



Experimental studies of coal and biomass co-combustion, in the suspension form

Agnieszka *KIJO-KLECZKOWSKA*¹

¹ Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Ciepłych, al Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa
e-mail: kijo@imc.pcz.czest.pl

Abstract

Clean coal technologies are currently the biggest challenge for the Polish energy sector, allowing to reduce the negative effect of the combustion of fuels on the environment and energy security of the country.

Mining, forced to deliver power better fuel must use deep cleaning of coal. It results increase in waste sludge flotation. The best method of utilisation of these mules is burning them in the form of suspensions and co-combustion with other fuels.

This paper takes experimental studies of co-combustion mechanism of coal with biomass in the form of suspensions, carried in a stream of air.

Keywords: coal-water slurry; biomass; co-combustion of fuels; mechanism of fuels combustion

Streszczenie

Badania eksperymentalne współspalania węgla z biomasa, w postaci zawiesin.

Czyste technologie węglowe stanowią obecnie największe wyzwanie dla polskiej energetyki, umożliwiając ograniczenie negatywnego skutku spalania paliw na środowisko oraz poprawę bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Górnictwo, zmuszane dostarczać energetyce coraz lepsze paliwo, musi stosować głębsze wzbogacanie węgla. Powoduje to ciągle wzrost odpadów w postaci mułów poflotacyjnych. Najlepszą metodą utylizacji tych mułów jest ich spalanie w postaci zawiesin oraz współspalanie z innymi paliwami.

Niniejsza praca podejmuje badania eksperymentalne mechanizmu współspalania węgla z biomasa w postaci zawiesin, prowadzone w strumieniu powietrza.

Słowa kluczowe: zawiesinowe paliwa węglowo-wodne; biomasa; współspalanie paliw; mechanizm spalania paliw

1. Wprowadzenie

Polska energetyka bazuje aż w 95% na węglu. Powoduje to duże obciążenie środowiska, wywołane emisją NO_x, SO₂, CO₂ i pyłów, a także powiększeniem powierzchni koniecznych na składowanie narastających stałych odpadów paleniskowych. Bardzo istotne staje się zatem wdrażanie i rozwój technologii:

- wzbogacania węgla dla energetyki,
- spalania paliw ekologicznych,
- spalania paliw w warunkach warstwy fluidalnej,
- spalania paliw w warunkach nadkrytycznych,
- spalania paliw w tlenie,
- zgazowania paliw,
- upłynniania paliw,

- redukcji emisji zanieczyszczeń podczas spalania paliw.

Współczesne badania w dziedzinie spalania paliw węglowo-wodnych ukierunkowane są głównie na opracowanie technologii spalania zawiesin, przygotowanych głównie z mułów węglowych. Paliwo zawiesinowe stanowi ponadto doskonały zamiennik oleju opałowego. Ze względu na fakt wyczerpywania się paliw ciekłych istnieje bowiem konieczność poszukiwania zamienników paliw pochodzenia petrochemicznego.

Zainteresowanie zawiesinowymi paliwami węglowo-wodnymi (w-w) zostało wymuszone koniecznością rozwiązania problemu transportu hydraulicznego rozdrobnionego węgla w latach 30-tych. Koncentracja węgla w tych zawiesinach dochodziła do 40% i odznaczała się grubym uziarnieniem, co utrudniało bezpośrednie wykorzystanie ich w energetyce. Ponowny wzrost zainteresowania tą problematyką pojawił się w latach 70-tych i wywołany był ówczesnym kryzysem energetycznym. Podjęto szerokie prace badawcze nad wykorzystaniem paliw zawiesinowych jako zamiennika oleju opałowego. Prace prowadzone do chwili obecnej, zaowocowały szeregiem technologii, opisanych w bogatej literaturze z zakresu preparacji oraz stosowania zamienników paliw ciekłych. Badania dotyczyły głównie właściwości reologicznych, m.in. [1,2,3,4,5] i rozpylania suspensji w-w [3,6,7]. Duże osiągnięcia w dziedzinie badania paliw w-w uzyskano w byłym ZSRR, zwłaszcza w utylizacji zawiesin węglowych transportowanych rurociągami [8]. W literaturze można znaleźć materiały dotyczące produkcji i możliwości wykorzystania mułów węglowych [9,10,11,12] oraz paliw odpadowych na cele energetyczne [13,14,15,16], a także szersze opracowania poświęcone zawiesinom węglowo-wodnym oraz procesom ich spalania [17,18,19,20,21].

Z drugiej strony, rozwój technologii wykorzystania biomasy na cele energetyczne daje szereg przyszłościowych korzyści, na które mają wpływ: dostępność surowca, konieczność ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i innych szkodliwych substancji, możliwość rolniczego wykorzystania terenów zdegradowanych i rekultywowanych, stworzenie nowych miejsc pracy, wsparcie rozwoju lokalnego, aktualny i prognozowany wzrost cen paliw węglowych, czy możliwość dofinansowania inwestycji. Pomimo korzystnych aspektów zastosowania biomasy jako paliwa, stwarza ona jednak pewne problemy. Wynikają one przede wszystkim z właściwości fizykochemicznych biomasy, z których najważniejsze to: mała gęstość, niska wartość opałowa oraz szeroki przedział wilgotności. Pomimo tych wszystkich trudności, biomasa jest jednym z najbardziej obiecujących źródeł energii odnawialnej w Polsce, a jej współspalanie z węglem znajduje w ostatnich latach coraz szersze zastosowanie, zarówno w Polsce, jak i na świecie. Ważną zaletą współspalania paliw jest bowiem ograniczenie, typowych dla spalania węgla, emisji zanieczyszczeń SO_2 oraz NO_x . W chwili obecnej współspalanie biomasy z paliwami węglowymi realizowane jest na skalę przemysłową w kilkunastu krajowych elektrowniach i elektrociepłowniach.

2. Stanowisko badawcze i metodyka pomiarów

Jak wspomniano, problematyka spalania wysoko zawadzionych paliw nabiera coraz większego znaczenia w miarę wzrostu wymagań jakościowych węgla spalanych w elektrowniach. Kopalnie węgla kamiennego, chcąc spełnić oczekiwania energetyków, zmuszone zostały do rozbudowy i unowocześnienia zakładów wzbogacania węgla. Powoduje to wzrost ilości odpadów powstających w procesie mokrego wzbogacania zawierających coraz mniejsze podziarna. W tej sytuacji koncepcja bezpośredniego spalania wspomnianych odpadów, transportowanych np. hydraulicznie do pobliskich elektrowni wydaje się atrakcyjna, zarówno ze względu na możliwość eliminacji konieczności głębokiego odwadniania i suszenia, a także likwidacji strat najdrobniejszych frakcji węgla, przy zrzucie zamulonych wód z zakładów wzbogacania. Sprawność spalania tak utworzonych suspensji węglowo-wodnych (w-w) wymaga jednak odpowiedniej organizacji procesu, uwzględniającej specyfikę mechanizmu spalania tego rodzaju paliwa. Stąd wynika główny cel pracy polegający na rozpoznaniu mechanizmu i kinetyki spalania zawiesin w-w w oparciu o kompleksowe badania eksperymentalne.

Priorytetowym celem badań było wyznaczenie oddziaływania różnych parametrów spalania, m.in. udziału biomasy w paliwie zawiesinowym utworzonym z węgla kamiennego, brunatnego oraz antracytu, na całkowity czas procesu. Szczegółowy zakres badań przedstawiono w dalszej części pracy. Tematyka pracy eksperymentalnej wynika z ukierunkowania współczesnych badań w dziedzinie spalania paliw węglowo-wodnych (w-w) na dwa główne problemy:

1. Opracowanie technologii spalania niskoskoncentrowanych paliw w-w zmniejszających emisję NO_x . Paliwo tego typu utworzone jest najczęściej z mułu poflotacyjnego o zawartości wilgoci $20\div 40\%$, wartości opałowej $8\div 10$ MJ/kg, przy zawartości popiołu $20\div 35\%$. [22].

2. Spalanie wysokoskoncentrowanych suspensji węglowych z zachowaniem dobrej stabilności – umożliwiającej zastępowanie paliw petrochemicznych. Prace w tym kierunku prowadzone są głównie w Chinach [23].

Rozwój technologii wytwarzania zawieszinowych paliw węglowo-wodnych inspirowany jest możliwościami [24, 25]:

- hydrotransportu paliwa na duże odległości,
- rozwoju technologii spalania oraz zgazowywania paliw,
- zastąpienia olejów opałowych i napędowych,
- zastąpienia węgla,
- łatwiejszego prowadzenia automatyzacji procesów spalania i technologicznych,
- zmniejszenia areału powierzchni pod transport i składowanie paliw,
- ograniczenia niekorzystnego oddziaływania na środowisko,
- uproszczenia gospodarki paliwowej.

Zawiesinę węglowo-wodną mogą stanowić odpady poflotacyjne i muły węglowe. Może być ona również wytwarzana bezpośrednio z węgla. W zależności od przeznaczenia paliwa zawieszinowego, ogromną rolę odgrywa dobór jakości zastosowanego węgla i ewentualnie jego wzbogacenie oraz odpowiednie rozdrobnienie. Należy pamiętać, że Polska jest krajem węglowym i właśnie na węglu (kamiennym i brunatnym) musi opierać swoje bezpieczeństwo energetyczne [26].

Stosowanie paliw suspensyjnych jest przyszłościowe, zarówno ze względów ekonomicznych, jak i ekologicznych. Wielu badaczy uważa, że w pełni zasadne jest zastosowanie mułów węglowych do produkcji suspensji węglowo-wodnych, zarówno z punktu widzenia niskich kosztów paliwa, jak i braku konieczności odwadniania [27], przy czym zawartość popiołu w tego typu paliwach nie powinna przekroczyć 30%, a udział wody: 55% [28].

W związku z koniecznością dostosowania do rygorystycznych wymagań związanych z ochroną środowiska polska energetyka musi sięgać do źródeł energii odnawialnej. Wyniki współspalania biomasy z węglem w elektrowniach i elektrociepłowniach w naszym kraju udowodniły konkurencyjność biomasy jako energii odnawialnej. Proces ten umożliwia bowiem ograniczenie emisji szkodliwych dla środowiska, charakterystycznych dla spalania węgla. Biomasa uczestniczy w recyklingu CO₂ emitując go podczas spalania, lecz absorbując w czasie wzrostu. Jest to niezwykle istotne, tym bardziej, że obecnie dużo uwagi poświęca się redukcji dwutlenku węgla w elektrowniach węglowych.

Celowym jest ponadto bardziej racjonalne zagospodarowanie mułów węglowych, jako jednego z mieszanki paliwowej zawierającej bioskładniki. Duża zawartość części lotnych w biomase ułatwia spalanie mułów, a wspomniana technologia umożliwia zastosowanie różnych materiałów organicznych, charakteryzujących się własnościami energetycznymi do produkcji paliw alternatywnych [29].

Podsumowując należy podkreślić, że energetyczne wykorzystanie węgla o niskiej jakości ma dwa aspekty:

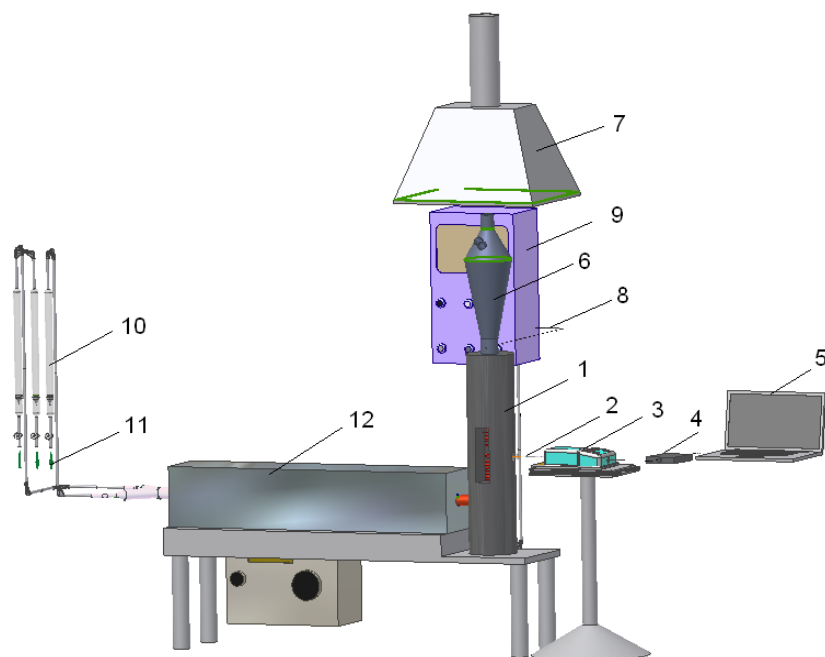
- ekonomiczny, związany z koniecznością obniżenia kosztów paliwowych,
- ekologiczny, polegający na racjonalnym gospodarowaniu surowcami mineralnymi oraz utylizacji produktów przeróbki węgla, zdeponowanych w przykopalnianych osadnikach.

Autorzy pracy [30] zauważają, że proces współspalania węgla z odpadami o wysokiej wilgotności, do 60% prowadzi do obniżenia sprawności procesu, nawet o 12%. Rekompensowane to jest jednak redukcją emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Stwierdzono zatem, że zastosowanie suspensji w-w do opalania kotłów energetycznych prowadzi do ograniczenia emisji [25]:

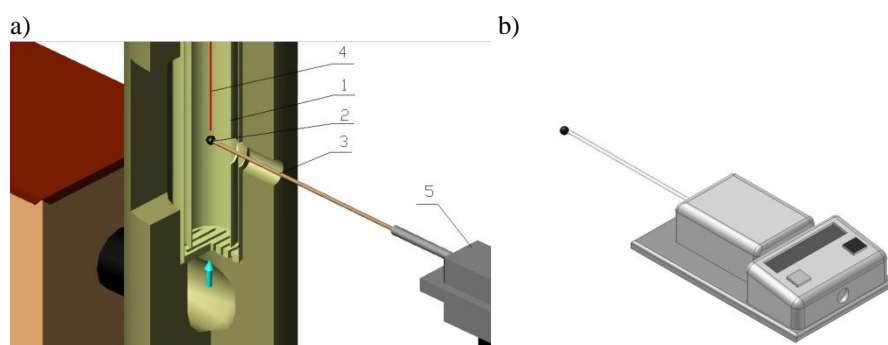
- tlenków azotu, około 2-krotnie,
- tlenków siarki, około 5-krotnie,
- pyłów, około 1,24-krotnie.

Podjęcie wspomnianej problematyki spalania zawieszonych paliw węglowo-wodnych oraz ich współspalania z biomasą jest zatem jak najbardziej zasadne.

Eksperymentalny charakter badań, przeprowadzonych w ramach rozpatrywanej pracy, wymagał przygotowania stanowiska badawczego oraz opracowania odpowiedniej metodyki pomiarów. Stanowisko badawcze (rys.2.1) umożliwiło badanie współspalania paliw w strumieniu powietrza. Główny element stanowiska stanowiła pionowa komora spalania (1), wykonana z rury kwarcowej o średnicy wewnętrznej 44 mm i wysokości 650 mm. Wejście pomiarowe dla próbki paliwa oraz wziernik wizualizacyjny umożliwiły badania polegające na obserwacji i rejestracji przebiegu procesu spalania paliwa, zamocowanego na termoelementach PtRh10-Pt (2) umiejscowionych w dwóch cienkich rurkach kwarcowych, stanowiących zarazem wysięgnik specjalnej elektronicznej wagi laboratoryjnej WM 002 firmy Mensor, o zakresie pomiarowym do 20g i dokładności 1mg (3). Jedna ze spoin termoelementu znajdowała się w środku paliwa, natomiast druga ze spoin termoelementu, wygiętego w kształcie podtrzymującego koszyczka, dotykała od spodu do powierzchni paliwa. Do badań wykorzystano termoelementy o grubości 0,3 mm. Próbkę paliwa wprowadzana była do komory spalania za pomocą układu jezdnego. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.2.2. W celu rejestracji wyników badań termoelementy wraz z wagą podłączono do karty pomiarowej (4) sprzężonej z komputerem (5). Spaliny emitowane na zewnątrz trafiały do wentylatora wyciągowego, poprzez elementy stanowiska (6,7). W bloku ceramicznym (12), w części poziomej, umieszczono rurę kwarcową, a w niej element grzejny urządzenia (nagrzewnicę gazu o mocy 6 kW), który tworzą trzy spirale (umiejscowione w sześciu rurkach kwarcowych). Blok ceramiczny (12) osłonięto blachą ze stali nierdzewnej. W celu uzyskania żądanej temperatury w miejscu pomiaru oraz wyeliminowania strat ciepła, komora spalania obudowana została dodatkowo segmentami grzałek o mocy całkowitej 2,2 kW oraz obłożona izolacją termiczną i osłonięta blachą ze stali nierdzewnej. Sprężone powietrze doprowadzane do rury kwarcowej w bloku ceramicznym (12) z wykorzystaniem przepływomierza pływakowego (10). System regulacji temperatury stanowił układ oparty na dwóch mikroprocesorowych regulatorach zabudowanych w skrzynce (9), pracujących niezależnie w komorze spalania i w nagrzewnicy gazu oraz sterujących pracą trójfazowego sterownika mocy. Tak przygotowane stanowisko umożliwiło badanie przebiegu spalania paliw w szerokim zakresie zmian parametrów procesu [31].



Rys. 2.1. Schemat stanowiska badawczego. 1 – komora spalania, 2 - termoelementy PtRh10-Pt, 3 - waga, 4 – karta pomiarowa, 5 - komputer, 6 –komora rozprężna, 7 – wyciąg spalin, 8 - termoelement NiCr-Ni (do pomiaru temperatury w komorze spalania), 9 - mikroprocesorowe regulatory temperatury, 10 - przepływomierz pływakowy, 11 – zawory regulacyjne, 12 - blok z materiału ceramicznego



Rys. 2.2. Układ pomiarowy. a) schemat układu pomiarowego 1 - komora badawcza, 2 - próbka paliwa, 3 - termoelementy PtRh10-Pt, 4 - termoelement NiCr-NiAl, 5 - waga b) waga wraz z próbką paliwa zamontowaną na wysięgniku utworzonym z termoelementów PtRh10-Pt

Badania przeprowadzono dla danego przedziału uziarnienia paliwa węglowego, tzn. poniżej 100 μm . W tym celu niezbędne było przygotowanie pyłu paliw (różnych typów węgla i biomasy), po uprzednim zmieleniu paliw i przesianiu ich przez sita. Odpowiednie porcje wody dodane do pyłu paliwa o stałej masie 100 mg zapewniły uzyskanie paliwa zawiesinowego o żądanej wilgotności. Analizę paliw zastosowanych w badaniach przedstawiono w tabelicy 2.1.

Tabela. 2.1. Analiza techniczna i elementarna paliw zastosowanych w badaniach

Paliwo	Zawart. wilgoci	Zawart. części lotnych	Zawart. popiołu	Wartość opalowa	Zawart. pierw. węgla	Zawart. wityrnytu	Zawart. egzynytu	Zawart. inertynytu	Zawart. substancji mineralnej	FC	FR
	W^a %	V^a %	A^a %	Q_i^a kJ/kg	C_i^a %	V % _{obj.}	L % _{obj.}	I % _{obj.}	MM % _{obj.}		
węgiel brunatny	14,5	37,1	18,4	16165	43,2	86	5	9	45	30,0	0,8
węgiel kamienny	2,7	30,9	2,4	31198	79,5	52	9	39	0	64,1	2,1
antracyt	1,5	3,0	2,5	39350	93,0	99	0	0	1	93,0	31,0
śruta	8,5	70,5	4,6	15825	40,9	-	-	-	-	16,5	0,2

$$* FC = 100 - (W^a + V^a + A^a)$$

$$** FR = \frac{FC}{V^a}$$

3. Charakterystyka rotalno-uniformalnego planu badań

Badania współspalania paliw wykonano zgodnie z planem rotalno-uniformalnym PS/DS-P: $\lambda(\lambda)$ [32]. Celem analizy statystycznej [32] był dobór funkcji regresji, najbardziej adekwatnej do wyników pomiarów. Badania wstępne polegające na wykonywaniu pomiarów przy zmianie wyłącznie jednego parametru procesu w przyjętych warunkach spalania pozwoliły na stwierdzenie, że uzyskane wartości całkowitego czasu trwania procesów można aproksymować funkcją wielomianową. Po przeprowadzeniu badań zasadniczych, biorąc po uwagę różne postacie funkcji wielomianowych dla poszczególnych cykli badań, uwzględniając ich niedokładność, adekwatność oraz współczynnik korelacji wielowymiarowej stwierdzono, iż najbardziej reprezentatywnymi funkcjami aproksymującymi uzyskane wyniki pomiarów są wielomiany drugiego stopnia z interakcjami pierwszego rzędu, w postaci:

- w przypadku czterech wielkości wejściowych:

$$\begin{aligned} \tilde{z} = & b_0 + b_{01} \cdot \hat{x}_1 + b_{02} \cdot \hat{x}_2 + b_{03} \cdot \hat{x}_3 + b_{04} \cdot \hat{x}_4 + b_{11} \cdot \hat{x}_1^2 + b_{22} \cdot \hat{x}_2^2 \\ & + b_{33} \cdot \hat{x}_3^2 + b_{44} \cdot \hat{x}_4^2 + b_{12} \cdot \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_2 + b_{13} \cdot \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_3 + b_{14} \cdot \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_4 \\ & + b_{23} \cdot \hat{x}_2 \cdot \hat{x}_3 + b_{24} \cdot \hat{x}_2 \cdot \hat{x}_4 + b_{34} \cdot \hat{x}_3 \cdot \hat{x}_4 \end{aligned} \quad (3.1)$$

gdzie:

\tilde{z} - aproksymowana wartość wielkości wyjściowej obliczona z funkcji obiektu badań dla u -tego pomiaru,
 b_0, b_k, b_{kk}, b_{qk} - wartości współczynników wielomianu aproksymującego,
 przy czym wykorzystano następujące relacje normowania:

$$\hat{x}_k = \frac{2 \cdot \alpha \cdot (x_k - \bar{x}_k)}{x_{kmax} - x_{kmin}} \quad (3.2)$$

Charakterystykę planu rotacyjno-uniformalnego PS/DS-P: $\lambda(\lambda)$ oraz współczynniki pomocnicze do wyznaczania aproksymującego wielomianu przedstawiono w tabelicy 3.1 i 3.2.

Tabela 3.1. Charakterystyka planu rotacyjno-uniformalnego PS/DS-P: $\lambda(\lambda)$ [32]

i	4
α_{rot}	2,00
n_k	16
n_α	8
n_0	7
n	31

gdzie:

i - liczba parametrów (wielkości) wejściowych,
 n_k - liczba układów stanowiących jądro planu,
 n_α - liczba układów, z których utworzone są punkty gwiazdne,
 n_0 - liczba układów w centrum planu,
 n - łączna liczba układów planu rotacyjnego.

Tabela 3.2. Współczynniki pomocnicze do wyznaczania aproksymującego wielomianu na podstawie planu PS/DS-P: $\lambda(\lambda)$ [32]

i	n_K	D	E	e	F	G
4	16	0,1429	-0,0357	23,9808	0,0350	0,0037

Wartości współczynników wielomianu aproksymującego obliczono z wykorzystaniem wzorów (3.3)-(3.11):

$$b_0 = D \cdot (0z) + E \cdot \sum_{k=1}^i (kkz) \quad (3.3)$$

$$b_k = \frac{(kz)}{e} \quad (3.4)$$

$$b_{kk} = (F - G) \cdot (kkz) + G \cdot \sum_{k=1}^i (kkz) + E \cdot (0z) \quad (3.5)$$

$$b_{qk} = \frac{(qkz)}{n_K} \quad (3.6)$$

przy czym:

$$(0z) = \sum_{u=1}^n \bar{z}^{(u)} \quad (3.7)$$

$$(kz) = \sum_{u=1}^n \hat{x}_{k/u} \cdot \bar{z}^{(u)} \quad (3.8)$$

$$(kkz) = \sum_{u=1}^n \hat{x}_{k/u}^2 \cdot \bar{z}^{(u)} \quad (3.9)$$

$$(qkz) = \sum_{u=1}^n \hat{x}_{q/u} \cdot \hat{x}_{k/u} \cdot \bar{z}^{(u)} \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^i (kkz) = \sum_{k=1}^i \sum_{u=1}^n \hat{x}_{k/u}^2 \cdot \bar{z}^{(u)} = (11z) + (22z) + \dots + (iiz) \quad (3.11)$$

$\bar{z}^{(u)}$ - średnia arytmetyczna wartości wielkości wyjściowej wyznaczonej eksperymentalnie, dla u -tego układu pomiarów,

$\hat{x}_{k/u}$ - wartość \hat{x}_k dla u -tego układu pomiaru,

(qk) - oznacza odpowiednio: (12), (13), (14), (23), (24), (34).

4. Analiza badań eksperymentalnych współspalania węgla z biomasą w postaci zawiesin

Celem badań współspalania węgla z biomasą w postaci zawiesin była identyfikacja oddziaływania udziału biomasy w paliwie, wilgotności zawiesiny, temperatury w komorze spalania oraz prędkości napływu powietrza na czas spalania paliw różnych typów w strumieniu powietrza [31]. Badane paliwo utworzono odpowiednio: z pyłu węgla brunatnego, kamiennego, antracytu i pyłu śruty zbożowej oraz wody. W celu przeprowadzenia badań wykorzystano rotalno-uniformalny plan badań PS/DS-P: $\lambda(\lambda)$ (tablica 4.1-4.3) [32]. Każdy pomiar powtórzono trzykrotnie.

Przyjęte do badań parametry wejściowe to:

x_1 – udział biomasy w paliwie zawiesinowym, UB, %,

x_2 – wilgotność zawiesiny, W, %,

x_3 - temperatura w komorze spalania, t, °C,

x_4 – prędkość napływu powietrza, v, m/s

Tabela 4.1. Wartości wielkości wejściowych x_k ($i = 4$)

x_k	$x_{k \min} - x_{k \max}$	$x_k (\alpha = 2)$				
		$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
x_1	0-100	0	25	50	75	100
x_2	20-50	20	27,5	35	42,5	50
x_3	800-900	800	825	850	875	900
x_4	3-6	3	3,75	4,5	5,25	6

przy czym: $\bar{x}_1 = 50$ $\bar{x}_2 = 35$ $\bar{x}_3 = 850$ $\bar{x}_4 = 4,5$

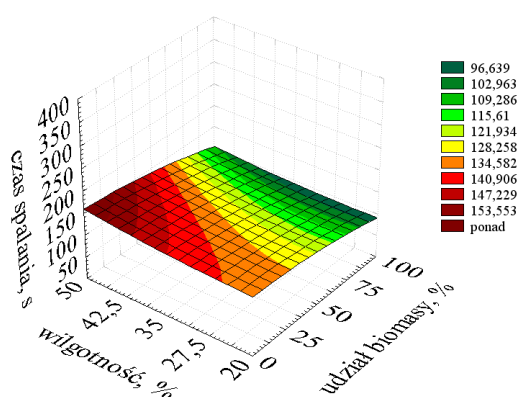
Dokonując analizy statystycznej uzyskanych wyników pomiarów, za najbardziej reprezentatywną funkcję aproksymującą uzyskane wyniki uznano wielomian drugiego stopnia z interakcjami pierwszego rzędu, opisany zależnością (3.1).

Z równania regresji wyznaczono czas spalania paliwa zawieszinowego, w różnych warunkach przebiegu procesu spalania, co przykładowo zilustrowano na rys.4.1-4.9. Z przedstawionych wykresów wynika, że o szybkości spalania paliwa decydują wszystkie rozpatrywane czynniki, a więc prędkość przepływu powietrza, udział wilgoci i biomasy w paliwie oraz temperatura w komorze spalania.

W tabelicy 4.3 przedstawiono obliczone wartości współczynników wielomianu aproksymującego.

Tabela 4.2. Program badań spalania paliwa zawieszinowego

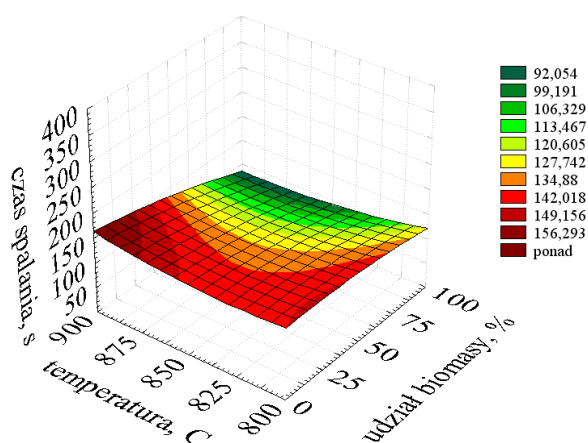
u	\hat{x}_k				x_k			
	\hat{x}_1	\hat{x}_2	\hat{x}_3	\hat{x}_4	x_1	x_2	x_3	x_4
1	-1	-1	-1	-1	25	27,5	825	3,75
2	1	-1	-1	-1	75	27,5	825	3,75
3	-1	1	-1	-1	25	42,5	825	3,75
4	1	1	-1	-1	75	42,5	825	3,75
5	-1	-1	1	-1	25	27,5	875	3,75
6	1	-1	1	-1	75	27,5	875	3,75
7	-1	1	1	-1	25	42,5	875	3,75
8	1	1	1	-1	75	42,5	875	3,75
9	-1	-1	-1	1	25	27,5	825	5,25
10	1	-1	-1	1	75	27,5	825	5,25
11	-1	1	-1	1	25	42,5	825	5,25
12	1	1	-1	1	75	42,5	825	5,25
13	-1	-1	1	1	25	27,5	875	5,25
14	1	-1	1	1	75	27,5	875	5,25
15	-1	1	1	1	25	42,5	875	5,25
16	1	1	1	1	75	42,5	875	5,25
17	-2	0	0	0	0	35	850	4,5
18	2	0	0	0	100	35	850	4,5
19	0	-2	0	0	50	20	850	4,5
20	0	2	0	0	50	50	850	4,5
21	0	0	-2	0	50	35	800	4,5
22	0	0	2	0	50	35	900	4,5
23	0	0	0	-2	50	35	850	3
24	0	0	0	2	50	35	850	6
25	0	0	0	0	50	35	850	4,5
26	0	0	0	0	50	35	850	4,5
27	0	0	0	0	50	35	850	4,5
28	0	0	0	0	50	35	850	4,5
29	0	0	0	0	50	35	850	4,5
30	0	0	0	0	50	35	850	4,5
31	0	0	0	0	50	35	850	4,5



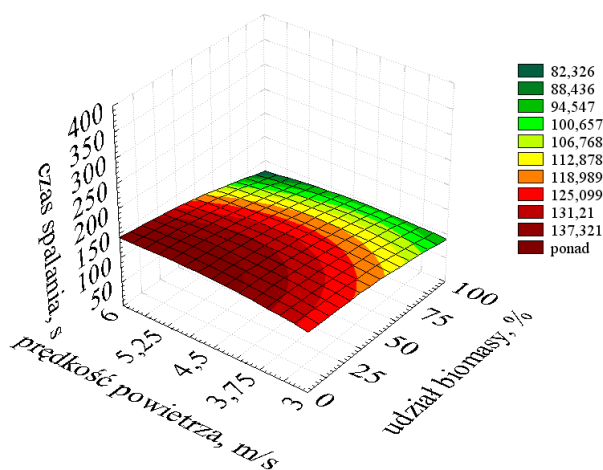
Rys.4.1. Oddziaływanie wilgotności paliwa oraz udziału biomasy w zawieszinie na czas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza (paliwo zawiesinowe utworzone – w odpowiednich proporcjach - z pyłu węgla brunatnego i śruty zbożowej oraz wody) [31]

Tabela 4.3. Wartości współczynników regresji

Współczynnik	Wartości współczynników regresji		
	Zawiesina utworzona z pyłu biomasy oraz:		
	węgla brunatnego	węgla kamiennego	antracytu
b_{00}	125,28	223,33	235,56
b_{01}	-12,25	-57,94	-62,17
b_{02}	4,86	-5,97	-10,47
b_{03}	-1,86	-8,17	-1,33
b_{04}	0,86	-1,94	1,22
b_{11}	-2,20	-2,44	1,29
b_{12}	-0,92	7,21	19,75
b_{13}	-3,63	-2,04	-5,08
b_{14}	-2,00	1,21	-1,29
b_{22}	1,38	-2,11	1,08
b_{23}	-2,79	-6,17	-1,99
b_{24}	0,67	-4,92	23,21
b_{33}	2,92	-1,99	1,62
b_{34}	-4,95	1,58	8,88
b_{44}	-2,37	0,01	1,99

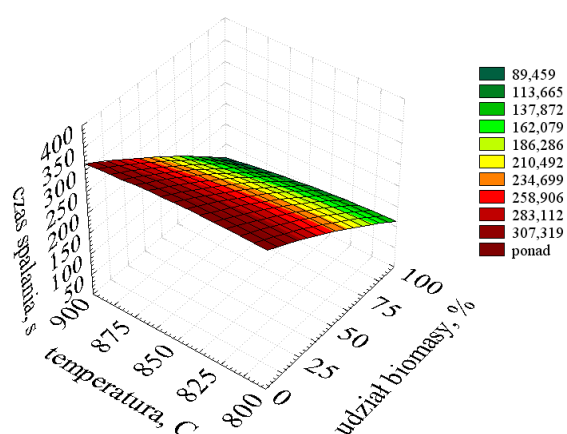


Rys.4.2. Oddziaływanie temperatury w komorze spalania oraz udziału biomasy w zawiesinie na czas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza; W = 35% (paliwo zawiesinowe utworzone – w odpowiednich proporcjach - z pyłu węgla brunatnego i śrutu oraz wody) [31]

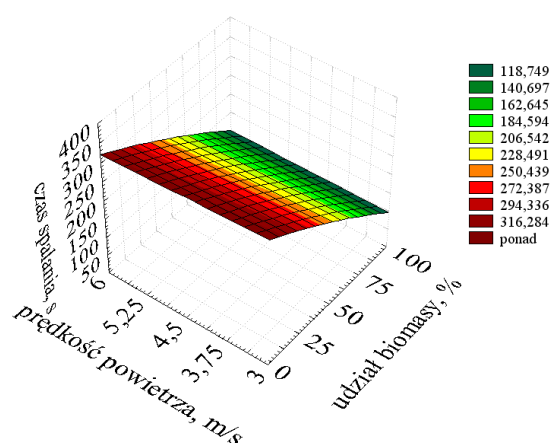


Rys.4.3. Oddziaływanie prędkości powietrza oraz udziału biomasy w zawiesinie na czas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza; W = 35% (paliwo zawiesinowe utworzone – w odpowiednich proporcjach - z pyłu węgla brunatnego i śrutu oraz wody) [31]

Analizując spalanie zawiesiny utworzonej z pyłu węgla brunatnego można stwierdzić, iż: wzrost udziału biomasy w paliwie zdecydowanie skraca czas spalania, co jest szczególnie widoczne w przypadku większych wilgotności zawiesiny; wzrost temperatury w komorze spalania przyczynia się do skrócenia czasu procesu, zwłaszcza w przypadku większych udziałów biomasy w paliwie oraz większych wilgotności zawiesiny; wzrost udziału biomasy w paliwie zdecydowanie skraca czas spalania w przypadku wyższych temperatur w komorze spalania; wzrost prędkości napływu powietrza (powyżej 4,5 m/s) prowadzi do nieznacznego skrócenia czasu procesu; wzrost udziału biomasy w paliwie zdecydowanie skraca czas spalania paliwa w całym rozpatrywanym przedziale zmian prędkości napływu powietrza.

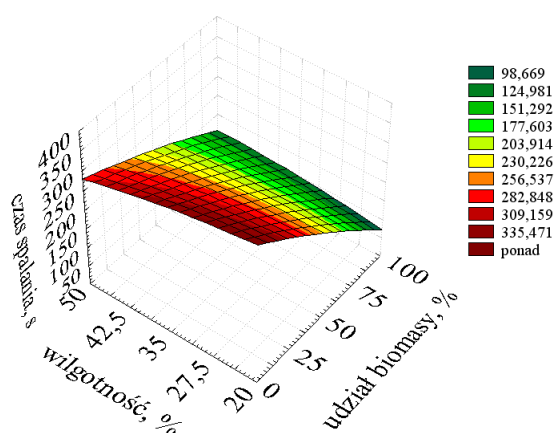


Rys.4.4. Oddziaływanie temperatury w komorze spalania oraz udziału biomasy w zawieszynie na czas spalania paliwa zawieszinowego w strumieniu powietrza; $W = 35\%$ (paliwo zawieszinowe utworzone - w odpowiednich proporcjach - z pyłu węgla kamiennego i śruty oraz wody) [31]



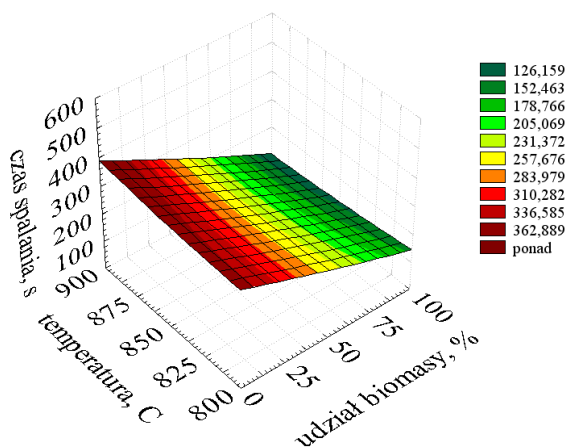
Rys.4.5. Oddziaływanie prędkości powietrza oraz udziału biomasy w zawieszynie na czas spalania paliwa zawieszinowego w strumieniu powietrza; $W = 35\%$ (paliwo zawieszinowe utworzone - w odpowiednich proporcjach - z pyłu węgla kamiennego i śruty oraz wody) [31]

Analizując spalanie zawiesziny utworzonej z pyłu węgla kamiennego można stwierdzić, iż: wzrost temperatury w komorze spalania powoduje skrócenie czasu procesu, wyłącznie w przypadku większych udziałów biomasy w paliwie oraz większych wilgotności zawiesziny; wzrost udziału biomasy w paliwie wyraźnie skraca czas spalania zawiesziny w całym rozpatrywanym przedziale temperatur w komorze spalania; wzrost prędkości napływu powietrza prowadzi do nieznacznego skrócenia czasu procesu, w przypadku większych udziałów biomasy w paliwie oraz większych wilgotności tego typu zawiesziny; wzrost udziału biomasy w paliwie skraca czas spalania paliwa w całym przedziale zmian prędkości napływu powietrza; wzrost udziału biomasy w paliwie zdecydowanie skraca czas spalania w całym przedziale wilgotności zawiesziny; wzrost wilgotności zawiesziny nieznacznie skraca czas procesu spalania, w przypadku mniejszych zawartości biomasy w paliwie, tzn. poniżej 50%.

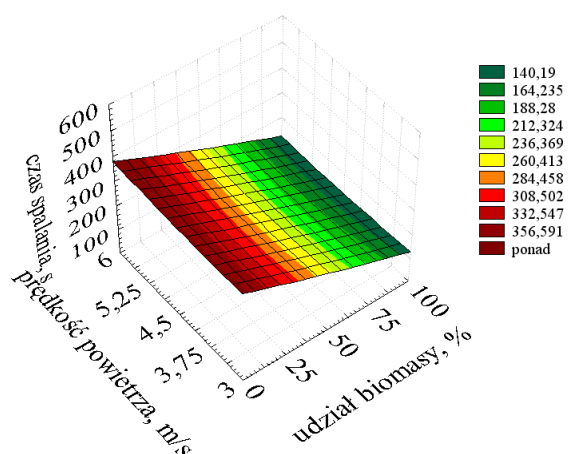


Rys.4.6. Oddziaływanie wilgotności paliwa oraz udziału biomasy w zawieszinie na czas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza (paliwo zawiesinowe utworzone - w odpowiednich proporcjach - z pyłu węgla kamiennego i śruty oraz wody) [31]

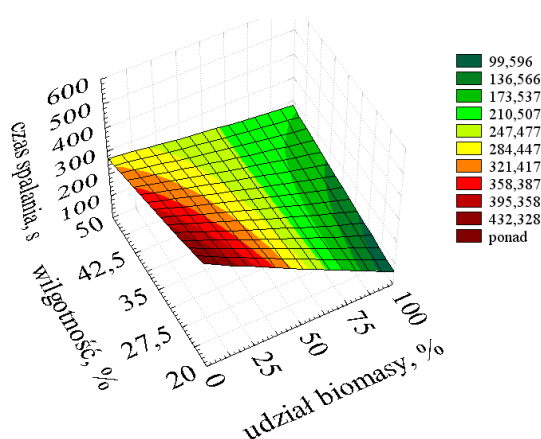
Analizując spalanie zawiesziny utworzonej z pyłu antracytu można stwierdzić, iż: wzrost udziału biomasy w paliwie skraca czas spalania zawiesziny w całym rozpatrywanym przedziale temperatur w komorze spalania; wzrost temperatury w komorze spalania przyczynia się do skrócenia czasu procesu, wyłącznie w przypadku większych udziałów biomasy w paliwie oraz większych wilgotności zawiesziny; wzrost udziału biomasy w paliwie skraca czas spalania paliwa w całym przedziale zmian prędkości napływu powietrza, wyłącznie w przypadku mniejszych wilgotności paliwa, tzn. poniżej 35%; wzrost prędkości napływu powietrza powoduje nieznaczne skrócenie czasu procesu, w przypadku większych udziałów biomasy w paliwie oraz mniejszych wilgotności tego typu zawiesziny; wzrost wilgotności zawiesziny skraca czas procesu, w przypadku mniejszych zawartości biomasy w paliwie; wzrost udziału biomasy w paliwie skraca czas spalania, co jest szczególnie widoczne w przedziale mniejszych wilgotności zawiesziny.



Rys.4.7. Oddziaływanie temperatury w komorze spalania oraz udziału biomasy w zawieszinie na czas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza; W = 35% (paliwo zawiesinowe utworzone – w odpowiednich proporcjach - z pyłu antracytu i śruty oraz wody) [31]



Rys.4.8. Oddziaływanie prędkości powietrza oraz udziału biomasy w zawieszynie na czas spalania paliwa zawieszinowego w strumieniu powietrza; $W = 35\%$ (paliwo zawieszinowe utworzone – w odpowiednich proporcjach - z pyłu antracytu i śruty oraz wody) [31]



Rys.4.9. Oddziaływanie wilgotności paliwa oraz udziału biomasy w zawieszynie na czas spalania paliwa zawieszinowego w strumieniu powietrza (paliwo zawieszinowe utworzone – w odpowiednich proporcjach - z pyłu antracytu i śruty oraz wody) [31]

Przeprowadzona analiza zaprezentowanych wyników badań pozwala stwierdzić, iż: wraz ze wzrostem udziału biomasy w paliwie skróceniu ulega czas procesu, szczególnie widoczny w przedziale większych wilgotności zawiesziny; w przypadku paliw niższych typów (węgiel brunatny) oraz w przedziale mniejszych wilgotności zawiesziny; w przypadku paliw wyższych typów (antracyt); wzrost wilgotności zawiesziny skraca czas procesu w przypadku paliw wyższych typów (węgiel kamienny i antracyt) oraz z mniejszą zawartością biomasy w mieszance paliwowej; wzrost temperatury w komorze spalania przyczynia się do skrócenia czasu procesu, wyłącznie w przypadku większych udziałów biomasy w paliwie oraz większych wilgotności zawiesziny (w przypadku wszystkich rozpatrywanych typów paliw); wzrost udziału biomasy w paliwie zdecydowanie skraca czas spalania zawiesziny w całym rozpatrywanym przedziale temperatur w komorze spalania (w przypadku węgla kamiennego i antracytu) oraz w przypadku wyższych temperatur w komorze spalania (w przypadku węgla brunatnego); wzrost prędkości napływu powietrza prowadzi do nieznacznego skrócenia czasu procesu, wyłącznie w przypadku większych udziałów biomasy w zawieszynie; wzrost udziału biomasy w paliwie zdecydowanie skraca czas spalania paliwa w całym rozpatrywanym przedziale zmian prędkości napływu powietrza.

Podsumowując należy stwierdzić, iż typ paliwa oddziałuje na przebieg i mechanizm procesu spalania zawiesziny.

Ciekawym elementem badań była także identyfikacja oddziaływania wilgoci zawiesiny oraz temperatury w komorze spalania i prędkości napływu powietrza na emisję NO_x oraz SO₂, podczas spalania zawiesiny w strumieniu powietrza (stanowisko badawcze-rys.2.1). Badania polegały na rejestracji emisji spalin powstałych w trakcie procesu spalania próbki paliwa, przy pomocy analizatora spalin Ecoline 4000 [31].

W celu przeprowadzenia badań wykorzystano rotacyjno-uniformalny plan badań PS/DS-P: $\lambda(\lambda)$ (tablica 4.4). Każdy pomiar powtórzono trzykrotnie.

Przyjęte do badań parametry wejściowe to:

x_1 – wilgotność zawiesiny, W, %,

x_2 – temperatura w komorze spalania, °C,

x_3 – prędkość napływu powietrza, v, m/s.

Wyniki badań aproksymowano funkcją wielomianową drugiego stopnia z interakcjami pierwszego rzędu.

Tabela 4.4. Program badań spalania paliwa zawiesinowego

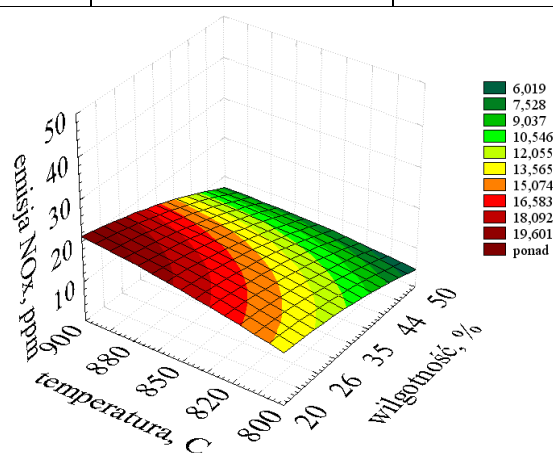
	x_1	x_2	x_3
1	26	820	3,6
2	44	820	3,6
3	26	880	3,6
4	44	880	3,6
5	26	820	5,4
6	44	820	5,4
7	26	880	5,4
8	44	880	5,4
9	20	820	4,5
10	50	820	4,5
11	35	800	4,5
12	35	900	4,5
13	35	850	3
14	35	850	6
15	35	850	4,5
16	35	850	4,5
17	35	850	4,5
18	35	850	4,5
19	35	850	4,5
20	35	850	4,5

Wartości współczynników wielomianu aproksymującego przedstawiono w tablicy 4.5. Z zastosowaniem wartości współczynników sporządzono przykładowe zależności emisji NO_x oraz SO₂ podczas spalania paliw od parametrów procesu (rys.4.10-4.15). Znaczne obniżenie emisji NO_x (rys.4.10-4.12) podczas spalania węglowo-biomasowych paliw zawiesinowych następuje wraz ze wzrostem wilgotności paliwa (w całym rozpatrywanym przedziale prędkości napływu powietrza oraz temperatury w komorze spalania): z obniżeniem temperatury w komorze spalania i prędkości napływu powietrza, w przedziale mniejszych wilgotności paliwa, z obniżeniem prędkości napływu powietrza w przedziale wyższych temperatur w komorze spalania, z obniżaniem temperatury w komorze spalania w przedziale wyższych prędkości napływu powietrza.

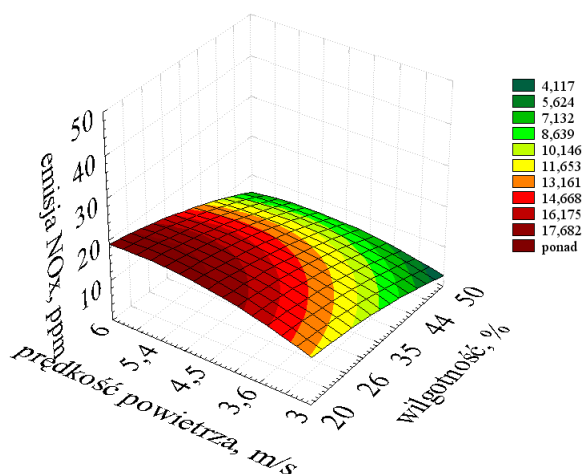
Znaczne obniżenie emisji SO₂ (rys.4.13-4.15) podczas spalania węglowo-biomasowych paliw zawiesinowych następuje wraz: ze wzrostem wilgotności zawiesiny w przedziale niskich temperatur w komorze spalania i niższych prędkości napływu powietrza, z obniżaniem temperatury w komorze spalania w przedziale wyższych wilgotności zawiesiny, z obniżaniem prędkości napływu powietrza, zwłaszcza w przedziale niższych temperatur w komorze spalania, z obniżaniem temperatur w komorze spalania w przedziale niższych prędkości napływu powietrza.

Tabela 4.5. Wartości współczynników regresji

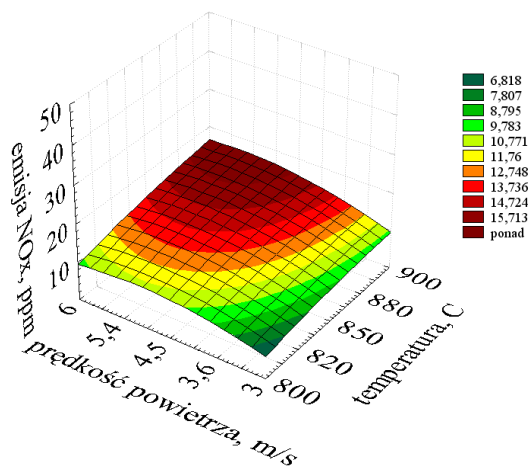
	Współczynniki regresji	
	NOx	SO ₂
b_{00}	13,69	3,62
b_{01}	-2,80	-0,87
b_{02}	1,35	0,36
b_{03}	1,30	0,86
b_{11}	-0,37	0,94
b_{12}	-0,36	0,38
b_{13}	-0,29	-0,11
b_{22}	-0,21	1,08
b_{23}	0,21	-0,029
b_{33}	-0,64	0,75



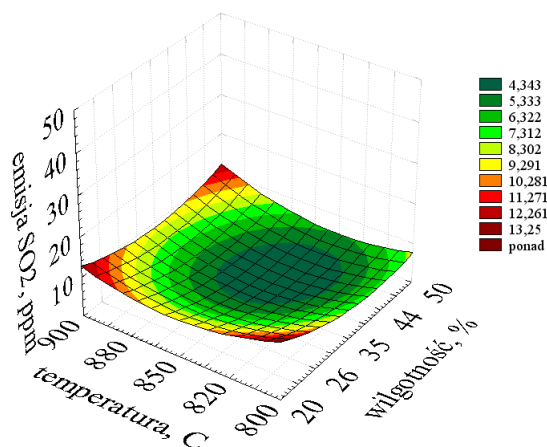
Rys.4.10. Oddziaływanie wilgotności zawiesiny oraz temperatury w komorze spalania na emisję NOx podczas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza [31]



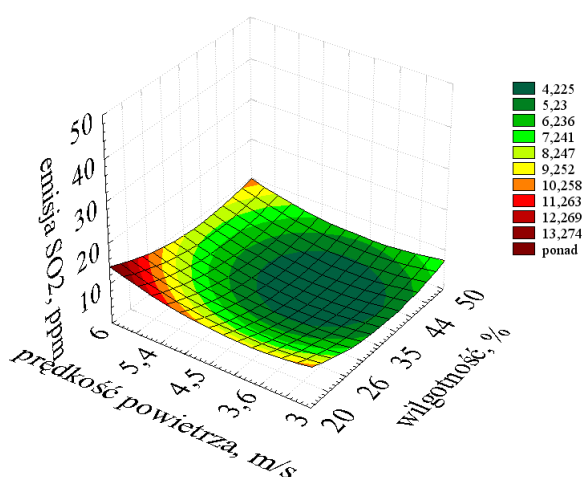
Rys.4.11. Oddziaływanie wilgotności zawiesiny oraz prędkości powietrza na emisję NO_x podczas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza [31]



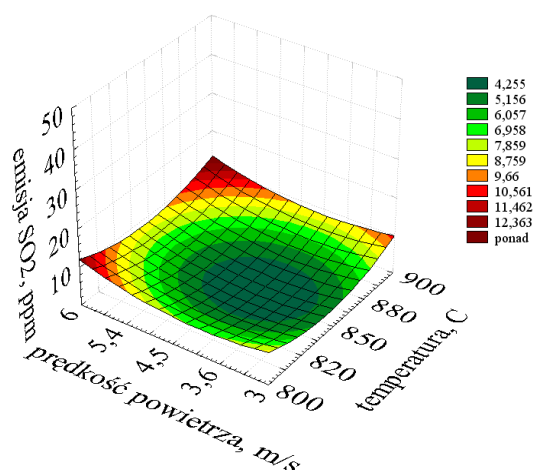
Rys.4.12. Oddziaływanie temperatury w komorze spalania oraz prędkości napływu powietrza na emisję NO_x podczas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza [31]



Rys.4.13. Oddziaływanie wilgotności zawiesiny oraz temperatury w komorze spalania na emisję SO₂ podczas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza [31]



Rys.4.14. Oddziaływanie wilgotności zawiesiny oraz prędkości powietrza na emisję SO_2 podczas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza [31]



Rys.4.15. Oddziaływanie temperatury w komorze spalania oraz prędkości napływu powietrza na emisję SO_2 podczas spalania paliwa zawiesinowego w strumieniu powietrza [31]

5. Podsumowanie

Przeprowadzone w ramach pracy badania i analizy pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Ziarna paliwa w zawiesinach rozmieszczone są nieregularnie, a woda łączy pojedyncze ziarna węgla oraz biomasy w aglomeraty.
2. Dodatek pyłu biomasy do paliwa węglowego intensyfikuje przebieg procesu spalania.
3. Przeprowadzona w ramach pracy analiza statystyczna wyników badań umożliwiła określenie korelacji między parametrami decydującymi o przebiegu procesu spalania w strumieniu powietrza.
4. Wzrost zawartości wilgoci oraz części lotnych w paliwie zawiesinowym prowadzi do skrócenia całkowitego czasu procesu.
5. Bez względu na rodzaj zawiesiny (utworzonej z pyłu węgla brunatnego, kamiennego czy antracytu) wzrost temperatury w komorze spalania przyczynia się do skrócenia czasu procesu, wyłącznie w przypadku większych udziałów biomasy w paliwie oraz większych wilgotności zawiesiny, co świadczy o bardziej kinetycznym przebiegu procesu w tym obszarze.

6. Znaczne obniżenie emisji NO_x podczas spalania węglowo-biomasowych paliw zawieszonych następuje wraz ze wzrostem wilgotności paliwa, w całym rozpatrywanym przedziale prędkości napływu powietrza oraz temperatury w komorze spalania.
7. Znaczne obniżenie emisji SO_2 podczas spalania węglowo-biomasowych paliw zawieszonych następuje wraz ze wzrostem wilgotności zawiesiny w przedziale niskich temperatur w komorze spalania i niższych prędkości napływu powietrza.

Literatura

1. Atesok G., Boylu F., Sikeci A.A., Dincer H.: The effect of coal properties on the viscosity of coal-water slurries. *Fuel* 81 (2002), pp.1855-1858.
2. Boylu F., Dincer H., Atesok G.: Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water. *Fuel Processing Technology* (2004), pp.241-250.
3. Kijo-Kleczkowska A.: Analiza procesu atomizacji zawieszonych paliw węglowo-wodnych. *Energetyka i Ekologia*, maj 2010, s. 313-320.
4. Son S. Y., Kihm K. D.: Effect of coal particle size on coal-water slurry (CWS) atomization. *Atomization and Sprays* 8 (1998), pp.503-519.
5. Tsai S.C., Viers B.: Airblast Atomization of viscous liquids. *Fuel* 69 (1980).
6. Tsai S.C., Vu T.: Atomization of coal-water slurry using twin-fluid jet atomizer. *Fuel* 69 (1987), pp.1596-1602.
7. Tsai S.C., Knell E.W. Viscometry and rheology of coal water slurry. *Fuel* 65 (1986), pp.566-570.
8. Канторвич Б.В.: Основы теории горения и газификации твердого топлива. Издательство Академии Наук СССР, Москва 1958. изд. – во ANCCCR.
9. Białas J.: Majka-Myrcha B., Ryncarz A.: Wielkość produkcji mułów węglowych i ocena kosztów ich wzbogacania. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Górnictwo*, z.231, 1996, s.27-35.
10. Hycnar J. J., Foltyn R., Olkusi T., Blaschke A.: Kierunki energetycznego wykorzystania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia i wzbogacania węgla kamiennego. VII Ogólnopolska Konferencja Naukowa. Koszalin-Ustronie Morskie, 2005, s.639-650.
11. Wierzchowski K, Aleksa H., Dyduch F.: Technologia zagospodarowania mułów węglowych w mieszkach energetycznych, *Wiadomości Górnicze* 7-8, 2005, s.369-372.
12. Zaidevarg V.A., Trubetskoy K.N., Chanturia V.A., Nekhoroshy L.K., Demidow Y.V.: Oddziaływanie jakości węgla na efektywność przygotowania, transportu rurociągiem i spalanie silnie zagęszczonych zawiesin wodno-węglowej w elektrowniach ciepłych. XII Międzynarodowy Kongres Przeróbki Węgla. Kraków 23-27 maja 1994.
13. Hycnar J.: Paleniska fluidalne przykładem racjonalnego rozwiązywania problemów odpadów. *Polityka Energetyczna*, Tom 9, Zeszyt specjalny 2006, s. 365-376.
14. Petersen I., Werther J.: Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed. *Chemical Engineering and Processing* 44 (2005), pp. 717-736.
15. Wandrasz J.W., Wandrasz A.J.: Paliwa formowane. Biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” SP.Z.O.O., Warszawa 2006.
16. Werther J., Ogada T.: Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* 25 (1999), pp.55-116.
17. Chan K.K.: Pilot-scale combustion tests on coal-water mixtures with reference to particle agglomeration. *Fuel* 73 (1994), pp.1632-1637.
18. Kijo-Kleczkowska A.: Combustion of coal-water suspensions. *Fuel* 90 (2011), pp.865-877.
19. Kijo-Kleczkowska A.: Research on coal-water fuel combustion in a circulating fluidized bed. *Archives of Mining Science* 57 (2012), 1, pp.79-92.

20. Kijo-Kleczkowska A.: Analysis Combustion Process of Coal-Water Fuel. Archives of Mining Sciences, 54 (2009), 1, s.119-133.
21. Zimny J.: Suspensja węglowo-wodna jako paliwo alternatywne do zasilania wysokoprężnych silników spalinowych. Wiadomości Górnicze, nr 7, 2001.
22. Gajewski W. (kier.): Analiza procesów spalania suspensji węglowo-wodnych w paleniskach fluidyzacyjnych. Raport projektu badawczego Nr 3 T10B 084 28, 2005-2008.
23. Kubica R., Smółka W.: Zawiesinowe paliwa węglowe rozwój, charakterystyka i perspektywy zastosowania. Gospodarka Paliwami i Energią 1 (2000), s.2-8.
24. Hycnar J.: Ekologiczne paliwo węglowo – suspensje węglowo-wodne. XV Konferencja, Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej, Zakopane 2001, s.393-404.
25. Hycnar J.: Produkcja i stosowanie suspensji węglowo-wodnych. Prace Naukowe GIG, nr 34, 2000, s.67-77.
26. Blaschke W., Gawlik L., Lorenz U.: Węgiel kamienny energetyczny – ekonomia i ekologia. Konferencja Koszalin-Ustronie Morskie 2005.
27. Gorlov E.G., Seregin A. I., Khodakov G. S.: Vibration mills in the manufacturing technology of slurry fuel from unbeneficiated coal sludge. Solid Fuel Chemistry 42 (2008), pp.208–212.
28. Gorlov E. G., Seregin A. I., Khodakov G. S.: Conditions of utilization of coal mining and processing sludges as slurry fuel. Solid Fuel Chemistry 41 (2007), pp.364-369.
29. Hycnar J. J., Foltyn R., Olkuski T., Blaschke A.: Kierunki energetycznego wykorzystania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia i wzbogacania węgla kamiennego. VII Ogólnopolska Konferencja Naukowa. Koszalin-Ustronie Morskie, 2005, s.639-650.
30. Suksankraisorn K., Patumsawad S., Fungtammasan B.: Combustion studies of high moisture content waste in a fluidised bed. Waste Management 23 “(2003), pp.433-439.
31. Kijo-Kleczkowska A. (kier.): Mechanizm współspalania zawiesinowych paliw węglowo-wodnych z biomasą. 2008 - 2010. Raport projektu badawczego Nr N N513 309935, 2008-2010.
32. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa, 1984.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy nr N N513 309935.

