



Comparative analysis of energy values of coal and waste used for heat and/or electricity production

Ryszard WASIELEWSKI¹, Sławomir STELMACH², Olaf PIOTROWSKI³

¹ Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, tel. 032 271 00 41, fax: 032 271 08 09, e-mail: rwasielewski@ichpw.pl

² Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, tel. 032 271 00 41, fax: 032 271 08 09, e-mail: sstelmach@ichpw.pl

³ Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, tel. 032 271 00 41, fax: 032 271 08 09, e-mail: opiotrowski@ichpw.pl

Abstract

A large part of the waste generated in the production and consumption processes has the energetic values, that allow for production of heat and/or electricity in various thermochemical conversion processes such as pyrolysis, gasification and combustion. For many years energy recovery from waste is carried out in the cement industry, as well as in modern waste incineration plants. It is also considered energy recovery from waste in the power industry and heat engineering. Most frequently it is based on co-incineration processes with fossil fuels. Due to the fluctuation of the quality parameters of waste in relation to fossil fuels its use of in the power industry is sporadic. Comparative results of several samples of hard and brown coal, and single samples of waste has been shown. The most important quality parameters of fossil fuels and basic groups of waste used in the power industry has been presented.

Keywords: fossil fuels, fuels from waste, comparative analysis

Streszczenie

Analiza porównawcza węgla i odpadów dla produkcji ciepła i/lub energii elektrycznej

Duża część odpadów generowanych w procesach wytwarzania i konsumpcji posiada walory energetyczne, które umożliwiają ich wykorzystanie do produkcji ciepła i/lub energii elektrycznej w różnych procesach termochemicznej konwersji, takich jak: piroliza, zgazowanie czy spalanie. Odzysk energii z odpadów jest prowadzony od wielu lat w przemyśle cementowym, jak również w nowoczesnych spalarniach odpadów. Podejmowane są również próby odzysku energii z odpadów w energetyce zawodowej i ciepłownictwie. Najczęściej polegają one na procesach współspalania odpadów z paliwami kopalnymi. Ze względu na fluktuację parametrów jakościowych odpadów w stosunku do paliw kopalnych ich wykorzystanie w energetyce zawodowej jest sporadyczne. Analizie porównawczej poddano wyniki badań kilkunastu próbek energetycznego węgla kamiennego i brunatnego oraz próbek odpadów. Przedstawiono najbardziej istotne parametry jakościowe paliw kopalnych oraz podstawowych grup odpadów wykorzystywanych w energetyce.

Słowa kluczowe: paliwa kopalne, odpady palne, analiza porównawcza

1. Wprowadzenie

Duża część odpadów generowanych w procesach wytwarzania i konsumpcji posiada walory energetyczne, które można wykorzystać dla produkcji energii elektrycznej lub ciepła w różnych procesach termochemicznej konwersji, takich jak: piroliza, zgazowanie, czy spalanie.

Odzysk energii z odpadów jest prowadzony od wielu lat w przemyśle cementowym oraz w nowoczesnych spalarniach odpadów. Podejmowane są również tego typu działania w energetyce zawodowej i ciepłownictwie, najczęściej w procesach współspalania z paliwami kopalnymi, jednak na nieco mniejszą skalę [1-4]. Powodem tego jest znacznie większa fluktuacja parametrów jakościowych odpadów w stosunku do paliw kopalnych. Niejednorodność składu oraz brak stabilności właściwości fizykochemicznych powoduje zagrożenia emisyjne podczas procesu współspalania odpadów. Wprowadzenie wysokich standardów emisyjnych dla instalacji realizujących ten proces jest uzasadnione i pozwala te zagrożenia ograniczyć, jednak stawia też bariery dla szerszego wykorzystania energii zawartej w odpadach [5]. Trzeba też pamiętać, że od instalacji energetycznych

wymagany jest wysoki stopień gotowości, a wykorzystanie odpadów w instalacjach do tego celu nieprzygotowanych zwiększa ryzyko wystąpienia nieprzewidzianych awarii i przestojów.

Energetyka zawodowa wykorzystuje różne typy kotłów, z których największe znaczenie posiadają: kotły z rusztem mechanicznym, kotły pyłowe oraz kotły ze złożem fluidalnym. Poszczególne rodzaje kotłów posiadają specyficzne wymagania projektowe w stosunku do paliwa, a ich bezpośrednie spełnienie przez odpady palne często napotyka problemy. Wymagania te obejmują m.in.: odpowiednie parametry energetyczne paliwa (zawartość wilgoci, popiołu oraz wartość opałową), a także formę paliwa (granulację i gęstość). Istotne znaczenie posiadają również parametry paliwa wpływające na emisję oraz zagrożenia korozyjne, takie jak: zawartość siarki i chloru oraz metali ciężkich. Ważną rolę ze względów eksploatacyjnych odgrywa skład chemiczny popiołu powstającego w wyniku spalania paliwa. Wpływa on na skłonność do tworzenia zanieczyszczeń powierzchni ogrzewalnych utrudniających prawidłową wymianę ciepła, a także na zwiększone zużycie utrudniające odbiór ubocznych produktów spalania z komory spalania.

Odzysk energii z odpadów w instalacjach kotłowych energetyki podlega wymaganiom formalnym i technicznym dla procesu termicznego przekształcania odpadów [6]. Oznacza to m.in., że przy współspalaniu odpadów konieczne jest utrzymywanie temperatury powyżej minimalnej wymaganej temperatury procesu. Gazy powstające w wyniku współspalania odpadów powinny pozostać w strefie spalania co najmniej 2 sekundy w temperaturze powyżej 850°C lub 1100°C (w zależności od zawartości chloru w spalonym materiale). Jest to jeden z trudniejszych warunków do spełnienia dla typowych instalacji kotłowych stosowanych w energetyce. Ponadto, instalacje termicznego przekształcania odpadów powinny być przystosowane do obniżania poziomu granicznych emisji substancji szkodliwych, a także uwzględniać dalsze zobojętnienie i bezpieczne zagospodarowanie pozostałości po przeróbce termicznej odpadów.

W procesach współspalania wykorzystuje się często pojedyncze grupy odpadów, takie jak: odpadowe drewno, osady ściekowe, czy mączki zwierzęco-kostne. Inne grupy odpadów, po odpowiednim przygotowaniu, stanowią składniki tzw. paliw alternatywnych, czy też tzw. stałych paliw wtórnych (ang. SRF). Paliwa te posiadają znacznie bardziej stabilne parametry jakościowe w stosunku do odpadów, z których je wytworzono. Najważniejsze grupy odpadów wykorzystywane do produkcji SRF stanowią: wysortowane frakcje odpadów komunalnych, odpady papieru i tektury, zużyte opony, odpadowe tworzywa sztuczne i tkaniny. Natomiast odzysk energii ze zmieszanych odpadów komunalnych nie jest przedmiotem zainteresowania sektora energetyki i jest prowadzony wyłącznie w dedykowanych instalacjach (spalarniach).

W niniejszym artykule poddano analizie porównawczej wyniki badań kilkunastu próbek energetycznego węgla kamiennego i brunatnego oraz pojedynczych próbek odpadów wykonane w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze [7]. Przedstawiono najbardziej istotne parametry jakościowe paliw kopalnych oraz podstawowych grup odpadów wykorzystywanych w energetyce.

2. Parametry energetyczne i forma paliwa

Wartość opałowa, zawartość wilgoci oraz popiołu są podstawowymi parametrami określającymi przydatność paliwa do celów technicznych, przy czym wartość opałowa paliwa zależy od zawartości składników palnych, substancji mineralnej (popiołu) oraz wilgoci. Wartość opałowa paliwa zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości wilgoci, która często jest wynikiem warunków jego przechowywania i transportu oraz obróbki wstępnej. Wyraźnie widać to na przykładzie danych przedstawionych w tabeli 2.1., dotyczących m.in. odwodnionego i wysuszonego komunalnego osadu ściekowego (obróbka cieplna wyraźnie zwiększyła wartość opałową).

Tabela 2.1. Porównanie przykładowych parametrów energetycznych węgla kopalnych i głównych grup odpadów stosowanych w procesach odzysku energii (przykłady)*.

Rodzaj paliwa	zaw. wilgoci, W_t^r , % m/m	zaw. popiołu, A^a , % m/m	zaw. cz. lotnych, V^{daf} , % m/m	Wart. opałowa, Q_i^r , MJ/kg
Węgiel kamienny	3,2-19,1	3,5-26,9	28-35	21-28
Węgiel brunatny	10,9-54,6	3,5-26,9	50-55	8,5-9,5
Drewno odpadowe	10-30	0,2-5	80-85	15-18
Papier i tektura	15-25	10-15	85-88	11-14
Tekstylnia	5-15	5-12	75-80	16-19
Zużyte opony	1-2	4-6	65-70	35-36
Odpadowe tworzywa sztuczne	1-5	1-7	90-96	13,7 (PVC) 21,8 (PET) 41,8 (PE)
Mączka mięsno-kostna	4-6	18-21	72-78	17,6-22,5
Komun. osady ściekowe odwodnione	73,2	34,8	83,11	1,6
Komun. osady ściekowe wysuszone	7,4	34,3	82,38	11,9
SRF 1	35,6	13,6	88,05	13,7
SRF2	14,1	11,8	86,83	22,6

*Badania własne IChPW

Niektóre grupy odpadów, a w szczególności takie jak np. osady ściekowe, posiadają wartości opałowe znacznie niższe od wartości typowych dla paliw kopalnych i dla celów autotermicznego spalania powinny być poddawane obróbce wstępnej (suszeniu). Inne odpady posiadają wartości opałowe znacznie wyższe od węgla kopalnych (tworzywa sztuczne – PE >41 MJ/kg, czy zużyte opony >35 MJ/kg). Należy zauważyć, że zbyt wysoka wartość opałowa spalanego materiału może skutkować problemami eksploatacyjnymi związanymi z uszkodzeniem (nadtopieniem) wymurówki komory paleniskowej kotła.

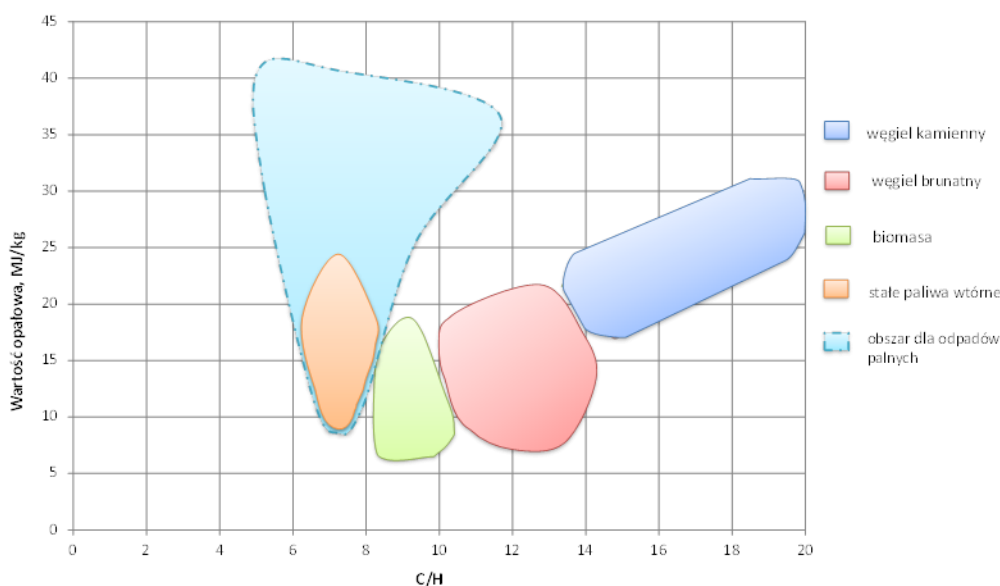
W przypadku paliw wytwarzanych z odpadów (SRF 1 i SRF 2) wartość opałowa może się zmieniać w szerokim zakresie, w wyniku celowej ingerencji technologicznej w skład morfologiczny paliwa.

Minimalna wartość opałowa, która umożliwia spalanie odpadów bez dodatkowego paliwa wynosi ok. 5-6 MJ/kg. Natomiast odzysk ciepła w instalacjach termicznej utylizacji odpadów przy zastosowaniu konwencjonalnych technologii jest efektywny wówczas, gdy wartość opałowa spalanych odpadów wynosi co najmniej 5,8 MJ/kg. Taka wielkość wartości opałowej zapewnia spalanie odpadów na ruszcie bez dodatkowego paliwa. Natomiast nie zapewnia uzyskania w komorze spalania wymaganej przepisami temperatury 850°C. Z doświadczeń praktycznych wynika, że temperatura taka może być osiągnięta przy wartości opałowej powyżej 7,5 MJ/kg [8].

Zawartość części lotnych w paliwie ma bezpośredni wpływ na sprawność energetyczną kotła, ponieważ części lotne biorą udział w początkowej fazie spalania. Im wyższa zawartość części lotnych w paliwie, tym łatwiejszy zapłon i szybsze spalanie paliwa. Zbyt niska zawartość części lotnych prowadzi do utraty stabilności procesu spalania.

Z danych przedstawionych w tabeli 2.1 wynika, że paliwa kopalne cechują się stosunkowo niską zawartością części lotnych w porównaniu do niektórych grup odpadów, takich jak tworzywa sztuczne, zużyte opony czy papier i tektura. Może to powodować problemy z wystarczającym dopaleniem współspalanych materiałów w przypadku niejednorodnej mieszanki z paliwem kopalnym.

Interesujące może być również przedstawienie zależności wartości opałowej paliw kopalnych, biomasy i najczęściej spalanych odpadów od stosunku zawartości węgla do zawartości wodoru na tzw. mapie paliw, co pokazano na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Mapa paliw. Zależność wartości opalowej paliw kopalnych, biomasy i odpadów od stosunku zawartości pierwiastków C/H.

Generalnie, odpady palne cechują się znacznie niższym stosunkiem zawartości pierwiastków C do H w porównaniu do węgla kopalnych.

Odpady i paliwa z nich wytwarzane mogą być podawane do paleniska kotła w różnej formie (wymiary i kształt pojedynczych ziaren oraz stopień zagęszczenia (poprzez kompaktowanie), najczęściej uzależnionej od wymagań technicznych danego typu kotła, w którym mają być wykorzystywane. Najczęściej spotykane formy to: paliwo rozdrobnione luzem oraz skompaktowane w postaci peletów i brykietów.

3. Parametry wpływające na emisję i zagrożenia korozyjne

Podstawowymi parametrami jakościowymi paliwa wpływającymi na emisję zanieczyszczeń do atmosfery są: zawartość siarki i chloru oraz metali ciężkich. W tabeli 3.1 podano przykłady oznaczeń zawartości tych pierwiastków w paliwach kopalnych i głównych grupach odpadów stosowanych do odzysku energii. Wysokie zawartości siarki są często spotykane w odpadach zużytych opon i osadach ściekowych, Natomiast szczególnie wysokie zawartości chloru charakteryzują odpady polichlorku winylu.

Chlor i siarka są niepożądanymi składnikami paliwa ze względu na ich działanie korodujące. Wysoka zawartość chloru w paliwie skutkuje korozją chlorkową, tym większą im wyższa jest temperatura podczas spalania w kotle. Natomiast obecność siarki w paliwach może przyczyniać się do korozji kotłów energetycznych, poprzez odkładanie się w kanałach grzewczych osadów w postaci siarczanów [9].

Tabela 3.1. Zawartość siarki i chloru w paliwach kopalnych oraz głównych grupach odpadów stosowanych w procesach odzysku energii (przykłady)*, %m/m.

Rodzaj paliwa	Zaw. siarki, S _t ^a	Zaw. chloru, Cl ^a
Węgiel kamienny	0,32-1,17	0,04-0,4
Węgiel brunatny	0,69-1,1	<0,005-0,057
Drewno odpadowe	0,3-1,2	0,05-2,0
Papier i tektura	0,10	0,121
Tekstylna	0,9	0,02
Zużyte opony	1,0-2,0	0,05-0,85
Odpadowe tw.sztuczne wysortowane z odp. komunalnych	(PE) 1,9 (PET) 0,8 (PVC) 0,8	(PE) 0,9 (PET) 1,4 (PVC) 44,3
Mączka mięsno-kostna	0,4-0,6	0,5-0,7
Komunalne osady ściekowe odwodnione	1,27	0,085
Komunalne osady ściekowe wysuszone	1,25	0,089
SRF 1	0,18	0,68
SRF 2	0,42	0,74

*Badania własne IChPW

Innym zagrożeniem występującym podczas współspalania odpadów z paliwami kopalnymi jest emisja do atmosfery metali ciężkich. Ich zawartość we współspalanych odpadach może wielokrotnie przekraczać typowe zakresy dla paliw kopalnych, co uwidoczniają dane przedstawione w tabeli 3.2. Szczególnie duże zawartości metali ciężkich cechują osady ściekowe.

Tabela 3.2. Zawartość metali ciężkich w paliwach kopalnych oraz głównych grupach odpadów stosowanych w procesach odzysku energii (przykłady)*, mg/kg s.m..

Symbol	Węgiel kam. energetyczny	Węgiel brunatny	Drewno iglaste	Papier tektura	Zużyte opony	Odpadowe tw. sztuczne	SRF 1	Komunalny osad ściekowy
As	0,331-5,08	15,7	<0,1-1,0	1,4	11,1	n. o.	2,3	n. o.
Cd	0,031-0,312	1,10	n. o.	0,26	2,55	1,10	1,02	5,29
Co	2,31-11,8	5,10	n. o.	1,64	0,08	10,60	0,34	n. o.
Cr	3,69-44,6	35,2	0,2-100	9,7	7,1	11,3	125,0	137,1
Cu	12,4-37,1	7,5	0,5-100	40,6	42,8	5,0	165	553,2
Mn	34,6-149	24,6	40-200	43,8	13,8	n. o.	296	n. o.
Ni	3,98-25,0	13,6	<0,1-10,0	5,6	2,8	10,6	33,3	43,7
Pb	3,98-25,0	12,9	<0,5-10,0	30,7	33,7	9,9	39,2	110,8
Sb	0,913-3,42	0,6	n. o.	1,2	0,1	n. o.	30,0	n. o.
V	7,14-68,8	20,0	<2,0	4,8	6,75	n. o.	4,74	n. o.
Zn	3,18-71,7	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	1097
Hg	0,016-0,168	0,15	<0,05	0,07	0,24	0,05	0,04	1,93

*Badania własne IChPW

n. o. – nie oznaczono

Wysoka zawartość metali ciężkich we współspalanych odpadach może również wpływać na kwalifikację ubocznych produktów współspalania jako odpadów o charakterze niebezpiecznym.

4. Skład chemiczny popiołu

Przedstawione w tabeli 4.1. dane wskazują na to, że popioły uzyskane ze spalania paliw kopalnych (węgiel kamienny i brunatny) znacznie różnią się od składu popiołu najczęściej współspalanych odpadów.

Tabela 4.1. Zawartość metali ciężkich w paliwach kopalnych oraz głównych grupach odpadów stosowanych w procesach odzysku energii (przykłady)*, mg/kg s.m..

Składnik	Węgiel kam. (NŻ)	Węgiel kam. (Z)	Węgiel brun.	Drewno odpadowe	Papier i tektura	Zużyte opony	Kom. osad ściekowy	Mączka zw.-kostna	Tkanina bawełna	SRF1	SRF2
CaO	3,7	15,05	4,1	26,21	34,68	10,64	17,38	18,81	20,28	28,64	43,9
Fe ₂ O ₃	7,63	12,2	3,57	2,65	1,36	1,45	7,50	0,40	0,44	16,17	5,48
Na ₂ O	0,9	0,97	1,47	0,56	1,00	1,10	0,79	2,94	4,64	1,68	0,58
K ₂ O	2,03	2,58	1,19	6,59	1,20	0,92	2,15	1,12	1,01	0,84	0,76
SiO ₂	57,44	53,73	47,6	25,05	23,66	22,00	14,97	5,96	33,74	24,56	4,62
Al ₂ O ₃	23,44	10,22	33,7	5,17	14,08	9,09	12,94	0,00	13,89	8,58	0,80
MgO	3,24	4,91	1,68	3,22	1,33	1,35	3,92	0,27	3,78	1,22	6,42
TiO ₂	1,53	0,27	2,10	0,21	0,20	2,57	0,58	0,00	0,65	0,47	0,42
P ₂ O ₅	0,09	0,07	0,18	2,71	0,26	1,03	32,93	70,5	1,55	0,46	0,44
ZnO	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	34,5	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.

*Badania własne IChPW

n. o. – nie oznaczono

Analiza składu chemicznego i właściwości fizykochemicznych popiołu z węgla energetycznych pozwala na ocenę ich skłonności do zużłowania i zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła. Współspalanie odpadów, szczególnie zawierających dużo popiołu (osady ściekowe) wpływa na zmiany składu chemicznego popiołu. Nawet niewielka różnica w składzie chemicznym popiołu może mieć istotny wpływ na zmianę jego temperatury topliwości, co niesie za sobą istotne skutki eksploatacyjne. Popioły z węgla kopalnych zawierają głównie SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃, natomiast diametralne różnice występują dla odpadów mączki zwierzęco-kostnej i komunalnych osadów ściekowych (gdzie głównym składnikiem popiołu jest P₂O₅), zużytych opon (z ponad 30% zawartością ZnO) oraz odpadów papieru i tektury (ponad 34% CaO).

O właściwościach termicznych popiołów w istotny sposób decyduje również zawartość składników alkalicznych (w tym głównie Na₂O, K₂O). Zbyt duża ilość związków alkalicznych może znacznie obniżyć temperatury topliwości popiołu. W tym aspekcie, wysokie wyniki oznaczeń zawartości alkaliów zaobserwowano dla odpadów tkanin z bawełny (> 4,6 %Na₂O) i drewna odpadowego (>6,5% K₂O).

Wysoka zawartość CaO w popiele, może być korzystna w aspekcie możliwości wiązania lotnych związków o charakterze kwaśnym emitowanych podczas procesu spalania. Wysoką zawartość CaO zaobserwowano w SRF 1 i 2 (na poziomie powyżej 28 i 43%), odpadach papieru i tektury (>34%) oraz odpadach tkanin bawełnianych (>20%) i drewna (>26%).

Należy również zauważyć, że podjęcie współspalania odpadów w instalacjach energetycznych wiąże się z koniecznością uzyskania odpowiednich zezwoleń przez dotychczasowych odbiorców ubocznych produktów współspalania, co w efekcie dla producenta energii może wiązać się z koniecznością zmiany dotychczasowych kierunków wykorzystania tych odpadów. Wynika to ze zmiany ich klasyfikacji kodowej.

Materiały te dla przypadku spalania samego węgla, klasyfikowane są jako odpady o kodach:

100101 – żużle, popioły paleniskowe i pyły z kotłów,

100102 – popioły lotne z węgla.

Uboczne produkty współspalania odpadów z węglem będą natomiast klasyfikowane jako odpady o następujących kodach:

190111* – żużle i popioły paleniskowe zawierające substancje niebezpieczne,

190112 – żużle i popioły paleniskowe inne niż wymienione w 190111,

190113* – popioły lotne zawierające substancje niebezpieczne,

190114 – popioły lotne inne niż wymienione w 190113,

190115* – pyły z kotłów zawierające substancje niebezpieczne,

190116 – pyły z kotłów inne niż wymienione w 190115.

5. Podsumowanie

Duża część odpadów posiada walory energetyczne umożliwiające efektywny odzysk zawartej w nich energii chemicznej i produkcję energii elektrycznej oraz ciepła w instalacjach kotłowych energetyki zawodowej, głównie w procesach współspalania z paliwami kopalnymi. Jedną z podstawowych wad odpadów, utrudniających ich stosowanie jako paliwa jest niejednorodność składu oraz niestabilność parametrów jakościowych. Charakterystyka właściwości fizykochemicznych odpadów często znacznie odbiega od właściwości węgla kamiennego lub brunatnego – typowych paliw wykorzystywanych w energetyce. Powoduje to szereg utrudnień procesowych oraz zagrożenie zwiększoną emisją zanieczyszczeń do atmosfery. Rozwiązaniem tego problemu może być produkcja tzw. „paliw alternatywnych” z odpadów, w stosunku do których postawić można określone wymagania jakościowe. Paliwa wytwarzane z odpadów mogą znacznie łatwiej spełnić kryteria technologiczne przypisane dla określonego rodzaju technologii kotłowej. Zwiększają również bezpieczeństwo ekologiczne poprzez odpowiednią ingerencję w skład chemiczny paliwa na etapie jego produkcji.

Stosowanie odpadów w procesach współspalania może przynosić korzyści zarówno ekonomiczne jak i ekologiczne. Pozwala bowiem zarówno oszczędzać zasoby paliw kopalnych, a także przyczynia się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych (ze względu na zawartą w odpadach frakcję biodegradowalną).

Odzysk energii z odpadów w procesie współspalania z paliwami kopalnymi jest procesem termicznego przekształcania odpadów i musi być prowadzony zgodnie z przypisanymi prawnie uwarunkowaniami formalnymi i technicznymi.

References

1. Nadziakiewicz J., Waclawiak K., Stelmach S.: Procesy termiczne utylizacji odpadów, Wyd. Politechniki Śl., Gliwice, 2007
2. Piecuch T.: Termiczna utylizacja odpadów, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 1998
3. Wybrane procesy energetycznego oraz surowcowego wykorzystania odpadów i biomasy, Pr. zbior. pod red. M. Koziola, Wyd. Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, Politechnika Śl. Gliwice, 2013
4. Wasielewski R., Ociepka W.: „Technologie termochemicznej konwersji odpadów”, Środowisko i Rozwój, 16, 2007, s.7-23
5. Wasielewski R., Tora B.: „Bariery stosowania paliw alternatywnych w energetyce”, Polityka Energetyczna, 10(2), 2008, s.129-138
6. Ściążko M., Sobolewski A., Zuwała J.: Przewodnik Metodyczny - Procedury bilansowania i rozliczania energii wytwarzanej w procesach współspalania, IChPW, Warszawa – Zabrze 2007
7. Jagustyn B. i inni: Rozwój i doskonalenie technik analitycznych dla oceny właściwości paliw stałych, biomasy i stałych paliw wtórnych, Sprawozdanie IChPW, Zabrze, 2013 (niepublikowane)
8. Czajka K., Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A., Zasoby energetyczne odpadów, Materiały z II Sympozjum „Energia z odpadów”, Sopot, 2000
9. Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce, Pr. zbior. pod red. M. Ściążko, J. Zuwały, M. Pronobisa, Wyd. IChPW Zabrze, 2007

