

Prof. dr hab. inż. Dawid Taler  
Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Procesów Ciepłych,  
Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów  
Ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków  
tel. 0048 12 628 30 26  
e-mail: dawid.taler@pk.edu.pl

Kraków, 23.10.2023 r.

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

Recenzowana rozprawa o objętości 143 stron napisana jest w języku polskim. Składa się z ośmiu rozdziałów oraz ze spisu literatury cytowanej zawierającego 92 pozycje literaturowe. Na początku rozprawy znajduje się spis treści oraz jej streszczenia w języku polskim i angielskim.

Przedmiotem rozprawy jest usuwanie tlenków azotu  $\text{NO}_x$  w kotłach rusztowych z wykorzystaniem metody SNCR (z ang. Selective Non-Catalytic Reduction).

Przeprowadzono modelowanie CFD i badania eksperymentalne kotła rusztowego WR-25 wyposażonego w instalację odazotowania typu FJBS (z ang. Furnace Jet Boiler System). Do rozpylania roztworu mocznika wtryskiwanego na wylocie z komory paleniskowej oraz na wlocie do drugiego ciągu kotła zastosowane zostało sprężone powietrze. Przeprowadzono porównawczą analizę ekonomiczną zastosowania systemu FJBS oraz technologii odazotowania bazującą na dozowaniu mocznika przy użyciu wody zdemineralizowanej. Przedstawiono również wyniki analiz i obliczeń numerycznych zagrożenia korozją powierzchni ogrzewalnych kotła WP70 spowodowanego nieprawidłowo działającym systemem SNCR.

Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna z poznawczego i praktycznego punktu widzenia. Symulacja CFD i badania eksperymentalne spalania węgla w kotle rusztowym przy zastosowaniu metody SNCR do usuwania tlenków azotu ze spalin mogą stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej.

## **1. Charakterystyka rozprawy**

W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie do rozprawy. Omówione zostały normy emisyjne oraz powstawanie i wpływ na środowisko tlenków azotu. Dużo uwagi poświęcono analizie powstawania tlenków azotu przy spalaniu paliwa stałego. Przedstawione zostały 3 mechanizmy powstawania tlenków azotu:

- powstawanie tlenków azotu  $\text{NO}_x$  z azotu zawartego w paliwie,
- utlenianie azotu zawartego w powietrzu dostarczanym do komory paleniskowej kotła,
- powstawanie NO w obecności rodników węglowodorowych (szybkie  $\text{NO}_x$ ).

Kandydat omówił również powstawanie podtlenku azotu, który powstaje przy spalaniu paliwa w niższych temperaturach, np. w kotłach fluidalnych. Wzrost emisji  $N_2O$  może także powstawać przy rozkładzie mocznika stosowanego w usuwaniu tlenków azotu ze spalin z wykorzystaniem metody SNCR. Wyszczególnione zostały również najważniejsze parametry wpływające na emisję  $NO_x$ .

W paragrafie 1.3 scharakteryzowane zostały metody ograniczania emisji  $NO_x$  z kotłów opalanych paliwami stałymi, takie jak: metody pierwotne odazotowania (stopniowanie powietrza i paliwa oraz recyrkulacja spalin), metody wtórne odazotowania (selektywna redukcja katalityczna, z ang. Selective Catalytic Reduction; selektywna redukcja niekatalityczna SNCR).

W podpunkcie 1.3.3 omówione zostały parametry wpływające na efektywność metody SNCR i SCR, takie jak: temperatura spalin, czas reakcji, stopień wymieszania, dobór reagenta, zmienne obciążenie kotła, stężenie bazowe  $NO_x$  i współczynnik nadmiaru stechiometrycznego reagenta. Więcej uwagi poświęcono dodatkom do reagentów SNCR.

W podpunkcie 1.3.5 omówione zostały rozwiązania komercyjne.

Sformułowanie problemu, cel, zakres i teza pracy przedstawione zostały w rozdziale 2.

Celem rozprawy jest dobranie odpowiednich parametrów pracy innowacyjnego (opatentowanego przez Politechnikę Śląską) wewnątrzkomorowego systemu strumienic - FJBS z dalszym rozwinięciem do wtórnej metody hybrydowej (FJBS+) poprzez rozszerzenie o reaktor katalityczny.

W paragrafie 2.3 mgr inż. Przemysław Garbacz sformułował następujące tezy rozprawy:

- w kotle rusztowym rozkład temperatury spalin odbiega od rozkładu temperatury spalin w kotłach pyłowych, co powoduje konieczność opracowania procedury projektowania instalacji SNCR w kotłach rusztowych,
- niewielkie wymiary komory paleniskowej w kotłach rusztowych narzucają konieczność precyzyjnego dozowania i (lub) stworzenia warunków pozwalających na wyrównanie pola temperaturowego w przekroju komory paleniskowej,
- liczba punktów dozowania reagenta usytuowanych w górnej części komory paleniskowej kotła rusztowego powinna być większa przy większych obciążeniach kotła,
- użycie powietrza zamiast wody jako nośnika reagenta w układach SNCR umożliwia zmniejszenie spadku sprawności kotła,
- w obszarze drugiego ciągu istnieją korzystne warunki do usuwania ze spalin tlenków azotu  $NO_x$  za pomocą metody SCR.

Obiekt badań, którym był kocioł rusztowy WR-25 omówiony został w rozdziale 3. Jest to kocioł wodny rusztowy konstrukcji Rafako S.A. Trójciągowy kocioł z taśmowym rusztem mechanicznym posiada 7 strefową skrzynią powietrza zasilaną wentylatorem podmuchowym. Projektowym paliwem jest miał węgla kamiennego.

Wpływ sylwetki kotła na emisje  $NO_x$  i na możliwość zabudowy SNCR oraz SCR analizowany jest w paragrafie 3.1.2.

Wyniki badań wstępnych przedstawione są w paragrafie 3.1.1. Wyznaczony został rozkład temperatury spalin w przekroju poprzecznym komory paleniskowej na 3 poziomach: poziom 1 - 3580 mm, poziom 2 - 5300 mm, poziom 3 - 6200 mm. Do pomiaru temperatury spalin zastosowano pirometr aspiracyjny, w którym radiacyjna wymiana ciepła między termoelementem a ekranami kotła zmniejszana jest przez ekrany termoelementu ze spieku odpornego na działanie spalin o wysokiej temperaturze. Dzięki zastosowaniu ekranów termoelementu podwyższa się dokładność pomiaru temperatury spalin.

W paragrafie 3.2 omówiono system FJBS.

Mieszanka powietrze-reagent podawana jest za pomocą strumienicy do komory paleniskowej. Strumienice do wtrysku mocznika usytuowane były na 3 poziomach na ścianie prawej i lewej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wtrysk mocznika na 3 poziomach jest niewystarczający. W celu sprawdzenia czy dodanie dysz wtryskowych na 4 poziomie umożliwi spełnienie norm dotyczących emisji NO<sub>x</sub> przeprowadzono symulację CFD procesów przepływowo-cieplnych w komorze przy użyciu oprogramowania ANSYS Fluent.

W paragrafie 4.1.2 zestawiono: równanie zachowania masy (równanie ciągłości), równanie zachowania pędu oraz równanie zachowania energii. Modele turbulencji omówione są w paragrafie 4.1.3. Najczęściej stosowane modele turbulencji zostały krótko omówione w paragrafie 4.1.3.

Przedmiotem paragrafu 4.1.4 są modele interakcji chemicznej.

W paragrafie 4.1.5 omówiono modelowanie radiacyjnej wymiany ciepła w kotłach podkreślając, że najczęściej do modelowania wymiany ciepła przez promieniowanie między zapyłonymi spalinami, zawierającymi również cząstki sadzy, stosowana jest metoda P-1 oraz Discrete Ordinates Method (DO). Do śledzenia ruchu cząstek zawieszonych w fazie gazowej zastosowano Discrete Phase Model (DPM).

W paragrafie 4.1.7 omówiono konwersję paliwa na ruszcie i eksperymentalną walidację uzyskanych wyników. Wyniki modelowania spalania w kotle rusztowym z wykorzystaniem metody DPM przedstawiono w podpunkcie 4.1.7.1. W tym samym podpunkcie przedstawione zostało porównanie temperatur spalin uzyskanych z pomiarów i modelowania CFD. Różnice między temperaturami otrzymanymi z pomiarów i modelowania CFD zawarte są w przedziale od -7,56 do 15,9%.

Model numeryczny strumienicy do wtryskiwania roztworu mocznika do komory przedstawiono w paragrafie 4.1.8. Obejmuje on pomiary stanowiskowe i wstępną analizę CFD, generację i walidację siatki numerycznej, modele turbulencji oraz funkcje przybliżające bezwymiarową prędkość płynu przy ścianie. Porównane zostały profile prędkości powietrza mierzone w kilku różnych odległościach od wylotu ze strumienicy otrzymane z pomiarów i modelowania CFD. W modelowaniu CFD zastosowano następujące modele turbulencji: k-ε Standard, k-ε Non-equilibrium, k-ε Enhanced Treatment, k-ε Realizable Enhanced Treatment, k-ω BSL, k-ω GEKO, k-ω SST i k-ω Standard. Symulację odazotowania spalin z wykorzystaniem instalacji FJBS przedstawiono w paragrafie 4.1.9.

Wyniki symulacji CFD przedstawione zostały w paragrafie 4.2. Przenalizowany został wpływ ciśnienia zasilania FJBS na rozkład temperatury w komorze paleniskowej oraz przeprowadzona została symulacja odazotowania z wykorzystaniem 4-tego poziomu systemu FJBS.

Przedmiotem rozdziału piątego są badania systemu FJBS zainstalowanego w kotle WR-25. Pomiary przeprowadzone zostały w zakresie obciążeń kotła od 25 do 29,5 MWt.

Z przeprowadzonych badań na obiekcie rzeczywistym wynika, że dla prawidłowego działania systemu FJBS niezbędna jest automatyzacja dozowania reagenta w zależności od rozkładu temperatury w komorze paleniskowej. W paragrafie 5.2 przedstawiony został system FJBS wyposażony w automatyczny układ sterowania strumieniem przepływu reagenta oraz automatycznym wyborem punktu wtrysku aerozolu w zależności od obciążenia kotła.

Wyniki długookresowych badań systemu FJBS przy niskich, średnich i wysokich obciążeniach kotła przedstawione zostały w paragrafie 5.3. Przeprowadzone testy pokazały,

że możliwe jest spełnienie norm emisyjnych w całym zakresie zmian obciążenia kotła WR-25 przy zastosowaniu systemu FJBS.

Przedmiotem paragrafu 5.4 jest metoda hybrydowa FJBS+. Pomiędzy pęczkami podgrzewacza wody usytuowanymi w drugim ciągu kotła zainstalowany został pojedynczy wkład SCR z regenerowanym katalizatorem. Zastosowany katalizator posiada optymalny punkt pracy w temperaturze 380°C. W miejscu usytuowania wkładu SCR temperatura spalin zmienia się w przedziale od 320 do około 400°C. Przeprowadzone badania na kotle WR-25 pokazały, że zainstalowanie reaktora SCR w przestrzeni za górnym pęczkiem podgrzewacza wody, skutecznie redukuje zawartość tlenków azotu NO<sub>x</sub> oraz amoniaku NH<sub>3</sub>.

W rozdziale 6 omówiono wyniki zastosowania dodatkowych rozwiązań w systemie FJBS. W celu zmniejszenia zużycia reagenta przy dużych obciążeniach kotła dołożono 2 dodatkowe punkty wtrysku amoniaku na poziomie 4. Celem dodatkowych punktów wtrysku reagenta było uzyskanie dobrego wymieszania reagenta ze spalinami i zmniejszenie prześlizgu amoniaku

w spalinach. Wzrost strumienia gazów spalinowych przy większych obciążeniach kotła wymusza konieczność kaskadowego zwiększania liczby punktów wtryskowych reagenta na kolejnych poziomach w miarę wzrostu obciążenia kotła.

W paragrafie 6.3 przeprowadzone zostało porównanie systemu FJBS z klasycznym układem SNCR stosującym wodę zdemineralizowaną do wtrysku mocznika do komory paleniskowej kotła. Z porównania przedstawionego w tablicy 6.5 wynika, że koszty eksploatacyjne układu FJBS bazującego na sprężonym powietrzu są 1,62 razy mniejsze w porównaniu z kosztami eksploatacyjnymi klasycznego układu SNCR bazującego na wodzie zdemineralizowanej.

W paragrafie 7 omówione zostały zagrożenia występowania korozji powierzchni ogrzewalnych kotła. Wtrysk mocznika do spalin o wysokiej temperaturze może wywoływać korozję powierzchni ogrzewalnych kotła ciepłowniczego. Zagrożeniem może być tworzenie się chlorku amonu NH<sub>4</sub>Cl, który powstaje w wyniku reakcji chloru znajdującego się w spalinach

z amoniakiem, który powstaje z rozkładu mocznika. W rozdziale 7 opisane zostały głównie mechanizmy i skutki korozji powierzchni ogrzewalnych w kotle WP-70, który jest kotłem ciepłowniczym na pył węglowy o konstrukcji wieżowej. Na rurach ekranowych kotła wystąpiła korozja wżerowa spowodowana nieprawidłowym działaniem systemu SNCR.

Przeprowadzono badania laboratoryjne oraz modelowanie CFD komory paleniskowej kotła WP-70, wyposażonej w instalację SNCR. Na podstawie analiz eksperymentalnych i wyników modelowania CFD komory paleniskowej kotła, do której wtryskiwany jest roztwór mocznika sformułowane zostały następujące zalecenia, które pozwolą uniknąć korozji powierzchni ścian komory paleniskowej: strumień ciekłego reagenta nie powinien docierać do obszaru, w którym temperatura spalin jest poniżej 700°C oraz strumień ciekłego reagenta powinien całkowicie odparować do fazy gazowej przed dotarciem do zagrożonej powierzchni.

Podsumowanie i wnioski końcowe przedstawiono w rozdziale 8.

## **2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie**

Najważniejszym osiągnięciem naukowym mgr inż. Przemysława Garbacza jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych oraz modelowania CFD w celu podwyższenia efektywności działania instalacji SNCR, w tym zmniejszenia emisji tlenków azotu i amoniaku do atmosfery, obniżenia kosztów odzotowania spalin oraz wyeliminowania korozji powierzchni ogrzewalnych kotła.

Mgr inż. Przemysław Garbacz wykazał, że:

- system FJBS umożliwia utrzymanie emisji  $\text{NO}_x$  na poziomie spełniającym wymagania zawarte w Dyrektywie IED (Industrial Emissions Directive),
- przy maksymalnych obciążeniach kotła temperatura spalin jest wyższa od przedziału temperaturowego, w którym metoda SNCR jest najbardziej efektywna; z tego względu dysze wtryskowe mocznika powinny być przeniesione za feston (tj. za część konwekcyjną parownika kotła),
- w celu uzyskania wymaganego przez przepisy stężenia  $\text{NO}_x$  w gazach spalinowych niezbędny jest wielopoziomowy, kaskadowy układ wtrysku reagenta,
- w przestrzeni między pęczkami podgrzewacza wody może być zainstalowany reactor SCR w celu redukcji stężenia  $\text{NO}_x$  oraz  $\text{NH}_3$  wytwarzanego przy wtryskiwaniu mocznika w systemie SNCR,
- wtrysk mocznika stosowany w metodzie SNCR usuwania tlenków azotu ze spalin, może wywoływać korozję ekranów kotła spowodowaną zbyt długim zasięgiem lanc, skutkującym natryskiem mocznika na ekrany komory paleniskowej,
- zastosowanie sprężonego powietrza do rozpylania mocznika w systemie FJBS, jest bardziej ekonomiczne niż rozpylanie mocznika za pomocą wody zdemineralizowanej w klasycznym systemie SNCR.

Praca doktorska Pana mgr inż. Przemysława Garbacza ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne.

### 3. Uwagi krytyczne

Pomimo pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej Kandydata mam również pewne uwagi krytyczne.

Paragraf 4.1.2 opisujący równania zachowania masy, pędu i energii napisany jest niestarannie. Niewłaściwy jest tytuł paragrafu 4.1.2 „Równania zachowania stanu”, podczas gdy są to równania zachowania masy, pędu i energii. Przed równaniem zachowania pędu (4.2) brak jest objaśnienia co to jest za równanie. Na stronie 48, w 3 i 2 linijce od dołu, Autor pisze „W układach, w których zachodzi wymiana ciepła lub rozpatrywany jest przepływ ściśliwy ( $\text{Ma} > 1$ ) obowiązuje równanie zachowania energii (I zasada termodynamiki).” Nie jest to zdanie zrozumiałe, gdyż równanie zachowania energii musi być zawsze spełnione. Nie podano również co oznaczają symbole  $E$  i  $k$  w równaniu (4.4). Nie jest także jasne dlaczego w równaniu (4.5) jednostkową energię wewnętrzną oznaczono przez  $i$  a nie przez  $u$ . Zwykle w podręcznikach z termodynamiki symbol  $i$  oznacza entalpię właściwą, która jest również oznaczana symbolem  $h$ .

Z uwagi na dużą liczbę symboli występujących we wzorach dobrze było by umieścić spis oznaczeń wraz z jednostkami miar.

Na rysunkach 4.11 - 4.13 brak jest opisu poziomej osi.

W pracy jest bardzo duża liczba usterek literowych. Wynika to prawdopodobnie z bardzo dużego zakresu rozprawy obejmującego badania eksperymentalne laboratoryjne i na obiektach rzeczywistych oraz modelowanie CFD.

Zauważone usterki nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

### 4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Garbacza spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim.

Rozprawa wnosi istotny wkład w poznanie procesów usuwania tlenków azotu  $\text{NO}_x$  ze spalin w kotłach rusztowych opalanych węglem kamiennym. W celu opracowania efektywnego i taniego układu FJBS w kotle WR-25, mgr inż. Przemysław Garbacz przeprowadził obszerne badania eksperymentalne i modelowanie CFD procesów powstawania tlenków azotu i amoniaku w kotle WR-25 wyposażonym w system FJBS. Zaproponował także usytuowanie dysz wtryskowych mocznika, odpowiednie dla całego zakresu zmian obciążenia kotła.

Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr inż. Przemysława Garbacza do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

*David Jalek*