

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Techniki Ciepłej

BADANIA ENERGETYCZNO-EMISYJNE KOTŁÓW
WSADOWYCH OPALANYCH SŁOMĄ

Autor:

mgr inż. Marcin Jewiarz

Promotor:

prof. dr hab. inż. Andrzej Szlęk

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Marek Pronobis

prof. dr hab. inż. Jacek Leszczyński

1 Wprowadzenie

Energetyka światowa oparta jest w znaczącym stopniu na paliwach kopalnych, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny. W Polsce wiodącym paliwem jest węgiel, którego roczne zużycie wyniosło w 2011 roku 79 mln ton. Popularność tego źródła energii wynika z jego dostępności oraz niskiej ceny w stosunku do innych paliw konwencjonalnych. Co istotne zużycie jego utrzymuje się na stałym poziomie na przestrzeni ostatnich lat pomimo wzrostu zużycia energii elektrycznej. Związane to jest głównie z obecną polityką energetyczną naszego kraju, promującą produkcję energii elektrycznej i ciepłej z Odnawialnych Źródeł Energii, poprzez wprowadzenie odpowiednich regulacji prawnych zwiększających udział tego typu nośników w bilansie energetycznym kraju.

Odnawialne Źródła Energii według definicji spotykanych w różnych źródłach można podzielić na następujące grupy:

- Odnawialne nośniki energii i odpady palne, do których zaliczyć można:
 - biomasę stałą
 - produkty pochodzenia zwierzęcego
 - gazy i paliwa ciekłe otrzymywane z biomasy
 - odpady komunalne palne pochodzące z wykorzystania ich składników biodegradowalnych
- energię cieków wodnych
- energię promieniowania słonecznego
- energię wiatrową
- energię geotermalną
- energię ruchu fal morskich i przyptyków

Struktura wykorzystania OZE w poszczególnych krajach jest różna i w głównej mierze uzależniona od warunków klimatycznych i geograficznych. W Polsce ponad 90% energii odnawialnej pozyskiwane jest z biomasy, przy czym 85% to biomasa stała, co jest związane z możliwością wykorzystania tego typu paliwa w obecnie istniejących instalacjach energetycznych. W wielu przypadkach biomasa jest współpalana w blokach energetycznych z węglem. Przykładem odnawialnego źródła energii jest słoma, której zasoby możliwe do energetycznego wykorzystania szacuje się na poziomie 10 milionów ton rocznie. Tak duża nadwyżka w produkcji słomy jest efektem głównie zmian w hodowli zwierząt, dlatego też często uznawana jest jako odpad.

Duże instalacje energetyczne wymagają dużych strumieni biomasy o możliwie stałych parametrach, co pociąga za sobą konieczność transportu biomasy, charakteryzującej się bardzo niską gęstością energii, co implikuje duże koszty transportu. Alternatywą jest wykorzystanie odpadów produkcji rolnej, takich jak na przykład słoma, lokalnie, do pokrycia potrzeb własnych gospodarstw rolnych lub do pokrycia potrzeb grzewczych i komunalnych.

Wykorzystanie słomy nadmiarowej realizowane jest między innymi w kotłach wsadowych, których podstawową zaletą jest brak konieczności rozdrabniania słomy. Niestety kotły te charakteryzują się zazwyczaj niską sprawnością i wysoką emisją substancji toksycznych. W celu podwyższenia sprawności i jednoczesnego ograniczenia emisji substancji toksycznych koniecz-

ne jest wyposażenie kotłów wsadowych w układy sterujące. Niniejsza praca poświęcona jest opracowaniu algorytmów sterowania kotłami wsadowymi opalanymi słomą.

2 Cel i zakres pracy

Podjęcie tematyki spalania słomy zbiegło się z realizacją projektu „Opracowanie metod przygotowania biomasy rolnej do energetycznego wykorzystania”, którego część prowadzona była w Instytucie Techniki Ciepłej w latach 2009-2011. Pozwoliło to nawiązać współpracę z jednostkami zajmującymi się energetycznym wykorzystaniem słomy, co miało istotne znaczenie przy realizacji badań w warunkach przemysłowych.

Głównym celem pracy jest obniżenie uciążliwości ekologicznej kotłów wsadowych opalanych słomą, poprzez zastosowanie modyfikacji konstrukcji kotła, oraz wprowadzenie odpowiedniego algorytmu sterowania pracą kotła mogącego pracować w szerokim zakresie właściwości paliwa.

Jako cele cząstkowe obrano:

- identyfikacja czynników mających dominujący wpływ na emisję substancji szkodliwych i sprawność,
- zaproponowanie mechanizmów fizykochemicznych tych wpływów,
- wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjnych kotła,
- opracowanie algorytmów sterowania pracą kotła,
- weryfikacja eksperymentalna opracowanych systemów sterowania

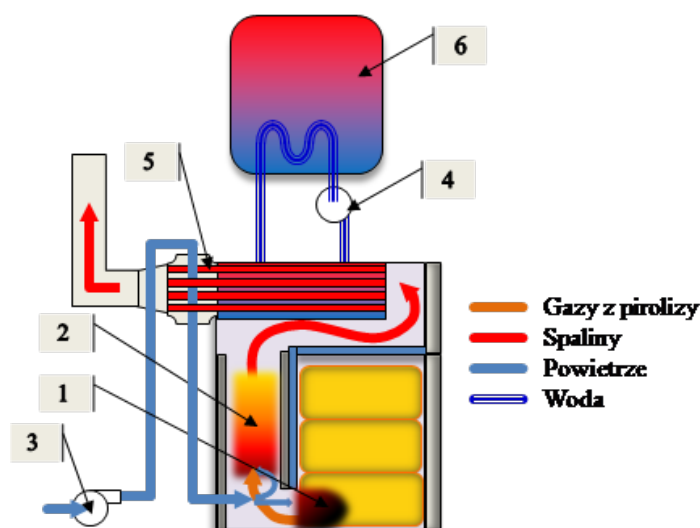
Główne problemy związane ze wsadową technologią spalania słomy to: niska sprawność oraz wysoka emisja CO i pyłu. Praca w głównej mierze opiera się o analizę wpływu różnych systemów sterowania i modyfikacji w dystrybucji powietrza do kotła na emisję tlenku węgla. Obniżenie zawartości pyłu w spalinach jest możliwe poprzez zastosowanie odpowiedniego układu odpylającego. Z tego powodu w pracy względnie mało uwagi poświęcone zostało temu problemowi. Sprawność z kolei jest w dużej mierze zależna od konstrukcji kotła, gdzie szczególnie istotnym czynnikiem jest obieg wody chłodzącej powierzchnie ogrzewalne. Z uwagi na czasochłonny i kosztowny etap projektowania układu wymiany ciepła, założono że ten element jest wykonany w sposób pozwalający odebrać maksymalną ilość energii ze spalin.

Zakres pracy obejmował badania kotła wsadowego opalanego słomą, o mocy cieplnej 150kW. W ramach działań wykonano zostały także badania kotła na słomę, z rusztem przesuwnym o mocy 3,5MW, pracującym w przedsiębiorstwie energetyki ciepłej. Badania te miały na celu porównanie parametrów energetyczno-emisyjnych obu jednostek.

3 Stanowisko badawcze

3.1 Instalacja kotłowa

Badania realizowane w ramach pracy doktorskiej, były możliwe dzięki współpracy z producentem kotłów wsadowych, firmą Metalerg z Oławy. Współpraca ta pozwoliła na wykorzystanie stanowiska do badań kotłów na terenie zakładu produkcyjnego, przy czym stanowisko to zosta-



Rysunek 1: *Uproszczony schemat stanowiska badawczego. 1. Strefa pirolizy, 2. Strefa dopalania, 3. Wentylator powietrza, 4. Pompa wody obiegowej, 5. Rekuperator ciepła ze spalin, 6. Zbiornik akumulacyjny*

ło doposażone w zakresie elementów pomiarowych i sterujących. W badaniach wykorzystywano aparaturę pomiarową będącą własnością Instytutu Techniki Ciepłej.

Sercem stanowiska badawczego był dwukomorowy kocioł wsadowy typu RM, o mocy znamionowej 150kW, który na potrzeby badań został wyposażony w dodatkowe króćce pomiarowe. Pełny wsad kotła stanowiło 6 małych bali prostopadłościennych słomy o wymiarach 40x40x80cm, o masie łącznej około 60kg . Powietrze do kotła dostarczane było za pomocą wentylatora, którego wydajność regulowana była za pomocą przepustnicy.

Konstrukcja kotła dwukomorowego jest zbliżona do tej stosowanej w kotłach wsadowych na węgiel, z tą różnicą że powietrze nie jest dostarczane przez ruszt od dołu a z boku. Taka konstrukcja kotła pozwala na rozdzielenie procesów pirolizy i zgazowania od procesu spalania, które w urządzeniach tego typu zachodzą w dwóch oddzielnych komorach połączonych tzw. „gardzielą”. Powietrze dostarczane jest do komory głównej w przeciwnym kierunku do gazów z procesu odgazowania. Gazy opuszczające komorę główną ulegają wstępnemu wymieszaniu z powietrzem. Warto zaznaczyć, że w konstrukcjach pierwszych kotłów, do rozdziału powietrza na pierwotne i wtórne dochodziło na specjalnej przegrodzie, zwanej „sercem”, gdzie nie było możliwe kontrolowanie stosunku strumienia powietrza pierwotnego do wtórnego. Taki sposób dystrybucji powietrza powodował dużą zależność rozdziału powietrza od parametrów trudnych do kontroli, takich jak na przykład ciąg kominowy. Kocioł podłączony był do zakładowego systemu odbioru ciepła, którego istotnym elementem był zbiornik akumulacyjny o pojemności 35m³, wypełniony wodą. Zastosowanie układu akumulacji ciepła, było niezbędne w celu utrzymania stabilnej temperatury wody zasilającej kocioł.

3.2 Układy sterowania

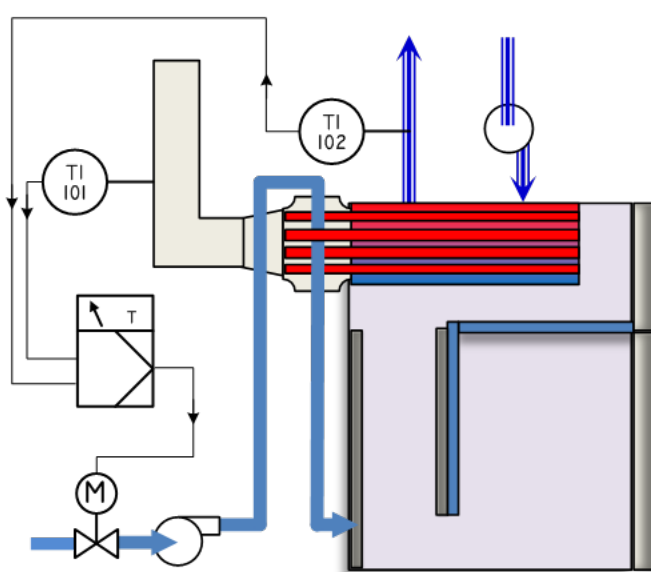
W pracy wykorzystano dwa systemy sterowania: fabryczny oraz autorski. Każdy z tych systemów działał w oparciu o algorytm sterowania dostosowany do zestawu sygnałów wejściowych i wyjściowych. W przypadku układu fabrycznego, nie było możliwości wglądu w kod źródłowy

algorytmu a tym bardziej jego zmiany. Z tego powodu zdecydowano się na opracowanie nowego układu sterowania, działającego o swobodnie programowalny sterownik PLC, z zaimplementowanymi autorskimi algorytmami sterowania.

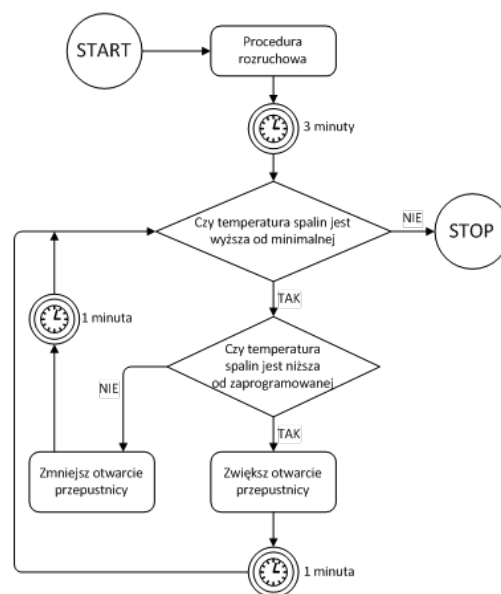
Układ seryjny

Układ sterowania dostarczany wraz z kotłem jest układem bardzo prosty, a jego zasada działania zobrazowana została na rysunku 2. Wydajność wentylatora, regulowana jest przy pomocy specjalnego siłownika zmieniającego położenie przepustnicy, zamontowanej na rurze ssawnej wentylatora. Zastosowany siłownik działał na zasadzie włącz/wyłącz, czyli siłownik wykonywał ruch w jedną lub drugą stronę zależnie od tego który z przewodów sterujących był pod napięciem. Sygnałem sterującym była temperatura spalin w czopuchu, przy czym układ dążył do utrzymania jej stałej wartości poprzez wymuszanie ruchu przepustnicy powietrza.

Algorytm ten posiadał dwa tryby pracy. Pierwszym był program rozpalania, w którym przez 3 minuty podawane było powietrze ze stałą wydajnością (otwarcie przepustnicy około 30%). Po tym czasie następowało przejście w tryb pracy lub wyłączenie wentylatorów co miało miejsce gdy temperatura spalin w czopuchu nie osiągnęła 100°C . W trybie pracy, algorytm co minutę porównywał temperaturę spalin z temperaturą ustawioną przez użytkownika i na tej podstawie zmieniany był kąt otwarcia przepustnicy. W przypadku, gdy temperatura spalin spadała poniżej 100°C , wentylatory i pompa obiegowa były wyłączane.



(a) Schemat fabrycznego układu sterowania



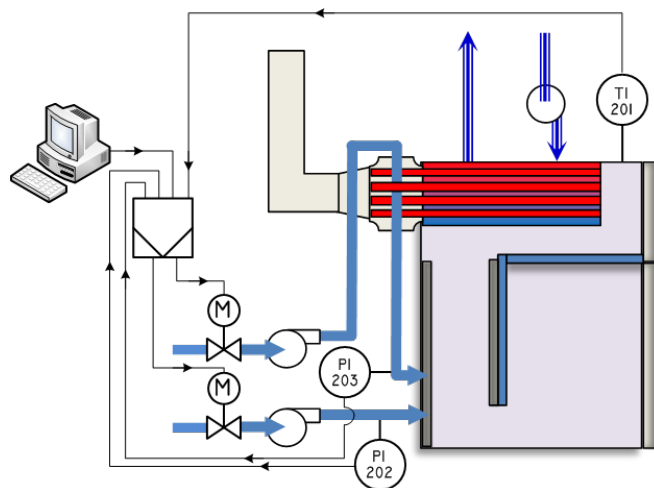
(b) Schemat logiczny fabrycznego algorytmu

Rysunek 2: Fabryczny system sterowania pracą kotła typu RM

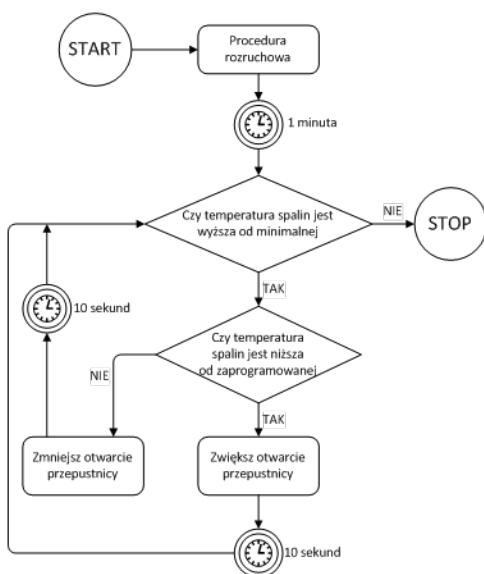
Układ autorski

Schemat systemu sterowania przedstawiono na rysunku 3a. W tym przypadku zastosowano moduł sterujący USB 4711A firmy Advantech, programowany był z poziomu komputera PC. Układ dystrybucji powietrza został rozbudowany o drugi wentylator, za pomocą którego poda-

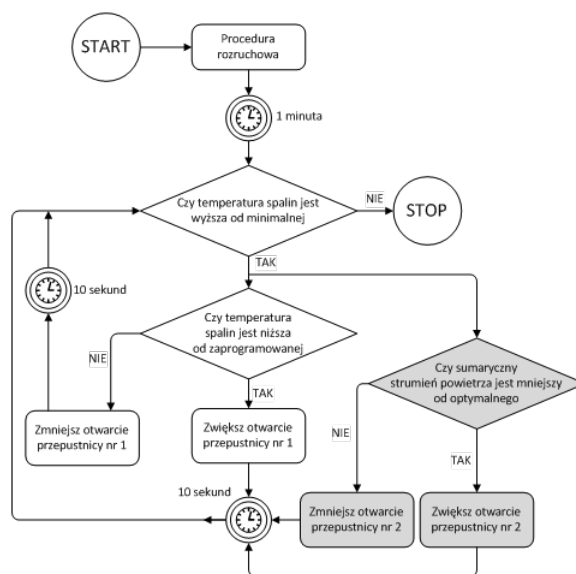
wane było powietrze wtórne. Modyfikacja ta pozwolił na niezależne sterowanie ilością powietrza pierwotnego i wtórnego. Każdy z wentylatorów został wyposażony w siłownik obrotowy do regulacji otwarcia przepustnicy, przy czym siłowniki te sterowane były standardowym sygnałem napięciowym (0-10V). Taki sposób sterowania pozwalał na ustawienie przepustnicy w zadanym położeniu.



(a) Schemat fabrycznego układu sterowania



(b) Schemat logiczny algorytmu ProFan1



(c) Schemat logiczny algorytmu ProFan2

Rysunek 3: Fabryczny system sterowania pracą kotła typu RM

Do sterowania wykorzystano dodatkowo sygnały dwóch dodatkowych czujników:

- Przetworników różnicy ciśnień typ DPT2500 - pomiar nadciśnienia w kolektorach powietrza pierwotnego (PI 202) i wtórnego (PI 203), przesyłających sygnał napięciowy 0-10V
- Termopary typu K (TI 201) - pomiar temperatury spalin przed sekcją konwekcyjnych wymienników ciepła

Algorytm ProFan1

Sama idea logiczna algorytmu jest zbliżona do tej stosowanej w sterowaniu fabrycznym i została przedstawiona na rysunku 3b. Podstawową różnicą są mniejsze stałe czasowe regulacji, oraz zastosowanie proporcjonalnego sygnału (0-10V) do sterowania regulatorami przepustnicy. Algorytm podobnie jak kod standardowy posiadał program rozpalania, jednak na podstawie doświadczeń skrócono czas trwania rozpalania do jednej minuty. W trybie pracy, gdzie stała czasowa wynosiła 10 sekund, system zmieniał stopień otwarcia przepustnicy dążąc do utrzymania stałej temperatury spalin przed sekcją konwekcyjną wymiany ciepła.

Algorytm ProFan2

Algorytm ProFan2 stanowił rozwinięcie algorytmu ProFan1. Schemat logiczny przedstawiony został na rysunku 3c. Realizowano w nim niezależne sterowanie przepustnicą powietrza pierwotnego i wtórnego. W tym celu wykorzystano pomiar trzech parametrów: nadciśnienia w kolektorach powietrza pierwotnego i wtórnego oraz temperatury przed sekcją konwekcyjnej wymiany ciepła. Optymalna ilość powietrza pierwotnego i wtórnego wyznaczana była w oparciu o proste zależności matematyczne.

4 Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne obejmowały szeroki zakres i zostały podzielone na następujące etapy:

- Badania wstępne,
- Badania optymalizacyjne
- Badania energetyczno-emisyjne
- Badania kotła z rusztem ruchomym o mocy 3,5 MW

Wszystkie testy były wykonywane zgodnie z wytycznymi zawartymi w aktualnych na etapie badań normach. W przypadku kotłów wsadowych małej mocy były to normy PN-EN 303-5:2002P oraz PN-EN 303-5:2012P. W przypadku kotła 3,5MW, obowiązującą normą była PN-EN 12952-15:2006. W przypadku kotła wsadowego wszystkie parametry pracy były zapisywane co 10 sekund, co miało na celu dokładne odwzorowanie charakterystyki pracy, oraz dawało możliwość określenia zależności pomiędzy parametrami mierzonymi.

4.1 Badania wstępne

Głównym celem badań wstępnych była analiza paliwa oraz identyfikacja charakterystyki pracy kotła wsadowego. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji wytypowano wstępnie elementy kotła wymagające modyfikacji.

Analiza paliwa

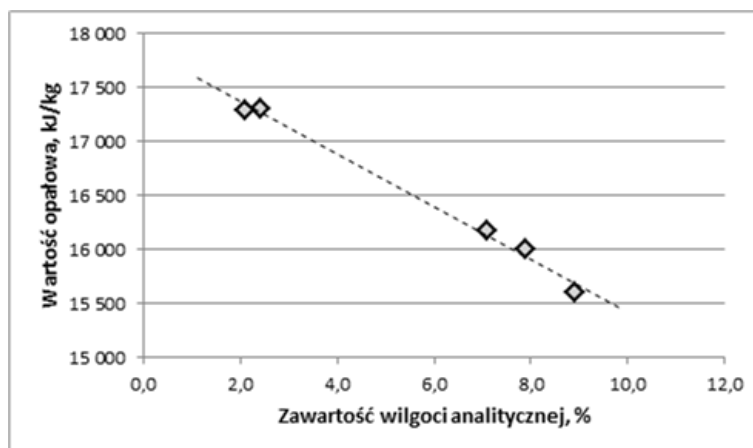
Jakość słomy wykorzystywanej do celów energetycznych, ma znaczący wpływ na proces spalania. Z tego powodu, na tym etapie badań koniecznym było przeprowadzenie analizy technicznej i elementarnej wykorzystywanego paliwa. Analizie poddana została słoma pszeniczna, gdyż taką zabezpieczył producent kotłów na potrzeby prowadzonych badań. Analizie podda-

Tabela 1: Analiza techniczna i elementarna słomy używanej podczas badań

Parametr		Pszenica	
Węgiel	C_t^a	%	42,43
Wodór	H_t^a	%	5,66
Tlen	O^a	%	37,93
Azot	N^a	%	0,89
Siarka całkowita	S_t^a	%	0,05
Chlor	Cl^a	%	0,03
Wilgość analityczna	W^a	%	8,10
Wilgość całkowita	W_t^r	%	16,90
Popiół	A^a	%	5,70
Części lotne	V^a	%	69,7
Ciepło spalania	Q_s^a	kJ/kg	17 000
Wartość opałowa	Q_i^a	kJ/kg	15 567
	Q_i^r	kJ/kg	14 406

Stany odniesienia: a analityczny, r-roboczy, d-suchy

ne zostały także słomy ze wcześniejszych okresów wegetacyjnych, co miało na celu analizę zmienności parametrów paliwa na przestrzeni lat. Głównym parametrem charakteryzującym przydatność słomy do energetycznego wykorzystania jest jej wilgotność, która bezpośrednio wpływa na wartość opałową paliwa. Charakterystyka zależności przedstawiona na wykresie 4, jest zgodna z danymi które można znaleźć w literaturze. Zależność wartości opałowej od zawartości wilgoci, pozwala więc na określenie ilości energii chemicznej, możliwej do uzyskania z jednostki paliwa.



Rysunek 4: Wykres zależności wartości opałowej (stan analityczny) od zawartości wilgoci w badanych próbkach paliwa.

Tabela 2: Analiza techniczna i elementarna słom z różnych okresów wegetacyjnych, w przeliczeniu na stan suchy

Parametr		Rok	2009		2010	
			Pszenica	Żyto	Pszenica	Żyto
Węgiel	C_t^d	%	49,00	48,35	49,23	48,85
Wodór	H_t^d	%	6,14	5,79	5,66	5,66
Tlen	O^d	%	41,17	40,95	41,68	41,00
Azot	N^d	%	0,47	0,53	0,45	0,68
Siarka całkowita	S_t^d	%	0,05	0,06	0,05	0,08
Chlor	Cl^d	%	0,02	0,03	0,03	0,03
Popiół	A^d	%	3,20	4,10	2,90	3,70
Części lotne	V^d	%	79,40	77,90	79,90	79,10
Ciepło spalania	Q_s^d	kJ/kg	18 925	18 903	19 039	18 954
Wartość opałowa	Q_i^d	kJ/kg	17 585	17 601	17 799	17 713

Stany odniesienia: a analityczny, r-roboczy, d-suchy

Sprawność

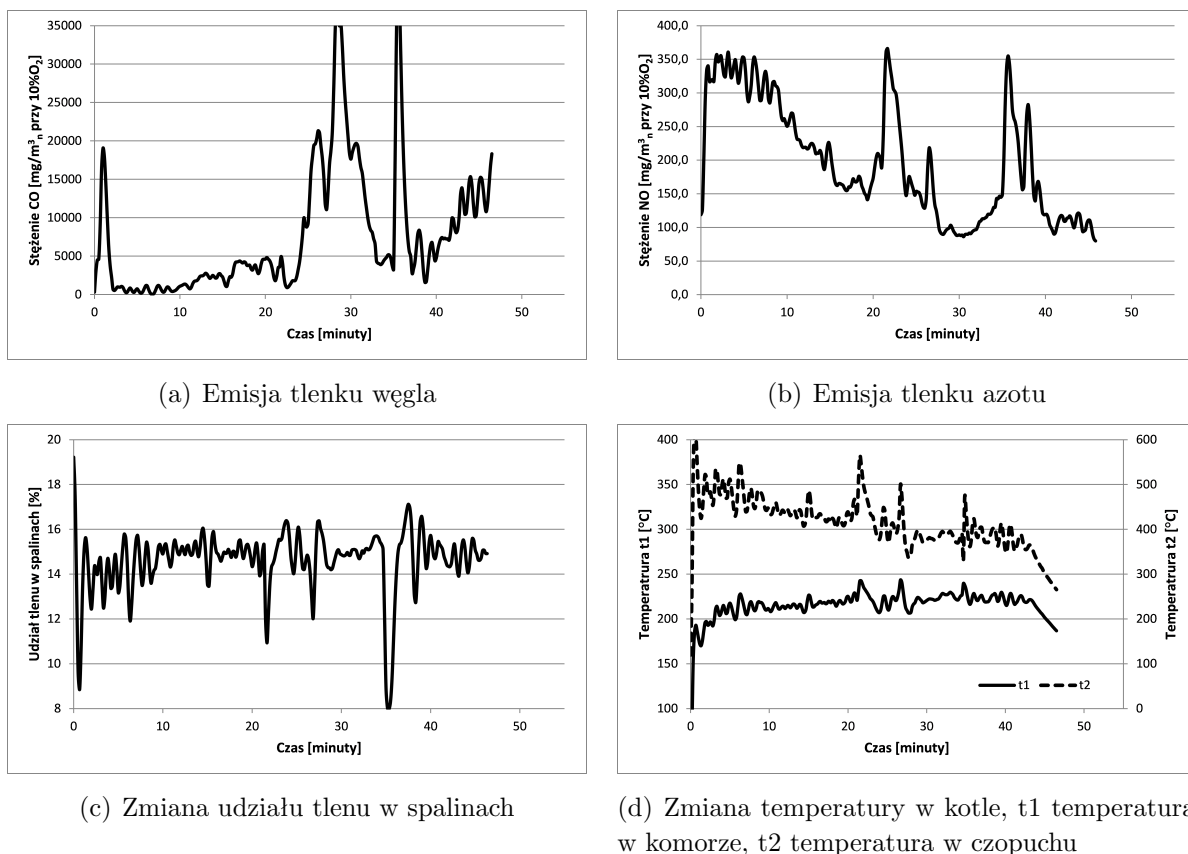
Do badań wstępnych użyto słomy pszenicznej pochodzącej z 2012 roku, o właściwościach zestawionych w tabelicy 6.4. Na podstawie danych pomiarowych i analizy technicznej paliwa określono sprawność metodą bezpośrednią, która wyniosła $\eta_k = 61,2\%$. Wartość ta wskazuje że duża część energii chemicznej wprowadzonej w paliwie, pozostaje niewykorzystana. Czynniki które mogą mieć wpływ na to, zostały przeanalizowane w dalszej części tego rozdziału.

Emisja substancji szkodliwych

Na wykresie 5a przedstawiono wykres zmienności emisji tlenku węgla w trakcie jednego testu. W pierwszych 20 minutach stężenie CO jest na dużo niższym poziomie niż w pozostałej części testu. Wstępna analiza wykazała że przyczyną takiej charakterystyki emisji było ułożenie słomy wewnątrz komory głównej, dwa rzędy po trzy bele. Okres niskiej emisji CO jest związany z wypalaniem się pierwszego rzędu słomy umieszczonego bliżej dysz powietrza. Dalsza część testu związana była z wypalaniem drugiej warstwy słomy. Głównym czynnikiem który wpłynął na tak wysoką emisję CO był gorszy dostęp powietrza do paliwa. Spowodowane to było większą odległością pomiędzy dyszami powietrznymi a paliwem, w skutek czego powietrze uderzało w słomę z dużo niższą prędkością w porównaniu do spalania pierwszego rzędu.

Na wykresie 5b, zaobserwować obniżanie się emisji tlenków azotu w trakcie testu. Trudno jednoznacznie wskazać powód takiej zmiany, prawdopodobnie jednak, w skutek mniejszej penetracji warstwy paliwa przez powietrze, obniżał się stopień konwersji azotu związanego w paliwie do tlenków azotu.

Zawartość tlenu w spalinach jest istotnym parametrem, który pozwala na określenie stosunku nadmiaru powietrza λ . Norma PN-EN 303-5:2002P precyzuje poziom odniesienia dla zawartości tlenu w spalinach jako 10%, co po przeliczeniu dla słomy odpowiada stosunkowi $\lambda = 1,9$. Wykres 5c obrazuje zmianę udziału tlenu w spalinach w trakcie testu, który to parametr praktycznie przez cały test kształtuje się na poziomie powyżej 10%. Jest to prawdo-



Rysunek 5: Zmiany poszczególnych parametrów pracy kotła w trakcie badań wstępnych

podobnie spowodowane złym doбором funkcji sterującej, lub nieodpowiednim rozdziałem na powietrze pierwotne i wtórne. Standardowy system sterowania, gdzie powietrze dostarczane jest do kotła przy pomocy jednego wentylatora nie daje możliwości rozdzielnej regulacji ilości powietrza pierwotnego i wtórnego. Z tego powodu trudno określić jednoznacznie który z czynników miał decydujący wpływ na tak wysoki poziom tlenu.

Analogiczny przebieg do tych przedstawionych dla tlenku węgla i azotu, można również zaobserwować na wykresie temperatury spalin w czasie testu, który został przedstawiony na rysunku 5d. Analizowane były temperatury spalin w dwóch różnych lokalizacjach: w czopuchu kotła (t_1) oraz w komorze kotła, przed sekcją konwekcyjnej wymiany ciepła (t_2).

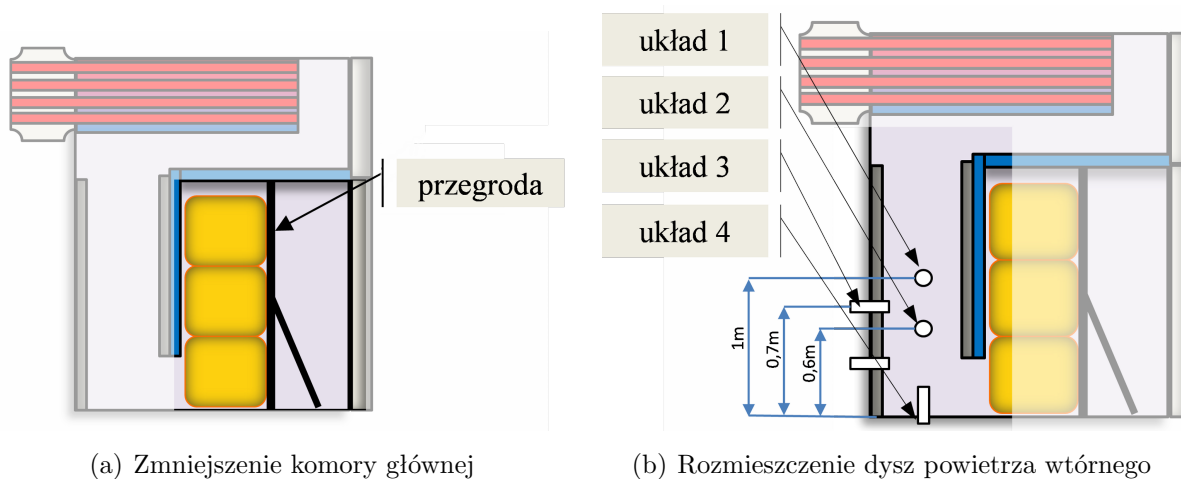
Modyfikacje kotła

Analiza wyników badań wstępnych pozwoliła również określić rodzaj modyfikacji koniecznych do przeprowadzenia dalszych badań. Zmiany polegały na:

- zmniejszeniu komory głównej,
- zastosowaniu oddzielnych wentylatorów dla powietrza pierwotnego i wtórnego,
- umieszczeniu dysz powietrza wtórnego.

Zmniejszenie objętości komory głównej o połowę zostało podyktowane gorszymi wskaźnikami emisji dla spalania drugiego rzędu paliwa. Jak ustalono wcześniej, w drugiej fazie odległość pomiędzy dyszami a słomą była zbyt duża, co skutkowało wysoką emisją CO. Zmniejszenie komory głównej okazało się być bardzo trudnym zadaniem. Na czas badań zastosowano rozwią-

zanie zastępcze, które polegało na umieszczeniu przegrody wykonanej ze stali, która dodatkowo została zabezpieczona warstwą izolacji ogniotrwałej, co zostało przedstawione na rysunku 6a. Użycie materiału izolacyjnego miało na celu uniknięcie deformacji przegrody, oraz zmniejszenia strat ciepła na rzecz pozostałej, pustej części komory. Wykorzystanie dwóch oddzielnie sterowanych wentylatorów, wymagało zastosowania dodatkowych dysz, którymi dostarczane było powietrze wtórne. Konieczną w tym przypadku była analiza wpływu umiejscowienia dysz powietrza wtórnego na emisję substancji szkodliwych. Zaproponowano 4 układy dysz, umiejscowione na różnych wysokościach komory dopalającej, które przedstawiono na rysunku 6b. Lokalizacje te były dobierane na podstawie przesłanek literaturowych, bądź własnych obserwacji. W układach 1 i 2 powietrze wtórne dostarczane było poprzez rurę z nawierconymi otworami na całej długości którą wsuwano w specjalne króćce. Układy te zastosowano w celu analizy wpływu lokalizacji, a dokładniej wysokości dostarczania powietrza wtórnego na przebieg procesu spalania i emisję tlenku węgla. Wysokość na jakiej zostały zamontowane króćce, to mierząc od podstawy kotła, 1m dla układu 1 i 0,6m dla układu 2. Układ 3 składał się z 7 dysz umiejscowionych w tylnej części kotła na wysokości 0,7m. Taka lokalizacja została zaproponowana, w celu oceny wpływu turbulencji powstałej w skutek uderzenia strugi powietrza o ścianę, na proces dopalania. Układ 4 składał się z dwóch dysz umiejscowionych w bocznej części komory dopalającej na wysokości dysz powietrza pierwotnego (0,4 metra), pod kątem 30° względem podstawy kotła.



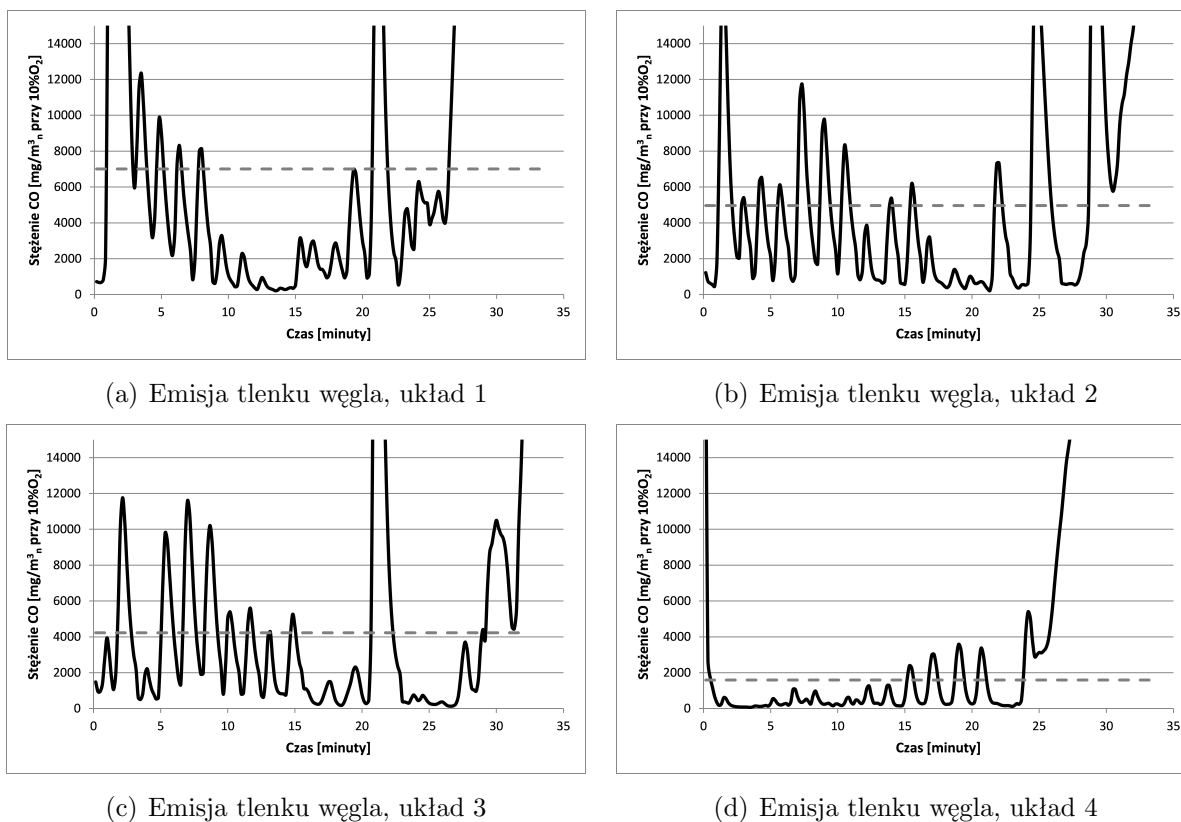
Rysunek 6: Schemat przedstawiający zakres modyfikacji kotła

4.2 Badania optymalizacyjne

Optymalizacja umiejscowienia dysz powietrza wtórnego

W pracy zaproponowane zostały cztery warianty lokalizacji dysz powietrza wtórnego (rysunek 6b). Na każdym układzie zostały wykonane testy z wykorzystaniem algorytmu ProFan1, który sterował ilością powietrza pierwotnego. Powietrze wtórne było na stałym poziomie odpowiadającym 40% otwarcia przepustnicy. Kryterium optymalizacyjnym w tym przypadku było uzyskanie możliwie najniższej emisji tlenku węgla. Zestawienie zmienność emisji CO podczas poszczególnych testów zestawiono na rysunku 7.

Z zaproponowanych czterech modyfikacji lokalizacji dysz powietrza wtórnego, najlepsze parametry emisyjne, to jest najniższą emisję tlenku węgla, uzyskano dla układu 4. Z uwagi na



Rysunek 7: Przebieg emisji tlenku węgla podczas badań optymalizacyjnych, dla poszczególnych układów dysz powietrza wtórnego

najniższą emisję CO ta lokalizacja dysz powietrza wtórnego została wybrana do badań nad algorytmem ProFan2. Wartości średnie z każdego z testów zestawiono w tabeli 3. Co istotne każdej z analizowanych lokalizacji dysz powietrza wtórnego obserwowano zwiększenie emisji CO w końcowej fazie testu, co mogło być związane z małą ilością paliwa pozostałą w komorze. Dodatkowo w każdym z analizowanych przypadków na podwyższenie emisji średniej wpływało również wysokie stężenie CO na koniec testu, będące rezultatem bardzo nieefektywnego wypalania się koksiku.

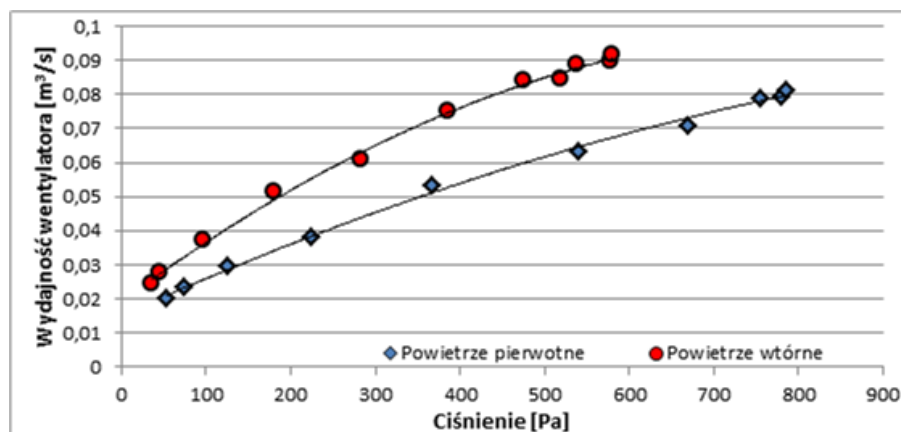
Tabela 3: Zestawienie średnich dla czterech lokalizacji dysz powietrza wtórnego

Parameter		układ 1	układ 2	układ 3	układ 4	układ 4''
CO_{sr}	mg/m_n^3 przy 10% O_2	7008	4965	4229	1592	1657
O_2_{sr}	%	10,1	10,2	9,9	10,7	10,9
NO_{sr}	mg/m_n^3 przy 10% O_2	225	215	243	272	275
t_2_{sr}	$^{\circ}C$	495	201	493	521	519

Punkt pomiaru temperatury (sygnał sterujący pracą kotła) założony na podstawie badań wstępnych, a więc temperatura t_2 , okazał się być poprawny pod kątem emisji CO. Z uwagi na znaczne obniżenie emisji tlenku węgla dla układu 4, postanowiono uznać wartość temperatury t_2 równą $500^{\circ}C$ jak optymalną.

Badania algorytmu ProFan2

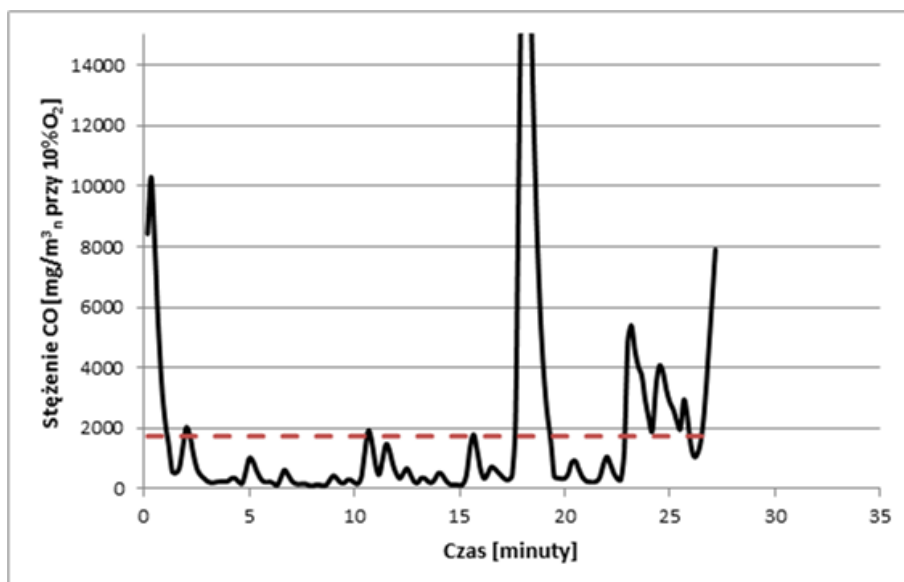
Algorytm ProFan2 składał się z dwóch modułów, pierwszy sterujący ilością powietrza pierwotnego, drugi sterujący ilością powietrza wtórnego. Podstawowy moduł był analogiczny do tego zastosowanego w algorytmie ProFan1, natomiast w przypadku modułu sterującego ilością powietrza wtórnego niezbędny był dodatkowy sygnał sterujący. W kotłach węglowych małej mocy często stosuje się w tym celu szerokopasmowe sondy lambda. Urządzenia te jednak mają wiele ograniczeń, między innymi wrażliwość na stałe zanieczyszczenia (pył), oraz wysoką niepewność pomiaru przy wysokich poziomach tlenu w spalinach. Dlatego też zastosowanie takiego układu do sterowania pracą kotła wsadowego wydało się być nieodpowiednim rozwiązaniem. W algorytmie ProFan2 ilość powietrza wtórnego określana była na podstawie równań bilansowych. Do poprawnego działania całego układu sterowania niezbędny był także pomiar strumienia powietrza doprowadzanego do kotła. W tym celu wykorzystany został pomiar nadciśnienia w kolektorach powietrza pierwotnego i wtórnego. Jak wykazały badania, możliwym jest określenie wydajności wentylatora na podstawie pomiaru nadciśnienia, co zostało przedstawione na rysunku Charakterystyka emisji tlenku węgla dla testu z wykorzystaniem algorytmu



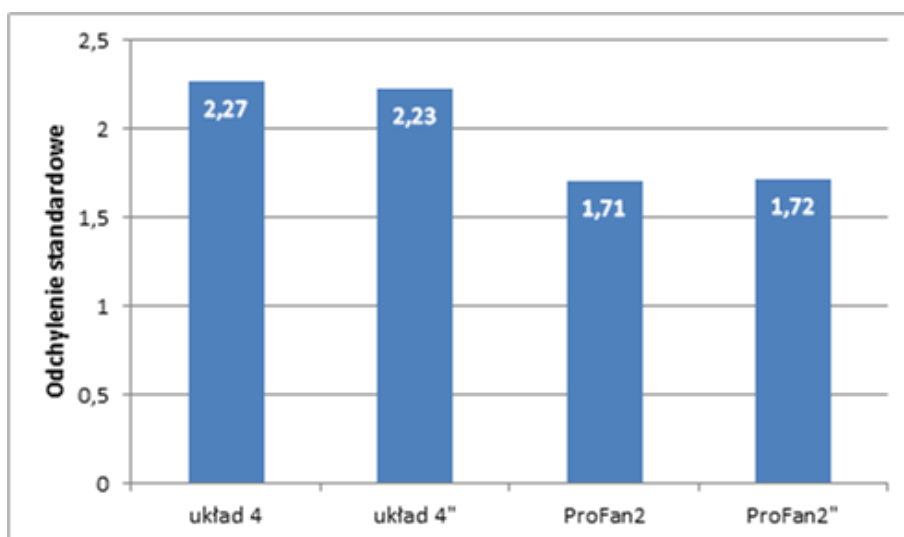
Rysunek 8: Zależność wydajności wentylatora od nadciśnienia w kolektorach powietrza pierwotnego i wtórnego.

ProFan2 została przedstawiona na wykresie 9. Wartość średnia stężenia CO dla tego testu jest wyższa od tej otrzymanej w testach wykorzystujących algorytm ProFan1, i wynosi 1750 mg/m_n^3 w przeliczeniu na 10% tlenu w spalinach. Zauważyć należy że pik w emisji CO w okolicy dwudziestej minuty, wpłynął na wartość średnią z całego testu. Analizując przebieg emisji tlenku węgla widać że zastosowany algorytm nie wpłynął w widoczny sposób na zmiany stężenia tego związku w spalinach.

Jednym z założeń przy opracowywaniu algorytmu ProFan2 była zmniejszenie wahań udziału tlenu w spalinach, poprzez wyrównywanie sumarycznej ilości powietrza dostarczanego do kotła. W celu zwiększenia reprezentatywności otrzymanych wyników wykonany został drugi test z wykorzystaniem badanego algorytmu. Następnie otrzymane dane poddano analizie statystycznej w celu wyznaczenia odchylenia standardowego w populacji udziału tlenu w spalinach dla każdego testu. Wyniki analizy zestawiono na wykresie 10, na którym można zaobserwować podobne wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych przypadków. Niższe wartości odchylenia dla testów z wykorzystaniem algorytmu ProFan2, wskazują na zmniejszenie amplitudy wahań udziału tlenu w spalinach, co było jednym z celów przy opracowywaniu tego algorytmu.



Rysunek 9: Emisja tlenku węgla w trakcie testu z wykorzystaniem algorytmu ProFan2



Rysunek 10: Wartości odchylenia standardowego dla udziału tlenu w spalinach podczas poszczególnych testów

4.3 Badania energetyczno-emisyjne

Sprawność

Badania przeprowadzone zostały na kotle 150kW, który opalany był tym samym paliwem co podczas badań wstępnych i optymalizacyjnych. Na test składały się cztery wsady po trzy beły słomy pszenicznej o wymiarach 40x40x80cm i masie 8-10kg każda. Po wypaleniu się wsadu, wyłączane były wentylatory, a na warstwie żaru umieszczany był kolejny wsad. Proces ten trwał zwykle około 2 minut, i został zaznaczony na wykresach emisji substancji szkodliwych kolorem fioletowym. Głównym celem tych badań było określenie charakterystyki pracy kotła w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, kiedy spalane jest kolejno kilka wsadów, w celu podgrzania wody w zbiorniku akumulacyjnym.

W bilansie energetycznym kotła uwzględnione zostały cztery wsady. Na podstawie masy słomy oraz jej wartości opałowej, określona została wartość energii chemicznej wprowadzonej w paliwie, E_{ch} . Pomiary różnicy temperatury oraz strumienia przepływu wody obiegowej pozwoliły na określenie ilości energii wyprodukowanej przez kocioł, Q_{uz} . Na podstawie tych wartości obliczono sprawność dla poszczególnych wsadów oraz dla całego testu. Wyniki analizy energetycznej zestawione zostały w tabeli 4.

Tabela 4: Wyniki z badań energetyczno-emisyjnych kotła typu RM o mocy 150kW

Parametr	Symbol	Jedn.	Cały test	Wsad 1	Wsad 2	Wsad 3	Wsad 4
Energia w paliwie	E_{ch}	MJ	1 198,2	295,4	268,8	312,2	322,0
Energia odebrana	Q_{uz}	MJ	913,5	221,4	210,4	232,1	249,6
Sprawność	η	%	76,24	74,96	78,28	74,37	77,52

Analiza prezentowanych danych wskazuje, że kocioł w trakcie całego okresu testu pracował ze sprawnością oscylującą wokół wartości 76%. Zaznaczyć należy że w przypadku kotła wsadowego nie jest możliwe określenie sprawności chwilowej, z powodu braku możliwości pomiaru chwilowego strumienia paliwa i straty chemicznej w produktach stałych. Mimo wszystko porównując otrzymany wynik ze sprawnością z badań wstępnych $\eta_k = 61,2\%$, zaobserwowano znaczący wzrost sprawności o prawie 15 punktów procentowych.

Emisja substancji szkodliwych

Poziom dopuszczalnej emisji substancji szkodliwych a w szczególności tlenku węgla i tlenku azotu, oraz pyłu jest zwykle ograniczany przez odpowiednie normy. Na podstawie norm PN-EN 303-5:2002P oraz EN 303-5:2012P (która została wprowadzona w momencie pisania pracy), wyróżnić można 5 klas kotłów ze względu na emisję CO i pyłu, co zostało zaprezentowane w tabeli 5. Spełnienie norm emisyjnych dla danej klasy jest kluczowe nie tylko z punktu widzenia oddziaływania na środowisko naturalne. Często wyższa klasa warunkuje możliwość ubiegania się o dotację na zakup kotła. Limity emisyjne dla kotłów wsadowych są wyższe aniżeli dla kotłów automatycznych, co jest związane z koniecznością uzupełniania paliwa, który to proces wpływa na podwyższenie poziomu emisji tlenku węgla i pyłu.

Zestawienie średnich wartości przedstawione w tabeli 6, pokazuje że emisja w przypadku spalania dwóch wsadów (wsad 1 i 4) jest nieznacznie powyżej limitu dla najbardziej rygorystycznej klasy 5 pod względem emisji CO. Spalanie wsadu 2 i 3 charakteryzuje dużo wyższa średnia emisja będąca na poziomie limitu dla klasy 3. Średnia emisja z testu jest wyższa od limity klasy 4 o prawie $300 \text{ mg}/\text{m}_n^3$. Emisja pyłu ze spalania była określona dla całego testu, z racji tego że grawimetryczny pomiar pyłu nie byłby miarodajny dla okresu w którym wypalał się jeden wsad. Emisja pyłu zawiera się w limicie emisyjnym dla klasy 3. Z uwagi na fakt że emisję pyłu bardzo trudno obniżyć metodami pierwotnymi (związanymi z procesem spalania), obniżenie stężenia pyłu w spalinach może wymagać zastosowania urządzeń odpylających. Spełnienie limitów najbardziej rygorystycznej, klasy 5, wymagałoby obniżenia emisji pyłu o prawie 50%.

Na rysunku 11a przedstawiona została zmiana emisji tlenku węgla w czasie testu, na którym kolorem fioletowym zostały oznaczone okresy uzupełniania paliwa. Warto zaznaczyć że poza

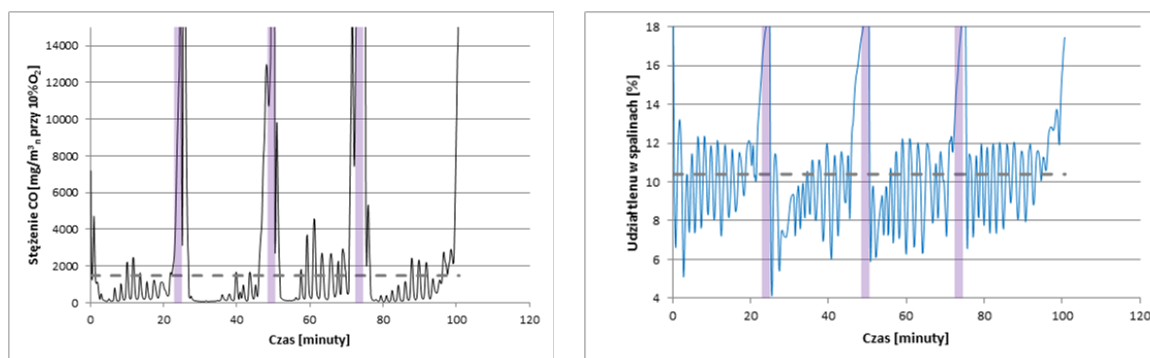
Tabela 5: *Limity emisyjne dla CO i pyłu kotłowych biomasowych o mocy 50-150kW zgodnie z normami PN-EN 303-5:2002P i 2012P*

Moc [kW]	PN-EN 303-5:2002P			PN-EN 303-5:2012P	
	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4	Klasa 5
CO [mg/m_n^3] przy 10% O_2					
50-150	12500	5000	2500	1200	700
Pył [mg/m_n^3] przy 10% O_2					
50-150	180	150	125	75	60

Tabela 6: *Wartości emisji uśrednione dla poszczególnych wsadów*

Parametr	Jedn.	Średnia	Wsad 1	Wsad 2	Wsad 3	Wsad 4
$O_{2\ sr}$	%	10,4	10,7	10,0	10,2	10,6
CO_{sr}	mg/m_n^3	1483	859	1830	2357	886
NO_{sr}	przy	310	324	320	288	308
Pyl	10% O_2	107	-	-	-	-

trzecim wsadem, kocioł pracował przy emisji CO poniżej $2000\ mg/m_n^3$ przy 10% tlenu w spalinach, co jest wynikiem bardzo dobrym porównując ze stanem przed wprowadzeniem zmian. Profil emisji dla wsadu numer 2, pomimo tego iż średnia była dużo wyższa niż w przypadku analizy dla wsadu 1 i 4, wygląda najbardziej korzystnie, a na wysoką wartość średnią miał głównie wpływ gwałtowny wzrost emisji CO w końcowej fazie wypalania się wsadu.



(a) Emisja tlenu węgla

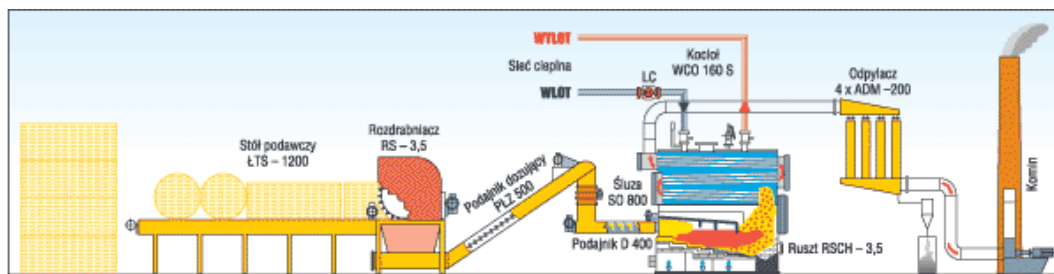
(b) Udział tlenu w spalinach

Rysunek 11: *Zmiany emisji tlenu węgla, oraz udział tlenu w spalinach podczas badań energetyczno-emisyjnych*

Na wykresie 11b przedstawiono zmianę udziału tlenu w trakcie testu. Na uwagę zasługują wahania tego parametru w czasie. W większości przypadków mieściły się one w zakresie 4 punktów procentowych udziału tlenu w spalinach. Jedynie dla wsadu trzeciego różnica ta była większa i wynosiła prawie 6 punktów procentowych. Podobnie jak podczas badań optymalizacyjnych udział tlenu w spalinach oscylował wokół 10% i średnia dla całego testu wyniosła 10,4% przy średniej temperaturze spalin przed sekcją wymienników $485^{\circ}C$.

4.4 Badania kotła o mocy 3,5MW

Ta część badań została zrealizowana w kotłowni należącej do Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej w Lubaniu, w której pracują dwa kotły z rusztem ruchomym opalane słomą o mocy 3,5MW każdy. Schemat instalacji został przedstawiony na rysunku 12



Rysunek 12: Schemat instalacji kotłowej do spalania słomy w formie siewki w PEC Lubień

Sprawność

W ramach badań analizowano główne parametry pracy kotła takie jak: temperatura i skład spalin, temperatura wody na wlocie i wylocie z kotła, strumień przepływu wody, zawartość pyłu w spalinach przed i za urządzeniami odpylającymi. Pomiary wykonano zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 12952-15:2006P Wyniki bilansu energetycznego kotła wskazują wyższą sprawność aniżeli ta otrzymana dla kotła wsadowego co przedstawiono na tablicy 7. Niestety charakterystyka podawania paliwa, które dostarczane było z siewkarni przez układ podajników uniemożliwiła pomiar chwilowego strumienia paliwa a tym samym nie było możliwe określenie sprawności chwilowej.

Tabela 7: Analiza sprawności podczas badań kotła z rusztem ruchomym o mocy 3,5MW

Parametr	Symbol	Jedn.	Cały test
Energia w paliwie	E_{ch}	MJ	17 298
Energia odebrana	Q_{uz}	MJ	14 222
Sprawność	η_k	%	82,22

Emisja substancji szkodliwych

W tabeli 8 zestawiono średnie wartości emisji substancji szkodliwych dla testu na kotle 3,5MW. Wyniki dla tego kotła powinny zostać przeliczone na 6% tlenu, gdyż taki poziom odniesienia narzuca norma Do celów porównawczych zostały one jednak przeliczone na 10% tlenu w spalinach co ułatwi interpretację wyników. Z przedstawionych danych wynika że emisja CO jest na wyższym poziomie niż w przypadku kotła wsadowego z autorskim systemem sterowania. Emisję pyłu mierzono za cyklonem służącym do odpylenia spalin, dlatego też wartość ta nie może być bezpośrednio porównana z wartościami z testu dla kotła wsadowego. Z tego względu mierzony był także unos z kotła metodą grawimetryczną, na odcinku pomiarowym przed urządzeniem odpylającym. Z danych przedstawionych w tabeli 8 wynika że emisja pyłu z kotła była prawie siedmiokrotnie wyższa niż w przypadku kotła wsadowego małej mocy. Przyczyną tak

dużej różnicy jest przede wszystkim różnica w konstrukcji kotła. Badana jednostka to kocioł z rusztem ruchomym, gdzie powietrze pierwotne podawane jest od dołu. Popiół po spalaniu słomy jest bardzo drobny, i z łatwością unosi się wraz ze spalinami.

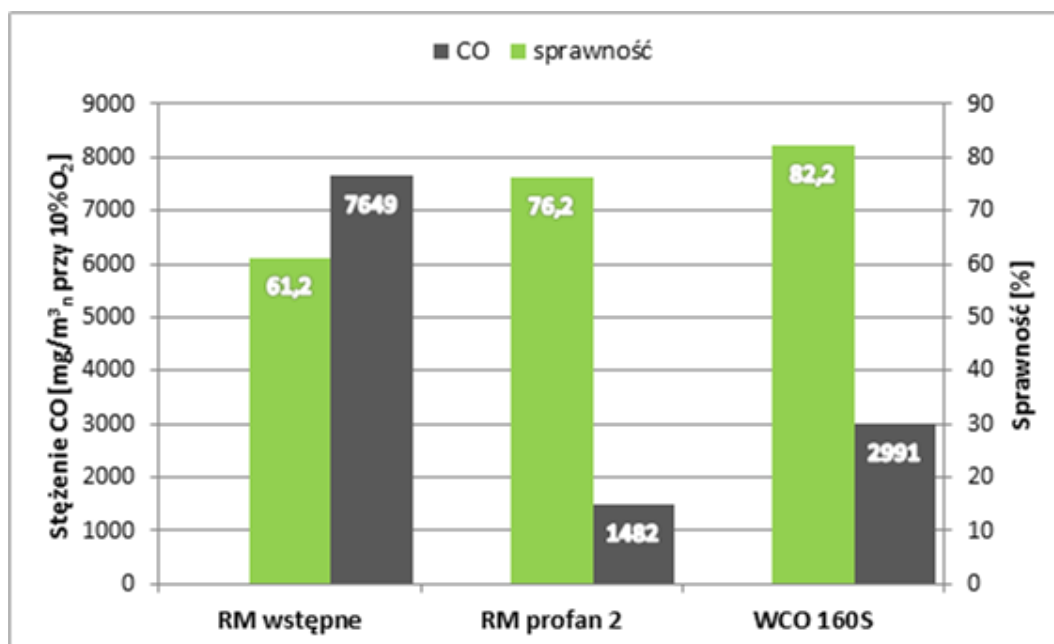
Tabela 8: Wartości emisji, uśrednione dla całego testu

Parametr	Jedn.	Średnia
$O_{2\ sr}$	%	11,2
CO_{sr}	mg/m_n^3	2991
NO_{sr}	przy	153
Pyl	10% O_2	112
$Unos$		713

Udział tlenu w spalinach podczas testu oscylował wokół 11%, czyli poziomie prawie dwukrotnie wyższym niż poziom odniesienia dla kotłów dużej mocy (6% O_2). Świadczyć to może o zbyt dużej ilości powietrza dostarczanej do kotła, lub o nieprawidłowym rozdziale pomiędzy powietrze pierwotne i wtórne.

4.5 Podsumowanie badań energetyczno-emisyjnych

Analiza energetyczno-emisyjna kotła wsadowego wykazała znaczące podwyższenie sprawności oraz obniżenie emisji tlenku węgla, w porównaniu do kotła wyposażonym w fabryczny układ sterowania. Wpływ na to miały wprowadzone modyfikacje kotła, co potwierdza poprawność ich działania. Porównanie parametrów energetycznych i emisyjnych z danymi z badań wykonanych na kotle 3,5MW została przedstawione na wykresie 13. Wynika z nich że kotły wsadowe opalane słomą mogą osiągać zbliżone poziomy emisji tlenku węgla i sprawności co kotły na słomę, wykorzystywane w energetyce zawodowej.



Rysunek 13: Schemat instalacji kotłowej do spalania słomy w formie siewczki w PEC Lubań

5 Wnioski

W ramach pracy przeprowadzono badania dwóch kotłów opalanych słomą: wsadowego o mocy 150kW oraz kotła z rusztem ruchomym o mocy 3,5MW. Badania na kotle wsadowym, które przeprowadzono na terenie zakładu producenta, były podzielone na trzy etapy. Pierwszym z nich były badania wstępne, w trakcie których wypracowano następujące wnioski:

- I. Spalanie w dwukomorowym kotle wsadowym, w którym paliwo umieszczane jest w dwóch rzędach, przebiega dwufazowo. W pierwszej fazie dochodzi do wypalenia się pierwszego rzędu słomy. Rząd ten zlokalizowany jest bliżej dysz powietrza pierwotnego. Podczas tej fazy, emisja tlenku węgla jest dużo niższa, niż w fazy drugiej, kiedy to ma miejsce spalanie drugiego rzędu słomy. Drugi rząd spala się przy dużo wyższej emisji tlenku węgla, co związane jest z dwoma czynnikami. Pierwszym z nich jest dużo większa odległość od dysz powietrza, co sprawia że powietrze dociera do frontu spalania z dużo niższą prędkością, co wpływa na obniżenie temperatury gazów powstałych podczas pirolizy. Drugim czynnikiem jest pusta część komory pozostała po pierwszym rzędzie, która z uwagi na chłodzone ściany komory głównej sprzyja ochładzaniu się gazów, obniżając efektywność procesu dopalania w komorze dopalającej.
- II. Istnieje korelacja pomiędzy temperaturą a udziałem tlenu w spalinach. Temperatura spalin przed sekcją konwekcyjnej wymiany ciepła jest silniej skorelowana z zawartością tlenu, niż temperatura w czopuchu kotła. Sygnał z termoelementu umieszczonego przed sekcją wymiany ciepła może zostać użyty do sterowania pracą kotła.
- III. Sprawność kotła wsadowego pracującego w oparciu o standardowy układ sterowania była na niskim poziomie i wynosiła 63%. Dodatkowo zaobserwowano silne wahania udziału tlenu w spalinach, oraz w stężeniu tlenku węgla. Ten drugi parametr wpływał na obniżenie sprawności poprzez generowanie straty chemicznej w spalinach.

Drugim etapem pracy były badania optymalizacyjne, w trakcie których przebadano zaproponowane modyfikacje dystrybucji powietrza wtórnego. Przeanalizowano także algorytmy sterowania o różnym stopniu zaawansowania. Kryterium optymalizacyjnym w tym przypadku było osiągnięcie jak najniższej emisji tlenku węgla. Na tym etapie pracy, wysunięto następujące wnioski:

- IV. W celu wyeliminowania dwufazowej charakterystyki procesu spalania należy zmniejszyć głębokość komory głównej, tak aby mieściła jeden rząd beli. Chcąc poddać analizie taką ewentualność, a przy tym uniknąć wysokich kosztów związanych z przebudową kotła, zastosowano rozwiązanie zastępcze polegające na użyciu przegrody stalowej obłożonej izolacją ogniotrwałą.
- V. Lokalizacja i sposób dostarczania powietrza wtórnego w kotle wsadowym ma kluczowy wpływ na emisję tlenku węgla. Spośród czterech zaproponowanych lokalizacji dysz powietrza wtórnego, oznaczonych jako układ 1,2,3 i 4, tylko układ 4 spełnił postawione kryterium optymalizacyjne, osiągając średnią emisję tlenku węgla w trakcie testu równą 1597 mg/m_n^3 przy 10% O_2 . Jest to wartość kilkukrotnie mniejszą niż w przypadku pozostałych układów. W każdym z przedstawionych układów powietrze wtórne dostarczane było przez oddzielnie sterowany wentylator.

- VI. Sterowanie pracą kotła na podstawie sygnału z termoelementu umieszczonego przed sekcją wymienników ciepła, zastosowane w algorytmie ProFan1, pozwoliło na szybszą reakcję na zmiany w parametrach pracy kotła niż miało to miejsce w przypadku sterowania fabrycznego, działającego w oparciu o pomiar temperatury w czopuchu kotła. Ponadto zastosowanie autorskiego systemu sterowania wraz z wprowadzonymi modyfikacjami pozwoliło na zwiększenie wydajności kotła.
- VII. Możliwe jest zastąpienie pomiaru udziału tlenu w spalinach (na przykład za pomocą sondy lambda), poprzez użycie prostych zależności matematycznych i pomiaru nadciśnienia w kolektorze powietrza pierwotnego i wtórnego. Taką metodę, wykorzystano w układzie sterowania opartym o algorytm ProFan2. Wyniki badań dla tego algorytmu wykazały wyraźnie niższe wahania udziału tlenu w spalinach niż przypadku algorytmu ProFan1, co było jednym z głównych celów, obranych przy opracowywaniu algorytmu ProFan2.

W ostatniej części badań przeprowadzono test energetyczno-emisyjny dla zmodyfikowanego kotła wsadowego, sterowanego przez algorytm ProFan2. Na podstawie tej części badań sformułowano następujące wnioski:

- VIII. Zastosowanie autorskiego algorytmu, wraz z modyfikacjami w dystrybucji powietrza wtórnego przyniosło znaczący wzrost sprawności kotła o 13 punktów procentowych, z 63% do ponad 76% (średnia z całego testu). W przypadku testu z wykorzystaniem autorskiego algorytmu, zaobserwowano także znaczące obniżenie emisji tlenku węgla z poziomu $7600 \text{ mg}/\text{m}_n^3$ przy 10% O₂ dla badań wstępnych, do poziomu mg/m_n^3 przy 10% O₂ dla testu energetyczno-emisyjnego. Obniżenie emisji CO spowodowała optymalizacja dystrybucji powietrza wtórnego, zarówno jego ilości (algorytm autorski) jak i lokalizacji dysz powietrza wtórnego
- IX. Porównanie wyników otrzymanych dla kotła wsadowego, z wynikami dla kotła z rusztem ruchomym, wskazuje że kocioł wsadowy może osiągnąć zbliżone, a nawet niższe wskaźniki emisji tlenku węgla do kotła stosowanego w energetyce zawodowej. Niższa o 6 punktów procentowych sprawność kotła wsadowego była spowodowana przez układ wymiany ciepła, który w znacznym stopniu ograniczał uzyskanie wyższej sprawności.

Spalanie słomy w kotłach wsadowych jest bardzo atrakcyjną alternatywą dla wykorzystywania węgla kamiennego, szczególnie na terenach rolniczych, gdzie pozyskanie takiego biopaliwa nie jest obciążone dużymi kosztami. Należy jednak pamiętać, aby kotły stosowane do wytwarzania energii cieplnej ze słomy, spełniały możliwie najwyższe normy emisyjne. Zaprezentowane wyniki badań pokazują, że jest możliwy dalszy rozwój technologii wsadowego spalania słomy w oparciu o już istniejące rozwiązania. Co istotne w wielu przypadkach modyfikacje niezbędne do obniżenia emisji substancji szkodliwych (głównie tlenku węgla) oraz podwyższenia sprawności, nie są kosztowne. W przypadku kotłów wsadowych opalanych słomą, trudno jest oszacować oszczędności jakie można osiągnąć, wprowadzając opisywane w pracy modyfikacje. Trudności te mają związek z paliwem, które w większości przypadków ma postać produktu ubocznego pochodzącego z produkcji rolnej.

Literatura (ważniejsze pozycje)

- [1] L. Baxter. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, 84(10):1295 – 1302, 2005.
- [2] M. L. Brown, W. S. Bulpitt, J. L. Walsh Jr, T. F. McGowan. *Biomass and alternate fuel systems: an engineering and economic guide*. Wiley. com, 2011.
- [3] A. Celińska. Charakterystyka różnych gatunków upraw energetycznych w aspekcie ich wykorzystania w energetyce zawodowej. *Polityka Energetyczna*, 12(2/1):59–72, 2009.
- [4] M. Ściążko, H. Zieliński, T. Chmielniak. *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*. IChPW, 2003.
- [5] W. Denisiuk. Słoma - potencjał masy i energii. *Inżynieria Rolnicza*, R. 12, nr 2(100):23–30, 2008.
- [6] W. Denisiuk. Słoma jako paliwo. *Inżynieria Rolnicza*, R. 13, nr 1:83–89, 2009.
- [7] M. Filipowicz, M. Dudek, A. Raźniak, W. Grega, W. Kreft, M. Rosół. Monitoring temperatury komory kotła na biomasę oraz instalacji grzewczej. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, T. 42, nr 7-8:310–310, 2011.
- [8] A. Grzybek, P. Gradziuk, K. Kowalczyk. *Słoma : energetyczne paliwo*. Wieś Jutra, 2001.
- [9] L. A. Hansen, H. P. Nielsen, F. J. Frandsen, K. Dam-Johansen, S. Hørlyck, A. Karlsson. Influence of deposit formation on corrosion at a straw-fired boiler. *Fuel Processing Technology*, 64(1–3):189 – 209, 2000.
- [10] J. Hernandez Allica, A. J. Mitre, J. A. Gonzalez Bustamante, C. Itoiz, F. Blanco, I. Alkorta, C. Garbisu. Straw quality for its combustion in a straw-fired power plant. *Biomass and bioenergy*, 21(4):249–258, 2001.
- [11] J. Hrdlicka, B. Sulc. Advanced features of a small-scale biomass boiler control for emission reduction. *International Journal of Energy*, 8:62–69, 2011.
- [12] B. Jenkins, R. Bakker, J. Wei. On the properties of washed straw. *Biomass and bioenergy*, 10(4):177–200, 1996.
- [13] B. Jenkins, L. Baxter, T. Miles Jr, T. Miles. Combustion properties of biomass. *Fuel processing technology*, 54(1):17–46, 1998.
- [14] L. Jensen, P. Aagaard Nielsen. Emissions from straw and wood-chip fuelled boilers. main report; emissioner fra halm-og flisfyr. hovedrapport. 1996.
- [15] P. A. Jensen, B. Sander, K. Dam-Johansen. Pretreatment of straw for power production by pyrolysis and char wash. *Biomass and Bioenergy*, 20(6):431–446, 2001.
- [16] M. Jewiarz, K. Kubica. Technologie spalania słomy. *Słoma - wykorzystanie w energetyce cieplnej - praca pod redakcją Anny Grzybek*, strony 124–162, 2012.

- [17] M. Jewiarz, K. Kubica, R. Kubica, W. Mokrosz. Zagrożenia korozyjne w kotłach wondych opalanych słomą. *Inżynieria Rolnicza - Monografie*, 7:163–182, 2012.
- [18] M. Jewiarz, K. Kubica, R. Kubica, W. Mokrosz, A. Szlęk. Materiały konstrukcyjne kotłów opalanych słomą w świetle zagrożenia korozją. *Inżynieria Rolnicza - Monografie*, 7:183–197, 2012.
- [19] M. Jewiarz, A. Szlęk. Badanie energetycznoemisyjne kotła wsadowego opalanego słomą. *Współczesne problemy energetyki, praca zbiorowa pod redakcją Sławomira Stelmacha i Krzysztofa Pikonia*, strony 79–92, 2013.
- [20] K. Kowalczyk. Słoma w mieście. *Przegląd Komunalny*, 10(10):78–79, 2006.
- [21] A. Kowalczyk-Juško, B. Kościk, M. Kwapisz. Możliwości i ograniczenia wykorzystania odpadów z rolnictwa na cele energetyczne. *Zeszyty Naukowe Polskiego Towarzystwa Inżynierii Ekologicznej*, 11(11):155–160, 2009.
- [22] A. Kowalewicz. *Podstawy procesów spalania*. WNT, 2000.
- [23] E. F. Kristensen, J. K. Kristensen. Development and test of small-scale batch-fired straw boilers in denmark. *Biomass and Bioenergy*, 26(6):561 – 569, 2004.
- [24] K. Kubica, R. Kubica, W. Mokrosz, M. Jewiarz, A. Szlęk, J. Widermann, K. Radwański, K. Kowalczyk. Spalanie słomy w kotłach rusztowych - pilotażowe badania materiałów konstrukcyjnych. *Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów: XI konferencja kotłowa ICBT*, 2010.
- [25] M. Michalski, D. Sawicka. Wpływ zmiany paliwa na pracę kotła na węgiel kamienny typu op-140. *Instal*, 2:11–16, 2013.
- [26] R. Morissette, P. Savoie, J. Villeneuve. Corn stover and wheat straw combustion in a 176-kw boiler adapted for round bales. *Energies*, 6(11):5760–5774, 2013.
- [27] L. Nikolaisen, C. Nielsen, M. G. Larsen, V. Nielsen, U. Zielke, J. Kristensen, B. Holm-Christensen. *Straw for energy production. Technology-Environment-Economy*. Dansk Teknologisk Inst., Aarhus (Denmark), 1998.
- [28] J. Piechocki. Analiza możliwości wykorzystania biomasy pochodzenia rolniczego w bilansie energetycznym województwa warmińsko-mazurskiego. *Inżynieria Rolnicza*, 15(1):181–187, 2011.
- [29] B. S. Repić, D. V. Dakić, A. M. Erić, D. M. urović, S. D. J. Nemoda, M. R. Mladenović. Development of the technology for combustion of large bales using local biomass. *Sustainable Energy - Recent Studies*, strony 55–87, 2012.
- [30] W. Rybak. *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006.
- [31] A. K. Sadhukhan, P. Gupta, T. Goyal, R. K. Saha. Modelling of pyrolysis of coal–biomass blends using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 99(17):8022 – 8026, 2008.

- [32] A. Sæbye, S. Gundtoft, L. Nikolaisen. *Fyring med halm - en metode til renere forbrænding: Gårdanlæg for hele halmballer (w jezyku duńskim)*. Miljøprojekt, 173. Miljøstyrelsen, 1991.
- [33] B. Sander. Properties of danish biofuels and the requirements for power production. *Biomass and Bioenergy*, 12(3):177–183, 1997. cited By (since 1996)90.
- [34] L. Shang, J. Ahrenfeldt, J. Holm, A. Sanadi, S. Barsberg, T. Thomsen, W. Stelte, U. Henriksen. Changes of chemical and mechanical behavior of torrefied wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 40:63–70, 2012. cited By (since 1996)8.
- [35] S. Van Loo, J. Koppejan. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan, 2008.
- [36] C. Yin, L. A. Rosendahl, S. K. Kær. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6):725–754, 2008.