

Kraków, 17.08.2020 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Wydział Energetyki i Paliw  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
[wnowak@agh.edu.pl](mailto:wnowak@agh.edu.pl)  
Tel: 604410913

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Śladewskiego „On-line, automatic optimization of combustion process in coal-fired power plant with utilization of an acoustic system for in-furnace temperature distribution measurement”**

#### **Wstęp**

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej, pismo RND-IŚGiE-40/2020 z 30.06.2020.

#### **Zasadność tematyki**

Niskoemisyjne palniki pyłowe wykorzystują redukcyjne właściwości bogatego płomienia pyłowego przez organizację stref spalania podstechiometrycznego z wykorzystaniem stopniowania powietrza lub stopniowanie paliwa. Z kolei stopniowanie powietrza lub paliwa w warunkach spalania pyłu węglowego może pogorszyć stabilność spalania i zwiększyć stratę niedopału. Z drugiej strony stopniowanie powietrza pozwala na zmniejszenie emisji NO<sub>x</sub>. Niestety metoda ograniczenia emisji NO<sub>x</sub> poprzez zmianę organizacji procesu spalania, pociąga za sobą negatywne skutki dla eksploatacji kotła. Najważniejsze z nich to: zwiększona emisja CO, większe straty niedopału, korozja parownika, zwiększenie zużycia, a także niestabilność płomienia. Uwzględniając te

czynniki oraz istotne aspekty ekologiczne, istnieje potrzeba opracowania systemu sterowania procesem spalania, który będzie dokonywał optymalizacji pracy kotła na podstawie informacji uzyskanych z systemu sterowania (DCS) bloku energetycznego oraz uwzględnienie innowacyjnych technik pozwalających na ocenę jakości procesu. Optymalizacja procesu spalania skutkuje uzyskaniem bardziej jednorodnego rozkładu temperatury w objętości kotła oraz właściwego profilu temperatur dla zmiennych poziomów obciążenia kotła.

Głównym celem badawczym przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej było opracowanie innowacyjnego podejścia do optymalizacji spalania z użyciem informacji o rozkładzie temperatury w komorze paleniskowej do modelowania procesu spalania oraz do obliczenia zmiennych sterujących nadmiarem powietrza oraz dystrybucją paliwa i powietrza. Takie podejście w modelowaniu spalania oraz bieżąca optymalizacja procesu pozwala na bardziej precyzyjną kontrolę procesu, a co za tym idzie uzyskanie lepszych wyników w projektach optymalizacji spalania w kotłach pyłowych.

*Stąd tematyka rozprawy doktorskiej wiąże się bezpośrednio z nowymi trendami poszukiwania i implementacji takich systemów. Problem naukowy został postawiony poprawnie oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora.*

## **Układ pracy**

Praca napisana w języku angielskim podzielona jest na dziesięć rozdziałów i liczy 157 stron. Bibliografia zawiera 101 pozycji i jest numerowana w kolejności występowania w pracy. W pierwszym rozdziale przedstawiona jest tematyka rozprawy oraz struktura rozprawy. Pierwszą ważną częścią w pracy doktorskiej jest teoria procesu spalania i różne podejście do modelowania procesu spalania. Autor skoncentrował się na opisie głównych typów modeli procesów spalania, począwszy od różnych modeli empirycznych, poprzez modele CFD i modele pierwszego rzędu. Każdy typ modelu został omówiony z uwzględnieniem zalet i wad stosowania w projektach optymalizacji procesów spalania on-line. Informacje te zostały przedstawione w rozdziale 2.

W rozdziale 3 pracy opisano zaawansowane rozwiązania w zakresie sterowania i optymalizacji procesu spalania. W pierwszej części rozdziału opisano kilka koncepcji, jak również istniejące rozwiązania. Informacje o tych rozwiązaniach zostały przedstawione w celu przeprowadzenia analizy porównawczej z proponowanymi przez Autora systemem SILO. Znajdują się tam informacje teoretyczne dotyczące każdego algorytmu, jak również informacje doświadczalne. W drugiej części rozdziału podkreślone są zalety i wady rozwiązań SILO i MPC.

W rozdziale 4 szczegółowo opisano system SILO. W pierwszej części rozdziału opisany jest układ odpornościowy istot żywych. Opis ten jest wprowadzeniem do szczegółów algorytmów sztucznego układu odpornościowego i jego rozwoju. Kolejna część zawiera informacje na temat architektury SILO, szczegóły dotyczące algorytmów, podejścia do modelowania procesów oraz definicji funkcji celu. Rozdział zawiera informacje teoretyczne, a także doświadczenia zdobyte podczas realizacji wielu projektów optymalizacji spalania. Opis zawiera ogólną ideę i wymagania dotyczące integracji optymalizatora z systemem DCS.

W rozdziale 5 przedstawiono teorię sterowania w kotłach energetycznych oraz teorię sterowania procesem spalania w węglowych kotłach pyłowych. Rozdział ten koncentruje się na konkretnych pętlach regulacyjnych, w tym na wyzwaniach i problemach związanych z kontrolą procesu spalania. Informacje zawarte w tym rozdziale zawierają wprowadzenie do optymalizacji procesu spalania w kotłach energetycznych.

Rozdział 6 zawiera informacje o bloku energetycznym w elektrowni Rybnik. W rozdziale tym opisano konstrukcję kotła w zakresie urządzeń sterujących procesem spalania. Dodatkowo opisano układy rozprowadzania węgla i powietrza. Rozdział zawiera informacje, które są niezbędne do zaprojektowania i wykonania standardowego projektu optymalizacji procesu spalania.

W rozdziale 7 opisany jest system AGAM. W pierwszej części tego rozdziału przedstawiono teoretyczne podstawy akustycznego pomiaru temperatury, indukując kwantyfikację błędów pomiarowych. W kolejnej części opisano szczegóły realizacji i konfiguracji systemu AGAM w kotle w elektrowni Rybnik. Dodatkowo w rozdziale zamieszczono informacje o technologii laserowej w celu omówienia zalet i wad obu technologii w projektach optymalizacji spalania.

Rozdział 8 zawiera opis głównych prac badawczych tej pracy - algorytmu optymalizacji kształtu jądra płomienia. Początkowo w tym rozdziale opisane są badania etapowe systemu AGAM i wyników procesu spalania. Następnie podane są szczegóły kategorii kształtu jądra płomienia, jego optymalnego kształtu i algorytmu optymalizacji kształtu. W końcowej części rozdziału opisano przyszłe udoskonolenia algorytmu optymalizacji kształtu jądra płomienia.

W rozdziale 9 znajduje się szczegółowa analiza wyników optymalizacji. W celu przedstawienia efektu optymalizacji analizuje się szereg parametrów procesu, takich jak sprawność, temperatura pary, emisja  $\text{NO}_x$  i CO. W pierwszej części opisano metody wstępnego przetwarzania danych. Wyniki są przedstawione w sposób, który jest przewidziany dla inżynierów elektrowni, w celu zrozumienia efektu końcowego optymalizacji. W ostatniej części rozdziału przedstawiono bardziej szczegółowe wyniki badań w postaci symulacji CFD.

Rozdział 10 zawiera podsumowanie i podsumowanie efektu badawczego i inżynierskiego projektu.

### **Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej**

Za najważniejsze elementy nowości naukowej stanowiące oryginalny dorobek doktoranta uważam:

- opracowanie metody optymalizacji procesu spalania w kotłach energetycznych z wykorzystaniem informacji z pomiaru rozkładu temperatury w poprzecznym przekroju komory paleniskowej. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że przeprowadzono badania nad dwoma kluczowymi aspektami metody, a mianowicie rozszerzenie modelowania empirycznego procesu spalania o informacje z pomiaru rozkładu temperatury spalin oraz opracowanie koncepcji optymalizacji spalania z wykorzystaniem pomiaru rozkładu temperatury spalin. W klasycznych zastosowaniach optymalizacja procesu spalania oparta jest o podstawowe pomiary kotłowe takie jak zawartość tlenu w spalinach, emisja CO,  $\text{NO}_x$ , czy temperatury pary oraz temperatury spalin mierzone punktowo przed podgrzewaczem powietrza. W

podejściu klasycznym jakość procesu spalania oceniana jest zatem pośrednio przez pomiary kotłowe.

- Modelowanie spalania z wykorzystaniem akustycznego pomiaru rozkładu temperatury spalin na wyjściu z komory paleniskowej jest wykorzystaniem teorii spalania, a w szczególności informacji o lokalnej stechiometrii. Rozkład temperatury jest bezpośrednią informacją o jakości procesu spalania, a więc znacznie zwiększa dokładność modelu matematycznego spalania.
- Dodatkowo w zakresie badań nad metodą dokonano weryfikacji jakości pomiaru rozkładu temperatury poprzez symulację CFD. Wynik analiz był pozytywny dla różnych warunków pracy kotła, co również potwierdza poprawność założenia dotycząca zwiększonej jakości matematycznego modelu procesu spalania.
- W drugim kluczowym aspekcie metody opracowano koncepcję optymalizacji procesu spalania, polegającą na wpływaniu na rozkład temperatury spalin. W oparciu o empiryczny model matematyczny spalania optymalizator immunologiczny oblicza nastawy sterowania systemu dystrybucji paliwa i powietrza w taki sposób, aby rozkład temperatury był optymalny. Dla różnych warunków pracy kotła, definiowanych przez obciążenie kotła lub konfigurację pracujących młynów optymalizator dobiera odpowiedni parametry płomienia takie jak przesunięcie przód-tył, przesunięcie lewa-prawa, intensywność oraz rozproszenie. ***Podejście to jest innowacyjne i nie zostało wcześniej opracowane***, a co więcej nie zostało wdrożone na rzeczywistym obiekcie.

W mojej ocenie oceniana rozprawa doktorska ma również duże walory praktyczne.

- Szczególną uwagę w badaniach nad metodą oraz podczas prac rozwojowych poświęcono na możliwość wdrożenia metody w warunkach rzeczywistych. W tym celu Autor metody wraz z zespołem badawczym z grupy EDF Polska oraz Politechniki Wrocławskiej uzyskali dofinansowanie w programie GEKON, finansowanego przez NCBiR oraz NFŚiGW. Dzięki temu badania prowadzono na bloku nr 4 w elektrowni Rybnik, a opracowana metoda charakteryzuje się wysokim potencjałem wdrożeniowym w warunkach rzeczywistego bloku energetycznego. Tym bardziej, że osiągnięto bardzo dobre wyniki, gdzie m.in. sprawność kotła wzrosła o 0.26 pp.

- Dodatkowym walorem metody jest jej wysoki potencjał wdrożeniowy. Należy zaznaczyć, że metoda ta została jeszcze wdrożona na bloku 3 elektrowni Rybnik, na blokach 1 i 2 elektrowni Tongchuan (Chiny), na blokach 3, 4, 6 w elektrowni Rovinari (Rumunia) in na blokach 5 i 7 w elektrowni Turceni (Rumunia). Obecnie trwają przygotowania do wdrożenia metody w elektrowniach Craiova i Isalnita – obie w Rumunii. Szczególna popularnością cieszy się metoda na blokach z systemem SNCR, gdzie utrzymując optymalny rozkład temperatury uzyskuje się zwiększoną efektywność instalacji SNCR, a w konsekwencji oszczędność zużycia mocznika.

### **Poziom warsztatowy**

Przedstawiona rozprawa napisana w języku angielskim jest wynikiem bardzo trudnych i uciążliwych prac optymalizacyjnych procesu spalania w kotle węglowym w elektrowni zawodowej.

Autor wykazał bardzo dobre przygotowanie w formułowaniu modelu bazującego o sztuczny układ odpornościowy SILO, który jest w stanie modelować proces spalania z rozkładem temperatury spalin na wylocie z kotła i przeprowadzić optymalizację on-line. Autor podjął również wyzwanie dotyczące jakości modelowania procesu spalania z wykorzystaniem rozkładu temperatury AGAM. W szczególności podkreślić należy na swobodę z jaką posługuje się stosowanymi pojęciami oraz zależnościami. Zarówno dobór tematyki jak i analizowanych źródeł uznać należy za prawidłowy. Praca posiada przejrzysty układ treści, konsekwentnie stosowane nazewnictwo oraz symbolikę.

### **Uwagi krytyczne**

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne, które nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką wartość merytoryczną przedstawionej rozprawy, a dotyczą zagadnień omówionych poniżej.

1. Implementacja SILO wymaga wielu niezbędnych działań na bloku energetycznym. Które z urządzeń kotła powinny być sterowane, a które nie ? Należałoby oszacować koszty takich dodatkowych działań.
2. Optymalizacja kotła i włączanie i wyłączanie SILO wymaga jego stabilnej pracy kotła. Jak długo należy zachowywać stabilne parametry pracy kotła ?

3. Na ile akustyczna metoda pomiaru temperatury jest wiarygodna i dostarcza prawdziwych informacji ? Czy znane są Autorowi inne metody pomiaru rozkładu temperatury wewnątrz komory paleniskowej ? Kotły energetyczne przeważnie nie są wyposażone w akustyczny system pomiaru temperatury i czy to oznacza ograniczenie możliwości stosowania proponowanej metody.
4. Rysunki 70 i 72 wymagają dodatkowego komentarza. Dla mocy 170-190 MW obserwujemy piki zarówno stężenia NO<sub>x</sub>, jak i CO. Zwykle im większe stężenie CO tym mniejsze stężenie NO<sub>x</sub>.
5. Rozdział 9 dotyczący symulacji CFD jak przypuszczam był opracowany przez zespół Politechniki Wrocławskiej. Jaki był wkład Autora przy prowadzeniu symulacji CFD komory ?

## **Wnioski końcowe**

Reasumując można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Śladewskiego „On-line, automatic optimization of combustion process in coal-fired power plant with utilization of an acoustic system for in-furnace temperature distribution measurement” wiąże się bezpośrednio z koniecznością wprowadzenia nowego podejścia i narzędzi do optymalizacji procesu spalania pyłu węglowego w kotłach energetycznych.

Praca mieści się zarówno w starej klasyfikacji dyscypliny *energetyka*, jak i nowej *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy zaliczam:

- poprawnie postawiony problem naukowy oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora,
- rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest opracowanie metody optymalizacji procesu spalania w kotłach energetycznych z wykorzystaniem informacji z pomiaru rozkładu temperatury w poprzecznym przekroju komory paleniskowej. Metoda ta stanowi oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy doktorskiej,
- przeprowadzenie trudnych analiz na wysokim poziomie,
- umiejętność wdrożenia wyników badań naukowych w sektorze energetycznym,

- poprawnie wybrano przedmiot analiz i metodykę, uzyskano ważne kompleksowe wyniki,
- Autor wykazał się dużymi umiejętnościami i talentem w prowadzeniu optymalizacji procesu spalania.

Reasumując, stwierdzam że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego wnioskuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej dopuściła mgr inż. Łukasza Śladewskiego do dalszego etapu postępowania doktorskiego.

