

POPIÓŁ LOTNY Z TERMICZNEGO PRZEKSZTAŁCANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH JAKO DODATEK DO BETONÓW ZWYKŁYCH

Gabriela Rutkowska✉

Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

STRESZCZENIE

Beton to najczęściej wykorzystywany materiał konstrukcyjny, bez którego współczesne budownictwo nie mogłoby funkcjonować, to materiał o dużym potencjale dostosowania się do określonych warunków eksploatacyjnych. Wykorzystanie tego potencjału dokonuje się poprzez materiałową modyfikację. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu modyfikacji betonu popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych w ilości 5, 10, 15, 20 i 25% masy cementu na wybrane parametry betonu zwykłego klasy C20/25. W toku prac eksperymentalnych wykonano pomiary wytrzymałości na ściskanie po dwóch okresach dojrzewania. Zebrane wyniki badań umożliwiły opracowanie modelu materiałowego opisującego wpływ parametrów wejściowych betonu na wytrzymałość na ściskanie. Uzyskane wyniki badań potwierdzają możliwość wytwarzania betonu zwykłego modyfikowanego popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych. Średnią wytrzymałość na ściskanie dla betonu zawierającego 25% popiołu ustalono na 41,4 MPa i 44,0 MPa po 28 i 56 dniach dojrzewania.

Słowa kluczowe: beton, popiół lotny, właściwości betonu

WSTĘP

Beton to najbardziej uniwersalny materiał kompozytowy, najczęściej wykorzystywany w budownictwie. Swoją pozycję zawdzięcza takim zaletom jak duża trwałość i wytrzymałość, łatwość wytwarzania i wprowadzania do konstrukcji oraz niski koszt produkcji. Wzrost jego zużycia zarówno w kraju, jak i na świecie powoduje zwiększenie zapotrzebowania na surowce potrzebne do jego wytwarzania. Według szacunków rocznie zużywa się około 3,5 mld m³ tego materiału na całym świecie. Jednocześnie obawy związane z ochroną środowiska przyrodniczego i wzrost świadomości społecznej skłaniają przemysł betonowy do racjonalnego korzystania z zasobów naturalnych i zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych (Motz i Geiseler, 2001; Mroueh, Eskola i Laine-Ylijoki,

2001). Czynności te spełniają zasady zawarte w koncepcji zrównoważonego rozwoju, dla której istotne jest wykorzystanie naturalnych zasobów zgodnie z zasadą 4R, czyli *reduce, reuse, recover i recycle* (Bromberek, 2014).

Znanym, ale ciągle rozwijającym się kierunkiem badań w technologii betonu zwykłego jest wykorzystanie dodatku w postaci popiołów lotnych powstałych ze spalania osadów ściekowych (Lynn, Dhir, Ghataora i West, 2015; Chen i Poon, 2017; Chen, Li i Poon, 2018; Rutkowska, Wichowski, Fronczyk, Franus i Chalecki, 2018; Rutkowska, Wichowski, Franus, Mendryk i Fronczyk, 2020). Osady ściekowe to odpady o kodzie 19 01 14 (Decyzja Komisji 2014/955/UE), których zagospodarowanie, a tym samym unieszkodliwienie jest poważnym zagadnieniem ekologicznym. Obowiązujące w Polsce przepisy prawne wprowadzają

opracowany na podstawie decyzji Rady WE/2003/33 zakaz składowania odpadów o dużej kaloryczności przekraczającej $6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. (Rozporządzenie MG z 2015 r.). Według ustawy z 2012 r. o odpadach komunalnych osady ściekowe można wykorzystać, jeżeli są właściwie ustabilizowane. Dokonuje się tego odpowiednią obróbką biologiczną, chemiczną lub termiczną w celu zmniejszenia ich podatności na zagniwanie oraz eliminacji zagrożenia dla zdrowia ludzi i środowiska przyrodniczego (Kosior-Kazberuk, 2011; Środa, Kijo-Kleczkowska i Otwinowski, 2012).

W Wielkiej Brytanii, Szwajcarii, Austrii, Holandii czy Niemczech na początku XXI wieku spalanie stanowiło znaczną część zagospodarowania osadów ściekowych. W Holandii, Szwajcarii i Austrii spalanie przekraczało połowę całkowitej ilości wykorzystanych osadów, w USA 25%, a w Japonii 55% (Werther i Ogada, 1999). W Polsce w ostatnich latach zaobserwowano również wzrost ilości komunalnych osadów ściekowych przekształcanych termicznie (dane GUS: w 2000 r. – 34,1 tys. suchej masy, w 2005 r. – 37,4 tys. suchej masy, w 2010 r. – 66,4 tys. suchej masy, w 2015 r. – 165,4 tys. suchej masy). Pod koniec czerwca 2010 r. w kraju działały jedynie trzy spalarnie komunalnych osadów ściekowych o łącznej wydajności 37,3 tys. Mg s.m. rocznie, a w 2014 funkcjonowało już 11 monospalarni o łącznej mocy przerobowej 160,3 tys. Mg s.m. rocznie (Uchwała 88 RM z 2016 r.). W efekcie powstają znaczące ilości popiołów lotnych, które należy właściwie zagospodarować.

Zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami, które w zakresie swej regulacji wdrażają dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE, powstające popioły lotne ze spalania osadów ściekowych po spełnieniu określonych wymogów mogą być wykorzystane jako dodatek do przygotowania mieszank betonowych, z wyłączeniem obiektów przeznaczonych do stałego przebywania ludzi lub zwierząt oraz do produkcji lub magazynowania żywności (Rozporządzeniem MR z 2016 r.). Dotychczasowe badania wskazują, że zastosowanie do produkcji betonów 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, Barbosa, Toledo Filho i Goncalves, 2004; Yusur, Noor, Din i Abba, 2012; Rutkowska,

Wiśniewski, Chalecki, Górecka i Miłosek, 2016; Wichowski, Rutkowska i Nowak, 2017).

Wskazanie różnych sposobów zagospodarowania powstających w oczyszczalniach dużych ilości odpadów ma szczególne znaczenie w technologii materiałowej. Właściwości fizykochemiczne oraz pucolano-we popiołów ze spalania osadów ściekowych wskazują na możliwość ich stosowania do wytwarzania materiałów kompozytowych (Rutkowska i in., 2018; Rutkowska i in., 2020). Głównym celem badań była ocena możliwości wykorzystania jako dodatek do produkcji betonu zwykłego popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych. Wykonano analizę właściwości fizykochemicznych popiołów lotnych oraz ocenę porównawczą parametrów mieszanki betonowej i dojrzałego betonu.

MATERIAŁ I METODY

Mieszankę betonu zwykłego klasy C20/25 zaprojektowano według PN-EN 206+A1:2016-12 metodą obliczeniowo-doświadczalna, opierając się na metodzie trzech równań. Podstawowymi składnikami wchodzącymi w skład mieszanki betonowej są: cement portlandzki CEM I 32,5 R, kruszywo otoczkowe, popiół lotny oraz woda (tab. 1). Parametry fizyczne i skład fazowy cementu zgodnego z wymaganiami normy PN-EN 197-1:2012 przedstawiono w tabeli 2, a jego właściwości chemiczne w tabeli 3. Jako kruszywo zastosowano piasek frakcji 0–2 mm i żwir frakcji 2–16 mm. We wszystkich próbkach przyjęto taki sam skład kruszywa grubego dobranego metodą kolejnych przybliżeń – iteracji oraz skład granulometryczny kruszywa drobnego dobranego metodą analizy sitowej (tab. 4). Jako częściowy zamiennik cementu wykorzystano dodatek mineralny: popiół lotny z termicznego przekształcania osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków „Czajka” w Warszawie. W celu przeprowadzenia analizy porównawczej parametrów betonu zwykłego oraz betonów wykonanych na bazie popiołu lotnego przygotowano sześć rodzajów próbek betonów:

- beton referencyjny – BZ,
- beton z 5% zawartością popiołu lotnego – P5%,
- beton z 10% zawartością popiołu lotnego – P10%,
- beton z 15% zawartością popiołu lotnego – P15%,
- beton z 20% zawartością popiołu lotnego – P20%,
- beton z 25% zawartością popiołu lotnego – P25%.

Tabela 1. Proporcje mieszanki betonowej według wagi

Table 1. Concrete mix proportions by weight

Wyszczególnienie Specification	Składniki mieszanki betonowej – Mass of concrete ingredients [kg·m ⁻³]			
	woda water	kruszywo aggregate	cement	popiół lotny fly ash
Beton BZ Concrete BZ	189,78	1782,05	427,01	–
Beton z ilością 5% popiołu Concrete with quantity 5% of fly ash	189,78	1782,05	405,66	21,35
Beton z ilością 10% popiołu Concrete with quantity 10% of fly ash	189,78	1782,05	384,31	42,70
Beton z ilością 15% popiołu Concrete with quantity 15% of fly ash	189,78	1782,05	362,96	64,05
Beton z ilością 20% popiołu Concrete with quantity 20% of fly ash	189,78	1782,05	341,61	85,40
Beton z ilością 25% popiołu Concrete with quantity 25% of fly ash	189,78	1782,05	320,26	106,75

Tabela 2. Właściwości fizyczne i skład fazowy cementu CEM I 32,5 R (dane producenta)

Table 2. Physical properties and phase composition of cement CEM I 32,5 R (data from the manufacturer)

Powierzchnia właściwa wg Blaine'a Specific surface area acc. to Blaine [cm ² ·g ⁻¹]	Początek czasu wiązania Beginning of binding time [min]	Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach Compressive strength after 2 days [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach Compressive strength after 28 days [MPa]
3330	218	21,0	49,8
Udział faz mineralnych CEM I – Share of mineral phases CEM I [% mas.]			
C ₃ S – 61,8	C ₂ S – 12,3	C ₃ A – 7,5	C ₄ AF – 4,0

Tabela 3. Właściwości chemiczne cementu CEM I 32,5 R (dane producenta)

Table 3. Chemical properties of cement CEM I 32,5 R (data from the manufacturer)

Strata prażenia Roasting loss	Zawartość siarczanów Sulfate content SO ₃	Zawartość chlorków Chloride content	Zawartość alkaliów Alkali content Na ₂ O _{eq}	SiO ₂
		%		
3,18	3,20	0,05	0,71	20,20
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _w	MgO
4,34	2,37	65,21	1,74	1,52

Tabela 4. Zawartość i skład granulometryczny kruszywa
Table 4. Content and size distribution of the aggregates

Frakcja Fraction	Stosunek zmieszania frakcji (piasku i żwiru) Fraction mixing ratio (for sand and gravel) [%]			Skład ziarnowy Grain composition [%]	
	I etap I stage	II etap II stage	III etap III stage	piasku sand	żwiru gravel
0,0–0,125				1,47	0,55
0,0125–0,25				10,65	3,95
0,25–0,50	–	–	37	38,24	14,16
0,50–1,0				32,88	12,17
1,0–2,0				16,76	6,17
2,0–4,0		35			22,05
4,0–8,0	48		63	–	19,66
8,0–16,0	52	65			21,29

Skład chemiczny popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych określono metodą energodispersyjnej fluorescencji rentgenowskiej (XRF) na spektrometrze Epsilon 3 (Panalytical). Badanie wykonano w zakresie pomiarowym pierwiastków Na–Am na aparacie wyposażonym w lampę RTG Rh 9W, 50 kV, 1 mA, 4096 kanałowy analizator widma, sześć filtrów pomiarowych (Ag, Al-50, Al-200, Cu-500, Cu-300, Ti) oraz wysokorozdzielczy półprzewodnikowy detektor SDD chłodzony ogniwnem Peltiera.

Za pomocą mikroskopu skaningowego SEM Quanta 250 FEG z systemem analizy składu chemicznego opartego na dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS) określono morfologię i skład chemiczny w mikroobszarze składników badanego materiału. Badanie aktywności pucolanowej popiołów lotnych przeprowadzono według norm PN-EN 450-1:2012 i ASTM C379-65T oraz wytycznych zawartych w literaturze przedmiotu (Hubbard i Dhir, 1984).

Przeprowadzono badanie konsystencji mieszanek betonowych metodą stożka opadowego (PN-EN 12350-2:2011), gęstość pozorną metodą pomiaru masy i objętości (PN-EN 12350-6:2011) oraz zawartość powietrza metodą ciśnieniową (PN-EN 12350-7:2011). Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 12390-3:2011 na próbkach sześciennych

o wymiarach 100 × 100 × 100 mm. Wytrzymałość na ściskanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej hydraulicznej H011 Matest. W analizie statystycznej dla sześciu próbek wyznaczono parametry statystyczne: odchylenie standardowe, współczynnik zmienności oraz niepewność całkowitą dla rekomendowanego przedziału ufności na poziomie $p = 0,95$. Do oceny niepewności rozszerzonej (całkowitej) wykorzystano metodę sklerometryczną, nieskalowaną (Brunarski i Dohojda, 2016; PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02).

Na podstawie wyników badań i ich analizy statystycznej opracowano model materiałowy w postaci funkcji opisujących zależność między składem (zawartością składnika) a właściwościami kompozytu. Zmiennymi wejściowymi modelu są czynniki materiałowe, które określają skład betonu (Czarnecki i Łukowski, 1996). Zmienne wyjściowe stanowią wartości tych cech materiału, które decydują o jego przydatności. Jest to model statystyczno-eksperymentalny, wyznaczony w funkcji kwadratowej. Na podstawie współczynnika determinacji R^2 dokonano oceny dopasowania modelu do uzyskanych wyników. Model opracowano dla betonów z dodatkiem popiołów lotnych z termicznego przekształcania osadów ściekowych, dla których wytrzymałość na ściskanie badano dla dwóch okresów dojrzewania – po 28 i 56 dniach.

WYNIKI I DYSKUSJA

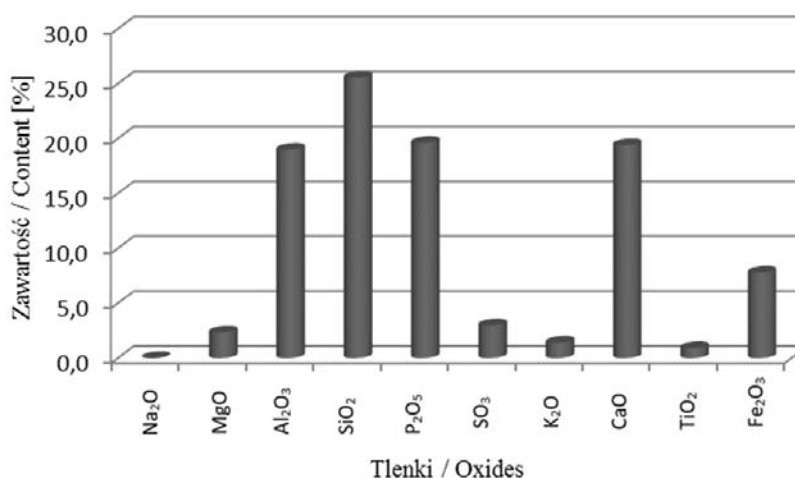
Właściwości popiołu lotnego

Wyniki składu chemicznego popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych przedstawiono na rysunku 1. Zaobserwowano, że największy udział procentowy miały tlenki krzemionki, glinu i wapnia. Sumy zawartości tlenku żelaza (Fe_2O_3 7,5%), dwutlenku krzemu (SiO_2 25,9%), tlenku glinu (Al_2O_3 19,6%) w popiołach lotnych z osadów ściekowych były równe 53% i nie spełniały wymagań zawartych w normie PN-EN 450-1:2012 (suma min. 65%). Norma ta dotyczy jednak popiołów lotnych krzemionkowych powstających ze spalania węgla lub współspalania węgla. Dodatkowo zaobserwowano, że popiół lotny z komunalnych osadów zawiera znacznie większe ilości fosforanów. Związane jest to z procesem usuwania fosforu ze ścieków i kumulowania go w osadzie ściekowym. Wyrażająca zawartość niespalonego węgla w danej próbce strata prażenia popiołu lotnego wyniosła 0,53%. Wynika to z technologii spalania komunalnych ścieków w 850°C w piecu fluidalnym. Przypuszcza się, że obecność jonów fosforowych oraz strata prażenia mogą wpływać na wytrzymałość betonów modyfikowanych popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych (Williams, 2005). Zróżnicowany skład chemiczny popiołów lotnych pozwala jednak na wytworzenie betonów popiołowych spełniających normatywne wymagania wytrzymałościowe.

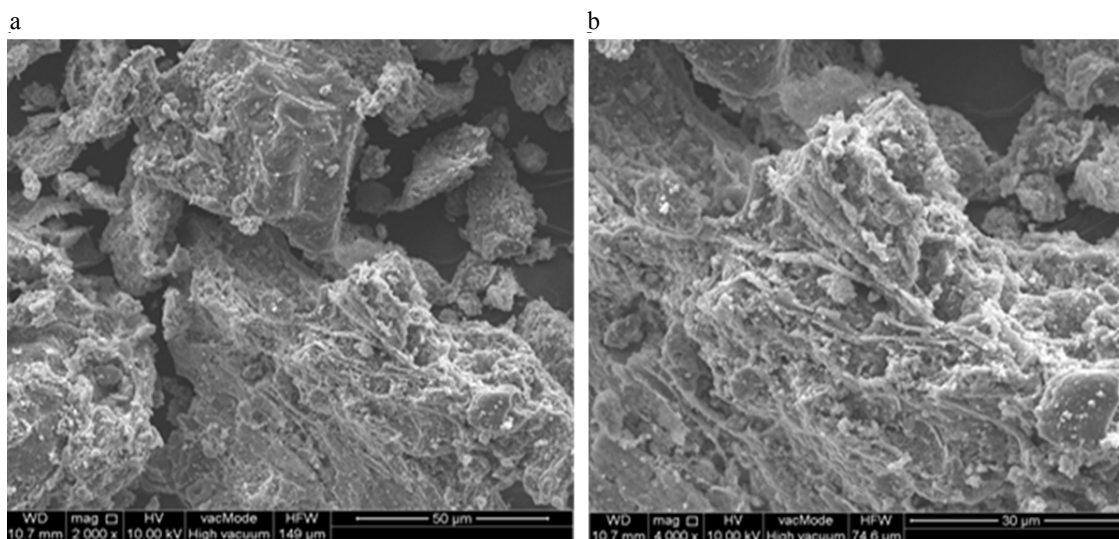
Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcia popiołu lotnego wykonanego z użyciem mikroskopu skaningowego SEM. W próbkach popiołu zaobserwowano nieregularne ziarna o zmiennej wielkości i chropowatej powierzchni. Może to wpływać na zwiększenie zapotrzebowania na wodę betonów wytworzonych z udziałem popiołów z osadów ściekowych (Lynn, Dhir, Ghataora i West, 2015). Na podstawie badania w mikroobszarze (SEM-EDS) analizy chemicznej zaobserwowano zróżnicowany skład pierwiastkowy. Dominowały ziarna zawierające w składzie chemicznym żelazo, glin, krzem, wapń i potas (rys. 3).

W składzie mineralnym popiołu lotnego z termicznego przekształcenia osadów ściekowych dominują anhydryt i kwarc, które są uzupełnione fosforanami w formie fluoroapatytu i apatytu. Gęstość ziaren określona według normy PN-EN 1097-7:2008 wyniosła $2530 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, miąższość określona według normy PN-EN 451-2:2017-06 wyniosła 50,3%.

Według normy ASTM C379-65T aktywność pucolanowa popiołów określona jest na podstawie zawartości w nich tlenku glinu i tlenku krzemu. Popiół lotny wykazuje charakter pucolanowy, gdy suma zawartości reaktywnego SiO_2 i Al_2O_3 wynosi powyżej 20% (Bastion, 1980; Tkaczewska, 2008). Aktywność pucolanowa ustalona na podstawie przeprowadzonych badań wyniosła 19,87%. Wskaźnik aktywności pucolanowej popiołów lotnych określany na podstawie normy PN-EN 450-1:2012 po 28 dniach dojrzewania

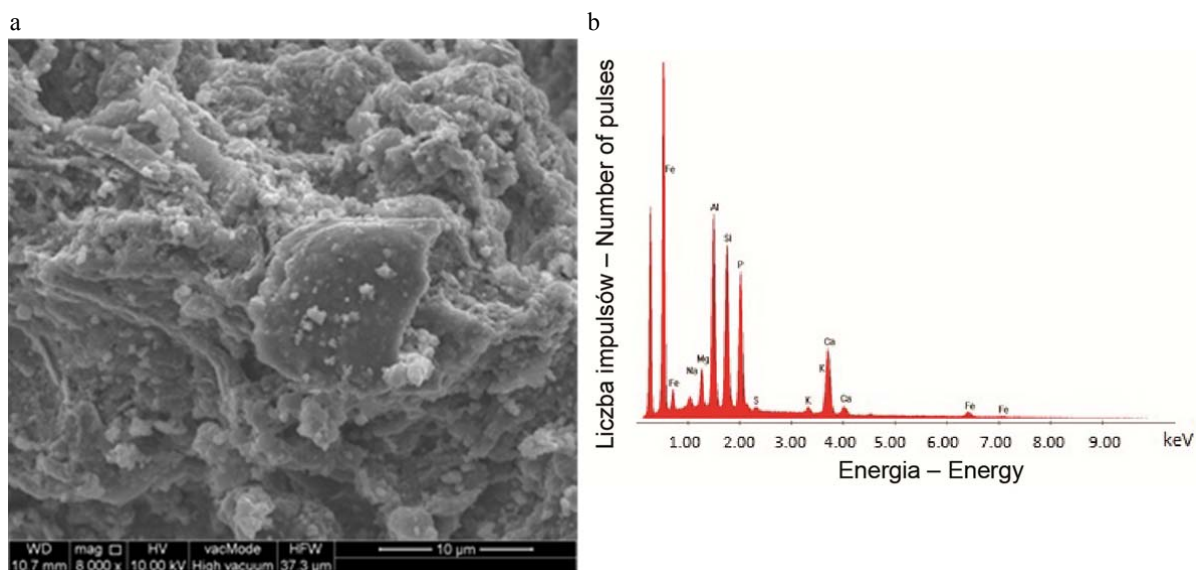


Rys. 1. Skład chemiczny popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych
Fig. 1. Chemical composition of fly ash from municipal sewage sludge combustion



Rys. 2. Zdjęcia SEM popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych: powiększenie (a) 2000, (b) 4000 razy

Fig. 2. SEM images of fly ash from municipal sewage sludge combustion: zoom (a) 2,000, (b) 4,000



Rys. 3. Zdjęcie SEM badanego popiołu lotnego (a) wraz z analizą EDS (b)

Fig. 3. SEM images of fly ash tested (a) along with EDS analysis (b)

powinien osiągnąć wartość $\geq 75\%$, a po 90 dniach wartość $\geq 85\%$. Wskaźnik aktywności badanych popiołów z osadów ściekowych po 28 dniach dojrzewania wyniósł 68,7%, a po 90 dniach 79,9%. Wskaźnik aktywności przekroczył wymagane wartości (85%) po 180 dniach dojrzewania. Na aktywność popiołów

lotnych znacznie wpływa również zawartość w ich składzie alkaliów. Zdaniem Hubbarda i Dhira (1984) o aktywności popiołów lotnych decyduje proporcja tlenku potasu i glinu (K_2O/Al_2O_3). Wprowadzony przez nich tzw. *pozzolanic potential desirable* dzieli w zależności od proporcji tlenków popioły lotne na

trzy klasy (klasa 1 – $K_2O/Al_2O_3 \cdot 10 \geq 1$, klasa 2 – $0,5 < K_2O/Al_2O_3 \cdot 10 < 1$, klasa 3 – $K_2O/Al_2O_3 \cdot 10 < 0,5$). Dla badanego popiołu uzyskano wskaźnik równy 0,73, który klasyfikuje popiół do średnio reaktywnego, klasy 2.

Właściwości fizyczne mieszanki betonowej

Na podstawie przeprowadzonych badań największą zawartość powietrza (2,8%) uzyskano w mieszance P25%, a najmniejszą w próbce BZ (1,7%). Zaobserwowano jednoczesny wzrost zawartości powierza i popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych. W przypadku betonu referencyjnego i próbek zawierających 5%, 10%, 15% popiołu lotnego uzyskano konsystencję gęstoplastyczną, a w pozostałych próbkach konsystencję wilgotną. Gęstość mieszanki betonowej wahała się w przedziale od 2321 do 2379 $kg \cdot m^{-3}$. Częściowa wymiana cementu na popiół lotny ze spalania

komunalnych osadów ściekowych zmniejsza urabialność mieszanki betonowej i nie wpływa negatywnie na środowisko naturalne (Monzó, Paya, Borrachero i Girbes, 2003). Analiza procesu hydratacji popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych wykazała, że wymiana składników mineralnych na popiół lotny do 20% masy w produkcji cementu daje możliwość wyprodukowania spoiwa, które spełnia wymagania stawiane cementom (Lin i Lin, 2005). W praktycznych zastosowaniach zaleca się dodawanie superplastyfikatorów (Merino, Arevalo i Romero, 2005).

Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki pomiarów średniej wytrzymałości na ściskanie po dwóch okresach dojrzewania (28 i 56 dniach) z zaznaczonym odchyleniem standardowym oraz rozszerzoną niepewnością przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki wytrzymałości na ściskanie dla betonu z popiołem lotnym z termicznego przekształcania osadów ściekowych

Table 5. Compressive strength of concrete with fly ash from municipal sewage sludge combustion

Rodzaj betonu Concrete type	Okres dojrzewania Curing period [dni] – [days]	f_{cm} [MPa]	$f_{c \min}$ [MPa]	$f_{c \max}$ [MPa]	SD [MPa]	V [-]	$U_p 0,95$ [MPa]
BZ	28	42,16	40,39	43,76	1,85	0,04	3,08
	56	43,96	42,42	45,77	2,08	0,05	3,41
P5%	28	37,45	36,12	38,94	1,45	0,04	2,48
	56	40,87	38,86	42,56	2,34	0,06	3,73
P10%	28	39,12	37,14	40,95	2,51	0,06	3,95
	56	45,63	43,67	47,21	2,31	0,05	3,74
P15%	28	42,06	39,71	41,72	2,36	0,05	3,77
	56	47,85	46,27	49,46	1,92	0,04	3,27
P20%	28	44,70	42,21	46,26	1,44	0,03	2,61
	56	48,36	47,00	49,90	1,56	0,03	2,82
P25%	28	41,45	40,10	42,92	1,40	0,03	2,50
	56	44,00	42,51	45,10	1,31	0,03	2,44

BZ, P% – rodzaj próbki (beton zwykły referencyjny, beton z dodatkiem popiołu), f_{cm} – średnia wytrzymałość na ściskanie, $f_{c \min}$ – minimalna wytrzymałość na ściskanie, $f_{c \max}$ – maksymalna wytrzymałość na ściskanie, SD – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności, U_p – niepewność rozszerzona całkowita dla poziomu ufności $p = 0,95$.

BZ, P% – type of concrete (ordinary concrete, concrete with addition ashes), f_{cm} – average compressive strength; $f_{c \min}$ minimum compressive strength; $f_{c \max}$ maximum compressive strength; SD – standard deviation; V – coefficient of variation; U_p – total expanded uncertainty for the confidence level $p = 0.95$.

Największą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (44,70 MPa) uzyskały próbki betonu, w których wymieniono cement na popiół lotny w ilości 20% (P20%), a najmniejszą wytrzymałość (37,45 MPa) uzyskały próbki betonu, w których wymieniono 5% cementu na popiół lotny. W porównaniu do betonu referencyjnego spadek wytrzymałości betonu P5% wynosił 11,2%, a wzrost wytrzymałości betonu P20% wynosił 6,0%. Najmniejszą wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach (40,87 MPa) uzyskał ten sam beton z popiołem w ilości 5%, a największą (48,36 MPa) beton z popiołem w ilości 20%. Spadek wytrzymałości betonu P5% w porównaniu do betonu porównawczego wyniósł 7,0%, a wzrost wytrzymałości betonu P20% wyniósł 10%. Zauważono, że po 28 dniach dojrzewania wykonane betony uzyskały założoną klasę betonu C20/25. Zastąpienie cementu popiołem lotnym z komunalnych osadów ściekowych w ilości 10–20% wpływa korzystnie na wzrost wytrzymałości na ściskanie w badanych okresach dojrzewania w porównaniu do betonu referencyjnego. Prezentowane w literaturze badania dotyczące wpływu popiołu z osadów ściekowych na wytrzymałość na ściskanie dowodzą, że zastąpienie do 15% cementu popiołem z termicznego przekształcania osadów ściekowych wpływa pozytywnie na wytrzymałość na ściskanie betonów wyprodukowanych z ich udziałem (Rutkowska i in., 2018).

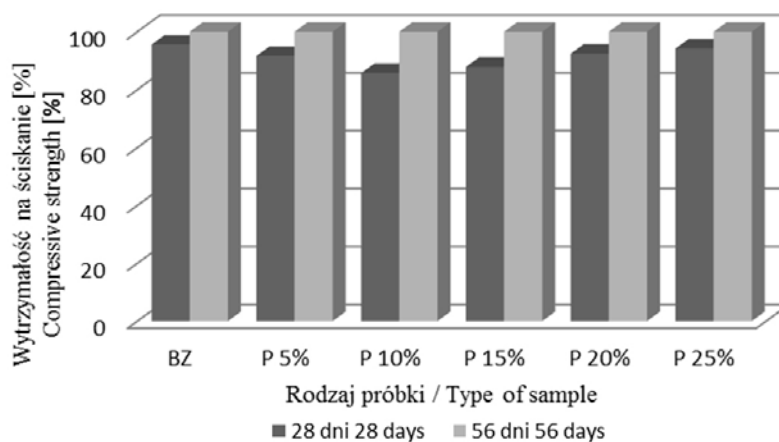
Najmniejsze odchylenie standardowe po 28 dniach dojrzewania betonu (1,40 MPa) uzyskały próbki

z zawartością 20% dodatku, a największe odchylenie standardowe (2,36 MPa) uzyskały próbki betonu, w których wymieniono cement w ilości 15% na popiół lotny. Współczynnik zmienności wahał się w przedziale od 3 (P20%, P25%) do 6% (P10%, P15%). Uzyskane wyniki świadczą o małej zmienności cech i jednorodności badanych próbek betonu zwykłego z dodatkiem popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych. Po 28 dniach dojrzewania przy rekomendowanym poziomie ufności ($p = 0,95$) najmniejszą niepewność całkowitą (2,48 MPa) osiągnęły próbki P5%, a największą (3,77 MPa) próbki P15%. Po 56 dniach dojrzewania największą niepewność całkowitą (3,74 MPa) uzyskano dla próbek P10%, a najmniejsza (2,44 MPa) dla próbek P25%.

Beton referencyjny po 28 dniach dojrzewania miał 95% końcowej wytrzymałości na ściskanie. Podobne wyniki zaobserwowano w betonach wytworzonych z udziałem popiołu lotnego z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych – wytrzymałość ta stanowiła 85–94% (rys. 4). Uzyskane wyniki badań mogą świadczyć o aktywności pucolanowej popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych.

Model materiałowy

Najprostszy model materiałowy betonu zawiera jedną zmienną wejściową – liczbę dni dojrzewania. Duże wartości współczynnika determinacji R^2 ($> 0,70$) wskazują na prawidłowe dopasowanie modelu do

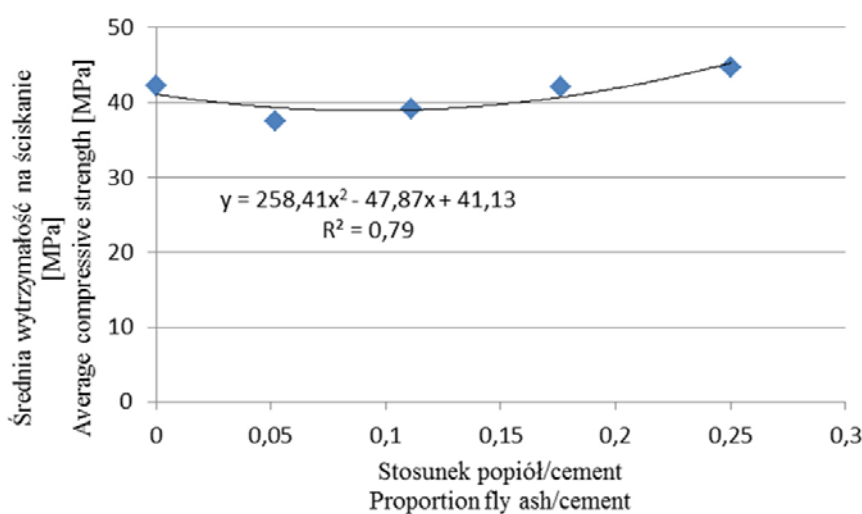


Rys. 4. Względne zmiany wytrzymałości na ściskanie

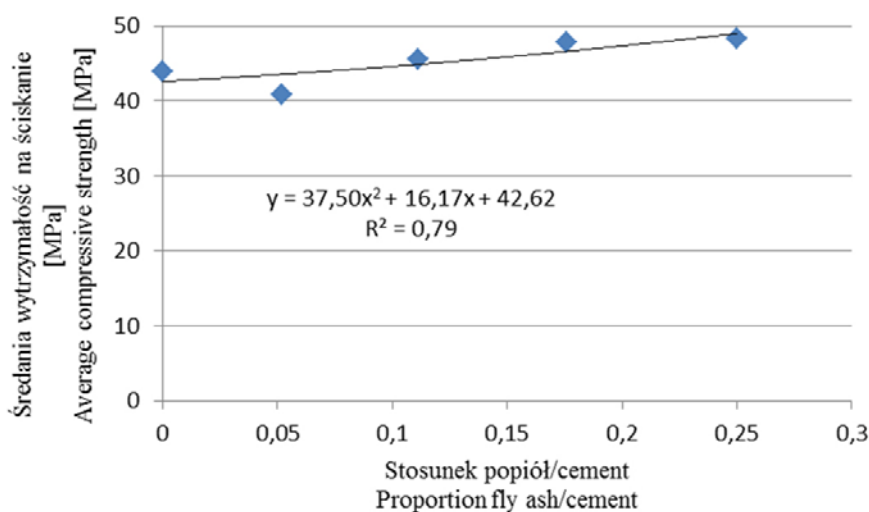
Fig. 4. Relative changes in compressive strength

przyjętych danych doświadczalnych oraz na to, że czas dojrzewania próbek jest jednym z najważniejszych czynników określających parametry betonu (Czarnecki i Łukowski, 1996). Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono model materiałowy dla betonu z dodatkiem popiołu lotnego z termicznego przekształcania osadów ściekowych, określony dla dwóch okresów dojrzewania (po 28 i 56 dniach) w zależności od stosunku popiołu do cementu.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że stopień dopasowania funkcji materiałowych do przyjętych danych eksperymentalnych wyrażony za pomocą współczynnika determinacji R^2 przyjmuje wartości większe od 0,79. Jest to rezultat zadawalający, który pozwala wywnioskować, że wykorzystany popiół lotny ma wpływ na wytrzymałość na ściskanie badanych kompozytów. Analizując zależności wytrzymałości na ściskanie od zawartości popiołu lotnego,



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości popiołu lotnego po 28 dniach dojrzewania
Fig. 5. Relationship between the compressive strength and fly ash content after 28 days of curing



Rys. 6. Zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości popiołu lotnego po 56 dniach dojrzewania
Fig. 6. Relationship between the compressive strength and fly ash content after 56 days of curing

można zauważyć, że z punktu widzenia wzrostu wytrzymałości najbardziej korzystna jest proporcja popiołu lotnego do cementu w ilości 0,25.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań betonów zwykłych i betonów wytworzonych z udziałem popiołów lotnych z termicznego przekształcenia osadów ściekowych wykazano pozytywny wpływ wykorzystanego zamiennika cementu na właściwości betonu. Uzyskane wyniki i ich analiza pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

1. Powstające w oczyszczalni ścieków popioły lotne z termicznego przekształcenia osadów ściekowych wykorzystane do sporządzania betonu zwykłego wpływają pozytywnie na jego parametry wytrzymałościowe.
2. Beton zawierający w swoim składzie popiół lotny ze spalania osadów ściekowych charakteryzował się porównywalną wytrzymałością na ściskanie do betonu porównawczego bez dodatku. W zakresie zawartości do 20% popiołu mogą być stosowane jako zamiennik cementu.
3. Skład fizykochemiczny popiołów z termicznego przekształcenia osadów ściekowych jest odmienny w porównaniu do popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego i nie spełnia wymagań zawartych w normie PN-EN 450-1:2012. Największy udział procentowy w próbkach popiołu stanowiły tlenki krzemu, wapnia, fosforu i glinu. Brak jest jednak przepisów dotyczących fizycznych i chemicznych właściwości popiołów ze spalania osadów ściekowych limitujących możliwości ich wykorzystania w technologii betonu.
4. Aktywność pucolanowa popiołu nie spełniała wymagań normy PN-EN 450-1:2012 po 90 dniach dojrzewania. Aktywność ta zostaje osiągnięta po dłuższym okresie dojrzewania.
5. Stopień dopasowania uzyskanych modeli materiałowych dla danych eksperymentalnych określony współczynnikiem determinacji R^2 jest powyżej 0,70. Analizując wykresy funkcji obrazujące zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości popiołu lotnego, zaobserwowano, że najbardziej

korzystne z punktu widzenia wzrostu wytrzymałości jest stosowanie dodatku do cementu w proporcji do 0,25.

PIŚMIENNICTWO

- ASTM C379-65T. Specification for fly ash for use as a pozzolanic material with lime.
- Bastion, S. (1980). *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*. Warszawa: Arkady.
- Bromberek, Z. (2014). Energooszczędność a rozwój miast. *Izolacje*, 1, 14–18.
- Brunarski, L. i Dohojda, M. (2016). An approach in-situ compressive strength of concrete. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 64 (4), 687–695. doi: 10.1515/bpasts-2016-0078
- 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. doi: 10.1016/j.clepro.2017.10.140
- Chen, Z. i Poon, C. S. (2017). Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 154, 791–803. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.003
- Czarnecki, L. i Łukowski, P. (1996). Model materiałowy betonów żywicznych. W *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej” (MATBED’96)*, Kraków-Mogilany (strony 62–69). Kraków: Politechnika Krakowska.
- 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 (2014/955/UE). Dz.U. UE L 370 z 30.12.2014.
- Decyzja Rady z dnia 19 grudnia 2002 r. ustanawiająca kryteria i procedury przyjęcia odpadów na składowiska, na podstawie art. 16 i załącznika II do dyrektywy 1999/31/WE (WE/2003/33). Dz.U. UE L 11 z 16.01.2003.
- 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). Dz.U. UE L 334 z 17.12.2010.
- Fontes, C. M. A., Barbosa, M. C., Toledo Filho, R. D. i Gonçalves, J. P. (2004). Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete. W E. Vázquez, Ch. F. Hendriks i G.M.T. Janssen (red.), *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*

- (strony 797–806). Barcelona: RILEM Publications. doi: 10.1617/2912143756.088
- Główny Urząd Statystyczny (2000). Ochrona środowiska 2000. Informacje i Opracowania Statystyczne. Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny (2005). Ochrona środowiska 2005. Informacje i Opracowania Statystyczne. Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny (2010). Ochrona środowiska 2010. Informacje i Opracowania Statystyczne. Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny (2015). Ochrona środowiska 2015. Informacje i Opracowania Statystyczne. Warszawa.
- Hubbard, F. H. i Dhir, R. K. (1984). A compositional index of the pozzolanic potential of pulverized-fuel ash. *Journal of Materials Science Letters*, 3, 958–960. doi: 10.1007/BF00720328
- Kosior-Kazberuk, M. (2011). Nowe dodatki mineralne do betonu. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 29, 47–55.
- Lin, K. L. i Lin, Ch. Y. (2005). Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. *Cement and Concrete Research*, 35 (10), 1999–2007. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.06.008
- 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. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122
- Merino, J., Arevalo, L. F. i Romero, F. (2005). Characterization and possible uses of ashes from wastewater treatment plants. *Waste Management*, 25, 1046–1054. doi: 10.1016/j.wasman.2004.12.023
- Monzó, J., Paya, J., Borrachero, M. V. i 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. doi: 10.1016/S0956-053X(03)00034-5
- Motz, H. i Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*, 21, 285–293. doi: 10.106/s0956-053x(00)00102-1
- Mroueh, U., Eskola, P. i Laine-Ylijoki, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by product in road and earth construction. *Waste Management*, 21 (3), 1–7. doi: 10.1016/s0956-53x(00)00100-8
- PN-EN 1097-7:2008. Oznaczenie gęstości wypełniacza.
- 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. Badanie mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metoda ciśnieniowa.
- PN-EN 12390-3:2011. Badanie betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań wytrzymałościowych.
- PN-EN 197-1:2012. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- 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-EN 451-2:2017-06. Metoda badania popiołu lotnego. Oznaczanie miałkości przez przesiewanie na mokro.
- PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02. Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach. Dz.U. 2015, poz. 1277.
- 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., Franus, M., Mendryk, M. i Fronczyk, J. (2020). Modification of ordinary concrete using fly ash from combustion of municipal sewage sludge. *Materials*, 13, 486–503. doi: 10.3390/ma13020487
- 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. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.167
- Rutkowska, G., Wiśniewski, K., Chalecki, M., Górecka, M. i 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. doi: 10.1515/ssgw-2016-0007
- Środa, K., Kijo-Kleczkowska, A. i Otwinowski, H. (2012). Termiczne unieszkodliwianie osadów ściekowych. *Inżynierii Ekologiczna*, 28, 67–81.
- Tkaczewska, E. (2008). Właściwości cementów zawierających różne frakcje ziarnowe krzemionkowych popiołów lotnych. *Drogi i Mosty*, 4, 47–80.
- Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022. M.P. 2016, poz. 784.
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 o odpadach. Dz.U. 2012 nr 62, poz. 628 z późn. zm.
- Werther, J. i Ogada, T. (1999). Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1 (25), 55–116.

Wichowski, P., Rutkowska, G. i Nowak, P. (2017). Wymywanie wybranych metali ciężkich z betonów zawierających popiół lotny z termicznego przekształcania osadów ściekowych. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 16 (1), 43–51. doi: 10.22630/ASPA.2017.16.1.05

Williams, P. T. (2005). *Waste treatment and disposal*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons.

Yusur, R. O., Noor, Z. Z., Din, M. D. F. M. D. i 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.

FLY ASH FROM THE THERMAL TRANSFORMATION OF SEWAGE SLUDGE AS AN ADDITIVE TO CONCRETE

ABSTRACT

Concrete is the most commonly used structural material, without which it is hard to imagine modern construction works. It is a material that can be substantially adapted to specific operating conditions. To exploit its potential, it is necessary to modify the material composition of concrete. The paper presents the results of research on the impact of modifying concrete with fly ash from the thermal transformation of sewage sludge in the amount of 5, 10, 15, 20 and 25% of cement mass on selected parameters of the C20/25 ordinary concrete. In the course of experimental work, compressive strength measurements were made at two stages of curing. The collected research results enabled us to develop material models describing the impact of concrete input parameters on its compressive strength. The obtained results confirm that it is possible to manufacture ordinary concrete modified by fly ash from thermal transformation of municipal sewage sludge. It was established that the average compressive strength of concrete containing 25% of ash amounts to 41.4 MPa and 44.0 MPa after, respectively, 28 and 56 days of curing.

Key words: concrete, fly ash, properties of concrete