

**Prof. dr hab. inż. Robert Sekret**

Profesor zwyczajny w Politechnice Częstochowskiej

**POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA**

**Wydział Infrastruktury i Środowiska**

Zakład Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji

42 – 201 Częstochowa, ul. J.H. Dąbrowskiego 69

E-mail: [rsekret@is.pcz.czest.pl](mailto:rsekret@is.pcz.czest.pl)

Częstochowa, dn. 30.08.2018 r.

**Szanowna Pani**

**Dr hab. inż. Joanna Kalka**

Prodziekan ds. Nauki i Organizacji

Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki

Politechniki Śląskiej

ul. Konarskiego 18

44-100 Gliwice

## **Recenzja**

### **Rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Pilarza**

#### **1. Wprowadzenie**

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na pismo Nr RIE-BD/4/388/2017/2018 z dnia 30 lipca 2018 roku.

#### **2. Zakres rozprawy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Pilarza nosi tytuł „Analiza numeryczna procesu redukcji tlenków azotu w technologii SCR dla bloków węglowych”. Rozprawa zawiera łącznie 120 stron. Oparto ją o 73 pozycje bibliograficzne. Rozprawa została podzielona na 11 głównych rozdziałów

i uzupełniona: streszczeniami, spisem tabel i rysunków, bibliografią oraz trzema załącznikami.

Rozdział pierwszy pracy stanowi wprowadzenie. Doktorant odniósł się w nim do problematyki emisji zanieczyszczeń gazowych z obiektów energetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem tlenków azotu. Jako punkt odniesienia wykorzystał obowiązujące akty prawne w postaci: Dyrektyw Unii Europejskiej, krajowych aktów prawnych oraz wytycznych BAT. W rozdziale drugim Autor nawiązał do stanu wiedzy w zakresie podjętego problemu naukowego. Doktorant podkreślił w nim: negatywny wpływ na środowisko emisji tlenków azotu, wskazał metody pierwotne i wtórne pozwalające na ich redukcję. Doktorant szczególną uwagę zwrócił również na przemysłowe zastosowanie metody selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) wraz z aspektami jej wykorzystania w blokach energetycznych. Podsumowując tą część pracy Autor wskazał, że obecny stan wiedzy jest niewystarczający do dalszego rozwoju metod SCR w świetle nowych norm dopuszczalnych emisji, zwłaszcza dla kotłów węglowych pracujących przy zmiennych obciążeniach cieplnych. Rozdział trzeci ocenianej rozprawy doktorskiej stanowi cel i zakres pracy. Doktorant jako cel rozprawy przyjął opracowanie metodologii analizy wybranych zagadnień pracy instalacji katalitycznej redukcji tlenków azotu i jej integracji z instalacją kotła węglowego oraz bloku energetycznego. Założonym efektem jest zwiększenie skuteczności działania reaktora deNO<sub>x</sub> oraz określenie jego konfiguracji w warunkach zaostrzających się norm emisji tlenków azotu. Autor jako zakres pracy przyjął m.in.: modelowanie działania reaktora SCR w ciągu oczyszczania spalin dla referencyjnego bloku węglowego 900 MW, opracowanie modelu numerycznego modułu SCR dla bloku węglowego z kotłem OP-650k oraz optymalizację procesu redukcji NO<sub>x</sub> w II - ciągu kotła węglowego. W rozdziale czwartym rozprawy Doktorant wskazał podstawowe mechanizmy tworzenia tlenków azotu, tj.: mechanizm termiczny, paliwowy oraz szybki, natomiast w rozdziale piątym scharakteryzował metody ograniczające emisję tlenków azotu, tj. metody pierwotne i wtórne wraz ze wskazaniem stosowanych obecnie rozwiązań lokalizacji reaktorów SCR, ich warunków pracy i problemów eksploatacyjnych. W rozdziale szóstym rozprawy Autor przedstawił istniejący stan wiedzy z zakresu wpływu lokalizacji reaktora SCR na system oczyszczania spalin. Szczególną uwagę zwrócił na wpływ instalacji SCR na proces odsiarczania i odpylania spalin. W rozdziale siódmym Doktorant zawarł analizę wpływu parametrów spalin na proces redukcji tlenków azotu. Jako narzędzie do modelowania

procesów termodynamicznych wykorzystał program Epsilon Professional. W rozdziale tym: scharakteryzował podstawowy model reaktora SCR oraz parametry spalin, następnie przedstawił uzyskane charakterystyki wpływu: stężenia tlenu, zawartości wody, stężenia tlenków azotu w spalinach na stopień redukcji  $\text{NO}_x$  oraz temperaturę spalin za reaktorem SCR. W rozdziale ósmym rozprawy Doktorant przeprowadził analizę wariantów lokalizacyjnych reaktora SCR dla trzech przypadków, tj.: high-dust SCR, low-dust SCR oraz low-dust tail-end SCR. W rozdziale dziewiątym rozprawy Autor zawarł analizę wpływu systemu akumulacji ciepła na emisyjność Duobloku. W tym celu wykorzystał program Epsilon Professional. W tej części pracy Doktorant przedstawił: opis idei Duobloku z systemem akumulacji ciepła, zależność parametrów pracy systemu redukcji  $\text{NO}_x$  od obciążenia Duobloku, wyniki prac modelowych emisji tlenków azotu oraz założenia do analizy zmiennej pracy Duobloku z wykorzystaniem akumulacji ciepła. W rozdziale dziesiątym Autor zajął się modelowaniem numerycznym procesu katalitycznej redukcji  $\text{NO}_x$ . Celem tej części pracy było opracowanie modelu procesu selektywnej redukcji katalitycznej tlenków azotu dla potrzeb wykorzystania go do optymalizacji procesu  $\text{deNO}_x$  na kotle OP-650k. W związku z tym w pierwszej części rozdziału dziesiątego Doktorant przedstawił: model matematyczny z wykorzystaniem środowiska Ansys Fluent, zaproponował modele turbulencji i kinetyki reakcji redukcji  $\text{NO}_x$ , a następnie przeprowadził analizy numeryczne procesu redukcji tlenków azotu dla wybranych modeli kanałów SCR. W drugiej części rozdziału dziesiątego Autor zawarł model reaktora SCR, który został opracowany na podstawie danych projektowych i pomiarowych dla instalacji kotła OP-650k. Ta część pracy zawiera m.in.: opis parametrów technicznych reaktora SCR zintegrowanego z kotłem OP-650k, opis modelu reaktora dwupoziomowego, rozbudowę reaktora SCR o trzecią warstwę katalityczną oraz analizę wpływu skutków zaburzenia przepływu w strefie rezerwowej na redukcję  $\text{NO}_x$ . Rozdział jedenasty rozprawy doktorskiej to końcowe podsumowanie.

### **3. Ocena pracy**

Scenariusze dywersyfikacji źródeł energii pierwotnej w kraju wskazują, że w perspektywie najbliższych lat w sektorze energetycznym nadal dominującymi technologiami będą technologie węglowe. Z jednej strony stanowi to stabilny fundament bezpieczeństwa energetycznego kraju, ale z drugiej strony wymusza konieczność badań i rozwoju technologii pozwalających na spełnienie coraz bardziej

zaostrzających się norm dopuszczalnych emisji zanieczyszczeń powstających w trakcie procesów konwersji energii chemicznej paliw stałych, zwłaszcza w coraz częściej dynamicznie zmieniających się w szerokim zakresie obciążeń cieplnych warunkach pracy instalacji energetycznych. Do jednych z głównych składników zanieczyszczeń gazowych, dla których istnieje konieczność zaproponowania rozwiązań pozwalających na spełnienie nowych norm w perspektywie roku 2020 oraz 2030, zalicza się tlenki azotu. Należy tutaj podkreślić, że stan wiedzy w zakresie integracji technologii oczyszczania spalin z blokiem węglowym pracującym ze zmiennym obciążeniem i magazynowaniem energii (możliwe, że w najbliższym czasie będzie to konieczne rozwiązanie) jest bardzo niewiele. Należy również zaznaczyć, że praktycznie każdy blok energetyczny stanowi dużą indywidualność i przy jego optymalizacji efektywnościowej przenoszenie wyników z jednej jednostki na inne nie jest już wystarczające. Stąd posiadanie narzędzi do analiz numerycznych jest bardzo pomocne a wręcz niezbędne. Dlatego też uważam, że podjęty w pracy problem modelowania numerycznego procesu redukcji tlenków azotu w technologii SCR dla bloków węglowych wychodzi naprzeciw obecnym i przyszłościowym potrzebom sektora energetycznego. Świadczy to o trafności wyboru tematyki naukowo-badawczej przez Doktoranta. Należy również podkreślić, że praca doktorska posiada charakter aplikacyjny oraz jest kontynuacją badań zrealizowanych w ramach Projektu Badawczego "Zaawansowane technologie pozyskiwania energii".

We wprowadzeniu Doktorant trafnie wskazał uzasadnienie podjęcia się problemu rozprawy doktorskiej. Przedstawione w rozdziale trzecim cel i zakres pracy szczegółowo informują o kierunku pracy i aplikacyjności uzyskanych wyników. Rozdziały: drugi, czwarty, piąty i szósty stanowią w mojej opinii przegląd literatury w obszarze stanu wiedzy koniecznej do podjęcia się rozwiązania podjętego problemu. Dlatego też, treści zawarte w rozdziałach: czwartym, piątym i szóstym trafnie byłoby ująć w rozdziale drugim lub cel i zakres pracy przedstawić bezpośrednio po wprowadzeniu. Niezależnie od tej drobnej korekty struktury pracy uważam, że przegląd stanu wiedzy jest czytelny, bezpośrednio odnosi się do podjętego problemu naukowego i stanowi dobre wprowadzenie czytelnika do istoty problemu naukowego oraz zaproponowanego celu i zakresu rozprawy. W związku z tym uważam, że

Doktorant nabył umiejętności przeprowadzenia krytycznego przeglądu literatury oraz poprawnego formułowania celu i zakresu badań.

Oceniając rozdziały siódmy i ósmy, które pozwoliły na wskazanie wrażliwości parametrów spalin na proces redukcji  $\text{NO}_x$  uważam, że: przyjęty model reaktora SCR, parametry spalin wykorzystanych do modelowania, warianty lokalizacji reaktora SCR w bloku węglowym są trafne a uzyskane wyniki z przeprowadzonych symulacji z wykorzystaniem programu Epsilon Professional nie budzą zastrzeżeń. Odnosząc się do rozdziału dziewiątego ocenianej rozprawy stwierdzam, że idea i przyjęty schemat Duobloku oraz zaproponowane jego parametry pracy są wystarczające na tym etapie badań. Przyjęta metoda analiz z wykorzystaniem programu Epsilon Professional jest odpowiednia. Należy podkreślić, że zaproponowane rozwiązanie oraz uzyskane wyniki stanowią kolejny etap w rozwoju dynamicznego modelowania pracy bloku węglowego. Znaczącą część rozprawy stanowi również rozdział dziesiąty. Przyjęte w nim: modele matematyczne, modele turbulencji oraz model kinetyki reakcji redukcji tlenków azotu w SCR są poprawne z punktu widzenia podjętego celu modelowania numerycznego procesu katalicznej redukcji  $\text{NO}_x$ . Ponadto przedstawione założenia do modelu reaktora SCR, opracowanego na podstawie danych projektowych i pomiarowych dla instalacji kotła OP-650k, są wystarczające do odwzorowania procesu selektywnej redukcji katalicznej tlenków azotu dla bloków węglowych. Uzyskane wyniki modelowania numerycznego nie budzą zastrzeżeń a osiągnięte wyniki stanowią istotny element ocenianej rozprawy. Wykorzystanie programu Ansys Fluent jest właściwe. Po zapoznaniu się z rozdziałami 7-10 ocenianej rozprawy doktorskiej nie wnoszę uwag krytycznych. W związku z tym uważam, że Doktorant wykazał się umiejętnościami: wyboru obiektu badań, metodyki badawczej i realizacji badań oraz analizy uzyskanych wyników. Na podstawie oceny rozdziału jedenastego należy stwierdzić, że Doktorant nabył również umiejętność poprawnego formułowania wniosków końcowych.

**Za istotne osiągnięcia rozprawy uważam:**

- Opracowanie numerycznego modelu reaktora SCR dla potrzeb analiz wariantów modernizacji istniejących instalacji redukcji tlenków azotu.
- Opracowanie modeli dla potrzeb algorytmów kontroli eksploatacji i stopnia zużycia katalizatorów.



- Opracowanie modelu bloku węglowego zintegrowanego z systemem oczyszczania spalin oraz systemem akumulacji ciepła dla potrzeb dynamicznego modelowania instalacji energetycznych.
- Wskazanie wariantów instalacji reaktora SCR w ciągu spalin dla bloku węglowego pozwalających na osiągnięcie stężenia tlenków azotu na poziomie 85-150 mg/m<sup>3</sup><sub>n</sub>.

Należy podkreślić dużą staranność pracy i rzeczowość zawartej w niej treści, zarówno z punktu widzenia znajomości procesu redukcji tlenków azotu, jak również numerycznego modelowania.

#### ***Uwagi szczegółowe:***

- str. 87 - na Rys. 10.19, opis osi Y to "stopień redukcji NO" - z treści pracy wynika, że jest to raczej procentowe odchylenie.
- str. 88 - na Rys. 10.21, na osi Y zamiast "Udział masowy NO" powinno być "Stopień redukcji NO",

#### ***Zagadnienia dyskusyjne:***

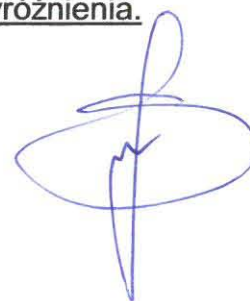
1. Czy silne zależności stopnia redukcji tlenków azotu od temperatury realizacji procesu i stężenia tlenu w spalinach, strona 33 - Rys. 7.2 (zmiana stężenia tlenu od 1 do 7 powoduje wzrost stopnia redukcji o ok. 9 punktów procentowych lub niewielkie wahania temperatury spalin, tj. w zakresie ok. 0,2 K prowadzą do zmiany stopnia redukcji o ok. 6 punktów procentowych) nie będą stanowić dużej bariery eksploatacyjnej na bloku węglowym mając za cel stabilne utrzymanie minimalnego poziomu stężenia NO<sub>x</sub> w spalinach, tj. poziomu 85 mg NO<sub>x</sub>/m<sup>3</sup><sub>n</sub>?
2. W pracy przedstawiono wpływ zbiornika Hot-AKU na wskaźnik emisji NO<sub>x</sub> podczas procesu ładowania i rozładowania w porównaniu do pracy instalacji bez akumulacji ciepła. Czy na podstawie uzyskanych w rozprawie wyników jest możliwe podanie wpływu łącznie całego cyklu ładowania i rozładowania akumulatora ciepła na wskaźnik emisji NO<sub>x</sub> w porównaniu do rozwiązania bez akumulacji ciepła?

#### **4. Wniosek końcowy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Pilarza pt. „Analiza numeryczna procesu redukcji tlenków azotu w technologii SCR dla bloków

węglowych” stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego jakim jest emisja tlenków azotu w sektorze energetycznym. Jej poziom merytoryczny spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. **Wobec powyższego wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**

Biorąc pod uwagę istotne osiągnięcia ocenianej rozprawy pt. "Analiza numeryczna procesu redukcji tlenków azotu w technologii SCR dla bloków węglowych" autorstwa mgr inż. Pawła Pilarza uważam, że praca kwalifikuje się do wyróżnienia.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a vertical line with a loop at the top and a horizontal oval shape around the middle.