

Gabriel BOROWSKI¹, Magdalena GAJEWSKA², Elżbieta HAUSTEIN³

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Podstaw Techniki, Katedra Podstaw Techniki
ul. Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin
e-mail: g.borowski@pollub.pl

² Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Technologii Wody i Ścieków
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: mgaj@pg.gda.pl

³ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: haustein@pg.gda.pl

Możliwości zagospodarowania popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych w kotłach fluidalnych

Problem zagospodarowywania osadów ściekowych dotyczy głównie ich wykorzystania rolniczego, w tym rekultywacji terenów zdegradowanych. Zmiana wymagań prawnych i środowiskowych spowodowała konieczność poszukiwań nowych sposobów ich unieszkodliwiania. W Polsce od kilku lat obserwuje się wzrost zainteresowania termiczną metodą przekształcania osadów ściekowych. Zastosowana technologia spalania fluidalnego sprzyja zmniejszeniu ilości wytwarzanych i zdeponowanych osadów ściekowych. Ich termiczne przekształcanie nie eliminuje jednak problemu występowania m.in. metali ciężkich w uzyskanych popiołach, a jedynie prowadzi do związania ich w formy bardziej stabilne, ograniczając w ten sposób stopień szkodliwości dla środowiska naturalnego. W artykule zaprezentowano metodę zestalenia popiołów powstałych z termicznego przekształcania osadów ściekowych w blokach cementowych. Analizując właściwości popiołów z fluidalnego spalania osadów ściekowych, zaproponowano koncepcję alternatywnego rozwiązania - ich przetworzenie w postaci zeszklo-nych mikrokulek. Proponowana metoda zapewni neutralizację substancji niebezpiecznych w nich zawartych. Omówiono potencjalne korzyści ekologiczne i ekonomiczne oraz wymieniono dziedziny potencjalnego wykorzystania gospodarczego w zależności od wielkości średnic mikrokulek. Mikrokulki szklane mogą być, między innymi, stosowane w przemyśle tworzyw sztucznych do uzyskania wytrzymałych wyrobów z PCV, a także jako zamiennik tzw. proppantów w procesie szczelinowania hydraulicznego przy wydobyciu gazu łupkowego i ropy naftowej.

Słowa kluczowe: osad ściekowy, spalanie fluidalne, popiół, zestalenie, zeszkliwienie

Wprowadzenie

Spalanie fluidalne osadów ściekowych, zalecane jako najlepsza dostępna technologia ich przetwarzania, skutkuje powstaniem znacznej ilości popiołów. Prognozy Krajowego programu oczyszczania ścieków komunalnych zakładają, że ich ilość ulegnie zwiększeniu o około 181 tys. Mg (2015) w stosunku do ich wytworzonej

ilości w 2010 r. (43,7 tys. Mg) [1]. Powstałe popioły z procesu oczyszczania gazów spalinowych oraz odlotowych, zgodnie z katalogiem odpadów (DzU Nr 112, poz. 1206) określane kodami (19 01 06 lub 19 01 07 oraz 19 01 14), należą do grupy odpadów niebezpiecznych [2, 3]. Popioły te powinny być, jak sugerują Białowiec i inni [4], wykorzystywane w środowisku po wcześniejszym ich przetworzeniu. Obecnie istotną trudność sprawia jakość pozyskanych popiołów. Ich właściwości w dużej mierze zależą od rodzaju i jakości spalanych osadów ściekowych [5-7].

Popularnym rozwiązaniem przetwarzania popiołów z energetyki jest ich zestawianie w blokach cementowych lub spiekanie do postaci granulatu [8, 9]. Granulaty stanowią zamienniki kruszywa (np. keramzyt, pollytag) i znajdują praktyczne zastosowanie m.in. jako wypełniacz w hydrofitowych systemach oczyszczania ścieków. Ich wykorzystanie zwiększa efektywność usuwania niektórych zanieczyszczeń obecnych w ściekach [4].

Proces zeszkliwienia (witryfikacji) popiołów często jest wykorzystywany do neutralizacji składników niebezpiecznych w nich zawartych, w tym metali ciężkich [10-14]. Metoda witryfikacji pozwala uzyskać produkt bezpieczny dla środowiska, chętnie wykorzystywany w przemyśle ceramicznym czy w budownictwie [15].

Uzyskanie szklanej postaci wymaga stopienia popiołu ($1300\div 1450^{\circ}\text{C}$), a następnie jego intensywnego schłodzenia [16, 17]. Zeszklenie popiołów ze spalania fluidalnego osadów ściekowych możliwe jest dzięki krzemionce (SiO_2) obecnej w ich masie. Pozytywny efekt osiągnąć można również przy współudziale popiołów lotnych ze spalania energetycznego węgla kamiennego, gdzie udział SiO_2 jest dwukrotnie większy [18]. Innym rozwiązaniem może być dodatek rozdrobnionego szkła gospodarczego. Jego udział obniża temperaturę reakcji syntezy termicznej i w konsekwencji zmniejsza zapotrzebowanie na energię [19].

Metoda witryfikacji popiołów pozyskanych ze spalania fluidalnego osadów ściekowych umożliwi powstanie produktów o nieregularnych lub zaokrąglonych kształtach [20-24]. Ich wymiary wynoszą od kilku milimetrów do kilkudziesięciu centymetrów i więcej.

Celem pracy jest zaprezentowanie prowadzonego na terenie oczyszczalni „Wschód” sposobu przeróbki popiołów ze spalania osadów ściekowych w kotłach fluidalnych na postać bezpieczną do składowania oraz przedstawienie alternatywnej koncepcji neutralizacji szkodliwych substancji z możliwością uzyskania nowego produktu.

Proponuje się zeszklenie analizowanych popiołów do postaci mikrokulek o średnicy rzędu $0,05\div 2,0$ mm. Obecnie do produkcji mikrokulek wykorzystuje się popioły lotne - bogate w glinokrzemiany - z elektrowni węglowych (technologia firmy RockTron z Wielkiej Brytanii) [25]. Produkty te stosowane są jako mineralne wypełniacze funkcyjne do wytwarzania tworzyw sztucznych metodą ekstruzji, formowania wtryskowego i wytłaczania. Dotychczas nie prowadzono prac badawczych i rozwojowych nad możliwością produkcji szklanych mikrokulek z popiołów pochodzących z fluidalnego spalania osadów ściekowych.

1. Charakterystyka popiołów i ich przetwarzanie

Technologia fluidalnego spalania osadów ściekowych realizowana na terenie oczyszczalni „Wschód” (woj. pomorskie) skutkuje powstaniem dwóch rodzajów odpadów popiołowych:

- **typ A** - wytrącone w I zespole filtrów workowych (barwa pomarańczowo-rdzawa),
- **typ B** - pozostałości z oczyszczania spalin w II zespole filtrów workowych (barwa biała).

Wyniki zrealizowanych w oczyszczalni badań składu chemicznego obu typów popiołów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny popiołów (typy A i B) powstających ze spalania fluidalnego osadów ściekowych w oczyszczalni „Wschód” (woj. pomorskie) [dane oczyszczalni „Wschód”]

Table 1. The chemical composition of the ashes (types A and B) resulting from the incineration of sewage sludge in the fluidized bed treatment plant “Wschód” (Pomeranian voivodeship) [data from “Wschód”]

Składnik	Zawartość w popiołach % s.m.	
	typ A	typ B
Tlenek krzemu (SiO ₂)	25,48	< 0,001
Tlenek fosforu(V) (P ₂ O ₅)	21,97	< 0,001
Tlenek wapnia (CaO)	17,12	64,80
Tlenek potasu (K ₂ O)	1,75	< 0,001
Siarka (S)	0,48	3,22
Żelazo (Fe)	5,99	0,014
Metale ciężkie		
Aluminium (Al)	4,99	0,002
Cynk (Zn)	0,287	0,001
Miedź (Cu)	0,091	< 0,001
Ołów (Pb)	0,014	0,001
Chrom (Cr)	0,013	< 0,001
Nikiel (Ni)	0,009	< 0,001
Arsen (As)	0,001	< 0,001

Pod względem składu chemicznego powstające popioły różnią się w sposób istotny. Przedstawione dane dotyczące popiołu z I zespołu filtrów workowych (typ A) potwierdzają obecność głównie trzech tlenków: krzemu (SiO₂), fosforu (P₂O₅) oraz wapnia (CaO). Odnotowana ilość tlenku żelaza (FeO lub Fe₂O₃) na poziomie ok. 6% nadaje odpadowi (typ A) rdzawe zabarwienie, które nie powinno obniżać cech użytkowych komponentów z jego udziałem.

W przypadku popiołu typu B głównym składnikiem jest tlenek wapnia (CaO) - ok. 65%, przy jednoczesnym braku SiO₂. Wysoka zawartość CaO w ogólnej



masie odpadu jest efektem wykorzystania preparatu wapiennego Sorbacal w procesie spalania fluidalnego osadów ściekowych. Jego obecność w strumieniu spalin z węglem aktywnym neutralizuje kwaśne gazy, usuwa metale ciężkie oraz wychwytuje furany i dioksyny. Analizowany popiół zawiera małą ilość żelaza, aluminium i cynku, natomiast 6-krotnie większą ilość siarki w porównaniu z popiołem typu A (tab. 1). Uzyskane z oczyszczalni wyniki badań potwierdzają słuszość zakwalifikowania obu odmian popiołów do odpadów niebezpiecznych.

Utylizacja popiołu typu B do postaci bezpiecznej i możliwej do składowania stwarza dla przedsiębiorstwa znaczne problemy. Metoda utylizacji tych popiołów polega na zestalaniu w blokach cementowych o rozmiarach ok. $1 \times 1 \times 1$ m. Do odpadów dodawane są popioły z elektrowni opalanej węglem. Jako materiały wiążące wykorzystywane są cement CEM III/A 32,5N, woda oraz preparat ChrysoFluid. Otrzymana mieszanka zawiera 25% popiołu z elektrociepłowni, 45% cementu oraz niecałe 30% popiołu ze spalarni osadów. Proces formowania oraz dojrzewania sporządzonego kompozytu cementowego jest realizowany w workach jutowych i trwa 7 dni. Należy nadmienić, że spalanie osadów powoduje istotne zmniejszenie ich objętości, jednak przyjęta technologia zagospodarowania popiołu typu B powoduje ponowne zwiększenie objętości (prawie trzykrotne) w celu zmiany ich klasyfikacji (kodu odpadu) i możliwości ich deponowania na składowisku.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki przeprowadzonych w oczyszczalni testów na wymywalność poszczególnych składników zestalonych mieszanek cementowych z udziałem popiołu typu B oraz popiołu z elektrociepłowni.

Popioły ze spalania fluidalnego osadów ściekowych charakteryzuje z reguły duża odporność na wymywanie metali ciężkich (tab. 2). Średnie wartości wymywania spełniają jednak kryteria zawarte w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki (DzU 2013, poz. 38) [26]. Podobne wyniki, spełniające wymagania powyższego rozporządzenia, otrzymali Białowiec i inni [4].

Biorąc pod uwagę wytyczne Rozporządzenia Ministra Środowiska (DzU 2009, Nr 27, poz. 169) [27], stwierdzono ponadnormatywne przekroczenie stężenia wymywalności jonów siarczanowych i chlorkowych. Dodatkowo, przekroczenie wymywalności związków rozpuszczalnych, w tym węgla organicznego oraz niektórych metali ciężkich (Se, Pb, Sb, Cu oraz As), skutkować może negatywnym oddziaływaniem na środowisko przyrodnicze. Wymienione związki są łatwo przyswajalne przez organizmy roślinne i zwierzęce w warunkach wodnych i glebowych.

W przypadku wytycznych Rozporządzenia Ministra Gospodarki (DzU 2013, poz. 38) uzyskane wartości wymywalności dopuszczają możliwość składowania zestalonych bloków cementowych z udziałem popiołów pozyskanych ze spalania fluidalnego osadów ściekowych na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości analizowanych kompozytów cementowych z mieszanką popiołu typu B oraz popiołu z elektrociepłowni.

Zastosowana technologia zmieszania popiołu (typ B) z poszczególnymi składnikami tworzącymi kompozyt cementowy skutkuje małą wytrzymałością po 7 dniach jego dojrzewania. Uzyskana wartość ($< 0,5$ MPa) wynika z ograniczonej ilości

glinianów i glinokrzemianów wapnia, kształtujących się podczas procesu hydratacji sporządzonej mieszanki cementowej.

Tabela 2. Wyniki badań wymywalności zanieczyszczeń z zestalonych próbek popiołu typu B [dane oczyszczalni „Wschód”]

Table 2. Results of the leaching of pollutants from the solidified ash samples of type B [data from “Wschód”]

Lp.	Składnik	Wartość wymywania mg/kg s.m.	Dopuszczalne wartości wymywania mg/kg s.m. według	
			DzU 2009, Nr 27, poz. 169	DzU 2013, poz. 38
1	Stale związki rozpuszczone	55 727 ± 11 491 *	–	60 000
2	Siarczany (SO ₄ ²⁻)	15 238 ± 3118	500	20 000
3	Chlorki (Cl ⁻)	2696 ± 527	1000	15 000
4	Rozpuszczony węgiel organiczny	518 ± 121	–	800
5	Fluorki (F ⁻)	12,0 ± 3,0	25	150
6	Bar (Ba)	5,0 ± 1,5	3,0	100
7	Selen (Se)	< 5,0	1,0	0,5
8	Ołów (Pb)	< 3,0	0,5	10
9	Antymon (Sb)	< 2,0	0,3	0,7
10	Molibden (Mo)	< 1,0	1,0	10
11	Miedź (Cu)	0,68 ± 0,18	0,5	50
12	Cynk (Zn)	0,63 ± 0,16	2,0	50
13	Chrom (Cr)	< 0,4	0,5	10
14	Nikiel (Ni)	< 0,4	0,5	10
15	Arsen (As)	< 0,2	0,1	2
16	Kadm (Cd)	< 0,01	0,02	1
17	Rtęć (Hg)	< 0,01	0,05	0,2

* wartości średnie ± odchylenie standardowe

Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałościowych zestalonych próbek popiołu typu B [dane oczyszczalni „Wschód”]

Table 3. Results of strength tests of solidified ash samples of type B [data from “Wschód”]

Parametr	Jednostka	Wynik pomiaru			
		1	2	3	średnia
Wymiary próbki	mm	99,8×100,3	98,9×101,1	98,9×103,5	99,2×101,6
Wytrzymałość na ściskanie	kN/m ²	496,1	486,0	456,2	479,4
Odształcenia graniczne	%	2,25	2,44	4,57	3,08
Wytrzymałość na ścinanie	kN/m ²	107,9	98,9	88,6	98,5

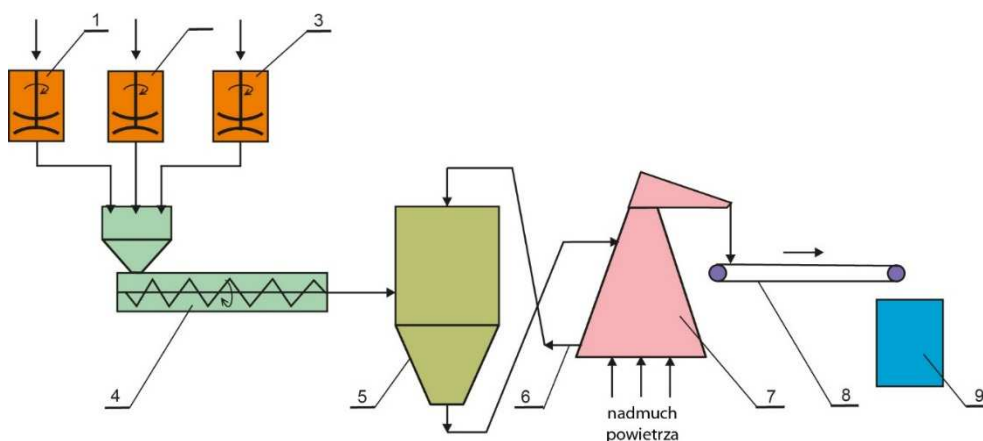


Pozytywnym aspektem przedstawionego sposobu zestalania popiołów typu B pozyskiwanych z termicznego przekształcania osadów ściekowych jest neutralizacja szkodliwych substancji w nich zawartych. Biorąc pod uwagę uzyskane z oczyszczalni wyniki badań (tab. 2 i 3), zestalone popioły można gromadzić na składowisku odpadów. W przypadku wykorzystania tego popiołu w produkcji materiałów budowlanych należy przeprowadzić dalsze badania dotyczące odpowiedniej i bezpiecznej ich ilości w cemencie.

2. Alternatywny sposób przetwarzania popiołów

Koncepcja zagospodarowania popiołów pochodzących z fluidalnego spalania osadów ściekowych zakłada przetworzenie (witryfikację) do postaci szklanych kulek o średnicy poniżej 2 mm (rys. 1). Technologia wytwarzania polega na:

- przygotowaniu materiału odpadowego do roztopienia,
- nagrzewaniu i roztopieniu w piecu wysokotemperaturowym,
- intensywnym schłodzeniu ciekłej materii z jednoczesnym wytworzeniem fazy szklistej.



Rys. 1. Schemat linii technologicznej produkcji mikrokulek z popiołów: 1 - zbiornik popiołów z fluidalnego spalania osadów ściekowych, 2 - zbiornik popiołów lotnych pochodzących z elektrowni węglowych, 3 - zbiornik dodatków modyfikujących, 4 - mieszalnik ślimakowy, 5 - piec indukcyjny tyglowy, 6 - nawrót frakcji gruboziarnistej, 7 - suszarka przedmuchowa, 8 - taśmociąg transportowy, 9 - zbiornik mikrokulek

Fig. 1. Schematic of technological line for production of microspheres from the ashes: 1 - container of ashes from fluidized bed combustion of sewage sludge, 2 - tank of fly ash from coal-fired power plants, 3 - tank of modifying additives, 4 - screw mixer, 5 - crucible induction furnace, 6 - return of the coarse fraction, 7 - a blow dryer, 8 - transport conveyor, 9 - tank of microspheres

Do mieszalnika ślimakowego (4) podawane są popioły pochodzące zarówno z fluidalnego spalania osadów ściekowych, jak i z elektrowni węglowych. Dodawane są także modyfikatory (na przykład kwas borowy), ułatwiające upłynnienie

wsadu w piecu. Mieszanka roztopiona jest w piecu indukcyjnym tyglowym (5), a następnie faza ciekła (wylewka) podawana jest do suszarki z intensywnym nadmuchem powietrza (7). Przedmuchi powietrza dezintegruje wylewkę na drobne cząstki oraz schładza tworząc szklane kulki. Drobne frakcje kulek unoszone są prądem powietrza przez górną część suszarki i opadają na taśmociąg (8), a następnie do zbiornika (9). Większe i cięższe części nawracane są (6) do ponownego roztopienia w piecu indukcyjnym (5). Proponowana metoda nagrzewania indukcyjnego należy do najbardziej rozpowszechnionych w przemyśle. Umożliwia generowanie dużej mocy grzewczej w stosunkowo krótkim czasie nagrzewania wsadu. Do nagrzewania i roztopiania popiołów mogą być stosowane także inne rodzaje pieców:

- obrotowe - zużywają znaczne ilości paliwa (gazu ziemnego);
- oporowe (metoda Joule'a) - wykorzystują ciepło powstające podczas przepływu prądu elektrycznego przez elementy grzejne, wymagają długiego czasu nagrzewania;
- mikrofalowe - przejmowanie ciepła następuje całą objętością wsadu, co w efekcie umożliwia skrócenie czasu przy zastosowaniu mniejszych temperatur nagrzewania;
- plazmowe - stosowane m.in. do zeszkliwienia odpadów medycznych w warunkach laboratoryjnych [28, 29], instalacje przemysłowe są bardzo kosztowne.

3. Gospodarcze wykorzystanie zeszklnych popiołów z osadów ściekowych

Zeszkłone popioły, w formie mikrokulek szklanych, mogą pełnić rolę zamiennika tradycyjnych materiałów, takich jak kreda, talk czy piasek. Produkty te wykorzystywane są do czyszczenia zarówno powierzchni metalowych, jak i niemetalowych. Ich silny strumień usuwa pozostałości np. nalotów barwnych, starych klejów, zgorzelin z powierzchni powłok malarskich, tworzyw sztucznych czy miejsc spawania.

Jednym z proponowanych obszarów praktycznego zastosowania mikrokulek (o średnicy do 0,5 mm) jest przemysł tworzyw sztucznych, malarski oraz lakierniczy. Uzyskany produkt może być wykorzystywany do:

- redukcji masy żywic termoplastycznych, termoutwardzalnych i niektórych elastomerów oraz uzyskania niższej lepkości;
- poprawy przepływu żywic w kompozytach, w tworzywach termoplastycznych oraz w produkcji powłok odpornych na zarysowania i na korozję;
- produkcji farb antykondensacyjnych i powłok izolacji termicznej, kitów silikonowych oraz tynków szpachlowych - zmniejszenie kurczliwości powłok oraz poprawa ich gładkości;
- produkcji sztucznego marmuru w urządzeniach sanitarnych - zwiększenie odporności termicznej;
- produkcji lekkich szpachlówek, kitów, klejów oraz mas łączących na bazie żywic, np. PCV z laminatami w konstrukcjach typu sandwich.

Mikrokulki szklane o średnicy od 0,5 do 2 mm mogą pełnić rolę materiału pod-sadzkowego w procesie szczelinowania hydraulicznego przy wydobyciu gazu łup-kowego i ropy naftowej. Mogą stanowić zamiennik tzw. proppantów. W chwili obecnej stosowane są cztery typy tego produktu: frakcje piasku krzemowego, piasek otoczony żywicą, spiekane boksyty oraz mikrokulki ceramiczne.

Obszarami potencjalnego zastosowania mikrokulek szklanych pozyskanych z popiołów ze spalania fluidalnego osadów ściekowych są następujące dziedziny przemysłu:

- wydobywczy, jako dodatek do cieczy wiertniczej i do betonu wiertniczego przy odwiertach;
- kompozytów, farb i klejów, jako wypełniacz;
- samochodowy, do produkcji części z tworzyw sztucznych, m.in.: kół kierownicy, pływaków zbiornika paliwa, zderzaków;
- materiałów budowlanych do produkcji powłok o zwiększonej odporności termicznej, kitów silikonowych, tynków szpachlowych, zapraw murarskich;
- meblarski, wykończenia wnętrz, m.in.: rzeźby, dekoracje ścienne, imitacje starych ram do obrazów;
- elektryczny i elektroniczny - ze względu na właściwość niskiej stałej dielektrycznej;
- naftowy - do powłok stanowiących izolację termiczną w transporcie ropy naftowej;
- lotniczy i jachtowy - do lekkich szpachlówek, kitów i klejów;
- kosmetyczny - do kremów złuszczących.

Podsumowanie

Wdrożenie w przyszłości technologii produkcji mikrokulek szklanych z popiołów, pochodzących ze spalania fluidalnego osadów ściekowych, przyniesie korzyści ekologiczne w postaci unieszkodliwienia związków niebezpiecznych w nich zawartych. Przewidywane korzyści ekonomiczne rynku europejskiego, związane ze ich sprzedażą, szacowane są na około 1 mln euro. Przykład stanowić może rynek brytyjski, gdzie w chwili obecnej produkuje się mikrokulki z popiołów pochodzących z elektrowni węglowych. Popioły te mogą być zmieszane z popiołami ze spalania osadów ściekowych, co zwiększy udział krzemionki niezbędnej do procesu zeszkliwienia. Propozycja wykorzystania technologii witrafikacji popiołów do postaci mikrokulek skutkować może ograniczeniem ich ilości deponowania w środowisku. Spełnienie wymogów potencjalnych odbiorców stworzy szerokie możliwości wykorzystania nowego produktu w praktyce. Uzasadnione jest zatem rozpoczęcie prac badawczych i rozwojowych nad przekształcaniem popiołów ze spalania osadów ściekowych metodą witrafikacji.



Literatura

- [1] IV Aktualizacja Krajowego programu oczyszczania ścieków komunalnych (roboczy projekt), Ministerstwo Środowiska, Warszawa, październik 2013 (www.kzgw.gov.pl).
- [2] Kępys W., Pomykała R., Pietrzyk J., Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych, *Inżynieria Mineralna* 2013, 1(31), 11-18.
- [3] Gawdzik J., Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych na przykładzie wybranej oczyszczalni ścieków, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2012, 15, 1, 5-15.
- [4] Białowiec A., Janczukowicz W., Krzemieniewski M., Możliwości zagospodarowania popiołów po termicznym unieszkodliwianiu osadów ściekowych w aspekcie regulacji prawnych, *Środowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska* 2009, 11, 959-971.
- [5] Bień J.D., Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2012, 15, 4, 439-449.
- [6] Kępys W., Kruszywo z drobnoziarnistych odpadów niebezpiecznych, *Inżynieria Ekologiczna* 2010, 23, 70-76.
- [7] Hycnar J.J., Paleniska fluidalne przykładem racjonalnego rozwiązywania problemów odpadów, *Polityka Energetyczna* 2006, 9, zeszyt specjalny, 365-376.
- [8] Plewa F., Popczyk M., Zajac A., Pierzyna P., Analiza możliwości wykorzystania odpadu energetycznego z mokrego odsiarczania spalin (100105) w mieszaninach zestalających w kopalniach węgla kamiennego, *Polityka Energetyczna* 2012, 15(3), 147-157.
- [9] Wystalska K., Sobik-Szołtysek J., Bień J., Vitrification and devitrification of ash after sewage sludge, *Annual Set The Environment Protection - Rocznik Ochrona Środowiska* 2013, 15, 181-191.
- [10] Basegio T., Leao A.P.B., Bernardes A.M., Bergmann C.P., Vitrification: An alternative to minimize environmental impact caused by leather industry wastes, *Journal of Hazardous Materials* 2009, 165(1-3), 604-611.
- [11] Bień J., Celary P., Morzyk B., Sobik-Szołtysek J., Wystalska K., Effect of additives on heavy metal immobilization during vitrification of tannery sewage sludge, *Environment Protection Engineering* 2013, 39(2), 33-40.
- [12] Bingham P.A., Hand R.J., Vitrification of toxic wastes: A brief review, *Advances in Applied Ceramics* 2006, 105(1), 21-31.
- [13] Kavouras P., Kaimakamis G., Ioannidis T.A. et al., Vitrification of lead-rich solid ashes from incineration of hazardous industrial wastes, *Waste Management* 2003, 23, 361-371.
- [14] Xiao Y., Oorsprong M., Yang Y., Voncken J.H.L., Vitrification of bottom ash from a municipal solid waste incinerator, *Waste Management* 2008, 28, 1020-1026.
- [15] Uzunow E., Osady ściekowe w produkcji materiałów budowlanych, *Wodociągi - Kanalizacja* 2009, 10(68).
- [16] Donald J.W., *Waste Immobilization in Glass and Ceramic Based Hosts: Radioactive, Toxic and Hazardous Wastes*, John Wiley & Sons 2010, 526.
- [17] Kordylewski W., Zacharczuk W., Kasprzyk K., Modyfikacja popiołu i żużla metodą wityfikacji, *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* 2003, 37, 84-88.
- [18] Lelusz M., Ocena zawartości aktywnego SiO₂ w popiołach lotnych wytwarzanych w obiektach energetycznych północno-wschodniej Polski, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2012, 3, 179-184.
- [19] Borowski G., Application of vitrification method for the disposal of municipal sewage sludge, *Annual Set The Environment Protection - Rocznik Ochrona Środowiska* 2013, 15, 575-583.
- [20] Bernardo E., Dal Maschio R., Glass-ceramics from vitrified sewage sludge pyrolysis residues and recycled glasses, *Waste Management* 2011, 31(11), 2245-2252.

- [21] Colombo P., Brusatin G., Bernardo E., Scarinci G., Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 2003, 7(3), 225-239.
- [22] Erol M., Kucukbayrak S., Ersoy-Mericboyu A., Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash, *Journal of Hazardous Materials* 2008, 153(1-2), 418-425.
- [23] Kikuchi R., Vitrification process for treatment of sewage sludge and incineration ash, *Journal of the Air & Waste Management Association* 1998, 48, 1112-1115.
- [24] Sobiecka E., Sroczynski W., Fly ash vitrification as the effective physico-chemical waste stabilization method, *Biotechnology and Food Science* 2011, 75(2), 35-38.
- [25] Strona internetowa RockTron Mineral Services Ltd.: www.rktron.com (dostęp dn. 13.04.2014 r.).
- [26] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu, DzU 2013, poz. 38.
- [27] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 stycznia 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzeniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, DzU 2009, Nr 27, poz. 169.
- [28] Bień J., Wystalska K., Efekty termicznego przekształcania żużla pochodzącego z procesu unieszkodliwiania odpadów medycznych, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2009, 41, 437-445.
- [29] Sobiecka E., Cedzyska K., Smolinska B., Vitrification as an alternative method of medical waste stabilization, *Fresenius Environmental Bulletin* 2010, 19, 3045-3048.

Possibilities of Ashes Utilization from Sewage Sludge Thermal Processing in a Fluidized Bed Boiler

The problem of sewage sludge processing relates mainly to its agricultural use, including the restoration of degraded land. Changing the legal and environmental requirements made it necessary to search for new techniques of disposal. In Poland, for several years there has been increased interest in using thermal treatment of sewage sludge. The used technology of fluidized bed combustion helps to reduce the amount of generated and deposited sludge. The thermal processing does not eliminate the problem of occurrence of heavy metals in the ash obtained, only results in binding them in the more stable form, thus reducing the degree of harmfulness to the environment. The paper presents a method for solidification of ash from the incineration of sewage sludge in cementitious compositions. Analyzing the characteristics of ashes from fluidized bed combustion of sewage sludge, there was proposed the concept of alternative solutions - processing in the form of vitrified microspheres. The proposed method provides neutralizing the hazardous substances contained therein. The potential environmental and economic benefits, and outlined areas of potential economic use, depending on the size of the diameter of the microspheres, were discussed. Glass microspheres may be, inter alia, used in the plastics industry to get durable PVC products, and also as a replacement of 'proppants' in hydraulic fracturing of the shale gas and oil.

Keywords: sewage sludge, fluidized bed combustion, ash, solidification, vitrification

