



Wpływ biomasy na stratę niedopału oraz emisję NO_x i SO_2

AUTOR: Karol Król^a*

REKOMENDOWANE PRZEZ: Wiesław Rybak^a

^a Zakład Inżynierii i Technologii Energetycznych, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Politechnika Wrocławska

* Adres do korespondencji: karol.król@pwr.edu.pl, tel. 71 320 41 04

STRESZCZENIE

Przedmiotem pracy był proces współspalania zrębków drewna sosnowego z węglem kamiennym o średnicy ziaren pon. 200 μm . Celem naukowym pracy było poznanie mechanizmu oddziaływań biopaliw stałych na zachowanie się węgla w czasie współspalania. Badania pozwoliły poznać podstawowe mechanizmy rządzące współspalaniem biomasy z węglem oraz wyznaczyć parametry mające najbardziej znaczący wpływ na, emisję zanieczyszczeń i stratę niedopału. Cele szczegółowe pracy obejmowały zebranie informacji (dla węgla kamiennego i zrębków drewna sosnowego) o wpływie właściwości mieszaniny obu paliw na stopień wypalenia pyłu i emisję zanieczyszczeń gazowych (NO_x i SO_2). W pracy zgromadzono nowe dane charakteryzujące przydatność technologiczną biopaliw stałych. Znajomość powyższych właściwości ma kluczowe znaczenie dla projektowania urządzeń kotłowych, przygotowania paliwa, jak również ma znaczenie dla oceny warunków eksploatacji kotłów spalających węgiel i biomasę.

SŁOWA KLUCZOWE: węgiel, biomasa, emisja NO_x i SO_2 , strata niedopału, współspalanie

1. WPROWADZENIE

Wymagania stawiane elektrowniom pod względem uciążliwości dla środowiska naturalnego są coraz wyższe. Zgodnie obowiązującą dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady Europy nr 2001/80/WE [1], dopuszczalna wielkość emisji NO_x do atmosfery, dla obiektów o mocy cieplnej przewyższającej 500 MW, wynosi 500 mg/m_N^3 (w 6% O_2 w spalinach) do końca roku 2015, natomiast od 1 stycznia 2016 roku będzie obowiązywał standard emisji NO_x równy 200 mg/m_N^3 .

Szczegółowy mechanizm tworzenia się tlenków azotu opisany jest w wielu pracach [2, 3, 4, 5, 6]. Tworzenie się NO_x z azotu paliwowego odbywa się na skutek utleniania związków azotowych wydzielających się z częściami lotnymi oraz utleniania azotu pozo-

stającego w koksie. Z tego wynika, że w czasie spalania biopaliw należy stosować techniki zmniejszania emisji NO_x [3, 7, 8].

Tlenki azotu w czasie spalania powstają według trzech różnych mechanizmów: 1. przez reagowanie w wysokich temperaturach azotu atmosferycznego z tlenem atomowym – tzw. termiczne NO , 2. przez reakcję wolnych węglowodorowych rodników z azotem cząsteczkowym z utworzeniem pośrednich związków azotowych – tzw. szybkie NO oraz 3. przez utlenianie związków azotowych chemicznie związanych z substancją organiczną paliwa – tzw. paliwowe NO . Ilość powstających NO_x , według trzech podanych procesów, zależy od warunków spalania. Długi czas reagowania w wysokiej temperaturze sprzyja powstawaniu tlenków azotu, termicznych i szybkich. Duże stężenie tlenu w początkowej fazie spalania węgla sprzyja powstawaniu paliwowych tlenków azotu. Uważa się, że tworzenie się „ NO paliwowego” nie zależy od temperatury.

Reakcje tworzenia się zanieczyszczeń azotowych odbywają się w czasie kolejnych etapów procesu spalania biomasy: odgazowania, homogenicznej reakcji utleniania części lotnych oraz heterogenicznej reakcji utleniania pozostałości koksowej. O końcowym poziomie emisji tlenków azotu decyduje: zawartość azotu w paliwie, konstrukcja paleniska i warunki spalania. Małej emisji tlenków azotu sprzyja:

- mała zawartość azotu w paliwie,
- mała wartość współczynnika nadmiaru powietrza w początkowym etapie spalania,
- niska temperatura spalania.

W literaturze [9] znajdują się sprzeczne doniesienia co do wpływu procesu współspalania węgla i biomasy na końcowy poziom emisji NO_x i SO_2 . Na podstawie testów w skali rzeczywistej kotła obserwowano [9], że emisja NO_x podczas współspalania drewna z węglem była mniejsza niż w czasie spalania samego węgla. W innych badaniach podczas współspalania słomy z węglem w palenisku pyłowym o mocy 500 kW [10, 11] obserwowano emisję NO_x wprost proporcjonalną do ilości spalanej słomy. Podobny wynik uzyskano w czasie współspalania słomy i węgla w palenisku fluidalnym [12]. Takie zachowanie się tlenków azotu wyjaśniano dużą zawartością części lotnych w słomie. Z powodu mniejszej zawartości siarki w biopaliwach niż w węglu, emisja SO_2 podczas współspalania obniża się, często w proporcji do udziału biomasy w mieszaninie paliwowej. Z powodu dużej ilości części lotnych w większości biopaliw mogą być emitowane duże stężenia CO .

Istotnym ograniczeniem nałożonym na współspalanie biomasy z węglem mogą być problemy techniczne związane z wpływem tego procesu na skuteczność i utrzymanie w czystości urządzeń oczyszczania spalin, takich jak DeNO_x , filtry i skrubery [13]. Proces współspalania biopaliw stałych z węglem może mieć również negatywny wpływ na pierwotne i wtórne metody redukcji emisji, jeśli takie były wcześniej zastosowane w paleniskach węglowych. W wielu paleniskach pyłowych są zainstalowane następujące systemy do redukcji NO_x :

- palniki z małą emisją NO_x ,
- zaawansowane pierwotne metody zmniejszania NO_x , takie jak dwuetapowe spalanie i technologie reburningu,

- nieselektywna katalityczna redukcja (SNCR),
- selektywna katalityczna redukcja (SCR).

Stosowanie technik spalania z niską emisją NO_x oraz stosowanie techniki współspalania może pociągać za sobą zagrożenie wzrostu udziału części palnych w popiele lotnym i żużlu (niedopału) oraz problemy z tworzeniem się stałych osadów żużla i popiołu na powierzchniach ogrzewalnych. Strata, wynikająca z niecałkowitego spalania pyłu węglowego, związana z nadmierną ilością stałych części palnych w żużlu i w lotnym popiele, jest podstawową charakterystyką urządzeń kotłowych. Obniża sprawność kotła i opłacalność procesu, wpływa na warunki pracy urządzeń odpylających oraz decyduje o możliwościach wykorzystania lotnego popiołu np. w przemyśle cementowym lub budowlanym. Opóźnione mieszanie pyłu i powietrza w komorze spalania, stosowane w systemach o niskiej emisji tlenków azotu, powoduje dodatkowe trudności w zapewnieniu całkowitego wypalenia, szczególnie w modyfikowanych układach palenisk pyłowych. Z przeprowadzonych licznych testów w elektrowniach węglowych [5, 9, 14] w czasie współspalania wynikało, że duże i wilgotne cząstki biomasy mogą ulegać niepełnemu spalaniu. Dlatego w czasie współspalania należy się liczyć z ograniczeniem wydajności i sprawności kotła.

Do najważniejszych eksploatacyjnych parametrów wpływających na niedopał należy: rozdrobnienie ziaren paliwa, wielkość nadmiaru powietrza, równomierność rozdziału paliwo/powietrze pomiędzy palniki (bilans i optymalizacja palników), temperatura płomienia, aerodynamika i mieszanie w kotle oraz czas przebywania w kotle. Choć problemowi spalania i współspalania pyłu węglowego oraz procesowi powstawania straty niecałkowitego spalania poświęcono znaczną uwagę, to jednak teoretyczne i eksperymentalne badania spalania węgla nie osiągnęły jeszcze zadawalającego poziomu, który by pozwolił wiarygodnie projektować układ paleniskowy, precyzyjnie wpływać na organizację spalania w kotle lub przewidzieć wielkość straty niedopału.

2. CEL I OPIS BADAŃ

W pracy przeprowadzono badania spalania wybranego węgla kamiennego i zrębków drewna sosnowego oraz ich mieszanin z 10, 20 i 30% dodatkiem sosny. Badany węgiel i zrębki sosny były suszone i rozdrabniane oraz przesiewane do frakcji pon. 200 mm. Paliwa spalano w warunkach jednostopniowego spalania w 3 m reaktorze przepływowym, w kontrolowanych warunkach temperaturowych z możliwością ustalenia wartości współczynnika nadmiaru powietrza.

2.1. CEL BADAŃ

Celem badań jest zebranie informacji o wpływie właściwości paliwa oraz warunków współspalania na emisję NO_x i niedopał. Cele badań obejmują:

- poznanie wpływu warunków spalania i rodzaju paliwa na wielkość emisji NO_x i wypalenie,
- poznanie wpływu biomasy na wielkość emisji NO_x i wypalenie paliwa w czasie współspalania węgla z biomasa,

- zgromadzenie danych doświadczalnych charakteryzujących węgiel, biomasę i ich mieszaniny o różnym składzie, poprzez ich spalanie w kontrolowanych warunkach jednostopniowego spalania,
- zidentyfikowanie tych własności paliwa i warunków współspalania (temperatura, nadmiar powietrza,), które odgrywają największą rolę ze względu na końcowy poziom emisji NO_x i niedopał.

Charakterystyka badanych paliw

W tabeli 1 została przedstawiona analiza techniczna badanego węgla.

Tabela 1. Analiza techniczna węgla^(a)–stan analityczny)

	W ^a %	A ^a %	V ^a %	FC ^a %
WĘGIEL	2,0	17,3	28,8	51,9

Następnie przeprowadzono analizę techniczną biomasy, którą przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Analiza techniczna biomasy^(a)–stan analityczny)

	W ^a %	A ^a %	V ^a %	FC ^a %
BIOMASA	8,5	1,4	63,0	27,1

Porównując węgiel z biomasą, można zauważyć duże dysproporcje związane z zawartością części lotnych. Cechą charakterystyczną biomasy jest wyższa ich zawartość w paliwie. Biomasa w porównaniu z węglem cechuje się bardzo niską zawartością substancji mineralnej. Przeprowadzona analiza elementarna miała na celu ustalenie składu pierwiastkowego użytych paliw. Analiza dla węgla została pokazana w tabeli 3.

Tabela 3. Analiza elementarną węgla^(a)–stan analityczny)

	C ^a %	H ^a %	N ^a %	S ^a %	O ^a %
WĘGIEL	65,4	3,7	1,3	1,2	9,1

Analizę elementarną zrębków drewna sosnowego zamieszczono w tabeli 4. Znaczącą różnicę widać w zawartości procentowej azotu w porównaniu do węgla. Porównując analizy elementarne węgla i biomasy zauważamy duże różnice w zawartości tlenu i węgla. Zawartość siarki w biomasie wynosiła 0,03%.

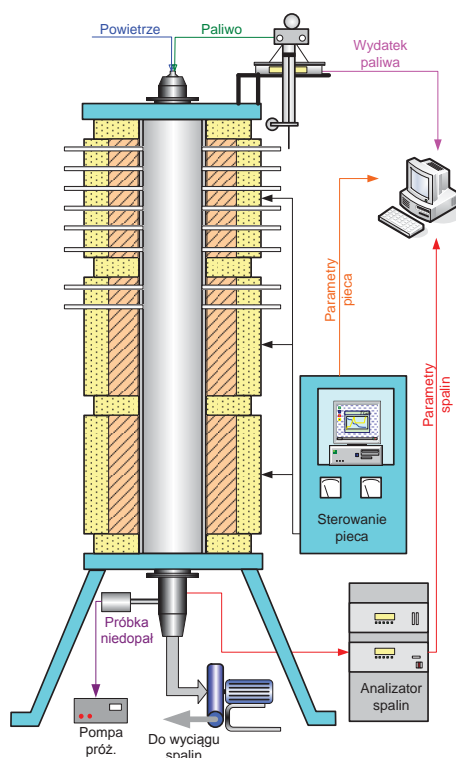
Tabela 4. Analiza elementarną węgla^(a)–stan analityczny)

	C ^a %	H ^a %	N ^a %	S ^a %	O ^a %
BIOMASA	49,3	5,3	0,37	0,03	35,1

2.2. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO I PROCEDURY BADAWCZEJ

Podczas badań laboratoryjnych spalano badane paliwa w warunkach odpowiadających jednostopniowemu spalaniu. Wielkości emisji NO_x , poziom niedopału i skład innych produktów spalania badano w zależności od: rodzaju paliwa, składu mieszanki węgla i biomasy oraz wartości współczynnika nadmiaru powietrza. Testy obejmowały pomiary składu spalin i stałych części palnych w popiele.

Schemat stanowiska badawczego został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Podstawowym elementem stanowiska badawczego jest grzany elektrycznie piec, w którym zachodzi proces spalania pyłu. Komorę reakcyjną pieca stanowi rura wykonana ze stali żaroodpornej o średnicy wewnętrznej 102,3 mm i długości 2900 mm, umieszczona pionowo na konstrukcji pieca. Komora grzejna wyposażona jest w dwa pionowe rzędy króćców do pomiaru temperatury, poboru próbek paliwa w różnych stadiach wypalenia, poboru próbek gazowych do analizatora spalin, doprowadzenie powietrza dodatkowego. Pionowy trójstrefowy układ grzejny o maksymalnej temp. pracy 1200 °C, wewnątrz którego zawieszony jest zespół reaktora, tworzą przedzielone półpierścieniami izolacyjnymi trzy segmenty zamknięte obustronnie pokrywami wypełnionymi kształtkami, wykonanymi z masy na bazie włókien ceramicznych. Do

kolnierza górnego reaktora przykręcony jest palnik pyłowy, do którego doprowadzana jest, w sposób pneumatyczny, mieszanina pyłowo – powietrzna za pomocą podajnika. Podajnik pyłu węglowego, umieszczony na górnej pokrywie pieca, zapewnia stabilny transport pyłu węglowego do komory, który jest kontrolowany na bieżąco za pomocą ciąglego pomiaru strumienia masy pyłu opuszczającego podajnik.

Budowa pieca oraz zastosowana aparatura pozwala na pomiar stężeń składników gazowych spalin oraz pobór prób węglowych w różnych warunkach prowadzenia procesu spalania. W badaniach analiza produktów gazowych wykonana była z wykorzystaniem: Analizatora spalin TEMET GASMET CX-4000, Analizatora spalin SIEMENS ULTRAMAT 23, Analizatora tlenu OXITEC 5000. Do analizy próbki gazowej wykorzystywane są analizatory spalin firm TEMET i SIEMENS, których zasada działania oparta jest o transformatę Fouriera w podczerwieni – FTIR. Możliwa jest więc analiza składników gazowych, które pochłaniają promieniowanie podczerwone, tj. wszystkich gazów z wyjątkiem dwuatomowych (np. O₂, N₂, H₂, Cl₂) i gazów szlachetnych (np. He, Ne, Ar, Kr).

3. WYNIKI BADAŃ

Celem tego etapu badań było uzyskanie informacji na temat wpływu wartości współczynnika nadmiaru powietrza oraz dodatku biopaliwa do węgla na wielkość emisji NO_x i SO₂, CO, CO₂, O₂ oraz stratę niedopału. Dla wszystkich badanych paliw przeprowadzono badania wpływu nadmiaru powietrza podawanego do spalania na emisję tlenków azotu i wielkość niedopału. Nadmiar powietrza był określany na podstawie zależności (1):

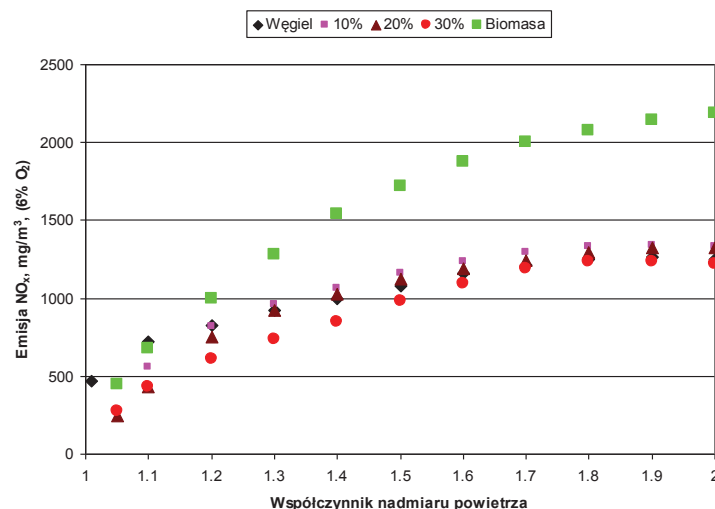
$$\lambda = \frac{V_{rz}}{m_p \cdot V_t} \quad (1)$$

gdzie: V_{rz} – całkowita ilość powietrza wprowadzanego do reaktora, m³/s, V_t – teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania, m³/kg_{pal}, m_p – strumień masy paliwa (węgla wyjściowego, zrębek sosny lub mieszaniny węgla z zrębkami sosny), kg_{pal}/s.

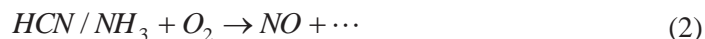
Badania prowadzono dla wartości współczynnika nadmiaru powietrza zmieniającego się w zakresie wartości od 1,0 (warunki stechiometryczne) do 2,0. Dla stałego strumienia masy pyłu węgla, zrębków sosny i ich mieszanin transportowanego do komory, nadmiar powietrza ustalany był poprzez wielkość strumienia objętości powietrza do spalania, podawanego razem z paliwem do palnika. Współczynnik nadmiaru powietrza odnoszony był osobno do węgla, sosny i mieszanin paliwowych. Zwiększanie nadmiaru powietrza realizowane było poprzez podwyższanie ilości powietrza do spalania. Metodę tę wybrano ze względu na to, że jest to sposób stosowany w urządzeniach kotłowych.

3.1. EMISJA NO_x

Rysunek 2 przedstawia poziom emisji NO_x dla węgla i jego mieszanin z biomasą w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza.

Rys. 2. Emisja NO_x dla węgla i mieszanin (dla 6% O_2)

Do podstawowych parametrów mających wpływ na wielkość emisji NO_x należy wartość współczynnika nadmiaru powietrza – dostępność tlenu. Z rys. 2 wynika, że dla każdego z badanych paliw i ich mieszanin wielkość emisji NO_x (dla 6% O_2) rosła ze zwiększaniem się wartości współczynnika λ . Przyczyną tego jest poprawa warunków utleniania się wydzielających się z częściami lotnymi związków azotowych poprzez zwiększenie dostępności tlenu. Dominuje wówczas reakcja utleniania:



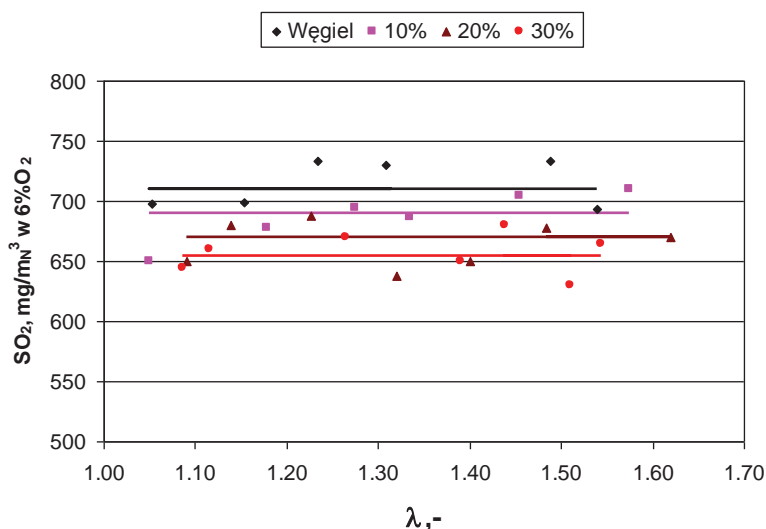
Można zauważyć, że pomimo znacznego zróżnicowania w ilości części lotnych oraz zawartości azotu pierwiastkowego w badanym węglu i biomase poziom emisji NO_x w warunkach jednostopniowego spalania jest porównywalny. Niewielki wpływ na końcowy poziom emisji w warunkach współspalania miał również skład mieszaniny paliwowej. Wartości emisji NO_x w czasie współspalania były zbliżone do emisji podczas spalania paliw wyjściowych.

3.2. EMISJA SO_2

W czasie spalania paliw stałych tlenki siarki pochodzą z związków siarki, które są absorbowane przez rośliny w czasie ich wzrostu oraz z utleniania związków siarki związanych z substancją mineralną. W czasie spalania powstają tlenki siarki, SO_x (SO_2 i SO_3) oraz H_2S , COS i CS_2 , których emisja może prowadzić do korozji urządzeń energetycznych, tworzenia się żużla w komorze spalania oraz jest źródłem zanieczyszczenia atmosfery. Problem ograniczenia emisji SO_x w czasie procesu spalania wynika przede wszystkim z samej natury chemicznej paliwa. W czasie nagrzewania paliwa związki siarki odgazowują w sposób podobny jak wydzielają się lotne składni-

ki w czasie odgazowania. W czasie spalania siarka paliwowa (zarówno organiczna jak i nieorganiczna) utlenia się do SO_2 lub SO_3 . Konwersja siarki do tlenków jest wysoka i wynosi przeciętnie 85-90%. Około 1-3% SO_2 w warunkach nadmiaru powietrza przekształca się do SO_3 . Ilość związków siarki zatrzymywanej przez popiół jest tym większa im więcej zawiera paliwo metali alkalicznych (Ca, Na) i związków żelaza.

Rysunek 3 przedstawia poziom emisji SO_2 dla węgla i mieszanin 10, 20 i 30% biomasy w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ .



Rys. 3. Emisja SO_2 dla węgla i mieszanin (dla 6% O_2)

Z rys. 3 wynika, że emisja SO_2 nie zależy od wartości współczynnika nadmiaru powietrza. Dodatek do węgla 10, 20 i 30% biomasy powodował proporcjonalne obniżenie emisji SO_2 .

3.3. STRATA NIEDOPALU

Problematyka wpływu jakości spalanego węgla na zawartość węgla w lotnym popiele jest rozpoznana i prezentowana w literaturze tylko w niewielkim stopniu. Jones i inni [15] obserwowali słaby związek między wypaleniem osmiu węgla a jakością spalanego węgla reprezentowaną przez tzw. wskaźnik odbicia światła. Hurt i Mitchell [16], Hercog i Rybak [17] obserwowali związek między reaktywnością spalanych węgla a wielkością niedopału. Reaktywność badanych węgla była określana w rurze opadowej.

Zawartość niespalonych części palnych w lotnym popiele jest oznaczana na świecie przez różne testy (np. Loss-On-Ignition (LOI) wg normy amerykańskiej [68]), które polegają na utlenianiu przez szereg godzin w piecu o temperaturze, zwykle powyżej 700°C , odważonej i wysuszonej próby lotnego popiołu. Po tym czasie próba jest ponownie ważona. Ubytek masy próby wywołany nagrzewaniem traktowany jest

jako zawartość niespalonych części palnych odpowiednio w żużlu, C_Z i lotnym popiele, C_L .

Wielkość części palnych w popiele jest decydującym elementem straty niecałkowitego spalania ze względu na znaczny udział masowy lotnego popiołu. W przypadku lotnego popiołu ubytek ten może być odniesiony do masy lotnego popiołu (kg niespalonych części palnych/kg popiołu) lub do masy wyjściowej doprowadzonego paliwa (kg niespalonych części palnych/kg paliwa).

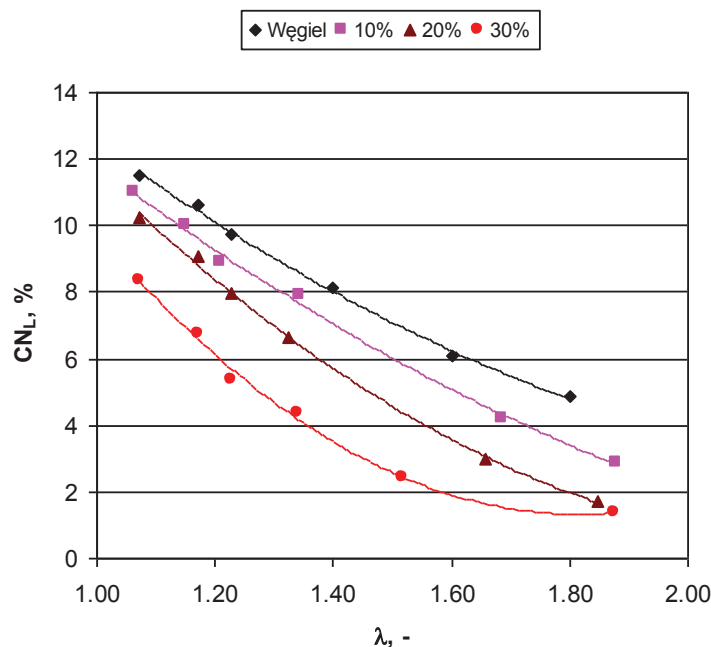
Związek między obiema postaciami przedstawienia zawartości niespalonych części palnych w popiele jest następujący:

$$CN_L = \frac{100 \cdot A^d \cdot C_L}{100 - C_L}, \% \text{ wag. paliwa} \quad (3)$$

gdzie CN_L oznacza zawartość niespalonych części palnych popiele (kg niespalonych części palnych/kg paliwa); C_L - zawartość niespalonych części palnych w popiele (kg niespalonych części palnych/kg popiołu); A^d - zawartość popiołu w węglu wyjściowym (% wag.).

Ponieważ badane paliwa różnią się znacząco zawartością popiołu, to ilość niespalonych części palnych odnoszona będzie do masy wyjściowej doprowadzonego paliwa, a nie do masy lotnego popiołu.

Rysunek 4 przedstawia wartość niespalonych części palnych CN_L w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ .



Rys. 4. Strata niecałkowitego spalania dla węgla i mieszanin dla różnych λ

Z rysunku wynika, że wraz ze zwiększaniem się wartości współczynnika nadmiaru powietrza maleje wielkość niespalonych części palnych. Dodatek 10, 20 i 30% biomasy do węgla powoduje zmniejszenie straty niecałkowitego spalania w porównaniu z samym węglem.

4. Dyskusja wyników i podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań oddziaływanie biomasy na emisje tlenków azotu i tworzenie się niedopału w czasie współspalania węgla i biomasy można podsumować następująco:

- zarówno rodzaj spalanego paliwa, jak i wielkość dodawanej biomasy nie miały wpływu (w zakresie badanych w pracy paliw) na końcową wielkość emisji tlenków azotu,
- dodawanie biomasy do mieszaniny biomasy i węgla powodowało proporcjonalne obniżenie końcowej emisji dwutlenku siarki,
- paliwa o wyższej reaktywności i większej zawartości części lotnych (mniejszej ilości stałej pozostałości po odgazowaniu) charakteryzują się niższym stopniem niespalonych części palnych w popiele,
- dodawanie biomasy do mieszaniny biomasy i węgla powodowało obniżenie straty niecałkowitego spalania w porównaniu do samego węgla.

5. Wnioski i uwagi praktyczne związane ze współspalaniem

Na podstawie przeprowadzonych badań oddziaływanie biomasy w postaci pyłu o rozmiarze ziaren pon. 200 μm na spalanie węgla w mieszaninie można podsumować następująco:

- dodawanie biomasy do mieszaniny biomasy i węgla będzie powodowało niewielki wpływ na końcowy poziom emisji tlenków azotu,
- dodawanie biomasy do mieszaniny biomasy i węgla będzie powodowało proporcjonalne obniżenie końcowej emisji dwutlenku siarki,
- dodawanie biomasy do mieszaniny biomasy i węgla powodowało obniżenie straty niecałkowitego spalania w porównaniu do samego węgla.

Powyższe wnioski badawcze pozwalają na sformułowanie następujących uwag praktycznych związanych z pracą kotłów w czasie współspalania węgla z biomasą:

- kotły, w których przewidziano współspalanie biomasy z węglem zostały zaprojektowane na określony typ węgla i ilość spalin powstającą ze spalania danego paliwa. Ze względu na mniejszą kaloryczność biopaliw i większą zawartość w nich wilgoci, na wyprodukowanie tej samej ilości energii cieplnej zużywana będzie większa ilość biopaliw. Prowadzi to do tworzenia się większych strumieni spalin w porównaniu do ilości spalin produkowanych w czasie spalania wyłącznie węgla kamiennego. Dlatego istniejące konstrukcje kotłów węglowych nie będą na ogół pozwalały na współspalanie dużych ilości biomasy lub w tych kotłach są wymagane zmiany i modernizacje.

Produkowane w czasie współspalania większe ilości spalin na jednostkę doprowadzonej z paliwem energii cieplnej będą powodowały:

- zmiany charakteru przepływu spalin przez kocioł oraz profilu temperatury, przez co zmniejszy się sprawność spalania i zwiększy ilość niespalonego węgla w lotnym popiele, zmianie ulegną rozkłady obciążeń cieplnych powierzchni ogrzewalnych w komorze paleniskowej i ciągu konwekcyjnym kotła,
- możliwość wystąpienia niewydolności wentylatorów wyciągowych spalin,
- przesunięcie spalania w górę komory paleniskowej z omijaniem stref wysokich temperatur, co może skutkować niestabilnością płomienia, zwiększeniem poziomu emisji NO_x, jak również większym popieleniem, erozją, korozją powierzchni ogrzewalnych oraz większymi wtryskami wody chłodzącej do przegrzewaczy pary,
- duża zawartość wilgoci w większości biomas może obniżać temperaturę płomienia, co zwiększy emisję CO, stratę niedopału i sprawność kotła; zwiększenie niedopału wymusza zwiększenie nadmiaru powietrza, co zmniejsza sprawność kotła i spowoduje dalsze obniżenie temperatury.

LITERATURA

- [1] Dyrektywa 2001/80/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy.
- [2] **Hercog J.:** *Emisja NO_x i strata niecałkowitego spalania w zależności od warunków spalania i typu węgla*, Praca doktorska, Politechnika Wroclawska, 2006.
- [3] **Kordylewski W. i inni:** *Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, 2000.
- [4] **Surmen Y., Demirbas A.:** *Cofiring of biomass and lignite blends: resource facilities; technological and environmental issues*, Energy Sources 2003, 25(3), 175–87, 2003.
- [5] **Tillman D.A., Hughes E., Gold B.A.:** *Cofiring of biofuels in coal fired boilers: results of case study analysis*, First biomass conference of the Americas, Burlington, VT 1994, 368–381, 1994.
- [6] **Wu C., Damstedt B., Burt S., Tree D., Baxter L.:** *Fuel-nitrogen chemistry during combustion of low-grade fuels in a low-NO_x burner*, Science in thermal and chemical biomass conversion, Victoria, BC, Canada. 30.08–02.09.2004.
- [7] **Nelson R.K., Franklin J.D., Scherer B.:** Power-Gen Americas'94, Livonia 1994.
- [8] **Splithoff H., Hein K.R.G.,** VGB Power Tech, vol. 4, 88, 2002.
- [9] **Tillman D. A.:** *Cofiring Technology Review*, Final Report NETL, USDOE, Pittsburg 2002.
- [10] **Hansen P.F.B., Andersen K.H., Wieck-Hansen K.:** *Co-firing straw in a 150MWe utility boiler: in-situ measurements*, Fuel Processing Technology, 54, 207-225, 1998.
- [11] **Henriksen N., Larsen O.H.:** *Corrosion in ultrasupercritical boilers for straw combustion*, Materials at High Temperature, 14, 227-236, 1997.
- [12] **Barnes D.I.:** *Opportunities and markets for co- utilization of biomass and waste with fossil fuels for power generation*, Final Report, European Commission, 1999.
- [13] **Struckmann P., Dieckmann J., Brandenstein J.:** *Co-Combustion of secondary fuels- prevention or reduction of operating problems*, VGB Power Tech, 1/2, 72-76, 2004.
- [14] **Nussbaumer T.:** *Combustion and Co-Combustion of Biomass*, 12th European Conference Exhibition on Biomass for Energy, Amsterdam 2002.
- [15] **Jones A.R., Gibb W.H., Irons R.M.S., Price H.J.,** EPA/EPRI Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, Kansas City, 1995.
- [16] **Hurt R.H., Mitchell R.E.,** 24th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1243, 1992.
- [17] **Hercog J., Rybak W.:** *Strata niecałkowitego spalania podczas stosowania pierwotnych metod redukcji emisji NO_x w paleniskach pyłowych*, Energetyka 2002. Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław, 249-256, 2002.