

Wrocław, 15.03.2022 r.

dr hab. inż. Wojciech Moroń, prof. PWr

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Politechnika Wrocławska

Wyb. Wyspiańskiego 27

50-370 Wrocław

e-mail: wojciech.moron@pwr.edu.pl

tel.: 71 320 24 74

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr. inż. Piotra Józwiaka

pt.: „Assessment of Using Low-calorific Synthesis Gas as a Source of Heat in an Industrial Bogie Hearth Furnace”

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda

Promotor pomocniczy: dr inż. Jarosław Hercog

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* Politechniki Warszawskiej o nr RND-IŚGiE/8/2022 z dnia 19 stycznia 2022 roku, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej w wersji drukowanej.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Józwiaka pt.: „Assessment of Using Low-calorific Synthesis Gas as a Source of Heat in an Industrial Bogie Hearth Furnace” stwierdzam, że może być ona zakwalifikowana do dyscypliny naukowej *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

2. Charakterystyka i ocena ogólna rozprawy

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Józwiaka pt.: „Assessment of Using Low-calorific Synthesis Gas as a Source of Heat in an Industrial Bogie Hearth Furnace” przygotowana na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej we współpracy z Instytutem Energetyki – Instytutem Badawczym. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda, a promotorem pomocniczym dr inż. Jarosław Hercog.

Rozprawa ma charakter eksperymentalny i liczy, wraz z bibliografią i załącznikami, 131 stron. Praca składa się z ośmiu rozdziałów merytorycznych, z których pierwszy stanowi wprowadzenie, a ostatni wnioski i konkluzje, literatury, spisów tabel i rysunków oraz załączników. Rozprawa zawiera 60 rysunków/wykresów (nie włączając rysunków z aneksów), 10 tabel oraz dwa załączniki w postaci graficznych danych eksperymentalno-modelowych. Oparta została o 136 pozycji bibliograficznych. Rozważania poprzedzone są

streszczeniem pracy w języku angielskim i polskim oraz spisem ważniejszych oznaczeń i indeksów wykorzystanych w dysertacji. Praca napisana została poprawnym językiem i sformatowana w sposób czytelny oraz zrozumiały.

Rozdział 1 to wstęp rozprawy, który pełni funkcję wprowadzenia do tematyki podjętej pracy, nakreśla aktualną problematykę przemysłu stalowniczego, problem emisji CO₂, a także wskazuje na nowe źródła pozyskiwania paliw gazowych do opalania pieców przemysłu hutniczego.

Ostatni podrozdział poświęcony został przedstawieniu celu, zakresu oraz tezy dysertacji. Doktorant sformułował tezę oraz określił zakres prac badawczych, który pozwolił mu obronić przyjętą w rozprawie tezę. Przyjęte cele badawcze są czytelne i precyzyjnie określają niezbędny do zrealizowania zakres prac badawczo-modelowych. Sformułowana w pracy teza oraz cele badawcze są konsekwencją przeprowadzonego przeglądu literatury, zdefiniowane zostały poprawnie i precyzyjnie.

Rozdział 2 to zwięzły opis zjawisk i procesów jakie występują w czasie eksploatacji pieców z paleniskami spalającymi paliwa gazowe. Doktorant omawia podstawy teoretyczne procesów tj.: podstawy procesu spalania, organizację procesu spalania czy zagadnienia dotyczące wymiany ciepła. Ważnym elementem rozdziału jest omówienie właściwości stosowanych w przemyśle stalowniczym paliw, szczególnie gazowych, ale również potencjalnych do zastosowania substytutów gazu ziemnego oraz alternatywnych źródeł paliw gazowych.

Rozdział 3 to przedstawienie przyjętego do badań pieca wózkowego, w którym Doktorant zwięźle charakteryzuje jego konstrukcję, warunki pracy i procedury wstępnego nagrzewu form stalowych.

Rozdział 4 to dyskusja nad możliwościami zastąpienia gazu ziemnego paliwem alternatywnym, w którym Doktorant przyjmuje dwa główne kryteria zastąpienia paliwa podstawowego i analizuje wpływ tych zmian z wykorzystaniem podstawowych zagadnień procesów wymiany ciepła. W rozdziale tym podjęte są również rozważania na temat problemów eksploatacyjnych jakie mogą pojawić się w wyniku zmiany parametrów paliwa pieca lub wykorzystania paliwa innego niż projektowe.

Rozdział 5 to przedstawienie przyjętego w rozprawie modelu matematycznego, w którym Doktorant omawia model URANS oraz RANS, oraz wskazuje, dlaczego wybrano takie podejście do problemu. Podsumowaniem rozdziału jest podrozdział poświęcony opisowi metod pomiarowych, miejsc pomiarowych w układzie rzeczywistym pieca, które są wykorzystywane do walidacji zaproponowanego modelu matematycznego.

Rozdział 6 to rozważania poświęcone wyborowi paliwa alternatywnego, sposobowi jego pozyskiwania, transportu i podawania do komory pieca. Doktorant prowadzi rozważania na temat współspalania paliwa podstawowego i alternatywnego, wpływie mieszania tych gazów przed podaniem na pracę palnika i pieca. Rozdział zawiera również opis propozycji konstrukcji palników dla paliwa alternatywnego, ich umiejscowienia w przestrzeni pieca oraz sposobu połączenia z instalacją gazogeneratora.

Rozdział 7 to obszernie rozważania dotyczące opisu parametrów paliwa alternatywnego, przyjętego do rozważań modelowych, opisu dyskretyzacji obiektu rzeczywistego i palników. Rozdział zawiera również opis rozważanych scenariuszy zasilania pieca, jak również wpływu parametrów procesu tj.: współczynnika nadmiaru powietrza, mocy paleniska, udziału gazu syntezowego, na przebieg obróbki cieplnej. Uzyskane dane modelowe poddane zostały walidacji w oparciu o dane pochodzące z obiektu rzeczywistego.

Rozdział 8 to syntetyczna dyskusja uzyskanych wyników modelowych, wskazanie zrealizowanych celów badawczych oraz odniesienie się do tezy pracy.

Kolejna część rozprawy to spis literatury wykorzystanej w dysertacji. Dobór źródeł jest poprawny, Doktorant korzysta z publikacji zwartych tj. książek, czasopism, ale również publikacji elektronicznych.

Praca zawiera także załącznik, w którym Doktorant przedstawia uzyskane na drodze modelowania matematycznego rozkłady temperatury elementu ogrzewanego (formy) dla różnych wariantów obliczeń oraz rozkład ścieżek spalin dla wariantu pracy 0-1444-1.42.

Podsumowując, przyjęty układ rozprawy oceniam jako logiczny i czytelny. Strona edytorska pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Strona graficzna rozprawy jest bardzo staranna, a rysunki i wykresy w większości przypadków są przygotowane poprawnie i czytelnie. Dobór pozycji bibliograficznych jest odpowiedni i obszerny.

3. Ocena wyboru tematu, celu i tez rozprawy

Poruszana w dysertacji problematyka ogrzewania pieców do wygrzewania/wyżarzania w przemyśle hutniczym jest ważna i aktualna. Obecne kierunki związane z konkluzjami BAT dla przemysłu hutniczego, jak również światowy trend ograniczania emisji CO₂ do atmosfery powodują, że konieczne jest przeprowadzanie modernizacji instalacji hutniczych tak, aby mogły sprostać nowym wyzwaniom. Proces ogrzewania pieców wózkowych poprzez współspalanie gazu podstawowego i syntezowego wpisuje się w kierunki tych zmian.

Dlatego uważam, że podjęte przez Doktoranta badania modelowe i obiektowe nad wykorzystaniem syngazu pochodzącego z procesu zgazowania biomasy są badaniami ważnymi, ciekawymi i wpisującymi się w aktualne trendy prowadzonych prac badawczych i rozwojowych.

Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się niewątpliwie w istotny nurt badań z zakresu energetyki, a temat i zakres pracy został poprawnie wybrany. Podjętą tematykę należy uznać za trafną i dającą możliwość wpisania się w aktualny i interesujący obszar badawczy, Dodatkowo recenzowana rozprawa ma duży walor praktyczny i wdrożeniowy.

Doktorant postawił sobie w rozdziale 1 pracy cel zbadania możliwości wykorzystania paliwa alternatywnego – syngazu pochodzącego z procesu zgazowania biomasy – do częściowego zastąpienia paliwa podstawowego służącego do ogrzewania pieca wózkowego, co przyniesie wymierny efekt ograniczenia emisji CO₂ w czasie eksploatacji pieca wózkowego. W tym celu Doktorant zdefiniował cztery cele pomocnicze, które pozwoliły na właściwe zaplanowanie prac badawczych.

Zarówno cel główny, jak i cele szczegółowe pracy, osadzone są dobrze w aktualnej problematyce naukowo-badawczej i wdrożeniowej, o czym świadczy również fakt, że realizowana w doktoracie tematyka badawcza była objęta współpracą Politechniki Warszawskiej, Instytutu Energetyki oraz dwóch firm ze Słowenii tj. Valji d.o.o. i Bosio d.o.o..

Potwierdzeniu postawionej przez Doktoranta tezy posłużyły zarówno badania modelowe, jak i eksperymentalne, pozyskane z obiektu rzeczywistego, które to pozwoliły na poprawną walidację opracowanego modelu matematycznego pieca.

Na podkreślenie zasługuje konsekwentne dążenie Doktoranta do zrealizowania postawionych celów, co niewątpliwie świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu tematyki rozprawy i solidnym przygotowaniu do prowadzenia zarówno rozważań teoretycznych, jak i badań modelowych oraz eksperymentalnych. Szczególnie zwrócić należy uwagę na bardzo bogaty warsztat badawczy Doktoranta, jeśli chodzi o umiejętność budowy modelu matematycznego, opisu zjawisk z zakresu mechaniki płynów, wymiany ciepła i termodynamiki.

Doktorant wykazał się także bardzo wnikliwą interpretacją uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i modelowych.

Do istotnych walorów recenzowanej rozprawy zaliczyć należy:

- Dużą wiedzę, umiejętności i kompetencje Doktoranta w zakresie planowania i prowadzenia eksperymentu naukowego.
- Poprawne zdefiniowanie kroków badawczych, co pozwoliło na właściwe zaplanowanie eksperymentu, jego przeprowadzenie oraz weryfikację uzyskanych danych eksperymentalnych.
- Obszerną analizę układu podawania gazowego paliwa alternatywnego w zakresie sposobu transportu i koncepcji spalania, a także analizę potencjalnych problemów jakie może nieść proces współspalania dla poprawnej pracy pieca wózkowego.
- Stworzenie modelu matematycznego opisującego przepływ spalin w piecu wózkowym z wykorzystaniem uśredniania Reynoldsa dla stanu nieustalonego (URANS) z modelem domknięcia 2-równaniowym $k-\epsilon$, co jest obecnie powszechnym podejściem przy modelowaniu tego typu przepływów turbulentnych.
- Zastosowanie poprawnego modelu spalania paliwa gazowego jako mieszaniny wieloskładnikowej z wykorzystaniem dwuetapowego mechanizmu chemicznego.
- Wielowariantową analizę pracy pieca wózkowego ze względu na różny stopień zastąpienia paliwa podstawowego paliwem syntezowym, wpływem nadmiaru powietrza oraz mocy palników na poprawną pracę pieca wózkowego.
- Obszerną analizę uzyskanych wyników pomiarowych wraz z poprawną interpretacją teoretyczną i praktyczną.

Podsumowując, podjęty przez Doktoranta temat rozprawy oraz sformułowane cele i tezy pracy są zasadne i ważne z naukowego i aplikacyjnego punktu oceny dysertacji.

4. Uwagi merytoryczne i kwestie dyskusyjne

Przedstawiona rozprawa jest niezwykle wartościowa merytorycznie ze względu na analizę ważnego zagadnienia z zakresu oceny przydatności zastosowania syngazu pochodzącego z procesu zgazowania biomasy jako paliwa dodatkowego wykorzystywanego do ogrzewania pieców wózkowych. W mojej opinii największa wartość prac naukowo-badawczych przedstawionych w recenzowanej rozprawie dotyczy:

- Obszernej analiza istniejącego układu podawania i spalania gazu dla pieca wózkowego wraz z koncepcją i projektem nowej instalacji podawania syngazu bez konieczności usuwania smoły.
- Przeprowadzenia poprawnej walidacji wyników w oparciu o dane obiektowe i wykazania zgodności pomiędzy wynikami modelowymi i obiektowymi.
- Sformułowania wniosków i podania wytycznych umożliwiających podjęcie prac aplikacyjnych w innych tego typu instalacjach.

Podczas lektury dysertacji pojawiają się drobne uwagi, pytania i wątpliwości wymagające wyjaśnienia, a czasami i szerszej dyskusji:

- 1) Struktura pracy – Doktorant stosuje podział na rozdziały aż do czwartego stopnia. Tak rozbudowana numeracja utrudnia czytelność pracy i szybkość poruszania się po niej, szczególnie, że Doktorant stosuje rozbudowany system odniesień i powiązań do różnych fragmentów swojej rozprawy.
- 2) Rozdział 1 – przyjętym w dysertacjach standardem jest, że rozdział poświęcony tezie i celom badawczym rozprawy jest rozdziałem głównym. Umieszczenie tej części pracy jako podrozdziału zawartego we wstępie utrudnia przekaz.
- 3) Rozdział 3 – w rozdziale tym Doktorant przedstawia analizowany piec wózkowy, opisuje jego parametry konstrukcyjne, cieplne, ale brakuje tu odniesienia się do

- wymiarów tego urządzenia, chociażby gabarytowych. Znajdują się one dopiero w Rozdziale 7 dotyczącym budowy modelu matematycznego. Lepszym rozwiązaniem byłoby włączenie treści rozdziału 3 do rozdziału 7, co spowodowałoby, że wszystkie kluczowe informacje zawarte byłyby w jednym miejscu.
- 4) Str. 44 góra – Doktorant w tekście opisuje umiejscowienie palników w przestrzeni pieca wózkowego stosując ich numerację, która znajduje się tylko na rysunku 16. Na kolejnych rysunkach (nr 17 i dalszych) brakuje oznaczeń numerów palników lub wyraźnego oznaczenia drzwi pieca w celu łatwego i szybszego zidentyfikowania palnika, o którym akurat mowa w tekście.
 - 5) Str. 46 dół – Doktorant odwołuje się do rysunku 8, wydaje się, że poprawnym odwołaniem jest rysunek 9.
 - 6) Str. 60 oraz str. 94 – termowizja jest zależna od poprawnego doboru współczynnika emisyjności powierzchni ϵ , brak informacji na jakiej podstawie przyjęto wartość 0,9 zarówno dla pomiarów ściany pieca, jak i wygrzewanej formy.
 - 7) Str. 60, rys. 23 – brak informacji jak umiejscowienie termopary na powierzchni formy wpływało na dokładność odczytu temperatury (dokładność pomiaru, wielkość błędów), szczególnie, że jest to parametr wykorzystywany przy walidacji modelu matematycznego.
 - 8) Str. 62 dół – czy podjęte były próby oszacowania zawartości smoły w syngazie? Na jakiej podstawie założono, że ich ilość jest pomijalna dla kaloryczności gazu?
 - 9) Str. 72 dół – Doktorant stwierdza, że zaproponowany palnik 400 kW powstał w wyniku przeskalowania geometrii palnika 100 kW. Czy parametry tj. stopień i intensywność zawirowania były weryfikowane i utrzymane na takim samym poziomie jak w przypadku palnika 100 kW?
 - 10) Str. 73, rys. 33 – błędnie oznaczono geometrię palników, wymiarowanie połówkowe stosuje się dla półwidoku – półprzekroju, a nie dla widoku. Jeżeli naniesione są wymiary, to dodatkowy pasek do oszacowania długości jest zbędny i raczej stosowany w kartografii, niż w rysunku technicznym.
 - 11) Str. 75, rys. 36 – Doktorant projektuje instalację doprowadzania syngazu do pieca, jednocześnie stwierdza, że ze względu na podawanie syngazu wraz ze smołą instalacja musi być izolowana. Co w przypadku rozruchu gazyfikatora lub uruchamiania pieca od stanu zimnego? Samoistne wygrzanie się instalacji nastąpi po pewnym czasie, w którym może następować kondensacja smoły. Czy rozważano taki stan instalacji, czy stwierdzono jak przeciwdziałać kondensacji lub jak prowadzić wygrzewanie instalacji?
 - 12) Str. 78 dół – odwołanie się do rysunku 33, który zawiera tylko geometrię palnika przy omawianiu warunków tj. masowego natężenia przepływu nic nie wnosi. Rysunek nie zawiera informacji związanych z omawianymi kwestiami.
 - 13) Rozdział 7.2 – Doktorant przedstawia referencyjne przypadki zasilania gazem ziemnym pieca wózkowego, analizując wpływ mocy, współczynnika nadmiaru powietrza itd. Natomiast brak jest informacji, dlaczego w przeprowadzonych symulacjach wykorzystano tylko palniki nr 2 i 3, co wynika z rys. 46 str. 88 oraz rys. 48 str. 90. Czy uwzględniano pracę palników nr 1 i 4 w tych symulacjach?
 - 14) Str. 102, rys. 58 – Doktorant wskazuje, że istnieje ryzyko zepchnięcia płomienia z palnika syngazu na ścianę pieca przy dużym λ_{NG} . Prezentowane wyniki dotyczą palnika dodatkowego, zamontowanego w strefie palnika głównego nr 4. Czy podobny efekt był obserwowany również w strefie palnika głównego nr 2?
 - 15) Str. 103, rys. 60 – Doktorant wskazuje, że prezentowane wyniki pokazują interakcje pomiędzy płomieniem gazu ziemnego przy różnym stopniu zastąpienia syngazem. Niemniej jednak prezentowany rysunek nie ma oznaczenie pola prędkości dla palnika

głównego nr 2. Jak zatem przeprowadzono ocenę oddziaływania palnika syngazu na palnik główny nr 2, czy badano tylko wpływ na palnik nr 3?

5. Uwagi edytorskie

Poniżej przedstawiam główne uwagi edytorskie sformułowane w czasie czytania pracy:

- Uwaga dotycząca stosowania skrótów:
 - Te same oznaczenia mają różne znaczenie w różnych częściach rozprawy, wynika to z wielu podejmowanych wątków, zarówno z zakresu mechaniki płynów, termodynamiki czy wymiany ciepła. Niemniej jednak dla czytelności pracy powinno się dążyć do unikania dublowania znaczenia zmiennych.
- Błędy stylistyczne, formalne np.:
 - Str. 25 góra – rzadko spotykany w pracach naukowych technicznych sposób cytowania literatury. W systemie cytowań Vancouver System cytując kilka pozycji w większości przypadków stosuje się jeden nawias, w którym wymienia się cytowane pozycje po przecinku lub z wykorzystaniem myślnika, jeżeli są to kolejne po sobie pozycje.
- Błędy edytorskie np.:
 - Str. 88, rys. 46, str. 9, rys. 48, rys. 56, str. 98, rys. 58, str. 102, rys. 59, str. 106 oraz cały załącznik 1.2 – mają oznaczoną jednostkę temperatury wyrażoną w Kelwinach wykorzystaniem małej litery k, wg. układu SI powinna być to wielka litera K.
 - Str. 92, rys. 50 – współczynnik korelacji R^2 określany jest w zakresie $[-1,1]$, stąd dokładność wskazania do czterech miejsc po przecinku jest zbędna, wystarczą dwie cyfry znaczące.
- Inne np.:
 - Str. 60, rys. 24 – wskaźnik zmian temperatury zlewa się z obrazem termowizyjnym elementu.
 - Str. 130-131, załącznik 1.2 – obcięte cyfry przy znaczniku zmian pola temperatury.

6. Wnioski końcowe

Do szczególnie cennych walorów recenzowanej rozprawy należy, w mojej ocenie, zaliczyć:

- Koncepcję i opracowanie instalacji podawania i spalania syngazu w picu wózkowym.
- Przeprowadzenie oceny przydatności syngazu pochodzącego ze zgazowania biomasy do zasilania pieca wózkowego.
- Koncepcję instalacji spalania gorącego gazu syntezowego bez konieczności usuwania z niego smoły.
- Przeprowadzenie obszernych prac badawczych wraz z rzetelnym procesem weryfikacji uzyskanych badań.
- Dogłębną analizę uzyskanych danych eksperymentalnych wraz z uzasadnieniem pewnych zachowań i trendów, poprawną walidację zbudowanego modelu matematycznego z wykorzystaniem danych obiektowych.
- Staranność prezentowania wyników badawczych, opis eksperymentu, ale również język pracy, który jest prosty i zrozumiały, przy jednoczesnym zachowaniu jego fachowości i poprawnej terminologii technicznej.

- Wysoki potencjał aplikacyjny i wdrożeniowy przeprowadzonych prac badawczo-modelowych.

Uważam, że kluczowym wkładem Doktoranta w dyscyplinę *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* jest wykazanie możliwości zastosowania syngazu pochodzącego z procesu zgazowania biomasy jako paliwa dodatkowego ogrzewającego piec wózkowy, a także udowodnienie możliwości spalania gorącego syngazu. Ważnym aspektem ocenianej rozprawy jest również jej charakter aplikacyjny i wdrożeniowy.

Przedstawione w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie podważają bardzo wysokiej oceny całości rozprawy. Uważam też, że należy podkreślić pracowitość przeprowadzonych prac badawczych, szeroki zakres wykonanych analiz oraz bardzo dobrą znajomość podejmowanej przez Doktoranta tematyki modelowania zjawisk procesów spalania i wymiany ciepła.

Uwagi krytyczne, które wymienione zostały w punkcie 4 recenzji, nie obniżają wartości merytorycznej i wysokiej ogólnej oceny dysertacji. Uwagi mają charakter dyskusyjny i mam nadzieję, że wykorzystane zostaną przez Doktoranta w dalszej pracy naukowej, np. przygotowaniu publikacji naukowych.

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska ma oryginalny charakter i stanowi wkład w dyscyplinę *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*. Podkreślić należy, że ma również istotne znaczenie praktyczne i aplikacyjne.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w art. 13 *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789) oraz *Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2018 r., poz. 1669 z późn. zm.).

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Piotra Józwiaka do dalszych etapów postępowania doktorskiego i publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Po zapoznaniu się z recenzowaną rozprawą oraz dorobkiem naukowym Doktoranta stawiam również wniosek o jej wyróżnienie.

