



The influence of biomass type and mass fraction on NO_x and SO₂ maximum emission during the co-combustion process with hard coal and brown coal

Aleksandra GÓRECKA-ZBRŃSKA¹, Agnieszka KIJO-KLECZKOWSKA²

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych, Zakład Kotłów i Termodynamiki, Al. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, tel.: 34 325 05 86, fax.: 34 325 05 55, e-mail: gorecka@imc.pcz.czyst.pl

² Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych, Zakład Kotłów i Termodynamiki, Al. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, tel.: 34 325 05 08, fax.: 34 325 05 55, e-mail: kijo@imc.pcz.czyst.pl

Abstract

In the paper the experimental results of hard coal and brown coal with biomass co-combustion are presented. The aim of research was to explain the influence of biomass and carbon participation in fuel-mixture (in briquette form) on NO_x and SO₂ maximum emission during fuels co-combustion in air. The “rotal” and “uniformall” schedule PS/DS-P:λ (λ) was used in the research. The analysis of results showed that it is the optimal participation of different types biomass in fuel-mixture (biomass and hard coal, biomass and brown coal) on the values of NO_x and SO₂ maximum emission during co-combustion of hard coal and brown coal with biomass.

Keywords: fuels co-combustion, hard coal, brown coal, biomass, NO_x and SO₂ emission

Streszczenie

Oddziaływanie rodzaju i udziału biomasy na maksymalne emisje NO_x i SO₂ podczas współspalania z węglem kamiennym i brunatnym

W pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych procesu spalania węgla: kamiennego oraz brunatnego z różnymi rodzajami biomasy, w postaci kulistych brykietów, stanowiących mieszankę paliwową. Celem badań było ustalenie oddziaływania udziału biomasy w paliwie i jego uwęglenia na maksymalną emisję spalin, powstałych podczas procesu współspalania paliw w strumieniu powietrza. Do przeprowadzenia badań wykorzystano rotalno-uniformalny plan badań PS/DS-P:λ (λ), który dzięki równoczesnej odpowiedniej zmianie przyjętych wejściowych parametrów procesu umożliwił uchwycenie interakcji między nimi. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że istnieje możliwość wyznaczenia udziału danego rodzaju biomasy w mieszance paliwowej z: węglem kamiennym i węglem brunatnym wpływającego na optymalną wartość maksymalnych emisji NO_x i SO₂ w procesie współspalania.

Słowa kluczowe: współspalanie paliw, węgiel kamienny, węgiel brunatny, biomasa, emisja NO_x i SO₂.

1. Wstęp

Racjonalne wykorzystanie paliw kopalnych oraz odnawialnych zasobów energii jest jednym z bardzo istotnych elementów zrównoważonego rozwoju kraju. Stopień ich wykorzystania uzależniony jest od wielkości zasobów oraz technologii przetwarzania. Zobowiązania Polski wobec umów międzynarodowych i prawnych, związane z corocznym wzrostem, a docelowo osiągnięciem w 2020 roku poziomu 20%-go zużycia energii elektrycznej wyprodukowanej ze źródeł odnawialnych, przyczyniły się do szukania różnego rodzaju rozwiązań mających na celu osiągnięcie wymaganych założeń. Powyższe względy ekologiczne i ekonomiczne stały się podstawą podejmowania działań na rzecz zastępowania paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii, co

spowodowało, że obecnie w polskiej energetyce wykorzystywane są różnego typu paliwa, w tym odpadowe: muły węglowe, koks petrochemiczny, biomasa, odpady, osady ściekowe oraz dostępne na rynku węgle importowane. Wymienione paliwa są paliwami organicznymi, ale mimo wspólnego pochodzenia, różnice w ich właściwościach powodują, że wymagają one różniących się od siebie technologii spalania. Dlatego niezwykle ważnym aspektem w polskiej energetyce jest racjonalna gospodarka ww. paliwami. Tematykę tę podjęto m.in. w pracach [1,2]

2. Odnawialne źródła energii jako wsparcie energetyki

Obecnie najbardziej popularnym i głównym źródłem energii odnawialnej w energetyce zawodowej naszego kraju stało się spalanie biomasy z węglem w procesie współspalania.

Pod pojęciem odnawialnego źródła energii należy rozumieć źródło wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów morskich i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, z biogazu wysypiskowego, a także z biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowych cząstek roślinnych i zwierzęcych [3].

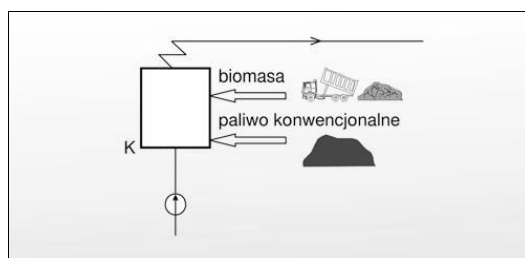
Biomasę natomiast stanowią zarówno stałe, jak i ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, z przemysłu przetwarzającego ich produkty, jak również części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji [4].

Współspalanie jest reakcją chemiczną polegającą na szybkim utlenianiu substancji palnej (paliwa), przebiegającą między paliwem a utleniaczem, z tą różnicą (w porównaniu do spalania), że podczas procesu współspalania występują minimum dwa rodzaje paliwa i jeden utleniacz, np. węgiel – paliwo podstawowe i biomasa – paliwo dodatkowe oraz powietrze jako utleniacz [5].

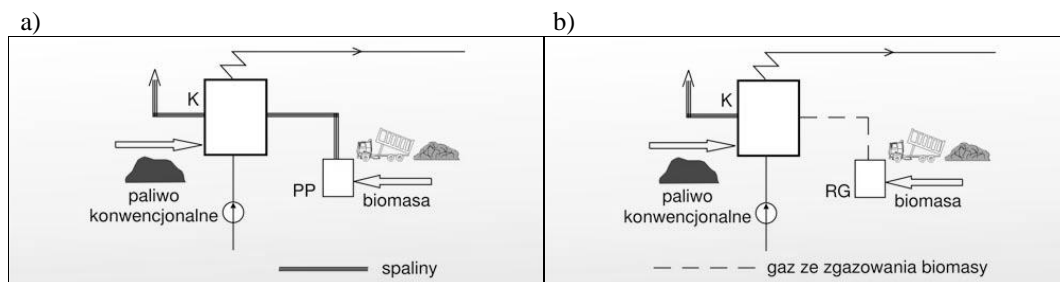
Produkcja energii odnawialnej w procesie współspalania biopaliw (biomasy, biogazu) oraz paliw konwencjonalnych w elektrowniach i elektrociepłowniach może być realizowana w kilku wariantach technologicznych [6]:

- współspalanie bezpośrednie (rys.1.1) – zachodzi w przypadku, kiedy do procesu spalania realizowanego w jednej komorze K, doprowadzany jest osobno strumień węgla i biomasy (ewentualnie biogazu) lub gotowa mieszanka węgla i biomasy (tzw. mieszane paliwo wtórne);
- współspalanie pośrednie – zachodzi w przypadkach, gdy:
 - spalanie biomasy (ewentualnie biogazu) odbywa się w tzw. przedpalenisku PP (rys. 1.2 a), zaś entalpia powstających spalin wykorzystywana jest w komorze K, w której zabudowane są powierzchnie ogrzewalne, bądź bezpośrednio jako czynnik grzewczy w wymiennikach ciepłowniczych,
 - zgazowanie biomasy zachodzi w gazogeneratorze RG (rys. 1.2 b)), a powstający gaz doprowadza się do komory spalania K, gdzie jest spalany w paleniskach gazowych;
- współspalanie w układzie równoległym (rys. 1.3) obejmuje przypadki, gdy każde paliwo konwencjonalne i odnawialne jest spalane w osobnej komorze spalania K z zachowaniem indywidualnych wymogów odnośnie do procesu spalania. Szczególnym przypadkiem współspalania równoległego jest tzw. układ hybrydowy.

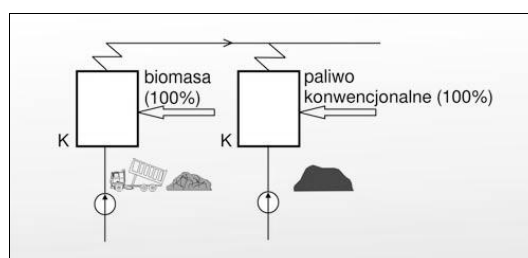
Pod pojęciem układu hybrydowego należy rozumieć układ jednostek wytwórczych pracujących na wspólny kolektor parowy oraz zużywających w procesie spalania odpowiednio biomasę/biogaz i paliwa konwencjonalne. Dla zachowania pełnej przejrzystości i jednoznaczności metodologii rozliczeniowej energii odnawialnej układy przygotowania i podawania paliwa są wówczas fizycznie niezależne (rozdzielone) [6].



Rys. 1.1. Uproszczony schemat jednostki realizującej współspalanie bezpośrednie [6]



Rys. 1.2. Uproszczony schemat jednostki kotła a) nadbudowanego przedpaleniskiem PP, b) nadbudowanego gazogeneratorem RG [6]



Rys. 1.3. Uproszczony schemat spalania w układzie hybrydowym [6]

Współspalanie bezpośrednie (rys.1.1) należy do najpopularniejszych metod procesu współspalania węgla i biomasy w Polsce [6].

Wykorzystanie wszelkiego rodzaju biomasy do celów energetycznych często wymaga większego nakładu pracy niż w przypadku węgla, którego odpowiednie sortymenty są dostarczane na zamówienie. Biomasa najpierw trzeba pozyskać poprzez ścinanie, zbieranie czy zakup, następnie rozdrobnić i posegregować. Początki „wprowadzania w życie” procesu współspalania w krajowych jednostkach energetycznych wiązały się ze znaczącymi utrudnieniami związanymi z zapewnieniem odpowiedniej ilości biomasy do kotła, jej magazynowaniem tj.: składowaniem w pomieszczeniach lub pod zadaszeniem w celu podsuszenia do zawartości poniżej 25%, jak również problemem związanym z samym procesem spalania dwóch różniących się od siebie, pod kątem pewnych własności fizyko-chemicznych i składu pierwiastkowego, paliw [7]. Biomasa jako paliwo energetyczne obecnie jest spalana w różnej formie, a mianowicie w postaci: krótkich i długich kawałków (zrębki, gałęzie), wiązek (chrust), odpadów (ścinki), plastrów, trocin, granulek, brykietów i kory. Jednak najwygodniejszą do spalania formą biomasy w kotłach energetycznych są zrębki oraz rozdrobniona biomasa (trociny lub wióry), najlepiej scalone w postaci peletów lub brykietów.

Własności fizykochemiczne biomasy powodują, że jest ona paliwem trudnym technologicznie, znacznie różniącym się od węgla spalanego w kotłach energetycznych. Jest ona słabo rozdrabialna i ma włóknistą postać. Podczas współspalania powinna zostać zmielona do rozmiarów zapewniających podobną do węgla charakterystykę spalania i całkowite wypalenie. Biomasa o mniejszych rozmiarach i wyższej reaktywności jest bardziej odpowiednia do spalania w dużych kotłach na pył węglowy, natomiast ta o większych rozmiarach, a

więc niższej reaktywności, w kotłach fluidalnych lub rusztowych. W przypadku spalania drewna typowym problemem jest wynoszenie niedopalonych cząstek, wynikające z ich niskiej gęstości i wysokiego współczynnika oporu, z omijaniem stref wysokich temperatur [8].

Podstawowe różnice między węglem i biomasą:

- niska wartość opałowa w przeliczeniu na jednostkę objętości – konieczność operowania kilkakrotnie większymi objętościowo ilościami biomasy w celu dostarczenia do procesu takiej samej ilości energii, jak z węgla,
- zbyt mała gęstość biomasy, utrudniająca transport, magazynowanie i dozowanie do paleniska oraz niekorzystnie wpływająca na przebieg procesu spalania,
- wysoka zawartość wilgoci w surowej biomacie (45÷60%), która wpływa negatywnie na efektywność procesu spalania,
- skład chemiczny i jego duża niejednorodność - obecność w biomacie pierwiastków takich jak: tlen, azot, chlor, prowadzi do emitowania w procesie spalania chlorowodoru, dioksyn i furanów; niewielka zawartość azotu, siarki i chloru w biomacie stwarza ryzyko występowania korozji urządzeń,
- wysoka zawartość części lotnych (2,5-krotnie wyższa niż w węglu kamiennym czy brunatnym) powoduje szybki i trudny do kontroli przebieg procesu spalania,
- zawartość popiołu w energetycznie przydatnej słomie jest podobnego rzędu jak dla węgla kamiennego, natomiast dla roślin energetycznych mieści się w zakresie 2÷6%, a jedynie dla odpadów drzewnych jest niska i wynosi ok. 2%,
- głównymi składnikami popiołu z węgla kamiennego są: SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 , natomiast dla biomasy, oprócz dużej ilości K_2O i SiO_2 , stwierdza się duże ilości CaO ,
- większość rodzajów biopaliw wykazuje stosunkowo niskie temperatury mięknięcia i topnienia popiołu w porównaniu z węglem, głównie z powodu dużej zawartości związków metali alkalicznych [8].

Większość tych problemów została już rozwiązana poprzez zwiększanie gęstości biomasy na drodze kompaktowania (balotowania – słoma, brykietowania, peletowania czy granulacji), stosowanie odpowiednich konstrukcji urządzeń kotłowych oraz współspalanie z węglem. Jednak koniecznym warunkiem efektywnej realizacji procesu współspalania w kotłach energetycznych jest zachowanie optymalnego dla danego rodzaju biomasy i urządzenia kotłowego objętościowego udziału biomasy w mieszance paliwowej. Niezwykle istotna jest jednorodność biomasy, tzn. niewielki zakres wahań podstawowych parametrów biomasy, umożliwiający określenie i uzyskanie optymalnych warunków, w jakich powinien odbywać się proces współspalania [6]. Przekroczenie tego udziału wiąże się z modyfikacją procesu spalania w danym urządzeniu, co zdecydowanie zwiększa koszty produkcji energii elektrycznej.

W Polsce współspalanie węgla z biomasą swój dynamiczny rozwój zawdzięcza wsparciu państwa w postaci świadectw pochodzenia dla biomasy. Jednak, zgodnie z projektem nowej ustawy o OZE pomoc finansowa dla współspalania ma zostać ograniczona. Wprowadzone do ustawy poprawki mają się przyczynić do ograniczenia importu biomasy i bardziej efektywnego wykorzystania rodzimego surowca.

Poprzez zmianę struktury surowcowej produkcji energii w kierunku ograniczania paliw kopalnych (węgla) i częściowego zastępowania go odnawialnymi nośnikami energii (biomasą), przewiduje się uzyskanie w skali globalnej znaczących efektów ekologicznych, szczególnie z uwagi na zamknięty obieg węgla pierwiastkowego w przyrodzie (zerowa emisja CO_2). Współspalanie węgla z biomasą jako sposób zwiększania produkcji energii elektrycznej z paliw odnawialnych było i jest przedmiotem badań i analiz prowadzonych w elektrowniach, elektrociepłowniach oraz wielu ośrodkach naukowo-badawczych [6,9-11]. Na podstawie prowadzonych dotychczas badań eksperymentalnych [12] stwierdzono, że dodatek biomasy do węgla zdecydowanie zmienia kinetykę i mechanizm spalania.

Zastępowanie węgla biomasą jako paliwem, z akceptowalną ekonomicznie i ekologicznie sprawnością energetyczną, jest jednak bardzo korzystne. Pod względem energetycznym 2 tony biomasy równoważone są 1 tonie węgla kamiennego. Najbardziej odczuwalnym negatywnym efektem spalania węgla jest emisja pyłów oraz zanieczyszczeń organicznych, w tym wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA), zaliczanych do grupy trwałych związków organicznych (TZO) oraz lotnych związków organicznych (VOCs) [13-15].

Ponadto, powstająca podczas spalania węgla emisja związków siarki, powoduje występowanie zjawiska kwaśnych deszczów. Jednak największym globalnym problemem ekologicznym jest nadmierna emisja CO₂, związku odpowiedzialnego za występowanie efektu cieplarnianego. W procesie spalania biomasy bilans emisji CO₂ jest zerowy, ponieważ tyle się go emituje do atmosfery, ile rośliny pobierają w procesie fotosyntezy. W przypadku wieloletnich roślin energetycznych (np. wierzby *Salix Virmiculis*), ilość pochłanianego CO₂ może przewyższać ilość emitowanego. Ze względu na znikomą ilość siarki w biomacie, zastępowanie nią węgla wpływa korzystnie na obniżenie emisji tlenków siarki, znacznie redukując problem odsiarczania spalin.

Dodatek biomasy do węgla, oprócz ograniczenia emisji CO₂, powoduje efekt synergizmu w odniesieniu do emisji CO, zanieczyszczeń organicznych (TOC), w tym WWA oraz lotnych związków organicznych (VOCs), [15,16]. Ponadto, przy spalaniu mieszanek paliwowych obserwuje się zmniejszenie ilości SO₂ i NO_x w spalinach oraz zmniejszoną ilość części palnych w popiele (żuźlu). Efekty te zaobserwowano nie tylko w przypadku rusztowych palenisk węglowych małej mocy [17], ale także w przemysłowych kotłach rusztowych [15] i fluidalnych [18].

Badania potwierdzają, że udziały SO₂ i NO_x w spalinach maleją proporcjonalnie do udziału biomasy w strumieniu podawanego do kotła paliwa [19]. Współspalanie biomasy z węglem może zwiększyć lub zmniejszyć zawartość części palnych w popiele lotnym, zależnie od rodzaju biomasy, jej rozdrobnienia i warunków spalania [20].

Do chwili obecnej wykonano wiele badań współspalania biomasy z węglem w kotłach energetycznych, które pokazały zalety i wady tego sposobu jej wykorzystania. Stwierdzono, że najlepiej do współspalania biomasy z węglem nadają się kotły z paleniskami fluidalnymi, które mogą być również całkowicie opalane biomasą. Do najważniejszych zalet tych palenisk należą: duża pojemność warstwy fluidalnej zapewniająca stabilne spalanie, możliwość spalania zawilgoconego paliwa (do 60% wody), mała emisja NO_x (90÷119 g/GJ), znaczne obciążenie cieplne paleniska fluidalnego oraz brak części ruchomych.

Emisja gazowych i stałych produktów spalania paliw kopalnych, wykorzystywanych powszechnie w produkcji energii elektrycznej i ciepła na świecie, stanowi nieustanne zagrożenie dla środowiska naturalnego. W znacznej mierze wynika to z ograniczonej zdolności przyjmowania przez środowisko naturalne powstałych w trakcie procesu spalania zanieczyszczeń m.in.: tlenków siarki, azotu i węgla oraz pyłów, popiołów i żużli [21,22].

Zanieczyszczenia spowodowane emisją cząstek stałych do powietrza to istotny problem spalania biomasy. Oprócz popiołu lotnego emitowane są cząstki karbonizatu. Analiza rozmiarów i składu emitowanych cząstek wskazała, że w zależności od rodzaju biomasy ich wielkość mieści się w zakresie 0,7÷1,4 mm i zawiera 70÷90% części palnych [23]. Najważniejszą przyczyną znacznej emisji cząstek karbonizatu są niewłaściwe warunki spalania biomasy, a przede wszystkim zbyt krótki czas przebywania w palenisku, wynikający z niekorzystnej kombinacji rozmiarów paleniska i prędkości przepływu spalin (wynoszenie cząstek). Emisję cząstek stałych można jednak zmniejszyć odpowiednią organizacją dopływu powietrza w palenisku zapobiegającą wywiewaniu tych cząstek.

Podczas spalania biomasy, z palenisk emitowany jest tlenek węgla, w zakresie 15÷1700 g/GJ, ale w niekorzystnych warunkach spalania jego udział w spalinach może osiągnąć kilkadziesiąt tysięcy miligramów na metr sześcienny [24]. Duża emisja CO spowodowana jest zwykle niekompletnym spalaniem i wynika z jego złej organizacji. Ponadto, zbyt szybkie wychodzenie płomienia często powoduje duży wzrost emisji kancerogennych WWA [25]. W celu odpowiedniego wypalenia powinno dobierać się właściwy współczynnik nadmiaru powietrza dla poszczególnych palenisk. Emitowane podczas spalania biomasy tlenki azotu stanowią w 90% NO i tylko 10% NO₂ [21]. Procesowi spalania biomasy zawierającej stosunkowo niewiele związanego azotu N_F przy temperaturze spalania, rzadko przekraczającej 1600°C, powinna towarzyszyć niewielka emisja NO_x. Tymczasem dane pomiarowe, pochodzące z różnych źródeł wykazują duże zróżnicowanie udziału NO_x w spalinach (170÷920 mg/m³), zależnie od rodzaju biomasy i zastosowanego paleniska [26]. Prawdopodobnym wytłumaczeniem tak dużej emisji NO_x, jest wysoki stopień konwersji związków azotowych w biomacie N_F do NO_x spowodowany mniejszym uwęgleniem biomasy i małym udziałem CaO, które odgrywają ważną rolę w redukcji NO do N₂. Skuteczną techniką ograniczenia emisji NO_x wytwarzanych podczas spalania biomasy jest odpowiednie stopniowanie powietrza w palenisku, które pozwala zredukować emisję NO_x do 50g/ GJ, a także umożliwia ograniczenie CO [23,24].

Oprócz omówionych efektów ekologicznych w postaci zmniejszenia emisji substancji szkodliwych dla środowiska, w tym SO₂, NO_x i zanieczyszczeń organicznych, a także redukcji emisji CO₂, nie do pominięcia są również inne, rzadziej wspomniane w literaturze przedmiotu, efekty ekologiczne, mające jednak niebagatelne

znaczenie dla środowiska naturalnego. Efekty te polegają na możliwości ograniczenia postępującej degradacji środowiska w wyniku wydobywania paliw kopalnych i deponowania w środowisku odpadów z przemysłu wydobywczego oraz ograniczenia procesów erozji gleby, redukcji gospodarki wodnej i asymilacji zanieczyszczeń powietrza w wyniku prowadzenia upraw energetycznych biomasy.

Współczesne krajowe kotły energetyczne z paleniskami pyłowymi lub fluidalnymi zużywają od 200 do 600 ton węgla na godzinę. Całkowite zastąpienie węgla biomasą w tego typu paleniskach nie jest więc możliwe z uwagi głównie na trudności z dostawą biomasy oraz jej magazynowaniem, jednakże współspalanie biomasy z węglem powoduje, że nawet niewielki jej udział w produkcji energii elektrycznej oznacza znaczne wykorzystanie jej energetycznego potencjału [27].

Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie oddziaływania udziału i rodzaju biomasy (w tym zawartości pierwiastka węgla) w zbrykietowanych mieszankach węgla kamiennego z biomasą oraz węgla brunatnego z biomasą na maksymalne wartości emisji NO_x i SO_2 podczas procesu ich spalania. Umożliwia to oszacowanie takiej zawartości biomasy w mieszance paliwowej, która zoptymalizuje emisję wspomnianych zanieczyszczeń do atmosfery, przy efektywnym współspalaniu z węglem kamiennym i brunatnym.

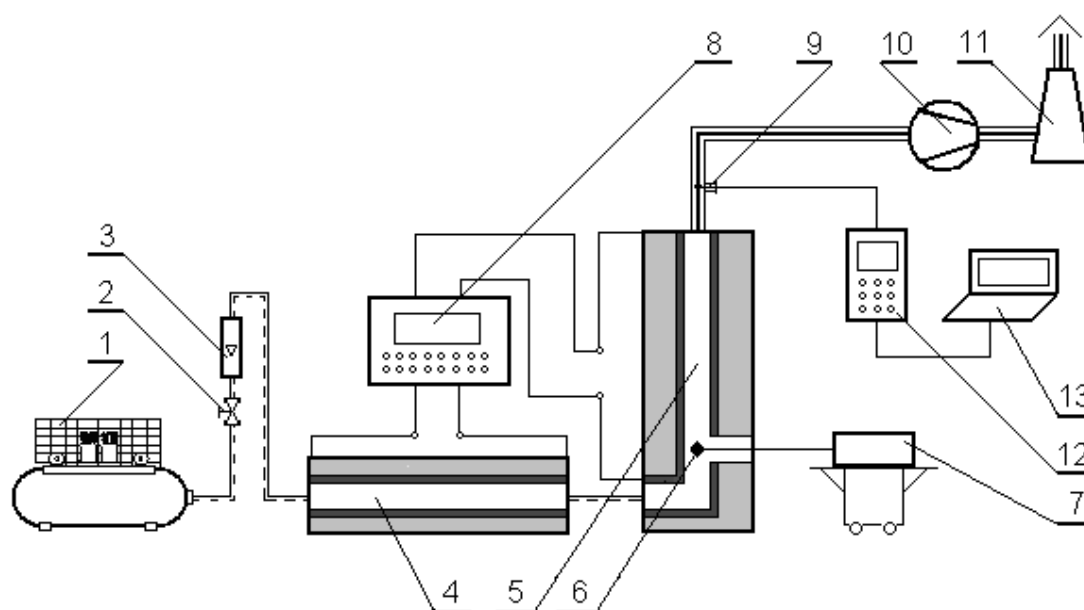
2. Badania eksperymentalne i metodyka pomiarów

2.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys. 1), umożliwiło spalanie zbrykietowanego paliwa (sporządzonego z mieszaniny pyłów węgla: kamiennego i biomasy oraz brunatnego i biomasy) w strumieniu powietrza, w temperaturze 850°C . Zbudowane ono zostało z dwóch bloków (4) i (5) wykonanych z materiału ceramicznego. Powietrze ze sprężarki (1) przepływając poprzez zawór regulacyjny (2), przepływomierz pływakowy (3) oraz nagrzewnicę (4) trafiało do komory spalania. Nagrzewnicę stanowi element grzejny, który tworzą trzy spirale (umiejscowione w sześciu rurkach kwarcowych). Komora spalania to rura kwarcowa umieszczona pionowo w bloku (5), w którym wykonano wejście pomiarowe dla próbki paliwa (6) oraz wziernik, umożliwiający bezpośrednią wizualną obserwację procesu spalania paliwa. Bloki ceramiczne zostały osłonięte blachą ze stali nierdzewnej. Do regulacji temperatury wewnątrz komory spalania zastosowano mikroprocesorowy regulator temperatury (8), który sterował pracą trójfazowego sterownika mocy zasilającego główne elementy grzejne. Jako czujnik temperatury w miejscu dokonywania pomiaru przebiegu procesu spalania paliwa zamontowano termoelement NiCr-NiAl. Pomiar gazów emitowanych w trakcie spalania paliw mierzono sondą analizatora spalin (9). Spaliny poprzez wentylator wyciągowy (10) trafiały do komina (11).

Badania polegały na rejestracji emisji spalin powstałych w trakcie procesu spalania próbki zbrykietowanego paliwa, zamocowanej na wysięgniku układu regulacji położenia próbki (7), przy pomocy analizatora spalin Ecoline 4000 (12) [29,30].

Analizator spalin Ecoline 4000 firmy EUROTRON jest wielogazowym i wielofunkcyjnym przyrządem, opartym na mikroprocesorze, zawierającym analizator spalin, monitor emisji oraz wskaźnik parametrów otoczenia. Dwa wewnętrzne czujniki elektrochemiczne pozwalają na prowadzenie ciągłej rejestracji zmian stężenia gazów, tj. O_2 i CO . Czujniki te pod wpływem działania tlenu lub tlenku węgla pobieranego z punktu pomiarowego oraz płynu zawartego wewnątrz czujnika tworzą energię uzależnioną od wartości mierzonego gazu. Temperatury gazu i powietrza używane zostały w połączeniu z analizatorem spalin do obliczania wydajności, nadmiaru powietrza i stężenia CO_2 . Dwa kolejne wewnętrzne czujniki elektrochemiczne umożliwiły pomiar zanieczyszczeń, tj. NO oraz SO_2 . W analizatorze Ecoline 4000 dokonane zostały przeliczenia stężenia NO na stężenie NO_x . Pomiarów parametrów środowiska uzyskane zostały przy pomocy czujników zewnętrznych: czujnika wilgotności względnej i temperatury ($\text{RH}\%+\text{T}$) oraz czujnika atmosferycznego CO . Analizator gazów Ecoline dodatkowo wyposażony został w interfejs szeregowy RS232 z oprogramowaniem konfiguracyjnym umożliwiającym dokonywanie wszelkich ustawień oraz transmisję danych do dalszego opracowania pomiarów z poziomu rejestratora danych [31]. W celu zapisu i obserwacji wyników badań analizator spalin podłączono do rejestratora danych pomiarowych (13).



Rys. 2.1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – sprężarka, 2 – zawór regulacyjny, 3 – przepływomierz pływakowy, 4 – blok ceramiczny z nagrzewnicą powietrza, 5 – blok ceramiczny z komorą spalania, 6 – próbka paliwa, 7 – układ regulacji położenia próbki, 8 – mikroprocesorowy regulator temperatury, 9 – miejsce wprowadzenia sondy analizatora, 10 – wentylator spalin, 11 – komin, 12 – analizator spalin, 13 – rejestrator danych pomiarowych [28].

2.2. Metodyka badań

Do badań wykorzystano zbrykietowane próbki o masie 1 g, utworzone z mieszaniny pyłów z węgla: kamiennego typu 32.1, pochodzącego z KWK „Staszic”, brunatnego pochodzącego z KWB „Bełchatów” oraz odpowiednio: śruty zbożowej, słomy, wierzby energetycznej, sosny i brzozy (o uziarnieniu poniżej 0,1 mm), w przyjętych (zgodnie z planem badań) proporcjach. Analizę techniczną i elementarną zastosowanych do badań paliw (w stanie analitycznym) przedstawiono w tabelicy 2.1.

Do badań wykorzystano rotacyjno-uniformalny plan PS/DS-P: λ (λ) [32], który dzięki równoczesnej zmianie przyjętych parametrów procesu umożliwił uchwycenie interakcji między nimi. Jako wielkości wejściowe przyjęto: udział biomasy oraz uwęglenia paliwa w zbrykietowanej mieszance paliwowej (wyliczonej na podstawie rodzaju badanej biomasy). Parametrem różnicującym biomasy była bowiem, m.in. zawartość w nich pierwiastka węgla. Wartości wielkości wejściowych (zgodnie z planem rotacyjno-uniformalnym) przedstawiono w tabelicach 2.2 i 2.3, a program badań w tabelicach 2.4 oraz 2.5. Każdy pomiar współspalania zbrykietowanych próbek paliwa w poszczególnych układach planu powtórzono trzykrotnie.

Tablica 2.1. Analiza techniczna i elementarna paliw (stan analityczny)*

		Paliwo						
		Węgiel kamienny typ 32.1 KWK Staszic	Węgiel brunatny KWB Bełchatów	Śruta zbożowa	Słoma	Wierzba	Sosna	Brzoza
Analiza techniczna								
Zawartość wilgoci, %	W ^a	2,64	14,02	8,45	6,71	7,42	7,34	4,8
Zawartość części lotnych, %	V ^a	30,88	37,11	70,53	70,38	69,65	74,60	80,83
Zawartość popiołu, %	A ^a	2,34	18,34	4,55	4,20	2,23	2,64	0,67
Wartość opałowa, kJ/kg	Q ^a	31198	16165	15825	16684	16828	16925	17859
Analiza elementarna								
Zawartość siarki całkowitej, %	S ^a	0,31	1,04	0,18	0,10	0,06	0,44	0,39
Zawartość pierwiastka węgla, %	C ^a	79,39	43,16	40,90	42,54	44,65	47,78	49,63
Zawartość pierwiastka wodoru, %	H ^a	4,33	3,08	6,07	6,89	6,12	4,8	5,42
Zawartość pierwiastka azotu, %	N ^a	1,26	0,55	2,73	0,53	0,69	0,05	0,80
Zawartość pierwiastka tlenu, %	O ^a	9,73	19,81	37,12	39,03	38,83	36,95	38,29

*Pomiary wykonane zgodnie ze zleceniem firmy zewnętrznej

Tablica 2.2. Wartości wielkości wejściowych (mieszanina węgla kamiennego i biomasy) [33]

x_k	$x_{k \min} \div x_{k \max}$	\hat{x}_k				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
x_1	0,5 ÷ 25	0,5	4	12,5	21	25
x_2	70,7 ÷ 79,4	70,7	72,8	75,1	77,9	79,4

Tablica 2.3. Wartości wielkości wejściowych (mieszanina węgla brunatnego i biomasy) [33]

x_k	$x_{k \min} \div x_{k \max}$	\hat{x}_k				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
x_1	0,5 ÷ 25	0,5	4	12,5	21	25
x_2	42,9 ÷ 44,0	42,9	43,2	43,4	43,6	44,0

 x_1 – udział biomasy w paliwie, % x_2 – uwęglenie paliwa, % $\alpha = 1,4$

$$\hat{x}_k = \frac{2 \cdot \alpha \cdot (x_k - \bar{x}_k)}{x_{k \max} - x_{k \min}} \quad (2.1)$$

Tablica 2.4. Rotalno-uniformalny program badań współspalania zbrykietowanego paliwa (mieszanka węgla kamiennego i biomasy) [33]

u	x_k	
	x_1	x_2
1	4	77,9
2	21	71,7
3	4	78,1
4	21	72,8
5	0,5	79,4
6	25	70,7
7	12,5	74,6
8	12,5	75,7
9	12,5	75,1
10	12,5	75,1
11	12,5	75,1
12	12,5	75,1
13	12,5	75,1

u - numer pomiaru

Tablica 2.5. Rotalno-uniformalny program badań współspalania zbrykietowanego paliwa (mieszanka węgla brunatnego i biomasy) [33]

u	x_k	
	x_1	x_2
1	4	43,1
2	21	43,0
3	4	43,3
4	21	44,0
5	0,5	43,2
6	25	43,6
7	12,5	42,9
8	12,5	44,0
9	12,5	43,4
10	12,5	43,4
11	12,5	43,4
12	12,5	43,4
13	12,5	43,4

3. Wyniki badań eksperymentalnych

Istotnym elementem pracy badawczej było określenie oddziaływania udziału biomasy oraz stopnia uwęglenia paliwa zbrykietowanego na maksymalną wartość emisji NO_x i SO_2 .

Analizę statystyczną uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono zgodnie z [32]. Biorąc pod uwagę różne wielomianowe postacie funkcji regresji, ich niedokładność oraz adekwatność do wyników pomiarów

stwierdzono, że najbardziej reprezentatywną funkcją aproksymującą uzyskane wyniki badań jest wielomian drugiego stopnia z interakcjami pierwszego rzędu (3.1).

$$\tilde{z} = b_{00} + b_{01} \cdot \hat{x}_1 + b_{02} \cdot \hat{x}_2 + b_{11} \cdot \hat{x}_1^2 + b_{22} \cdot \hat{x}_2^2 + b_{12} \cdot \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_2 \quad (3.1)$$

gdzie:

\tilde{z} - aproksymowana wartość maksymalnej wartości emisji NO_x i SO₂, obliczona z funkcji obiektu badań dla danego pomiaru,

b - wartości współczynników wielomianu aproksymującego (tablice 3.1 i 3.2).

Z równania regresji (3.1.), z wykorzystaniem obliczonych współczynników (tablice 3.1 oraz 3.2) wyznaczono maksymalne wartości emisji NO_x oraz SO₂ powstałe podczas procesu współspalania zbrzyktowanych mieszanek paliwowych, w przyjętych warunkach eksperymentu (rys. 3.1÷3.4).

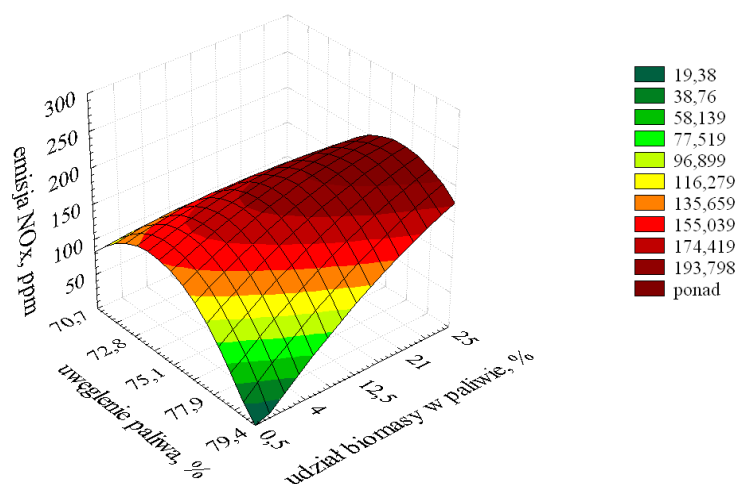
Rysunki 3.1 oraz 3.2 przedstawiają oddziaływanie uwęglenia paliwa oraz zawartości w nim biomasy na maksymalną emisję NO_x i SO₂ podczas procesu współspalania zbrzyktowanych mieszanek węgla kamiennego i biomasy. Zgodnie z rys. 3.1, w rozpatrywanych warunkach procesu spalania w strumieniu powietrza, wzrost zawartości biomasy w paliwie prowadzi do zwiększenia emisji NO_x. Tendencję tę zaobserwowano również w przedziale wyższych wartości uwęglenia paliwa (79,4÷75,1). Dopiero paliwa o zawartości pierwiastka węgla, poniżej 75% wykazują spadek emisji NO_x.

Tablica 3.1. Wartości współczynników regresji (mieszanina węgla kamiennego i biomasy) [33]

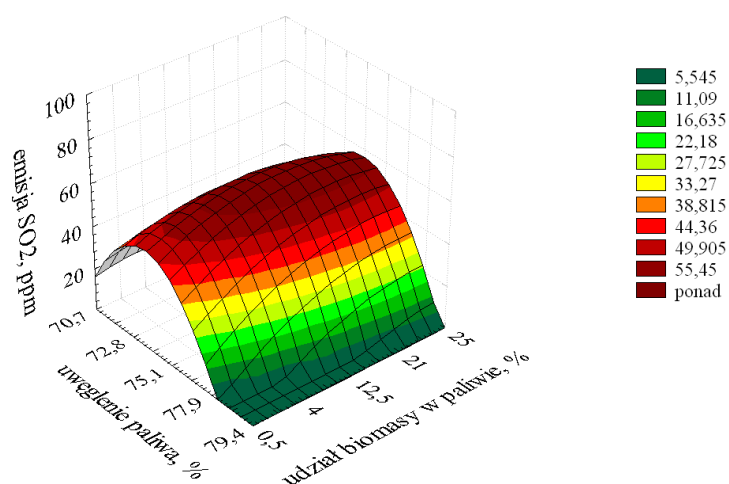
Współczynnik	Wartości współczynników regresji	
	w przypadku emisji NO _x	w przypadku emisji SO ₂
b_{00}	184,73	58,60
b_{01}	16,67	4,05
b_{02}	-6,85	10,13
b_{11}	-4,74	-2,51
b_{12}	-15,17	-4,42
b_{22}	-24,24	-15,59

Tablica 3.2. Wartości współczynników regresji (mieszanina węgla brunatnego i biomasy) [33]

Współczynnik	Wartości współczynników regresji	
	w przypadku emisji NO _x	w przypadku emisji SO ₂
b_{00}	76,73	122,53
b_{01}	23,32	1,21
b_{02}	-9,98	2,41
b_{11}	18,19	18,9
b_{12}	9,08	0
b_{22}	-11,30	-15,43



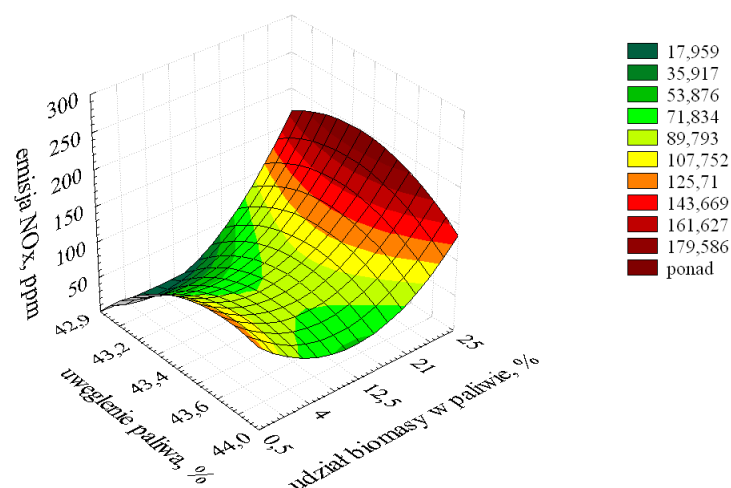
Rys. 3.1. Oddziaływanie uwęglenia paliwa oraz zawartości w nim biomasy na maksymalną emisję NO_x podczas procesu współspalania zbrykietowanych mieszanek węgla kamiennego i biomasy [33]



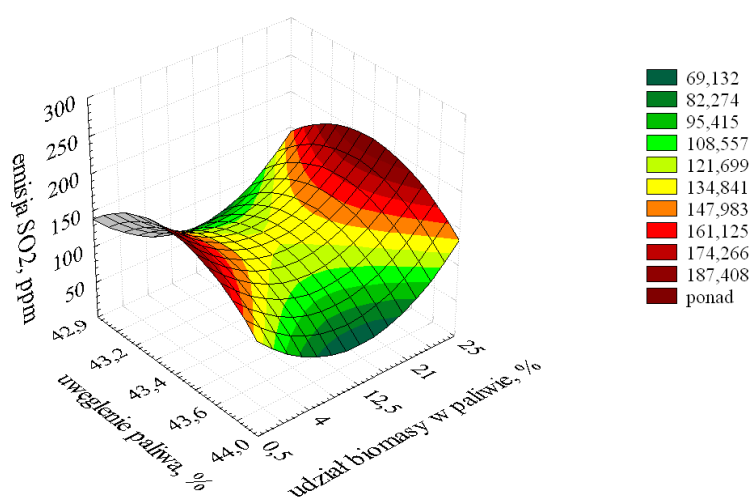
Rys. 3.2. Oddziaływanie uwęglenia paliwa oraz zawartości w nim biomasy na maksymalną emisję SO_2 podczas procesu współspalania zbrykietowanych mieszanek węgla kamiennego i biomasy [33]

Z rysunku 3.2. wynika, iż udział biomasy w zbrykietowanej mieszance paliwowej nie wpływa znacząco na zmianę maksymalnej emisji SO_2 podczas spalania paliwa w strumieniu powietrza. Obniżenie zawartości pierwiastka węgla w paliwie do 75% prowadzi do wzrostu emisji SO_2 , lecz poniżej 75% udziału „C” w brykiecie zaobserwowano spadkową tendencję emisyjności tego związku.

Na rysunkach 3.3 oraz 3.4 zaprezentowano oddziaływanie uwęglenia paliwa oraz zawartości w nim biomasy na maksymalną emisję NO_x i SO_2 podczas procesu współspalania zbrykietowanych mieszanek węgla brunatnego i biomasy. Zgodnie z rys.3.3 można stwierdzić spadek emisji NO_x podczas współspalania mieszanek paliwowych w strumieniu powietrza, wraz z obniżaniem zawartości pierwiastka węgla w paliwie, poniżej 43,4%. Ogólnie, wzrost zawartości biomasy w paliwie prowadzi do zwiększenia emisji NO_x .



Rys. 3.3. Oddziaływanie uwęglenia paliwa oraz zawartości w nim biomasy na maksymalną emisję NO_x podczas procesu współspalania zbrykietowanych mieszanek węgla brunatnego i biomasy [33]



Rys. 3.4. Oddziaływanie uwęglenia paliwa oraz zawartości w nim biomasy na maksymalną emisję SO_2 podczas procesu współspalania zbrykietowanych mieszanek węgla brunatnego i biomasy [33]

Na podstawie rys. 3.4 można stwierdzić, iż obniżenie zawartości pierwiastka węgla w zbrykietowanej mieszance paliwowej poniżej 43,4% prowadzi do zmniejszenia emisji SO_2 podczas współspalania w strumieniu powietrza. Tendencji tej sprzyja również nieznaczny udział biomasy w paliwie, w zakresie 0,5 ÷ 12,5%.

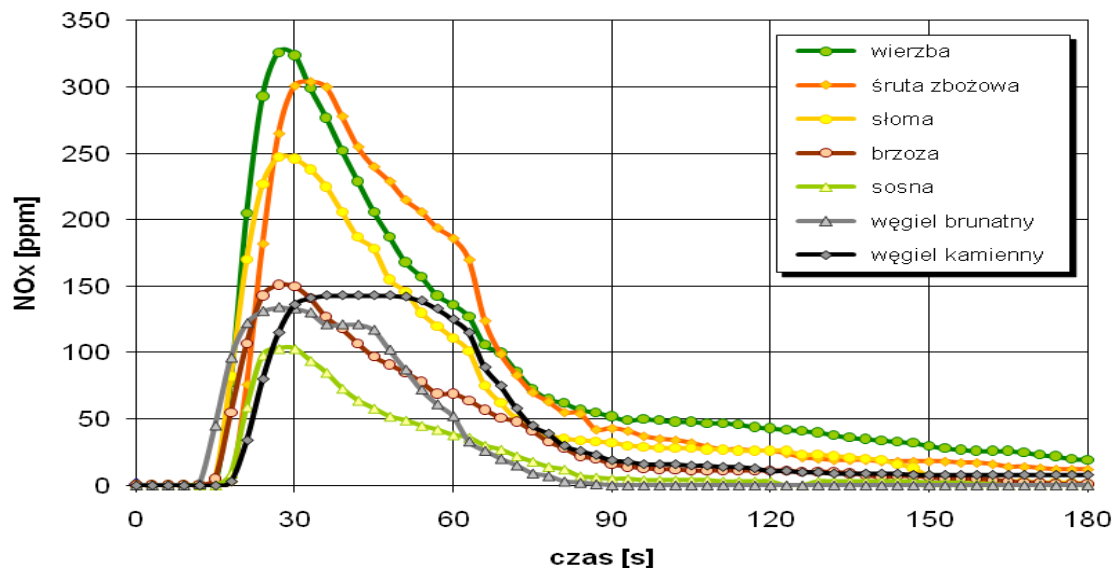
Podsumowując można stwierdzić, iż wzrost udziału biomasy w mieszance paliwowej – węgiel brunatny i biomasa (do 12,5%) prowadzi do ograniczenia zarówno emisji NO_x , jak i SO_2 , w całym przedziale zawartości pierwiastka węgla w paliwie.

Kolejnym etapem badań było porównanie przebiegu zmian emisji NO_x i SO_2 podczas procesu spalania w temperaturze 850°C brykietów wykonanych wyłącznie z węgla kamiennego, węgla brunatnego oraz każdego z rozpatrywanych rodzajów biomasy (rys. 3.5 i 3.6).

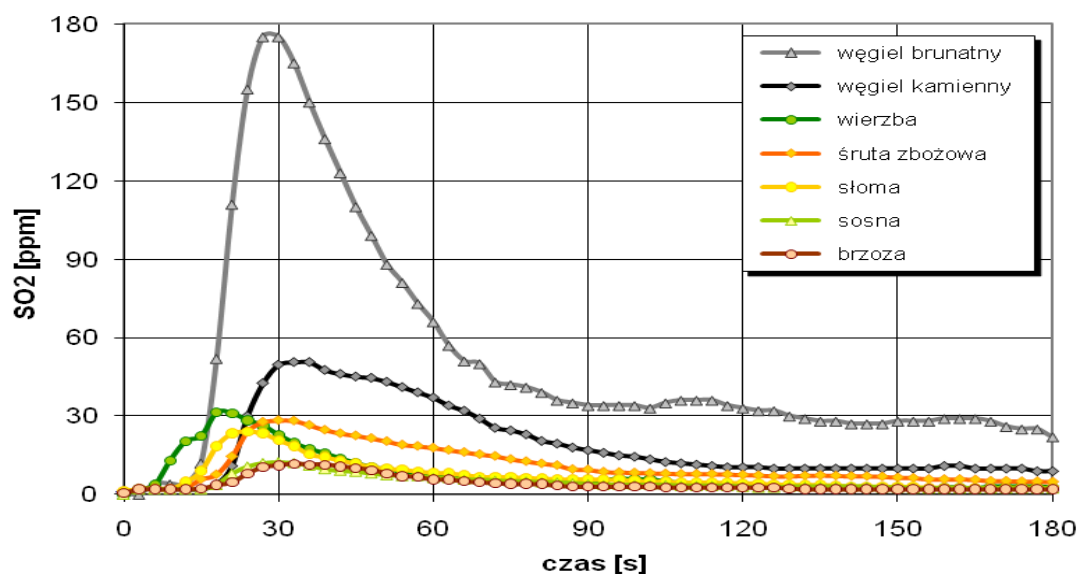
Zgodnie z rys. 3.5, zbrykietowane czyste paliwa z większą zawartością pierwiastka węgla wykazują niższe emisje NO_x , podczas spalania w danych warunkach eksperymentu.

Na rysunku 3.6. widać natomiast, że spalanie czystego węgla, szczególnie węgla brunatnego uwalnia najwyższe emisje SO_2 w porównaniu do wszystkich rozpatrywanych rodzajów biomasy.

Wysoka emisja SO_2 podczas spalania węgla brunatnego, w odniesieniu do węgla kamiennego, wynika z dużej zawartości pierwiastka siarki w tym paliwie.



Rys. 3.5. Przebieg zmian emisji NO_x podczas procesu spalania paliw [33]



Rys. 3.6. Przebieg zmian emisji SO_2 podczas procesu spalania paliw [33]

4. Wnioski

Analiza zmian maksymalnych emisji NO_x i SO_2 podczas współspalania zbrykietowanych mieszanek paliwowych węgla i biomasy w strumieniu powietrza doprowadziła do następujących wniosków:

- ✓ Spadek emisji NO_x podczas spalania brykietów wykonanych z węgla kamiennego i biomasy zaobserwowano dla uwęglenia paliwa poniżej 75%. Tendencji tej sprzyja również obniżenie zawartości biomasy w paliwie.
- ✓ Mieszanki paliwowe węgla kamiennego i biomasy, o uwęgleniu poniżej 75%, wykazują spadek emisji SO_2 w procesie spalania.
- ✓ W przypadku mieszanin paliwowych węgla brunatnego i biomasy, należy podkreślić obniżanie emisji NO_x w procesie spalania, wyłącznie przy zwiększaniu udziału biomasy w paliwie, do 12,5%, w całym zakresie uwęglenia paliwa. Tendencję taką stwierdzono przy analizie emisyjności SO_2 .
- ✓ Spadek emisji NO_x i SO_2 zaobserwowano ponadto obniżając uwęglenie brykietu wykonanego z węgla brunatnego i biomasy, poniżej 43,4%.

Ponadto stwierdzono, iż:

- ✓ Brykiety wykonane z czystych paliw charakteryzujące się większym uwęgleniem paliwa wykazują podczas spalania niższe emisje NO_x .
- ✓ Spalanie zbrykietowanych próbek czystych węgli, szczególnie węgla brunatnego, uwalnia najwyższe emisje SO_2 w porównaniu do wszystkich rozpatrywanych rodzajów biomasy.

Literatura

1. Środa K., Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H.: Metody utylizacji osadów ściekowych. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, vol. 15, nr 2, s. 33-50, 2013.
2. Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H., Środa K.: Properties and production of sewage sludge in Poland with reference to the methods of neutralizing. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, vol.14, pp.59-78, 2012.
3. Ustawa z dn. 10 kwietnia 1997 r. "Prawo energetyczne". *Dz.U.* z 2006 r., Nr 89. poz. 625 z późniejszymi zmianami.
4. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 14 sierpnia 2008 r. 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 potwierdzenia danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii. *Dz. U.* z 2008 r., Nr 156, poz. 969.
5. Chomiak J.: *Podstawowe problem spalania*. PWN, Warszawa 1977.
6. Ściążko M. Zuwała J. Pronobis M.(red.): *Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce*. Zabrze-Gliwice 2007, Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Politechniki Śląskiej.
7. Tymiński J.: *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2030 r.*, IBMiER, Warszawa 1997.
8. Golec T.: *Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych*. *Energetyka* 2004, s.7-8.
9. Kobylecki R., Bis Z.: Analiza możliwości współspalania paliw alternatywnych w kotłach fluidalnych. IX Konferencja Kotłowa nt. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów, Gliwice 2002, *Prace naukowe Politechniki Śląskiej*, z. 10, t. 2, s. 85-107.
10. Kruczek S., Głąbik R., Mierzyński J.: Technologiczne aspekty zastosowania paliw biomasowych w technice kotłowej. IX Konferencja Kotłowa nt. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów, Gliwice 2002, *Prace naukowe Politechniki Śląskiej*, z. 10, t. 2, s. 201-217.
11. Wilk R., Sarnowski T.: *Współspalanie węgla z biomasą w ujęciu technologii spalania*. *Archiwum Spalania*, vol. 9, 2009, nr. 3-4, s. 197-211.

12. Kijo-Kleczkowska A., Gajewski W.: Analysis of Coal-Biomass Mixtures Combustion. *Archiwum Combustionis*, vol. 28, 2008, no. 3-4, s. 215-230.
13. Kubica K.: Termodynamiczne przemiany substancji organicznej węgla w procesie jego spalania w złożu stacjonarnym, *Karbo*, 9, t.45, 2000.
14. Kubica K., Williams A., Ross A.B., Andersson J., Danihelka P.: Emission of Pollutants from Biomass and Coal Combustion in Low Power Output Heating Applicances, 7-th Polish – Danish Workshop on “BIOMASS FOR ENERGY”, Poland, December 7-10, 2000.
15. Jones J.M., Poukashanian M., Ross A.B., Danos L., Bartle K.D., Williams A., Kubica K., Andersson J., Kerst M., Danihelka P.: The Combustion of Coal and Biomass in a Fixed bed Furnace, 5-th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Portugalia, 11-14 April 2000.
16. Kubica K., Raińczak J., Rzepa S., Ściążko M.: Influence of “biofuel” addition on emission of pollutants from fine coal combustion, *Proc. 4* Polish – Danish Workshop on Biofuels*, Starbniowo, Polska, 12-14 June 1997.
17. Kubica K., Raińczak J., Bastek P.: Badania nad efektywnym energetycznie i ekologicznie współpalaniem węgla i biomasy w kotle WR-10 w EPEC Elbląg, *Sprawozdanie IChPW nr 2910/02*.
18. Hughes E.E., Tillman D.A.: Biomass cofirin: status and prospects 1996, *Fuel Processing Technology*, vol. 54, pg. 127-142, 1998.
19. Roberts P.A., van de Kamp W.L.: Biomass/sewage sludge and other wastes i co-firing coal. Topic Oriented Technical Meeting, IFRF, 26-28.04.1997, Haarlem, Holandia 1997.
20. Spliethoff H., Hein K.R.G.: Effect of co-combustion on emissions in pulverized fuel furnaces. *Fuel processing Technology*, Vol. 54, 1998, 189-2005.
21. Domański R., Leszczyńska-Domańska M.: Źródła i przetwarzanie energii a zagrożenia ekologiczne w XXI wieku. XVIII Zjazd Termodynamików, Warszawa 2002, *Prace naukowe*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, t. 1, z. 22, t. 1, s. 287-306.
22. Lewandowski W. M.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Warszawa 2008, WNT.
23. Tillman D. A. et al., *Wood Combustion*, Academic Press, New York 1981.
24. Juszcak M.: *Ekologiczne spalanie odpadów drzewnych. Badania przemysłowe ograniczenia emisji tlenu węgla i tlenu azotu.*, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 2002.
25. Praca zbiorowa pod red. Ściążko M., Zieliński H.: *Termiczne przetwórstwo węgla i biomasy*, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze-Kraków 2003.
26. Werther J. et al., *Combustion of agricultural residues*, *Progress Energy Combust. Sci.*, Vol. 26, 2000.
27. Praca zbiorowa pod red. Kordylewskiego W.: *Spalanie i paliwa*. Wrocław 2005, Oficyna Wydawnicza Pol. Wrocławskiej.
28. Górecka-Zbrońska A.: Raport z BW-1-107-201/2009/P “Wykorzystanie biomasy przy współpalaniu z węglem”, Instytut Maszyn Ciepłych, Politechnika Częstochowska. 2010.
29. Górecka-Zbrońska A., Kijo-Kleczkowska A.: Analiza współpalania węgla z biomasą. *Laboratorium spalania paliw stałych*. Częstochowa 2009, Politechnika Częstochowska, s. 75-84.
30. Górecka-Zbrońska A., Kijo-Kleczkowska A.: Analiza spalin kotłowych. *Laboratorium spalania paliw stałych*. Częstochowa 2009, Politechnika Częstochowska, s. 113-126.
31. Instrukcja obsługi i konserwacji przenośnych analizatorów gazów kominowych Ecoline 4000, GreenLine 4000, UniGas 3000+ oraz BTU 3000+.
32. Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. Warszawa 1984, PWN.
33. Opracowanie własne.

