



Wielowariantowa analiza możliwości współspalania osadów ściekowych w kotłach energetycznych opalanych węglem

Werle S.

Institut Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej

ul. Konarskiego 22

44-100 Gliwice

tel. 32 237 29 83, fax. 32 237 28 72

e-mail: sebastian.werle@polsl.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę teoretyczną możliwości współspalania komunalnych osadów ściekowych z węglem kamiennym w obiektach energetyki zawodowej (kotły WR-25, CFB-420 oraz OP-230). Przeprowadzona analiza uwzględnia różny udział masowy osadów ściekowych w badanej mieszance paliwowej (0%-20%) i szeroki zakres zmian stosunku nadmiaru powietrza λ w komorze spalania (1,1-1,5). W oparciu o uzyskane wyniki przeprowadzono również analizę ekologiczną procesu współspalania osadów ściekowych, a także ocenę ekonomiczną przedsięwzięcia.

Abstract

Multivariate analysis of possibility of co-combustion of sewage sludge in coal-fired power boilers

The paper presents a theoretical analysis of the possibility of co-combustion of municipal sewage sludge with hard coal in power station boilers (WR-25, CFB-420 and OP-230). The analysis takes into account different mass fraction of sludge in the test fuel blend (0% - 20%) and a wide range of changes in excess air ratio λ in the combustion chamber (1.1-1.5). Based on the obtained results, ecological and economic analyses of co-combustion process were carried out.

1. Wstęp

W roku 2008 wytworzono w Polsce 567,3 tys. ton s.m. (suchej masy) komunalnych osadów ściekowych [1]. Co więcej, szacuje się, iż ilość ta w roku 2018 wyniesie aż 706,6 tys. ton s.m., zaś w roku 2020 już niemal milion ton s.m. [2]. Polskie oczyszczalnie ścieków obsługują 63% społeczeństwa. Wskaźnik ten w krajach Europy Zachodniej wynosi 78% [3]. Dodatkowo, w Polsce wskaźnik produkcji osadów ściekowych w odniesieniu do 1 mieszkańca jest wyższy niż średnia dla krajów z tzw. „nowej” Unii (12UE) (tabela 1.1) [4].

Analizując dane przedstawione w tabeli widać, iż wartość ta zmierza ku wartości średniej dla krajów tzw. „starej” Unii (15UE). Pozwala to na tej podstawie wnioskować, iż w miarę wzrostu poziomu życia społeczeństwa ilość produkowanych osadów ściekowych w kraju wzrasta.

Tabela 1.1 Roczna produkcja osadów ściekowych w odniesieniu do 1 mieszkańca dla wybranych krajów Unii Europejskiej (UE)

Kraj wytworzenia	Roczna produkcja osadów kg/1 mieszkańca
Średnia 15UE	22
Bułgaria	4
Cypr	10
Czechy	21
Węgry	13
Łotwa	10
Litwa	21
Polska	14
Rumunia	6
Słowacja	10
Słowenia	10
Średnia UE12	12

Dominującym kierunkiem zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w Polsce jest ich unieszkodliwianie przez składowanie. Z punktu widzenia zobowiązań w dostosowywaniu polskiego prawa do wymogów UE jest to wysoce niekorzystne. Głównym problemem jest brak instalacji do termicznego przekształcania osadów ściekowych. W innych krajach tzw. „starej” UE termiczne metody utylizacji osadów ściekowych są na wysokim poziomie zaawansowania technologicznego. W tabeli 1.2 przedstawiono przykładową strukturę zagospodarowania osadów ściekowych w wybranych krajach europejskich [4].

Polska struktura wykorzystania osadów ściekowych przedstawiona w tabeli 1.2 z uwagi na wprowadzony przez Ministra Gospodarki i Pracy [5] od 1 stycznia 2013r. zakaz składowania osadów ściekowych, charakteryzujących się między innymi ciepłem spalania o wartości > niż 6MJ/kg musi zostać zmieniona. Wymieniona bowiem wartość ciepła spalania jest zdecydowanie niższa niż większości substancji organicznych. W tabeli 1.3 przedstawiono przykładowe wartości ciepła spalania dla wybranych paliw [6-8].

Tabela 1.2 Sposób zagospodarowania osadów ściekowych w wybranych krajach Europy

Kraj	Wykorzystanie rolnicze, %	Rekultywacja terenu, %	Metody termiczne, %	Inne sposoby (m.in. składowanie), %
Austria	18	1	47	34
Dania	55	2	43	-
Niemcy	30	3	38	29
Holandia	-	-	60	40
Wielka Brytania	60	1	20	19
Czechy	45	28	-	26
Polska	30	30	-	40

Tabela 1.3 Wartości ciepła spalania dla wybranych substancji organicznych [6 - 8]

Paliwo	Ciepło spalania, MJ/kg
Tłuszcz i kożuch	38,75
Skratki z kraty gęstej	24,00
Osad wstępny	
- surowy	25,56
- przefermentowany	11,62
- chemiczny	16,27
Osad nadmierny (czynny)	20,92
Osad po złożach biologicznych	19,70
Odpadki z rozdrabniarek kuchennych	19,06
Osad ślaskich oczyszczalni ścieków (średnio)	14,66
Drewno pnia	20,18
Kora	21,47

Przedstawione powyżej fakty sprawiają, iż istnieje w Polsce szczególna potrzeba rozwoju termicznych metod zagospodarowania osadów ściekowych.

2. Osad ściekowy jako odnawialne źródło energii

Konieczność rozwoju termicznych metod zagospodarowania osadów ściekowych doskonale wpisuje się w polską politykę energetyczną, której głównymi celami są [9]:

- Poprawa efektywności energetycznej,
- Wzrost bezpieczeństwa dostaw paliw i energii,
- Dywersyfikacja struktury wytwarzania energii elektrycznej poprzez wprowadzenie energetyki jądrowej,
- Rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE), w tym biopaliw,
- Rozwój konkurencyjnych rynków paliw i energii,
- Ograniczenie oddziaływania energetyki na środowisko.

Z punktu widzenia problemu zagospodarowania osadów ściekowych szczególnie istotne jest postulowane zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

3. Problem termicznego przekształcania osadów ściekowych

Termiczne metody utylizacji osadów ściekowych w Polsce nie są jak dotąd szeroko i powszechnie stosowane w skali przemysłowej jednak spełnienie wymagań UE odnośnie strumienia energii generowanej w kraju z odnawialnych źródeł energii, nie jest możliwe do realizacji bez wprowadzenia technologii termicznej utylizacji osadów [10].

Zgodnie z [11] pod pojęciem termicznego przekształcania odpadów (i osadów ściekowych) rozumie się: spalanie odpadów (i osadów ściekowych) przez ich utlenienie oraz inne procesy termicznego przekształcania odpadów, w tym pirolizę, zgazowanie i proces plazmowy, o ile substancje powstające podczas tych procesów termicznego przekształcania odpadów są następnie spalane [12].

W warunkach polskich szczególnie znacznie odgrywa współspalanie. Ta technika łączy w sobie korzystanie z odnawialnych źródeł energii z użytkowaniem energii z paliw kopalnych. Współspalanie realizowane jest najczęściej w ramach istniejącej infrastruktury i może być stosowane we wszystkich dotychczasowych procesach spalania. Wybór konkretnego rozwiązania technicznego współspalania powinien być dokonywany na podstawie kryteriów minimalnej ingerencji w normalną pracę siłowni i minimalnych poniesionych kosztów modernizacyjnych. Specyfika polskiej energetyki opartej na kotłach opalanych węglem stwarza duże możliwości utylizacji osadów ściekowych. Jednakże, by móc rozpatrywać tę możliwość należy zadać pytanie czy osad ściekowy to biomasa?

4. Osad ściekowy jako biomasa

Według Encyklopedii PWN biomasa [gr. *bios* 'życie', łac. *massa* 'ciasto'] to masa materii organicznej zawartej w organizmie zwierzęcia lub rośliny; także ilość materii organicznej wytworzonej przez populację, zespół organizmów danego środowiska, na danej przestrzeni, w jednostce czasu. Jednakże definicja ta nie jest przydatna, jeśli myśli się o biomacie, jako potencjalnym źródle energii.

Według definicji UE [13] biomasa oznacza ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (łącznie z substancjami

roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych i miejskich.

Kiedy mówimy o polskim ustawodawstwie i wynikającej z niego definicji biomasy, należy wymienić dwa Rozporządzenia. Pierwsze z nich to Rozporządzenie Ministra Środowiska [14] w sprawie standardów emisyjnych z instalacji. Zgodnie z nim biomasa rozumiana jako:

1. Produkty składające się w całości lub w części z substancji roślinnych pochodzących z rolnictwa lub leśnictwa spalane w celu odzyskania zawartej w nich energii;
2. Następujące odpady:
 - a. Roślinne z rolnictwa i leśnictwa,
 - b. Roślinne z przemysłu przetwórstwa spożywczego, jeżeli odzyskuje się wytwarzaną energię cieplną,
 - c. Włókniste roślinne z procesu produkcji pierwotnej masy celulozowej i z procesu produkcji papieru z masy, jeżeli odpady te są spalane w miejscu, w którym powstają, a wytwarzana energia cieplna jest odzyskiwana,
 - d. Korka,
 - e. Drewna, z wyjątkiem odpadów drewna zanieczyszczonego impregnatami i powłokami ochronnymi, które mogą zawierać związki chlorowcoorganiczne lub metale ciężkie, oraz drewna pochodzącego z odpadów budowlanych lub z rozbiórki.

Analizując powyższe informacje, widać iż biomasa może być produktem ale także odpadem. Biomasa określana jako „odpad” mieści się w klasyfikacji zdefiniowanej przez Ministra Środowiska w Rozporządzeniu [15] w sprawie Katalogu Odpadów. Zatem biomasą są odpady należące do grup:

1. 02 Odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności
2. 03 Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury
3. 20 Odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury

Biomasa rozumiana natomiast jako produkt to np. drewno, zrębki, pellety czy też rośliny z upraw energetycznych.

Druga z definicji biomasy wynika wciąż z obowiązującego Rozporządzenia Ministra Gospodarki [16]. Według niej biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji. Ze względu

na znaczną zawartość substancji organicznych w osadach ściekowych a tym samym na ich podatność na procesy rozkładu, osady ściekowe uznaje się za ulegające biodegradacji.

W myśl tej znacznie szerszej od poprzedniej definicji do biomasy zaliczyć można osady ściekowe, które są klasyfikowane we wcześniej wspomnianym Katalogu Odpadów w grupie 19 - Odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych (podgrupa 19 08 – odpady z oczyszczalni ścieków nie ujęte w innych grupach; kod 19 08 05 – ustabilizowane osady ściekowe).

Z uwagi jednak na nowelizację ustawy Prawo energetyczne [17] oraz konieczności realizacji zobowiązań międzynarodowych z zakresu zwiększania udziału energii ze źródeł odnawialnych, obecnie trwają prace (etap konsultacji społecznych) nad nowym projektem wcześniej wymienionego Rozporządzenia [14]. W myśl tego projektu biomasa to stałe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej lub leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów i pozostałości rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji, oraz ziarna zbóż niespełniające wymagań jakościowych dla zbóż w zakupie interwencyjnym (...) i ziarna zbóż, które nie podlegają zakupowi interwencyjnemu. Projekt ten wprowadza także osobną definicję dla biomasy leśnej, czyli biomasę powstałą na terenie lasu oraz w wyniku jej przetworzenia, a także biomasę stanowiącą odpad lub pozostałość z procesu przetwarzania biomasy powstałej na terenie lasu lub odpady z przemysłu przetwarzającego odpady z produkcji leśnej. Wprowadzenie tej definicji ma na celu wyraźne określenie granicy przedmiotowego rodzaju biomasy, tak, aby nie było problemu z jej zdefiniowaniem, co w dotychczasowej praktyce wielokrotnie miało miejsce.

Widać, iż definicje te zbieżają ku definicji unijnej [18], znacznie pojęciowo szerszej, według której osady ściekowe należy definiować, jako biomasę.

5. Zakres stosowania definicji

Przytoczone definicje mają ścisły obszar zastosowania. Definicja wg Rozporządzenia Ministra Środowiska, jest wykorzystywana w celu ustalania warunków środowiskowych związanych z wprowadzaniem gazów i pyłów do powietrza. W myśl tego rozporządzenia osady ściekowe nie są zaliczane do biomasy, a proces termicznego przekształcania osadów ściekowych należy traktować jak proces termicznego przekształcania odpadów. Standardy takie są znacznie bardziej rygorystyczne. Należy dodatkowo brać pod uwagę fakt, że instalacje termicznego przekształcania odpadów, które mieszczą się w definicji biomasy, podlegają pewnym uproszczeniom, do których należy m.in. zwolnienie z obowiązku przestrzegania specjalnych wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów [19]. Warto jednak podkreślić, iż jeżeli w instalacji jednocześnie wraz z paliwami są spalane odpady inne niż niebezpieczne w ilości nie większej niż 1% masy tych paliw, to do instalacji tej nie stosuje się przepisów dotyczących współspalania odpadów w zakresie standardów emisyjnych.

Druga z przedstawionych definicji wynika z Rozporządzenia, które służy potrzebie rozliczania udziału energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii. W związku z tym, z punktu widzenia Ustawy Prawo energetyczne termiczna utylizacja osadów ściekowych to proces produkcji energii ze źródeł odnawialnych. Definicja ta umożliwia zatem przedsiębiorstwom wywiązanie się z nałożonych prawem energetycznych obowiązków.

6. Współspalanie

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione względy bardzo korzystnym procesem termicznej przeróbki odpadów jest proces współspalania. Wiąże się to głównie z możliwością współspalania osadów ściekowych w dużych, istniejących zakładach przemysłowych tj. elektrowniach, elektrociepłowniach bądź cementowniach. Zakłady tego typu są już w większości przypadków wyposażone w odpowiednie instalacje, w których mogłyby być prowadzony proces współspalania wraz z paliwem konwencjonalnym. Obecnie większość tych zakładów posiada zaawansowany system oczyszczania spalin, stopniowo modernizowany w celu spełnienia wymagań emisyjnych. Wszystkie te aspekty, zarówno ekonomiczne jak i techniczne skłaniają do postawienia tezy, iż przynajmniej w najbliższym czasie współspalanie będzie dominującą technologią termicznej utylizacji osadów ściekowych.

Współspalanie osadów ściekowych z paliwami naturalnymi (węgiel kamienny, węgiel brunatny, drewno) czy też odpadami komunalnymi stanowi dobry i perspektywiczny sposób zagospodarowania osadów ściekowych. W warunkach polskich szczególnie ciekawe wydaje się być współspalanie osadów ściekowych w kotłach pyłowych. Przykładem pierwszych prób może być instalacja współspalania osadów ściekowych w kotle pyłowym OP-230 w EC Gdańsk [20]. W pracy stwierdzono, iż dodatek osadu ściekowego w ilości nieprzekraczającej 1% w odniesieniu do całkowitej masy paliwa nie wymaga zmian konstrukcyjnych kotła. Innym polskim przykładem współspalania osadów ściekowych z węglem jest EC Rzeszów [21], w której współspalano osady ściekowe w kotle rusztowym WR-25.

7. Warunki prowadzenia procesu współspalania

Warunkiem efektywnego prowadzenia procesu współspalania w konwencjonalnych ciągach technologicznych przystosowanych do spalania węgla kamiennego lub brunatnego jest ich odpowiednie dostosowanie do parametrów nowej mieszanki paliwowej. W znacznej liczbie przypadków modernizacje te nie są znaczące, a nawet czasami niekonieczne, np. w przypadku zakładów, w których eksploatowane są kotły rusztowe należy zwrócić uwagę na uziarnienie mieszanki paliwowej. Cechą osadów w odróżnieniu od węgla jest większa zawartość tlenu, co powoduje obniżenie temperatury zapłonu. Stopień zmielenia osadów odgrywa pewną rolę w przypadku kotłów pyłowych.

Proces współspalania jak każde zjawisko wieloetapowe jest stosunkowo złożone pod względem technicznym. Przy podejmowaniu się prowadzenia procesu współspalania, podstawową informacją, jaką powinniśmy wziąć pod uwagę jest informacja o jakości dostarczanych osadów, ich wilgotności, kaloryczności, o ich zachowywaniu się podczas spalania, a także o powstających w trakcie ich obróbki zanieczyszczeniach i odpadach.

Niektóre ich własności, takie jak: wysoka wilgotność czy też duży udział części lotnych oraz niska gęstość i topliwość popiołów utrudniają ich energetyczne użytkowanie [22]. Trzeba się również liczyć z faktem, iż parametry wyjściowe dostarczanych osadów będą się różnić w zależności od dostawcy oraz okresu dostarczenia. Będą to głównie różnice wynikające z pochodzenia osadów z terenów uprzemysłowionych, terenów o charakterze rolniczym, również pora roku odgrywa istotne znaczenie i wpływa na skład elementarny osadów ściekowych. Wymaga to na eksploatatorze instalacji zagwarantowania prawidłowej pracy kotłów niezależnie od jakości dostarczanego paliwa. Polskie badania doświadczalne przeprowadzone w układach pracujących zalecają, aby udział osadów ściekowych w strumieniu paliwa nie przekracza 5%. Doświadczenia zagraniczne pokazują, iż możliwe jest stosowanie nawet 30% udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej [23].

8. Analiza własna

Niniejsza analiza obejmuje przedstawienie możliwości współspalania w obiektach zawodowych mieszanki paliwowej składającej się wysuszonych osadów ściekowych oraz węgla kamiennego. Przeprowadzona analiza uwzględni różny udział masowy osadów ściekowych w badanej mieszance paliwowej (0%-20%) oraz stosunku nadmiaru powietrza λ w komorze spalania (1,1-1,5). Analizę porównawczą przeprowadzono dla trzech kotłów: WR-25, CFB-420 oraz OP-230. W oparciu o uzyskane wyniki przeprowadzono również analizę ekologiczną procesu współspalania osadów ściekowych, a także ocenę ekonomiczną przedsięwzięcia.

Kocioł WR-25 [24] jest kotłem wodnym z paleniskiem rusztowym. Jest to stosunkowo stara konstrukcja, jednak ze względu na prostą budowę jest nadal wykorzystywana w wielu zakładach. Ostatnio kotły tego typu są często modernizowane, głównie ze względu na potrzeby spełniania warunków emisyjnych.

Kocioł CFB-420 [25] jest to kocioł wykorzystywany do spalania paliwa w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej.

Kocioł OP-230 jest to kocioł parowy opalany węglem kamiennym. Kocioł tego typu zasilany jest pyłem węglowym o odpowiednim rozdrobnieniu, zapewnionej wartości opałowej oraz o odpowiednim stopniu zawartości wilgoci [24].

W analizowanych przypadkach, podstawowym składnikiem mieszanki paliwowej jest węgiel kamienny, natomiast dodatek stanowi wysuszony osad ściekowy o zawartości suchej masy 92%. Do przeprowadzenia analizy wykorzystano różne udziały masowe osadów ściekowych w mieszance paliwowej. Przeprowadzono 4 próby, odpowiednio z dodatkiem 5%, 10%, 15% oraz 20% wysuszonych osadów ściekowych, wyniki odniesiono do „próby odniesienia”, która nie zawierała dodatku osadów ściekowych. W tabeli 8.1 przedstawiono skład analizowanych mieszanek paliwowych.

W badaniach dokonano obliczeń równowagowych procesu spalania mieszanek paliwowych. Założono spalanie całkowite i zupełne. Analizę przeprowadzono w funkcji stosunku nadmiaru powietrza. Otrzymany skład spalin (tabela 8.2) stanowił dane do obliczeń energetycznych komory spalania analizowanych kotłów.

Tabela 8.1 Skład analizowanych mieszanek paliwowych [26]

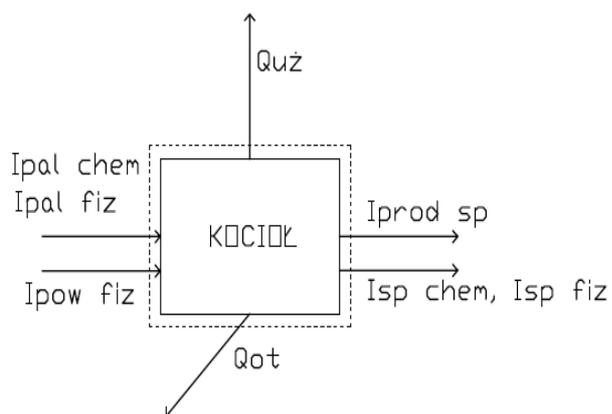
Udział masowy składnika w mieszanke,	Udział masowy osadu ściekowego w mieszanke paliwowej				
	0	5	10	15	20
C	0,6867	0,6542	0,6246	0,5977	0,5730
H	0,0083	0,0087	0,0091	0,0094	0,0097
S	0,0466	0,0468	0,0469	0,0470	0,0472
O	0,0849	0,0932	0,1070	0,1076	0,1141
N	0,0178	0,0205	0,0230	0,0252	0,0272
H ₂ O	0,0493	0,0517	0,0539	0,0559	0,0577

Tabela 8.2 Jednostkowa zawartość podstawowych składników spalin (i) suchych (ss), kmol_i/kmol_{ss}

λ	n_i , kmol _i /kmol _{ss}	Udział masowy osadu ściekowego w mieszanke paliwowej				
		0	5	10	15	20
1,10	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,000272	0,000284	0,000294	0,000303
	N ₂	0,27574	0,263816	0,25207	0,24294	0,23389
	O ₂	0,00665	0,00636	0,00607	0,00585	0,00563
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,15	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,000272	0,000284	0,000294	0,000303
	N ₂	0,28825	0,27577	0,26349	0,25394	0,24448
	O ₂	0,00997	0,00954	0,00911	0,00877	0,00844
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,20	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,000272	0,000284	0,000294	0,000303
	N ₂	0,30075	0,28773	0,27491	0,26494	0,25507
	O ₂	0,01330	0,01272	0,01214	0,0117	0,01126
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,25	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,000272	0,000284	0,000294	0,000303
	N ₂	0,31326	0,29969	0,28633	0,27594	0,26566
	O ₂	0,01662	0,01589	0,01518	0,01462	0,01407
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,30	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,000272	0,000284	0,000294	0,000303

	N ₂	0,32576	0,31165	0,29775	0,28694	0,27624
	O ₂	0,01995	0,01907	0,01821	0,01755	0,01689
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,35	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,00027	0,00028	0,00029	0,00030
	N ₂	0,33827	0,32361	0,24065	0,29794	0,28683
	O ₂	0,02326	0,02225	0,00304	0,02038	0,01970
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,40	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,00027	0,00028	0,00029	0,00030
	N ₂	0,35077	0,33557	0,32059	0,30895	0,29742
	O ₂	0,02659	0,02543	0,02429	0,02340	0,02252
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,45	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,00027	0,00028	0,00029	0,00030
	N ₂	0,36328	0,34752	0,33201	0,31995	0,30801
	O ₂	0,02991	0,02861	0,02732	0,02632	0,02533
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681
1,50	CO ₂	0,05722	0,05452	0,05205	0,04981	0,04775
	SO ₂	0,00026	0,00027	0,00028	0,00029	0,00030
	N ₂	0,37578	0,35948	0,34343	0,33095	0,31859
	O ₂	0,03324	0,03179	0,03036	0,02925	0,02815
	H ₂ O	0,02604	0,02627	0,02644	0,02661	0,02681

Na rysunku 8.1 przedstawiono ilustrację graficzną do sporządzenia bilansu energii komór spalania analizowanych kotłów.



Rys. 8.1 Ilustracja graficzna bilansu energii

$$\dot{I}_{\text{palfiz}} + \dot{I}_{\text{palchem}} + \dot{I}_{\text{powfiz}} = \dot{Q}_{\text{uz}} + \dot{I}_{\text{spalfiz}} + \dot{I}_{\text{spalchem}} + \dot{I}_{\text{prodst}} + \dot{Q}_{\text{ot}} \quad (8.1)$$

gdzie,

\dot{I}_{palfiz} – entalpia fizyczna paliwa, kJ

\dot{I}_{palchem} – entalpia chemiczna paliwa, kJ

\dot{I}_{powfiz} – entalpia fizyczna powietrza, kJ

\dot{Q}_{uz} – przyrost entalpii czynnika roboczego, kJ

\dot{I}_{spfiz} – entalpia fizyczna spalin, kJ

\dot{I}_{spchem} – entalpia chemiczna spalin, kJ

\dot{I}_{prodsp} – entalpia chemiczna produktów spalania, kJ

\dot{Q}_{ot} – ciepło tracone do otoczenia, kJ

Rozwiązanie bilansu energii przy wykorzystaniu rzeczywistych parametrów pracy kotłów (tabela 8.3 – 8.5) oraz po uwzględnieniu założeń upraszczających (entalpia fizyczna paliwa i powietrza oraz entalpia chemiczna spalin i produktów spalania są równe zero) pozwoliło na wyznaczenie strumienia spalanego paliwa \dot{P} .

Tabela 8.3 Ogólna charakterystyka kotła WR-25 [24]

Dane ogólne	Jednostka	Wartość
Wydajność maksymalna, trwała	MW	30,00
Ciśnienie wody na wylocie	MPa	1,50
Opory przepływu wody	MPa	0,25
Temperatura wody na wlocie	°C	70,00
Temperatura wody na wylocie	°C	150,00
Ilość spalin wylotowych	m ³ /s	15,50
Wymagany ciąg za kotłem	Pa	800,00
Temperatura spalin wylotowych	°C	180,00

Tabela 8.4 Parametry znamionowe kotła CFB-420 [24]

Dane ogólne	Jednostka	Wartość
Wydatek pary przegrzanej	t/h	112,3-116,7
Temperatura pary wylotowej	°C	538,0
Ciśnienie pary wylotowej	Bar	139,3
Temperatura wody zasilającej	°C	230,0
Temperatura spalin wylotowych	°C	128,0

Tabela 8.5 Parametry znamionowe kotła OP-230 [24]

Dane ogólne	Jednostka	Wartość
Maksymalna wydajność	kg/s	64,0
Temperatury pary na wylocie	°C	540,0
Ciśnienie pary na wylocie	MPa	13,5
Temperatura wody zasilającej	°C	200,0

Następnie wyznaczono sprawność kotła metodą bezpośrednią η ze wzoru:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{uz}}{\dot{P} \cdot W_d} \quad (8.2)$$

Wartość opałowa obliczona z formuły Dulonga [27] analizowanych mieszanek paliwowych jest przedstawiona w tabeli 8.6.

Tabela 8.6 Wartość opałowa analizowanych mieszanek paliwowych

Udział masowy osadu ściekowego w mieszance paliwowej, %	0	5	10	15	20
Wartość opałowa, kJ/kg	26677,7	25461,6	24251,5	23333,3	22411,0

Uzyskane wyniki sprawności analizowanych kotłów przedstawiono w tabelach 8.7 – 8.9.

Tabela 8.7 Sprawność kotła WR-25

Kocioł WR-25					
λ	Udział masowy osadu ściekowego w mieszance paliwowej, %				
	0	5	10	15	20

1,10	90,8	90,8	90,7	90,7	90,6
1,15	90,5	90,5	90,4	90,4	90,4
1,20	90,2	90,2	90,1	90,1	90,1
1,25	90,0	89,9	89,9	89,8	89,8
1,30	89,7	89,6	89,6	89,6	89,5
1,35	89,4	89,4	89,3	89,3	89,2
1,40	89,1	89,1	89,0	89,0	89,0
1,45	88,9	88,8	88,8	88,7	88,7
1,50	88,6	88,5	88,5	88,4	88,4

Tabela 8.8 Sprawność kotła CFB-420

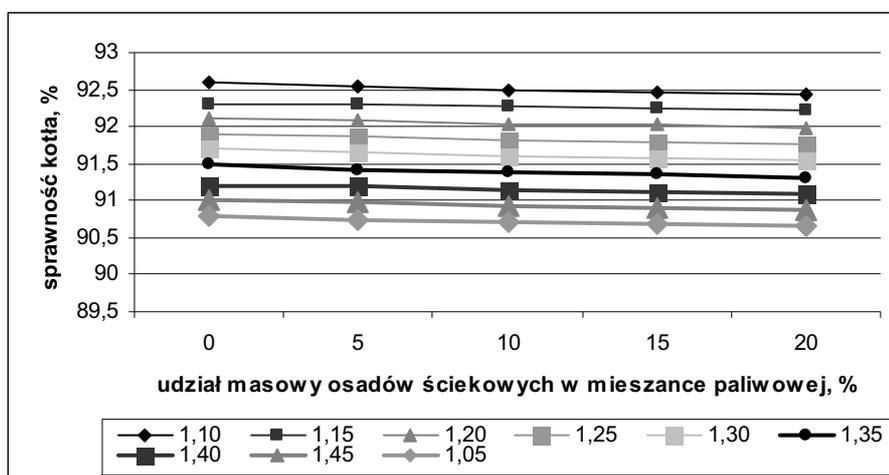
Kocioł CFB-420					
λ	Udział masowy osadu ściekowego w mieszance paliwowej, %				
	0	5	10	15	20
1,10	92,6	92,5	92,5	92,5	92,4
1,15	92,3	92,3	92,3	92,2	92,2
1,20	92,1	92,1	92,0	92,0	92,0
1,25	91,9	91,9	91,8	91,8	91,8
1,30	91,7	91,6	91,6	91,6	91,5
1,35	91,5	91,4	91,4	91,4	91,3
1,40	91,2	91,2	91,2	91,1	91,1
1,45	91,0	91,0	90,9	90,9	90,9
1,50	90,8	90,8	90,7	90,7	90,6

Tabela 8.9 Sprawność kotła OP-230

Kocioł OP-230					
λ	Udział masowy osadu ściekowego w mieszance paliwowej, %				
	0	5	10	15	20
1,10	82,7	82,6	82,5	82,4	82,3
1,15	82,0	82,0	81,8	81,8	81,7
1,20	81,4	81,3	81,2	81,2	81,1
1,25	80,8	80,7	80,6	80,5	80,4
1,30	80,2	80,1	80,0	79,9	79,8
1,35	79,6	79,5	79,4	79,3	79,2
1,40	79,0	78,9	78,7	78,7	78,6

1,45	78,3	78,2	78,1	78,0	78,0
1,50	77,7	77,6	77,5	77,4	77,3

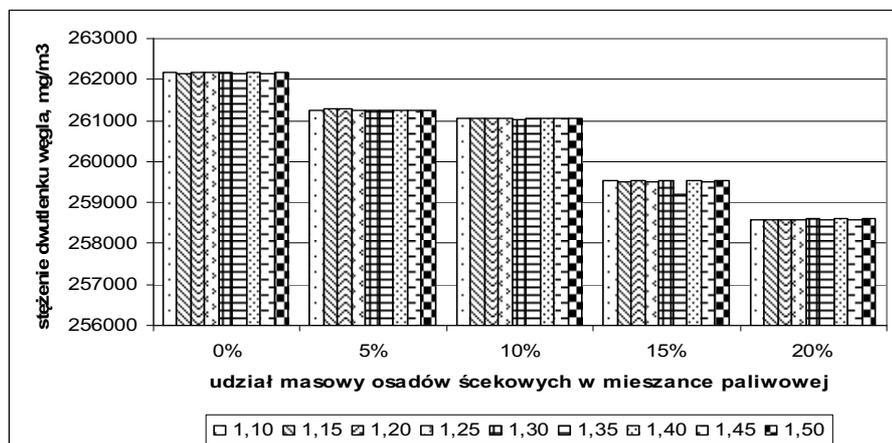
Analizując powyższe wyniki, zakładając niezmienną wydajność kotła \dot{Q}_{uz} można zauważyć, iż zarówno wzrost zawartości osadów ściekowych w mieszance paliwowej jak i wzrost stosunku nadmiaru powietrza powoduje obniżenie sprawności kotła. Nie mniej jednak, bardzo ważne jest to, iż spadek ten nie jest duży, a spowodowany głównie wzrostem straty wylotowej fizycznej. Po przeanalizowaniu uzyskanych wyników można stwierdzić, iż kocioł fluidalny charakteryzuje się najmniejszym spadkiem sprawności w porównaniu z pozostałymi analizowanymi przypadkami. Na rys. 8.2 pokazano zmianę sprawności kotła CFB-420 w funkcji udziału masowego osadu ściekowego w mieszance palnej dla analizowanych wartości stosunku nadmiaru powietrza.



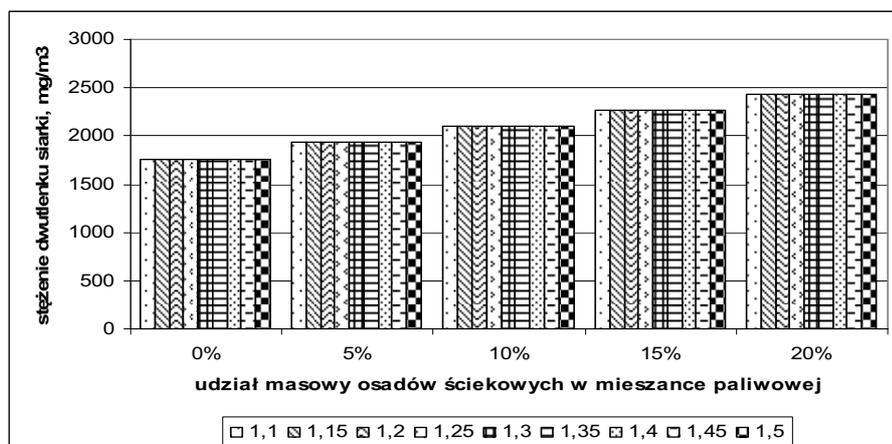
Rys. 8.2 Sprawność kotła fluidalnego CFB-420

W analizie dokonano także analizy środowiskowej instalacji współspalania osadów ściekowych uwzględniając zanieczyszczenia surowcowe, jako te które mają najsilniejszy związek z rodzajem spalanego paliwa. Na rysunku 8.3 przedstawiono zależność stężenia dwutlenku węgla w funkcji zawartości osadu ściekowego w mieszance palnej dla całego przedziału analizowanego stosunku nadmiaru powietrza. Zwiększenie udziału masowego osadu ściekowego w mieszance paliwowej powoduje znaczne obniżenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Zmniejszenie stężenia CO_2 przynosi wymierne korzyści finansowe. Obliczono, iż w przypadku kotła CFB-420 dodatek 5% osadów ściekowych skutkuje zmniejszeniem emisji CO_2 w ilości 1212 ton, co przy cenie giełdowej 1 tony CO_2 (czerwiec 2010) daje zysk wynoszący 68 tys PLN/rok. Nie mniej ważne w tym aspekcie są znacznie niższe opłaty za korzystanie ze środowiska naturalnego ustalane przez Ministra Środowiska [28].

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 8.4 widać, iż wraz ze wzrostem udziału masowego osadu ściekowego w mieszance paliwowej stężenie SO_2 rośnie.



Rys. 8.3 Stężenie CO_2 w gazach odlotowych



Rys. 8.4 Stężenie SO_2 w gazach odlotowych

Rosną, zatem opłaty za korzystanie ze środowiska naturalnego. Nie mniej jednak należy pamiętać, iż duże obiekty energetyczne niemal zawsze są wyposażone w bardzo skuteczne metody odsiarczania pól suchego lub mokrego, czy też suchego (w kotłach fluidalnych). Zastosowanie na przykład metody mokrej wapieniakowej pozwoli ograniczyć stężenie nawet o 99%.

9. Wnioski

Stały wzrost komunalnych osadów ściekowych oraz zakaz możliwości ich składowania po dniu 1 stycznia 2013r., a także możliwe w przyszłości ograniczenie ich wykorzystania na cele rolnicze, powodują, że zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych jest niezwykle ważnym zagadnieniem ekologicznym, technicznym i ekonomicznym. Termiczne metody unieszkodliwiania osadów wiążą się głównie z ich spalaniem w indywidualnych instalacjach przeznaczonych do tego celu, po uprzednim wysuszeniu osadów do odpowiedniej zawartości suchej masy lub ich współspalaniem, gdzie osady dodawane są do mieszanki paliwowej w dokładnie określonych proporcjach, a następnie są utylizowane w obiektach energetyki zawodowej, tj. elektrownie lub elektrociepłowni. Ten kierunek rozwoju termicznych metod unieszkodliwiania osadów wydaje się być najbardziej słuszny, gdyż pozwala na redukcję ilości osadów odprowadzanych do środowiska z jednoczesnym procesem produkcji energii elektrycznej lub ciepłej. Zastosowanie osadów ściekowych pozwala na zmniejszenie ilości spalanego paliwa konwencjonalnego, najczęściej węgla kamiennego, co również przynosi wymierne korzyści w postaci oszczędności związanych z ograniczeniem kosztów zakupu paliwa konwencjonalnego. Główny problem związany z szerokim wprowadzeniem termicznych metod unieszkodliwiania osadów jest fakt jest obowiązujący porządek prawny. W polskim porządku prawnym istnieją dwie definicje biomasy, które należy stosować do dwóch różnych celów. Dla celów ustalenia, jakie obowiązki wynikające z przepisów ochrony środowiska, korzystać należy z definicji Ministra Środowiska. Przy współspalaniu osadów ściekowych w ilości do 1% w masie paliwa, standardy emisyjne dla paliw nie ulegają zmianie. Przy współspalaniu osadów w ilości ponad 1%, należy prowadzić ciągły pomiar emisji zanieczyszczeń, w tym HCl i HF, a także ciągłych pomiarów prędkości przepływu spalin, temperatury spalin, ciśnienia statycznego spalin oraz współczynnika wilgotności.

Dla potrzeb rozliczenia udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych stosujemy definicję Ministra Gospodarki. Zgodnie z obowiązującym prawem osady ściekowe uznaje się za czystą biomasę neutralną pod względem CO₂, której przydzielono wskaźnik emisji CO₂ wynoszący zero.

Literatura

- [1] Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2003.
- [2] Werle S., *Technologie termicznego zagospodarowania osadów ściekowych*, IV Konferencja Naukowo-Techniczna Woda, ścieki i odpady w przemyśle, 13-14 września 2010, Wrocław, pp. 15-23.
- [3] Mały rocznik statystyczny Polski 2009.
- [4] Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludges on land, Final Report EU, Part III: Project Interim Reports.
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 7 września 2005 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz.U. 2005 nr 186 poz. 1553).

- [6] Grabowski Z., *Spalanie Osadów Ściekowych*, <http://www.wis.pk.edu.pl>.
- [7] Wandrasz J.W., Wandrasz A.J., *Paliwa formowane*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. Z o.o., Warszawa 2006.
- [8] Kraszkiewicz A., *Ocena ciepła spalania i wartości opałowej wybranych sortymentów drewna robinii akacjowej na tle klas grubości*, Motrol, 2008, 10, 67–72.
- [9] Polityka energetyczna Polski do 2030 roku, Dokument przyjęty przez Radę Ministrów w dniu 10 listopada 2009 roku.
- [10] Werle S., *Zagospodarowanie osadów ściekowych w Polsce w świetle obowiązującego prawa - stan aktualny i perspektywy rozwoju*, Forum Eksploatatora, 2 (2010), pp. 48-54.
- [11] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001r. o odpadach – Dz. U. 2001 nr 62 poz. 628 z późniejszymi zmianami.
- [12] Werle S., *Zgazowanie osadów ściekowych i inne możliwości ich energetycznego wykorzystania*, Forum Eksploatatora, 6 (2009), pp. 90-93.
- [13] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- [14] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz. U. z roku 2005, nr 260, poz. 2181).
- [15] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. z 2001r., nr 112, poz. 1206).
- [16] Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii (Dz. U. z dnia 28 sierpnia 2008 r.).
- [17] Ustawa z dnia 8 I 2010r. o zmianie Ustawy Prawo Energetyczne oraz zmianie innych niektórych ustaw – Dz. U. nr 21, poz. 104.
- [18] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- [19] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 marca 2002r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów (Dz. U. nr 37, poz. 339, z późn. Zm.).
- [20] Stelmach S., Wasilewski R., *Co-combustion of dried sewage sludge and coal in a pulverized coal boiler*. Journal of Material Cycles and Waste Management 10 (2008) 110-115.

- [21] Wilk J., Wolańczyk F., *Problemy energetycznego wykorzystania odpadów z oczyszczalni ścieków*, Polityka energetyczna, tom 11, zeszyt 2, 2008.
- [22] Kubica K., *Energetyczne wykorzystanie biomasy- uwarunkowania techniczno-technologiczne*, www.polskiklubekologiczny.org.
- [23] Li P.-S., Hu Y., Yu W., Yue Y.-N., Xu Q., Hu S., Hu N.-S., Yang J., *Investigation of sulfur forms and transformation during the co-combustion of sewage sludge and coal X-ray photoelectron spectroscopy*, Journal of Hazardous Materials, (167) 2009, pp. 1126-1132.
- [24] Kruczek S., *Kotły*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001
- [25] Praca zbiorowa, *Proekologiczna kogeneracja- polsko-amerykańska elektrociepłownia w Chorzowie*, Energetyka i Ekologia, nr 6, 2004.
- [26] Kupka T., Mancini M., Weber R., *Investigation of ash deposit formation during co-firing of coal with sewage sludge, saw-dust and refuse derived fuel*, 87 (2008), pp. 2824-2837.
- [27] Szargut J., *Termodynamika techniczna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [28] Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 18 sierpnia 2009 r. w sprawie wysokości stawek opłat za korzystanie ze środowiska na rok 2010.