

Gabriel Borowski

## PRZETWARZANIE POPIOŁU ZE SPALANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA MATERIAŁ BUDOWLANY

**Streszczenie.** W publikacji przedstawiono sposób przetwarzania popiołów ze spalania osadów ściekowych w celu uzyskania nietoksycznego produktu przydatnego w budownictwie. Polega ona na zmieszaniu popiołów z określonymi składnikami, następnie brykietowaniu tej mieszaniny oraz spiekaniu otrzymanych brykietów. Podczas spiekania następuje zeszkliwienie powierzchni brykietu. Badania laboratoryjne obejmowały głównie określenie właściwości mechanicznych spieków, mrozoodporności oraz nasiąkliwości. Wyniki badań wskazują na możliwość neutralizacji substancji niebezpiecznych zawartych w spiekanych brykietach. Uzyskany produkt okazał się bezpieczny dla środowiska w przypadku jego gospodarczego wykorzystania.

**Słowa kluczowe:** osad ściekowy, spalanie, popioły, brykietowanie, spiekanie.

### WPROWADZENIE

Powszechnie stosowaną metodą unieszkodliwiania odpadów ściekowych zawierających substancje szkodliwe dla środowiska jest termiczna utylizacja. Spalanie odpadów stwarza jednak problemy zagospodarowania popiołów z komór spalania, odfiltrowanego popiołu lotnego, nasyconych sorbentów i ścieków technologicznych [Mokrzycki, Uliasz-Bocheńczyk 2006]. Instalacje do termicznej utylizacji odpadów, pracujące w oparciu o najnowsze rozwiązania technologiczne, pozwalają na emitowanie do atmosfery gazu spalinowego o znikomej zawartości szkodliwych metali ciężkich i pyłów. Składniki te pozostają jednak w popiele lub są wyłapywane na sorbentach pozostających jako wtórny odpad po procesie spalania. Zarówno popioły jak i zużyte sorbenty należy traktować jako materiały potencjalnie toksyczne [Haugsten, Gustavson 2000].

Osady ściekowe, powstające w oczyszczalniach ścieków są odpadami, które skutecznie są unieszkodliwiane i zagospodarowane w rekultywacji gleb, w rolnictwie bądź produkcji kompostów [Siuta 2005]. Coraz częściej podawane są także procesowi termicznej utylizacji. W Polsce istnieje ponad 2200 oczyszczalni ścieków komunalnych oraz prawie 1700 oczyszczalni ścieków przemysłowych. Produkują one rocznie ok. 450 tys. Mg suchej masy (s.m.) osadów ściekowych, z czego aż 188 tys. Mg s.m. kierowane są do składowania oraz do spalania. Produkty spalania także kieruje się do składowania [Kosturkiewicz 2006].

---

Gabriel BOROWSKI – Katedra Podstaw Techniki, Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska.

W Polsce często prowadzi się współspalanie osadów ściekowych z węglem w kotłach rusztowych z rusztem posuwisto-zwrotnym lub walcowym. Osady współspalanie z węglem brunatnym powinny być odwodnione mechanicznie. W przypadku współspalanie z węglem kamiennym natomiast osady powinny być termicznie podsuszone. Ilość osadów ściekowych przeznaczona do współspalania w mieszance paliwowej nie powinna przekraczać 10% masowo [Niemiec, Zamorska 2006].

Stosuje się również współspalanie osadów ściekowych wraz z innymi paliwami w piecu cementowym do wypalania klinkieru. W piecach cementowych temperatura spalania dochodzi do 2000 °C. Warunki panujące w piecu są wystarczające do całkowitej neutralizacji wielkocząsteczkowych węglowodorów oraz dioksyn. Osady przeznaczone do spalania w piecu cementowym muszą być odpowiednio przygotowane. Należy określić ich stan fizyczny, wartość opałową, skład chemiczny, toksyczność, wilgotność, jednorodność, uziarnienie oraz gęstość [Ślądceczek, Niemczyk 2006].

Kolejną możliwością termicznego przekształcania osadów ściekowych jest ich współspalanie z odpadami komunalnymi. Rozwiązanie to ma na celu przede wszystkim ograniczenie kosztów utylizacji odpadów komunalnych i osadów ściekowych. Proces współspalania prowadzi się w piecach obrotowych lub rusztowych. Obrotowy piec bębnowy wykonany jest z wymurowanej materiałem ceramicznym rury, usytuowanej z lekkim spadkiem do poziomu. Zasilanie osadem odbywa się od strony wyżej usytuowanego końca pieca. Na skutek obrotowego ruchu bębna i jego pochylenia, osad poprzesuwa się ku przeciwnemu końcowi bębna, gdzie zlokalizowana jest komora dopalania oraz wylot spalin i popiołu. Wadą pieców obrotowych są duże rozmiary bębnowców oraz wysokie straty ciepła przez promieniowanie i unoszenie wraz ze spalinami [Mokrzycki, Uliasz-Bocheńczyk 2006].

Do spalania różnorodnych mieszanek paliwowych wykorzystuje się także kotły fluidalne. Charakteryzują się one niskimi wartościami temperatur spalania, co wpływa przede wszystkim na ograniczenie emisji zwłaszcza związków azotu. Osady ściekowe mogą być dostarczane do komory paleniskowej kotła fluidalnego bez wstępnego przygotowania. Pewnym ograniczeniem tej technologii jest niska temperatura spalania wynosząca 850 °C. Spalanie osadów wymaga ponadto zainstalowania skutecznych urządzeń odpylających.

Piec fluidalny ma kształt cylindrycznej komory, gdzie w dolnej części powyżej perforowanego dna znajduje się piaskowe złożo fluidalne. Osad wraz z paliwem dodatkowym wprowadza się do złoża fluidalnego. Powietrze zasysane do przestrzeni złoża służy zarówno do fluidyzacji jak i do spalania osadu. Dzięki temu spalanie przebiega intensywnie i równomiernie. Spalanie w kotle fluidalnym zapewnia niemal całkowitą likwidację części organicznych, których zawartość w popiołach nie przekracza 3%. Gazy spalinowe, powietrze, woda odparowana z osadu i pył mineralny opuszczają piec przez kopułę w górnej części komory spalania skąd zostają skierowane do przewodu spalinowego. Układ oczyszczania składa się z elektrofiltru, płuczki wieżowej gazu, skrubera, filtrów workowych i wentylatora odprowadzającego resztę spalin do komina. Spaliny zawierają pył o wielkości cząstek około 50 mikronów. Są one zawieszane

w gazie w elektrofiltrze naładowane są ładunkiem elektrycznym, zostają ściągnięte polem elektrycznym do elektrod. Wraz z pyłem usuwane są metale ciężkie adsorbujące na powierzchni cząstek pyłu. Cząstki pyłu przechwycone w elektrofiltrze trafiają do lejów znajdujących się na jego dnie. Następnie zostają pneumatycznie odprowadzone do silosu skąd zostają odebrane do utylizacji [Werther, Ogada 1999].

Proces technologiczny zagospodarowania popiołów ze spalania osadów ściekowych polega na jego przetworzeniu i uzyskaniu nietoksycznego produktu, albo poddaniu zestaleniu w kompozycjach cementowych lub za pomocą żywic syntetycznych. Można też stosować powlekanie zestalonych produktów substancjami hydrofobowymi w celu zabezpieczenia przed pyleniem i wypłukiwania zanieczyszczeń wodą. Tak zabezpieczona ostateczna pozostałość po spalaniu odpadów może być bezpiecznie składowana na wysypiskach odpadów komunalnych [Kęps 2010]. Inne metody zagospodarowania popiołów polegają na zastosowaniu ich jako składnika kompozycji nawierzchni dróg asfaltowych lub betonowych. Popioły mogą stanowić także składnik zbrylonego wyrobu poddanego procesowi spiekania [Góralczyk i in. 2009].

## MATERIAŁ BADAWCZY

Przygotowano mieszaninę zawierającą popioły lotne ze spalania osadów ściekowych z przeznaczeniem do brykietowania. Popioły pobrano z kotła fluidalnego do spalania podsuszonych osadów wyposażonego w system oczyszczania spalin.

Największym problemem utrudniającym unieszkodliwienie osadów ściekowych są metale ciężkie. Okresowe przekroczenia zawartości kadmu i niklu uniemożliwiają rolnicze wykorzystanie osadów z dużych oczyszczalni ścieków, np. „Hajdów” w Lublinie, gdzie zdarzają się przekroczenia zawartości chromu, cynku i kadmu. Termiczna utylizacja niszczy organizmy chorobotwórcze. W produktach spalania pozostają metale ciężkie [Pająk 2009].

Zawartość metali ciężkich w popiołach zależy od ich początkowej zawartości w osadach i jest zależna od rodzaju i uciążliwości ścieku. W tabeli 1 zestawiono ekstremalne i najczęściej stwierdzane orientacyjne zawartości metali ciężkich w osadach ściekowych polskich oczyszczalni.

**Tabela 1.** Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych [Pająk 2009]

**Table 1.** Heavy metals contents in sewage sludge [Pająk 2009]

| L.p. | Pierwiastek | Typowe zawartości (mg/kg s.m.) | Ekstremalne zawartości (mg/kg s.m.) |
|------|-------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1    | Ołów        | 100 – 500                      | 2970                                |
| 2    | Kadm        | 1 – 20                         | 562                                 |
| 3    | Cynk        | 2500 – 4000                    | 10 000                              |
| 4    | Miedź       | 200 – 500                      | 1250                                |
| 5    | Nikiel      | 100 – 300                      | 950                                 |
| 6    | Chrom       | 250 – 700                      | 17 075                              |

Stężenie metali ciężkich wzrasta w popiele średnio 4–5-krotnie wskutek zmniejszenia masy odpadu po jego spalaniu. Łączna zawartość metali ciężkich w popiołach może wynosić wagowo do 2,5% suchej masy.

Popiół z elektrofiltru ma postać miałkiego mineralnego pyłu w kolorze od jasno do ciemnoszarego oraz jasnobrązowym. Składnikami popiołów są przede wszystkim tlenki:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  i  $\text{TiO}_2$  [Pajak 2009]. Na powierzchni cząstek popiołu kondensują metale ciężkie oraz absorbowane są wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Opady atmosferyczne wymywają z powierzchni cząstek te związki, które przenikają następnie do gleby i wód gruntowych. Z tego powodu lokowanie popiołów ze spalania na składowiskach jest kłopotliwe ze względu na konieczność zabezpieczenia przed pyleniem wtórnym i izolowanie przed skażeniem wód gruntowych.

Glinokrzemianowy skład chemiczny popiołów i amorficzna struktura fazowa czynią je atrakcyjnym materiałem w przemyśle cementowym, drogownictwie, budownictwie i rolnictwie, a także w zaawansowanych technologiach ceramicznych.

## METODYKA PRZETWARZANIA POPIOŁU

Stosuje się najczęściej dwa sposoby zagospodarowania pozostałości po spalaniu osadów ściekowych [Uzunow 2009]:

1. Utwardzanie popiołu w kompozycjach cementowych (zestalenie) i składowaniu tych bloków na wysypiskach komunalnych. Kompozycje cementowe można też wykorzystać do budowy dróg, głębokich fundamentów oraz obudowy wysypisk komunalnych. Ze względu na niebezpieczeństwo korozji konstrukcji betonowych i wymywanie się substancji toksycznych, w niektórych przypadkach kształtki cementowe pokrywa się warstwą hydrofobową, np. smołą lub asfaltami. Asfalty zabezpieczają zawarte w kompozycjach cząstki popiołów przed możliwością wymycia zanieczyszczeń. Stosuje się je do budowy spodnich warstw dróg.
2. Witryfikacja (zeszkliwienie) popiołu, czyli powstawanie substancji szklistej w wyniku spiekania, na trwałe wiążącej niebezpieczne substancje w sposób całkowicie nierozpuszczalny dla roztworów wodnych. Sposób ten wymaga stosowania wysokich temperatur, w których część niebezpiecznych związków ulega uwolnieniu. Metoda ta ma zastosowanie do utylizacji popiołów zawierających większość metali ciężkich i ich związki (z wyjątkiem rtęci), lecz nie zawierających dioksyn.

Najważniejszymi zaletami witryfikacji są:

- rozkład substancji organicznej,
- „wbudowanie” w strukturę szkła składników nieorganicznych,
- odporność produktu na oddziaływanie czynników atmosferycznych.

Witryfikacja stosowana jest do przemysłowej produkcji keramzytu wykorzystywanego w produkcji elementów budowlanych, jako materiał izolacyjny (izolacje cieplne),

do wykonywania drenaży oraz w ogrodnictwie. Keramzyt otrzymywany jest z naturalnej gliny poprzez formowanie granulatu i spiekanie w temperaturze około 1150 °C w piecach obrotowych. Zamiennikiem keramzytu może być lekkie kruszywo sztuczne uzyskane w procesie spiekania granulowanych popiołów ze spalania osadów ściekowych i odpadów mineralnych mające zastosowanie jako komponent mieszanek bitumicznych lub betonowych stosowanych w budownictwie [Kępyś 2010, Uzunow 2009].

Zastosowanie brykietowania w przekonaniu autora jest korzystniejsze niż granulowania, gdyż uzyskuje się wyroby o większych gabarytach, mające bardziej jednorodną i zwartą strukturę oraz większą wytrzymałość mechaniczną. Zaproponowany sposób wytwarzania polegał na brykietowaniu popiołów ze spalania osadów ściekowych łącznie z dodatkowymi składnikami, następnie brykietowaniu utworzonej mieszaniny oraz spiekaniu otrzymanych brykietów. W procesie spiekania poprzez zeszkliwienie powierzchni brykiety uzyskano neutralizację substancji niebezpiecznych zawartych w brykietach.

Składniki mieszaniny przeznaczonej do scalania w prasie walcowej zawierały popioły w ilości ok. 50% wagowo oraz dodatki w postaci pyłów krzemionkowych oraz rozdrobnionego odpadu szklanego. Pył krzemionkowy (w udziale ok. 40% wagowo) stanowił odpad z produkcji kruszyw krzemionkowych, zaś odpad szklany (ok. 10% wagowo) dodawano w postaci pyłu o frakcji do 0,2 mm.

Pył krzemionkowy w procesie syntezy termicznej tworzy strukturę krzemianową, w którą wbudowują się związki metali ciężkich znajdujące się w popiołach. Związki te tworząc odpowiednie krzemiany „uwięzione są” w brykiecie w sposób trwały. Nie istnieje zatem niebezpieczeństwo ich wymywania i migracji do otoczenia, nawet podczas rozkruszenia brykiety [Kępyś 2010].

Odpady szklane (zużyte kineskopy, lampy oświetleniowe, szkło gospodarcze) obecne w brykietach pełni funkcję topnika i posiada podobną do pyłów krzemionkowych strukturę materiałową. Jego zastosowanie jest korzystne ze względu na obniżenie temperatury reakcji syntezy termicznej.

Proces ujednorodnienia mieszaniny polegał na mieszaniu składników w mieszarce łopatkowej oraz dodawaniu porcjami wody, aż do uzyskania konsystencji o wilgotności 5–6%. Brykietowanie utworzonej mieszaniny wykonano w prasie walcowej z zasobnikiem ślimakowym. Walce robocze o średnicy podziałowej 360 mm miały 46 wgłębień formujących w jednym rzędzie na obwodzie. Dobrano następujące parametry pracy urządzenia:

- prędkość obwodowa walców,  $v_w = 0,3$  m/s,
- prędkość obrotowa ślimaka,  $v_s = 80$  obr/min,
- wartość nacisku jednostkowego,  $P = 135$  MPa,
- moment obrotowy,  $M = 28$  kNm,
- szczelina między walcami,  $a = 1,5$  mm.

Uzyskano brykiety w kształcie baryłkowatym, których objętość wynosiła ok. 25 cm<sup>3</sup>. Brykiety te skierowano do laboratoryjnego pieca komorowego. Spiekanie prowadzono w temperaturze 1100 °C w czasie 1,5 godziny. Po zakończeniu wityfikacji zbadano właściwości i przydatność produktów.

## WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań pilotażowej partii wyrobów (ok. 100 próbek) wytrzymałości mechanicznej, mrozoodporności i nasiąkliwości oraz wymywalności substancji niebezpiecznych zestawiono w tabelach 2 i 3.

**Tabela 2.** Wymywalność substancji niebezpiecznych ze spieków  
**Table 2.** Leaching of hazardous substances from sinters

| L.p. | Pierwiastek | Wynik pomiaru (mg/dm <sup>3</sup> ) | Wartość dopuszczalna (mg/dm <sup>3</sup> ) |
|------|-------------|-------------------------------------|--|
| 1    | Kadm        | 0,003                               | <0,02                                      |
| 2    | Rtęć        | 0,02                                | <0,05                                      |
| 3    | Chrom       | 0,06                                | <0,5                                       |
| 4    | Miedź       | 0,07                                | <0,5                                       |
| 5    | Nikiel      | 0,11                                | <0,5                                       |
| 6    | Ołów        | 0,22                                | <0,5                                       |
| 7    | Cynk        | 0,07                                | <2,0                                       |

**Tabela 3.** Wybrane właściwości wyrobów spiekanych  
**Table 3.** Selected properties of sintered products

| Lp. | Parametr                             | Jednostka         | Wynik pomiarów | Wartości dopuszczalne dla keramzytu |
|-----|--------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------------------|
| 1   | Nacisk jednostkowy niszczący brykiet | MPa               | 4,5            | > 0,8                               |
| 2   | Odporność na zrzut grawitacyjny      | %                 | 92,1           | > 90,0                              |
| 2   | Gęstość nasypowa                     | Mg/m <sup>3</sup> | 520,0          | 400,0–550,0                         |
| 3   | Mrozoodporność                       | %                 | 1,1            | < 2,0                               |
| 4   | Nasiąkliwość                         | %                 | 15,2           | < 37,0                              |

Stwierdzono dużą powtarzalność wyników pomiarów właściwości fizycznych i mechanicznych. Właściwości mechaniczne wyrobów spiekanych spełniają wymagania stawiane materiałom przeznaczonym na podbudowy utwardzonych nawierzchni drogowych (wytrzymałość na obciążenie wynosi co najmniej 2,5 MPa).

Mrozoodporność badano metodą pośrednią określoną przez normę PN-88/B-06250. Badanie polegało na cyklicznym zamrażaniu próbki w powietrzu i odmrażaniu w wodzie. Cykl badania trwał 6 godzin i wykonano trzy kolejne cykle. Następnie badano wytrzymałość spieków na ściskanie. Stopień mrozoodporności określono na podstawie zależności pomiędzy wytrzymałością a ubytkiem masy.

Badanie nasiąkliwości, czyli zdolności wchłaniania wody przez materiał przy ciśnieniu atmosferycznym, polegało na stopniowym zanurzaniu próbek w wodzie, tak aby nie zamknąć powietrza w porach materiału. Nasiąkliwość określono jako stosunek masy wchłoniętej wody do masy próbki materiału suchego. Woda zwilżała ścianki spieku głównie powierzchniowo nie dostając się do wnętrza zamkniętych porów. Po wyjęciu próbek z wody następował szybki powrót do stanu suchego.

Wymywalność chromu, kadmu, miedzi, ołowiu, niklu, cynku i rtęci badano stosując metodę plazmowej spektrometrii emisyjnej. Wyniki pomiarów porównano z wartościami granicznymi ustalonymi dla środowiska w którym planowane jest umieszczenie spieków.

Uzyskano mniejsze od dopuszczalnych zawartości jonów metali ciężkich w wyciągach wodnych. Oznacza to, że produkt spiekania jest bezpieczny dla środowiska. Potwierdzono więc, że związki metali ciężkich są wbudowane na stałe w strukturę krystaliczną krzemianu i nie ulegają degradacji ani wypłukaniu.

## WNIOSKI

1. Brykiety wytworzone z pyłów ze spalania osadów ściekowych, a następnie spiekane w piecach obrotowych są produktami bezpiecznymi dla środowiska; obecne w nich substancje niebezpieczne nie ulegają degradacji ani wypłukaniu.
2. Spieki zawierające popioły nadają się do szerokiego stosowania w budownictwie jako zamiennik keramzytu, do produkcji lekkich betonów, zapraw ciepłochronnych, wyrobu pustaków ściennych i stropowych.

## PIŚMIENNICTWO

1. Góralczyk S., Mazela A., Uzunow E., Naziemiec Z. 2009. Kruszywa lekkie z osadów ściekowych i odpadów mineralnych. Materiały Konferencji „Kruszywa Mineralne”. Szklarska Poręba.
2. Haugsten K.E., Gustavson B. 2000. Environmental properties of vitrified fly ash form hazardous and municipal waste incineration. *Waste Management*, 20, 167–176.
3. Kępys W. 2010. Kruszywo z drobnziarnistych odpadów niebezpiecznych. *Inżynieria Ekologiczna*, 23, 70–76.
4. Kosturkiewicz B. 2006. Metoda zagospodarowania osadów ściekowych w przemyśle energetycznym. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH*, 32, 249–259.
5. Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A. 2006. *Możliwości wykorzystania odpadów komunalnych jako paliw alternatywnych*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
6. Niemiec W., Zamorska J. 2006. *Zarys technologii zagospodarowania niebezpiecznych odpadów organicznych*. *Ekologia i Technika*, 6(84), 14–19.
7. Pająk T. 2009. *Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych w Polsce*. *Wodociągi – Kanalizacja*, 9(67), 21–27.

8. Siuta J. 2005. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na składowiskach odpadów przemysłowych. *Acta Agrophysica*, 5(2), 417–425.
9. Śląderek F., Niemczyk P. 2006. Ekologiczne i techniczne aspekty współspalania osadów ściekowych w przemyśle cementowym i w energetyce. *Archiwum Spalania*, 6(1–4): 86–96.
10. Uzunow E. 2009. Osady ściekowe w produkcji materiałów budowlanych. *Wodociągi – Kanalizacja*, 10(68), 7–12.
11. Werther J., Ogada T. 1999. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25(1), 55–116.

## **PROCESSING OF ASHES FROM SEWAGE SLUDGE COMBUSTION FOR BUILDING MATERIAL**

### **Summary**

The method of processing ashes from sewage sludge combustion were presented in the paper to obtain a non-toxic product useful in building. It consist in mixing ashes with desired components, then briquetting composition and sintering of received briquettes. While sintering is going a surface vitrification of briquette is following. Laboratory tests involved to determine mechanical properties and cake toughness for unfavourable weather conditions. Research results indicated a possibility of neutralisation a hazardous substances included in sintered briquettes. The product obtained after processing made environmentally safe for economic utilisation.

**Key words:** sewage sludge, combustion, ashes, briquetting, sintering.