

Dr hab. inż. Piotr Krawczyk, prof. PW  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Politechnika Warszawska  
Warszawa

Warszawa, 17.10.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**Pana mgr inż. Przemysława Garbacza**  
**„Optymalizacja wtórnych metod odazotowania spalin w kotłach rusztowych”**

**Promotor rozprawy dr hab. inż. Robert Wejkowski, prof. PŚ**

## **1. Wprowadzenie**

Recenzja została przygotowana w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 13.07.2023, pismo znak RIE-BD.512.55.2023 w sprawie powierzenia mi opracowania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Recenzja przygotowywana będzie w oparciu o następujące akty prawne:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789 z późniejszymi zmianami);
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261);
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

Recenzja opracowana została na podstawie przekazanej wraz z w/w pismem rozprawy doktorskiej stanowiącej opracowanie zwarte.

## 2. Ogólna ocena rozprawy

### 2.1 Zakres rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Garbacza poświęcona jest badaniu instalacji redukcji stężenia tlenków azotu w spalinach kotłów energetycznych głównie kotła wodnego, rusztowego oznaczonego symbolem WR-25.

Układem szczegółowo analizowanym w przedmiotowej dysertacji jest autorska technologia opracowana przez zespół pracowników Politechniki Śląskiej, którego doktorant był członkiem. Technologia ta bazuje na znanej metodzie redukcji stężenia tlenków azotu zwanej technologią selektywną niekatalityczną.

Rozprawa została zawarta na 143 stronach tekstu zasadniczego. Pracę podzielono na osiem numerowanych rozdziałów. Praca zawiera również obszerny spis literatury obejmujący 92 pozycje, z czego przewagę stanowią pozycje anglojęzyczne. Znaczny udział cytowanych prac pochodzi z ostatnich lat, co świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu przez Doktoranta dorobku naukowego w zakresie merytorycznym przedmiotu rozprawy.

**Pierwsze dwa** rozdziały dysertacji zawierają informacje wprowadzające. W rozdziale numer jeden autor pracy przedstawia:

- ogólne informacje dotyczące standardów emisyjnych z instalacji energetycznego spalania paliw w szczególności w odniesieniu emisji tlenków azotu;
- mechanizmy powstawania tlenków azotu;
- znane i stosowane w technice metody ograniczania ich emisji z podziałem na metody pierwotne oraz wtórne. Większą uwagę poświęca metodzie SNCR, będącej przedmiotem ocenianej dysertacji. Dokonuje również pewnego przeglądu rozwiązań komercyjnych bazujących na technologii SNCR

**W rozdziale drugim** doktorant formułuje problem badawczy, wynikający z niego cel i zakres pracy jak również stawia tezy, które będzie się starał udowodnić bądź obalić w czasie realizacji badań.

W rozdziale **trzecim rozprawy**, autor dokonuje charakterystyki obiektu rozważań, którym stał się kocioł wodny, rusztowy, węglowy typu WR-25. Swoje badania autor skupił wokół konkretnej jednostki tj. kotła zabudowanego w Przedsiębiorstwie Energetyki Ciepłej w Gliwicach. W rozdziale tym autor opisuje również pewne badania wstępne realizowane na obiekcie rozważań, głównie w zakresie pomiarów rozkładu temperatury w obrębie komory paleniskowej analizowanego kotła. Pierwszy raz pojawia się także charakterystyka badanej technologii oznaczonej w pracy jako FJBS. Technologia ta bazuje na znanej metodzie SNCR, wprowadzając jednak w jej podstawowym koncepcie istotne zmiany i modyfikacje.

**Rozdział czwarty** pracy w opinii recenzenta jest jednym z najistotniejszych w ocenianej dysertacji. Autor opisuje w nim szereg aspektów związanych z przygotowaniem oraz realizacją obliczeń numerycznych procesów ciepłno – przepływowych zachodzących we wnętrzu komory paleniskowej badanego kotła. W pierwszej części rozdziału autor wyjaśnia jakimi metodami zamierza się posługiwać celem realizacji przedmiotowego zadania. Charakteryzuje podstawy numerycznej mechaniki płynów m.in. w takich obszarach jak turbulencja, wymiana ciepła, przepływy wielofazowe. Następnie z poziomu ogólnych rozważań na temat podstaw numerycznej mechaniki płynów przechodzi do przygotowania oraz implementacji modelu numerycznego procesów zachodzących we wnętrzu komory paleniskowej kotła w komercyjnym narzędziu pozwalającym na realizację obliczeń z tego zakresu tj. Ansys Fluent. Szczególną uwagę w tym zakresie poświęca sposobowi modelowania spalania paliwa na ruszcie.

Odrębną część rozdziału stanowią rozważania dotyczące modelowania zagadnień przepływowych w jednym z istotniejszych komponentów rozwijanej technologii FJBS tj. strumienicy. W tym zakresie autor ponownie wykorzystuje komercyjne narzędzie z zakresu numerycznej mechaniki płynów. Tu jednak uzyskane wyniki modelowania dodatkowo zestawia z prowadzonymi przez siebie badaniami stanowiskowymi. W końcowej części rozdziału bazując na uzyskanych wcześniej wynikach obliczeń, zarówno w domenie samego kotła jak i pracy strumienicy, autor prowadzi analizy obliczeniowe procesu redukcji tlenków azotu w badanym kotle z wykorzystaniem będącej przedmiotem dysertacji technologii.

**Rozdział piąty** to drugi z najistotniejszych w opinii recenzenta rozdziałów pracy. Autor opisuje w nim przygotowania, przebieg oraz wyniki testów obiektowych badanej przez siebie technologii zaaplikowanej na kotle będącym przedmiotem rozważań.

Dosyć szczegółowo zostały przedstawione uzyskane wyniki w czasie prowadzonych testów. Dodatkowo w przedmiotowym rozdziale przedstawiono wyniki w zakresie redukcji NO<sub>x</sub> z badanego kotła po uzbrojeniu technologii FJBS w dodatkowy element jakim stał się katalizator umieszczony w drugim ciągu przedmiotowego kotła.

**W rozdziale szóstym** Doktorant przedstawia wyniki prac optymalizacyjnych badanej technologii. Przestankami do ich prowadzenia stały się wyniki testów obiektowych oraz zauważone niedociągnięcia stworzonej technologii. Prace te realizowane były w oparciu o opisane wcześniej modele obliczeniowe. W ich efekcie zostały zaproponowane dodatkowe punkty iniekcji reagenta do wnętrza komory.

**Rozdział siódmy** pracy zawiera ogólne rozważania na temat możliwych zagrożeń korozyjnych związanych ze stosowaniem technologii SNCR. W rozdziale tym autor przedstawia wyniki pewnych rozważań w tym zakresie dla innego od wcześniej analizowanego kotła tj. kotła pyłowego o mocy 81 MW.

**Rozdział ósmy** pracy zawiera podsumowanie w zakresie głównych osiągnięć naukowych omawianej dysertacji oraz uzyskanych wyników.

## **2.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu**

Problematyka poruszona w pracy, tj. redukcji stężenia tlenków azotu w spalinach kotłów węglowych jest nadal istotna i aktualna. Polityka klimatyczna Unii Europejskiej zakłada wprawdzie stopniowe odchodzenie od wykorzystania paliw kopalnych w sektorze wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, na korzyść źródeł odnawialnych. Proces ten będzie jednak procesem rozłożonym na wiele lat. Kotły wodne rusztowe, których przedstawiciel stał się obiektem rozważań w ocenianej dysertacji, nadal stanowią podstawę majątku wytwórczego polskich ciepłowni. Ich funkcjonowanie w okresie najbliższych lat uwarunkowane jest spełnianiem coraz bardziej surowych standardów emisyjnych w tym w zakresie tlenków azotu. Jednocześnie na rynku brak jest rozpowszechnionych technologii o ugruntowanej pozycji dedykowanych dla tej klasy obiektów.

**Mając na uwadze wyżej przytoczone argumenty, uznaję że temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Garbacza został wybrany prawidłowo, jako aktualny, a całość podjętej pracy wynikała nie tylko z problematyki naukowo-badawczej, ale nakierowana była również na osiągnięcie potencjalnych efektów praktycznych.**

## **3. Analiza treści rozprawy wraz z uwagami krytycznymi**

W niniejszym rozdziale recenzji skupiam się na zagadnieniach naukowych samodzielnie rozwiązanych przez Doktoranta, krytyce prawidłowości rozważań zawartych w pracy, pozyskanych wynikach i wnioskach przedstawionych przez Doktoranta. Przedstawię pewne uwagi dyskusyjne i wątpliwości, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy. Przedstawię również uwagi na temat oryginalności rozprawy jak i wskaże główne walory rozprawy.

### **3.1 Zagadnienia naukowe i utylitarne rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta**

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy stwierdzam, że postawiony przez Doktoranta cel pracy został zrealizowany.

Do najważniejszych zagadnień naukowych zrealizowanych przez Doktoranta zaliczam:

- udział w opracowaniu innowacyjnej technologii redukcji stężenia tlenków azotu dedykowanej do kotłów rusztowych oznaczonej symbolem FJBS;
- realizację obliczeń numerycznych procesów cieplno – przepływowych zachodzących we wnętrzu komory paleniskowej kotła rusztowego;
- realizację obliczeń numerycznych procesów przepływowych w wykorzystywanych w badanej technologii strumienicach wraz z weryfikacją uzyskanych wyników poprzez ich porównanie z wynikami badań stanowiskowych;
- realizację badań obiektowych przygotowanej technologii FJBS na kotle WR – 25, zlokalizowanym w PEC Gliwice;

- realizację analiz pozwalających na korektę założeń badanej technologii w reakcji na uzyskane wyniki badań obiektowych.

### 3.2 Uwagi krytyczne do pracy

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w przedstawionej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie uchybień i oceniam znajomość przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta, w tym jego przygotowanie zawodowe i naukowe – bardzo pozytywnie.

Poniżej zamieszczam uwagi o charakterze merytorycznym z podziałem na poszczególne rozdziały, do których te uwagi się odnoszą:

Rozdział 2:

- Na stronie 38 Doktorant opisując cel i zakres pracy używa sformułowań „symulacje numeryczne wtórne” czy „układ wtórnie zoptymalizowany”. Nie jest jasne dla recenzenta co sformułowania te oznaczają i co autor miał na myśli posługując się nimi?
- Na stronie 39 Doktorant formułując tezy pracy jako pierwszą z nich podaje: *„W kotle rusztowym istnieją warunki temperaturowe odbiegające charakterystyką od typowego przepływu tłokowego jaki ma miejsce w kotłach pyłowych jednocześnie uniemożliwiając stosowanie zbieżnego podejścia do projektowania instalacji SNCR w kotłach rusztowych”*. W opinii recenzenta wiedza na temat odmiennego charakteru przepływu spalin w kotłach rusztowych od kotłów pyłowych jest wiedzą powszechną, nie wymagającą udowodnienia. Powstaje zatem pytanie czy w zasobie tez badawczych stawianych w pracy tego typu teza powinna się znajdować?

Rozdział 3:

- W rozdziale 3.2 Doktorant opisuje będącą przedmiotem analiz w ocenianej pracy technologię FJBS. Nie jest jednak jasne dla recenzenta jaki jest udział doktoranta w opracowaniu przedstawianej technologii? Informacje tego typu nie zostały zawarte w dysertacji.
- Na stronie 45 doktorant opisując technologię FJBS używa sformułowania: *„Oprócz wyboru miejsca wtrysku, dzięki ilościowej zabudowie jednostek FJBS, na dostosowanie do zmiennych warunków pracy pozwala układ zmiany położenia ...”*. Co autor ma na myśli pisząc o ilościowej zabudowie jednostek FJBS?

#### Rozdział 4:

- Na stronie 55 Doktorant opisuje wartości stałych mieszania substratów chemicznych. W pewnym momencie pojawia się informacja odnośnie wartości tej stałej sformułowana w taki sposób „W niniejszym artykule przyjęto wartość 0,7”. Nie towarzyszy temu jednak żadne cytowanie. Nie jest jasne dla recenzenta o jaki artykuł chodzi oraz na jakiej podstawie została przyjęta przywołana wartość.
- Na stronie 56 Doktorant przedstawia podstawowe informacje na temat parametrów siatki numerycznej dla domeny kotła wykorzystywanej w obliczeniach. Informacje te w opinii recenzenta należy jednak uznać za niewystarczające. Nie są podane żadne dane dotyczące jakości siatki. Doktorant również nie wyjaśnia czy realizował badania wpływu niezależności siatki na uzyskiwane wyniki. Działanie takie jest standardową praktyką przy prowadzeniu obliczeń z wykorzystaniem metod numerycznej mechaniki płynów.
- Na stronie 57 Doktorant prezentuje m.in. grafiki z rozkładem udziałów masowych NO w modelowanej domenie. Jest to o tyle zaskakujące, że wcześniej nie został przedstawiony sposób modelowania powstawania NO w trakcie procesu spalania oraz przyjęte nastawy w tym zakresie.
- Na stronach 68 i 69 doktorant prezentuje wykresy przedstawiające wyniki analiz pracy strumienic. Nie została oznaczona oś pozioma, co utrudnia interpretację wyników.
- Na stronie 76 Doktorant prezentuje w tabeli 4.13 parametry dozowania reagent do komory paleniskowej w modelu CFD. Tabela ta zawiera informację na temat wariantowych strumieni reagenta wprowadzanego przez dysze tj. od 27,4 kg/h do 82,2 kg/h. Jednocześnie Doktorant zakłada stałe, tj. niezależne od wydatku parametry rozpylania przez tą dyszę określane średnicą minimalną, maksymalną i średnią kropel. Czy parametry te są dla badanej dyszy niezależne od wydatku i nawet przy takich dużych jego zmianach nie ulegają zmianie?

#### Rozdział 5

- Na stronie 82 Doktorant opisując sposób prowadzenia badań pisze, że wartości rejestrowane przez analizator były przeliczane na warunki normlane oraz stężenie tlenu 6%. W normach określających standardy emisyjne posługujemy się warunkami umownymi. Prośba o doprecyzowanie do jakich warunkach odnoszą się prezentowane wyniki?
- W rozdziale 5.2 autor przedstawia informacje na temat układu sterowania przedmiotową instalacją. Nie jest jasne dla recenzenta jaka była rola doktoranta w realizacji prezentowanych prac.

- Na stronie 96 i dalej na stronie 99 autor podaje informację, że w czasie prowadzenia testów nie występowała emisja NH<sub>3</sub>. Wiadomym jest, że oznaczanie stężenia NH<sub>3</sub> w gazach spalinowych jest pomiarem stosunkowo trudnym. Pytanie w jaki sposób był realizowany pomiar tego związku? Z wykorzystaniem jakiego analizatora oraz w którym miejscu zamontowana była sonda. Jak Doktorant ocenia wiarygodność pomiarów w tym zakresie?
- Czy w czasie prowadzenia testów oznaczano zawartość związków amonowych w ubocznych produktach spalania? Jeżeli tak to na jakim poziomie pozostawały?

## Rozdział 6

- Pewne niezrozumienie recenzenta powoduje miejsce ulokowania w harmonogramie zdarzeń, pomiarów rozkładu temperatury w komorze paleniskowej kotła prezentowanych w rozdziale 6. W opinii autora cały proces projektowania instalacji odazotowania należałoby zaczynać od realizacji przedmiotowych pomiarów. Pytanie dlaczego te pomiary realizowane były dopiero po zabudowie technologii oraz testach obiektowych jej funkcjonowania?

## Rozdział 7

- Prośba o doprecyzowanie udziału autora w prezentowanych pracach.
- Na stronie 129 Doktorant prezentuje wykres 7.7. Pytanie jakie jest źródło danych do tego wykresu? Czy są o pomiary własne Doktoranta czy dane literaturowe?
- Na tej samej stronie tj. 129 Doktorant pisze „*Otrzymany zasięg lanc porównano z nagraniem dostarczonym z badania lanc*”. Prośba o wyjaśnienie o jakie nagranie i czyjego autorstwa chodzi? W jakich warunkach odbywały się te badania w stosunku do warunków prowadzonych obliczeń.
- Na tej samej stronie tj. 129 Doktorant pisze o prędkości wyrzutu cząstek. Pytanie skąd pochodziły dane w tym zakresie przyjęte w modelowaniu i jakie były ich wartości?

Podkreślić należy, że wskazane uwagi nie umniejszają znacząco wartości naukowej pracy. Przedstawiony cel pracy został osiągnięty, zakres pracy także umożliwił recenzentowi odpowiednie odniesienie się do postawionego problemu badawczego.

W czasie lektury pracy dostrzegłem również pewne potknięcia stylistyczne i redakcyjne. Przykłady przedstawiam poniżej:

- Strona 12 – „powietrzy sprężonym”
- Strony 13 – „tworzeniu opadów kwaśnych deszczu”

- Strona 40 – Doktorant pisze „Polska energetyka ciepła stoi głównie na kotłach rusztowych, 2023 średnich źródeł spalania węgla kamiennego w rejestrze MCP....” Wydaje się, że jest coś nie tak ze składnią tego zdania.
- Doktorant bardzo często formułuje bardzo długie i zawiłe zdania co utrudnia płynną lekturę tekstu. Przykładem czego może być fragment tekstu na stronie 47 „*Kierując się problemem w uzyskaniu odpowiedniego poziomu emisji postanowiono wykonać analizę zastosowania dodatkowego, 4-tego poziomu wtrysku stosując metodykę numerycznej mechaniki płynów ze wstępną weryfikacją przepływu przez eżektor funkcjonujący w warunkach otoczenia dla którego przeprowadzono walidację modelu oraz w późniejszym etapie w uzależnieniu skuteczności eżektora od temperatury ośrodka*” ;
- Strona 51 – Doktorant pisze „*W zależności od rozpatrywanego zjawiska badawcze stosują odmienne podejście.*” Wydaje się że jest coś nie tak ze składnią tego zdania. Utrudnione też jest zrozumienie jego sensu;
- Strona 62 - Doktorant pisze „*Generacja i walidacja siatki numerycznej*” co doktorant ma na myśli przez sformułowanie walidacja siatki numerycznej?
- Strona 83 - Doktorant pisze „*Testy przeprowadzono celem weryfikacji lokalizacji dysz wtryskowych*”. Jak rozumiem jest to skrót myślowy i doktorantowi chodziło o weryfikację prawidłowości doboru lokalizacji dysz. Tego typu skrótów myślowych w pracy jest bardzo dużo.
- Strona 84 - Doktorant pisze „*Zmiana sposobu dozowania na osobny pomiędzy lewą a prawą stroną FJBS nie wskazała na zasadnicze zmiany w emisji*”. Zdanie w opinii recenzenta niezrozumiałe.
- Strona 95 - Doktorant jako tytuł podrozdziału pisze „*Wyniki ruchów FJBS*”. W opinii recenzenta jest to niezrozumiałe;
- Strona 111 – błąd w formatowaniu tekstu nad tabelą;

### 3.3 Oryginalność pracy i jej główne walory

Doktorant zrealizował bardzo szeroki zakres prac zarówno badawczych jak i konstrukcyjnych, uzyskując wyniki pozwalające na pełniejsze rozumienie pracy instalacji redukcji stężenia tlenków azotu w spalinach kotłów energetycznych w szczególności rusztowych.

Zakres zrealizowanych prac stanowi oryginalny dorobek Doktoranta a uzyskane wyniki dostarczają wniosków, które mogą być przydatne na etapie wdrażania badanych instalacji.



Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest wartościowy i z pewnością wart dalszej popularyzacji poprzez np. zaprezentowanie uzyskanych wyników na konferencjach naukowych czy w czasopiśmie.

#### 4. Wnioski końcowe

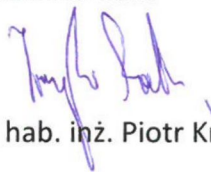
Zdaniem recenzenta, przedstawiona do recenzji praca oraz dotychczasowy dorobek naukowy Autora w pełni spełniają wymagania stawiane do uzyskania tytułu doktora nauk technicznych określone w Art. 13.1 przywołanej w pkt. 1 Ustawy warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Praca poświęcona jest zagadnieniu aktualnemu, wpisując się w prowadzone w szeregu ośrodkach krajowych i zagranicznych badania związane ograniczaniem szkodliwego wpływu energetyki na środowisko. W pracy otrzymane zostały wartościowe wyniki, które zdaniem recenzenta mogą znaleźć wdrożenie w przemyśle.

**Reasumując, pomimo pewnych uwag merytorycznych, jednak nie umniejszających istotnie wartości otrzymanych wyników, recenzent wnioskuje o dopuszczenie pracy Pana mgr Przemysława Garbacza do publicznej obrony.**

Recenzent jednocześnie **wnioskuje o wyróżnienie pracy**. Swój wniosek opieram na bardzo szerokim zakresie prac przeprowadzonych przez Doktoranta, zaprezentowanych w rozprawie. Na szczególne uznanie zasługuje zaplanowanie oraz przeprowadzenie pełnego cyklu badawczego przez Doktoranta poczynając od udziału w tworzeniu koncepcji bardzo ciekawego, innowacyjnego rozwiązania redukcji stężenie tlenków azotu, poprzez realizację badań symulacyjnych procesów ciepłno – przepływowych zachodzących w badanym kotle celem wytypowania pożądanych parametrów konstrukcyjnych i operacyjnych poszczególnych, głównych komponentów technologii, a na przeprowadzeniu badań obiektowych kończąc. Praca zawiera ponadto wszechstronną i dogłębną analizę uzyskanych przez Doktoranta wyników.

Z poważaniem



Dr hab. inż. Piotr Krawczyk, profesor PW