



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



WYDZIAŁ  
BUDOWNICTWA,  
INŻYNIERII ŚRODOWISKA  
I ARCHITEKTURY  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Krzysztof Nowak

### **Wpływ procesu współspalania węgla i biomasy na stężenia zanieczyszczeń w gazach spalinowych**

Promotor:  
prof. dr hab. inż. Krzysztof Wojdyga

Promotor pomocniczy:  
dr inż. Sławomir Rabczak

## STRESZCZENIE

W niniejszej pracy dokonano analizy wpływu współspalania węgla kamiennego i biomasy w wodnych kotłach rusztowych na sprawność wytwarzania ciepła oraz wielkość stężeń i emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych podczas pracy kotła z obciążeniami poniżej minimum technicznego. W badaniach wykorzystano mieszanki paliwowe składające się z różnych udziałów masowych węgla kamiennego oraz biomasy w postaci zrębki drzewnej. Opisane analizy opracowano na podstawie pomiarów własnych oraz komputerowych symulacji statystycznych. W ramach realizacji pracy wykonano:

- pomiary sprawności kotła oraz stężeń wybranych zanieczyszczeń w spalinach w procesie współspalania węgla kamiennego i biomasy w wodnych kotłach rusztowych;
- pomiary podstawowych parametrów energetycznych paliw wykorzystywanych w procesie ich współspalania w badanym kotle;
- obliczenia standardów emisji zanieczyszczeń powietrza w oparciu o dane literaturowe oraz otrzymane wyniki pomiarów;
- modele statystyczne określania sprawności kotła oraz stężeń i standardów emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych.

W rozdziale pierwszym przedstawiono najistotniejsze uwarunkowania, które wpłynęły na wybór omawianego tematu rozprawy doktorskiej.

W kolejnych dwóch rozdziałach przedstawiono cel pracy, tezy pracy, zakres i plan pracy.

Czwarty rozdział poświęcony jest istotnym zagadnieniom z punktu widzenia celu pracy. Przeanalizowano obowiązujące akty prawne w zakresie ochrony powietrza. Przedstawiono charakterystykę węgla kamiennego i biomasy oraz proces ich współspalania w istniejących kotłach energetycznych. Wymieniono możliwe działania mające na celu optymalną pracę kotła z punktu widzenia procesu spalania.

W piątym rozdziale przedstawiono tematykę dotyczącą analizy przeprowadzonych badań podstawowych parametrów energetycznych węgla kamiennego i biomasy, sprawności kotła oraz stężeń wybranych zanieczyszczeń gazowych z procesu współspalania paliw. W tej części przedstawiono cel prowadzonych badań, opisano analizowany obiekt ciepłowniczy, stanowiska pomiarowe oraz wykorzystywane techniki pomiarowe. Wyniki przeprowadzonych pomiarów zaprezentowano w postaci tabel oraz wykresów, a następnie dokonano ich interpretacji. Obliczono współczynniki korelacji określając zależności pomiędzy obciążeniem

kotła oraz udziałem biomasy w spalonym paliwie a sprawnością kotła oraz wielkością stężeń poszczególnych zanieczyszczeń.

Badania eksperymentalne były podstawą do stworzenia statystycznego modelu obliczeniowego dotyczącego wpływu współspalania węgla kamiennego i biomasy w kotłach wodnych typu WR podczas pracy w warunkach niestabilnych na sprawność wytwarzania ciepła oraz wielkość stężeń i standardów emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych.

W szóstym rozdziale na podstawie badań eksperymentalnych stworzono statystyczne modele obliczeniowe dotyczące wpływu współspalania węgla kamiennego i biomasy w kotłach wodnych typu WR na sprawność wytwarzania ciepła oraz wielkość stężeń i standardów emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych. Poprzez wprowadzenie danych weryfikujących modele poddano weryfikacji w celu sprawdzenia poprawności ich działania. Dla każdego przypadku otrzymano satysfakcjonujące wyniki i wysokie współczynniki korelacji liniowej. Na podstawie danych eksperymentalnych oraz danych predykowanych stworzono wykresy powierzchniowe sprawności wytwarzania ciepła, stężenia tlenu i ditlenku węgla, emisji tlenków azotu, ditlenku siarki, chlorowodoru, fluorowodoru, metanu i lotnych związków organicznych względem ilości biomasy w spalonym paliwie i mocy kotła.

W rozdziale siódmym przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe.

Dalsza część pracy zawiera spis literatury, tabel i rysunków.

Ostatnim elementem pracy jest załącznik 1, w którym przedstawiono tabele z opracowanymi wynikami dla różnych obciążeń cieplnych kotła i udziałów biomasy w spalonym paliwie.

Przedstawione w niniejszej rozprawie efekty pracy potwierdziły w pełni stawiane tezy i pozwoliły na sformułowanie końcowych wniosków:

1. Jednym z rozwiązań technologicznych ograniczenia zużycia paliw kopalnych oraz zwiększenia udziału paliw odnawialnych w bilansie energetycznym jest współspalanie węgla kamiennego i biomasy w kotłach energetycznych.
2. Współspalanie węgla kamiennego i biomasy może być realizowane efektywnie i praktycznie bezinwestycyjnie przy wykorzystaniu istniejących kotłów, infrastruktury i urządzeń pomocniczych.
3. Współspalanie węgla kamiennego i biomasy w układzie bezpośrednim wodnych kotłach rusztowych typu WR jest rozwiązaniem najbardziej optymalnym pod względem ekonomicznym, a utrzymanie stałych parametrów pracy kotła nie stanowi

problemu. Biomasa pełni rolę taniego i czystego nośnika energii, węgiel natomiast stabilizuje proces spalania, kompensując okresowe zmiany jakości i ilości biomasy.

4. Współspalanie węgla kamiennego i biomasy ma wpływ na sprawność wytwarzania ciepła oraz wielkość emisji zanieczyszczeń gazowych w wodnych kotłach energetycznych.
5. Wzrost udziału biomasy w spalanej paliwie powoduje spadek sprawności kotła, co wynika bezpośrednio z parametrów energetycznych paliw, a tym samym ich zużycia.
6. Wzrost udziału biomasy w spalanej paliwie wpływa na zwiększenie stężenia CO<sub>2</sub> oraz emisji NO<sub>x</sub> i HF. Pozytywnym efektem jest zmniejszenie emisji SO<sub>2</sub>, HCl, CH<sub>4</sub> i LZO. Powyższe zmiany wynikają między innymi ze składu pierwiastkowego paliwa oraz jego zużycia.
7. Wraz ze wzrostem obciążenia cieplnego kotła stabilizuje się proces spalania, a tym samym zwiększa się sprawność wytwarzania ciepła.
8. Wzrost obciążenia cieplnego kotła związany jest z wyższym zużyciem paliwa oraz temperaturą w komorze spalania, co w efekcie przekłada się na zwiększenie stężenia CO<sub>2</sub> oraz emisji NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, i HF. Pozytywnym efektem jest zmniejszenie emisji CH<sub>4</sub> i LZO.
9. Praca kotłów w warunkach niestabilnych znacznie poniżej nominalnego obciążenia powoduje istotną zmienność ładunków emisji zanieczyszczeń oraz sprzyja powstawaniu takich substancji jak: NH<sub>3</sub>, HCl, HF, CH<sub>4</sub> i LZO. Związane jest to z niecałkowitym i niezupełnym procesem spalania.
10. Analiza przeglądu literaturowego oraz wyników pomiarów umożliwiła skonstruowanie modeli określania sprawności kotła, stężeń i standardów emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych w warunkach pracy kotła odbiegających od normalnych mogących być wdrożonych do praktyki strategii ochrony powietrza. Opracowano następujące modele:
  - model określania sprawności kotła w zależności od jego obciążenia i udziału biomasy w spalanej paliwie;
  - model określania stężenia CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> oraz standardów emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, HF, CH<sub>4</sub> i LZO w zależności od obciążenia kotła i udziału biomasy w spalanej paliwie.

Z uwagi na niemonotoniczne zachowanie się stężeń CO i NH<sub>3</sub> żaden z predyktorów nie był istotnie statystycznie, a zatem nie było możliwe wykonanie modeli standardów emisji.

11. Zakres stosowalności opracowanych modeli analitycznych mieści się w przedziale 1,5 do 5,0 MW obciążenia kotła oraz 30 do 70% udziału biomasy.
12. Opracowane modele charakteryzują się tendencją jakościową, a zatem na ich podstawie można określić zmianę sprawności, stężeń lub emisji zanieczyszczeń. Może to być podstawą do optymalizacji procesu współspalania węgla kamiennego i biomasy w wodnych kotłach rusztowych typu WR.
13. Opracowanie modelu charakteryzującego się tendencją ilościową wiąże się z głębszą analizą rozpatrywanego zagadnienia. Wśród przyszłych prac badawczych można zaproponować przeprowadzenie dalszych pomiarów sprawności kotła oraz stężeń zanieczyszczeń przy różnych obciążeniach kotła i udziałach biomasy w spalanej paliwie, termodynamyczną analizę procesu spalania, pomiary wszystkich wielkości zmiennych mogących mieć wpływ na wielkość stężenia zanieczyszczeń i sprawności kotła. Tak dopracowany model obliczeniowy mógłby być wykorzystany jako dodatkowy element sterujący pracą kotła w czasie rzeczywistym.

Niniejsza praca wnosi nowe elementy takie jak:

- zbadanie zależności pomiędzy obciążeniem kotła oraz udziałem biomasy w spalanej paliwie a sprawnością wytwarzania ciepła oraz wielkością stężeń i standardów emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych;
- stworzenie statystycznego modelu obliczeniowego dotyczącego wpływu współspalania węgla kamiennego i biomasy w kotłach wodnych typu WR podczas pracy w warunkach niestabilnych na sprawność wytwarzania ciepła oraz wielkość stężeń i standardów emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych;
- propozycja wykorzystania autorskiego modelu statystycznego przy określaniu tendencji zmian sprawności kotła, stężeń i emisji wybranych zanieczyszczeń gazowych podczas współspalania biomasy i węgla kamiennego w kotłach wodnych typu WR.

**Słowa kluczowe:** współspalanie biomasy i węgla kamiennego, stężenie i emisja zanieczyszczeń gazowych powietrza, standard emisji, kotły ciepłownicze.

## ABSTRACT

This dissertation describes the correlation between co-combustion of coal with biomass and the efficiency of heat and the emission of gaseous air pollutants in coal-fired boilers during operation loads below the technical minimum. Used in the research the fuels were composed of different weight fractions of coal and biomass. Described analysis were based on own measurements and computer simulations statistics. As a part of the dissertation made the following research:

- measurements of the boiler efficiency and concentrations of selected pollutants in the exhaust gas during co-combustion coal and biomass in water stoker-fired boilers;
- measurements of basic parameters of energy fuels in the process of co-combustion in the test boiler;
- calculation of the air pollutants emission standards based on the literature data and the results of measurements;
- statistical models for determining the boiler efficiency, concentrations and emission standards selected gaseous pollutants.

In the first chapter discussed the most significant factors that determined the choice of the dissertation topic.

In the following chapters presented the dissertation thesis, objective of the work, the scope and work plan.

The fourth chapter is devoted to the important issues from the point of view to work. In this part were described the current air protection legislation. Presents the characteristics of coal and biomass and co-combustion process in their existing power boilers. Mentioned modernization and operational actions which cause technologically optimal working conditions of the boiler.

In the fifth chapter presents topics concerning the analysis of the study of basic energy parameters of coal and biomass, boiler efficiency and concentrations of some pollutants from the process of co-combustion. This section describes the purpose of the research, a detailed description of the boiler house, the measuring positions also measurement techniques used. The results of the measurements are presented in the form of tables and graphs, and then made their interpretation. Calculated correlation coefficients to identify relationship between

the load of the boiler and the share of biomass combusted fuel and the efficiency of the boiler and the size of the concentrations of individual pollutants.

Experimental studies were the basis for the creation of a statistical calculation co-combustion model coal and biomass in the water boilers WR when working in unstable conditions on the efficiency of heat and the volume concentrations selected gaseous pollutants.

In the sixth chapter based on experimental research were created statistical models the impact of co-combustion of coal and biomass in the water boilers WR on the efficiency of heat and the volume concentrations and emission standards selected gaseous pollutants. All models have been verified for validation. For each case were obtained satisfactory results and high correlation coefficients. Based on experimental data and model data were created surface plots of heat generation, concentration for oxygen and carbon dioxide, emission standards for nitrogen oxides, sulfur dioxide, hydrogen chloride, hydrogen fluoride, methane and volatile organic compounds depending on the amount biomass and boiler power.

The seventh chapter presents the summary and conclusions.

The next part of the dissertation concerns bibliography, list of tables and illustrations.

The last part concerns attachment presenting the tables with results for different boiler heat loads and biomass share.

Presented and realized topic allows to formulate the following statements and conclusions:

1. One of the technological solutions to reducing fossil fuel consumption and increasing the share of renewable fuels is the co-combustion of hard coal and biomass in power boilers.
2. Co-combustion of coal and biomass can be implemented effectively and practically without cost using existing boilers, infrastructure and auxiliary equipment.
3. Co-firing of hard coal and biomass in the direct water system of WR boilers is the most economically optimal solution, and maintaining the constant operating parameters of the boiler is not a problem. Biomass is a cheap and clean energy source, hard coal stabilizes the combustion process, compensating for periodic changes in the quality and quantity of biomass.
4. Co-combustion of hard coal and biomass affects the efficiency of heat generation and the emission of gaseous pollutants in water power boilers.

5. The increase of the biomass share in the combusted fuel results in a decrease boiler efficiency, which results directly from the energy parameters of the fuels and thus their consumption.
6. The increase in the share of biomass combusted fuel increases the concentration of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and HF. Positive effect is reduction of SO<sub>2</sub>, HCl, CH<sub>4</sub> and VOC. These changes are due, inter alia, to the composition of the elemental fuel and its consumption.
7. With the increase in boiler heat load, the combustion process is stabilized and the heat generation efficiency is increased.
8. The increase in the thermal load of the boiler is related to higher fuel consumption and combustion chamber temperature, resulting in increased concentration of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, and HF. Positive effect is reduction of CH<sub>4</sub> and VOC.
9. Boiler operation under unstable conditions significantly below the nominal load causes significant variability of pollutant load and promotes the formation of such substances as NH<sub>3</sub>, HCl, HF, CH<sub>4</sub> and VOC. This is due to incomplete and incomplete combustion.
10. Based on the analysis of the literature review and the results of the measurement were constructed models for determining boiler efficiency, emission standards, and concentrations of selected gaseous pollutants in the boiler operating conditions other than normal. Models can be implemented into the practice of air protection strategies. The following models were developed:
  - A model for determining the efficiency of the boiler depending on its load and the biomass share of the combusted fuel;
  - A model for determining concentration of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> and emission standards for SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, HF, CH<sub>4</sub> and LZO, depending on the boiler load and biomass share.

It was not possible to perform models of CO and NH<sub>3</sub> emission standards due to nonmonotonic behavior, predictors were not statistically significant.

11. Range of applications developed analysis model is from 1.5 to 5.0 MW boiler load and 30 to 70% of biomass in fuel.
12. The models are characterized by a qualitative tendency, and therefore they can be used to determine the change in efficiency, concentration or emission standards. This can be the basis for optimizing co-combustion of hard coal and biomass in WR type water boilers.



13. Developing a model characterized by a quantitative trend involves further analysis of the issue under consideration. Future research may suggest further measurements of boiler efficiency and concentration of pollutants at different boiler loads and biomass share, thermal energy analysis of combustion, measurement of all variable quantities that may affect the concentration of pollutants and boiler efficiency. An improved calculation model could be used as an additional element of controlling the operation of the boiler in real time.

This work brings new elements such as:

- study of the relationship between the boiler load and also the biomass share in combustion of fuel and efficiency of heat generation, concentration and emission standards of selected gaseous pollutants;
- Creation of a statistical computational model for the influence of co-combustion of hard coal and biomass in WR boilers during unstable operation on heat generation efficiency and concentration and emission standards of selected gaseous pollutants;
- Possibility of using of the statistical model for determining trends in boiler efficiency, concentration and emission of selected gaseous pollutants during co-firing of biomass and hard coal in WR boilers.

**Key words:** co-combustion of hard coal and biomass, concentration and emission of gaseous pollutants, emission standards, district heating boilers.