Warszawa, lipiec 2022 r.

Prof. dr hab. inż. Janusz LEWANDOWSKI
Instytut Techniki Cieplnej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jolanty Ziai

pt.: **„Minimalizacja emisji NO_x w procesie fluidalnego spalania"**

Przedmiotem rozważań w pracy doktorskiej mgr inż. Jolanty Ziaji są zagadnienia generacji tlenków azotu w komorze paleniskowej fluidalnego kotła parowego. Głównym celem jaki stawia sobie Doktorantka jest *„opracowanie algorytmu eksperymentalnej minimalizacji emisji tlenków azotu NO_x z cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w kotle opalanym węglem brunatnym dokonywanej metodą SNCR oraz zastosowanie algorytmu do minimalizacji emisji tlenków azotu NO"*.. Niezależnie od celu pracy Doktorantka zdefiniowała tezę,: *„Sterowanie dystrybucją przestrzenną mocznika i warunkami przepływowymi w kotle umożliwia minimalizację emisji tlenków azotu NO_x z kotła energetycznego"*, której udowodnienie traktuje jako główne zadanie w zrealizowanej rozprawie doktorskiej.

Problem minimalizacji emisji tlenków azotu powstałych w wyniki spalania węgla w kotle energetycznym stanowi ciągle wyzwanie badawcze, a w przypadku spalania fluidalnego jest on dotychczas mało rozpoznany, choć wynika to też z faktu, że instalacji dużej mocy wykorzystujących tę technologię jest relatywnie mało. Nie ulega zatem wątpliwości, że opiniowana praca dotyczy problemu technicznego, który ciągle jeszcze nie jest w pełni rozwiązany. Spełnia zatem podstawowe wymaganie jakie stawiane jest rozprawom doktorskim. Podkreślić tu należy, że doktorantka podjęła się tego zadania prowadząc badania na rzeczywistym obiekcie w jednej z krajowych elektrowni, co jest nie lada wyzwaniem, a zrealizowana praca doktorska może stanowić przykład dobrej praktyki w zakresie doktoratu wdrożeniowego.

Przedłożona do recenzji rozpraw doktorska zawarta jest na 149 stronach, obejmuje siedem rozdziałów oraz wykaz oznaczeń, spisy rysunków i tabel oraz bibliografię zawierającą 180 pozycji literatury.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
49/573/2022
Wpłynęło dnia 15.07.22 r.

1. Omówienie treści rozprawy

W pierwszym rozdziale rozprawy, zatytułowanym „*Wstęp*", Doktorantka porusza dwa wątki. Pierwszy to ogólne informacje na temat perspektyw gospodarki światowej w horyzoncie 2050 roku oraz istotne, Jej zdaniem, zdarzenia w historii regulacji prawnych w zakresie ograniczania emisji zanieczyszczeń ze spalania paliw. Na tym tle przedstawia dwie, być może perspektywiczne, ideę bezemisyjnych technologii: bloku GreenGen oraz instalacji spalania w tlenie. Wątek drugi to historia działań na rzecz ograniczenia emisji tlenków azotu w polskiej energetyce, związanych przede wszystkim z zaawansowanymi metodami pierwotnymi, zarówno przy wykorzystania palników niskoemisyjnych jak i zaawansowanego sterowania procesem spalania z zastosowaniem algorytmów wykorzystujących sieci neuronowe. Rozwiązania takie stosowano jest już obecnie praktycznie powszechnie w krajowych elektrowniach wyposażonych w kotły pyłowe. Oceniana rozprawa doktorska dotyczy kotłów fluidalnych, dla których nie jest możliwe przeniesienie wspomnianych wyżej rozwiązań. Spalanie w warstwie fluidalnej przebiega w znacznie niższej temperaturze niż w palniku pyłowym, stąd mniejsza jest emisja pierwotna tlenków azotu, a do jej dalszego ograniczenia można wykorzystać metodę SNCR nie wymagająca stosowania katalizatorów. Ta znana metoda nie była wcześniej stosowana w takich kotłach, co niewątpliwie otwiera obszar badawczy, w którym lokuje się oceniana rozprawa. Już we „*Wstępie*" Doktorantka stwierdza, że jednym z istotnych, oryginalnych wyników jej badań jest określenie niższej, niż to dotychczas sadzono, dolnej temperatury okna, w którym zachodzą reakcje odazotowania. Pozwolę sobie wrócić do tego stwierdzenia w dalszej części niniejszej opinii.

Rozdział 2 poświęcony jest omówieniu dotychczasowego stanu wiedzy, obejmującym takie zagadnienia jak: mechanizmy powstawania tlenków azotu, zapobieganie emisji tlenków azotu NOx i wpływ na nią zmiennych fenomenologicznych oraz rozwiązania techniczne stosowane w kotłach fluidalnych, których celem jest zmniejszeni emisji. Na podstawie przeprowadzonego obszernego przeglądu literatury doktorantka określa istotną, Jej zdaniem, lukę badawczą związaną z efektywnością wykorzystanie niekatalitycznej metody odazotowania poprzez wtrysk do komory kotła roztworu mocznika (amoniaku). Dotyczą one określenia takich parametrów jak stężenie reagenta oraz miejsca wtrysku, szczególnie w przypadku cyrkulacyjnych kotłów fluidalnych. Doktorantka podjęła udaną próbę wypełnienia tej luki prowadząc badania na kotle pracującym w elektrowni, a więc w pełnej skali technicznej.

Rozdział trzeci poświęcony został określeniu celu pracy i postawieni jej głównej tezy: *„Sterowanie dystrybucją przestrzenną mocznika i warunkami przepływowymi w kotle umożliwia minimalizację tlenków azotu NO_x z kotła energetycznego"*.

Zdefiniowany przez Doktorantkę zakres pracy obejmuje następujące zagadnienia:

„ – opracowanie metody eksperymentalnej redukcji emisji tlenków azotu NOx w spalinach w stanach ustalonych i nieustalonych pracy bloku,

– omówienie obiektu badań, materiałów i metod badawczych,

– przedstawienie wyników pomiarów i ich analizę,

– określenie wpływu m.in. strumieni objętości powietrza, mocznika oraz masy paliwa, sorbentu (mączki kamienia wapiennego CaCO3), geometrii kotła, przestrzennej dystrybucji mocznika, obciążenia cieplnego kotła,

– temperatury spalin, składu paliwa na emisję tlenków azotu NOx,

– opracowanie metody optymalizacji redukcji tlenków azotu NOx,

– wnioski i podsumowanie".

Rozdział 4 zatytułowany *„Część eksperymentalna"* dotyczy jednego z dwóch najistotniejszych elementów rozprawy i zawiera takie elementy jak:

- opis obiektu badań,
- opis wykorzystanych instalacji pomiarowych,
- sformalizowanie rozwiązywanego problemu optymalizacyjnego,
- opis badań w zakresie minimalizacji emisji metodami pierwotnymi,
- opis badań w zakresie optymalizacji parametrów pracy układy niekatalicznego odazotowania (SNCR).

Obiektem badań są cztery kotły z cyrkulacyjną warstwą fluidalną pracujące w jednej z krajowych elektrowni. Każdy z nich może wytwarzać 700 Mg/h pary wodnej o wysokich, ale podkrytycznych parametrach. Wyposażone są one w rozbudowane układy pomiarowej w ramach rozproszonego układu sterowania (DCS). Te eksploatacyjne układy pomiarowe, uzupełnione o czajniki do pomiaru spadku ciśnienia i temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej kotła wykorzystywane są w badaniach doktorantki. Dodatkowo zbudowano specjalną stację dozowania mocznika na sześciu poziomach komory poprzez 32 dysze z możliwością niezależnego sterowania wydajnością w czterech sekcjach.

Należy tu podkreślić skalę trudności jaka przyszło pokonać Doktorantce przy prowadzeniu pomiarów na rzeczywistych obiektach z wykorzystaniem eksploatacyjnych systemów pomiarowych. Takich prac doktorskich nie spotyka się często.

Z formalnego punktu widzenia zagadnienie optymalizacyjne rozwiązywane w ramach badań jest niezwykle złożone. Funkcją celu jest stężenie tlenków azotu, zidentyfikowano 12 zmiennych sterujących, których część jest zmienna w przestrzeni i czasie. Ograniczenia to nie tylko dopuszczalne zakresy zmian tych zmiennych ale i równania określające szybkość zachodzących reakcji chemicznych. dodatkowo Doktorantka podjęła próba uogólnienia wyników poprzez zdefiniowanie kryteriów podobieństwa mających wpływ na badany proces, takich jak liczby Reynoldsa, Froude'a, Lewisa, Sherwooda, Archimedesa, Nusselta i Prandtla.

Nie ulega wątpliwości, że nie jest możliwe rozwiązania tak złożonego zadania optymalizacyjnego przy wykorzystaniu zdefiniowanych w literaturze metod optymalizacji. Jedyne co pozostaje to badanie wpływu poszczególnych zmiennych na skuteczność ograniczania emisji oraz zawężanie przedziału poszukiwań, a więc metoda, którą można nazwać metodą „systematycznego przeszukiwania z wykorzystaniem wiedzy i doświadczenia badacza". Taka to właśnie metodę proponuje Doktorantka, dekomponując dodatkowo problem optymalizacyjny na dwa podzadania: optymalizację metodami pierwotnymi poprzez dobór właściwych parametrów pracy kotła oraz optymalizację parametrów pracy instalacji SNCR. Znalezienie najlepszych wartości zmiennych decyzyjnych w ramach tych dwóch procesów wymaga jeszcze opracowania algorytmów sterowania kotłem i instalacją SNCR, które zapewni pracę w warunkach minimalnej emisji. Zadanie to zostało także w pracy zrealizowane.

W rozprawie przedstawiono cały szereg wyników cząstkowych pokazujących wzajemny wpływ parametrów procesu oraz ich oddziaływanie na stężenie tlenków azotu w spalinach. Te częściowe wyniki posłużyły między innymi do korekty algorytmu sterowanie przepływem powietrza. Szczególnie intersujące są wyniki przedstawiające zmiany temperatur w pętlach cyrkulacyjnych materiału inertnego spowodowane utratą drożności kanałów przerzutowych. Zmniejszenie drożności powoduje w efekcie spadek temperatury, a tym samym zmniejszenie skuteczności odazotowania spalin. Oryginalny charakter mają także wyniki przedstawiające wpływ dodawanego do kotła kamienia wapiennego na emisję tlenków azotu. Materiał ten jest dodawany do paleniska w celu ograniczenia emisji tlenków siarki. Jednocześnie tlenek wapnia działając jako katalizator powoduje powstawanie tlenku azotu poprzez utleniania amoniaku i cyjanowodoru ale wtórnie katalizuje reakcję tlenku węgla z tlenku i podtlenku azotu, co w sumie zmniejsza emisję zarówno tlenku węgla jak i tlenków azotu.

Badanie dotyczące układu SNCR obejmowały przede wszystkie określnie optymalnych parametrów wtryskiwanego amoniaku takich jak miejsce wtrysku, stężenie

roztworu mocznika i strumień masy wtryskiwanego reagenta. Zakres badan był bardzo szeroki i obejmował także takie zgadnięcia jak dobór dysz wtryskowych, określenie właściwego stężenia i ciśnienia roztworu mocznika. W pracy zamieszczono wyniki tych badań, a znaczna ich część jest istotna nie tyko dla prawidłowego zaprojektowania instalacji, ale ma też znaczenie poznawcze.

W wyniku badań stwierdzono miedzy innymi, że proponowane wcześniej rozmieszczenie dysz w obszarze separatorów nie jest skuteczne przy niskich obciążeniach na skutek spadku temperatury spalin poniżej 750 °C. Stąd dysze umieszczono także w obszarze komory paleniskowej. Potwierdzono skuteczność zaproponowanego rozwiązania.

Niezwykle istotny dla oceny omawianej rozprawy jest rozdział 5 zatytułowany *„Wyniki badań eksperymentalnych i ich dyskusja"*. Przedstawione w rozdziale 4 wyniki dotyczyły fazy projektowania i budowy instalacji odazotowania, która pozwoliła zminimalizować stężenie tlenków azotu w spalinach istniejącego kotła na poziomie niższym niż dopuszczalne standardy emisji (stężenie dopuszczalne określone przepisami prawnymi). Na tej podstawie zbudowane instalację SNCR na trzech kotłach i przeprowadzono badanie ich skuteczności w pełnym dopuszczalnym zakresie pracy kotłów w stanach ustalonych i przejściowych związanych ze zmianą obciążenia. Zamieszczono tu szereg wyników szczegółowych potwierdzających skuteczność zaproponowanego rozwiązania.

Dodatkowym elementem przedstawionym w ocenianej rozprawie jest próba określenia wartości liczb podobieństwa wymiarujących zjawiska zachodzące w badanej instalacji oraz związków pomiędzy nimi. Należy się tu zgodzić z Doktorantką że działania te mają zupełnie wstępny charakter i mogą co najwyżej być impulsem do podjęcia dalszych badań. Ciekawym, zamieszczonym w pracy materiałem jest zestawienie wartości współczynnika korelacji liniowej między zawartością tlenków azotu w spalinach, a 190 zmiennymi, które mają charakter zmiennych wejściowych określających przebieg procesu. Moim zdaniem wynik ten jest zaskakujący. Tylko w przypadku 5 zmiennych wartość bezwzględna współczynnika korelacji przyjmuje wielkość większa niż 0,5 (wartość przyjmowana często za granicę istotności związku liniowego). Są to zmienne oczywiste, takie jak stosunek powietrze - paliwo, temperatura spalin w rejonie wtrysku roztworu mocznika oraz ciśnienie wtryskiwanego roztworu (decyduje o jego ilości).

Charakter podsumowania badań nad skutecznością opracowanej metody maja wyniki przedstawione w rozdziale 6 zatytułowanym *„Główny wynik badań"*. Przedstawiono w nim wyniki ciągłego 4 dniowego pomiaru bloku z zadana wartości stężenia tlenków azotu w spalinach odpowiednio 200 mg/m^3 oraz 150 mg/m^3. Jednoznacznie potwierdziły one

skuteczność metody zaproponowanej przez Doktorantkę. Na podkreślenie zasługuje efektywność zastosowanych algorytmów sterowania, które mimo zmian mocy bloku w całym dopuszczalnym zakresie obciążeń utrzymują stężenie na zadanym poziomie. Porównano je także z efektami działania instalacji odazotowanie na trzech innych kotłach fluidalnych pracujących w tej samej elektrowni. Wskazuje ono na liczne przewagi rozwiązania będącego przedmiotem rozprawy, w tym zarówno skuteczność odazotowania jak i stabilności procesu sterowania.

Pracę zamyka rozdział 7 „Podsumowanie i wnioski." Wskazano w nim główne osiągniecia Doktorantki oraz kierunki dalszych badan.

Ogólna ocena pracy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Jolanta Ziaja podjęła niezwykle trudne zadanie przeprowadzenia oryginalnych badań na rzeczywistym obiekcie technicznym i zaproponowania na tej podstawie zmian algorytmów sterowania i optymalizacji pracy kotła fluidalnego wraz z autorskim projektem instalacji SNCR. Badania te zakończyła sukcesem. To jest podstawą nie tylko do oceny pracy jako spełniającej wymogi pracy doktorskiej ale jako pracy wyróżniającej. Może one być ona wzorem „doktoratu wdrożeniowego" i moim zdaniem zasługuje na formalne wyróżnienie. Należy podkreśli, że oprócz zdecydowanie praktycznego znaczenia uzyskanych wyników część z nich ma równie istotny charakter poznawczy.

Ta jednoznacznie pozytywna ocena powoduje, że przedstawione niżej uwagi krytyczne maja już zdecydowanie drugorzędne znaczenie i zamieszczono je poniżej tylko dla dochowania tradycji recenzji doktorskiej.

Uwagi krytyczne

1. Z przeprowadzonych badań wynika że w przypadku badanego obiektu reakcja wiązania tlenków azotu przez amoniak może zachodzić w znacznie niższej temperaturze niż to wynikało z dotychczasowych doświadczeń. Uzyskany wynik nie pozwala jednak na stwierdzenie bez zastrzeżenie *„dolna temperaturą reakcji jest 750°C zamiast 870 °C"*. Ta wyższa wartość udokumentowana jest wieloma badaniami o charakterze podstawowym i doświadczeniami z pracy instalacji SNCR w kotłach. Sądzę że uzyskany przez Doktorantkę

wynik jest szczególnym przypadkiem związanym z obecnością w spalinach tlenku wapnia i intensyfikacją procesu, co jest charakterystyczne dla przepływu fluidalnego.

2. Zrealizowane badania pozwoliły **twórczo, efektywnie** i niewątpliwie **innowacyjnie rozwiązać** zaprojektować instalację odazotowania spalin w kotle fluidalnym. Te trzy, wytłuszczone w poprzednim zdaniu słowa, są wystarczające żeby zrealizowana praca spełniała wymagania jakie są stawiane pracom doktorskim. Doktorantka, pewnie w obawie o „naukowość" rozprawy, dożyła do niej szereg rozważań o teoretycznym charakterze. Moim zdaniem zupełnie niepotrzebnie. Z rozważań tych niewiele wynika dla oceny wartości pracy.

3. Nie istnieje praca doktorska bez błędów o charakterze redakcyjnym. Są one tez w opiniowanej rozprawie. Nie zmieniają one bardzo wysokiej oceny pracy i ich wypisywanie moim zdaniem jest zbędne - z jednym wyjątkiem: w „papierowej" wersji rozprawy opis osi poziomej na rysunkach 5.35 i 5.36 jest nieczytelny nawet pod lupą.

4. Niestety do pracy wdarł się też błąd, który obecnie można spotkać często. Nie wypada jednak żeby przedostał się do rozprawy doktorskiej, bowiem *„rozwiązanie najbardziej optymalne"* po prostu nie istnieje.

Wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom , które są podstawą do ubiegania się o stopień naukowy doktora, w szczególności:

- w pracy podjęto oryginalny problem badawczy o charakterze wdrożeniowym z istotnym elementami o charakterze poznawczym i naukowym,
- praca zawiera wszystkie elementy pracy naukowej od postawienia hipotezy badawczej do wykazania w skali przemysłowej jej poprawność,
- wyczerpująco opisuje stan wiedzy w przedmiocie rozprawy i jednoznacznie wskazuje własne osiągniecia,
- rozprawa została przygotowana zgodnie ze zasadami pisania raportów z badań wykonywanych w ramach pracy doktorskiej,
- Doktorantka wykazała umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników badań.

Z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Jolanty Ziaji pt.: *„Minimalizacja emisji NO_x w procesie fluidalnego spalania"* spełnia wymogi ustawowe i w oparciu o powyższe stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Wniosek o wyróżnienie rozprawa

Rozprawę doktorską Pani mgr inż. Jolanty Ziaji uważam za wzór pracy doktorskie o charakterze wdrożeniowym, Skala problemu, rozległy zakres badań rzeczywistego obiektu, skuteczne rozwiązanie trudnego wielowymiarowego problemu o charakterze zarówno praktycznym jak i poznawczym znacząco przekracza zakres typowych prac doktorskich. Wszystkie te elementu upoważniają mnie do podstawienia formalnego wniosku o wyróżnienie rozprawy.