

*osady ściekowe, utylizacja termiczna, popioły lotne,
zagospodarowanie odpadów, materiały budowlane*

Marzena SMOL*, Joanna KULCZYCKA**, Anna HENCLIK*,
Katarzyna GORAZDA***, Zbigniew WZOREK***

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ODPADÓW PO TERMICZNYM PRZEKSZTAŁECENIU OSADÓW ŚCIEKOWYCH W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH

W pracy przedstawiono analizę możliwości zagospodarowania odpadów po termicznym przekształceniu osadów ściekowych w materiałach budowlanych. Taki sposób zagospodarowania popiołów ze spalania osadów ściekowych jest zgodny z założeniami programu „zero odpadów dla Europy” w którym podkreśla się że trwały wzrost gospodarczy jest możliwy poprzez przechodzenie na gospodarkę o bardziej zamkniętym obiegu. Wśród najważniejszych zastosowań popiołów w budownictwie wyróżniono stosowanie popiołu jako składnik mieszaniny surowcowej do produkcji cementu, aktywny dodatek do cementowych spoiw nieorganicznych (betonów i zapraw), składnik nadmiaru surowcowego do produkcji ceramiki budowlanej (cegieł i płytek ceramicznych), składnik spiekanego kruszywa lekkiego oraz substytut piasku i/lub cementu w konstrukcjach drogowych (stabilizowanych podłożach cementowych i nasypach drogowych). W pracy opisano możliwości stosowania popiołów do celów budowlanych, z uwzględnieniem spełnienia zarówno kryteriów technicznych, jak i środowiskowych.

1. WPROWADZENIE

Osady ściekowe, zgodnie z ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska* [45] stanowią odpad powstający w oczyszczalniach ścieków podczas procesów ich oczyszczania. W ostatnich latach, w Polsce obserwuje się systematyczny wzrost masy generowanych osadów ściekowych, będący konsekwencją zaostrzają-

* Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Pracownia Badań Strategicznych, ul. J. Wybickiego 7, 31-261 Kraków, smol@meeri.pl.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Zarządzania, ul. Gramatyka 10, 30-962 Kraków.

*** Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Katedra Technologii Nieorganicznej i Biotechnologii Środowiska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków.

cych się uregulowań prawnych dotyczących jakości oczyszczanych ścieków, wynikających z implementacji prawa wspólnotowego [35]. Obecnie sposób zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych podlega ustawie o odpadach [46] oraz innym ustawom i rozporządzeniom specyficznym dla ich sposobu powstawania, przeróbki i skali zagrożenia dla środowiska naturalnego. Z uwagi na zakaz możliwości ich składowania po 1 stycznia 2016 roku [36], zagospodarowanie osadów ściekowych stało się bardzo ważnym problemem zarówno ekologicznym, technicznym jak i ekonomicznym [2, 3]. Dotąd osady najczęściej trafiały na składowiska, wysypiska lub do środowiska w postaci wstępnie ustabilizowanej (np. po stabilizacji tlenowej, beztlenowej lub wapnem). Zawsze jednak stanowią dość istotny problem techniczny ze względu na duże uwodnienie i masę oraz niebezpieczeństwo sanitarne [38]. Biorąc pod uwagę występowanie w osadach metali ciężkich oraz substancji toksycznych [28], które ograniczają ich przyrodnicze/rolnicze wykorzystanie, najodpowiedniejszym sposobem utylizacji osadów ściekowych są metody termiczne [4, 42]. Głównymi zaletami tego sposobu unieszkodliwiania osadów jest zmniejszenie ich objętości oraz odzysk energii elektrycznej i/lub cieplnej [34]. Dzięki wsparciu finansowemu Unii Europejskiej (UE), w ostatnich latach w Polsce powstały Stacje Termicznej Utylizacji Osadów Ściekowych (STUOŚ) w których spalane są osady z oczyszczalni komunalnych (m.in. Kraków, Kielce, Warszawa, Łódź, Bydgoszcz, Gdynia, Gdańsk, Szczecin). Niemniej jednak w instalacjach termicznego przekształcania osadów ściekowych powstają odpady wtórne – pozostałości z procesów oczyszczania spalin, a wśród nich popioły – odpady o kodach 19 01 06 lub 19 01 07* oraz 19 01 14 [37], które także wymagają odpowiedniego zagospodarowania. Zgodnie z przewidywaniami Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych [18] dotyczącymi wytwarzania i sposobów unieszkodliwiania komunalnych osadów ściekowych, oszacowano że ilość powstających popiołów o kodzie 19 01 14 oraz 19 01 07* w 2016 r. wyniesie 24–32 tys. Mg, natomiast w 2020 r. 55–65 tys. Mg. Prognozy te wskazują, że tego rodzaju odpadów będzie powstawało w Polsce coraz więcej. Należy zatem znaleźć efektywne sposoby unieszkodliwienia powstałych popiołów, najlepiej poprzez ich dalsze wykorzystanie. Hierarchia postępowania z osadami i ich pochodnymi, zgodnie z obecnie przyjętym prawodawstwem dotyczącym odpadów, prowadzi do recyklingu oraz zniechęca do ich składowania. Takie podejście do zagadnień związanych z gospodarką popiołami jest zgodne z założeniami programu „zero odpadów dla Europy” w którym podkreśla się że trwały wzrost gospodarczy jest możliwy poprzez przechodzenie na gospodarkę o bardziej zamkniętym obiegu. Systemy gospodarki o obiegu zamkniętym pozwalają zachować możliwie jak najdłużej wartość dodaną produktów i wyeliminować odpady. Zakłada się że trwała poprawa w zakresie zasobooszczędności jest osiągalna i może przynieść znaczne korzyści gospodarcze dla krajów członkowskich UE, w tym dla Polski. W ramach inicjatywy „Horyzont 2020” UE przedstawia możliwości przejścia na gospodarkę o obiegu zamkniętym na poziomie krajowym i międzynarodowym za sprawą eko-innowacyjnych projektów na dużą

skalę, jednocześnie wspierając zastosowanie eko-innowacyjnych rozwiązań na rynku [15]. Z uwagi na możliwość wykorzystania popiołów ze spalania osadów ściekowych jako alternatywnych surowców lub dodatków do materiałów budowlanych, jedną z gałęzi przemysłu, która może być beneficjentem programów wspierających rozwój nowych eko-technologii jest przemysł budowlany. Wydaje się więc być uzasadnionym dokonanie analizy możliwości zagospodarowania popiołów po termicznym przekształceniu osadów ściekowych, w materiałach budowlanych, zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym.

2. ZASTOSOWANIE POPIOŁÓW Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH

Z uwagi na zaostrzające się uregulowania prawne dotyczące gospodarki odpadami z termicznej utylizacji osadów ściekowych, w ostatnich latach obserwuje się wzrost ilości badań dotyczących możliwości ich gospodarczego wykorzystania [2, 26]. Charakter produkcji materiałów budowlanych umożliwia zagospodarowanie dużych ilości odpadów powstających w innych dziedzinach gospodarki, i tak popioły z osadów ściekowych mogą być stosowane, m.in. jako alternatywne surowce lub dodatki do materiałów budowlanych [6]. Badania w tym kierunku prowadzi się ze względu na możliwość częściowego zastąpienia surowców budowlanych, ale także zmniejszenia emisji CO₂, np. przy procesach wypalania klinkieru cementowego [13]. Co więcej, wzrost popytu na materiały budowlane, wynikający z rozwoju gospodarczego, wpłynął na poszukiwanie eko-innowacyjnych metod wytwarzania materiałów w przemyśle budowlanym. Jednak ilość zagospodarowanych popiołów, stawiane im wymagania, a także możliwe do tolerowania wahania składu i innych właściwości uzależnione są od rodzaju wytwarzanego materiału budowlanego [17]. Wśród najważniejszych zastosowań popiołów w budownictwie wyróżnia się stosowanie ich jako:

- składnik mieszaniny surowcowej do produkcji cementu;
- aktywny dodatek do cementowych spoiw nieorganicznych (beton i zaprawy);
- składnik nadmiaru surowcowego do produkcji ceramiki budowlanej (cegły, płytki ceramiczne);
- składnik spiekanego kruszywa lekkiego;
- substytut piasku i/lub cementu w konstrukcjach drogowych (stabilizowane podłoża cementowe i nasypy drogowe) [1].

Wykorzystanie materiałów budowlanych wzbogaconych o surowce pochodzące z odzysku prowadzi do pewnych zmian w charakterystykach materiałów budowlanych, dlatego należy przestrzegać wymaganych standardów w zakresie zastąpienia części składników innymi, zgodnie z przepisami budowlanymi oraz prowadzić badania nad identyfikacją wpływu takich zabiegów na środowisko [14, 39]. Możliwości

wykorzystania popiołów (pochodzących ze spalania innych paliw niż węgiel jako dodatku typu II) określa norma PN-EN 206-1 (2003) *Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – do betonu i zaprawy*. Dopuszcza ona stosowanie popiołów z osadów ściekowych jako substancji aktywnej w środowisku zaczynu cementowego. Natomiast wymagania odnośnie popiołów lotnych ze spalania osadów ściekowych stosowanych jako dodatek do betonu określa norma PN-EN 450-1+A1 (2009) *Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności*.

Potencjalne korzyści z wykorzystania popiołów w materiałach budowlanych to immobilizacja metali ciężkich w wypalanej matrycy, utlenianie substancji organicznych i niszczenie patogenów w trakcie procesu wypalania oraz zwiększenie odporności na niskie temperatury. Możliwości stosowania popiołów do celów budowlanych, z uwzględnieniem spełnienia zarówno kryteriów technicznych, jak i i środowiskowych, były przedmiotem licznych badań [47–51]. Należy także podkreślić, na żadnym z etapów ich zagospodarowania nie mogą wystąpić zagrożenia dla osób zatrudnionych przy pracach z odpadami i użytkowników, a także działania te powinny być opłacalne ekonomicznie [11].

2.1. ZASTOSOWANIE POPIOŁÓW Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W PRODUKCJI CEMENTU

Wykorzystanie paliw z odpadów jest jednym z głównych działań przemysłu cementowego, mającym na celu poprawę efektywności produkcji i włączenia się w trudny problem utylizacji odpadów po spalaniu osadów ściekowych. Korzyści dla środowiska wynikające ze stosowania popiołów w procesie produkcji cementu to:

- ograniczenie degradacji terenów rolniczych (zmniejszenie wydobycia surowców naturalnych i węgla),
- ograniczenie zużycia paliw kopalnych – nieodnawialnych,
- całkowite wykorzystanie niepalnych części odpadów (wyeliminowanie składowania produktów spalania – popiołów i żużli),
- zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych [7].

Popioły z osadów ściekowych mogą być z powodzeniem stosowane jako aktywny dodatek w mieszaniu surowcowej do produkcji cementu [10]. Skład chemiczny (krzemionka, żelazo, wapń, glin, magnez, fosfor i tlen) oraz właściwości hydrauliczne i pucolanowe popiołów z osadów ściekowych wykorzystywanych jako zamiennik cementu portlandzkiego w betonach wykazują analogię do tradycyjnych dodatków mineralnych [52]. Większość opisanych w literaturze badań dotyczy wpływu popiołu, zastępującego część cementu portlandzkiego, na właściwości wytrzymałościowe kompozytów cementowych, jako podstawowe cechy determinujące przydatność techniczną dodatków mineralnych [16].

W badaniach Monzó i wsp. (2004) cement zastąpiono popiołem z osadów ściekowych w ilości 15–30% wagowych, do produkcji zaprawy. Wyniki badań wskazują, iż

zaprawa zawierająca 15% popiołów wykazuje porównywalną wytrzymałość na ściskanie do zaprawy konwencjonalnej. Wzrost zawartości popiołu do 30% wpływał na zwiększenie różnic w właściwościach hydraulicznych zaprawy [33]. W innych badaniach tych autorów, 30% zastąpienie cementu portlandzkiego przez popioły prowadziło do zmniejszenia urabialności świeżej zaprawy, badanej na podstawie zmian rozpląwu. Spadek ten wynika z dwóch czynników: nieregularnej budowy ziaren popiołu oraz wysokiej absorpcji wody na powierzchni cząstek popiołu. Ponadto, analiza wyplukiwania pierwiastków śladowych ze stwardniałych zapraw i betonów wykazała, że ten sposób utylizacji popiołów nie zagraża bezpieczeństwu środowiska naturalnego [32]. W badaniach Chang i wsp. (2010) również powierdzono, że dodatek popiołu z osadu ściekowego wpływa na wzrost zdolności absorpcji wody materiałów budowlanych. Dodatek popiołów spowodował obniżenie podatności na obróbkę oraz wytrzymałości na ściskanie uzyskanego materiału. Najbardziej korzystne warunki uzyskano przy 10% wprowadzeniu popiołu do mieszanki [5]. Zgodnie z informacjami podanymi przez innych autorów, optymalna zawartość popiołu z osadu ściekowego w materiałach cementowych wynosi od 5% do 20% [9, 21, 51]. Analizowano także proces hydratacji popiołu z osadu, zastępując popiołem 20% masy mineralnych składników przeznaczonych do produkcji cementu. Uzyskano spoiwo spełniające wymagania stawiane cementom powszechnego użytku, tzw. eko-cement. Badania wytrzymałości na ściskanie oraz mikrostruktury potwierdziły przydatność eko-cementu do zastosowań konstrukcyjnych [21]. W badaniach Baeza-Brotóns i wsp. (2014) popiół wprowadzano w ilości 5, 10, 15, 20% do bloków betonowych. Wykazano, że bloki betonowe, utwardzane przez 28 doby, posiadają zbliżone właściwości mechaniczne do bloków konwencjonalnych. Ponadto, dodatek popiołu znacząco wpłynął na zmniejszenie absorpcji wody. Zaobserwowano także, że bloki w których piasek zastąpiono popiołem w ilości 10%, wykazywały najlepsze parametry takie jak gęstość, absorpcja i kapilarność. Zastosowanie tak przygotowanej mieszaniny surowcowej pozwoliło na lepsze wypełnienie szczelin niż w przy stosowaniu mieszaniny standardowej. Może to oznaczać znaczne korzyści dla środowiska ze względu na bardziej trwałe zestalenie popiołu w mieszaninie i mniejsze wymywanie zanieczyszczeń, w tym metali ciężkich [1]. Chen i wsp. (2013) analizowali możliwości wykorzystania popiołu jako substytut do cementu i/lub substytut piasku w materiałach budowlanych, z uwzględnieniem zarówno kryteriów technicznych jak i środowiskowych. Zaprawa i beton wytworzone przez zastąpienie części cementu i części piasku popiołem wykazywały mniejszą wytrzymałość na zginanie i ściskanie w porównaniu do tradycyjnych pustaków. Potwierdzono także, iż zaprawa zawierająca popiół w ilości 10%, ma podobną wydajność mechaniczną oraz wytrzymałość na ściskanie do zaprawy konwencjonalnej. Przeprowadzono także analizę wymywania, która wykazała, że spośród potencjalnych zanieczyszczeń tylko Mo i Se wymywane są w stężeniach przekraczających wartości progowe. Badania wymywania prowadzone na betonowych monolitach wykazały jednak, że stężenia zanieczyszczeń, w tym Mo i Se, nie przekraczają

wartości progowych podanych przez Agencję Ochrony Środowiska. Uwzględniając zatem specyfikację techniczną oraz normy środowiskowe, wykorzystanie popiołu z osadu ściekowego w materiałach budowlanych wydaje się możliwe [6]. Należy pamiętać, iż zmienność składu i uziarnienia utrudnia powszechne stosowanie popiołów jako aktywnych dodatków do betonu. Obecność popiołów w ilości 25% wagowych masy cementu wpływa na opóźnienie procesu wiązania zaczynu oraz wolniejsze narastanie wytrzymałości na ściskanie zapraw i betonów w porównaniu do kompozytów wykonanych przy zastosowaniu wyłącznie cementu portlandzkiego. Jednakże, wydłużając czas dojrzewania można uzyskać wytrzymałość wymaganą dla betonów konstrukcyjnych [16]. Warto podkreślić, że popiół pochodzący ze spalania osadów ściekowych jest bogaty w związki fosforu [43]. Przypuszcza się zatem, że powolne narastanie wytrzymałości betonów zawierających popiół ze współspalania może być spowodowane obecnością jonów fosforanowych, które opóźniają proces hydratacji cementu [29].

2.2. ZASTOSOWANIE POPIOŁÓW Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W PRODUKCJI CERAMIKI BUDOWLANEJ

Popiół powstający podczas termicznej obróbki osadów ściekowych posiada postać drobnego pyłu, dzięki czemu może być bezpośrednio wprowadzany do mieszanki surowcowej przeznaczonej do produkcji ceramiki budowlanej. W przemyśle ceramicznym wykorzystuje się przede wszystkim surowce naturalne na bazie krzemianów, dlatego popioły są potencjalnym substytutem do nadmiaru surowcowego. Jednak z uwagi na duże ilości tlenku żelaza i metali zawartych w popiele, dodatek popiołu może negatywnie wpływać na właściwości produktu ceramicznego [9]. Problem ten może być rozwiązany przez optymalny dobór ilości popiołu wprowadzanego do mieszanki surowcowej. W badaniach Suzuki i wsp. (1997) spieki ceramiczne produkowano dodając popiół z osadów ściekowych do wapna. Spieki ceramiczne zawierające 50% popiołu wykazywały wytrzymałość, odporność na działanie kwasów i współczynnik absorpcji w normalnym zakresie dla produktów ceramicznych [41]. Ferreira i wsp. analizowali podatność na wymywanie ceramiki produkowanej z dodatkiem popiołu z osadów ściekowych. Wyniki potwierdziły minimalne wymywanie metali ciężkich [9]. W badaniach Lin i wsp. (2005) analizowano wpływ dodatku do gliny różnej ilości popiołu z osadów ściekowych na właściwości produkowanych płytek ceramicznych. Wykazano istotne różnice, takie jak wyższa nasiąkliwość wodą, mniejsza odporność na ścieranie i nadmierna ilość porów. Aby polepszyć właściwości płytek, popiół wprowadzano do gliny przy produkcji płytek glazurowych. Uzyskano obniżenie nasiąkliwości wodą oraz podatności na ścieranie, a także wzrost wytrzymałości na zginanie produkowanych płytek [22]. W badaniach Lin i wsp. (2008) wykazano, że zastąpienie gliny popiołem z osadu miało niekorzystny wpływ na właściwości płytek. Zaobserwowano wzrost nasiąkliwości wodą i obniżenie wytrzymałości na

zginanie wraz z zwiększaniem ilości dodawanego popiołu. Jednakże, zmniejszenie nasiąkliwości wodą, wzrost odporności na ścieranie oraz wzrost wytrzymałości na zginanie uzyskano dla płytek glazurowanych produkowanych z mieszaniny wzbogaconej popiołem [19]. Istnieje również możliwość dodatku nano-SiO₂ do płytek produkowanych z popiołu z osadów ściekowych. Zaobserwowano, że dla płytek zawierających dodatki nano-SiO₂ i wypalanych w temperaturze od 1000°C do 1100°C, nasiąkliwość wodą i odporność na ścieranie były mniejsze, a wytrzymałość na zginanie była większa. Wyniki te wskazują, że temperatura wypalnia jest ważnym czynnikiem determinującym możliwość dodatku nano-SiO₂ do płytek produkowanych z popiołu [23]. Badano także właściwości ceramiczne samego popiołu, i popiołu zmieszanego z dodatkami, tj. z kaolinem, montmorylonitem, gliną, sproszkowanym szkłem płaskim. Obróbka termiczna (do 1200°C) wpłynęła na zwiększenie gęstości i wytrzymałości na ściskanie próbek oraz obniżenie nasiąkliwości wodą. Wyniki wykazały, że najlepszą wytrzymałości na ściskanie uzyskano z dodatkiem 25% montmorylonitu, gliny lub sproszkowanego szkła płaskiego. Podczas dodawania popiołu do kaolinu, ze względu na swój charakter ogniotrwały, nie obserwowano wzrostu wytrzymałości na ściskanie [31]. Analizowano także przemiany popiołów z osadów ściekowych w podwyższonej temperaturze, pobranych z dwóch różnych oczyszczalni ścieków [48]. Wykazano różnice w zachowaniu dwóch próbek popiołów podczas obróbki cieplnej, które wynikały z różnych zawartości Al₂O₃ i Fe₂O₃ w analizowanych popiołach. Próbki o wysokiej zawartości Al₂O₃ były ubogie w Fe₂O₃ i wymagały znacznie wyższych temperatur spiekania i topnienia. Próbki o dużej zawartości Fe₂O₃ początkowo ulegały spiekaniu, a następnie topiły się przy znacznie niższych temperaturach, co przyczyniło się do powstawania Fe-krzemianów i Fe-glinokrzemianów. Względne zawartości Fe i Al w popiołach są wynikiem stosowanych metod odwadniania, rodzaju trzeciego stopnia oczyszczania oraz wyboru środka do strącania fosforu [48]. Ze względu na dużą zawartość żelaza pochodzącego z procesu flokulacji, popioły z osadów ściekowych mogą także spełniać funkcję barwnika dla materiałów ceramicznych. Podczas spalania osadów ściekowych, sole żelaza ulegają przemianie głównie do tlenku żelaza (III) o barwie czerwonej, co wpływa na zabarwienie materiałów ceramicznych. Popiół z osadów może być wykorzystany do produkcji ceramicznych materiałów budowlanych, nie zmieniając parametrów gotowych wyrobów. Wzrastająca porowatość wraz ze zwiększeniem udziału popiołu osadowego jest korzystna przy produkcji ceramicznych materiałów izolacyjnych. Natomiast wzrost nasiąkliwości, zwłaszcza powyżej 21%, jest zjawiskiem negatywnym [12]. W produkcji ceramiki budowlanej możliwe jest wykorzystanie popiołu z osadów do produkcji: cegły pełnej, cegły kratówki, cegieł perforowanych i szczelinowych pustaków. Te rodzaje cegieł mogą być wykonane z materiałów zawierających w swoim składzie (z wyjątkiem produktów z gliny) duże ilości popiołu (do 90%). W badaniach Lin i Weng wykazano, że zawartość popiołu w mieszaninie i temperatura wypalania są dwoma głównymi czynnikami wpływającymi na jakość cegieł [24]. Cegły o najwyższej jakości uzyskano przy 10% zawartości

popiołu w mieszaninie surowcowej, przy 24% wilgotności i temperaturze wypalania 880°C i 960°C [49]. Badania Kosior-Kazberuk i Karwowskiej (2011) potwierdziły, że przy zawartości popiołu do 10%, wytrzymałość zmodyfikowanych cegieł jest optymalna i porównywalna do cegieł tradycyjnych [17]. W pracy Yadav i wsp. (2014), do produkcji cegieł wykorzystywano osady i popioły ze spalania osadów w proporcji od 50% do 100% wagowych. Przy 80% udziale osadu i 20% udziale popiołu, uzyskano cegły o pożądanej odporności na ścieranie, twardości i nasiąkliwości wodą [50]. Należy zauważyć, że wykorzystanie popiołów do produkcji cegieł jest możliwe pod warunkiem spełnienia nie tylko norm technicznych, ale również środowiskowych [20]. Badania nad wypłukiwaniem pierwiastków śladowych z cegieł wykazały, że taka forma utylizacji popiołów nie zagraża bezpieczeństwu środowiska [25].

2.3. ZASTOSOWANIE POPIOŁÓW Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W PRODUKCJI KRUSZYW LEKKICH

Produkty termicznej utylizacji osadów ściekowych o odpowiednim uziarnieniu mogą być stosowane bez dodatkowych zabiegów jako drobne, sztuczne kruszywo lekkie w kompozytach cementowych [9]. Badania wykazały, że popiół charakteryzuje się stałością objętości pomimo względnie dużej nasiąkliwości. Wprowadzenie do 30% popiołu z osadów w miejsce drobnego kruszywa naturalnego nie powoduje znaczącego obniżenia 28-dniowej wytrzymałości betonu cementowego [16]. Gruboziarniste popioły ze spalania osadów, wykazujące małą aktywność pucolanową i wpływające negatywnie na urabialność mieszanki betonowej mogą być wykorzystane do produkcji kruszywa lekkiego (wypełniacza) o kontrolowanym uziarnieniu [16, 17]. Popioły o składzie zbliżonym do składu gliny ekspansywnej, które w procesie spiekania w temperaturze 1050–1150°C mogą być przetwarzane w lekkie kruszywo popiołowe o regularnych okrągłych ziarnach, o średnicy do 10 mm, są najbardziej przydatne do produkcji kruszywa lekkiego. Kruszywo wzbogacone dodatkiem popiołu wykazuje mniejszą gęstość właściwą i nieznacznie mniejszą wytrzymałość w porównaniu do konwencjonalnego kruszywa lekkiego. Dzięki niskiej przewodności cieplnej i dużej ognioodporności, możliwe jest stosowanie kruszyw z dotakiem popiołu w betonach niekonstrukcyjnych w zastosowaniach, gdzie wymagana jest termoizolacyjność i odporność ogniowa przegród budowlanych [16, 30]. Zastosowanie popiołów do produkcji kruszyw lekkich może przynieść znaczne korzyści ekonomiczne ze względu na obniżenie kosztów materiałowych wskutek zastąpienia tańszymi odpadami przemysłowymi części tradycyjnych kruszyw naturalnych [11].

2.4. ZASTOSOWANIE POPIOŁÓW Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH W KONSTRUKCJACH DROGOWYCH

Popioły z osadów ściekowych mogą być stosowane w budownictwie drogowym do stabilizacji gruntów, wykonywania podbudów drogowych, budowy nasypów oraz nawierzchni drogowych [30]. Popioły, które są szkodliwe dla otoczenia tylko w czasie robót, a po zakończeniu robót ich szkodliwość zanika mogą być użyte pod warunkiem przestrzegania wymagań technologicznych wbudowania. Popioły z osadów ściekowych wprowadza się jako substytut piasku i/lub cementu w cementowych stabilizowanych bazach i podbudowach. Badania terenowe [27] wykazały, że wprowadzenie popiołu do budowy nawierzchni drogowych (warstwy nośnej) nie powoduje zagrożenia dla środowiska (gleby, wód gruntowych) przez wymywanie metali ciężkich. Popioły aktywowane przez cement lub wapno mogą być stosowane jako spoiwo, a z kruszywem naturalnym mogą być stosowane do produkcji betonu do fundamentów drogowych. Betony zawierające popiół powinny dojrzewać w wilgotnym środowisku. Ocena ich przydatności nie jest podawana w standardowych procedurach, ale wymaga dodatkowych badań [9]. Nasypy drogowe wzbogacone popiołem powinny być układane na podłożu z gruntów nieprzepuszczalnych, na warstwie odcinającej od wód gruntowych. O przydatności materiału do konstrukcji nawierzchni drogowych decyduje głównie jego odporność na wypłukiwanie, przepuszczalność oraz odporność na działanie mrozu. Wykorzystanie popiołu jako składnika poszczególnych warstw nawierzchni drogowych nie może prowadzić do obniżenia jej sztywności, odporności na obciążenie ruchem drogowym, odporności na erozję oraz obciążenia pionowe, jak również nie może zwiększać podciągania kapilarnego cieczy [9, 25]. Shirodkar i wsp. (2013) badali wpływ dodatku popiołu do gorącej mieszaniny asfaltowej jak wypełniacz mineralny oraz/lub jako substytut kruszywa w mieszance drobnoziarnistej. Wyniki wykazały, że odporność na pękanie i obciążenia pionowe asfaltu, zawierającego od 0% do 2% popiołu były porównywalne do asfaltu konwencjonalnego. Stwierdzono również, że mieszanka asfaltowa zawierająca 2% popiołu wykazuje zbliżoną sztywność oraz odporność na obciążenie ruchem drogowym, jak mieszanka bez dodatku popiołu. Ponieważ wytrzymałość powierzchni asfaltowej nie obniżała się wraz z 2% dodatkiem popiołu, powinno prowadzić się dalsze badania określające możliwość stosowania większej zawartości popiołu. Może to pozytywnie wpłynąć na zmniejszenie ilości surowców potrzebnych do produkcji mieszanek asfaltowych [40]. W badaniach Tenza-Abril i wsp. (2014) analizowano także zachowanie mieszanek bitumicznych wzbogaconych popiołem z osadów ściekowych jako wypełniacz mineralny. Wyniki badań potwierdzają, że popiół można stosować w mieszankach bitumicznych w ilości 2-3% procent wagowych, utrzymując odpowiedni poziom przyczepności i spójności w mieszaninie, co jest porównywalne do wyników uzyskanych dla konwencjonalnych mieszanin z aktywnymi wypełniaczami takimi jak uwodnione wapno i cement. Stosowanie mieszanek bitumicznych wzbogaconych dodatkiem popiołu nie

zmniejsza odporności na obciążenie ruchem drogowym, lecz może wpływać na spadek sztywności asfaltów [44]. Wykorzystanie popiołu z osadów jako dodatek stabilizujący do gruntowo-cementowych mieszanek stosowanych do budowy nasypów oraz nawierzchni drogowych było przedmiotem badań Durante Ingunza i wsp. (2014). Wykonano testy wytrzymałości na ściskanie gruntowo-cementowych mieszanek z zawartością cementu 3, 6 i 9% oraz 5, 10, 20 i 30% zawartości popiołu, w warunkach normalnego i zmodyfikowanego ciśnienia. Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie odnotowano dla wszystkich prób zawierających popiół. Dodatek popiołu w ilości 20% do mieszaniny skutkowało wzrostem wytrzymałości o 26% w porównaniu do mieszaniny bez popiołu [8]. W innych badaniach, autorzy porównywali odporność na wymywanie popiołu oraz popiołu stabilizowanego wapnem lub cementem. Stwierdzono, że wymywanie niestabilizowanego popiołu przekracza normy stawiane wodzie przeznaczonej na cele wodociągowe, podczas gdy dla ustabilizowanych popiołów wartości te nie były przekroczone. Analiza została ograniczona jedynie do wypłukiwania popiołu i nie uwzględniała interakcji zachodzących w układzie popiół-gleba, która może wpłynąć na precyzyjne określenie wymywalności popiołów z nasypów drogowych. Wskazano także, że wstępna obróbka popiołu może przyczynić się do rozwiązania problemu ich wymywania z nasypów drogowych [9].

3. PODSUMOWANIE

Wskazanie właściwych sposobów zagospodarowania odpadów po termicznym przekształcaniu osadów ściekowych ma szczególne znaczenie w przemyśle budowlanym. Jest to związane z możliwością wykorzystania dużych ilości materiałów odpadowych o różnym stopniu przetworzenia i różnych możliwościach substytucji w materiałach budowlanych. Skład chemiczny (krzemionka, żelazo, wapń, glin, magnez, fosfor i tlen) oraz właściwości hydrauliczne i pucolanowe popiołów ze spalania osadów ściekowych wskazują na możliwość ich wykorzystania do produkcji materiałów budowlanych. Głównymi zastosowaniami popiołów z osadów ściekowych w budownictwie jest stosowanie ich jako:

- składnik mieszaniny surowcowej do produkcji cementu;
- aktywny dodatek do cementowych spoiw nieorganicznych (beton i zaprawy);
- składnik nadmiaru surowcowego do produkcji ceramiki budowlanej (cegły, płytki ceramiczne);
- składnik spiekanego kruszywa lekkiego;
- substytut piasku i/lub cementu w konstrukcjach drogowych (stabilizowane podłoża cementowe i nasypy drogowe).

Należy podkreślić, iż wykorzystanie popiołów w budownictwie jest zgodne z założeniami programu „zero odpadów dla Europy” w którym promuje się przechodzenie na gospodarkę o bardziej zamkniętym obiegu. Ponadto, jest to rozwiązanie

pożądane, pod warunkiem, że spełnione zostaną zarówno kryteria techniczne, jak i środowiskowe, uwzględniające obowiązujące standardy w zakresie zastąpienia części składników innymi, zgodnie z przepisami budowlanymi.

Praca naukowa finansowana ze środków NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych, umowa PBS1/A1/3/2012.

LITERATURA

- [1] BAEZA-BROTONS F., GARCES P., PAYA J., SAVAL J. M., *Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks*. Journal of Cleaner Production, 2014, No. 82, 112–124.
- [2] BIEŃ J., NECZAJE., WORWAŁ M., GROSSER A., NOWAK D., MILCZAREK M., JANIK M., *Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013*. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2011, Vol. 14, No. 4, 378.
- [3] BIEŃ J., WYSTALSKA K. *Gospodarka osadowa-konieczność zmian strategicznych decyzji*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2014, Vol. 17, No. 3, 357–361.
- [4] BOROWSKI, G., GAJEWSKA, M., HAUSTEIN, E. *Możliwości zagospodarowania popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych w kotłach fluidalnych*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2014, Vol. 17, No. 3, 393–402.
- [5] CHANG F., LIN J., TSAI C., WANG K., *Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash*, Water Science & Technology, 2010, Vol. 62, No. 7, 1689–1693.
- [6] CHEN M., BLANCD., GAUTIER M., MEHU J., GOURDONR., *Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction*, Waste Management, 2013, Vol. 33, No. 5, 1268–1275.
- [7] DUDA J., WASILEWSKI M. *Innowacyjna technologia utylizacja osadów ściekowych*, Materiały z XVIII Konferencji „Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane 2014.
- [8] DURANTE INGUNZA M. P., PEREIRA K. L. D. A., FRANCISCO DOS SANTOS JUNIOR O., *Use of Sludge Ash as a Stabilizing Additive in Soil-Cement Mixtures for Use in Road Pavements*, Journal of Materials in Civil Engineering (2014), DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001168.
- [9] FERREIRA C., RIBEIRO A., OTTOSEN L., *Possible applications for municipal solid waste fly ash*, Journal of Hazardous Materials, 2003, Vol. 96, No. 2, 201–216.
- [10] FONTES C. M. A., BARBOSA M. C., TOLEDO FILHO R. D., GONCALVES J. P., *Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete*, Materiały z Konferencji “ Use of Recycled Materials in Buildings and Structures” (RILEM Publications), Barcelona 2004.
- [11] GAWLICKI M., MAŁOLEPSZY J., *Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie*, Materiały z Konferencji XXVII Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane”, Międzyzdroje 2013.
- [12] GRABOWSKI Z., OLESZKIEWICZ J.A., *Spalanie osadów ściekowych*, Materiały z Konferencji „Podstawy oraz praktyka przeróbki i zagospodarowania osadów”, Kraków 1998.
- [13] HUDZIAK G., GORAŻDA K., WZOREK Z. *Główne kierunki w zastosowaniu popiołów po termicznej obróbce osadów ściekowych*, Czasopismo Techniczne. Chemia, 2012, Vol. 109, 41–50.
- [14] JOHNSON O. A., NAPIAH M., KAMARUDDIN I., *Potential uses of Waste Sludge in Construction Industry: A Review*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014, Vol. 8, No. 4, 565–570.

- [15] Komunikat Komisji Europejskiej. 2014. *Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero odpadów dla Europy”*. COM. 398.
- [16] KOSIOR- KAZBERUK M. *Nowe dodatki mineralne do betonu*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2011, Vol. 2, 47–55.
- [17] KOSIOR-KAZBERUK M., KARWOWSKA J. *Wybrane problemy zagospodarowania popiołów pochodzących ze spalania osadów ściekowych w technologii materiałów cementowych*, Inżynieria Ekologiczna, 2011, No. 25, 110–123.
- [18] Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2014 (M. P. nr 101, poz. 1183).
- [19] LIN D. F., CHANG W. C., YUAN C., LUO H. L., *Production and characterization of glazed tiles containing incinerated sewage sludge*, Waste Management, 2008, Vol. 28, No. 3, 502–508.
- [20] LIN K. L., CHEN B. Y., CHIOU C. S., CHENG A., *Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement*, Waste Management & Research, 2010, Vol. 28, No. 7, 647–652.
- [21] LIN K.-L., LIN Ch.-Y.: *Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material*, Cement and Concrete Research, 2005, Vol. 35, 1999–2007.
- [22] LIN D. F., LUO H. L., LUO H. L., SHEEN Y. N., *Glazed tiles manufactured from incinerated sewage sludge ash and clay*, Journal of the Air & Waste Management Association, 2005, Vol. 55, No. 2, 163–172.
- [23] LIN D. F., LUO H. L., ZHANG S. W., *Effects of nano-SiO₂ on tiles manufactured with clay and incinerated sewage sludge ash*, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, Vol. 19, No. 10, 801–808.
- [24] LIN D. F., WENG C. H., *Use of sewage sludge ash as brick material*, Journal of Environmental Engineering, 2001, Vol. 127, No. 10, 922–927.
- [25] LIN Ch.-F., WU Ch.-H., HO H.-M., *Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials*, Waste Management, 2006, Vol. 26, 970–978.
- [26] LIN Y., ZHOU S., LI F., LIN Y., *Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement*, Journal of Hazardous Materials, 2012, Vol. 213, 457–465.
- [27] LIND B.B., NORRMAN J., LARSSON L.B., OHLSSON S.A., BRISTAV H., *Geochemical anomalies from bottom ash in a road construction – Comparison of the leaching potential between an ash road and the surroundings*, Waste Management, 2008, Vol. 28, 170–180.
- [28] MACHERZYŃSKI, B., WŁODARCZYK-MAKUŁA, M., SKOWRON-GRABOWSKA, B., STAROSTKA-PATYK, M., *Degradation of PCBs in sewage sludge during methane fermentation process concerning environmental management*, Desalination and Water Treatment, 2014, Vol.52, No. 19-21, 3859–3870.
- [29] MAŁOLEPSZY J., TKACZEWSKA E., *Wpływ popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na proces hydratacji i właściwości cementu*, Materiały z Konferencji „Dni Betonu”, Wisła 2006.
- [30] MERINO I., AREVALO L.F., ROMERO F., *Characterization and possible uses of ashes from wastewater treatment plants*, Waste Management, 2005, Vol. 25, 1046–1054.
- [31] MERINO I., AREVALO L.F., ROMERO F., *Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives*, Waste Management, 2007, Vol. 27, No. 12, 1829–1844.
- [32] MONZÓ J., PAYA, J., BORRACHERO M.V., GIRBES I., *Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars*, Waste Management, 2003, Vol. 23, No. 4, 373–381.
- [33] MONZÓ J., PAYA, J., BORRACHERO M. V., MORENILLA J.J., BONILLA M., CALDERO P., *Some strategies for reusing residues from waste water treatment plants: Preparation of building materials*, Materiały z Konferencji „Use of Recycled Material in Building and Structures”, Barcelona 2004.

- [34] PAJAŁ, T. *Termiczne przekształcanie osadów ściekowych wobec wyzwań roku 2016*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2014, Vol. 17, No. 3, 363–376.
- [35] Rocznik Ochrona Środowiska, GUS 2013.
- [36] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz.U. 2013, poz. 38.).
- [37] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2001, nr 112, poz. 126).
- [38] SADECKA Z., MYSZOGRAJ S., SUCHOWSKA-KISIELEWICZ M. *Aspekty prawne przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych*, Zeszyty Naukowe Inżynieria Środowiska/Uniwersytet Zielonogórski, 2011, No. 144, 5–17.
- [39] SAFIUDDIN M., JUMAAT M. Z., SALAM M. A., ISLAM M. S., HASHIM R., *Utilization of solid wastes in construction materials*, International Journal of Physical Sciences, 2010, Vol. 5, No. 13, 1952–1963.
- [40] SHIRODKAR P., SONPAL K., NORTON A., WEAVER R., TOMLINSON C., NOLAN A., METHA Y., JAHAN K., *Evaluation of Fatigue and Rutting Performance of Sewage Sludge Ash (SSA) in Asphalt Concrete*, The Journal of Solid Waste Technology and Management, 2011, Vol. 37, No. 1, 55–60.
- [41] SUZUKI S., TANAKA M., KANEKO T., *Glass-ceramic from sewage sludge ash*, Journal of Materials Science, 1997, Vol. 32, No. 7, 1775–1779.
- [42] ŚRODA K., KIJO-KLECKOWSKA A., OTWINOWSKI H., *Termiczne unieszkodliwianie osadów ściekowych*, Inżynieria Ekologiczna, 2012, No. 28, 67–81.
- [43] TARKO B., GORAZDA K., WZOREK Z., NOWAK A. K., KOWALSKI Z., KULCZYCKA J., HENCLIK A., *Recovery of phosphorus from industrial sewage sludge ashes*. Przemysł Chemiczny, 2014, Vol. 93, No. 6, 1041–1044.
- [44] TENZA-ABRIL A. J., SAVAL J. M., CUENCA A., *Using Sewage-Sludge Ash as Filler in Bituminous Mixes*, Journal of Materials in Civil Engineering (2014), DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001087.
- [45] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 nr 62, poz. 627).
- [46] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21).
- [47] UZUNOW E., *Osady ściekowe w produkcji materiałów budowlanych*, Wodociągi – Kanalizacja, 2009, Vol. 10, No. 68, 20–23.
- [48] WANG L., SKJEVRAK G., HUSTAD J. E., GRONIL M. G., *Sintering characteristics of sewage sludge ashes at elevated temperatures*, Fuel Processing Technology, 2012, Vol. 96, 88–97.
- [49] WENG C.H., LIND F., CHIANG P.C., *Utilization of sludge as brick materials*, Advances in Environmental Research, 2003, Vol. 7, No. 3, 679–685.
- [50] YADAV S., AGNIHOTRI S., GUPTA S., TRIPATHI R. K., *Incorporation of STP Sludge and Fly ash in Brick Manufacturing: An attempt to save the Environment*, International Journal of Advancements in Research & Technology, 2014, Vol. 3, No. 5, 138–144.
- [51] YENC L., TSENG D.H., LIN T.T., *Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges*, Chemosphere, 2011, Vol. 84, No. 2, 220–226.
- [52] YUSUF R. O., NOOR Z. Z., DIN M. D. F. M. D., ABBA A. H., *Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete-a review*, International Journal of Global Environmental Issues, 2012, Vol. 12, No. 2, 214–228.

THE POSSIBLE APPLICATIONS OF WASTE AFTER THERMAL TREATMENT OF SEWAGE SLUDGE IN BUILDING MATERIALS

The paper presents an analysis of the possible applications of waste after thermal treatment of sewage sludge in building materials. This method of incinerated sewage sludge ash (ISSA) management is consistent with the objectives of 'A zero waste programme for Europe', which assumes that sustainable economic growth is possible by moving towards a more circular economy (CE). The most important applications of fly ash in construction industry is the use of ash as a component of a mixture of raw materials for cement production, active additive for cementitious inorganic binder (concrete and mortar), bearing component of the raw material in the manufacture of building ceramics (bricks, ceramic tiles), a component of lightweight aggregate and sand and/or cement substitute in the road constructions (cement stabilized bases, subbases and embankments). This paper describes the possibility of using fly ash for construction purposes, including to meet both the technical and the environmental criteria.