

dr inż. Jacek Szulej<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0002-1411-3204

dr hab. inż. Paweł Ogrodnik, prof. SGGW<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0003-3515-8505

dr inż. Aleksandra Powęzka<sup>3)</sup>

ORCID: 0000-0002-5749-8618

dr inż. Andrzej Sumorek<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-7521-6709

# Wpływ popiołów ze spalania komunalnych osadów ściekowych na cechy wytrzymałościowe betonu zawierającego recyklingowe kruszywo ceramiczne

*The influence of ashes from the combustion of municipal sewage sludge on the strength properties of concrete containing recycled ceramic aggregate*

DOI: 10.15199/33.2023.12.09

**Streszczenie.** Świadomość ekologiczna społeczeństwa, a przede wszystkim konieczność dążenia do zrównoważonego rozwoju w gospodarce powoduje, że wpływ betonu na środowisko naturalne jest coraz częściej omawiany. Wpisuje się to jednocześnie w szeroko rozumiany trend gospodarki o obiegu zamkniętym, w której ogranicza się do minimum możliwości powstawania odpadów także w budownictwie. Podejmowane są liczne badania mające na celu zmniejszenie energochłonności rozwiązań dla sektora budowlanego oraz zmniejszenia ilości wytwarzanych odpadów. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań cech mechanicznych betonu zawierającego odpadowe kruszywo ceramiczne i popiół lotny ze spalania osadów ściekowych. Określono także wpływ podwyższonej temperatury 300, 450 i 600°C na właściwości wytrzymałościowe betonu. Przeprowadzone badania jednoznacznie wykazały możliwość stosowania kruszywa recyklingowego pochodzącego z przekruszenia ceramiki szlachetnej oraz popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych w betonach konstrukcyjnych.

**Słowa kluczowe:** popiół ze spalania osadów ściekowych; kruszywo ceramiczne; wytrzymałość na ściskanie; wysoka temperatura.

**Abstract.** The ecological awareness of society and, above all, the need to base the country's economy on sustainable development mean that the issue of impact on the natural environment is an issue that is increasingly discussed by concrete technologists. At the same time, it fits into the broadly understood trend of a closed-loop economy, in which the possibility of generating waste, also in construction, is minimized. Numerous studies are being undertaken to reduce the energy consumption of solutions for the construction sector and to reduce the amount of waste generated. The article presents selected results of tests on the mechanical properties of concrete containing waste ceramic aggregate and fly ash from the combustion of sewage sludge. The influence of increased temperatures of 300, 450 and 600°C on the strength properties of concrete was also determined. The conducted research clearly demonstrated the possibility of using recycled aggregate from the crushing of fine ceramics and fly ash from the combustion of sewage sludge in construction concrete.

**Keywords:** ash from sewage sludge incineration; ceramic aggregate; compressive strength; high temperature.

Sucha masa osadów pochodzących z przemysłowych i komunalnych oczyszczalni ścieków wyniosła w 2021 r. w Polsce 1025,8 tys. ton [1]. Jedną z dostępnych metod unieszkodliwiania tego typu odpadów i ich znacznej redukcji jest przekształcanie termiczne. W obrębie tej metody wyróżnić można spalanie,

współspalanie i zgazowanie. W efekcie uzyskuje się znaczną redukcję masy i objętości odpadów, która w przypadku spalania może wynieść 90% objętości i 65% masy początkowej [2]. Procentowy udział metod termicznych w zagospodarowaniu komunalnych osadów ściekowych w krajach UE wynosi ok. 18% [3]. Dominuje Holandia, gdzie 100% osadów ściekowych unieszkodliwia się metodą termiczną. Drugie miejsce z wynikiem 90% zajmuje Belgia [4]. W wyniku zastosowania spalania komunalnych osadów ściekowych otrzymujemy znaczną ilość popiołu,

który jest coraz częściej wykorzystywany m.in. w budownictwie jako zamiennik cementu. Na świecie również coraz częściej prowadzone są badania dotyczące zastosowania popiołu powstałego ze spalania odpadów ściekowych (*Sewage Sludge Ash – SSA*).

## Przegląd literatury

Odpady ściekowe charakteryzują się różnym składem chemicznym, co skutkuje uzyskaniem popiołu o zróżnicowanym składzie. Autorzy [5] stosowali dodatek (SSA) w ilości 10 – 40% jako zamiennik cementu portlandzkiego CEM I

<sup>1)</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

<sup>2)</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

<sup>3)</sup> Akademia Pożarnicza, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności

\*) Adres do korespondencji: j.szulej@pollub.pl

w betonach. Uzyskane wyniki potwierdziły, że zastąpienie 10% cementu dodatkiem SSA korzystnie wpływa na wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu, porowatość całkowitą, zdolność do transportu jonów chlorkowych i odporność na siarczany. W pracy [6] przeprowadzono obszerną analizę literatury na temat zastosowania SSA w betonie. Ze względu na strukturę i skład chemiczny oceniono, że ten materiał może być wykorzystywany jako surowiec do produkcji klinkieru cementowego i kruszyw lekkich oraz w postaci zmielonej jako składnik cementu. W artykule [7] zbadano wpływ SSA na płynność i wytrzymałość betonów ultrawysokiej wytrzymałości (UHPC). Stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie próbek UHPC z dodatkiem 10% SSA była po 7 i 28 dniach dojrzewania nieznacznie większa w porównaniu z próbkami bazowymi. Zawartość SSA przyczyniła się do zmniejszenia wydzielania ciepła hydratacji i zwiększenia objętości porów zmodyfikowanego betonu. W opracowaniu [8] zastosowano metodę kwasowej ekstrakcji fosforu z SSA. Pozbawiony fosforu popiół (AW-SSA) stosowano jako częściowy zamiennik piasku lub cementu w mieszance betonowej. Przy zamianie 10% cementu tym popiołem zaprawa miała podobną wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach jak bazowa. Stwierdzono, że AW-SSA prawdopodobnie ma utajony charakter hydrauliczny i pozytywnie wpływa na późny rozwój wytrzymałości. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy po 42 dniach dojrzewania była o ok. 5 MPa większa od wzorcowej.

W pracy [9] oceniono zachowanie się zaczynów cementowych zawierających popiół z osadów ściekowych (SSA) w podwyższonej temperaturze (600 – 1000°C). Wyniki pokazały, że zaczyn zawierający 10% SSA (S10) miał większą resztkową wytrzymałość na ściskanie niż zwykły zaczyn cementowy (S0), a podwyższona temperatura powodowała powstawanie spękań. Dodatek SSA sprzyjał większemu tworzeniu się gelu w temperaturze 900 – 1000°C, a taka faza może wypełniać pory w matrycy. W artykułach [10 – 12] opisano mechanizmy stojące za niektórymi korzystnymi efektami SSA na rozwój wytrzy-

małości zapraw przez badanie porów nawcze z drobnym popiołem z osadów ściekowych (FSSA). Wyniki badania wskazują, że obecność SSA przyspiesza tempo wydzielania ciepła hydratacji cementu. Zastąpienie cementu SSA lub FSSA w ilości do 10% nie spowodowało istotnych zmian w strukturze porów zaczynów. Tworzenie się bruszytu w zaprawach cementowych zawierających SSA lub FSSA przyczynia się do zwiększenia ich wytrzymałości po długim okresie wiązania. Dodatek SSA powodował tworzenie się większej ilości ettringitu w zaprawach w warunkach zanurzenia w wodzie. Zaprawy rozszerzały się już przed siódmym dniem dojrzewania. Badania wykazały, że zastąpienie 15% cementu portlandzkiego przez SSA i jego frakcje: gruboziarnistą (SSAC) i średnią (SSAM) powoduje zwiększenie wytrzymałości na ściskanie. W pracy [13] zbadano właściwości zapraw z dodatkiem popiołu z osadów ze zbiorników gnilnych (SA). Stosowano cement i piasek w proporcjach masowych 1 : 3. Dodatek popiołu osadowego wynosił 5 – 30% w stosunku do masy cementu. Uzyskane wyniki wskazują, że dodatek SA poprawia właściwości zapraw, a dodatek 20% SA uznano za optymalny.

Możliwość wykorzystania kruszywa pochodzącego z przekruszenia ceramiki sanitarnej jako pełnowartościowego zamiennika kruszyw naturalnych w zaprawach i betonach potwierdzono w pracy [14]. Opisano procedurę przygotowania kruszywa (rozdrabnianie, podział ziaren na dwie grupy – drobne i gruboziarniste oraz ustalenie ich proporcji), projektowanie mieszanki betonowej, a także badania jej właściwości oraz właściwości betonu zawierającego to kruszywo. Badany beton charakteryzował się dużą wytrzymałością oraz odpornością na ścieranie. Szczególnie korzystne wyniki uzyskano w przypadku zastosowania cementu glinowego i próbek poddanych obciążeniom termicznym do 1000°C. Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono, że kruszywo z przekruszenia ceramiki sanitarnej może być rekomendowane do wykonywania specjalnych rodzajów betonów – betonu odpornego na ścieranie oraz betonu przeznaczonego do ele-

mentów pracujących w wysokiej temperaturze. Możliwość wykorzystania odpadów ceramiki sanitarnej w betonach zwykłych potwierdzono również w pracy [15], w której zaprojektowano mieszanki betonowe, wykorzystując cement CEM 32,5R oraz wyłącznie kruszywo z różnych frakcji pokruszonej ceramiki sanitarnej.

## Materiały i metody badań

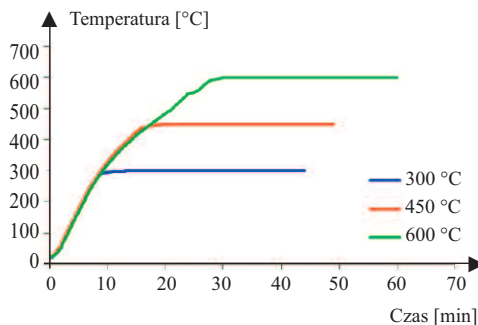
W badaniach wykorzystano betonowe próbki sześciennie (10 x 10 x 10 cm) i walcowe (wysokości 30 cm i średnicy 15 cm) zgodnie z normą [16]. Wartości średnie wytrzymałości na ściskanie i modułów Younga danych serii próbek uzyskiwano, badając co najmniej trzy próbki. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Advantest 9, natomiast moduły Younga, stosując system WalterBai, który współpracuje z ekstensometrami znajdującymi się na próbkach walcowych. Próbki wykonano z następujących składników: odpadowego kruszywa ceramicznego frakcji 0 – 4 mm i 4 – 8 mm, które zostało pozyskane z wyrobów armatury sanitarnej, popiołu z termicznej obróbki osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków Płaszów II w Krakowie oraz cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Wykonano cztery serie próbek: próbki bazowe i trzy serie zawierające popiół zastępujący 5, 10 i 15% cementu. Badania miały na celu określenie wpływu dodatku popiołu na cechy fizyczne i wytrzymałościowe zmodyfikowanego betonu. Wyznaczono m.in. wytrzymałość na ściskanie po 28 i 90 dniach wiązania oraz wpływ temperatury (300 – 600°C) na wytrzymałość na ściskanie. W tabeli 1 podano skład próbek.

**Tabela 1. Skład mieszanek betonowych [kg/m<sup>3</sup>]**

*Table 1. Composition of concrete mixtures [kg/m<sup>3</sup>]*

Składniki	Oznaczenie serii próbek			
	CP0c	CP5c	CP10c	CP15c
Cement (I 42,5 R)	488,0	463,6	439,2	414,8
Popiół (SSA)	0,0	24,4	48,8	73,2
Kruszywo ceramiczne (4 – 8 mm)	997,0	997,0	997,0	997,0
Kruszywo ceramiczne (0 – 4 mm)	398,0	398,0	398,0	398,0
Woda	196,0	196,0	196,0	196,0

Po przeprowadzeniu pielęgnacji, zgodnie z wymaganiami normowymi [16], próbki wysuszono w temperaturze  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  do stałej masy, w suszarni laboratoryjnej KC-100/200. Następnie wygrzewano w piecu specjalnym PK 1100/5 wyposażonym w komorę grzejną. Stanowisko ma oprogramowanie ThermoPro pozwalające na zaprogramowanie procesu termicznego. Czas nagrzewania zależał od wartości zaprogramowanej temperatury, która utrzymywana była w piecu przez 30 min, aż do zakończenia procesu grzejnego. Rozkład temperatury w piecu monitorowano za pomocą termopary regulującej wprowadzonej przez tylną ścianę. Termoelement znajduje się blisko górnej części pieca. Na rysunku 1 przedstawiono rzeczywiste rozkłady temperatury w czasie wygrzewania w piecu specjalnym PK 1100/5 zarejestrowane przez oprogramowanie ThermoPro. Za podstawę procesu wygrzewania przyjęto krzywą standardową „temperatura-czas” zgodną z wymaganiami [17].



**Rys. 1. Rozkład temperatury w piecu wg termopary zewnętrznej**

*Fig. 1. Temperature distribution in the furnace according to the external thermocouple*

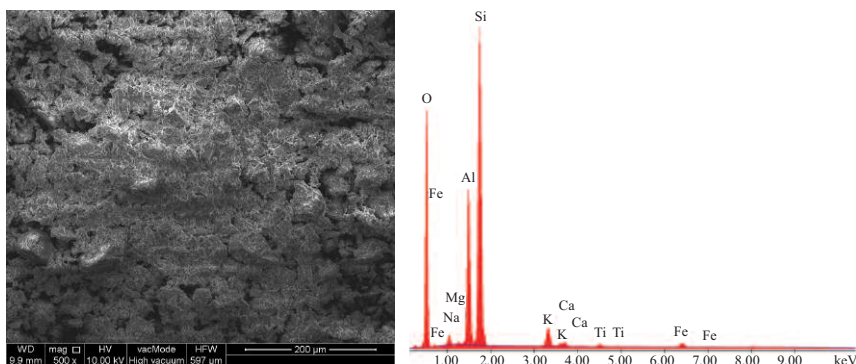
Do badań morfologii i składu pierwiastkowego betonu użyto elektronowego mikroskopu skaningowego typu FEG Quanta 250. Badania mechaniczne przeprowadzono przy użyciu prasy hydraulicznej Advantest 9 Controls w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej. Uzyskane wyniki porównano z próbkami referencyjnymi.

**Wyniki badań popiołu ze spalania osadów ściekowych, cementu 43,5R oraz recyklingowego kruszywa ceramicznego.** Skład chemiczny badanych popiołów określono metodą fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją

energii XRF, a skład mineralny za pomocą rentgenowskiej analizy fazowej XRD. Pomiary wykonano metodą proszkową przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego X’pertPRO MPD z goniometrem PW 3020. Fotografie 1, 2, 3 przedstawiają mikrostrukturę i wyniki analizy EDS z obszarów zdjęć kruszywa ceramicznego, popiołu ze spalania odpadów komunalnych i cementu

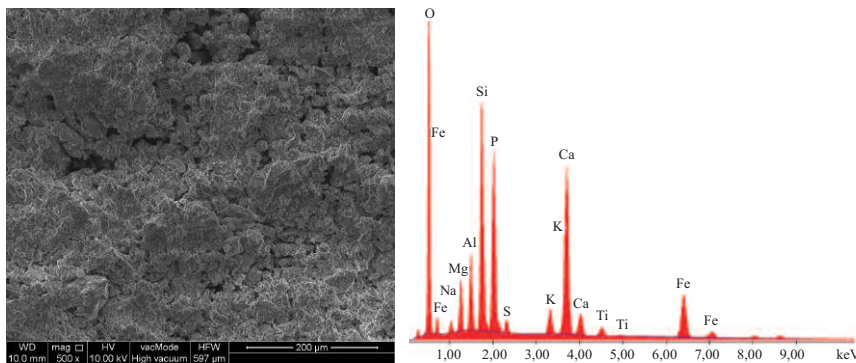
portlandzkiego 42,5R, a w tabeli 2 zestawiono wyniki badań ich składu tlenkowego.

Porównując skład tlenkowy cementu, w którym suma procentowej zawartości  $\text{SiO}_2$  i  $\text{CaO}$ , odpowiedzialnych za hydratację faz klinkierowych wynosi ok. 80% i omawianego popiołu zawierającego ok. 40% tych związków stwierdzono, że dodatek w formie popiołu nie



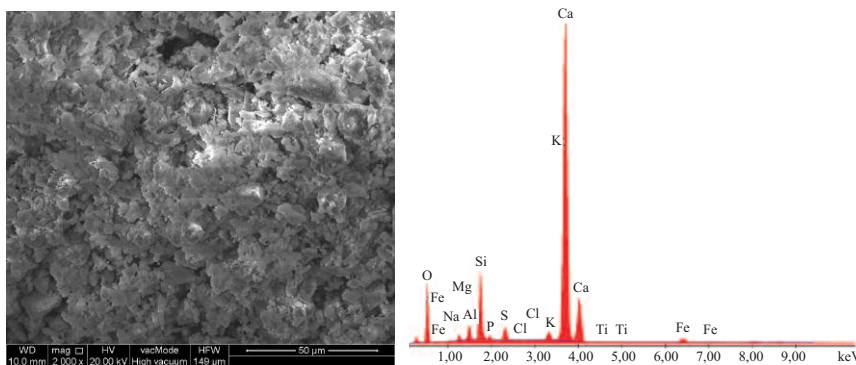
**Fot. 1. Widok mikrostruktury kruszywa ceramicznego (powiększenie 500x). Analiza pierwiastkowa EDS z obszaru widocznego na zdjęciu**

*Photo 1. View of the microstructure of ceramic aggregate (500x magnification). EDS elemental analysis from the area visible in the photo*



**Fot. 2. Widok mikrostruktury popiołu z osadów ściekowych (powiększenie 500x). Analiza pierwiastkowa EDS z obszaru widocznego na zdjęciu**

*Photo 2. View of the microstructure of ash from sewage sludge (500x magnification). EDS elemental analysis from the area visible in the photo*



**Fot. 3. Widok mikrostruktury cementu 42,5 R (powiększenie 2000x). Analiza pierwiastkowa EDS z obszaru widocznego na zdjęciu**

*Photo 3. View of the cement 42,5 R microstructure (2000x magnification). EDS elemental analysis from the area visible in the photo*



Tabela 2. Skład tlenkowy kruszywa ceramicznego, popiołów i cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R

Table 2. Oxide composition of ceramic aggregate, ashes and Portland cement CEM I 42.5 R

Tlenek	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>
	[%]									
Kruszywo	2,79	1,57	0,35	29,95	61,19	0	0	2,72	0,71	0,73
Popiół	13,51	1,18	4,56	9,51	24,64	23,62	1,81	1,91	17,64	1,62
Cement	2,06	0,20	1,21	4,03	14,95	0,29	3,41	1,19	72,34	0,22

wykazuje istotnych właściwości hydraulicznych. Wyniki badań składu tlenkowego kruszywa ceramicznego wykazały głównie krzemionkę SiO<sub>2</sub> (61,9%) i dwutlenek glinu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (29,95%). W przypadku betonów o wymaganej dużej odporności na obciążenia mechaniczne i agresywne oddziaływanie środowiska należy stosować kruszywa odporne na rozdrabnianie, czyli o małym współczynniku Los Angeles (LA). Badano kruszywo ceramiczne frakcji 4 ÷ 8 mm po uprzednim umyciu i wysuszeniu w temperaturze 110±5°C. Uzyskano wartość współczynnika LA = 22,4 i w związku z tym kruszywo można zakwalifikować do kategorii LA<sub>25</sub>. W ramach prac badawczych wykonano także badania mrozoodporności. Wykazały one ubytek masy 0,29%, a zatem jest on ≤ 1%, co zgodnie z wymaganiami pozwala zakwalifikować pozyskane kruszywo ceramiczne do kategorii F<sub>1</sub>. Określona średnia gęstość objętościowa kruszywa wynosi 2403 kg/m<sup>3</sup>, natomiast średnia nasiąkliwość 1,98%. Oznacza to, że gęstość kruszywa ceramicznego jest zbliżona do gęstości takich skał naturalnych, jak granit czy marmur, a nasiąkliwość do dolomitu czy żwiru z przewagą ziaren węglanowych. Nasiąkliwość przebadanego kruszywa jest natomiast znacznie mniejsza niż innych kruszyw pochodzących z recyklingu, takich jak pokruszony beton RCA, którego nasiąkliwość w różnych badaniach waha się od 3 do 15% [18]. Istotne jest również to, że kruszywo z ceramiki sanitarnej nie wykazuje żadnych zmian struktury w wyniku ogrzewania w wysokiej temperaturze. Badania struktury zostały poprzedzone wygrzewaniem ziaren kruszywa frakcji 4 ÷ 8 mm w temperaturze 300°C oraz 600°C w piecu komorowym PK1100/5. Po osiągnięciu zakłada-

nej temperatury była ona następnie utrzymywana w komorze pieca przez godzinę. Kruszywo ceramiczne po wyżarzaniu nie zmieniło swojej struktury oraz formy. Nadal widoczne były nieregularne pory w całej objętości materiału.

W wyniku badań nie wykazano mikropęknięć powstałych podczas ogrzewania kruszywa ceramicznego. Uszkodzenia takie były natomiast widoczne w badaniach kruszywa bazaltowego, które po wygrzewaniu w 600°C wykazywało wiele nieregularnych rys. Z przeprowadzonych badań cech technicznych recyklingowego kruszywa z pokruszonej stłuczki ceramicznej wynika, że jego cechy nie odbiegają znacznie od kruszyw pochodzenia naturalnego, a w przypadku dużej odporności na oddziaływanie wysokiej temperatury nawet je przewyższają [19].

**Wyniki badań mechanicznych próbek betonowych z dodatkiem popiołu z osadów ściekowych.** Na rysunku 2 zestawiono wytrzymałość na ściskanie betonowych próbek sześciennych o kra-

wędzi 10 cm. Po zastąpieniu cementu w ilości 10% popiołem uzyskano po 90 dniach dojrzewania prawie identyczne wartości wytrzymałości na ściskanie próbek w porównaniu z próbkami bazowymi.

W celu uwzględnienia późniejszego przyrostu wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych spowodowanego dodatkiem popiołu (SSA), wpływ obciążenia betonu wysoką temperaturą sprawdzono po 180 dniach dojrzewania (rysunek 3). Uzyskano wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek z zawartością SSA 5 i 10% podobne do próbek bazowych poddanych wygrzewaniu w temperaturze 300°C. Największą wytrzymałość na ściskanie po wygrzewaniu w temperaturze 600°C uzyskały próbki serii CP5c i CP10c.

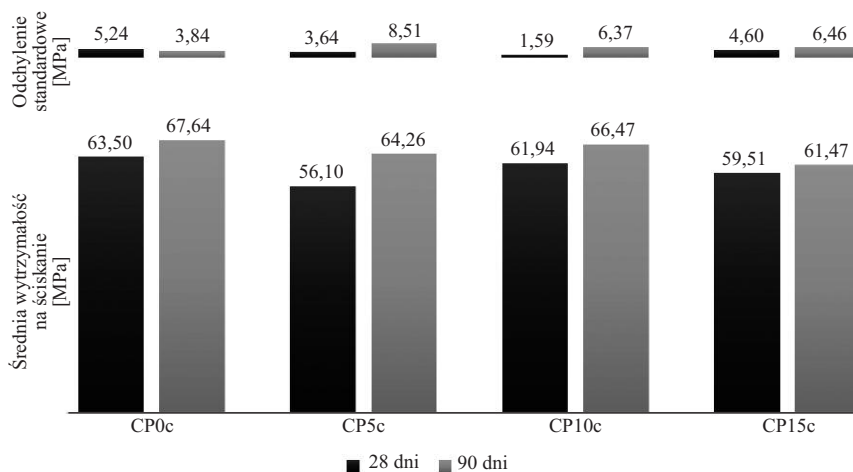
Na rysunku 4 zestawiono wyniki modułów Younga czterech serii próbek badanych po 28 dniach dojrzewania. Największą wartość wynoszącą 37,66 GPa uzyskał beton serii CP0c.

## Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że:

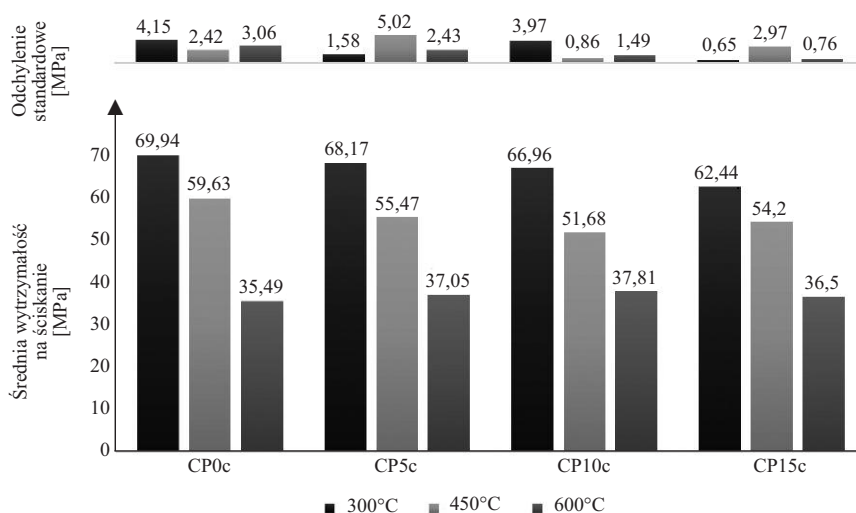
1) popiół z termicznego przekształcenia odpadów ściekowych w ilości 5 – 15% może być stosowany jako częściowy zamiennik cementu w mieszance betonowej wykonanej na bazie odpadowego kruszywa ceramicznego;

2) w składzie popiołu z termicznego przekształcenia odpadów znajdują się



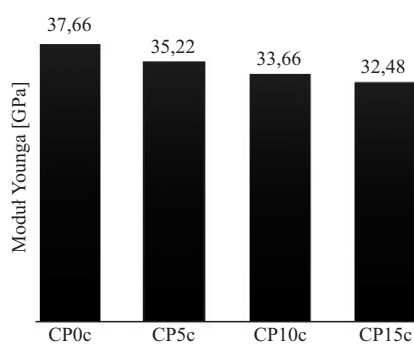
Rys. 2. Średnia wytrzymałość na ściskanie i odchylenie standardowe próbek z różną zawartością popiołu po 28 i 90 dniach dojrzewania

Fig. 2. Average compressive strength and standard deviation of samples with different ash content measured after 28 and 90 days of curing



**Rys. 3.** Średnie wytrzymałości na ściskanie i odchylenie standardowe próbek z różną zawartością popiołu mierzone po 180 dniach dojrzewania i poddanych wygrzewaniu w temperaturze 300, 450 i 600°C

Fig. 3. Average compressive strength and standard deviation of samples with different ash content measured after 180 days of curing and heated at temperatures of 300, 450 and 600°C



**Rys. 4.** Moduł Younga próbek betonowych z różną zawartością popiołu

Fig. 4. Young moduli of concrete samples with different ash content

składniki hydrauliczne. Z przeprowadzonych badań wynika, że proces wiązania początkowego jest wolniejszy niż w próbkach referencyjnych. Po okresie 90 dni dojrzewania uzyskano zbliżone wartości wytrzymałości na ściskanie próbek CP5c, CP10c i CP15c do próbek bazowych. Największy przyrost wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach dojrzewania, wynoszący prawie 15%, zaobserwowano w próbkach serii CP5c;

3) w wyniku ogrzewania próbek do temperatury 300 – 600°C wytrzymałość resztkowa próbek maleje. Zwiększenie dodatku popiołu nie wpływa na charakter zmian wytrzymałości, gdyż zarówno w przypadku próbek referencyjnych, jak i z dodatkiem popiołu zmniejszenie wytrzymałości jest porównywalne w każdej temperaturze

wygrzewania. Zauważono jednocześnie pewną anomalię, gdyż temperatura wygrzewania 300°C spowodowała kilkuprocentowy wzrost wytrzymałości wszystkich typów próbek w porównaniu z próbkami referencyjnymi, których wytrzymałość określono po 28 i 90 dniach pielęgnowania;

4) dodatek popiołu lotnego ze spalania odpadów ściekowych powoduje zmniejszenie modułu sprężystości podłużnej (moduł Younga). Spadek ten jest proporcjonalny do ilości dodanego popiołu lotnego; różnica pomiędzy próbą referencyjną a betonem oznaczonym CP15c wynosi ok. 15%;

5) istnieje możliwość zastosowania popiołu z termicznego przekształcania odpadów w betonach z kruszywem pochodzącym w 100% z recyklingu. Uzyskane cechy mechaniczne i dość duża odporność na działanie podwyższonej i wysokiej temperatury sprawia, że tego typu beton może przyczynić się do ograniczenia ilości odpadów powstających wyniku działalności człowieka.

#### Literatura

- [1] Główny Urząd Statystyczny. Ochrona Środowiska 2021.
- [2] Rosik-Dulewska Cz. Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. 6 Warszawa, PWN, 2015.
- [3] Rocznik statystyczny ochrony środowiska 2017. GUS.
- [4] Pietrzyk J. Analiza możliwości wykorzystania odpadów z termicznego przekształcania komu-

nalnych osadów ściekowych. Rozprawa doktorska. AGH, 2018.

[5] Zdeb T, Tracz T, Adamczyk M. Physical. Mechanical properties and durability of cement mortars containing fly ash from the sewage sludge incineration proces. J. Clean. Prod., 2022.; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131055>.

[6] Lynn CJ, Dhir RK, Ghataora GS, West RP. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. Constr Build Mater., 2015, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122>; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130028>.

[7] Chunping Gu, Yongjie Ji et al. Feasibility of recycling sewage sludge ash in ultra-high performance concrete: Volume deformation, microstructure and ecological evaluation. Constr Build Mater. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125823>.

[8] Ottosen LM, Thornberg D, Cohen Y, Stiernström S. Utilization of acid-washed sewage sludge ash as sand or cement replacement in concrete. Resour Conserv Recycl. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105943>.

[9] Liu M, Zhao Y, Xiao Y, Yu Z. Performance of cement pastes containing sewage sludge ash at elevated temperatures. Constr Build Mater. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.290>.

[10] Chen Z, Poon CS. Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. Constr Build Mater. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.003>.

[11] Gu C, Shuang Y, et al. Effect of environmental conditions on the volume deformation of cement mortars with sewage sludge ash. J. Build. Eng. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105720>.

[12] Monzó J, Payá J, Borrachero MV, Córcoles A. Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars. Cem. Concr Res. 1996; [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00119-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00119-6).

[13] Pilar Durante Ingunza M, Camarini G, Costa FMS. Performance of mortars with the addition of septic tank sludge ash. Constr Build Mater. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.053>.

[14] Halicka A, Ogrodnik P, Zegardło B. Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. Constr Build Mater. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125823>.

[15] Ogrodnik P, Szulej J, Franus W. The Wastes of Sanitary Ceramics as Recycling Aggregate to Special Concretes. Mater. 2018; <https://doi.org/10.3390/ma11081275>.

[16] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

[17] PN-EN 1363-1:2020-07 Badania odporności ogniowej – Część 1: Wymagania ogólne.

[18] Klimek B, Szulej J, Ogrodnik P. The effect of replacing sand with aggregate from sanitary ceramic waste on teh durability of stucco mortars. Clean Technol Envir. 2020; <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01932-w>.

[19] Ogrodnik P, Szulej J. The Assessment of Possibility of Using Sanitary Ceramic Waste as Concrete Aggregate – Determination of the Basic Material Characteristics. Appl. Sci. 2018.

Przyjęto do druku: 16.12.2023 r.