

Dr hab. inż. Krystian Czernek, profesor uczelni
Katedra Inżynierii Procesowej i Środowiska
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska

Opole, 30.06.2023 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 06.07.2023
nr 32 zał.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Zdzisława Bieleckiego pt. „Sterowanie w układach z przepływem wielofazowym”.

Podstawą prawną sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, z dnia 16 czerwca 2023 roku informujące o powołaniu przez Radę ww. Dyscypliny mojej osoby na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Zdzisława Bieleckiego.

Doktorat wdrożeniowy to program Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, obecnie Ministerstwa Edukacji i Nauki, uruchomiony w 2017 roku prowadzący do uzyskania stopnia doktora poprzez przygotowanie rozprawy doktorskiej, łączącej zarówno teoretyczny jak i praktyczny wymiar badań. Program Doktoratu Wdrożeniowego realizowany jest poprzez prowadzenie w ramach szkół doktorskich kształcenia doktorantów we współpracy z zatrudniającymi ich przedsiębiorcami albo innymi podmiotami. Daje on zatem możliwość uzyskania stopnia naukowego osobom, które jednocześnie chcą w pełni kontynuować pracę zawodową poza uczelnią. Stanowi zatem swoistego rodzaju pomost pomiędzy karierą w nauce i biznesie. Jest to zarazem szansa na wdrożenie i komercjalizację otrzymanych wyników badań, dedykowanych dla konkretnego podmiotu czy branży. Przygotowywane w jego ramach dysertacje stanowią nie tylko oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, ale także podstawę zastosowania będącego jego wynikiem wdrożenia w praktyce gospodarczej. Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została wykonana w ramach I edycji projektu Doktorat Wdrożeniowy finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (nr 29/DW/2017). Praca doktorska wykonana została pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Dariusza Chońskiego, prof. Politechniki Śląskiej. Promotorem pomocniczym był dr inż. Jarosław Dziuba.

Czernek

Treść i zakres rozprawy

Spalanie pyłu węglowego jest najczęściej stosowaną technologią wytwarzania energii na skalę przemysłową na świecie. Proces spalania pyłu węglowego w kotłach energetycznych jest wciąż udoskonalany poprzez wstępne oczyszczanie węgla oraz zastosowanie różnych dodatków o charakterze katalitycznym. Dynamikę spalania w kotłach pracujących w elektrowniach, elektrociepłowniach i ciepłowniach można poprawić, dzięki użyciu katalizatorów przez co uzyskuje się większy stopień wypalenia paliwa, co z kolei skutkuje mniejszym zużyciem energii na wyprodukowanie tej samej mocy. Poprawie ulegają również parametry emitowanych spalin oraz popiołu. Alternatywą optymalizacji i poprawy efektywności procesu spalania w kotłach jest ustalenie sposobu dostarczania katalizatora do układu. Kluczową rolę w tej kwestii odgrywa nie tylko rodzaj, postać katalizatora oraz miejsce jego wtrysku, ale także układ wtryskujący. Proces optymalizuje się również pod względem przepływowym, stosując coraz nowsze urządzenia i algorytmy sterowania procesem. Automatyczne sterowanie pracą kotłów jest jednym ze sposobów zwiększenia ich efektywności spalania oraz zmniejszenia ilości toksycznych związków emitowanych do środowiska. W niniejszej rozprawie zaproponowano stosowanie odpowiedniego katalizatora, który pozwala na redukcję emisji zanieczyszczeń do atmosfery, a także wzrost wydajności i szybkości procesu spalania. Wpływ katalizatora na proces spalania widoczny jest przede wszystkim w obniżeniu temperatury zapłonu pyłu węglowego i temperatury odpowiadającej maksymalnej szybkości spalania. Ilość podawanego katalizatora jest uzależniona od skali procesu. Opracowano nowy aerodynamiczny reaktor wielofazowy, który pełni funkcję układu wtryskowego modyfikatora. Układ ten poddano modelowaniu CFD oraz badaniom eksperymentalnym, które potwierdziły, że generuje on krople o odpowiednich średnicach i odpowiednim widmie rozpylania. Opracowano koncepcję i parametry przepływu wielofazowego oraz przeanalizowano i zaimplementowano opracowany układ sterowania. Całość opracowanej technologii została przebadana na kotle z 16 palnikami K-15 o mocy 430 MW. Badania przeprowadzone przez Pana mgra inż. Zdzisława Bieleckiego wpisują się w tematykę sterowania w układach z przepływem wielofazowym. Praca doktorska jest ciekawa, dobrze napisana i zredagowana, ma klasyczny i przejrzysty układ, kolorową oprawę graficzną, zawiera bogatą literaturę przedmiotu, głównie pochodzącą z ostatnich dwudziestu lat.

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie parametrów sterowania procesem aplikacji modyfikatora do strefy pyrolizy w kotle pyłowym o dużej mocy. Szczegółowe etapy prac badawczych obejmowały:

- opracowanie metody uzyskania homogenicznego, aktywnego modyfikatora procesu spalania opartego na alkoholu izopropylowym oraz niklu Raneya,
- określenie parametrów aplikowanego modyfikatora: proces odparowywania, mieszania, obliczenia CFD przepływu pyłu węglowego w pyłoprzewodach oraz wprowadzania modyfikatora,
- opracowanie konstrukcji aerodynamicznego reaktora wielofazowego wraz z wynikającym z tego europejskim zgłoszeniem patentowym,
- opracowanie koncepcji i parametrów sterowania przepływem wielofazowym,
- weryfikacja możliwości wykorzystania opracowanych metod i urządzeń na kotle dużej mocy,
- badania właściwości fizykochemicznych katalizatora i reologicznych modyfikatora,
- symulacje numeryczne CFD przepływów w pyłoprzewodach przeprowadzone w oparciu o rzeczywiste wymiary geometryczne,
- obliczenia CFD trajektorii kropeł,
- zaprojektowanie aerodynamicznego reaktora wielofazowego wraz z badaniami wielkości generowanych kropeł oraz próbami sterowania parametrami operacyjnymi.

Po ustaleniu przedmiotu i celu badań została określona następująca teza badawcza: *Jeżeli jest znana lepkość fazy ciekłej oraz granulacja fazy stałej tworzącej zawiesinę, to można sterować przepływem trójfazowym dyspersji kropeł zawierających cząstki stałe na podstawie wskaźnika jakości, który określa równomierny rozkład fazy stałej w kroplach o zadanej średnicy. Wartość zadana średnicy kropeł jest wyznaczana na podstawie temperatury i prędkości przepływu fazy gazowej, miejsca wprowadzania dyspersji oraz modelu parowania kropeł cieczy o znanym składzie i lepkości. Jednocześnie atomizacja zawiesiny zawierających cząstki stałe jest prowadzona na podstawie ustawień ustalonych w badaniach symulacyjnych.*

Aplikacja, którą autor wdrożył, dotyczy atomizacji zawiesiny katalizatora w roztworze izopropanolu dozowanej do przewodu dostarczającego pył węglowy do palnika kotła energetycznego.

Wyróżniającym się ośrodkiem badawczym zajmującym się podjętą tematyką jest z całą pewnością Politechnika Śląska. Zadeklarowany cel pracy jest w znacznym stopniu wynikiem zainteresowań badawczych i dokonań Autora rozprawy, jak też twórczą kontynuacją badań prowadzonych przez Zespół Pana Profesora Dariusza Choińskiego. Należy podkreślić, że przedstawiona tematyka rozprawy doktorskiej oraz postawione cele są w pełni zgodne

z realizowanym programem Ministerstwa Edukacji i Nauki łączącym świat nauki i biznesu, dlatego podjęte działanie badawcze uważam za w pełni uzasadnione. Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy ważnej, ze względów poznawczych, problematyki sterowania procesem aplikacji modyfikatora do strefy pyrolizy w kotle pyłowym o dużej mocy. Autor opiniowanej rozprawy zaplanował i zrealizował obszerny program badawczy obejmujący zastosowanie wielu nowoczesnych metod badawczych.

Rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego oraz powinna wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną Autora w danej dziedzinie, jak i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę charakter projektu Doktorat Wdrożeniowy, w ramach którego niniejsza rozprawa została przygotowana. Uważam, że najważniejsze wymogi spełnia zarówno recenzowana praca, jak i Kandydat na doktora. Rozprawa ma charakter pracy naukowo-badawczej ukierunkowanej na opracowanie i wdrożenie w przedsiębiorstwie nowego aerodynamicznego reaktora wielofazowego oraz sterowania parametrami operacyjnymi procesu spalania. Autor porusza się „płynnie” po szerokiej tematyce związanej z projektowaniem urządzeń energetycznych, symulacjami CFD, badaniami doświadczalnymi procesu sterowania w układach z przepływem wielofazowym.

Rozprawa została przedstawiona w postaci 134 stronicowej monografii oraz dodatkowego załącznika w postaci płyty CD. Przedstawioną do recenzji pracę, składającą się z 8 rozdziałów, podzielić można na dwie zasadnicze części: część teoretyczną (rozdział 3) oraz część doświadczalną (rozdziały 4-8). Całość poprzedza wykaz ważniejszych stosowanych oznaczeń oraz krótkie wprowadzenie, cel pracy i tezy badawcze. Kończą natomiast streszczenie pracy w językach polskim i angielskim, wykaz cytowanego piśmiennictwa oraz wykaz publikacji Autora. Tytuł rozprawy oddaje w pełni jej zawartość. niespełna trzystronicowy wstęp oraz sformułowane na stronach 16-17 cel pracy i hipoteza badawcza wprowadzają czytelnika w analizowane zagadnienia i w bardzo jasny sposób przedstawiają konieczność podjęcia proponowanych przez Autora badań. Część teoretyczna przedstawia studia literaturowe skupione głównie wokół katalizatorów do spalania paliw stałych oraz sposobów ich dostarczania do pyłoprzewodu, urządzeń wtryskowych oraz systemów sterowania parametrami operacyjnymi procesu spalania i ich automatyzacją. Część doświadczalna omawia szeroko i szczegółowo metody badawcze oraz wyniki badań doświadczalnych. Rozdział ten jest najobszerniejszy. Wszystkie prezentowane przez Doktoranta wyniki badań są bardzo dobrze udokumentowane z wykorzystaniem tabel, rysunków oraz zdjęć. Wszystkie rysunki w pracy zostały przygotowane starannie, a ich jakość nie budzi zastrzeżeń. Rozdział

8 podsumowuje uzyskane wyniki badań oraz przedstawia prawidłowo sformułowane wnioski. Dokonano w nim syntetycznej rekapitulacji osiągniętych wyników. Na końcu pracy Doktorant zawarł spis literatury i własnych publikacji. Przedstawiony przegląd literatury obejmuje 104 pozycje literaturowe oraz 21 publikacji Autora pracy, 2 referaty i 4 postery na konferencjach naukowych, a także 3 zgłoszenia patentowe i patenty. Liczba cytowanych prac świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w dyscyplinie, którą uprawia. Brak numeracji poszczególnych pozycji literaturowych utrudnia jednak nieco lekturę pracy. Podsumowując tę część pracy stwierdzić należy, że Autor zarówno dobrze przygotował się teoretycznie do zaplanowanych badań, jak też dobrze uzasadnia konieczność ich podjęcia. Przeprowadzone badania odznaczają się oryginalnością i mają duży potencjał w aspekcie ich zastosowania w praktyce, w tym również w formie wdrożenia przemysłowego.

Przedstawiona do recenzji praca napisana jest poprawnym językiem polskim. Praca zredagowana jest starannie, ale nie jest wolna od drobnych błędów edytorskich. Poniżej przedstawiam kilka wybranych z dostrzeżonych przeze mnie tego rodzaju niezręczności:

- Nieliczne błędy interpunkcyjne i stylistyczne np. ... *ditlenku siarki oraz innych, pozostałości organicznych.* – str. 22, ... *wyniki obróbki danych, takie jak ...* – str. 108,
- Nieliczne niewłaściwe zapisy jednostek: *30 Pa.s.* zamiast *30 Pa·s.* – str. 32, *ciepło właściwe 2570 J/kg.K* zamiast *2570 J/kg·K* – str. 79, *cp = 3874 J/lgK* zamiast *cp = 3874 J/kgK* – str. 85,
- Powoływanie się na źródła literaturowe niewystępujące w wykazie np. *Suárez-Ruiz i inni, 2017* – str. 14, *Nagendranath i inni, 2010* – str. 27, *Hernik, 2022* – str. 29, *Watcher i inni 2020* – str. 32, *Vuthaluru i inni, 2006; Shah i inni, 2009; Dodds i inni, 2011; Ferrín i Saavedra, 2013; Ciukaj i Hernik, 2020* – str. 33, *Ciukaj i Hernik 2020, Shih i inni, 1995, Vishnoi i Mohapatra, 2018, Sommerfeld i Huber, 1999* – str. 34, *Ferrín i Saavedra, 2013* – str. 35, *Tian i inni, 2013, Shah i innych 2009, Vuthaluru i innych, 2005* – str. 36, *Zheng i Liu, 2011, Vijiapurapu i inni, 2006, Vuthaluru i inni, 2005, Chen i Ghoniem, 2013* – str. 37, *Gajtowski, 2000* – str. 50, *Bocheński, 2004; Karolewicz i inni, 2009; O'Sullivan i inni, 2019; Dafsari i inni, 2019* – str. 64,
- Przedwcześnie formułowany wniosek: *Jedną z możliwych i słusznych dróg rozwoju jest automatyzacja...* – str. 14,
- Błąd redakcyjny – str. 17: *Jednocześnie atomizacja zawiesziny zawierających cząstki stałe jest prowadzona na podstawie ustawień ustalonych w badaniach symulacyjnych.* Powinno być *zawiesziny zawierającej lub zawieszin zawierających,*

- Błąd redakcyjny – str. 18: *Oszacowano, że przy obecnym tempie zużycia całkowite potwierdzone zasoby węgla wystarczą na około 139 lat (BP, 2022). Powinno być (BP, 2020),*
- Błąd stylistyczny – str. 24: *Katalizatory SO_x służą, analogicznie do opisanych katalizatorów wyżej NO_x, Powinno być Katalizatory SO_x służą, analogicznie do opisanych wyżej katalizatorów NO_x,*
- Błąd stylistyczny – str. 28: *... jakie stawiane są dozującym dyszom, Powinno być ... jakie stawiane są dyszom dozującym,*
- Błąd redakcyjny – Rysunek 10. Schemat instalacji zasilania gazem i cieczą układu reaktora – na przedstawionym rysunku nie ujęto reaktora.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny lub są drobnymi niedociągnięciami. Nie obniżają mojej zdecydowanie pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Ocena merytoryczna rozprawy – uwagi ogólne

Zadeklarowany cel pracy jest w znacznym stopniu wynikiem zainteresowań badawczych i dokonań Autora rozprawy, jak też twórczą kontynuacją badań prowadzonych przez zespół kierowany przez Pana Profesora Dariusza Choińskiego. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących sterowania średnicami generowanych kropeł poprzez zmianę ustawień dyszy rozpylającej oraz parametrów operacyjnych i sterujących procesem oraz samym rozpylaniem. Opracowano układ wielofazowy, którego czynną częścią są cząstki Niklu Raneya, a nośnikiem jest mieszanina alkoholu izopropylowego, wody i stabilizatora zwiększającego lepkość. Przeprowadzone badania dowodzą, że granulacja dostarczanego katalizatora Niklu Raneya wykazuje duże różnice w rozmiarach cząstek, dlatego konieczna jest ich dodatkowa obróbka, czyli mielenie. Wykazano, że obecność cząstek katalizatora praktycznie nie wpływa na właściwości reologiczne modyfikatora. Opracowano model łączący średnice generowanych kropeł z wielkościami cząstek katalizatora w modyfikatorze. Zaprojektowano aerodynamiczny reaktor wielofazowy do generowania kropeł o odpowiednich rozmiarach. Skonstruowano go oraz poddano badaniom numerycznym i eksperymentalnym. Określono ponadto pożądaną wielkość kropeł, tj. wyznaczono minimalną średnicę kropli dla danych parametrów pracy pyłoprzewodu. Potwierdzono wcześniejsze przewidywania symulacyjne CFD odnoszące się do wielkości kropli. Wykazano, że aby doprowadzić

modyfikator do układu, należy wygenerować krople o średnicy co najmniej 30 μm , a najlepiej około 50 μm . Analiza uzyskanych wyników modelowania numerycznego wykazała, że korzystny jest kąt ustawienia rurki wlotowej reaktora podającego modyfikator równy 45°, co pozwala na wprowadzenie modyfikatora w głąb strumienia pyłu węglowego. Dowiedziono, że zaprojektowany, skonstruowany i przebadany system spełnia wymagania, które pozwalają na jego zastosowanie nie tylko na stanowisku badawczym, na którym został zweryfikowany, ale również na innych urządzeniach, w tym również na kotłach rusztowych. Wykazano, że zarówno wyniki symulacji, jak i wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają możliwości sterowania procesem dostarczania katalizatora do układu zasilania paliwem kotła energetycznego. Uzyskane przez autora wyniki badań i przeprowadzonych eksperymentów oraz symulacji stanowią oryginalne rozwiązanie, które jest na etapie wdrażania do układów rzeczywistych kotłów pyłowych. Otrzymane w niniejszej rozprawie wyniki wykorzystano do przygotowania wdrożenia wybranego rozwiązania w skali przemysłowej tj. zaimplementowano zaproponowany układ na kotle pyłowym. Tym samym zaprojektowany układ pozwalający na dokładne dozowanie modyfikatora poprawiającego parametry spalania paliw stałych w kotle został zweryfikowany na obiekcie rzeczywistym.

Należy podkreślić, że przedstawiona tematyka rozprawy doktorskiej wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej analizowanego zagadnienia przez co wypełnia istniejącą lukę informacyjną, dlatego podjęte działania badawcze uważam za w pełni uzasadnione.

Stwierdzam, że Pan mgr inż. Zdzisław Bielecki zrealizował zadeklarowane cele pracy, a uzyskane z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych wyniki – uznaję za wkład w rozwój prac badawczych związanych z szeroko rozumianymi przepływami wielofazowymi, które są złożone w swej naturze oraz trudne do opisu i modelowania. Na uwagę zasługuje fakt, że uzyskane wyniki mają duże znaczenie praktyczne. Do głównych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- opracowanie układu wielofazowego, którego częścią czynną są cząstki Niklu Raneya, a nośnikiem jest mieszanina alkoholu izopropylowego, wody i stabilizatora zwiększającego lepkość;
- opracowanie modelu łączącego średnice generowanych kropeł z wielkościami cząstek katalizatora w modyfikatorze;
- zaprojektowanie aerodynamicznego reaktora wielofazowego do generowania kropeł o odpowiednich rozmiarach;
- wyznaczenie minimalnej średnicy kropli dla danych parametrów pracy pyłoprzewodu;

- wyznaczenie korzystnego kąta ustawienia rurki wlotowej reaktora podającego modyfikator;
- przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu;
- opracowanie sterowania procesem dostarczania katalizatora do układu zasilania paliwem kotła energetycznego;
- wdrożenie opracowanego aparatu.

Ocena strony formalnej rozprawy – uwagi szczegółowe

Recenzowaną rozprawę czyta się z zainteresowaniem, jest napisana poprawnym językiem i praktycznie wolna od błędów edytorskich. Praca ma przejrzysty i logiczny układ. Drugą grupę sformułowanych uwag stanowią te, o charakterze merytorycznym, na które oczekuję dodatkowych wyjaśnień Doktoranta podczas publicznej obrony pracy doktorskiej. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na kilka kwestii i zadać kilka pytań:

- 1) *Z punktu widzenia niniejszej pracy najważniejszą częścią pyłoprzewodu jest rura o długości 2,5 m, w której zamontowano układ podający modyfikator. Jest on umiejscowiony w odległości 1,0 m od palnika - str. 42. Dlaczego taka odległość? Czy przepływ w tym miejscu jest już ukształtowany i ustabilizowany?*
- 2) *Średnica generowanych kropeł powinna wynosić $> 30 \mu\text{m}$ - str. 42. Na jakiej podstawie określono taką średnicę?*
- 3) *W obliczeniach procesów przepływu i transportu bierze się pod uwagę tylko średnią średnicę kropeł - str. 42. Dlaczego do określenia wielkości kropli posłużono się średnią objętościowo-powierzchniową średnicą kropli? W literaturze przedmiotu występują także inne średnice zastępcze D_{10} czy też D_{30} .*
- 4) *Zaobserwowano wzrost powierzchni właściwej pod wpływem oddziaływania ultradźwiękami - str. 56. Na jakiej podstawie to stwierdzono?*
- 5) *Jakiej klasy dokładności był reometr rotacyjny Physica MCR 501 firmy Anton Paar?*
- 6) *Jakiej klasy dokładności był tensjometr K9 produkcji Krüss GmbH?*
- 7) *Za reprezentatywną próbkę można uznać Ni3 Met - str. 56. Na jakiej podstawie to stwierdzono?*
- 8) *... im większe natężenie przepływu gazu, tym czas przebywania jest krótszy i powierzchnia kontaktu wytworzona w reaktorze w określonym czasie θ jest mniejsza*

oraz im średnica kropli jest większa, tym powierzchnia międzyfazowa jest mniejsza - str. 71. Z czego to wynika?

Powyższe uwagi, w najmniejszym stopniu nie podważają wartości poznawczej i aplikacyjnej rozprawy, a stanowią jedynie podstawę do merytorycznej dyskusji podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej. W mojej opinii przedstawiony w pracy materiał spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Uwzględniając aktualność podjętej tematyki rozprawy, trafność zdefiniowanego celu oraz poprawność wnioskowania, pozytywnie oceniam rozprawę doktorską pt. „Sterowanie w układach z przepływem wielofazowym”. Złożoność problemów z jakimi spotkał się Doktorant realizując recenzowaną rozprawę niewątpliwie wymagała wiedzy teoretycznej i praktycznej niezbędnej do prowadzenia badań eksperymentalnych oraz ogromnego nakładu pracy. Sposób zaplanowania i prowadzenia badań, jak również forma przedstawienia uzyskanych wyników oraz ich analiza świadczą o dużej wiedzy i kompetencjach. Uważam, że Doktorant zrealizował założone cele swojej pracy, która zakończyła się nie tylko wdrożeniem przemysłowym, ale również zgłoszeniem patentowym.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska jest opracowaniem oryginalnym o wysokiej wartości poznawczej. Uważam, że recenzowana przeze mnie praca doktorska Pana mgra inż. Zdzisława Bieleckiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą aktualnie w Polsce Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie Pana mgra inż. Zdzisława Bieleckiego do publicznej obrony.

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII PROCESOWEJ I ŚRODOWISKA

Krzysztof Czernek
DR HAB. INŻ. KRYSZTIAN CZERNEK, PROF. UCZELNI