, P. (2017). Badanie właściwości betonów z dodatkiem popiołów lotnych pochodzących z termicznej obróbki osadów ściekowych. *Cement Wapno Beton*, 2, 113-119.
- Rutkowska, G., Wiśniewski, K., Chalecki, M., Górecka, M., Miłosek, M. (2016). Influence of fly-ashes on properties of ordinary concretes. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation* 48(1), 79-94.
- Szarek, Ł., Wojtkowska, M. (2018). Properties of fly ash from thermal treatment of municipal sewage sludge in terms of EN 450-1. *Archives of Environmental Protection*, 44(1), 63-69.
- Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022.
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012r. o odpadach (Dz.U. Nr 62 poz. 628 z późn. zm.)
- Wichowski, P., Rutkowska, G., Nowak, P. (2017). Wymywanie wybranych metali ciężkich z betonów zawierających popiół z termicznego przekształcania osadów ściekowych. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 16(1), 43-51.
- Yadav, S., Agnihotri, S., Gupta, S., Tripathi, R. K. (2014). Incorporation of STP Sludge and Fly ash in Brick Manufacturing: An attempt to save the Environment. *International Journal of Advancements in Research & Technology*. 3(5), 138-144.
- Yusur, R. O., Noor, Z. Z., Din, M. D. F. M. D., Abba, A. H. (2012). Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete-a review. *International Journal of Global Environmental Issues*. 12(2). 214-228.

Research on the Possibility of Using Fly Ashes from Combustion of Municipal Sewage Sludge on Properties of Ordinary Concretes

Abstract

Application of fly ash from combustion of municipal sewage sludge (FAMSS) in the concrete technology implements assumptions concerning the waste management adopted by the European Union. The study concerned the influence of partial replacement of the Portland cement by the ash on strength parameters of concrete in comparison to the reference concrete and concretes

containing conventional admixtures (siliceous and calcareous fly ashes). The article presents the results of investigations on selected properties (consistency, water absorption, compressive strength and tensile strength after 28 and 56 days of curing, penetration depth) of ordinary concretes and concretes containing fly ash (calcareous and siliceous ash) from combustion of municipal sewage sludge. To make up the samples, the Portland cement CEM I 32,5 R and natural aggregate with grading of 0-16 mm were used. The concrete with siliceous and siliceous admixture was made in five lots to which the ash was added in the quantity of 5%, 10% 15%, 20% and 30% of the cement weight. The investigations have shown that the concretes containing fly ash from combustion of municipal sewage sludge have better strength parameters.

Streszczenie

Wykorzystanie popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych w technologii betonu realizuje założenia gospodarki odpadami proponowane w Unii Europejskiej. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu częściowego zastąpienia tym materiałem cementu portlandzkiego na parametry wytrzymałościowe betonów w porównaniu do betonu referencyjnego oraz do betonów zawierających w swoim składzie konwencjonalne dodatki (krzemionkowe i wapienne popioły lotne). W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości (konsystencji, wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie po 28 i 56 dniach dojrzewania, głębokości penetracji wody pod ciśnieniem) betonów zwykłych i betonów zawierających popioły lotne w ich składzie. Do wykonania próbek użyto cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R i kruszywa naturalnego o uziarnieniu 0-16 mm. Beton z dodatkami został wykonany w pięciu partiach, w których popiół został dodany w ilości 5%, 10%, 15%, 20%, 30% masy cementu. Badania wykazały, poprawę parametrów wytrzymałościowych betonów zawierające popioły lotne z termicznego przekształcania osadów ściekowych.

Słowa kluczowe:

dodatki do betonu, popiół lotny, wytrzymałość betonów

Keywords:

concrete additives, fly ashes, strength of concretes