

dr inż. Elżbieta Haustein<sup>1)</sup>

# Możliwość wykorzystania popiołów z osadów ściekowych w betonie

## *Possibility of ashes utilization from sewage sludge in concrete*

DOI: 10.15199/33.2017.10.04

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania popiołów lotnych z osadów ściekowych w betonie. Wykonano dwie serie badawcze o dwóch współczynnikach w/s 0,49 oraz 0,55 z udziałem 10 i 20% popiołu lotnego z osadów ściekowych (SSA), jako zamiennika cementu. Skład chemiczny wykazał, że SSA zawiera głównie  $P_2O_5$ , CaO oraz  $SiO_2$  i  $Al_2O_3$ . Stężenie wymienionych związków ma zasadniczy wpływ na właściwości betonu. Wzrost udziału popiołu lotnego prowadzi do zmniejszenia jego wytrzymałości mechanicznej. Wytrzymałość na ścislenie betonu zawierającego 20 oraz 10% popiołu z osadów (SSA) po 28 dniach dojrzewania wynosi od 32,4 do 36,5 MPa w przypadku w/s = 0,49 oraz od 25,8 do 29,7 MPa przy w/s = 0,55. Zawartość wybranych metali ciężkich w betonie z udziałem popiołu lotnego (SSA) nie stwarza zagrożenia ekologicznego. Uzyskane wyniki badań nie wykluczają możliwości wykorzystania popiołu z osadów ściekowych w materiałach budowlanych.

**Słowa kluczowe:** popiół z osadów ściekowych (SSA); metale ciężkie; beton; wytrzymałość na ścislenie.

**Abstract.** The paper presents an assessment of the possible applications of fly ash from sewage sludge (SSA) in concrete. The article presents the results of research concerning the replacement of cement (10 and 20%) of ash from sewage sludge (SSA) in concrete. The made two series of test for the two ratios water/binder (w/b) equal to 0,49 and 0,55 with the participation 10% and 20% fly ash of sludge (SSA), as a replacement for cement. The chemical composition shows that the sewage sludge ash (SSA) is mainly composed of CaO,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$  and  $Al_2O_3$ . The concentrations of these compounds have an effect on the properties of the concrete. The increase of fly ash leads to reduction of its mechanical strength. Concrete with 10% and 20% ash of sludge (SSA) has a compressive strength after 28 days up 32,4 to 36,5 MPa (for the w/b = 0,49), and up 25,8 to 29,7 MPa (for the w/b = 0,55). The contents of selected heavy metals in concrete with the participation of fly ash is not hazardous for environment. The study results show the possibility of the use of sewage sludge ash in building of materials.

**Keywords:** sewage sludge ash (SSA); heavy metals; concrete; compressive strength.

Zaostrzone wymagania prawne dotyczące jakości odprowadzanych ścieków powodują zwiększenie ilości osadów ściekowych w środowisku. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z 2015 r. [19] od 2016 r. obowiązuje zakaz składowania odpadów m.in. o cieple spalania powyżej 6 MJ/kg s.m. Większość osadów ściekowych wykazuje ciepło spalania powyżej tej wartości. W Polsce zagospodarowanie osadów ściekowych sprowadza się do ich składowania, wykorzystania w rolnictwie, do rekultywacji terenów zdegradowanych, do kompostowania oraz do produkcji biogazu czy unieszkodliwiania termicznego. Ze względu na wartość opałową osady ściekowe pełnią również rolę paliwa alternatywnego przy wypalaniu klinkieru.

Dane GUS [11] potwierdzają zwiększenie ilości osadów ściekowych przekształcanych metodami termicznymi: 2013 r. – 148,8 tys. Mg; 2014 r. – 164,4 tys. Mg oraz 2015 – 165,4 tys. Mg s.m. Termiczna utylizacja pozwala zredukować 70% masy oraz 90% objętości osadów. Podobnie jak w przypadku spalania paliw konwencjonal-

nych powstają produkty uboczne – popioły lotne. Ich kwalifikacja zależy od składu chemicznego spalanych osadów. Zgodnie z Katalogiem odpadów [20] popioły lotne należą do kategorii: niebezpieczne (kod 19 01 13) lub inne niż niebezpieczne (kod 19 01 14).

Możliwość potencjalnego wykorzystania popiołów lotnych stwarza budownictwo. Zgodnie z PN-EN 206:2014 [12], materiały odpadowe mogą pełnić rolę zamiennika części spoiwa mineralnego lub stanowić jego wypełniacz. Popiół lotny można stosować do wytwarzania betonu, jeżeli spełni wymagania PN-EN 450-1:2012 [14]. Rozporządzenie [18] dopuszcza wykorzystanie pozostałości po spalaniu odpadów w mieszankach betonowych na potrzeby budownictwa, z wyłączeniem budynków przeznaczonych do stałego przebywania ludzi lub zwierząt, w tym do produkcji lub magazynowania żywności z zastrzeżeniem, że całkowity stopień wycięcia metali ciężkich w wyciągach wodnych z próbek mieszanek betonowych nie może przekroczyć 10 mg/dm<sup>3</sup> w przeliczeniu na masę analizowanych pierwiastków. Szereg badań [23] wskazuje, że popiół lotny (ang. sewage sludge ash – SSA) powstały z termicznego spalania osadów ściekowych może pełnić rolę:

- aktywnego dodatku do betonu lub zapraw [1, 5];
- surowca do produkcji cementu lub kruszywa lekkiego [2, 9];
- wypełniacza w mieszankach bitumicznych oraz stanowić częściowy substytut gliny do produkcji cegieł lub substytut piasku i/lub cementu przy stabilizacji miękkich torowisk [3, 22].

Ze względu na dużą zawartość żelaza (III) może też pełnić funkcję barwnika w produkcji ceramiki budowlanej, np. cegieł, płytek ceramicznych itp. [4]. Celem badań jest określenie wpływu popiołu lotnego powstałego z termicznego przekształcania osadów ściekowych (SSA) na wytrzymałość betonu. Zebrane dane, w tym charakterystyka jego składu, stanowią wstępną ocenę przydatności badanego popiołu do produkcji materiałów budowlanych.

### Materiały i rodzaj badań

Przedmiotem badań jest popiół lotny (SSA) – kod 19 01 14 – powstały z termicznego spalania komunalnych osadów ściekowych w oczyszczalni „Dębogórze” (woj. pomorskie). Proces spalania osadów poprzedzony jest suszeniem w obrotowej suszarce bębnowej pary przegrzanej. Po wy-

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; haustein@pg.gda.pl

sucheniu osady są spalane w piecu ze złożem fluidalnym, w temperaturze 850 ÷ 900°C przy podciśnieniu ok. 100 Pa. Powstały popiół po odprowadzeniu z pieca wraz ze spalinami jest pakowany w worki typu big-bag i składowany na zabezpieczonym składowisku na terenie oczyszczalni (powierzchnia > 25000 m<sup>2</sup>).

Skład chemiczny popiołu (SSA), w tym straty prażenia określono zgodnie z normą PN-EN 196-2:2013-11 [7]. Skład granulometryczny wyznaczono za pomocą analizatora Mastersizer 2000 (Malvern Instruments) z przystawką dyspergującą Hydro 2000 MU, a ogólną zawartość wybranych metali ciężkich (Zn, Cu, Ni, Pb, Cr, Cd) z wykorzystaniem spektrofotometru absorpcji atomowej Vario 6 (Analytik Jena AG). Badania zrealizowano zgodnie z procedurą zawartą w PN-ISO 8288:2002 [13].

Aktywność pucolanową popiołu (SSA), definiowaną jako stosunek procentowy wytrzymałości na ściskanie zaprawy normowej, wykonanej z użyciem mieszaniny 75% mas. cementu porównawczego i 25% mas. popiołu, do wytrzymałości na ściskanie zaprawy zawierającej 100% cementu porównawczego, określono wg PN-EN 450-1:2009 [14]. Cement porównawczy stanowił cement portlandzki CEM I 42,5 R zgodny z PN-EN 197-1:2012 [15].

Wpływ popiołu z osadów ściekowych na rozwój wytrzymałości betonu po 28 i 90 dniach jego dojrzewania zbadano wg PN-EN 12390-3:2011 [16]. Mikrostrukturę betonu, w tym skład chemiczny (EDS) w wyznaczonym mikroobszarze określono za pomocą mikroskopu skaningowego typu Jeol JSM-J800F.

Popiół z osadów ściekowych (SSA) pełnił rolę dodatku aktywnego, zastępując 10 i 20% masy cementu CEM I 42,5 R w betonie. Jego zawartość w mieszance betonowej obliczono zgodnie z wymaganiami normy [12]. W badaniach zastosowano mieszanek kruszyw pochodzenia naturalnego: piasek oraz żwir o frakcjach 0/2 mm oraz 2/8 i 8/16 mm. Początkowa zawartość cementu CEM I 42,5 R w betonie wynosiła 376 kg/m<sup>3</sup>. Wykonano dwie serie badawcze o dwóch współczynnikach w/s różnych 0,49 oraz 0,55.

W przeprowadzonych badaniach nie zastosowano domieszek chemicznych. Główny nacisk położono na wytrzymałość betonu o zróżnicowanym udziale popiołu lotnego z osadów ściekowych. Badania zrealizowano w Katedrze Wytrzymałości Materiałów, na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

### Analiza wyników badań

Skład chemiczny popiołu powstałego z osadów ściekowych (SSA) o kodzie 19 01 14, w przeliczeniu na formy tlenkowe, przedstawiono w tabeli 1. Uzyskane dane porównano z wartościami dopuszczalnymi [14] dla popiołów lotnych wykorzystywanych do betonu, natomiast całkowitą zawartość wybranych metali ciężkich w popiele (tabela 2) z dopuszczalnymi stężeniami metali ciężkich [17], jakie mogą występować w gruntach. Rozkład wielkości cząstek zawartych w badanym materiale przedstawiono na rysunku 1, a w tabeli 3 wskaźnik aktywności pucolanowej popiołu lotnego (SSA) uzyskany po 28 i 90 dojrzewania.

Tabela 1. Skład chemiczny popiołu lotnego o kodzie 19 01 14

Table 1. The chemical composition of the fly ash by codes 19 01 14

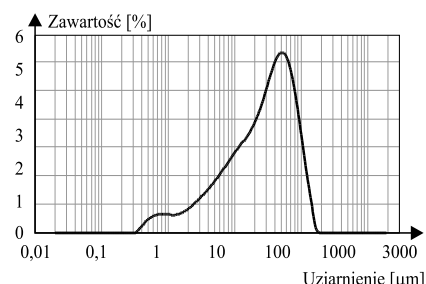
Rodzaj tlenku	Zawartość [% suchej masy]	Dopuszczalne wartości graniczne wg [17]
SiO <sub>2</sub> reaktywny	24,6	≤ 25% masy
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5	sumaryczna zawartość tlenków: SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≥ 70 % mas.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,6	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25,0	zawartość rozpuszczalnych fosforanów (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) ≤ 100 mg/kg (≤ 0,01%)
SO <sub>3</sub>	2,3	≤ 3 % masy
CaO reaktywny	20,5	≤ 10 % masy
CaO wolny	0,5	≤ 2,5 % masy <sup>1)</sup>
MgO	4,8	≤ 4 % masy
K <sub>2</sub> O	1,5	zawartość alkaliów Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> (Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O) ≤ 5,0% masy
Na <sub>2</sub> O	0,6	
Straty prażenia	2,4	kategorie: A: ≤ 5%; B: 2–7%; C: 4–9% masy

<sup>1)</sup> popiół lotny, w którym zawartość wolnego CaO jest większa niż 1,0 % masy, lecz nie większa niż 2,5 %, może być akceptowany pod warunkiem zachowania stałości objętości (próba Le Chatelliera) ≤ 10 mm

Tabela 2. Ogólna zawartość wybranych metali ciężkich (mg/kg s. masy) w popiele lotnym (SSA)

Table 2. The general contents of selected heavy metals (mg/kg dry weight) of the fly ash (SSA)

Rodzaj metalu	Popiół lotny (SSA) – kod 19 01 14	Dopuszczalna graniczna zawartość metali ciężkich w ziemi na głębokości 0-0,25 m ppt wg [17]			
		grupa I	grupa II	grupa III	grupa IV
zawartość suchej masy [mg/kg]					
Kadm (Cd)	5,8	2	2 ÷ 5	10	15
Miedź (Cu)	892	200	100 ÷ 300	300	600
Nikiel (Ni)	59	150	100 ÷ 300	300	500
Ołów (Pb)	93	200	100 ÷ 500	500	600
Cynk (Zn)	3971	500	300 ÷ 1000	1000	2000
Chrom (Cr)	56	200	150 ÷ 500	500	1000



Rys 1. Graficzny rozkład uziarnienia popiołu lotnego SSA [% w ogólnej masie]  
Fig. 1. The particle size distribution of fly ash SSA [% by weight]

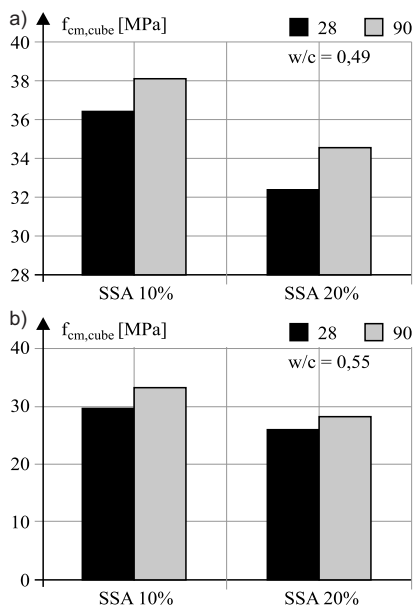
Tabela 3. Aktywność pucolanowa popiołu lotnego (SSA) po 28 i 90 dniach dojrzewania  
Table 3. Pozzolanic activity of fly ash (SSA) after 28 and 90 days

Parametr	Czas dojrzewania [dni]	
	28	90
Wytrzymałość na ściskanie zapraw [MPa] z udziałem:		
– 100% CEM I 42,5 R (cement porównawczy)	53,8	57,2
– 75% CEM I 42,5 R + 25% popiół lotny (SSA)	22,9	27,9
Wskaźnik aktywności pucolanowej [%]:		
– obliczony [%]	42,6	48,8
– wg PN-EN 450-1:2012 [14]	75,0	85,0

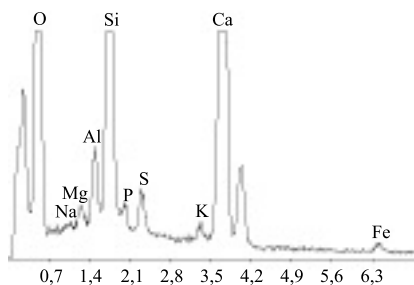
Średnią zmianę wytrzymałości ( $f_{cm, cube}$ ) betonu z udziałem 10% i 20% popiołu (SSA) w funkcji czasu jego dojrzewania (28 i 90 dni) w zależności od stosunku wodno-spoiwowego (w/s) przedstawiono na rysunku 2, a analizę składu pierwiastkowego (EDS) w wyznaczonym mikroobszarze betonu zawierającego 10% popiołu z osadów (SSA) po 28 dniach jego dojrzewania na rysunku 3.

Średnią zawartość metali ciężkich w betonie z udziałem 10% popiołu z osadów (SSA) w zależności od stosunku wodno-spoiwowego (w/s) po 28 dniach jego dojrzewania przedstawiono w tabeli 4. Uzyskane wyniki porównano z przykładowym stężeniem metali ciężkich w cementach, bez i z udziałem popularnych dodatków mineralnych w postaci odpadów przemysłowych pochodzących ze spalania węgla [8].

Skład chemiczny popiołów pochodzących z spalania fluidalnego osadów ściekowych jest pochodną składu chemicznego ścieków doprowadzanych do danej oczyszczalni. W zależności od jakości osadów ściekowych oraz od parametrów ich spalania, popioły lotne powstałe z przekształcania termicznego mogą wykazywać zróżnicowany skład chemiczny oraz właściwości fizyczne. Uzyskane wyniki badań (tabe-



**Rys. 2. Rozwój wytrzymałości betonu z udziałem 10 oraz 20% popiołu lotnego (SSA) w zależności od w/s = 0,49 (a) oraz 0,55 (b), po 28 i 90 dniach dojrzewania**  
 Fig. 2. The development of strength of concrete with 10 and 20% fly ash (SSA) of depending on ratio of water to binder w/b = 0,49 (a) and 0,55 (b) after 28 and 90 days



**Rys. 3. Skład pierwiastkowy EDS betonu zawierającego 10% popiołu (SSA) po 28 dniach jego dojrzewania, w/s = 0,55**  
 Fig. 3. Elemental composition in concrete (EDS) with 10% fly ash (SSA) after 28 days, for w/b = 0,55

la 1) wskazują, że popiół lotny (SSA) z oczyszczalni „Dębogórze” zawiera niewielki udział (24,6% ogólnej masy) reaktywnej krzemionki. Biorąc pod uwagę ilość tlenków SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suma ich stężenia jest poniżej limitu (≥ 70% s. m.) ustalonego dla popiołów lotnych w normie [14]. W przypadku wykorzystywania popiołu (SSA), ze względu na niewielki udział reaktywnej krzemionki oraz i/lub tlenku glinu, należy się liczyć z małą aktywnością popiołu w strukturze betonu.

Popiół z osadów (SSA) zawiera ponadnormatywnie stężenie tlenków fosforu, wapnia i magnezu. Szczególny udział fosforu (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) na tle pozostałych składników jest wynikiem jego wytrącania w trakcie

oczyszczania ścieków. Wykorzystanie popiołu z dużą zawartością fosforu podczas hydratacji cementu wiąże się z ryzykiem powstawania trudno rozpuszczalnego fosforanu wapnia Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> w betonie. Związek ten wykazuje tendencje do krystalizacji w porach spoiwa mineralnego. Jego obecność w betonie może mieć wpływ na szybkość formowania się głównych faz cementu i tym samym decydować o jego właściwościach użytkowych [10].

**Tabela 4. Zawartość wybranych metali ciężkich w betonie z udziałem 10% popiołu z osadów (SSA) po 28 dniach dojrzewania, w/s = 0,49 oraz 0,55**

Table 4. The contents of selected heavy metals in concrete with 10% fly ash (SSA) after 28 days, for w/b = 0,49 and 0,55

Rodzaj metalu	Zawartość metali ciężkich [mg/kg suchej masy]				
	beton z udziałem 10% popiołu (SSA)		CEM I 52,5 R	cement portlandzki z udziałem	
	w/s = 0,49	w/s = 0,55		30% żużla	28% popiołu
Cd	0,87	0,97	5	6	7
Cu	16,49	46,36	21	74	30
Ni	10,41	13,52	6	3,5	23
Pb	12,34	14,54	44	44	57
Zn	79,26	179,83	151	251	220
Cr	34,90	54,12	32	30	56

W elektrolicie o złożonym składzie, jakim jest faza ciekła w betonie, zarówno jony sodu, potasu, jak i wapnia biorą bezpośredni udział w reakcji z krzemionką. Dyfuzja jonów krzemianowych do roztworu zależy od stężenia jonu Ca<sup>2+</sup> w bezpośrednim jego otoczeniu. Widoczna nadmierna ilość reaktywnego tlenku wapnia (20,5% w ogólnej masie badanego popiołu (SSA)) jest efektem stosowania wapna palonego przy higienizacji osadów ściekowych. Głównym produktem procesu hydratacji układu cement-popiół lotny-woda są uwodnione krzemiany wapnia (faza C-S-H). Tempo ich powstawania jest uzależnione od rozpuszczalności związków wyjściowych (CaO i SiO<sub>2</sub>), w tym od ich wzajemnego stosunku molowego. Wykorzystanie popiołu (SSA) z nadmierną ilością wapnia stwarza ryzyko powstawania ograniczonej ilości drobnokrystalicznej sieci produktów hydratacji w strukturze betonu i tym samym może mieć wpływ na jego właściwości użytkowe.

Popiół z osadów ściekowych (SSA) charakteryzuje się ponadnormatywnym stężeniem miedzi (Cu) oraz cynku (Zn) w porównaniu z pozostałymi analizowanymi metalami ciężkimi (tabela 2). Stężenie pierwiastków śladowych zależy od ilości

i jakości ścieków doprowadzanych do danej oczyszczalni. Rozporządzenie [17], ze względu na przekroczenie dopuszczalnej granicy przewidzianej dla obu wymienionych metali ciężkich, wyklucza możliwość zagospodarowania przyrodniczego badanego popiołu (SSA) niezależnie od grupy czy podgrupy danego gruntu. O przydatności popiołu lotnego w cementach i betonie – obok składu chemicznego – decydują również jego właściwości fizyczne. Istotną rolę w oddziaływaniu na rozwój wytrzymałości na ścislenie betonu – wśród wymagań zawartych w normie [14] – odgrywa kategoria popiołu, która zależy od strat prażenia oraz od stopnia jego miakkości. Popiół lotny (SSA), biorąc pod uwagę jego straty prażenia (2,4%) oraz pozostałość na sicie o wymiarach 0,045 mm (28,2%), spełnia wymagania kategorii A (≤ 5% s.m.) oraz kategorii N (≤ 40% s.m.), co przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 1. Badany popiół charakteryzuje się drobnym uziarnieniem o przewadze cząstek pyłowych < 0,063 mm. Ich udział procentowy wynosi 25,5% w ogólnej masie. Cząstki o rozmiarach 0,063 ÷ 0,125 mm oraz 0,125 ÷ 0,250 mm stanowią 26,1% oraz 20,2% całkowitej masy frakcji generalnych. Zróżnicowanie składu ziarnowego nie ma większego znaczenia, jeśli popiół zostanie zmielony wspólnie z klinkierem i gipsem, dając cement. Ma jednak wpływ w przypadku jego wykorzystania, jako niezależnego dodatku mineralnego do betonu. Popiół o drobnym uziarnieniu zawiera większy udział fazy bezpostaciowej (szklistej) bogatej w krzem, w stosunku do popiołu o grubszym uziarnieniu. Drobniejsze cząsteczki popiołu szybciej rozpuszczają się i reagują w płynnej fazie produktów hydratacji. Popiół zawierający frakcje o dużej średnicy ziaren ma wpływ na tempo reakcji pucolanowej w środowisku cementu. Rozpuszczanie ziaren o małym stopniu rozdrobnienia w spoiwie cementowym jest wydłużone w czasie, powodując powolne narastanie wytrzymałości betonu.

Zachowanie popiołu lotnego w cementach i betonie jest uzależnione od jego aktywności pucolanowej, tj. zdolności wiązania w obecności wody z utworzeniem związków o właściwościach hydraulicznych. Uzyskany wskaźnik aktywności pucolanowej popiołu (SSA) po 28 i 90 dniach kształtuje się na poziomie ok. 43 oraz 49%. Uzyskane wartości są zdecydowanie mniejsze od wymagania normowego [14] dotyczącego popiołów wykorzystywanych do betonu (tabela 3). Na aktywność pucolanową po-



popiołu (SSA) w środowisku cementu ma wpływ temperatura spalania osadów ściekowych. Badania [21] wskazują, że spalanie osadów ściekowych w temperaturze wyższej niż 800°C prowadzi do krystalizacji bezpostaciowej krzemionki, zmniejsza aktywność pucolanową, a także zdolność adsorpcyjną powstałego popiołu.

Analiza wyników badań (rysunek 2) pokazuje, że popiół (SSA) jako zamiennik cementu ma nieznaczny wpływ na rozwój wytrzymałości betonu w miarę upływu czasu dojrzewania. Jego udział w ilości 10 oraz 20% zwiększa wytrzymałość po 90 dniach średnio o 10,4% i 6,8% (dla  $w/s = 0,49$ ) oraz 11,8% i 8,5% (dla  $w/s = 0,55$ ) w porównaniu z wytrzymałością, jaką uzyskuje beton po 28 dniach dojrzewania. W przypadku zawartości 20 i 10% popiołu (SSA) uzyskano, po okresie normowym (28 dni), klasę betonu od C20/25 do C25/30 przy  $w/s = 0,49$  oraz od C16/20 do C20/25 przy  $w/s = 0,55$ .

Analiza składu pierwiastkowego (EDS) w wyznaczonym mikroobszarze (rysunek 3) zawierającego 10% popiołu (SSA) po 28 dniach dojrzewania przy  $w/s = 0,55$  potwierdza wyraźną dominację takich pierwiastków, jak wapń (54,1%), krzem (29,2%), glin (5,0%) oraz fosfor (2,5%). Europejski system norm nie ogranicza stężenia metali ciężkich w cementach. Jedyny problem stanowi chrom ( $Cr^{6+}$ ). Dyrektywa UE 2003/53/EC [6] zaleca jego ograniczenie do poziomu niższego od 2 ppm w stosunku do suchej masy cementu.

Metale ciężkie mogą pojawiać się praktycznie we wszystkich materiałach stosowanych do produkcji betonu. Uzyskane wyniki dotyczące zawartości metali ciężkich w betonie, po wprowadzeniu zamiast cementu 10% popiołu z osadów (SSA) wykazują, niezależnie od stosunku wodno-spoiwowego ( $w/s$ ), że ich stężenie utrzymuje się na poziomie zbliżonym do wartości występujących w tradycyjnych dodatkach wykorzystywanych w materiałach budowlanych (tabela 4). Uzyskany efekt jest wynikiem trwałego wbudowania metali ciężkich w strukturę spoiwa. Stwardniały beton, dzięki obecności w spoiwie fazy C-S-H immobilizuje metale ciężkie i nie stwarza zagrożenia ekologicznego. Wzrost stosunku  $w/s$  powoduje zwiększenie stężenia wybranych metali ciężkich w strukturze betonu po 28 dniach jego dojrzewania, największe między cynku (odpowiednio o 64,4% oraz 55,9% w stosunku do zawartości obu pierwiastków przy  $w/s = 0,49$ ), a najmniejsze (o 1%) dla kadmu.

## Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki badań stanowią wstępne prace dotyczące wykorzystania popiołów lotnych (SSA) pozyskanych ze spalania termicznego osadów ściekowych w betonie. Ich skład chemiczny jest uzależniony od jakości spalanych osadów ściekowych, w tym warunków ich spalania. Przeprowadzone badania nie wykluczają możliwości wykorzystania popiołów (SSA) w materiałach budowlanych. Ich właściwości decydują o cechach użytkowych betonu.

Udział 10 oraz 20% popiołu z osadów (SSA) w roli zamiennika cementu w spoiwie:

- po upływie 28 dni dojrzewania pozwala uzyskać wytrzymałość na ściskanie betonu 36,5 ÷ 32,4 MPa (przy  $w/s = 0,49$ ) oraz 29,7 ÷ 25,8 MPa (przy  $w/s = 0,55$ ) wymaganą dla betonów konstrukcyjnych;

- spowalnia dynamikę narastania wytrzymałości betonu, ale nie ogranicza jego wytrzymałości końcowej;

- zawartość wybranych metali ciężkich w spoiwie utrzymuje się na poziomie zbliżonym do stężenia występującego w tradycyjnych dodatkach mineralnych wykorzystywanych w budownictwie; odnotowane stężenie nie powinno powodować niekorzystnych zmian właściwości użytkowych betonu.

Niezbędne są dalsze badania popiołów z osadów ściekowych ukierunkowane na określenie kompatybilności z innymi składnikami betonu. Istotnym problemem popiołów lotnych (SSA) w świetle potencjalnego wykorzystania w budownictwie są ich zróżnicowane właściwości, uzależnione od jakości osadów pozyskiwanych podczas oczyszczania ścieków dopływających do danej oczyszczalni. Warunkiem wykorzystania popiołów (SSA) w materiałach budowlanych jest wytwarzanie ich o zdefiniowanych i powtarzalnych właściwościach.

## Literatura

- [1] Baeza-Brotons Francisco, Pedro Garcés Terradillos, Jordi Payá Bernabeu, Oscar Galao Malo. 2015. „Valuation of sewage sludge ash as a component of precast concrete”. *Journal of the Latin-American Association of Quality Control, Pathology and Recovery of Construction* 5 (1): 41 – 52.
- [2] Baeza-Brotons Francisco, Pedro Garcés, Jordi Payá, José Miguel Saval. 2014. „Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks”. *Journal of Cleaner Production* 82: 112 – 124.
- [3] Chen Li, Lin Deng-Fong. 2009. „Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement”. *Journal of Hazardous Materials* 162 (1): 321 – 327.
- [4] Lynn Ciarán J., Ravindra K. Dhir, Gurmel S. Ghataora. 2016. „Sewage sludge ash characteristics and potential for use in bricks, tiles and glass ceramics”. *Water Science & Technology* 74 (1): 17 – 29.

- [5] Lynn Ciarán J., Ravindra K. Dhir, Gurmel S. Ghataora, Roger P. West. 2015. „Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete”. *Construction and Building Materials* 95: 767 – 779.

- [6] Dyrektywa nr 2003/53/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 18 czerwca 2003 r. zmieniająca po raz dwudziesty szósty Dyrektywę Rady 76/769/EWG odnoszącą się do ograniczeń we wprowadzeniu do obrotu i stosowaniu niektórych substancji i preparatów niebezpiecznych (nonylofenolu, etoksylovanego nonylofenolu i cementu).

- [7] PN-EN 196-2:2013-11. Metody badania cementu. Część 2: Analiza chemiczna cementu (wersja angielska).

- [8] *Beton przyjazny środowisku* (red. Kohutek Z.). 2008. Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego (SPBT) w Polsce. Kraków.

- [9] Kosior-Kazberuk Maria. 2010. „Application of SSA as partial replacement of aggregate in concrete”. *Polish Journal of Environmental Studies* 20 (2): 365-370.

- [10] Kurdowski Wiesław. 2010. *Chemia cementu i betonu*. PWN. Wydawnictwo Polski Cement. Kraków.

- [11] Ochrona Środowiska 2015. Warszawa. Główny Urząd Statystyczny.

- [12] PN-EN 206:2014. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

- [13] PN-ISO 8288:2002. Jakość wody. Oznaczenie kobaltu, niklu, miedzi, cynku, kadmu i ołowiu. Metody atomowej spektrometrii absorpcyjnej z atomizacją w płomieniu.

- [14] PN-EN 450-1:2012. Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.

- [15] PN-EN 197-1:2012. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku

- [16] PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

- [17] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia zanieczyszczeń powierzchni ziemi (Dz.U. nr 0, poz. 1395).

- [18] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z 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. nr 0, poz. 108).

- [19] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach (Dz.U. nr 0, poz. 1277).

- [20] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. nr 0, poz. 1923).

- [21] Tantawy Mohamed, Ahmed M. El-Roudi, Elham M. Abdalla, Mohamed A. Abdelzاهر. 2012. „Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash”. *ISRN Chemical Engineering*: 1 – 8.

- [22] Tenza-Abril Antonio José, José Miguel Saval, Artemio Cuenca. 2014. „Using sewage sludge ash as filler in bituminous mixes”. *Journal of Materials in Civil Engineering* 27 (4): 1 – 9.

- [23] Yusuf Rafiq Olasunkanmi, Zainura Zainon Noor, Moh'd Fadhil Moh'd Din, Ahmad Halilu Abba. 2012. „Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – a review”. *International Journal Global Environmental Issues* 12 (2/3/4): 214-228.

Przyjęto do druku: 28.08.2017 r.