

BADANIA LABORATORYJNE NAD MOŻLIWOŚCIĄ WSPÓŁSPALANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH Z WYBRANEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW

Janusz Dąbrowski¹, Tomasz Dąbrowski¹

¹ Katedra Techniki Wodno-Mułowej i Utylizacji Odpadów, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Politechnika Koszalińska, 75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2, e-mail: janusz.dabrowski@tu.koszalin.pl, tomasz.dabrowski@tu.koszalin.pl

STRESZCZENIE

W publikacji przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad możliwością współspalania osadów ściekowych z odpadami gumowymi, jako możliwość termicznego przekształcania zarówno osadów ściekowych, jak i badanych odpadów. Badaniom tym poddano komunalne osady ściekowe, pobrane z Oczyszczalni Ścieków w Tychowie oraz zużyte opony rowerowe. Dodatkowo, określone wyniki porównano z wynikami badań współspalania analizowanych osadów ściekowych w mieszance z miałem węglowym, jako paliwem klasycznym. Wstępnym etapem badań było wykonanie analizy technicznej materiałów użytych do badań. W dalszej części pracy, przedstawiono i poddano ocenie wyniki analizy strumienia gazów spalinowych, powstających w wyniku procesu współspalania badanych odpadów i osadów ściekowych. Mierzonymi parametrami były: c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu. W badaniach procesu spalania mieszanek użytych do badań, jako zmienne parametry niezależne przyjęto: udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej, temperaturę w strefie spalania pieca oraz współczynnik nadmiaru powietrza. Ostateczna analiza właściwości energetycznych mieszanek paliwowych oraz wyników badań warunków spalania tych mieszanek wykazała, że maksymalna wartość udziału osadów nie powinna przekraczać 10%. Wzrost temperatury spalania, znacznie pogarsza jakość termicznego przekształcania analizowanych osadów ściekowych, zwiększając emisje tlenku siarki(IV) a także, w dużo większym stopniu, tlenków azotu NO_x . Wzrost zawartości tlenu wraz z powietrzem dostarczanym do komory spalania, był przyczyną zwiększenia emisji tlenków azotu, przy nieznacznych zmianach stężenia ditlenku siarki.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, odpady gumowe, termiczne przekształcanie.

LABORATORY STUDIES ON POSSIBILITY OF CO-INCINERATION OF SEWAGE SLUDGE FROM THE SELECTED WASTEWATER TREATMENT PLANT

ABSTRACT

The paper presents results of laboratory studies on the possibility of co-incineration of sewage sludge with waste rubber, as the possibility of thermal treatment of both: sludge and examined waste. Municipal sewage sludge, taken from the Wastewater Treatment Plant in Tychowo and waste bicycle tires were used in the examinations. In addition, results were compared with the results of co-incineration of analysed sewage sludge mixed with hard coal as classic fuel. The initial stage of the study was a technical analysis of materials used in the examinations. Results of the analysis of exhaust gas fluxes, resulting from the co-incineration of examined waste and sewage sludge were presented and evaluated in the next part of paper. Following parameters were determined: c_{SO_2} – concentration of sulfur oxide (IV), c_{NO_x} – concentration of nitrogen oxides. Variable independent parameters determined during studies of mixtures incineration were: mass fraction of sludge in the fuel mixture, temperature in the combustion zone of the furnace and the excess air coefficient. Analysis of energetic properties and emissions of pollutants, under tested conditions of incineration of those mixtures, allowed determining the maximum share of sewage sludge in the fuel mixture and impact of variability of independent parameters of the incineration process on the quality of this process. Final analysis of energetic properties of mixtures and results of examinations on incineration conditions of those mixtures proved, that maximum mass fraction of sewage sludge should not exceed 10%. Increase of incineration temperature significantly decreases quality of thermal processing of examined sewage sludge, increasing emissions of sulfur oxide (IV) and, to a greater extent, of nitrogen oxides NO_x . Increase of oxygen amount, along with air fed into incineration chamber caused, causes increase of nitrogen oxides emission and slight changes of sulfur dioxide concentration.

Keywords: sewage sludge, waste rubber, thermal processing.

WSTĘP

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach [RMG 2015], od 1 stycznia 2016 r. składowanie nieprzetworzonych osadów ściekowych będzie niemożliwe. Natomiast, wg założeń aktualizacji Krajowego Planu Gospodarki Odpadami zakłada się, że każdego roku ilość osadów w przeliczeniu na suchą masę będzie wzrastała o około 2,5%. Jednakże, zakłada się również, zwiększenie ilości komunalnych osadów ściekowych przekształcanych metodami termicznymi [KPGO 2015]. Przewiduje, że w perspektywie 2020 roku, ponad 30% ścieków będą przekształcane termicznie.

Obecnie przekształcanie osadów ściekowych w Polsce realizowane jest poprzez [Bień 2015, Zabielska-Adamska 2015]:

- rolnicze wykorzystanie (pod warunkiem, że osady ściekowe są wcześniej badane i spełniają wymogi sanitarne, nie powodując skażenia gleby i upraw [Siuta 2015]),
- rekultywację terenów przemysłowych i składowisk odpadów,
- kształtowanie terenów oczyszczalni ścieków oraz magazynowanie osadów na ich terenie,
- produkcję kompostu,
- składowanie na składowiskach odpadów komunalnych,
- termiczne przekształcanie.

Spalanie i współspalanie osadów ściekowych z innymi paliwami oraz wpływ tych procesów na środowisko jest od wielu lat szeroko opisywane w literaturze krajowej i zagranicznej [Kowalski i in. 2003, Magdziarz i in., 2011, Murakami, 2009, Shimizu 2009, Solimene i in., 2009].

Jak podają autorzy artykułu [Czechowska-Kosacka i in. 2015], spalanie osadów ściekowych w chwili obecnej ma największą szansę rozwoju, gdyż poszukując alternatywnych źródeł energii, dąży się także do wykorzystania materiałów odpadowych (np. osadów ściekowych) jako źródło dodatkowej energii. Natomiast Werle uważa, że procesem umożliwiającym właściwe zagospodarowanie osadów ściekowych jest proces zgazowania a zastosowany czynnik zgazowujący wpływa w istotny sposób na skład otrzymanego gazu [Werle 2014]. Ponieważ idea zgazowania osadów wiąże się ze stosowaniem reaktora bezpośrednio na miejscu wytworzenia osadów ściekowych, Autor stwierdza, że optymalne jest sto-

sowanie powietrza atmosferycznego, jako czynnika zgazowującego [Werle 2014].

Istotne jest również wskazanie możliwości zastosowania produktów spalania komunalnych osadów ściekowych. Zabielska-Adamska stwierdza, że odpady ze spalania w kotle z rusztem mechanicznym, komunalnych osadów ściekowych z MPWiK w Łomży, charakteryzowały się dużo grubszym uziarnieniem, od popiołów uzyskiwanych ze spalania tych osadów w piecach fluidalnych. Są zatem korzystniejszym materiałem do wbudowywania w budowlę ziemne [Zabielska-Adamska K. 2015]. Przeprowadzone oznaczenia właściwości fizycznych i mechanicznych oraz skład chemiczny, wskazały na możliwość zastosowania produktu spalania komunalnych osadów ściekowych jako materiału na nasypy liniowe i do makroniwelacji terenu.

Innym rodzajem termicznego przekształcania osadów ściekowych jest ich piroliza. Proces ten, kojarzony jest głównie z odzyskiem energetycznym. Np. Shen i Zhang określili możliwość zastosowania oleju, jako jednego z trzech produktów (oprócz fazy gazowej i stałej) procesu pirolizy osadów ściekowych, pobranych z przykładowej oczyszczalni ścieków w zachodniej Australii. Maksymalna, 30% wydajność oleju została osiągnięta w temperaturze pirolizy 525 °C [Shen, Zhang 2003]. Natomiast Szaja stwierdza, że piroliza osadów ściekowych dodatkowo charakteryzuje się bardzo wysokim stopniem odzysku fosforu, jak i metali ciężkich zawartych w fazie stałej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza, że największą ilość fosforu, można odzyskać w wyniku pirolizy osadów po procesie suszenia [Szaja 2013].

Jeszcze inną możliwością wykorzystania osadów ściekowych przedstawiono w pracy [Czechowska-Kosacka 2013], w której opisano wykorzystanie osadów ściekowych pochodzących z biologicznej oczyszczalni ścieków, jako paliwa alternatywnego do wypału klinkieru. Przeprowadzone badania wykazały, że spalanie osadów ściekowych nie wpływa ujemnie na gospodarkę odpadami cementowni.

Ciekawe wykorzystanie popiołu ze spalania osadów ściekowych zostało określone przez zespół z Chińskiej Akademii Nauk [Lin in. 2005]. Badanie te potwierdziły, że popiół można zastosować jako dodatek w procesie wytwarzania płytek glazury. Zaproponowane proporcje nie miały wpływu na własności wytrzymałościowe i odpornościowe produkowanych materiałów ceramicznych.

Również w Katedrze Techniki Wodno-Mułowej i Utylizacji Odpadów Politechniki Koszalińskiej, przeprowadzane są badania laboratoryjne dot. problematyki termicznego przekształcania odpadów, m.in. osadów ściekowych [Dąbrowski, Dąbrowski 2015, Dąbrowski, Piecuch 2011, Dąbrowski, Piecuch 2011, Piecuch i in. 2009].

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad możliwością termicznego przekształcania osadów ściekowych, pobranych z wybranej komunalnej oczyszczalni ścieków oraz ich współspalania z paliwem klasycznym i wybraną grupą odpadów. Celem pracy było określenie jakości spalania analizowanych osadów ściekowych, przy założonej zmienności wybranych parametrów, poprzez wyznaczenie maksymalnej wartości udziału tym materiałów w mieszance paliwowej oraz emisji zanieczyszczeń powstających w procesie ich spalania.

ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Zakres badań przedstawionych w pracy obejmował dwa zasadnicze etapy:

- badania procesu spalania osadów ściekowych,
- badania i analiza możliwości współspalania badanych osadów ściekowych i węgla kamiennego jako paliwa klasycznego oraz dodatkowe badania procesu spalania osadów ściekowych wraz z odpadami gumowych, w wybranych proporcjach masowych.

W badaniach procesu spalania osadów ściekowych, jako zmienne parametry niezależne przyjęto: T [K] – temperatura w strefie spalania pieca, λ – współczynnik nadmiaru powietrza, – parametr określany jako iloraz, ilości powietrza dostarczanego do spalania i ilości powietrza teoretycznie potrzebnego w procesie spalania.

W pierwszej serii badań procesu spalania, jako parametr niezależny na poziomie stałym został przyjęty parametr $\lambda = 1,2$, natomiast wielkość T została przyjęta jako parametr zmienny, który zmieniano w zakresie: 1123,15–1343,15K, zwiększając go co 10K. W kolejnej serii tych badań, przeprowadzano je przy stałej wartości parametru $T = 1273,15K$, podczas gdy drugi rozpatrywany parametr zmienny niezależny tj. λ , zmieniano w przedziale: 1,1–1,4.

W badaniach procesu współspalania paliw użytych do badań, jako zmienną niezależną przyjęto parametr U_o [%] – udział masowy osadów ściekowych w mieszance paliwowej. Na-

tomiaś na stałym poziomie ustalono wartości parametrów: $\lambda = 1,2$ i $T = 1273,15K$. Parametr U_o zmieniano w zakresie 0–100%, w przypadku przeprowadzania badań nad procesem spalania mieszanek analizowanych osadów ściekowych, zarówno z węglem kamiennym, jak i odpadami gumowymi.

Pomiary ciepła spalania Q_s [$MJ \cdot kg^{-1}$], określającego własności energetycznych materiałów przeznaczonych do spalania, wykonano zgodnie z normą PN-81/G-04513, przy zastosowaniu mikroprocesorowego kalorymetru KL-11 „Mikado”, przeznaczonego do pomiaru ciepła spalania paliw stałych lub niewybuchowych, palnych substancji organicznych.

We wszystkich badaniach (zarówno procesu spalania, jak i współspalania), dodatkowo jako parametr stały został określony wskaźnik masy materiału, m , $kg \cdot m^{-3}$ – parametr określający wielkość próbki badanego paliwa jako wsadu do pieca, w odniesieniu do objętości komory spalania tego pieca. Przyjęto stałą wartość parametru $m = 1,2 kg \cdot m^{-3}$.

Zakresy zmienności wartości ww. parametrów określono na podstawie wcześniejszych badań procesu spalania różnych paliw (m.in. osadów ściekowych pochodzących z różnych oczyszczalni ścieków, odpadów komunalnych i miału węglowego), przy zastosowaniu tego samego stanowiska i analiz wpływu zmian tych parametrów na stężenia zanieczyszczeń gazowych powstałych w wyniku przeprowadzonych procesów spalania [Dąbrowski, Dąbrowski 2015, Dąbrowski, Piecuch 2011, Dąbrowski, Piecuch 2011].

Zmiennymi zależnymi (wynikowymi) w badaniach zarówno procesu spalania jak i współspalania były: c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV), $mg \cdot m^{-3}$, c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu, $mg \cdot m^{-3}$.

Do przeprowadzenia założonych zakresów badań służyła instalacja badawcza, której zasadniczym elementem był laboratoryjny jednostrefowy piec rurowy z poziomym układem grzejnym o maksymalnej temperaturze pracy ciągłej równej 1473K. Proces spalania przeprowadzany był w atmosferze powietrza, które doprowadzano do układu pompką przeponową poprzez rotometr stołowy mierzący natężenie jego przepływu w zakresie 0,5–8,5 $dm^3 \cdot min^{-1}$. Natomiast strumień gazów spalinowych wydostający się z reaktora pieca, poddawano analizie za pomocą analizatora spalin MADUR GA-21 plus. Dla ułatwienia orientacji i możliwości porównywania wyników, wszystkie stężenia zanieczyszczeń gazów spalinowych przeliczano na standardowe

warunki umowne spalania przy zawartości 11% O_2 w spalinach.

MATERIAŁY UŻYTE DO BADAŃ

Do badań procesu spalania i współspalania osadów ściekowych z założonymi materiałami paliwowymi, poddano osady ściekowe, pobrane z komunalnej oczyszczalni ścieków w Tychowie, która eksploatowana jest przez Regionalne Wodociągi i Kanalizacja Sp. z o.o. w Białogardzie. Na podstawie udostępnionej przez Zakład w Tychowie, karty przekazania odpadów, stwierdzono, że są one wolne bakteriologicznie a ich zawartość metali ciężkich nie przekracza dopuszczalnych norm; dlatego też mogą być przeznaczone do celów rolnych. Osady ściekowe wytwarzane przez oczyszczalnię w Tychowie odbierane są m.in. przez firmę specjalizującą się w usługach komunalnych, która stosuje je pod uprawę kukurydzy w gminie Białogard [Stępień 2014].

Jako materiały odpadowe gumowe, zastosowano zużyte opony rowerowe, które są odpadem jednomateriałowym. Dlatego, w przeciwieństwie do opon samochodowych, nie było konieczne wyodrębnianie wyłącznie warstwy gumy właściwej, którą jest naturalny lub sztuczny, wulkanizowany kauczuk. Następnie odpad został rozdrobniony do wielkości miazgi gumowej (uziarnienie około 1 mm).

Uwodnione osady ściekowe charakteryzowały się wysoką zawartością wilgoci ($W^r = \sim 60\%$), która mogła wpływać negatywnie na efektywność procesu spalania, gdyż wraz ze wzrostem uwodnienia osadów ściekowych, maleją wartości energetyczne. Dlatego też, osady zostały wysuszone do uzyskania wilgotności W^a około 10%. Ostatecznie uzyskano jednak, niską wartość ciepła spalania $Q_s = 11,6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Porównywalne wartości zostały określone w badaniach [Barz 2009], gdzie wartość opałowa osadów ściekowych, pobranych z oczyszczalni ścieków z Berlina i Ellwangen, wynosiła zaledwie $10\text{--}11 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, przy 10% zawartości wilgoci. Wysoką wilgotnością, charakteryzowały się również, osady ściekowe pochodzące z Oczyszczalni Ścieków – Dziarny Spółki z o.o. Iławskie Wodociągi. Przy wartości $W^r = 46,58\%$, wartość opałowa Q_j^f wyniosła zaledwie $5,8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Pomimo tak dużej zawartości wilgoci w tych odpadach, podczas badania procesu współspalania z ich udziałem aż 15%, praca kotła (WF-6) okazała się stabilna. Gorsze para-

metry, zaobserwowano dopiero przy 40% udziale osadów w mieszance paliwowej, gdy znacznie wzrosło również stężenie SO_2 i NO_x w spalinach [Rajczyk 2014].

Natomiast Li i zespół przedstawili wyniki badań procesu suszenia osadów ściekowych, pochodzących z oczyszczalni ścieków w miejscowości Hangzhou w Chinach, które charakteryzowały się znaczną zawartością wilgoci (W^a – około 80%). Proces wstępnego suszenia odbywał się z zastosowaniem cyrkulacyjnego złoża fluidalnego, będącego elementem składowym całego układu spalania tych osadów. Ostatecznie, wysuszone osady, charakteryzujące się już zawartością wilgoci poniżej 20%, przenoszone były bezpośrednio (w sposób ciągły) z suszarki do obiegu wspomnianego oryginalnego, zintegrowanego układu spalania [Li i in. 2014].

Wysuszone osady ściekowe, będące przedmiotem badań w niniejszej pracy, zostały poddane procesowi rozdrabniania do wielkości ziaren około 1 mm, w celu ujednoczenia wielkości ziaren osadów z rozmiarem ziaren pozostałych materiałów użytych do badań. Ułatwia to dozowanie i mieszanie osadów z innymi paliwami w procesie współspalania.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wstępnym etapem badań było wykonanie analizy technicznej materiałów użytych do badań, polegającej na określeniu części palnych (u^a , % – substancji organicznych) i niepalnych (n^a , % – substancji mineralnych i wilgoci). Podstawowe parametry charakteryzujące paliwa stałe to zawartość wilgoci (W), popiołu (A), części lotnych (V) oraz ciepła spalania (Q_s). Suma udziałów palnej substancji organicznej, popiołu i wilgoci stanowi 100% ($u^a + n^a = 100\%$) [Kordylewski i in. 2008]. Dodatkowo określono węgiel związany (tzw. substancja uwęglona; z ang. fixed carbon) FC^d , %, oznaczający pozostałość pierwiastka węgla po procesie odgazowania substancji palnej (w odniesieniu do substancji suchej właściwa jest zależność – $V + A + FC = 1$).

Analizy te wykonywano zgodnie z normami PN-ISO 1213-2:1999; PN-80/G-04511; PN-ISO 1171:2002; PN-80/G-04512; PN-G-04516:1998; PN-ISO 1928:2002. Wyniki pełnej analizy technicznej odpadów użytych w badaniach zostały przedstawione jako wykresy ramkowe na rysunku 1. Standardowo, wartości parametrów cha-

rakteryzujących te materiały, podano dla stanu analitycznego (a), którego wilgoć jest w stanie równowagi z wilgocią otoczenia.

W podsumowaniu wyników analizy technicznej, stwierdzono porównywalne wartości części palnych u^a badanych materiałów z wartością tego parametru w przypadku węgla kamiennego (u^a – około 74%). Osady ściekowe, jak większość odpadów organicznych, bogate są w substancje lotne. Fakt ten, znajduje potwierdzenie w wynikach zawartości części lotnych V^a analizowanych osadów ściekowych. Odpady te posiadały najwyższą wartość tego parametru, ze wszystkich badanych materiałów, również w porównaniu do V^a dla węgla kamiennego (V^a – około 34%). Jednakże, nie należy porównywać zawartości części lotnych i palnych, gdyż wartość V^a określana jest wyłącznie w warunkach beztlenowych. Ilość części lotnych jest wskaźnikiem stopnia uwęglenia naturalnego paliwa stałego i jego wartość maleje ze wzrostem stopnia uwęglenia. Osady ściekowe posiadały znacznie niższą zawartość popiołu A^a , w porównaniu do innych badanych materiałów. Związane jest to z zawartością substancji mineralnych (niepalnych) w paliwie.

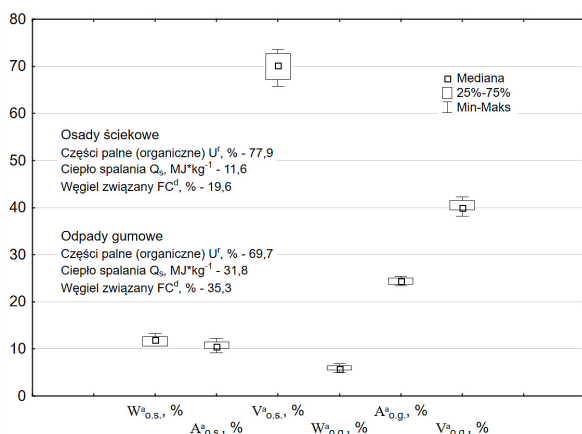
Odpady gumowe (np. zużyte opony) charakteryzują się bardzo wysoką wartością opałową, przewyższającą nawet własności energetyczne węgla kamiennego (paliwa klasycznego, którego Q_s wynosi około 21–22 MJ·kg⁻¹). Zauważa się również podwyższone wartości siarki jako

pierwiastka paliwowego tych odpadów. Wg Mianowskiego [Mianowski i in. 2007] wartości siarki w odpadach gumowych mogą osiągnąć nawet wartości 1,2–1,8%, natomiast wg Skalmowskiego, opony zawierają 1,3–2,2% S i około 0,2% Cl [Skalmowski 2007]. Zmniejsza to walory odpadów gumowych jako surowca do spalania lub współspalania energetycznego (opony w piecach cementowni stanowią tylko 10–20% masy ogółu spalanego paliwa). Należy również wspomnieć, że np. opony to tworzywa charakteryzujące się przede wszystkim odpornością na działanie wody, dlatego zaobserwowano tak niską wartość W^a w odpadach z tych materiałów.

Powyższa analiza porównawcza związana jest przede wszystkim z zawartością substancji organicznych w tych paliwach, a więc analizą pierwiastków elementarnych, takich jak węgiel, wodór, azot i siarka. Na podstawie danych literaturowych dotyczących analizy jakościowej odpadów [Marcisz 2013, Misiak 2012], można stwierdzić, że odpady polimerowe, do których należy zaliczyć odpady gumowe, mimo niskich zawartości azotu n^a , posiadają duże zawartości węgla elementarnego c^a , co ostatecznie powoduje dużo większą zawartość substancji organicznych, a więc palnych, porównywalnych np. z osadami ściekowymi.

Natomiast osady ściekowe, jako substancje, głównie organiczne, oddzielone od ścieków podczas ich oczyszczania, posiadają znacznie większą zawartość substancji lotnych, wyłącznie ze względu na stosunkowo duże wartości procentowe pierwiastków elementarnych, np. azotu n^a i siarki s^a [Rajczyk i in. 2014, Shen 2003, Magdziarz i in. 2011, Vainio i in. 2013]. Z zawartości substancji organicznych wynikają również własności energetyczne odpadów (wartość ciepła spalania Q_s). Niska wartość węgla elementarnego c^a osadów ściekowych [Rajczyk i in. 2014] jest powodem ich dużo niższej wartości kalorycznej, w porównaniu z odpadami polimerowymi. Potwierdza to Bień i Wystalska, według których ciepło spalania osadów prefermentowanych o zawartości 50% substancji palnych to wartość około 11 MJ·kg⁻¹ [Bień, Wystalska 2009]. Porównywalne wartości energetyczne określono przez autorów publikacji [Szaflik i in. 2014] dla osadów ściekowych odprowadzanych z komór fermentacyjnych Oczyszczalni Ścieków Pomorzany w Szczecinie.

Zmiany wartości ciepła spalania Q_s , w zależności od udziału osadów ściekowych w mieszankach paliwowych użytych do badań w ni-



Rys. 1. Statystyczne zestawienie wyników analizy technicznej badanych odpadów: zawartość wilgoci (W^a), popiołu (A^a), części lotnych (V^a); o.s. – osady ściekowe, o.g. – odpady gumowe

Fig. 1. Statistical summary of the results of technical analysis of examined waste: water content (W^a), ash content (A^a), volatiles content (V^a); o.s. – sewage sludge, o.g. – waste rubber

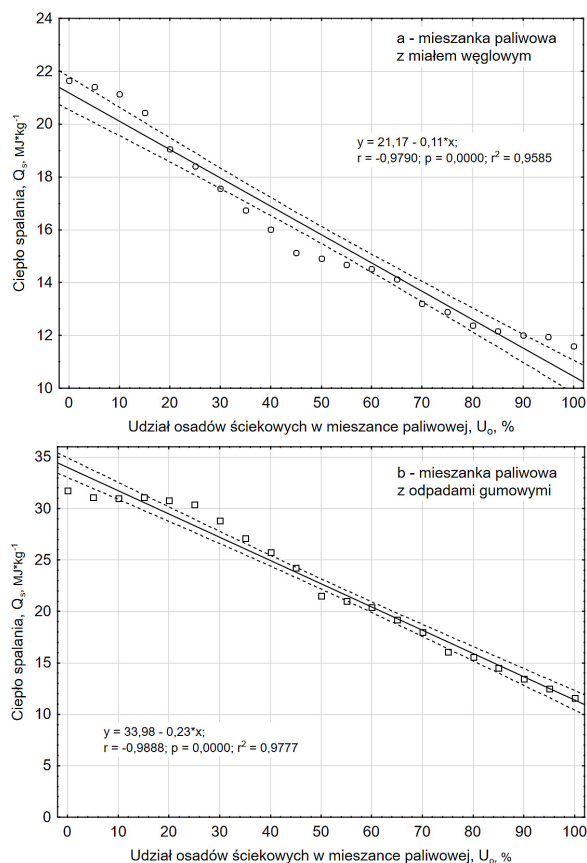
niejszej pracy, przedstawiono graficznie na rysunku 2. Analiza wyników tego etapu badań pozwala stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału osadów ściekowych w mieszance zmniejszała się wartość ciepła spalania mieszanek paliwowych, zarówno mieszanek z węglem kamiennym, jak i odpadami gumowymi. Spadek w całym zakresie był stały, osiągając ponad 50% przy 100% udziale osadów ściekowych. Analiza tych wyników pozwala również zauważyć, że maksymalny udział osadów ściekowych w mieszance paliwowej nie powinien przekraczać zakresu 10%, gdyż to pozwala utrzymać wartości Q_s na stosunkowo dużym poziomie, np. około $21 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ w przypadku badanych osadów ściekowych w mieszance z węglem kamiennym (rysunek 2a).

Badania procesu spalania osadów ściekowych

Podstawowym zakresem badań było określenie wpływu założonych i przedstawionych w metodyce zmienności parametrów, na wielkość wartości stężeń tlenu siarki(IV) i tlenków azotu, powstających w procesie spalania analizowanych osadów ściekowych. Wyniki pomiarów tych stężeń zostały przedstawione na rysunku 3.

Analizując te wyniki należy stwierdzić, że negatywnym efektem termicznej redukcji badanych odpadów jest wzrost wartości stężeń zarówno dwutlenku siarki, jak i tlenków azotu, zaobserwowany w całym zakresie zmienności temperatury spalania osadów ściekowych (ponad $300 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} c_{\text{SO}_2}$ i ponad $600 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} c_{\text{NO}_x}$, w przypadku najwyższej założonej wartości zmiennej T) – rysunek 3. Oczywiście zależność ta jest efektem znacznej zawartości siarki paliwowej w osadach ściekowych, co potwierdzają wyniki badań termicznego przekształcania osadów ściekowych pobranych z innych oczyszczalni ścieków. Np. w artykule [Dąbrowski, Dąbrowski 2015], współautorzy niniejszej pracy określili możliwość współspalania osadów ściekowych z Oczyszczalni Ścieków „Jamno”, która jest obiektem eksploatowanym przez Spółkę z o.o. Miejskie Wodociągi i Kanalizacja w Koszalinie. Dodawanie tych materiałów do badanych mieszanek powodował znaczny wzrost stężeń zarówno SO_2 , jak i NO_x .

Tak wysokie wartości stężeń analizowanych gazów spalinowych, związane są z tym, że ich emisja zależy głównie od rodzaju spalanej paliwa, gdyż źródłem SO_2 w spalinach są prawie wyłącznie procesy utleniania siarki zawartej

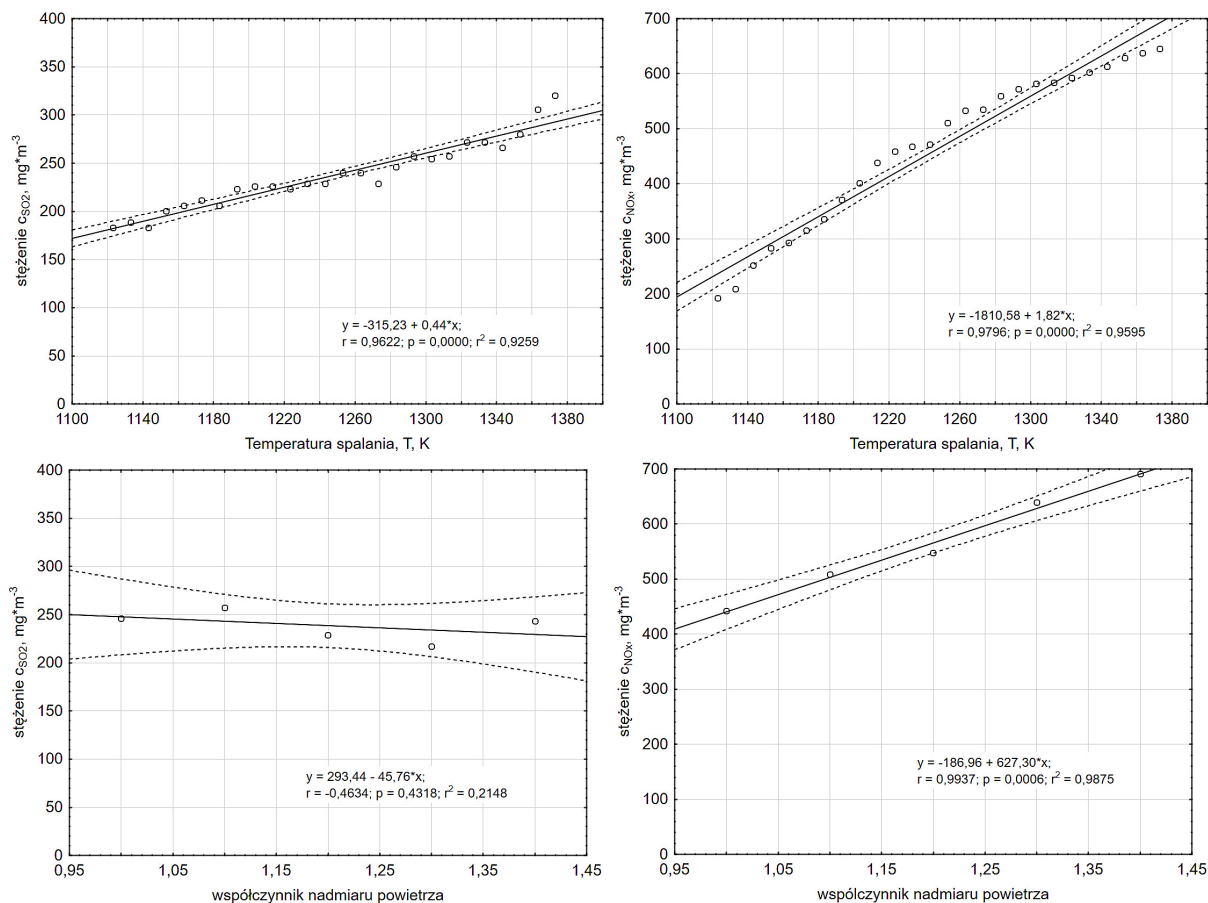


Rys. 2. Zmiany wartości ciepła spalania Q_s mieszanki osadów ściekowych wraz z miałem węglowym (a) i odpadami gumowymi (b), w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych U_s w mieszance paliwowej

Fig. 2. Changes of calorific value Q_s of mixture of sewage sludge with fine coal (a) and waste rubber (b), depending on the percentage share of sewage sludge in the fuel mixture U_s

w paliwie i domieszkach, podobnie jak w przypadku emisji NO_x , gdzie dodatkowym źródłem, oprócz azotu zawartego w paliwie, jest także azot zawarty w powietrzu dostarczanym do komory pieca. Jednakże, na znaczny wzrost stężeń tlenków azotu w zakresie zmian temperatury spalania, miały wyłącznie termiczne tlenki azotu, gdyż ich ilość zależy głównie od temperatury spalania oraz (w mniejszym stopniu) od stężenia tlenu w strefie spalania.

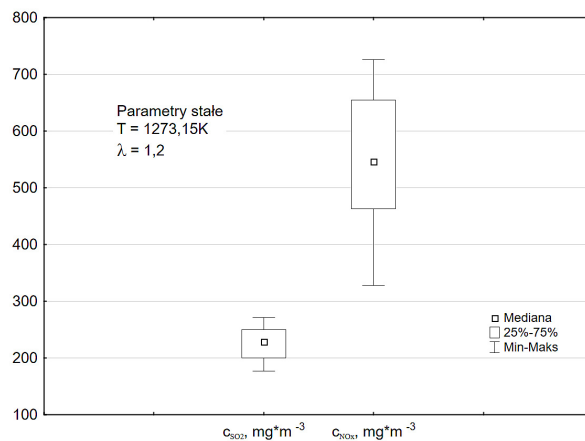
Na rysunku 4, w formie wykresu ramkowego, przedstawiono przykładową analizę statystyczną rozkładu mediany wraz z rozstępem (różnica wartości min. i maks.) dla stężeń analizowanych składników spalin w procesie spalania w stałych warunkach procesowych: $\lambda = 1,2$ i $T = 1273,15\text{K}$. Zaobserwowany duży rozrzut wyników świadczy o tym, że osady te charakteryzowały się dużą



Rys. 3. Wpływ zmian temperatury w strefie spalania T i współczynnika nadmiaru powietrza l, na stężenie wybranych gazów spalinowych powstałych w procesie spalania osadów ściekowych
Fig. 3. Influence of temperature in the incineration zone T and the excess air coefficient l, on the concentration of selected exhaust gases produced during incineration of sewage sludge

niejednorodnością a wysoka zawartość substancji lotnych w paliwie wzmagają początkowe, bardziej intensywne etapy spalania. Dlatego chcąc zachować odpowiednio wysoką dokładność i wiarygodność przeprowadzonych analiz, istotne było właściwe pobranie i przygotowanie prób. Pomimo tego, przeprowadzona statystyka opisowa, wskazuje na wciąż znaczną intensywność termicznego przekształcania osadów ściekowych.

Analiza zmian wartości stężeń gazów spalinowych, w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza, wskazuje jednoznacznie, że w procesie spalania badanych osadów ściekowych następował, w małym zakresie, spadek stężenia tlenku siarki(IV) oraz wyraźny wzrost stężenia tlenków azotu – rysunek 3. Przyczyną dużo większej zmienności stężeń tlenków azotu, był przede wszystkim wzrost stężenia tlenu dostarczanego do procesu spalania (wzrost współczynnika nadmiaru powietrza). Również duży udział w wysokich wartościach c_{NOx} w procesie spalania



Rys. 4. Przykładowa analiza statystyczna rozkładu stężeń wybranych gazów spalinowych powstałych w procesie spalania osadów ściekowych, przy założonych stałych wartościach zmiennych niezależnych
Fig. 4. Exemplary statistical analysis of distribution of concentration of selected exhaust gases produced during incineration of sewage sludge, at examined constant values of the independent variables

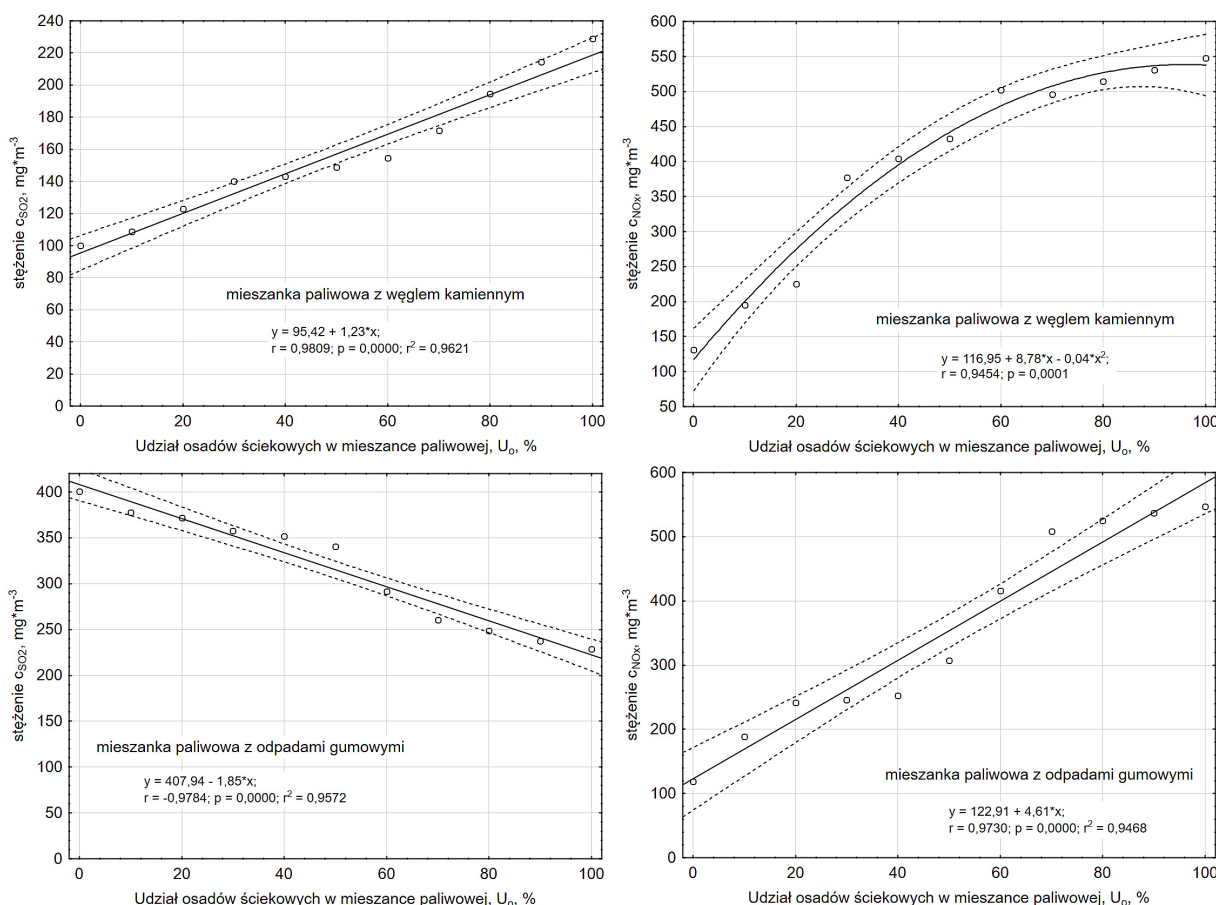
osadów ściekowych, miały paliwowe tlenki azotu (ze względu na ilość azotu elementarnego w osadach ściekowych).

Analiza możliwości współspalania osadów ściekowych

Zgodnie z metodyką badań, analizę możliwości współspalania osadów ściekowych rozpoczęto od procesu spalania mieszanek tych osadów z miałem węglowym. Na rysunku 5 przedstawiono wpływ zmian procentowego udziału osadów ściekowych U_o w tej mieszance paliwowej, na stężenie wybranych gazów spalinowych powstałych w procesie spalania tych mieszanek, w założonej temperaturze 1273,15 K i przy współczynniku $\lambda = 1,2$. Dodatnia korelacji pomiędzy zmienną U_o a stężeniami badanych związków pozwala stwierdzić, że wzrost udziału osadów ściekowych w badanym zakresie zmian parametru U_o , powoduje wzrost wartości stężenia zarówno tlenu siarki-

(IV), jak i tlenków azotu. Zależność ta jest efektem znacznie większej zawartości pierwiastków paliwowych w osadach ściekowych niż w węglu kamiennym. Również związane jest to z wielkością stężeń analizowanych gazów w procesie spalania poszczególnych składników mieszanek paliwowych przy ww. stałych parametrach.

W przypadku stężenia tlenu siarki(IV), jego wzrost w odniesieniu do zmiennej U_o był stosunkowo jednostajny – wzrost udział osadów w mieszance w zakresie 0–20% powodował wzrost c_{SO_2} niewiele powyżej 20%, podczas gdy zmiana parametru U_o w zakresie 80–100% była równa ponad 33%. Wartości współczynnika liniowej korelacji r Pearsona (rysunek 5) świadczy o prawie pełnej korelacji i stosunkowo liniowej zależności pomiędzy zmiennymi c_{SO_2} i U_o . W przypadku wartości współczynnika determinacji r^2 można wnioskować o mniejszej, ale również istotnej regresji, czyli sile powiązania pomiędzy analizowanymi parametrami.



Rys. 5. Wpływ zmian procentowego udziału osadów ściekowych U_o w mieszance paliwowej z węglem kamiennym i odpadami gumowymi na stężenie wybranych gazów spalinowych powstałych w procesie spalania tych mieszanek

Fig. 5. Influence of changes of the percentage share of sewage sludge U_o in the fuel mixture with fine hard coal and waste rubber on concentration of selected exhaust gases produced during incineration of those mixtures

W przypadku zmienności stężenia tlenków azotu (w pełnym zakresie parametru U_o), zaobserwowano znaczny wzrost stężenia c_{NOx} (100–400 mg · m⁻³ w zakresie $U_o = 0–40\%$). Nie stwierdzono już liniowych zależności pomiędzy tymi zmiennymi (dużo mniejsza wartość współczynnika liniowej korelacji r Pearsona. Prawdopodobnie, wpływ na to miał duży udział w znacznych wartościach c_{NOx} , tlenków termicznych, które pojawiają się dopiero w wysokich temperaturach – a w takich przeprowadzano proces współspalania. Ostatecznie zdecydowano się na empiryczne, wielomianowe dopasowanie rozkładu analizowanych zmiennych z określeniem odpowiedniego równania regresji (rys. 5).

Wyniki analizy możliwości współspalania osadów ściekowych z badanymi odpadami gumowymi przedstawiono również na rysunku 5. Badania przeprowadzono w analogicznych warunkach procesowych, tj. w założonej temperaturze 1273,15K i przy współczynniku $\lambda = 1,2$. W przypadku wyników badań wpływu udziału osadów ściekowych w mieszance paliwowej na stężenie tlenku siarki(IV), należy stwierdzić, że udział osadów ściekowych w mieszance paliwowej z odpadami gumowymi, powoduje spadek wartości c_{SO_2} (ujemna wartość współczynnika liniowej korelacji r Pearsona), gdyż odpady gumowe charakteryzują się większą zawartością siarki paliwowej od pozostałych analizowanych materiałów, o czy już wcześniej wspomniano.

Zakres dużo większej zmienności stężenia tlenków azotu porównywalny jest do rozrzutu wyników tej zmiennej w przypadku poprzedniego analizowania procesu współspalania osadów z miałem węglowym. Jednakże, w tym przypadku stwierdzono liniową zależność pomiędzy tymi zmiennymi (stosunkowo większą wartość współczynnika liniowej korelacji r Pearsona i determinacji r^2 (rys. 5).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza właściwości energetycznych mieszanek badanych osadów ściekowych i odpadów gumowych oraz badań warunków spalania tych mieszanek wykazała, że maksymalna wartość udziału osadów w mieszance paliwowej nie powinna przekraczać 10%.

Wzrost temperatury spalania, jako parametru zmiennego niezależnego, znacznie pogarsza jakość termicznego przekształcania analizowanych osadów ściekowych, zwiększając emisje

tlenku siarki(IV) a także, w dużo większym stopniu, tlenków azotu NO_x . Wzrost zawartości tlenu wraz z powietrzem dostarczanym do komory spalania, był przyczyną wzrostu emisji tlenków azotu, przy nieznaczących zmianach stężenia ditlenku siarki.

Ze względu na znaczne wartości stężeń analizowanych gazów spalinowych, termiczna redukcja osadów ściekowych jest możliwa, tylko i wyłącznie z zastosowaniem instalacji projektowanych wraz z kompleksowymi węzłami oczyszczania spalin. Należy je projektować w oparciu o morfologie odpadów komunalnych, bilans energetyczny wsadu do pieca spalarni, tak aby proces ten był efektywny i właściwy, nie tylko ze względów energetycznych, ale i ekologicznych [Piecuch, Dąbrowski 2014].

Proces spalania osadów ściekowych i ich współspalania, można opisać równaniami empirycznymi, a wyniki obliczeń świadczą o w miarę mocnej zależności liniowej w większości analizowanych zakresach zmienności (stosunkowo wysokie wartości współczynników korelacji).

LITERATURA

1. Barz M. Sewage Sludge from Wastewater Treatment as Energy Source. *International Journal of Renewable Energy*, 4(1), 2009.
2. Bień J.D., Bień B. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi w obliczu zakazu składowania po 1 stycznia 2016. *Inżynieria Ekologiczna (Ecological Engineering)* 45, 2015, 36–43.
3. Bień J.D., Wystalska K. Przekształcanie osadów ściekowych w procesach termicznych. Wydawnictwo Seidel-Przywecki. Warszawa 2009.
4. Czechowska-Kosacka A. Sewage Sludge as a Source of Renewable Energy. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 15, 2013.
5. Czechowska-Kosacka A., Cel W., Kujawska J., Wróbel K. Alternative Fuel Production Based on Sewage Sludge Generated in the Municipal Wastewater Treatment. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 17, 2015.
6. Dąbrowski J., Dąbrowski T. Laboratory Studies on the Effectiveness of Thermal Treatment of Selected Compositions of Waste from Organic Chemistry Industry. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 17, 2015.
7. Dąbrowski J., Piecuch T. Mathematical Description of Combustion Process of Selected Groups of Waste. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 13, 2011, 25–50.

8. Dąbrowski J., Piecuch T.: Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych wraz z osadami ściekowymi. *Polityka Energetyczna*, 14(1), 2011.
9. Kordylewski W. i in. *Spalanie i paliwa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2008.
10. Kowalski Z., Wzorek Z., Gorazda K., Jodko M., Przewrocki P., Kulczycka J. Thermal Utilisation of Sewage Sludge in Poland. *Minerals and Energy*, 18(2), 2003.
11. *Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2014 – Aktualizacja*. Warszawa 2015.
12. Li S., Li Y., Lu Q., Zhu J., Yao Y., Bao S. Integrated drying and incineration of wet sewage sludge in combined bubbling and circulating fluidized bed units. *Waste Management* 34, 2014, 2561–2566.
13. Lin D.F., Luo H.L., Sheen Y-N. Glazed Tiles Manufactured from Incinerated Sewage Sludge Ash and Clay. *Air & Waste Manage. Assoc.* 55, 2005, 163–172.
14. Magdziarz A., Wilk M., Kosturkiewicz B. Investigation of Sewage Sludge Preparation for Combustion Process. *Chemical and Process Engineering*, 32(4), 2011, 299–309.
15. Marcisz M.: Zawartość siarki całkowitej w złożach monokliny Zofiówki (SW część Górnośląskiego Zagłębia Węglowego). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 29(3), 2013.
16. Mianowski A., Radko T., Koszorek A.: Współspalanie mialu węglowego i zużytych opon. *Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej*. Koszalin 2007.
17. Misiak J.: Jakość węgla eksploatowanych pokładów w LW „Bogdanka” S.A. (Lubelskie Zagłębie Węglowe). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 28(4), 2012.
18. Murakami T., Suzuki Y., Nagasawa H., Yamamoto T., Koseki T., Hirose H., Okamoto S. Combustion characteristic of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery. *Fuel Process. Technol.*, 90, 2009, 778–783.
19. Piecuch T., Dąbrowski J., Dąbrowski T.: Badania laboratoryjne nad możliwością termicznej utylizacji poprodukcyjnych odpadów poliestrowych. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, Tom 11, Koszalin 2009.
20. Piecuch T., Dąbrowski J.: Projekt koncepcyjno-technologiczny Zakładu Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych dla Regionu Środkowopomorskiego. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*, 16, 136, 2011.
21. Rajczyk R., Bień J., Palka H., Pogodziński A., Smorąg H. Co-combustion of municipal sewage sludge and hard coal on fluidized bed boiler WF-6. *Archives of Environmental Protection*, 40(3), 2014, 101–113.
22. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach (Dz.U. 2015, 1277).
23. Shen L., Zhang D-K. An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidised-bed. *Fuel*, 82, 2003, 465–472.
24. Shimizu T., Toyono M., Ohsawa H. Emission of NO_x and N₂O during via co-combustion of dried sewage sludge with coal in a bubbling fluidized bed combustor, *Fuel*, 86, 2007, 957–964.
25. Siuta J. Spór o prawną i wykonawczą zasadność stosowania komunalnych osadów ściekowych. *Inżynieria Ekologiczna (Ecological Engineering)* 45, 2015, 1–20.
26. Skalmowski K.: *Poradnik gospodarowania odpadami*. Wyd. Verlag-Dashöfer, Warszawa, 2007.
27. Solimene R., Urciuolo M., Cammarota A., Chirone R., Salationo P., Damonte G., Donati C., Puglisi G.: Devolatilization and ash comminution of two different sewage sludges under fluidized bed combustion conditions. *Mediterranean Combustion Symposium*. Ajaccio, France 2009.
28. Stępień A. Badania procesu spalania osadów ściekowych po wirówce dekantacyjnej miejsko-gminnej oczyszczalni ścieków w Tychowie. *Praca magisterska*. Promotor prof. T. Piecuch. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2014.
29. Szaflik W., Iżewska A., Dominowska M. Chemical Energy Balance of Digested Sludge in Sewage Treatment Plant Pomorzany in Szczecin. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 16. Koszalin 2014.
30. Szaja A. Phosphorus Recovery from Sewage Sludge via Pyrolysis. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 15, 2013, 361–370.
31. Vainio E. i in. The fate of chlorine, sulfur, and potassium during co-combustion of bark, sludge, and solid recovered fuel in an industrial scale BFB boiler. *Fuel Processing Technology*, 105, 2013, 59–68.
32. Werle S. Wpływ rodzaju czynnika zgazowującego na parametry gazu ze zgazowania osadów ściekowych. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 16, 2014, 440–452.
33. Zabielska-Adamska K. Produkt spalania komunalnych osadów ściekowych jako grunt antropogeniczny. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)*. Tom 17. Koszalin 2015.