

dr hab. inż. Anna Głowacka, prof. ZUT¹⁾

ORCID: 0000-0002-4733-5920

dr inż. Justyna Kiper¹⁾

ORCID: 0000-0001-7880-6627

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk^{1)*}

ORCID: 0000-0003-0840-5048

dr inż. Jarosław Strzałkowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-7001-9303

Possibilities of using bottom ashes from the combustion of sewage sludge in cement concrete

Możliwości wykorzystania popiołów paleniskowych ze spalania osadów ściekowych w betonach cementowych

DOI: 10.15199/33.2024.08.03

Abstract. The search for alternative materials that can replace the basic components of concrete is one of the most important directions of scientific research in recent years. The article presents the results of research on the use of bottom ash generated as a result of thermal treatment of sewage sludge in concrete in one of the Polish incinerators. Changes in the mechanical and thermal properties of cement concretes were described in which the cement was replaced with bottom ash in the following amounts: 0, 10, 20 and 30% of the cement volume. The tests carried out showed the possibility of using bottom ash from the combustion of sewage sludge in structural concrete.

Keywords: bottom ash from sewage sludge incineration; compressive strength; thermal conductivity of concrete

Streszczenie. Poszukiwanie alternatywnych materiałów mogących zastąpić podstawowe składniki betonu to jeden z najważniejszych kierunków badań naukowych ostatnich lat. W artykule przedstawiono wyniki badań zastosowania w betonie popiołów paleniskowych powstających w wyniku obróbki termicznej osadów ściekowych w jednej z polskich spalarni. Opisano zmiany właściwości mechanicznych i termicznych betonów cementowych, w których cement został zastąpiony popiołem paleniskowym w ilości: 0, 10, 20 i 30% objętości cementu. Przeprowadzone badania wykazały możliwość stosowania popiołów paleniskowych ze spalania osadów ściekowych w betonach konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: popioły paleniskowe ze spalania osadów ściekowych; wytrzymałość na ściskanie; przewodność cieplna betonu.

Sewage sludges created during industrial and municipal sewage treatment require suitable utilization due to their specific properties. Because industrial and municipal sewage is jointly discharged, the sewage sludges are contaminated with heavy metal compounds, organic materials, pathogenic bacteria, fungi, and other hazardous substances. One of the methods of sewage sludge utilization is thermal treatment, which creates other wastes – ashes and slags. Their utilization is a step towards a circular economy. The sewage sludges have low calorific value (3 – 6 MJ/kg) and high moisture content (60 – 80%), so their utilization is expensive due to the high consumption of auxiliary fuel [1]. Incineration of the sewage sludges significantly reduces their mass and volume, making further utilization easier [2, 3].

The best recognized using bottom slags and ashes from sewage sludges incineration in construction covers: Portland clinker production [3 – 6]; alternative fuel in the production of cement/clinker [7, 8] and lightweight aggregates [9]; cement replacement [10 – 12] and fine substitute aggregate [13, 14].

Osady ściekowe powstające w procesie oczyszczania ścieków przemysłowych i komunalnych wymagają odpowiedniego zagospodarowania ze względu na właściwości. Z powodu wspólnego odprowadzania ścieków przemysłowych i komunalnych osady ściekowe są zanieczyszczone związkami metali ciężkich, substancjami organicznymi, bakteriami chorobotwórczymi, grzybami i innymi niebezpiecznymi substancjami. Jedną z metod utylizacji osadów ściekowych jest ich termiczna obróbka, która wiąże się z powstawaniem kolejnych odpadów – popiołów i żużli. Ich zagospodarowanie stanowi krok w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Osady ściekowe mają małą wartość opałową (3 – 6 MJ/kg) i dużą zawartość wilgoci (60 – 80%), dzięki czemu proces ich utylizacji jest kosztowny ze względu na wysokie zużycie paliwa pomocniczego [1]. Spalanie osadów ściekowych znacznie zmniejsza masę i objętość osadów, a to ułatwia ich dalsze zagospodarowanie [2, 3].

Najbardziej zbadane zastosowanie żużli i popiołów dennych ze spalania osadów ściekowych w budownictwie obejmuje: produkcję klinkieru cementowego [3 – 6]; paliwo alternatywne w produkcji cementu/klinkieru [7, 8] oraz kruszyw lekkich [9]; materiał zastępujący cement [10 – 12] oraz drobne kruszywo zastępcze [13, 14].

Popioły paleniskowe z termicznej obróbki osadów ściekowych mogą być wykorzystane w materiałach budowlanych

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

^{*} Correspondence address: elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl

The bottom ashes from the thermal treatment of sewage sludges can be used in cement-based building materials because cement composites demonstrate a high ability for heavy metals immobilization [15]. The test results presented in the paper aim to show the possibility of utilizing the ashes and slags created when sewage sludges are incinerated in a Polish sewage treatment plant. Physico-chemical analyses have been done for the wastes from an incinerator working in the „Pomorzany” Municipal Sewage Treatment Plant in Szczecin. Changes in technological, mechanical and thermal characteristics have been presented for the cement concrete, in which the cement was substituted with the bottom ash in the range of 0 – 30% by volume, with an increment of 10%.

The bottom ashes used in the investigation in a small amount allowed to obtain the concrete with good mechanical performance and slightly worsened workability. The porous structure of the slag from sewage sludge incineration causes high water absorption when mixing the concrete and thus worsens its consistency. It also increases the absorbability, so the aggregate made from sewage sludge incineration cannot be used in large volumes in structural concrete production.

Materials and test methods

The Portland cement CEM I 42.5R with a specific density of 3.1 g/cm³ was used for each tested concrete, with natural sand 0 – 2 mm, gravel of the fractions 2 – 8 mm and 8 – 16, and tap water. The grain size distribution for the sand and coarse aggregate is presented in Table 1.

The samples of analyzed sewage sludges were derived from a mono-incinerator working at the „Pomorzany” Municipal Sewage Treatment Plant in Szczecin. The sewage is treated using activated sludge technology, with stabilization in separated, closed fermentation chambers. After methane fermentation, the sludge is dehydrated to about 20% of the dry mass in belt presses and then dried. When the dry mass content is 90 – 95%, the sludge is incinerated in two cauldrons with a mechanical grate and joint power of 2460 kW [16]. The produced ashes and slags are stored in the containers and successively transported to the places of further utilization by external companies; due to the content of phosphorus, calcium, magnesium and micro-components, they are used, among others, for producing the granulated fertilizers.

Physico-chemical characteristics were determined for the samples of incinerated sewage sludge of the fraction < 500 μm. The tests showed a pH value of 8.2, dry mass content of 93.31% and organic substances content of 0.33%. The material contained 8.41% of the general phosphorus and 20.19% of P₂O₅ (by mass). The results of determining

nych na bazie cementu, ponieważ kompozyty cementowe wykazują znaczną zdolność do unieruchamiania metali ciężkich [15]. Przedstawione w artykule wyniki badań mają na celu pokazanie możliwości zastosowania popiołów i żużli powstających w wyniku spalania osadów ściekowych w polskiej oczyszczalni ścieków. Wykonano analizy fizykochemiczne odpadów pobranych ze spalarni funkcjonującej na terenie Oczyszczalni Ścieków Komunalnych „Pomorzany” w Szczecinie. Przedstawiono zmiany właściwości technologicznych, mechanicznych i termicznych zwykłych betonów cementowych, w których cement został zastąpiony popiołem paleniskowym w ilości 0 – 30% objętościowo, w krokach co 10%.

Popioły paleniskowe zastosowane w badaniach, przy niewielkiej ich zawartości, pozwalają na uzyskanie betonów o dobrych właściwościach mechanicznych przy nieznacznym pogorszeniu ich urabialności. Porowata struktura żużla ze spalania osadów ściekowych powoduje znaczną absorpcję wody podczas mieszania betonu i pogarsza jego urabialność. Powoduje także zwiększenie nasiąkliwości betonu, dlatego kruszywo powstałe ze spalania osadów ściekowych nie może być stosowane w dużej ilości w betonach konstrukcyjnych.

Zastosowane materiały i metoda badań

Do wykonania wszystkich betonów zastosowano cement portlandzki CEM I 42.5R o gęstości właściwej 3,1 g/cm³, piasek naturalny 0 – 2 mm, żwir frakcji 2 – 8 mm i 8 – 16 mm oraz wodę wodociągową. Uziarnienie piasku i kruszywa grubego przedstawiono w tabeli 1.

Table 1. Sand and coarse aggregate grain size

Tabela 1. Uziarnienie piasku i kruszywa grubego

Aggregate/ Kruszywo	Sieve [mm]/remains on sieve [%]/Pozostaje na sicie [%] o oczku [mm]								
	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
Sand 0/2 mm Piasek 0/2 mm	13.6	0.3	47.7	26.3	4.8	6.7	0.6	0	0
Gravel 2/8 mm Żwir 2/8 mm	0	0.9	0.9	7.9	3.5	35.1	49.4	2.3	0
Gravel 8/16 mm Żwir 8/16 mm	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	9.3	84.8	4.8

zamkniętych komorach fermentacyjnych. Osad po fermentacji metanowej kierowany jest na prasy taśmowe, gdzie zostaje odwodniony do zawartości ok. 20% suchej masy, a następnie jest kierowany do suszarni osadu. Po osiągnięciu zawartości suchej masy na poziomie 90 – 95%, osad trafia do dwóch kotłów z rusztem mechanicznym o łącznej mocy 2460 kW [16]. Powstałe w procesie spalania popioły i żużle składowane są w kontenerach i sukcesywnie wywożone do dalszego zagospodarowania przez firmy zewnętrzne ze względu na zawartość fosforu, wapnia, magnezu i mikroskładników m.in. do produkcji nawozów granulowanych.

Przeprowadzono badania właściwości fizykochemicznych z próbek ze spalania osadu ściekowego o frakcji < 500 μm. Wykazały one wartość pH równą 8,2, zawartość suchej masy 93,31% oraz substancji organicznej 0,33%, zawartość fosforu ogólnego – 8,41% i zawartość P₂O₅ – 20,19% masy. Wy-

the chemical composition of processed sewage sludges, including heavy metals content, are presented in Table 2. The grain size distribution curve for the bottom ash used in tested concrete production is presented in Figure 1.

Because the addition of the ashes and slags from sewage sludge incineration causes a significant worsening of concrete mix workability [17], the reference concrete mix (BR) was designed with the consistency S4 (according to the standard [18]). For this purpose, the polycarboxylates-based superplasticizer with a 1006 kg/m³ density has been used (1.5% of the cement mass). In the three concrete mixes (B10P, B20P, B30P), the bottom ashes from sewage sludge incineration were used, substituting Portland cement with 10, 20 and 30% by volume. The composition of the tested concrete mixes is given in Table 3. The consistency of the concrete mixes was determined by the slump method following the standard PN-EN 12350-2 [19].

The thermal conductivity of concrete samples was tested on the cubes 100 x 100 x 100 mm³ after 28 days of curing. The tests were performed on the samples' exposed cores after cutting them in half. The concrete samples were stored in dry laboratory conditions until their masses were stable. The thermal conductivity was determined by a non-stationary technique using the Isomet 2104 apparatus. All measurements were done on the central sections of the samples. Eight measurements were carried out for one type of concrete. The thermal conductivity λ , volumetric specific heat c_v , and thermal diffusion coefficient a were determined.

The compressive strength was determined on the cubes 100 x 100 x 100 mm³ after 7 and 28 days of curing. The tests were conducted according to PN-EN 12390-3 [20] on six specimens for each type of concrete.

Tests results and discussion

The results of testing concrete mixes consistency, volumetric density of concrete samples in dry state and absorbability are presented in Table 4. The increasing content of the ashes from sewage sludges led to diminishing the

Table 2. Content of selected bottom ash elements, including heavy metals

Tabela 2. Zawartość wybranych pierwiastków popiołu paleniskowego, w tym metali ciężkich

Cd	Cu	Co	Pb	Ni	Mn	Zn	Ca	Mg	Fe	K	Na
[mg/kg of dry mass]/[mg/kg suchej masy]								[g/kg of dry mass]/[g/kg suchej masy]			
2.28	691.9	–	49.6	65.5	376.2	1503.4	63.5	44.5	102.8	56.6	1.07

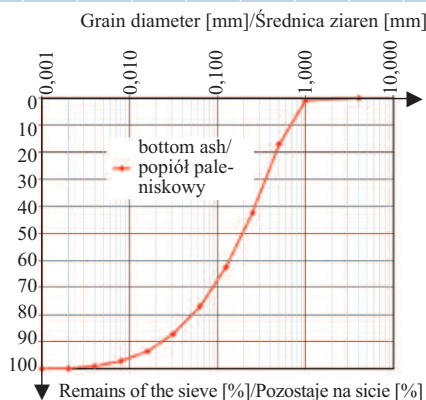


Fig. 1. Graining of bottom ash

Rys. 1. Uziarnienie popiołu paleniskowego

Table 3. The composition of concrete mixes

Tabela 3. Skład mieszanek betonowych

Components/ Składniki	Content [kg/m ³]/ Zawartość [kg/m ³]			
	BR	B10P	B20P	B30P
Cement CEM 142,5R/ Cement CEM 142,5R	320	288	256	224
Ash/ Popiół	0.0	25.5	51.0	76.5
Slag/ Żużel	0.0	0.0	0.0	0.0
Water/Woda	170	170	170	170
Sand 0/2/Piasek 0/2	580	580	580	580
Gravel 2/8/Żwir 2/8	779	779	779	779
Gravel 8/16/Żwir 8/16	560	560	560	560
Superplasticizer/ Superplastyfikator	4.8	4.8	4.8	4.8

ściwego c_v oraz współczynników dyfuzyjności cieplnej a .

Wytrzymałość na ściskanie próbek oznaczono na kostkach 100 x 100 x 100 mm po 7 i 28 dniach dojrzewania. Badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 12390-3 [20] na sześciu próbkach z każdego rodzaju betonu.

Wyniki badań i dyskusja

Wyniki badań konsystencji mieszanek betonowych, gęstości objętościowej betonów w stanie suchym oraz nasiąkliwości wagowej zestawiono w tabeli 4. Na podstawie analizy wyników badań konsystencji mieszanek przedstawionych w tabeli 4 stwierdzono, że wraz ze wzrostem udziału popiołów z osadów ściekowych w mieszance betonowej klasa konsystencji znacznie się zmniejszyła – w przypadku betonów B20P

niki badań składu chemicznego przetworzonych osadów ściekowych, w tym zawartość metali ciężkich, zestawiono w tabeli 2. Krzywą uziarnienia popiołu paleniskowego zastosowanego do wykonania betonów przedstawiono na rysunku 1.

W związku z tym, że dodatek popiołów i żużla ze spalania osadów ściekowych powoduje znaczne zmniejszenie urabialności mieszanki betonowej [17], mieszankę referencyjną (BR) zaprojektowano o konsystencji S4 (zgodnie z normą [18]). W tym celu zastosowano superplastyfikator na bazie polikarboxylanów o gęstości 1006 kg/m³ w ilości 1,5% masy cementu. W trzech kolejnych mieszankach (B10P, B20P, B30P) zastosowano popioły paleniskowe ze spalania osadów ściekowych, które zastąpiły odpowiednio 10, 20 i 30% objętości cementu. Skład badanych betonów zamieszczono w tabeli 3. Konsystencję mieszanek betonowych określono metodą opadu stożka wg normy PN-EN 12350-2 [19].

Badania przewodności cieplnej betonów wykonano na kostkach 100 x 100 x 100 mm³ po 28 dniach dojrzewania. Badania parametrów cieplnych betonu wykonano na odsłoniętych rdzeniach próbek po przecięciu próbek na pół. Testowane próbki betonów przechowywano w suchych warunkach laboratoryjnych do czasu ustabilizowania ich masy. Badania przewodnictwa cieplnego przeprowadzono techniką niestacjonarną za pomocą aparatu Isomet 2104. Wszystkie pomiary zostały wykonane na przekrojach środkowych próbek. W przypadku jednego rodzaju betonu wykonano po 8 pomiarów właściwości cieplnych. Wyznaczono wartości przewodności cieplnej λ , objętościowego ciepła wła-

consistency class of the concrete mixes, in the case of the concrete B20P and B30P to S1. The rise in the absorbability with increasing ash content was also observed; each concrete containing the ash had an absorbability higher than 5%. The ash addition caused a lowering of the volumetric density of the concrete in the dry state. This tendency can be attributed to the ash's lower specific density than the Portland cement.

One of the limitations of utilizing sewage sludge incineration waste as the cement addition is P₂O₅ presence, with the maximum content defined in the standard PN-EN 450-1 [21] as 5%. The conducted tests showed that the above limit had been exceeded four times (20.19% of dry mass).

The results of testing compressive strength for the concrete samples with various contents of the ash from sewage sludge incineration are presented in Figure 2. The compressive strength decreased with increasing ash content. The most significant differences in compressive strength were observed after 7 days of curing. The downfall of the initial compressive strength is also significant. The decrease of compressive strength of the concrete B10P, B20P and B30P compared to reference concrete after 7 days of curing was 19.5%, 38.6% and 58%, respectively. As concluded in [2], the early strength of concrete is affected by P₂O₅, which creates calcium phosphate, delaying the setting processes. After 56 days of curing, the average compressive strength of concrete with 10% of the ash (B10P) was equal to that of the reference concrete (BR), while concrete B20P after 56 days achieved 90% of the 28-day strength of the reference concrete. The lowest compressive strength demonstrated concrete B30P, which after 56 days had only 62% of the 28-day strength of the reference concrete. The Authors of [2, 11, 12] have noted that at the 25% content of ash (referring to cement mass), the required structural strength of concrete can be achieved by extending the curing time.

Figure 3 presents the average values of thermal conductivity λ of tested materials. Using the bottom ash significantly reduced the thermal conductivity (proportional to ash content). Compared to the reference

Table 4. Test results for mixtures and concretes with different contents of sewage sludge ash

Tabela 4. Wyniki badań mieszank i betonów z różną zawartością popiołów z osadów ściekowych

Concrete / Oznaczenie betonu	Slump [mm] / Opad stożka [mm]	Consistency class acc. to [18] / Klasa konsystencji wg [18]	Dry density [kg/m ³] / Gęstość betonu w stanie suchym [kg/m ³]	Absorbability [%] / Nasiąkliwość [%]
BR	170	S4	2278	3.8
B10P	55	S2	2203	5.5
B20P	30	S1	2131	5.9
B30P	10	S1	2089	6.9

i B30P do S1. Zaobserwowano tendencję do zwiększania nasiąkliwości betonów wraz ze wzrastającym udziałem dodatku popiołu. Wszystkie betony zawierające popiół jako częściowy zamiennik cementu uzyskały nasiąkliwość większą od 5%. Dodatek popiołu wpłynął również na obniżenie gęstości objętościowej badanych betonów w stanie suchym wraz ze wzrostem zawartości popiołu. Tendencję tę można przypisać mniejszej gęstości właściwej popiołu w porównaniu z cementem zastosowanym w badaniach.

Jednym z podstawowych ograniczeń warunkujących zagospodarowanie odpadów po spalaniu osadów ściekowych jako dodatku do cementu jest określona w PN-EN 450-1 [21] zawartość P₂O₅, wynosząca maksymalnie 5%. Przeprowadzone badania wykazały czterokrotnie przekroczoną średnią zawartość P₂O₅ (20,19% suchej masy).

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych o różnej zawartości popiołu ze spalania osadów ściekowych pokazano na rysunku 2. Wytrzymałość na ściskanie zmniejszyła się wraz ze wzrostem zawartości popiołów w próbce. Największe różnice w wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano po 7 dniach dojrzewania. Wyraźnie widoczny jest też spadek wytrzymałości początkowej betonu na ściskanie wraz ze wzrostem w nim zawartości popiołu. W stosunku do betonu referencyjnego zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonów B10P, B20P i B30P po 7 dniach dojrzewania wyniosło odpowiednio: 19,5; 38,6 oraz 58%. Jak wynika z badań [2], wpływ na wczesną wytrzymałość betonów ma P₂O₅, który przyczynia się do tworzenia fosforanu wapnia powodującego opóźnienie procesów wiązania. Po 56 dniach dojrzewania średnia wytrzymałość na ściskanie próbek zawierających 10% popiołu (B10P) zrównała się z wytrzymałością betonu referencyjnego (BR), a próbki B20P po 56 dniach uzyskały 90% wytrzymałości 28-dniowej betonu referencyjnego. Najmniejszą wytrzymałość na ściskanie uzyskał beton B30P, który po 56 dniach miał tylko 62% wytrzymałości 28-dniowej betonu referencyjnego BR. Autorzy [2, 11, 12] zaznaczają, że przy zawartości popiołów do 25% cementu (wagowo) można uzyskać wymaganą wytrzymałość konstrukcyjną betonu, wydłużając jego czas dojrzewania.

Na rysunku 3 zestawiono średnie wartości współczynników przewodzenia ciepła λ badanych betonów. Zastosowanie popiołu paleniskowego znacznie zmniejszyło przewodność cieplną badanych betonów (proporcjonalnie do ich zawartości objętościowej). W porównaniu

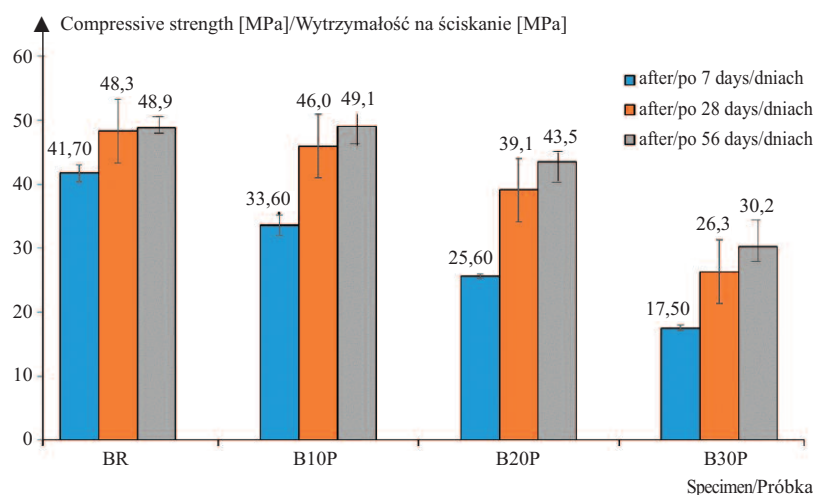


Fig. 2. Test results of compressive strength of concrete specimens

Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie badanych próbek betonowych

concrete, the λ value decreased to 75% in the case of B10P, 68% for B20P and 61% for B30P. A similar relation was observed when determining the thermal diffusivity coefficients a (Figure 4). The a values diminished compared to the reference concrete (BR) and were 90% of the reference value for B10P, 82% for B20P and 70% for B30P. However, the effect of the bottom ashes on the volumetric specific heat was slight (Figure 5).

The biggest downfall of the volumetric specific heat c_v , by 15% on average compared to the reference concrete BR, was observed for concrete B10P. The B20P and B30P concrete had a c_v value by 11% and 13%, respectively, lower than BR. The tests of specific heat were conducted after 28 days of curing. The lower falls of c_v for the samples with large bottom ash content can result from ashes reactivity and increased thermal accumulation. The tests should be repeated after 56 days of curing.

Summary

Searching for wastes suitable for recycling, to which another lifecycle would be imposed, is a global tendency in all industrial branches, including construction. Incineration of sewage sludges is the element of modern waste management, aiming at the total abandoning of waste storage. The incineration of sewage sludges resolves the problem of managing the pollution that is harmful to the environment and human health. The presented investigation shows that the bottom ashes from the thermal treatment of the sewage sludges can be utilized in structural concrete production. Adding 10% (by cement mass) of the bottom ash allows for a compressive strength similar to that of the reference concrete. The substitution of Portland cement with a more significant content of the bottom ash, even 20%, is possible, particularly if the curing time is extended.

The main technological problem is the variable chemical composition of the bottom ashes, the high content of P_2O_5 , and the potential presence of heavy metals. The obstacle is also a lack of standardization regarding the chemical and physical properties of the ashes from sewage sludge incineration. Such regulations are necessary since the

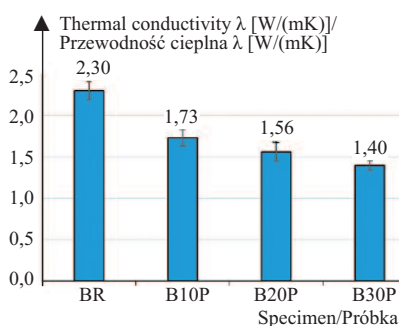


Fig. 3. The average values of thermal conductivity coefficients of the tested concretes
Rys. 3. Średnie wartości przewodności cieplnej badanych betonów

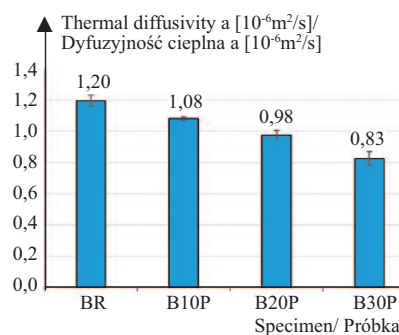


Fig. 4. The average values of thermal diffusivity of the tested concretes
Rys. 4. Średnie wartości współczynnika dyfuzyjności cieplnej badanych betonów

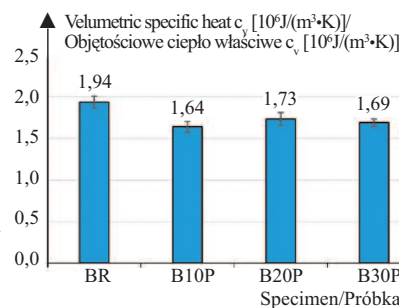


Fig. 5. The average values of volumetric specific heat of the tested concretes
Rys. 5. Średnie wartości objętościowego ciepła właściwego badanych betonów

z betonem referencyjnym współczynnik λ zmniejszył się do wartości: 75% w przypadku betonu B10P; 68% – B20P oraz do 61% w przypadku B30P. Podobną zależność zaobserwowano przy wyznaczeniu współczynników dyfuzyjności cieplnej a badanych betonów (rysunek 4). Ich wartość zmniejszyła się w odniesieniu do betonu referencyjnego (BR) i wyniosła w przypadku próbek B10P – 90% wartości referencyjnej; 82% w przypadku próbek B20P oraz 70% – próbek B30P wraz ze wzrostem objętości popiołów paleniskowych w badanym betonie. Mniejszy wpływ miało zastosowanie popiołów paleniskowych w betonach na ich objętościowe ciepło właściwe (rysunek 5).

Największy spadek objętościowego ciepła właściwego c_v , średnio o 15% w porównaniu z betonem referencyjnym BR zaobserwowano w przypadku betonów B10P. Dwa pozostałe betony uzyskały wartość c_v o 11% i 13% mniejszą w porównaniu z próbkami BR. Badania ciepła właściwego dotyczyły próbek po 28 dniach dojrzewania. Mniejsze spadki wartości c_v betonów z dużą zawartością objętościową popiołów paleniskowych w porównaniu z próbkami betonu referencyjnego mogą być spowodowane reaktywnością popiołów i zwiększoną akumulacją termiczną. Badania należałoby powtórzyć po 56 dniach dojrzewania.

Podsumowanie

Poszukiwanie odpadów nadających się do recyklingu, którym można nadać kolejny cykl życia, to globalny kierunek we wszystkich gałęziach przemysłu, w tym w budownictwie. Termiczne spalanie osadów ściekowych jest jednym z elementów nowoczesnej gospodarki odpadami, którego celem jest całkowita rezygnacja ze składowania. Spalanie osadów ściekowych rozwiązuje problem utylizacji zawartych w nich zanieczyszczeń szkodliwych dla środowiska i zdrowia człowieka. Jak pokazują przedstawione badania, popioły paleniskowe z termicznej obróbki osadów ściekowych mogą znaleźć zastosowanie w produkcji betonów konstrukcyjnych. Dodanie do nich 10% popiołu paleniskowego pozwala na uzyskanie wytrzymałości na ścisnienie porównywalnej z betonem referencyjnym. Możliwe jest zastosowanie większej ilości popiołu paleniskowego, nawet 20%, jako zamiennika cementu, szczególnie przy wydłużeniu czasu dojrzewania betonu.

Głównym problemem technologicznym jest zmienny skład chemiczny popiołów paleniskowych oraz duża zawartość P_2O_5 , a także potencjalna obecność metali ciężkich. Trudnością jest również brak uregulowań normalizacyjnych dotyczących chemicznych i fizycznych właściwości popiołów uzyskanych ze spalania osadów ściekowych, limitują-

rules for using fly ashes, formulated in the standard [18], are very rigorous, and it is impossible to make any corrections. The number of worldwide investigations of using ash in concrete as a partial replacement for cement proves that it is a promising material that will soon become practically useful.

cych możliwości ich wykorzystania w technologii betonów cementowych, tym bardziej że sformułowane w normie [18] zasady wykorzystania popiołu lotnego o stwierdzonej normowo jego przydatności są bardzo rygorystyczne i niemożliwe do jakiegokolwiek korekty. Liczba prowadzonych na świecie badań dotyczących zastosowania popiołów w betonach cementowych jako częściowego zamiennika cementu świadczy o tym, że jest to obiecujący materiał, który już niedługo może znaleźć praktyczne zastosowanie.

Received: 06.05.2024
Revised: 28.06.2024
Published: 21.08.2024

Wpłynął do redakcji: 06.05.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.06.2024 r.
Opublikowano: 21.08.2024 r.

References

- [1] Braguglia CM, Bagnuolo G, Gianico A, Mininni G, Pastore C, Mascolo G. Preliminary results of lab-scale investigations of products of incomplete combustion during incineration of primary and mixed digested sludge. *Environ Sci Pollut Res.* 2016; DOI 10.1007/s11356-015-5653-6.
- [2] Donatello S, Freeman-Pask A, Tyrer M, Cheeseman CR. Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. *Cement and Concrete Composites.* 2010; DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.002.
- [3] Lynn JC, Dhirv R, Ghataora G, West PR. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122>.
- [4] Hwang CL et al. Properties of alkali-activated controlled low-strength material produced with waste water treatment sludge, fly ash, and slag. *Constr. Build. Mater.* 2017; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.014>.
- [5] Yusuf RO, Noor ZZ, Din MDFMD, Abba AH. Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – areview. *Int. J. Glob. Environ.* 2012; 12: 214 – 228.
- [6] Kikuchi R. Recycling of municipal solid waste for cement production: Pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker. *Resour Conserv Recycl.* 2001; [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00077-X).
- [7] Nadal M, Schuhmacher M, Domingo JL. Cost – benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant: a case study. *Environ Sci Pollut Res.* 2009; DOI 10.1007/s11356-008-0063-7.
- [8] Ghiocel AN, Panaitescu VN. Using sewage sludge as an alternative fuel for the cement production process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018; DOI 10.1088/1757-899X/400/2/022029.
- [9] Chiou IJ, Wang KS, Chen CH-H, YLin Y-T. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incineratedash. *Waste Manage.* 2006; 26: 1453.
- [10] Hausteine E, Kuryłowicz-Cudowska A, Łuczkiwicz A, Fudala-Ksiazek S, Cieślak BM. Influence of Cement Replacement with Sewage Sludge Ash (SSA) on the Heat of Hydration of Cement Mortar. *Materials.* 2022; <https://doi.org/10.3390/ma15041547>.
- [11] 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>.
- [12] Szulej J, Ogrodnik P, Powęzka A, Sumorek A. Wpływ popiołów ze spalania komunalnych osadów ściekowych na cechy wytrzymałościowe betonu zawierającego recyklingowe kruszywo ceramiczne. *Materiały Budowlane.* 2023; 12: 42 – 46.
- [13] Jamshidi A, Jamshidi M, Mehrdadi N, Shasavandi A, Pacheco-Torgal F. Mechanical Performance of Concrete with Partial Replacement of Sand by Sewage Sludge Ash from Incineration. *Mater. Sci. Forum.* 2012; 730 – 732, 462 – 46.
- [14] Kosior-Kazberuk M. Application of SSA as Partial Replacement of Aggregate in Concrete. *Polish J. of Environ. Stud.* 2011; 20, 2: 365 – 370.
- [15] Giergiczyński Z, Król A. Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. *Journal of Hazardous Materials.* 2008; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.007>.
- [16] Kiper J, Głowacka A, Rucińska T. Analysis of the Variability of the Composition of Sewage Sludge Before and After Drying Treatment – SEM Studies. *Journal of Ecological Engineering.* 2019; DOI:10.12911/22998993/109864.
- [17] Zdeb T, Tracz T, Adamczyk M. Physical, mechanical properties and durability of cement mortars containing fly ash from the sewage sludge incineration process. *Journal of Cleaner Production.* 2022; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131055>.
- [18] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.
- [19] PN-EN-12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [20] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [21] PN-EN 450-1:2012. Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.