



The energetic and emission effects of waste paper co-combustion with coal in a stoker-fired boiler

Ryszard WASIELEWSKI¹, Krzysztof GLÓD²

¹ Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, tel. 032 2710041, fax: 032 2710809, e-mail: rwasielewski@ichpw.pl

² Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, tel. 032 2710041, fax: 032 2710809, e-mail: kglod@ichpw.pl

Abstract

The paper presents the results of the industrial co-combustion trial tests of non-recyclable paper residues with hard coal in stoker-fired boiler. During the tests, the energetic and emission indices were compared for coal alone combustion and co-combustion of coal and waste paper with the mass share of 30%. It was found, that the co-combustion of waste paper with their participation in a fuel blend of 30% results in a noticeable lowering boiler efficiency (decrease of approximately 10%). Construction of stoker-fired boiler type OR-10 does not allow keeping requirements of the process thermal treatment of waste in the minimum time of two seconds residence in the area of exhaust gas temperatures above 850°C. Co-combustion residues have a much higher unburned carbon content relative to the residues of coal combustion. Keeping the system under test boiler OR-10 force the emission standards for co-incineration of waste is impossible. Co-combustion of waste paper and cardboard in the test stoker-fired boiler OR-10 carries environmental risks.

Keywords: waste paper, energy recovery, co-combustion with coal, stoker-fired boiler

Streszczenie

Energetyczno-emisyjne efekty współspalania odpadów papieru z węglem kamiennym w kotle z rusztem mechanicznym.

Przedstawiono rezultaty przemysłowych testów współspalania odpadów makulaturowych nieprzydatnych do recyklingu z węglem kamiennym w kotle energetycznym typu OR-10 wyposażonym w ruszt mechaniczny. Porównano parametry energetyczne i emisyjne spalania węgla kamiennego oraz współspalania odpadu z węglem przy udziale masowym 30% w mieszance. Stwierdzono, że współspalanie odpadów papieru i tektury, przy ich udziale w mieszance paliwowej na poziomie: 30% wpływa w sposób zauważalny na obniżenie sprawności kotła (spadek o około 10%). Konstrukcja kotła typu OR-10 nie pozwala na dotrzymanie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów w zakresie minimalnego czasu 2 sekund przebywania spalin w obszarze temperatury powyżej 850°C. Uboczne produkty współspalania odpadów wykazują znacznie większy niedopał w stosunku do ubocznych produktów spalania węgla. Dotrzymanie przez instalację badanego kotła OR-10 obowiązujących ją standardów emisyjnych dla współspalania odpadów jest niemożliwe. Współspalanie odpadów papieru z węglem w badanym kotle rusztowym OR-10 niesie za sobą zagrożenia środowiskowe.

Słowa kluczowe: odpady papieru, odzysk energii, współspalanie z węglem, kocioł z rusztem mechanicznym

1. Wprowadzenie

Odpady papieru i tektury stanowią istotny strumień odpadów wytwarzanych w wyniku działalności gospodarczej i konsumpcji. Zawartość tej frakcji materiałowej w krajowych odpadach komunalnych waha się w zależności od trzech typów obszaru (wiejski, wiejsko-miejski, miejski) od 5 do ponad 19% i wynosi średnio ok. 15% [1]. Wielkość strumienia frakcji papieru w odpadach komunalnych można więc oszacować na poziomie nieco ponad 1,5 mln Mg/rok. Głównym źródłem tych odpadów są opakowania, w których opakowania z papieru i tektury stanowią około 30%. Część tych odpadów podlega selektywnej zbiórce i stanowi surowiec do recyklingu materiałowego. Wg danych GUS w roku 2015 poziom recyklingu odpadów opakowaniowych z papieru i tektury w Polsce osiągnął 78,6% [2]. Odpady papieru i tektury powstają również w instalacjach służących

zagospodarowaniu odpadów (kod 19 12 01 - papier i tektura). Szacuje się, że rocznie w Polsce powstaje ok. 56-57 000 Mg tych odpadów.

Pomimo dużych nakładów organizacyjnych i finansowych ponoszonych na selektywną zbiórkę i recykling papieru – praktycznie zawsze pozostaje niezagospodarowana część strumienia tych odpadów, która posiada walory energetyczne. Jedną z metod zagospodarowywania biodegradowalnych frakcji odpadów komunalnych, których nie udało się wykorzystać w recyklingu materiałowym jest odzysk energii. Interesującym kierunkiem wykorzystania tych odpadów może być ich współspalanie z paliwami kopalnymi w kotłach energetycznych. Pozwala to na wykorzystanie istniejącej już instalacji technologicznej oraz umożliwia uniknięcie, bądź znaczną redukcję nakładów inwestycyjnych [3-8]. Odpady papieru charakteryzują się ponadto stosunkowo dużą zawartością frakcji biodegradowalnej (ponad 80%) co powoduje, że mogą być brane pod uwagę jako nośnik energii odnawialnej wytwarzanej w sektorze energetyki a także czynnik obniżający raportowaną emisję ditlenku węgla [9-10].

Odzysk energii z odpadów w instalacjach kotłowych energetyki podlega wymaganiom formalnym i technicznym dla procesu termicznego przekształcania odpadów. 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 zubożenie i bezpieczne zagospodarowanie pozostałości po przeróbce termicznej odpadów.

W kotle parowym z warstwowym paleniskiem rusztowym typu OR-10 przeprowadzono testy współspalania odpadów papieru nieprzydatnego do recyklingu z węglem kamiennym. Jednostką nadzorującą przebieg badań i ich głównym wykonawcą był Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze. Celem badań było określenie możliwości spełnienia obowiązujących wymagań prawnych dotyczących spalania odpadów z papieru i tektury w badanej instalacji, a także określenie wpływu współspalania odpadów na pracę i parametry eksploatacyjne kotła.

2. Uwarunkowania formalno-prawne współspalania odpadów papieru z paliwami kopalnymi.

Przedmiotem badań były odpady opakowaniowe papieru i tektury nieprzydatne do recyklingu ze względu na stopień zabrudzenia. Materiał ten jest klasyfikowany jako odpad inny niż niebezpieczny i oznaczony kodem 150101 wg obowiązującej klasyfikacji odpadów. Proces współspalania tych odpadów z węglem kamiennym jest procesem ich termicznego przekształcania. Przywołana kwalifikacja współspalanej substancji oraz klasyfikacja procesu technologicznego determinuje konieczność spełnienia przez instalację, w której proces ma być prowadzony, odpowiednich wymagań związanych z gospodarką odpadami, zarówno formalnoprawnych, jak i technicznych.

Poniżej przedstawiono najistotniejsze wymagania techniczne, które muszą być spełnione przez instalację współspalania odpadów papieru i tektury.

- Instalacja powinna spełnić wymagania określone w Rozporządzeniu Ministra Rozwoju z dnia 21 stycznia 2016 r w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz sposobów postępowania z odpadami powstałymi w wyniku tego procesu (Dz. U. 2016, poz. 108). M.in. temperatura gazów spalinowych wytworzonych podczas spalania/współspalania musi być podniesiona w kontrolowany i jednorodny sposób oraz utrzymywana przez co najmniej 2 sekundy na poziomie nie niższym niż 850°C (dla odpadów zawierających poniżej 1% związków chlorowcoorganicznych, w przeliczeniu na chlor). Ponadto instalacja spalania/współspalania musi być wyposażona w automatyczny system podawania odpadów pozwalający na zatrzymanie ich podawania podczas:
 - rozruchu, do czasu osiągnięcia wymaganej temperatury,
 - procesu, w razie nieosiągnięcia wymaganej temperatury lub przekroczenia dopuszczalnych wartości emisji.

Instalacja powinna posiadać ponadto układ ciągłego pomiaru temperatury gazów spalinowych, stężenia tlenu w gazach spalinowych oraz ich ciśnienia w reprezentatywnym miejscu komory spalania.

- Instalacja powinna posiadać system rozszerzonego monitoringu emisji (pomiaru ciągle: pył, ditlenek siarki, tlenek i dwutlenek azotu w przeliczeniu na ditlenek azotu, tlenek węgla, TOC - całkowity węgiel

organiczny, tlen, chlorowodór, fluorowodór, prędkość przepływu spalin lub ich ciśnienie dynamiczne, temperatura spalin, ciśnienie statyczne spalin, współczynnik wilgotności oraz pomiary okresowe: rtęć, kadm i tal, suma metali ciężkich: Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, As, Sb, V, Co, Sn; dioksyne i furany). Szczegółowe wytyczne w tym zakresie określono w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2014 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody.

- Obowiązują znacznie ostrzejsze standardy emisyjne, w stosunku do spalania klasycznych paliw, wyznaczone według tzw. „reguły mieszania” opisanej w zał. Nr 8 do Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów (Dz. U. 2014, poz. 1546).

3. Przebieg badań przemysłowych

Testy energetyczno-emisyjne przeprowadzono jako porównawcze do spalania samego węgla oraz mieszanki paliwowej z 30% udziałem odpadu przy takim samym obciążeniu kotła.

Na potrzeby testów zgromadzono zapas jednolitego gatunkowo węgla kamiennego. Przygotowano również około 20 Mg odpadów papieru i tektury (w postaci speletyzowanej), pochodzących z sortowni odpadów komunalnych. Kompaktowanie odpadów papieru i tektury miało na celu zwiększenie gęstości nasypowej spalanego materiału (z pierwotnych 100 kg/m³ do ok. 700 kg/m³), co znacznie poprawia właściwości logistyczne i przeciwdziała niekorzystnym zjawiskom związanym z wynoszeniem spalanego materiału ze strefy rusztu. Mieszankę paliwową sporządzono z odważonych porcji odpadów papieru i tektury oraz węgla kamiennego przy wykorzystaniu ładowarki. Podawanie węgla i mieszanki paliwowej do kotła odbywało się poprzez istniejący układ nawęglania do przykotłowego zasobnika magazynowego z warstwownicą. Podczas obydwu testów nie zmieniano wysokości warstwy materiału podawanego na ruszt. Podczas testu pobierano próbki spalanych materiałów pobierano bezpośrednio z rusztu. Pobór próbek prowadzono w sposób cykliczny co 30 minut, po czym przed analizą poddano je uśrednieniu. Pobierano również próbki popiołu lotnego z baterii cyklonów oraz żużla z układu odżulzania dokonywano cyklicznie co 30 min. Przed analizą próbki uśredniano.

3.1. Charakterystyka instalacji badawczej

Wybrany do badań kocioł parowy typu OR-10 jest kotłem opromieniowanym, wykonanym w tradycyjnym układzie dwuciągowym. Kocioł wyposażony jest w warstwowe palenisko rusztowe i przeznaczony do wytwarzania pary o ciśnieniu 1,6 MPa i temperaturze 350°C w ilości 12 Mg/h. Paliwo konwencjonalne dla tego kotła stanowi miał węgla kamiennego. Instalację oczyszczania spalin stanowi bateria cyklonów o skuteczności odpylania około 90÷93%.

3.2. Metodyka pomiarowa

Pomiary prowadzono przez okres 6 godzin w warunkach ustalonego stanu pracy kotła. Zakres pomiarów obejmował określenie rozkładu temperatury w komorze paleniskowej kotła oraz wszystkie oznaczenia emisyjne, wymagane dla współspalania odpadów.

- badania właściwości fizykochemicznych węgla, odpadów papieru i tektury oraz ich mieszanki obejmowały: analizę techniczną i elementarną oraz zawartość metali ciężkich. Poszczególne oznaczenia wykonano zgodnie z metodyką badawczą określoną w Polskich Normach oraz procedurami badawczymi IChPW. Zawartość poszczególnych metali określono metodą ICP. Dla próbki odpadów papieru i tektury oznaczono również zawartość frakcji biodegradowalnej metodą selektywnego rozpuszczania w oparciu o metodykę określoną w normie PN-EN 15440:2011: Stałe paliwa wtórne – metody oznaczania zawartości biomasy.
- dla ubocznych produktów spalania węgla kamiennego i mieszanki węgla z odpadami zakres badań obejmował: oznaczenie zawartości części palnych oraz oznaczenie zawartości metali ciężkich (Pb, Cu, V, Sb, Cr, Ni, Co, Cd i Hg). Badania przeprowadzono w oparciu o wytyczne określone w Polskich Normach oraz procedury akredytowane IChPW. Zawartość poszczególnych metali określono metodą ICP, Ponadto dla próbek żużla i popiołu lotnego wykonano analizy wyciągu wodnego (tzw. "test zgodności"). Testy te przeprowadzono zgodnie z wytycznymi rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach (Dz. U. 2016, poz. 1277, zał.3 – odpady inne niż niebezpieczne i obojętne).

- pomiar temperatury w komorze spalania wykonano przy ścianie lewej i prawej na trzech poziomach: 1,2 m, 2,5 m, 4,75 m. Pomiar pola temperatury przeprowadzono za pomocą czujnika temperatury – termopary NiCr-NiAl typu K oraz miernika temperatury typu TES 1314,
- oznaczenia stężenia pyłu, prędkości oraz gęstości spalin wykonano zgodnie z wymogami polskiej normy PN-Z-04030-7:1994 „Badania zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną” przy zastosowaniu zestawu pyłomierza grawimetrycznego typu EMIOTEST 2598 oraz sondy aspiracyjnej z filtracją wewnętrzną FG-38,
- stężenia CO, NO₂, SO₂ oraz CO₂ i O₂ określono stosując analizator gazów HORIBA PG-250 A z wielootworową sondą pomiarową o długości 700 mm. Pomiar wykonano zgodnie z procedurą instrukcji obsługi urządzenia oraz zgodnie z wymogami polskiej normy PN-ISO 10396:2001 „Emisja ze źródeł stacjonarnych. Pobieranie próbek do automatycznego pomiaru stężenia składników gazowych”,
- pomiary stężeń LZO (Lotnych Związków Organicznych) wykonano stosując przenośny analizator substancji organicznych wyrażonych jako całkowity węgiel organiczny serii AWE-PW,
- pobór prób gazów dla określenia stężeń HCl i oznaczenie realizowano wg wymogów normy PN-EN 1911-1:2003 „Emisja ze źródeł stacjonarnych. Manualna metoda oznaczania HCl.”,
- pobór prób gazów dla określenia stężeń HF i oznaczenie realizowano wg zaleceń procedury badawczej PB-01 „Pobór prób gazów dla określenia stężenia HF”. Oznaczenia wykonano w laboratorium badawczym OBK i Ś. w Katowicach,
- udział wilgoci w gazach odlotowych oznaczano metodą absorpcyjną,
- pobór prób polichlorowanych dibenzodioxyn i polichlorowanych dibenzofuranów PCDD/DF wykonywany został wg wymogów polskiej normy PN-EN 1948-1: 2006 „Emisja ze źródeł stacjonarnych – Oznaczenie stężenia masowego PCDD/DF oraz PCB typu dioksyn – Część 1: Pobieranie próbek PCDD/DF”. Pobrana próba została poddana analizie chemicznej w akredytowanym laboratorium Institute of Public Health Ostrawa.

4. Wyniki badań i ich analiza

Podczas testów nie stwierdzono problemów technicznych w dozowaniu odpadów jak również technologicznych w pracy kotła. Poniżej przedstawiono najważniejsze rezultaty badań w odniesieniu do wymagań legislacyjnych w zakresie parametrów procesu termicznego przekształcania odpadów oraz spełnienia wymaganych standardów emisyjnych.

4.1 Charakterystyka spalanych materiałów.

W tabeli 4.1.1. zebrano wyniki oznaczeń parametrów fizykochemicznych poszczególnych spalanych materiałów.

Biorąc pod uwagę analizy składu chemicznego badanych odpadów papieru i tektury, należy stwierdzić, że nie odbiegają one od składów tego rodzaju odpadów prezentowanych w literaturze [11]. Wyniki analizy technicznej przedstawione w tabeli 4.1.1. wykazują, że badane odpady papieru i tektury posiadają zadowalające własności energetyczne. Cechuje je stosunkowo niska zawartość popiołu i średnia zawartość wilgoci, przy dosyć niskiej wartości opałowej w stanie roboczym (nieco powyżej 14 MJ/kg). Wartość opałowa badanych odpadów mieści się w dolnym zakresie typowych wartości osiąganych dla papieru i kartonów jest jednak znacznie niższa od zakresu typowego dla energetycznego węgla kamiennego w sortymencie miał – typowego paliwa stosowanego w kotłach wyposażonych w ruszt mechaniczny. Przy wagowym zastępowaniu węgla odpadem przy współspalaniu, nieuchronnie prowadzić to musi do spadku sprawności kotła.

Warto zwrócić uwagę na bardzo wysoką zawartość części lotnych ($V^{\text{daf}} = 79,74\%$) w badanych odpadach, która jest ponad dwukrotnie wyższa w stosunku do energetycznego węgla kamiennego ($V^{\text{daf}} = 30-40\%$). Świadczy to o tym, że z punktu widzenia kinetyki procesu, ich spalanie powinno zachodzić bezproblemowo, a reakcje przebiegać będą głównie w fazie gazowej, przy nieznacznym udziale heterogenicznego procesu zgazowania karbonizatu.

Tabela 4.1.1. Właściwości fizykochemiczne spalanych materiałów.

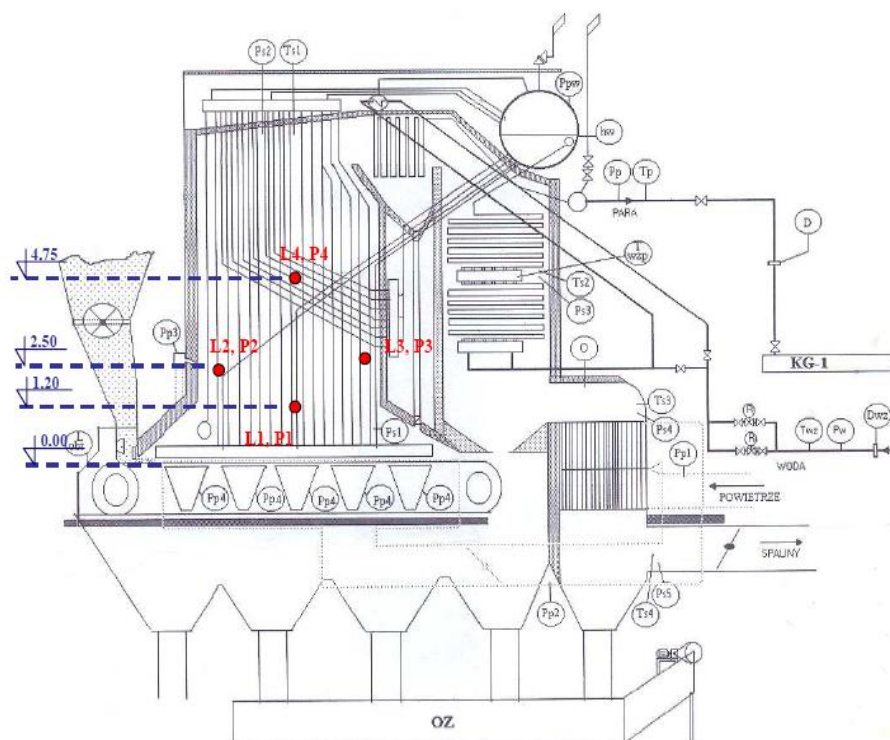
Parametr	Symb.	Jedn.	Węgiel kamienny	Odpady papieru i tektury	Mieszanka węgiel + 30% odpadów
Analiza techniczna					
Zaw. wilgoci całkowita	W_t^r	% _{m/m}	11,6	14,0	9,5
Zaw. wilgoć analityczna	W^a	% _{m/m}	2,0	4,9	3,6
Zaw. popiołu	A^d	% _{m/m}	24,0	10,3	18,9
Zaw. części lotnych	V^{daf}	% _{m/m}	35,83	79,74	50,17
Ciepło spalania	Q_s^a	kJ/kg	24570	17 672	22 521
Wartość opałowa	Q_i^r	kJ/kg	21135	14 593	19 982
Analiza elementarna					
Węgiel	C_t^d	% _{m/m}	63,67	47,42	50,52
Wodór	H_t^d	% _{m/m}	3,86	5,57	4,70
Siarka całkowita	S_t^d	% _{m/m}	0,70	0,19	0,41
Siarka popiołowa	S_{A}^d	% _{m/m}	0,23	0,13	0,31
Siarka palna	S^{dc}	% _{m/m}	0,47	0,06	0,10
Azot	N^d	% _{m/m}	0,95	0,30	0,40
Chlor	Cl^d	% _{m/m}	0,332	0,117	0,115
Inne					
Zaw. frakcji biodegradowalnej	X_B^d	% _{m/m}	-	81,36	-

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. Jednocześnie istnieje pewne zagrożenie spalaniem odpadów papieru na początku rusztu, a następnie bardzo wolnym wypalaniem powstałego karbonizatu, które jest tłumione przez popiół nagromadzony na powierzchni ziaren. Zawartość popiołu w badanych odpadach jest praktycznie ponad dwukrotnie niższa niż w spalonym węglu. Również zawartość chloru w odpadach jest niższa niż dla węgla i nie powinna powodować komplikacji eksploatacyjnych kotła. Zawartość siarki w badanych próbkach odpadów papieru i tektury jest także stosunkowo niska. W związku z tym nie powinny wystąpić niekorzystne zmiany w wielkości emisji SO_2 .

Oznaczona zawartość frakcji biodegradowalnej w badanej próbce odpadów papieru i tektury jest bardzo wysoka i wynosi ponad 81%. Biorąc pod uwagę stan suchy bezpopiołowy należy stwierdzić, że badane odpady zawierają ponad 95 % frakcji biodegradowalnej, co posiada istotne znaczenie przy rozważaniu możliwości kwalifikacji i rozliczania wytworzonej energii elektrycznej jako pochodzącej ze źródła odnawialnego.

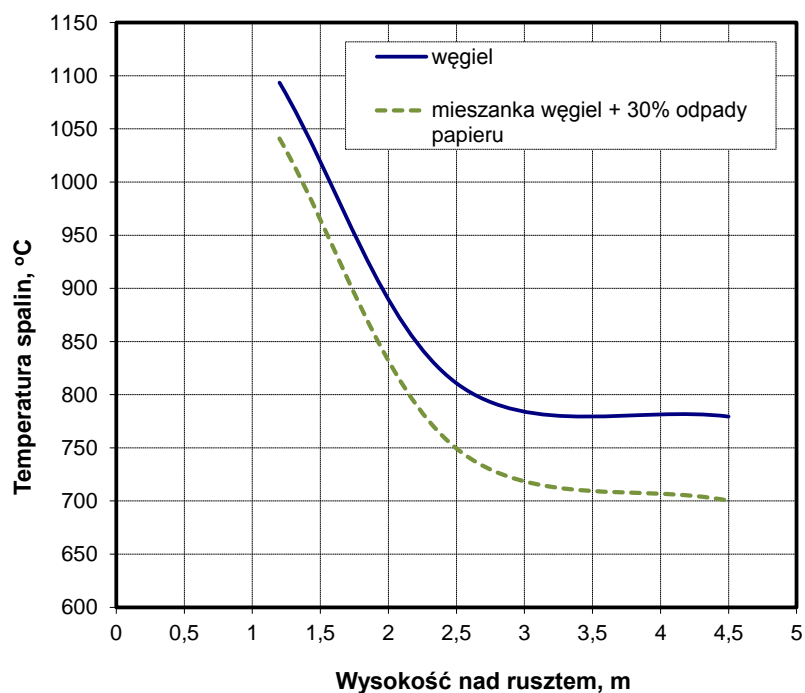
4.2. Określenie średniego czasu przebywania gazów spalinowych.

Dla określenia czasu przebywania gazów spalinowych w komorze spalania kotła, w temperaturze nie niższej niż $850^{\circ}C$, przeprowadzono pomiary identyfikacyjne rozkładu temperatury spalin w kotle. Punkty pomiarowe zlokalizowano w reprezentatywnych strefach kotła z uwzględnieniem technicznych możliwości wykonania króćców pomiarowych oraz przeprowadzenia pomiarów. Oznaczenia temperatury rejestrowano po uzyskaniu przez czujnik stanu równowagi termodynamicznej. Rozkład punktów pomiarowych przedstawiono schematycznie na rysunku 4.2.1.



Rys. 4.2.1. Schemat usytuowania punktów pomiaru temperatury w komorze spalania kotła OR-10.

Na rysunku 4.2.2 przedstawiono interpolowane rozkłady średniej temperatury spalin wzdłuż wysokości komory spalania od poziomu 1,2 do 4,4 m (podczas obydwu testów).



Rys. 4.2.2. Rozkład średniej temperatury spalin wzdłuż wysokości komory spalania kotła OR-10.

Podczas współspalania mieszanki paliwowej z 30% udziałem odpadów średnia temperatura spalin we wszystkich punktach pomiarowych komory spalania uległa obniżeniu w stosunku do spalania węgla. Różnice te zwiększają się wraz ze wzrostem poziomu pomiaru. Może być to związane z niższą wartością opałową mieszanki węgla z 30% udziałem odpadów papieru oraz mniejszym strumieniem spalin wytwarzanych w procesie współspalania odpadów papieru z węglem. Wyniki pomiarów oraz analiza rozkładu temperatury wskazuje również, że w strefie komory paleniskowej od poziomu rusztu (przyjętego jako poziom 0,0 m) temperatura gazów spalinowych nie spada poniżej 850°C do poziomu:

- 2,2 m (dla spalania węgla kamiennego),
- 1,9 m (dla spalania mieszanki paliwowej z 30% udziałem odpadów).

W celu wyznaczenia średniego czasu przebywania gazów spalinowych w komorze spalania, przyjęto następujące założenia:

- tłokowy model przepływu strumienia gazów spalinowych w komorze spalania,
- wartość temperatury gazów spalinowych przyjęto jako wartość średnią zarejestrowaną w punktach pomiędzy poziomem rusztu a poziomem 2 m,
- jako średnią drogę przepływu przyjęto odległość 2,2 m dla spalania węgla oraz 1,9 m dla spalania mieszanki węgla i odpadu.
- rzeczywisty strumień objętości gazów spalinowych w warunkach wyznaczonej średniej temperatury spalin w komorze obliczono w oparciu o wyznaczony podczas testów strumień objętości gazów za kotłem,
- w obliczeniach uwzględniono „fałszywe” powietrze dostane do spalin w podgrzewaczu powietrza.

Uwzględniając otrzymane wyniki pomiarów przeprowadzono obliczenia średniego czasu przebywania gazów spalinowych w komorze spalania w warunkach rzeczywistych. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.2.1.

Tabela 4.2.1. Wyniki obliczeń średniego czasu przebywania gazów spalinowych w komorze spalania.

Parametr	Jedn.	Spalanie węgla kamiennego	Spalanie mieszanki węgla i 30% odpadów
Średnia temperatura spalin w komorze spalania do poziomu 2 m	°C	951	918
Strumień objętości spalin w warunkach normalnych	m ³ /h	8547	7637
Strumień objętości spalin w warunkach rzeczywistych	m ³ /h	38 251	33 322
Średnia prędkość spalin	m/s	1,88	1,64
Wysokość strefy powyżej 850°C	m	2,2	1,9
Czas przebywania spalin w warunkach rzeczywistych w strefie „850°C”	sek	1,17	1,16

Uzyskane wyniki obliczeń czasów przebywania gazów spalinowych w strefie temperatur powyżej 850°C wskazują na nie dotrzymanie warunku TPO w badanej instalacji kotłowej. Podczas obydwu testów, czas ten wynosił poniżej 2 sekund. Dłuższy czas przebywania gazów spalinowych w obszarze wymaganej temperatury uzyskano podczas spalania samego paliwa węglowego.

4.3. Wyniki badań energetyczno-emisyjnych.

W tabeli 4.3.1. przedstawiono wyniki bilansu energetycznego kotła OR-10 wykonanego w oparciu o dane zebrane podczas testów przemysłowych.

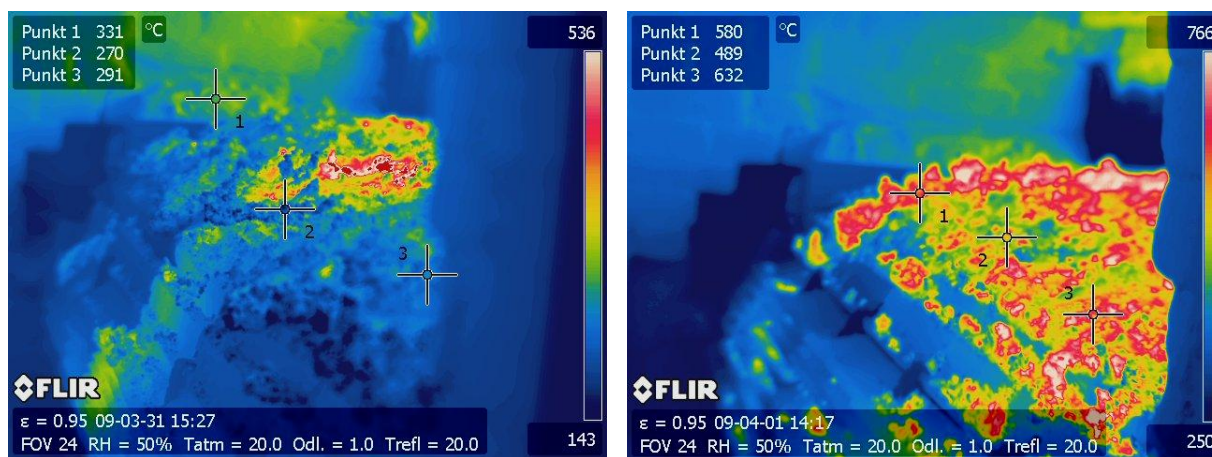
Wyniki pomiarów wykazały znacznie większe fluktuacje temperatury spalin w poszczególnych strefach komory paleniskowej przy współspalaniu odpadów papieru w stosunku do spalania węgla kamiennego. Może to wynikać z mniej stabilnego przebiegu procesu spalania mieszanki węgla z 30% udziałem odpadu na ruszcie. Nierównomierne, miejscowe wypalanie się paliwa powoduje tzw. „kratery powietrzne”, przez które przedostaje się powietrze, powodując tym samym gorsze wypalanie paliwa w innej części strefy rusztu. Wynikiem tego są wyższe straty energetyczne, objawiające się w postaci wysokiego poziomu zawartości części palnych w odpadach paleniskowych. Są one prawie 3-krotnie wyższe w stosunku do spalania paliwa jednorodnego, tj. 100% węgla.

Tabela 4.3.1. Wyniki bilansu energetycznego kotła OR-10.

Parametr		Jedn.	Węgiel kamienny	Mieszanka węgla i 30% odpadów
Obciążenie kotła		ton/h	7,5	7,4
Moc cieplna kotła		MW	5,63	5,55
Średni strumień paliwa		Mg/h	1,20	1,35
Strumień energii chemicznej paliwa		MW	7,02	7,49
Straty	wylotowa fizyczna spalin	MW	0,89	1,14
		%	12,64	15,21
	niespalonego CO w spalinach	MW	0,002	0,002
		%	0,02	0,03
	entalpii i zawartości części palnych w popiele lotnym i żużlu	MW	0,383	1,03
		%	5,45	13,71
	do otoczenia (promieniowania i konwekcji)	MW	0,37	0,36
		%	5,27	4,88
Sprawność energetyczna kotła (brutto)		%	75,83	66,66
Niepewność			±3,82	±5,65

Utrzymanie podobnej wydajności i mocy cieplnej kotła wymagało zwiększenia strumienia podawanego paliwa poprzez zwiększenie prędkości przesuwu rusztu, przy tej samej wysokości warstwy podawanego paliwa. Wpłynęło to na jakość procesu spalania paliwa na ruszcie.

Na rysunkach 4.3.1a i 4.3.1b przedstawiono rozkład temperatury żużla odprowadzanego do odzūżlacza w formie fotografii wykonanych kamerą termowizyjną. Zauważyć można na nich obszary żużla, w których tli się żar, świadczący o niewypalonym do końca paliwie w związku z niejednorodnym spalaniem na ruszcie kotła.



a) spalanie węgla kamiennego

b) spalanie mieszanki: 70% węgla kamiennego + 30% odpady papieru i tektury

Rys. 4.3.1. Temperatura żużla na przesypie z rusztu do odzūżlacza.

W konsekwencji, podczas procesu spalania mieszanki węgla kamiennego z 30% udziałem odpadów papieru obniżyła się w sposób istotny sprawność energetyczna kotła.

Dla instalacji kotła OR-10 podczas kolejnych testów obowiązują limity wielkości dopuszczalnych emisji określone dla dwóch różnych przypadków:

- spalania węgla kamiennego - jak dla spalania paliw,
- współspalania odpadów z węglem kamiennym - jak dla współspalania odpadów, zgodnie z tzw. „regułą mieszania”

W tabeli 4.3.2. przedstawiono zarówno wyniki pomiarów emisji uzyskane podczas testów jak i wielkości obowiązujących standardów emisyjnych dla badanej instalacji kotła OR-10.

Tabela 4.3.2. Wyniki pomiarów emisyjnych oraz dopuszczalne emisje dla badanej instalacji kotłowej.

Parametr	Jedn	Emisja zmierzona		Emisja dopuszczalna	
		Spalanie węgla kamiennego	Spalanie mieszanki węgla i 30% odpadów	Spalanie węgla kamiennego	Spalanie mieszanki węgla i 30% odpadów
O ₂	% _{v/v}	6	6	6	6
NO _x	mg/m ³ _u	235,7	502,6	400	444
SO ₂	mg/m ³ _u	891,5	1056,5	1500	1271
CO	mg/m ³ _u	99,2	302,1	-	55
Pył	mg/m ³ _u	174,3	679,1	400	338
HCl	mg/m ³ _u	2,8	8,6	-	3,9
HF	mg/m ³ _u	p.o.	p.o.	-	0,3
TOC	mg/m ³ _u	1,4	7,8	-	3,3
Hg	mg/m ³ _u	p.o.	p.o.	-	0,05
Cd + Tl	mg/m ³ _u	0,16	0,03	-	0,05
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	mg/m ³ _u	2,13	3,98	-	0,5
PCDD/DF	ng/m ³ _u	0,0006	0,0033	-	0,1

p.o. – poniżej oznaczalności

Porównując uzyskane emisje zanieczyszczeń z dopuszczalnymi wartościami stwierdzono, iż w przypadku współspalania odpadów papieru i tektury przekroczone zostały stężenia:

- tlenków azotów,
- tlenku węgla,
- chlorowodoru,
- pyłu,
- metali ciężkich w zakresie Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V.

Przedstawione wyniki pomiarów potwierdzają fakt, że kocioł rusztowy typu OR-10 jest prostą konstrukcją, wyposażoną jedynie w podstawowy układ odpylania spalin i nie dostosowaną do zadań związanych ze współspalaniem/spalaniem odpadów.

4.4. Uboczne produkty współspalania.

W przypadku podjęcia przez elektrociepłownię współspalania odpadów - istotnym zagadnieniem jest kwestia konieczności zmiany kwalifikacji produktów ubocznych. Ubocznymi produktami spalania paliw w elektrowniach są popioły paleniskowe, pyły i żużle. Stanowią one odpady o kodach:

100101 - żużle, popioły paleniskowe i pyły z kotłów (z wyłączeniem pyłów z kotłów wymienionych w 100104),

100102 - popioły lotne z węgla.

Ubocznymi produktami współspalania paliw i odpadów w instalacjach energetycznych są natomiast odpady o następujących kodach (* oznaczono odpady niebezpieczne):

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*.

Dla prawidłowej klasyfikacji tych materiałów – ważna jest m.in. znajomość zawartości metali ciężkich w tych produktach.

Tabela 4.4.1. Wyniki oznaczeń zawartości metali ciężkich w ubocznych produktach spalania/współspalania.

Oznaczenie	Zawartość, mg/kg _{s.m.}			
	węgiel kamienny		węgiel kamienny/odpad	
	żużel	popiół lotny	żużel	popiół lotny
Ołów	14,9	112,1	18,30	59,10
Kadm	<0,050	1,08	<0,050	0,73
Miedź	21,10	120,0	46,10	106,5
Chrom całkowity	30,50	58,40	26,20	38,00
Nikiel	39,40	85,80	32,40	59,10
Rtęć	<0,050	0,25	<0,050	0,31
Wanad	47,30	130	42,50	90,00
Antymon	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Kobalt	14,20	29,10	12,10	19,60
Suma metali ciężkich	<167,4	<536,73	<177,6	<373,34

Wyniki badań przedstawionych w tabeli 4.4.1. wskazują, że sumaryczna zawartość metali ciężkich w żużlach ze współspalania odpadów wzrosła, natomiast w popiele lotnym tendencja jest odwrotna. Spośród oznaczanych metali ciężkich, największy poziom zawartości w produktach ubocznych wykazuje miedź. Metal ten jednak występuje w badanym materiale w stanie związanym, o czym świadczy brak wykrywalności w wyciągu wodnym (tabela 4.4.2.). Wykonane oznaczenia wykazały również tendencję spadkową w zakresie zawartości kobaltu i wanadu w produktach współspalania odpadów papieru i tektury. Zaobserwowano również, że kadm i rtęć występują głównie w popiele lotnym.

Tabela 4.4.2. Wyniki badań wyciągu wodnego ubocznych produktów spalania/współspalania węgla kamiennego i odpadów o kodzie 15 01 05.

Oznaczenie	Wartość, mg/kg _{s.m.}				Wartość dopuszczalna
	węgiel kamienny		w. kamienny/odpad		
	żużel	popiół lotny	żużel	popiół lotny	
Arsen	0,033	<0,010	<0,010	0,017	2
Bar	0,569	6,79	5,05	7,86	100
Kadm	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	1
Chrom całkowity	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	10
Miedź	<0,040	<0,040	<0,040	<0,040	50
Rtęć	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,2
Molibden	2,36	<0,040	1,47	<0,040	10
Nikiel	<0,040	<0,040	<0,040	<0,040	10
Ołów	<0,100	<0,100	<0,100	<0,100	10
Antymon	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	0,7
Selen	<0,010	>1,0	0,011	0,056	0,5
Cynk	2,29	2,32	1,57	0,067	50
Chlorki	<50	55,5	122	110	15000
Fluorki	<1,00	20,00	4,20	25,00	150
Siarczany	193	3650	449	2695	20000
Rozpuszczony węgiel organiczny (DOC)	50,1	55,5	31,7	31,00	800
Stałe związki rozpuszczone (TDS)	1320	7590	4710	8640	60000
pH	10,9	11,4	11,9	11,8	-

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 4.4.2. - odczyn roztworu wodnego wykazuje charakter alkaliczny, a oznaczone poziomy wymywalności wszystkich oznaczanych substancji, poza jednym przypadkiem, wykazują dużo niższy poziom od wartości dopuszczalnych. Przekroczenie zawartości selenu w wyciągu wodnym z próbki popiołu lotnego ze współspalania węgla ma najprawdopodobniej charakter incydentalny i przy

założeniu łącznego odbioru popiołu i żużla nie powinno stanowić przeszkody dla traktowania tego materiału w przyszłości jako materiału obojętnego. Wydaje się więc uprawnionym stwierdzenie, że wszystkie badane materiały klasyfikują się do składowania na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne.

Wyniki badań przedstawione w tablicach 4.4.1. i 4.4.2. wskazują na to, że badane odpady nie posiadają charakteru odpadów niebezpiecznych.

W tabeli 4.4.3. przedstawiono wyniki oznaczeń zawartości części palnych w ubocznych produktach spalania węgla i spalania mieszanki węgla z odpadami papieru i tektury.

Tabela 4.4.3. Wyniki oznaczeń części palnych w ubocznych produktach spalania/współspalania.

Parametr	Wartość oznaczona, % _{m/m}			
	Węgiel kamienny		Mieszanka w. kamienny/odpad	
	żużel	popiół lotny	żużel	popiół lotny
Części palne	7,05	22,11	28,62	38,53

Uboczne produkty współspalania odpadów wykazują znacznie większy niedopał w stosunku do ubocznych produktów spalania węgla. Wynika to głównie z charakteru konstrukcji urządzenia kotłowego, w którym odpady były spalane/współspalane. Kocioł z poziomym rusztem mechanicznym nie zapewnia dobrych warunków dla ruchu pojedynczych cząstek spalanego materiału. Dlatego w urządzeniach do spalania odpadów stosuje się zwykle ruszty skośne i schodkowe, wymuszające wzajemne przesuwanie się cząstek i właściwe dopalenie materiału. Należy zauważyć, że uboczne produkty ze spalania węgla kamiennego (bez udziału odpadów) nie były również dobrze wypalone. Poziom dopalenia ubocznych produktów spalania węgla jak również współspalania węgla i odpadów nie jest jednak limitowany legislacyjnie natomiast wpływa na obniżenie sprawności energetycznej kotła, co uwidoczniło w danych zawartych w tabeli 4.3.1.

5. Podsumowanie

Testy przemysłowe spalania/współspalania z węglem kamiennym – odpadów papieru i tektury o kodzie 150101, przeprowadzone w kotle z rusztem mechanicznym typu OR-10, wykazały, że:

- współspalanie odpadów papieru i tektury, przy ich udziale w mieszance paliwowej na poziomie: 30% wpływa w sposób zauważalny na obniżenie sprawności kotła (spadek o około 10%),
- konstrukcja badanego kotła typu OR10 nie pozwala na dotrzymanie wymagań formalnych dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów dotyczącego minimalnego czasu 2 sekund przebywania spalin w obszarze temperatury powyżej 850oC.
- zawartości części palnych w ubocznych produktach spalania/współspalania mieszanki węgla i odpadów przekroczyły znacznie wartości oznaczone dla spalania węgla kamiennego.
- dotrzymanie przez instalację badanego kotła OR-10 obowiązujących ją standardów emisyjnych dla współspalania/spalania odpadów jest niemożliwe.

Tak więc, z formalnego punktu widzenia - współspalanie/spalanie odpadów papieru i tektury w badanym kotle rusztowym OR10 niesie za sobą zagrożenia środowiskowe i jest niedopuszczalne. Generalnie, współspalanie odpadów prowadzone jest w kotłach dedykowanych, spełniających wymagania legislacyjne dla termicznego przekształcania odpadów i wyposażonych w skuteczne systemy oczyszczania spalin.

Podsumowując, należy jednak stwierdzić, że podjęcie współspalania odpadów z papieru i tektury w instalacjach energetyki zawodowej jest przedsięwzięciem celowym. Umożliwić ono może wzrost potencjału produkcyjnego energii kwalifikowanej jako pochodząca z odnawialnego źródła energii oraz przyczynić się do zmniejszenia raportowanej emisji ditlenku węgla. Proces ten, prowadzony w instalacjach o innej konstrukcji (np. w kotłach fluidalnych), wyposażonych jednocześnie w wysokosprawne instalacje oczyszczania spalin - może być, zdaniem autorów, efektywny zarówno środowiskowo jak i ekonomiczne.

Literatura

1. Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2022 (Monitor Polski, 2016 r. , poz. 784).
 2. Ochrona Środowiska (2016). Główny Urząd Statystyczny. Warszawa.
 3. Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. (red. 2007). Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce. Wyd. IChPW Zabrze i Politechniki Śląskiej w Gliwicach.
 4. Thiel S., Thomé-Kozmiensky K.J. (2012). Co-combustion of solid recovered fuels in coal-fired power plants. *Waste Management and Resources*. 30 (4): 392-403.
 5. Hilber T., Maier J., Scheffknecht G., Agraniotis M., Grammelis P., Kakaras E., Glorius T., Becker U., Derichs W., Schiffer H.P., De Jong M., Torri L.(2007). Advantages and Possibilities of Solid Recovered Fuel Co-combustion in the European Energy Sector. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 57: 1178-1189.
 6. Wasielewski R., Sobolewski A. (2015). Uwarunkowania i perspektywy wykorzystania paliw z odpadów do generowania energii elektrycznej i ciepła. *Przemysł Chemiczny*.4: 1000-1005.
 7. Ucuncu A. (1991). Energy recovery from mixed paper waste. Final Report. Duke University, North Carolina. USA.
 8. Boavida D., Abelha P., Gulyurtlu I., Cabrita I. (2003).Co-combustion of coal and non-recyclable paper and plastic waste in a fluidised bed reactor, *Fuel*. 82: 1931–1938.
 9. Monte M.C., Fuente E., Blanco A., Negro C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*. 29: 293-308.
 10. Sobolewski A., Wasielewski R. (2008). Wykorzystanie stałych paliw wtórnych w instalacjach energetycznych. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*. 3-4: 69-76.
 11. Wandrasz J.W., Wandrasz A.J. (2006). Paliwa formowane. Wyd. Seidel-Przywecki Sp. z o.o. Warszawa.
-