

## WPŁYW POPIOŁU Z TERMICZNEGO PRZEKSZTAŁCANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH JAKO ZAMIENNIKA CZĘŚCI CEMENTU NA PARAMETRY BETONU ZWYKŁEGO

Gabriela Rutkowska✉, Karol Siekut

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa

### 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. W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości (konsystencji, wytrzymałości na ściskanie po 28, 56 i 90 dniach dojrzewania, mrozoodporność) betonów zwykłych i betonów zawierających popioły lotne w ich składzie. Do wykonania próbek użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5 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 i 15% masy cementu. Badania wykazały poprawę parametrów wytrzymałościowych betonów zawierających popioły lotne z termicznego przekształcania osadów ściekowych.

**Słowa kluczowe:** beton, popiół lotny, właściwości betonu

### WSTĘP

Produkcja cementu należy do procesów uciążliwych dla środowiska naturalnego, emitującym duże ilości gazów cieplarnianych, ze względu na wysokotemperaturowy (1450°C) proces wypalania klinkieru cementowego oraz emisję CO<sub>2</sub> będącą wynikiem dekarbonizacji surowca. Według danych GUS produkcja cementu na świecie w 2000 roku wyniosła ponad 1,67 mld t. W wyniku tej produkcji przemysł cementowy wyemitował do atmosfery 1,4 mld t gazów cieplarnianych (w przeliczeniu na CO<sub>2</sub>), co stanowi 3% globalnej emisji gazów cieplarnianych i około 5% emisji CO<sub>2</sub> powstałej w wyniku działalności człowieka.

W 2014 roku produkcja cementu wzrosła i wyniosła 4,18 mld t, co stanowi 5% światowej emisji antro-

pogenicznej i jak wskazują kolejne dane, wciąż wzrasta. Polska w 2014 roku wyprodukowała 15,4 mln t cementu. Spowodowało to emisję około 11,59 mln t CO<sub>2</sub>. Według danych Stowarzyszenia Producentów Cementu w 2017 roku zużycie cementu w Polsce wyniosło około 17 mln t i było większe o 7–8% niż w 2016 roku. Największy udział w produkcji miał cement: Górażdże 21,9%, Lafarge Cement 18,6% oraz Grupa Ożarów 18,4% (International Energy Agency, 2008).

Bezpośrednim źródłem emisji CO<sub>2</sub> w przemyśle cementowym jest proces kalcynacji surowca (ok. 62%) oraz spalanie paliw (ok. 38%), a pośrednim są środki transportu, produkcja energii elektrycznej, wydobywanie surowców mineralnych i paliw pierwotnych. Duża emisja CO<sub>2</sub> przez przemysł cementowy

✉gabriela\_rutkowska@sggw.pl

spowodowała wypracowanie strategii ograniczenia tej emisji poprzez: udoskonalenie procesów produkcyjnych, modernizację urządzeń, zastępowanie paliw pierwotnych paliwami alternatywnymi z odpadów, optymalizację składu cementu, odzyskiwanie energii cieplnej z procesów produkcyjnych (Deja, Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki, 2010; Chromá, Rovnaniková, Teplý, Bergmeister i Strauss, 2014). Jednak działania te mogą zredukować emisje jedynie do określonej wartości granicznej.

Ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> wprowadzone przez Unię Europejską (Kępyś, Pomykała i Pietrzyk, 2013) zachęcają do badań nad innowacyjnymi materiałami zawierającymi mniejsze ilości klinkieru. W technologii cementu, a przede wszystkim w technologii betonu, w Polsce i Europie szerokie zastosowanie mają popioły lotne krzemionkowe i wapienne pochodzące ze spalania węgla kamiennego i brunatnego (Giergiczny, 2013). Użycie ich w składzie betonu wpływa na oszczędność paliw kopalnych, naturalnych surowców oraz ograniczenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego i emisji CO<sub>2</sub> (Deja i Antosiak, 2012; Yadav, Agnihotri, Gupta i Tripathi, 2014; Wichowski, Rutkowska i Nowak, 2017). O szerokim wykorzystaniu popiołu decydują głównie: skład chemiczny i fazowy, miałość zbliżona do cementu oraz aktywność pucolanowa. Jednocześnie popiół ma korzystny wpływ na niektóre cechy betonu (Lai i Serra, 1997; Kim i Kim, 2002; Gupta, 2007).

W ostatnich latach prowadzonych jest wiele badań mających na celu określenie możliwości wykorzystania w technologii betonu popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych (Lynn, Dhir, Ghataora i West, 2015; Chen, Li i Poon, 2018; Rutkowska, Wichowski, Fronczyk, Franus i Chalecki, 2018). Powstające w oczyszczalniach osady ściekowe są odpadami, których unieszkodliwienie i zagospodarowanie jest poważnym zagadnieniem ekologicznym. Jedną z możliwości zagospodarowania powstających popiołów jest ich wykorzystanie do produkcji materiałów konstrukcyjnych, jakim jest beton zwykły (Rutkowska, Wichowski i Borowiecka, 2016), zwiększając tym samym recykling odpadów (Chen i in., 2018). Zgodnie z obowiązującym w Polsce rozporządzeniem Ministra Rozwoju z 2016 roku regulującym kwestie termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów

postępowania z odpadami z tego procesu (Dz.U. 2016, poz.108), które w zakresie swej regulacji wdraża dyrektywę 2010/75/UE, 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. Jak dotąd nie opracowano wytycznych i norm odnośnie wykorzystania popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych jako surowca mineralnego do produkcji betonu.

Głównym celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości wykorzystania popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych jako zamiennika części cementu do produkcji betonu. Wykonano analizę porównawczą właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu na bazie cementów z dodatkiem popiołu lotnego z osadów ściekowych.

## MATERIAŁ I METODYKA

### Material

Popiół lotny według PN-EN 450-1:2012 to drobno uziarniony pył, składający się z kulistych, zeszkliwionych ziaren, otrzymywany przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przede wszystkim SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, przy czym zawartość reaktywnego SiO<sub>2</sub> określona w PN-EN 197-1:2012 wynosi co najmniej 25% masy. Popiół lotny to sztuczna pucolana, składnik krzemianowy lub glinokrzemianowy, które w obecności wody w temperaturze pokojowej wchodzi w reakcję z wodorotlenkiem wapniowym Ca(OH)<sub>2</sub>, tworząc mieszanekę o właściwościach wiążących hydraulicznych (C-S-H) o mniejszym stosunku molowym CaO/SiO<sub>2</sub> w C-S-H w porównaniu z cementem portlandzkim (ACI 116R-00).

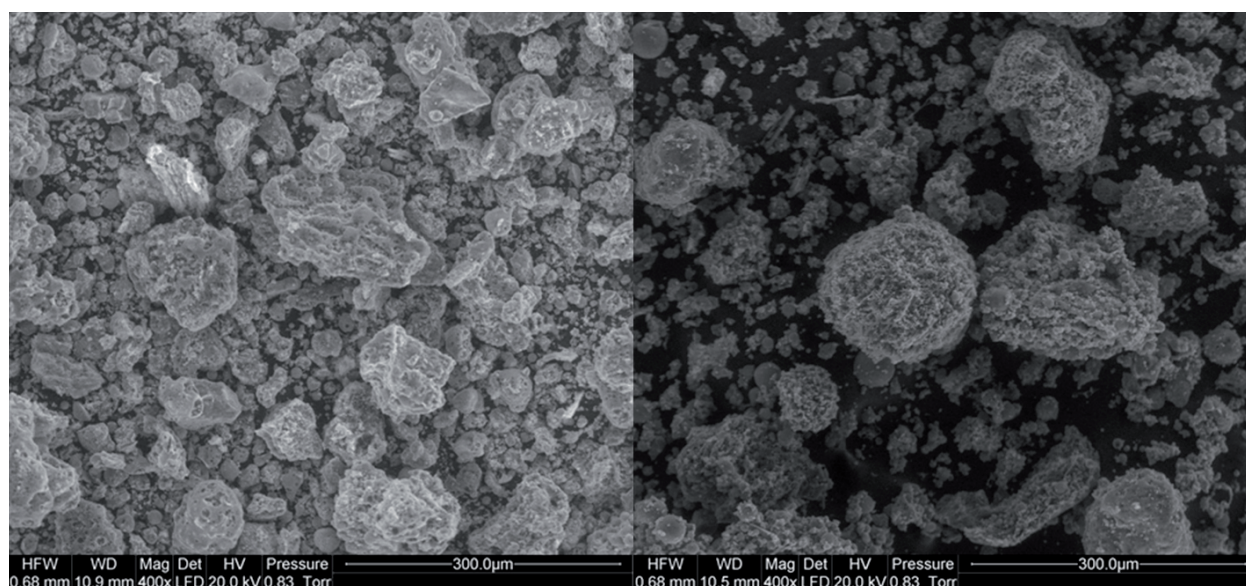
Do badań wykorzystano popiół lotny z termicznego przekształcania osadów ściekowych z Oczyszczalni Ścieków „Czajka” w Warszawie. Zgodnie ze wspomnianym rozporządzeniem Ministra Rozwoju z 2016 roku powstające popioły ze spalania osadów ściekowych po spełnieniu określonych wymogów mogą być wykorzystane do sporządzania mieszanek betonowych

na potrzeby budownictwa, z wyłączeniem budynków przeznaczonych do stałego przebywania ludzi lub zwierząt oraz do produkcji lub magazynowania żywności.

Na podstawie analizy chemicznej popiołów z osadów ściekowych zaobserwowano mniejszą sumę zawartości tlenku glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 18,9%), tlenku żelaza ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 7,8%) oraz dwutlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$  – 25,5%) w stosunku do popiołów konwencjonalnych wykorzystywanych obecnie w technologii betonu i produkcji cementu. Ilość ta nie spełnia wymagań PN-EN 450-1:2012. Norma ta dotyczy jednak popiołów lotnych krzemionkowych powstających podczas spalania lub współspalania węgla kamiennego z odpadami. Zawartość pozostałych składników wynosiła: CaO – 15,4%; MgO – 2,33%;  $\text{SO}_3$  – 2,97%;  $\text{K}_2\text{O}$  – 1,40%;  $\text{TiO}_2$  – 0,90% oraz chlorków – 0,04%. Dodatkowo w popiołach niekonwencjonalnych zaobserwowano większą zawartość fosforanów (19,6%) oraz mniejszą stratę prażenia (0,5) niż w popiołach konwencjonalnych. Przypuszcza się, że powolne narastanie wytrzymałości na ściskanie może być spowodowane obecnością jonów fosforanowych, które opóźniają proces hydratacji cementu (Małolepszy i Tkaczewska, 2006). Badany popiół lotny charakteryzuje się obecnością nieregularnych ziaren o rozwiniętej powierzchni, świadczącej o dużej porowatości dodatku. Rysunek 1 przedstawia mikrofotografie ze skaningowego mikroskopu elektronowego popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych.

### Metodyka

Procedury projektowe oraz badawcze opracowano według 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 Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Badania popiołów lotnych przeprowadzono w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Skład chemiczny określono metodą energodispersyjnej fluorescencji rentgenowskiej na spektrometrze Epsilon 3 firmy Panalytical. Próbkę betonową do badań zaprojektowano jako beton zwykły zgodnie z PN-EN-206+A1:2016-12. W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano mieszanki betonowe klasy C25/30 o konsystencji K4 – półcieklej. We wszystkich próbkach zachowano stały skład



**Rys. 1.** Obraz SEM popiołu z termicznego przekształcania osadów ściekowych

**Fig. 1.** Fly ash from sewage sludge combustion SEM images

granulometryczny kruszywa drobnego dobranego metodą analizy sitowej oraz kruszywa grubego dobranego metodą kolejnych przybliżeń – iteracji (tab. 1). Skład mieszanki zaprojektowano, wykorzystując metodę trzech równań według Bukowskiego (Jamroży, 2009). Do przygotowania próbek betonowych wykorzystano kruszywo normalne o uziarnieniu 0,125–16 mm, cement portlandzki CEM I 42,5 R oraz dodatek. Jako dodatek mineralny do mieszanki betonowej zastosowano popiół lotny pochodzący z fluidalnego spalania komunalnych osadów ściekowych w oczyszczalni ścieków „Czajka” w Warszawie. W celu porównania właściwości betonów zwykłych wytwarzanych w tradycyjny sposób oraz betonów zawierających w swoim składzie popiół lotny z termicznego przekształcania

komunalnych osadów ściekowych przygotowano cztery rodzaje próbek betonów:

- beton bez żadnych dodatków – BZ,
- beton z dodatkiem 5% popiołu lotnego – P I,
- beton z dodatkiem 10% popiołu lotnego – P II,
- beton z dodatkiem 15% popiołu lotnego – P III.

Dla przyjętych założeń projektowania mieszanki betonowej betonu zwykłego z użyciem metody trzech równań ustalono recepturę mieszanki betonowej na 1 m<sup>3</sup> (tab. 2).

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 wy-

**Tabela 1.** Zawartość procentowa kruszywa dobranego metodą iteracji

**Table 1.** Percentage contain of the aggregates selected by iterations

Frakcja Fraction	Procentowy stosunek zmieszania frakcji (piasku i żwiru) Fraction mixing percentage ratio (for sand and gravel)			Skład ziarnowy Grain composition of	
	I etap – I stage	II etap – II stage	III etap – III stage	piasku sand	żwiru gravel
0–0,125				0,93	0,35
0,0125–0,25				17,82	6,77
0,025–0,5	–	–	38	39,62	15,06
0,5–1				34,32	13,04
1–2				7,31	2,78
2–4		32			19,84
4–8	45		62	–	18,97
8–16	55	68			23,19

**Tabela 2.** Proporcje mieszanki betonowej według wagi

**Table 2.** Concrete mix proportions by weight

Wyszczególnienie – Specification	Składniki mieszanki betonowej Mass of concrete ingredients [kg·m <sup>-3</sup> ]			
	woda water	kruszywo aggregate	cement	popiół lotny fly ash
Beton bez dodatków – Concrete without admixtures	222,12	1649,35	482,00	–
Beton z dodatkiem 5% popiołu – Concrete admixed with 5% of fly ash	222,12	1649,35	457,90	24,10
Beton z dodatkiem 10% popiołu – Concrete admixed with 10% of fly ash	222,12	1649,35	433,80	48,20
Beton z dodatkiem 15% popiołu – Concrete admixed with 15% of fly ash	222,12	1649,35	409,70	72,30



trzymałości na ściskanie użyto próbek o wymiarach  $100 \times 100 \times 100$  mm. Badania przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w PN-EN 12390-3:2011 w maszynie wytrzymałościowej hydraulicznej H011 Matest. Próbki poddano badaniom po upływie 28, 56 i 90 dni pielęgnacji betonu. Badanie gęstości przeprowadzono zgodnie z PN-EN 12390-7:2011, a mrozoodporność zgodnie z PN-88/B-06265:2004 w maszynie ToRoPoL. Próbki badano po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. W analizie statystycznej wyników badań parametry statystyczne: odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności wyznaczono dla sześciu próbek. Dla lepszego przedstawienia wyników określono również rozrzut wyników. Zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 i procedurą ISO, przystosowaną do materiałów budowlanych dla oceny niepewności rozszerzonej (całkowitej), wykorzystano metodę sklerometryczną nieskalowaną (Brunarski i Dohojda, 2016). Wartość współczynnika rozszerzenia  $p = 0,75$  przyjęto na poziomie rekomendowanym przez Brunarskiego (2008) oraz na  $p = 0,95$ .

## WYNIKI I DYSKUSJA

### Mieszanka betonowa

Na podstawie przeprowadzonych badań konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka dla próbki BZ uzyskano konsystencję półciekłą, a dla próbki PIII konsystencję gęstoplastyczną. W marę zwiększania ilości popiołu opad mieszanki był coraz mniejszy i wynosił dla: BZ – 160 mm, PI – 100 mm, PII – 75 mm oraz PIII – 60 mm. Większe zawartości powietrza zanotowano w mieszankach BZ (3,3 i PII (3,9%), a mniejsze dla próbek PI (2,7%) i PIII (3,1%). 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 ( $2000\text{--}2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) gęstość mieszanki betonowej mieściła się w granicach od 2341 do  $2377 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Częściowe zastąpienie cementu popiołem lotnym ze spalania osadów ściekowych powoduje zmniejszenie urabialności mieszanki betonowej i nie zagraża bezpieczeństwu środowiska

**Tabela 3.** Wyniki wytrzymałości na ściskanie dla betonu z popiołem z termicznego przekształcania osadów ściekowych

**Table 3.** The results of the compressive strength of concrete with fly ash from combustion of municipal sewage

Rodzaj betonu Concrete type	Wiek [dni] Age [days]	$f_{c,m}$ [MPa]	$f_{c,min}$ [MPa]	$f_{c,max}$ [MPa]	$SD$ [MPa]	$V$ [-]	$Up_{0,75}$ [MPa]	$Up_{0,95}$ [MPa]
BZ	28	41,65	40,54	42,08	1,00	0,024	1,04	2,03
	56	47,65	45,23	49,11	2,86	0,060	2,33	4,53
	90	49,42	48,10	51,12	1,52	0,031	1,44	2,80
PI	28	42,12	40,97	43,24	0,82	0,019	0,95	1,86
	56	49,21	47,76	50,12	1,07	0,022	1,17	2,28
	90	50,62	48,90	52,02	1,64	0,032	1,52	2,96
PII	28	43,61	42,26	44,75	1,02	0,023	1,08	2,10
	56	49,56	47,26	50,73	2,51	0,051	2,09	4,08
	90	51,46	49,74	51,82	1,33	0,026	1,34	2,61
PIII	28	42,59	41,56	42,93	1,42	0,033	1,31	2,54
	56	50,01	47,52	51,52	3,00	0,060	2,44	4,76
	90	51,94	50,46	52,25	1,10	0,021	1,22	2,38

BZ – beton zwykły referencyjny – ordinary concrete, PI – beton z dodatkiem 5% popiołu – concrete with addition of 5% ashes, PII – beton z dodatkiem 10% popiołu – concrete with addition of 10% ashes, PIII – beton z dodatkiem 15% popiołu – concrete with addition of 15% ashes,  $f_{c,m}$  – średnia wytrzymałość na ściskanie – average compressive strength,  $f_{c,min}$  – minimalna wytrzymałość na ściskanie – minimum compressive strength,  $f_{c,max}$  – maksymalna wytrzymałość na ściskanie – maximum compressive strength,  $SD$  – odchylenie standardowe – standard deviation,  $V$  – współczynnik zmienności – variability coefficient,  $Up$  – niepewność rozszerzona całkowita dla poziomu ufności  $p = 0,75$  i  $p = 0,95$  – expanded total uncertainty for confidence level  $p = 0.75$  and  $p = 0.95$ .

naturalnego (Monzo, Payá, Borrachero i Girbés, 2003). Związane jest to z dużą wodożądnością cząstek oraz nieregularną budową samych ziaren popiołu. Ponadto analiza procesu hydratacji popiołu z osadu wykazała, że zastępując popiołem 20% masy mineralnych składników wykorzystywanych do produkcji cementu, można uzyskać spoiwo spełniające wymagania stawiane cementom powszechnego użytku.

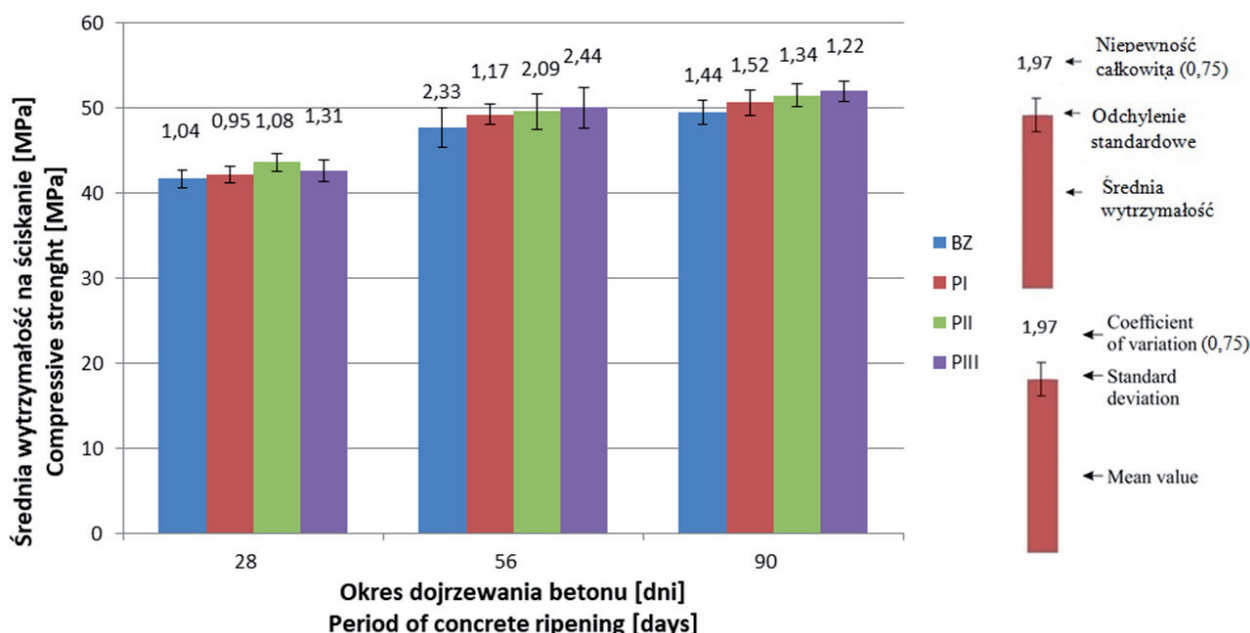
### Stwardniały beton – wytrzymałość na ściskanie

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie dla różnych okresów dojrzewania. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dodatek popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych w ilości do 15% masy cementu wpływa pozytywnie na parametry wytrzymałościowe betonów wytworzonych z jego udziałem.

Po 28 dniach dojrzewania największa wytrzymałość na ściskanie (43,61 MPa) uzyskał beton PII, a najmniejszą (41,65 MPa) beton BZ. Po 56 dniach parametry wytrzymałościowe kształtowały się w przedziale od 47,65 MPa (beton bez dodatku) do 50,01 MPa

(beton z ilością 15% dodatku w postaci popiołu z osadów). Po trzecim okresie dojrzewania najmniejszą wytrzymałość na ściskanie (49,42 MPa) uzyskał beton referencyjny, a największą (51,94 MPa) beton PIII.

Po 28 daniach dojrzewania najmniejsze odchylenie standardowe (0,82 MPa) odnotowano dla betonu PI, a największe (1,42 MPa) dla betonu PIII, po 56 dniach beton PIII uzyskał największe odchylenie standardowe (3,0 MPa), a beton PI najmniejsze 1,07 MPa), z kolei po 90 dniach wyniki były odwrotne – najmniejsze odchylenie zaobserwowano dla PIII (1,10 MPa), a największe dla PI (1,64 MPa). Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, przy rekomendowanym poziomie ufności 0,75, dla betonu z dodatkiem popiołu mieściła się w przedziale od 0,95 MPa (PI) do 1,31 MPa (PIII), po 56 dniach w przedziale od 1,17 MPa (PI) do 2,44 M Pa (PIII), z kolei po 90 dniach w przedziale od 1,22 MPa (PIII) do 1,52 MPa (PI). Dla betonów z popiołem z osadów ściekowych uzyskano małe wartości wskaźników zmienności (1,9–6,0%), świadczące o jednorodności badanych próbek betonu (rys. 2).



**Rys. 2.** Średnia wytrzymałość na ściskanie betonów z zaznaczonym odchyleniem standardowym oraz niepewnością całkowitą  $Up$  0,75

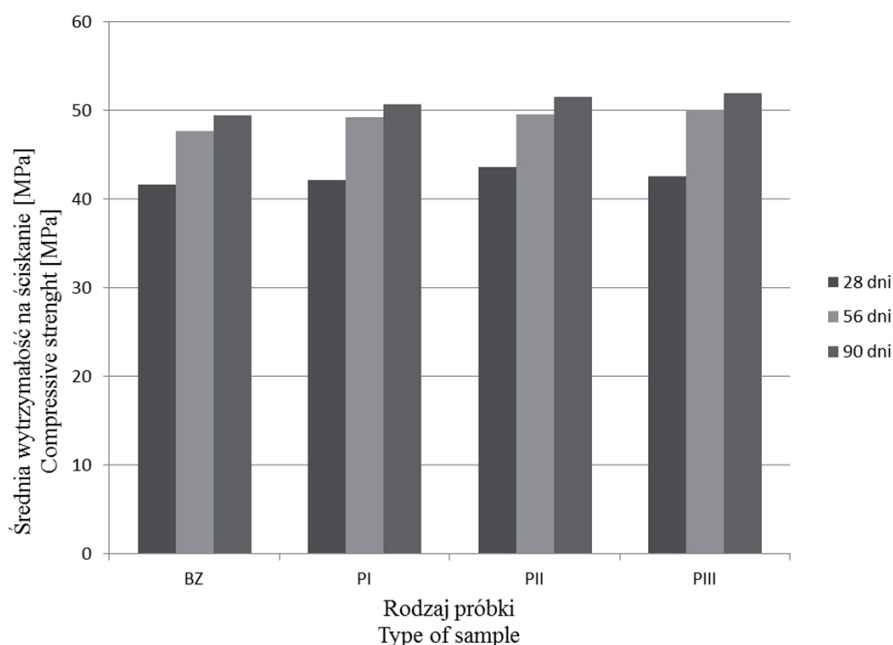
**Fig. 2.** Average compressive strength for concretes; standard deviation and total uncertainty  $Up$  0.75 are marked

Po 28 dniach dojrzewania beton BZ miał już 84% końcowej wytrzymałości na ściskanie, podobnie w betonach modyfikowanych popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych wytrzymałość to stanowiła 81–84% wytrzymałości końcowej. Największy przyrost wytrzymałości w przedziale między 28. a 56. dniem dojrzewania zaobserwowano dla betonu PIII (15%), a najmniejszy (12%) dla betonu referencyjnego oraz betonu PII. W przedziale między 56. a 90. dniem pielęgnacji betony charakteryzowały się nieznacznym przyrostem wynoszącym: dla BZ – 4%, dla PI – 3% oraz po 4% dla PII i PIII (rys. 3). Na rysunku 4 przedstawiono beton z popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych w ilości 10%.

Dodatek popiołów lotnych do betonu spowodował spadek gęstości betonu wraz z większą zawartością popiołu lotnego. Gęstość betonu wahała się od 2387 do 2412 kg·m<sup>-3</sup>, tak jak dla betonów zwykłych (2000–2600 kg·m<sup>-3</sup>).

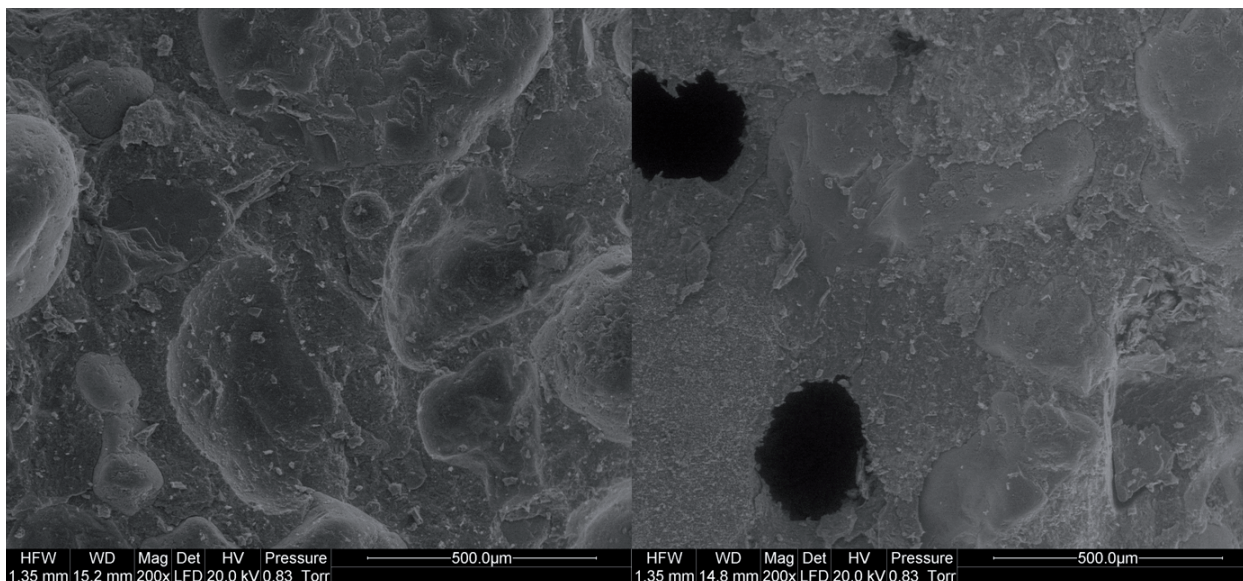
Beton modyfikowany popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych do 10% wpływa pozytywnie na mrozoodporność betonów wytworzonych na jego bazie. Największą wytrzymałość na ściskanie po 150 cyklach zamrażania uzyskał beton PII (42,08 MPa), a najmniejszą beton PIII (38,12 MPa). Betony porównawcze charakteryzowały się wytrzymałością od 47,70 MPa (BZ) do 50,00 MPa (PIII) – tabela 4. Średni spadek wytrzymałości zawierał się w granicach 11,97–15,09%, a średni ubytek masy w przedziale 0,50–0,60%. Badane betony są betonami mrozoodpornymi. Beton z zawartością 15% dodatku, którego średni spadek wytrzymałości przekracza 20%, jest nieodpornym na działanie mrozu.

Niepewność całkowita świadków obliczona dla  $p = 0,75$  była na poziomie 1,36–1,73 MPa, próbek na mrożeniu na poziomie 1,60–2,32 MPa (tab. 5). Określony współczynnik zmienności świadczy o jednorodności próbek, ponieważ jego wartość dla próbek po 150 cyklach zamrażania wynosi 4–8%, a dla próbek



**Rys. 3.** Zmiany w czasie wytrzymałości na ściskanie dla betonu z popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych

**Fig. 3.** Time changes of compressive strength of concrete with addition of ashes from thermal treatment of wastewater sediments



**Rys. 4.** Mikrostruktura betonu z popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych w ilości 10%

**Fig. 4.** Microstructure of concrete with 10% addition of ashes from thermal treatment of wastewater sediments

**Tabela 4.** Zestawienie średniego spadku wytrzymałości próbek poddanych mrożeniu oraz średniego ubytku masy próbek

**Table 4.** List of average decrease of strength of samples subjected to freezing and average decrease of mass of the samples

Próbka Sample	Średnia wytrzymałość na ściskanie Average compressive strength [MPa]		Średni spadek wytrzymałości próbek poddanych mrożeniu Average strength decrease of frozen samples [%]	Średnia masa Average mass [g]		Średni ubytek masy Average loss in mass [%]
	świadka of reference sample	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles		przed mrożeniem before freezing	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles	
BZ	47,70	41,99	11,97	2400	2388	0,50
PI	49,21	41,12	16,44	2349	2332	0,72
PII	49,56	42,08	15,09	2349	2335	0,60
PIII	50,00	38,12	23,76	2371	2344	1,13



**Tabela 5.** Zestawienie odchylenia standardowego i niepewności całkowitej dla próbek poddanych mrożeniu i próbek przed mrożeniem

**Table 5.** List of standard deviation and total uncertainty for samples subjected to freezing and samples before freezing

Próbka Sample	SD		CV		Niepewność całkowita $Up\ 0,75$ Total uncertainty $Up\ 0.75$		Niepewność całkowita $Up\ 0,95$ Total uncertainty $Up\ 0.95$	
	świadka of reference sample	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles	świadka of reference sample	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles	świadka of reference sample	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles	świadka of reference sample	po 150 cyklach mrożenia after 150 freeze-thaw cycles
BZ	1,43	1,87	0,03	0,04	1,36	1,60	2,65	3,11
PI	1,70	1,89	0,03	0,05	1,54	1,60	3,01	3,12
PII	1,41	2,32	0,03	0,06	1,37	1,91	2,67	3,71
PIII	1,98	2,93	0,04	0,08	1,73	2,32	3,37	4,52

świadków 3–4%. Największe odchylenie standardowe świadków uzyskano dla betonu PIII, najmniejsze dla betonu PII, a po 150 cyklach zamrażania najmniejsze odchylenie uzyskał beton BZ, największe PII – tabela 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  $CO_2$ .

2. Beton zawierający w swoim składzie popioły lotne z termicznego przekształcania osadów ściekowych charakteryzował się porównywalną wytrzymałością na ściskanie do betonu referencyjnego. Zawartość popiołów lotnych z komunalnych osadów ściekowych do 15% skutkowała wzrostem wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu referencyjnego.

3. Beton zawierający do 10% popiół z komunalnych osadów ściekowych uzyskał lepsze parametry wytrzymałościowe po 150 cyklach zamrażania i odmrażania. Betony te można zakwalifikować do betonów mrozoodpornych.

4. Skład chemiczny popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych w porównaniu do popiołów konwencjonalnych jest odmienny. Brak jest jednak przepisów dotyczących chemicznych i fizycznych właściwości popiołów uzyskanych ze spalania osadów ściekowych limitujących możliwość ich wykorzystania w technologii betonu.

## PIŚMIENICTWO

- ACI 116R-00. Cement and Concrete Terminology.
- Brunarski, L. (2008). *Wyznaczanie niepewności wyników badań wytrzymałościowych*. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej.
- Brunarski, L. i Dohojda, M. (2016). An approach to in-situ compressive strength of concrete. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 64 (4), 687–695.
- Chen, Z., Li, J. S. i Poon, C. S. (2018). Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1447–1459.
- Chromá, M., Rovnaniková, P., Teplý, B., Bergmeister, K. i Strauss, A. (2014). Concret durability and the k-value concept. *Cement – Wapno – Beton*, 2, 81–92.
- Deja, J. i Antosiak, B. (2012). Degree of progress of the fly ash reaction in alkali-activated fly-ash binders. *Cement – Wapno – Beton*, 17 (79), 67–76.
- Deja, J., Uliasz-Bocheńczyk, A. i Mokrzycki, E. (2010). CO<sub>2</sub> emissions from Polish cement industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 583–588.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola) (wersja przekształcona) (tekst mający znaczenie dla EOG) (2010/75/UE). Dz.U. EU L 334 z 17.12.2010.
- Giergiczny, Z. (2013). *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Gupta, S. M. (2007). Support vector machines based modeling of concrete strength. *International Journal of Intelligent Technology*, 3, 12–18.
- International Energy Agency [IEA]. (2008). *Greenhouse Gas R&D Programme (IEA GHG). CO<sub>2</sub> capture in the cement industry* (Technical Study, Report 2008/3).
- Jamróży, Z. (2009). *Beton i jego technologie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kępys, W., Pomykała, R. i Pietrzyk, J. (2013). Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 14 (1), 11–18.
- Kim, J. i Kim, D. K., (2002). Application of neural networks for estimation of concrete strength. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 6, 429–438.
- Lai, S. i Serra, M., (1997). Concrete strength prediction by means of neural network. *Construction and Building Materials*, 11, 93–98.
- Lynn, C. J., Dhir, R. K., Ghataora, G. S. i West, R. P. (2015). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 767–779.
- Małolepszy, J., Tkaczewska E. (2006): Wpływ popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na proces hydratacji i właściwości cementu. W *Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”*, Wisła (strony 591–601).
- Monzo, J., Payá, J., Borrachero, M. V. i Girbés, 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.
- PN-88/B-06265:2004. Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność (norma wycofana, zastąpiona PN-B-06265:2018-10. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12).
- PN-EN 12350-2:2011. Badanie mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- PN-EN 12350-6:2011. Badanie mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość.
- PN-EN 12350-7:2011. Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badania zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- PN-EN 12390-3:2011. Badanie betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- PN-EN 12390-7:2011. Badania betonu. Część 7: Gęstość betonu.
- PN-EN 197-1:2012. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- PN-EN 450-1:2012. Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02. Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- PN-EN-206+A1:2016-12. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 21 stycznia 2016 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu (Dz.U. 2016, poz. 108).
- Rutkowska, G., Wichowski, P. i Borowiecka A. (2016). Badanie wybranych właściwości betonów zwykłych z udziałem popiołów lotnych z termicznej przeróbki osadów ściekowych stosowanych w obiektach tury-

- stycznych. W B. Stankiewicz i B. Prochorowicz (red.), *Turystyka wodna jako produkt turystyczny regionu* (strony 103–110). Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego.
- Rutkowska, G., Wichowski, P., Fronczyk, J., Franus, M. i Chalecki, M. (2018). Use of fly ashes from municipal sewage sludge combustion in production of ash concretes. *Construction and Building Materials*, 188, 874–883.
- Wichowski, P., Rutkowska, G. i Nowak, P. (2017). Wymywanie wybranych metali ciężkich z betonów zawierających popiół z termicznego przekształcania osadów ściekowych. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 16 (1), 43–51.
- Yadav, S., Agnihotri, S., Gupta, S. i Tripathi, R. (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.

## **HOW ARE PARAMETERS OF AN ORDINARY CONCRETE AFFECTED BY ASHES GENERATED IN THERMAL TREATMENT OF WASTEWATER SEDIMENTS AND USED AS A SUBSTITUTE OF A PART OF THE CEMENT**

### **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. The article presents the results of investigations on selected properties (consistency, water absorption, compressive strength after 28, 56 and 90 days of curing) of ordinary concretes and concretes containing fly ash from combustion of municipal sewage sludge. To make up the samples, the Portland cement CEM I 42.5 R and natural aggregate with grading of 0–16 mm were used. The concrete with siliceous and siliceous admixture was made in three lots to which the ash was added in the quantity of 5, 10 and 15% of the cement weight. The investigations have shown that the concretes containing fly ash from combustion of municipal sewage sludge have better strength parameters.

**Key words:** concrete, fly ash, properties of concrete

