

prof. dr hab. inż. Tomasz Czakiert
Politechnika Częstochowska
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
tel.: 608 089 178, e-mail: tczakiert@is.pcz.pl

Częstochowa, 12.08.2022 r.

Szanowny Pan
Dr hab. inż. Robert Król, Prof. Uczelni
Przewodniczący Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Cholewińskiego

1. Wprowadzenie

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Nr W9/PW/482/2022 z dnia 23 czerwca 2022 roku.

2. Zakres rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Cholewińskiego nosi tytuł „Wpływ warunków spalania i rodzaju paliwa na emisję rtęci w czasie spalania pyłu węglowego”. Praca została wykonana na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej pod opieką promotora prof. dr hab. inż. Wiesława Rybaka oraz promotora pomocniczego dr hab. inż. Wojciecha Moronia, prof. uczelni. Praca była realizowana w ramach projektu systemowego „Grant Plus” (Program Operacyjny Kapitał Ludzki), przy wsparciu finansowym Władz macierzystego Wydziału w ramach przyznanych środków na działalność statutową.

Praca liczy ogółem 194 strony, włączając spis literatury w ilości 166 pozycji (w tym aż 32 pozycje których Doktorant jest autorem bądź współautorem) oraz wykazy rysunków

i tabel. Zebrany materiał rozdzielono pomiędzy 7 głównych rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem i zwięzłym wstępem, a zakończonych obszernym podsumowaniem zawierającym wnioski końcowe.

W krótkim wstępie (rozdział 1) Autor nakreśla problem naukowy, związany z emisją rtęci towarzyszącą procesom spalania paliw stałych, dla rozwiązania którego zamierza poszukiwać taniej, szybkiej i skutecznej metody predykcyjnej. Już tym miejscu rozprawy daje o sobie znać silnie aplikacyjny charakter prowadzonych przez Doktoranta prac badawczych.

Rozdział 2 stanowi wyczerpujące i interesująco napisane wprowadzenie w tematykę opiniowanej rozprawy doktorskiej. Traktuje o rtęci jako składniku paliw stałych, wykorzystywanych powszechnie w procesach produkcji energii elektrycznej i ciepła. Wskazuje na zagrożenia wynikające z wprowadzania tego metalu ciężkiego do otoczenia, zauważa przy tym potencjał pierwotnych metod ograniczania emisji Hg, jednocześnie odwołując się do obowiązujących regulacji prawnych. W czasie prowadzonych studiów literaturowych zwraca uwagę na rozbieżności w szacunkach uwolnień rtęci do środowiska, które wynikają tak z przyjętego podejścia do tematu inwentaryzacji tych emisji, jak i z niejednorodności stosowanych paliw (w rozumieniu udziałów i form występowania pierwiastka Hg) oraz zróżnicowanych warunków ich termicznej obróbki.

W rozdziale 3 Autor skupia się już na samym procesie spalania, a przedstawiony opis zachowania się rtęci dowodzi dużej złożoności i zawichości analizowanych w pracy zjawisk. Wskazuje przy tym na możliwe korelacje pomiędzy wielkością emisji rtęci i formami jej występowania w spalinach a właściwościami spalanego paliwa i warunkami prowadzenia procesu. Omawia również szereg sposobów ograniczania emisji tego pierwiastka (dotyczących w szczególności formy gazowej utlenionej Hg^{2+} i rtęci zaadsorbowanej na popiołach lotnych Hg_p), które potencjalnie mogą znaleźć zastosowanie zarówno w nowych jak i istniejących węglowych blokach energetycznych. Punktuje przy tym wszystkie braki, niedopowiedzenia i kwestie sporne, co następnie zostanie wykorzystane podczas stawiania hipotez badawczych.

Rozdział 4 stanowi podsumowanie rzetelnie przeprowadzonego **krytycznego przeglądu literatury przedmiotu**, przy czym należy podkreślić wyjątkową staranność opracowania całości zebranego materiału.

Cel pracy (rozdział 5), zarówno **poznawczy** jak i **użyteczny**, został jasno i konkretnie sprecyzowany. Jednocześnie Autor stawia pięć hipotez badawczych, które wynikają wprost z przeprowadzonego uprzednio przeglądu piśmiennictwa. Zakres pracy jest bardzo obszerny, a opracowany program badawczy dobrze przemyślany i możliwy do zrealizowania.

Rozdział 6 otwiera część doświadczalną rozprawy. Doktorant poszukuje tutaj odpowiedzi na pierwsze kluczowe pytanie dotyczące zależności pomiędzy budową fizykochemiczną stosowanego paliwa a poziomami emisji rtęci i jej specjacją w gazach spalinowych. Do tego celu typuje wstępnie aż 16 paliw, w tym: 6 węgla kamiennych, 5 węgla brunatnych i 5 stałych

biomas, które następnie poddaje szczegółowym analizom według skrupulatnie opracowanego schematu badań. Dokonuje również bilansu masowego rtęci w procesie całkowitego i zupełnego spalania paliwa, co jest możliwe dzięki wynikom testów przeprowadzonych według autorskiej procedury badawczej. Na zebranych danych eksperymentalnych opiera swoje dalsze rozważania dotyczące stopni uwolnień oraz możliwości ograniczania emisji rtęci z procesu spalania sklasyfikowanych już paliw. Co warto podkreślić, swoimi propozycjami współspalania węgla z wybraną biomasą istotnie wychodzi poza zakres pracy wynikający z tytułu ocenianej rozprawy doktorskiej.

W ramach rozdziału 7 Doktorant podejmuje próbę odpowiedzi na kolejne ważne pytanie, tym razem związane z wpływem warunków realizacji procesu spalania na kwestie dotyczące uwolnień rtęci i potencjalnych możliwości ograniczenia jej emisji z energetycznych kotłów węglowych. Eksplorację tematu rozpoczyna od badań eksperymentalnych procesu pirolizy wybranych paliw w atmosferze tlenowej i obojętnej. Z zebraniem bagażem praktycznych doświadczeń śmiało przechodzi do realizacji testów w dużej skali laboratoryjnej, gdzie potwierdza techniczne możliwości i zasadność prowadzenia ciągłych pomiarów stężenia rtęci w gazach spalinowych. Na koniec, ociera się o obiekty przemysłowe, analizując próbki popiołów lotnych, pobrane z rzeczywistych bloków energetycznych. Lektura rozdziałów 6 i 7 pozwala jednocześnie stwierdzić o znakomicie zorganizowanym i doskonale opanowanym warsztacie pracy Doktoranta, a dbałość o szczegóły w przedstawianych opisach zasługuje w tym przypadku na wyjątkowe uznanie.

Dopełnienie całości stanowi tu opracowany przez Doktoranta algorytm, umożliwiający szacowanie emisji podstawowych zanieczyszczeń, w tym rtęci, z procesów spalania paliw stałych, co zostało szczegółowo omówione w rozdziale 8 opiniowanej rozprawy doktorskiej. Dodatkowych informacji dostarczyły w tym przypadku przeprowadzone analizy termodynamiczne, przy okazji których posłużono się specjalistycznym oprogramowaniem FactSage. Symulacje te zostały ponadto uzupełnione o obliczenia procesowe wykonane w komercyjnym programie Aspen HYSYS. Wszystko to składa się na obraz bardzo ambitnego przedsięwzięcia naukowo-badawczego, wymagającego od Doktoranta dużej wiedzy i ogromnego zaangażowania.

Rozprawę doktorską kończy rozdział 9, zawierający wnioski korespondujące z postawionymi hipotezami oraz złożonym celem pracy.

3. Ocena rozprawy

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza dotyka bardzo istotnych i aktualnych problemów dotyczących emisji rtęci z obiektów energetycznych spalających paliwa stałe. Doktorant podjął się oceny wpływu właściwości fizykochemicznych spalanego paliwa oraz wybranych parametrów procesowych, w tym między innymi stopnia jego rozdrobnienia i założonego nadmiaru tlenu, na specjację rtęci w gazach spalinowych, a finalnie jej emisję do

otoczenia. Jednocześnie dla indywidualnych przypadków proponuje dedykowane metody jej ograniczenia. Utwierdza to tym samym w przekonaniu o trafności wyboru przedmiotu badań i właściwie zorientowanych zainteresowaniach naukowych Doktoranta.

Przedłożoną do oceny pracę w całości oceniam bardzo wysoko. Na etapie jej lektury nasuwały się jednak pewne pytania, uwagi i komentarze, które w kolejności chronologicznej zostały spisane poniżej.

1. *Rozdział 2:* Niektóre fragmenty wymagają uaktualnienia, przykładowo: „*Ujęte w nich standardy (...) wejdą w życie 16 sierpnia 2021 roku.*”.

Tabela 1: Odnośnik „2 – nieorganiczne związki fluoru, rozumiane jako HF” nie znajduje w tym przypadku zastosowania.

2. *Rozdział 3:* Stosowany od str. 32 skrót „UPS” (uboczne produkty spalania) nie został wcześniej rozwinięty. Podobnie jak anglojęzyczne skróty „ESP”, „FF”, „FGD” i „SCR” stosowane od strony 47.

Uwagi wymagają współczynniki stechiometryczne w równaniach 3 i 5.

Treść punktu (str. 54) „*zawartość niespalonego węgla w popiele lotnym – im niższa, tym korzystniejsze warunki adsorpcji i heterogenicznego utleniania Hg⁰*” kłóci się z przeprowadzoną poniżej dyskusją „*Generowany niedopał, ze względu na korzystny wpływ materii węglowej na utlenianie i sorpcję par rtęci ...*”.

Autor nadużywa wyrażenia „*relatywnie*”, na co należałoby zwrócić uwagę w kolejnych publikacjach.

3. *Rozdział 5:* Zakres pracy jest znacznie szerszy niż wskazywałby na to tytuł dysertacji.
4. *Rozdział 6:* Napotkać można na drobne usterki redakcyjno-edycyjne, przykładowo: podany zakres dla zawartości części lotnych w paliwach biomasowych (str. 76) – jest 70-93%, powinno być 70-83%; czy dla udziału rtęci w węglu kamiennym (str. 84) – jest 50-50 ppb, powinno być 50-150 ppb; a także podany zakres analizy fizykochemicznej paliw (str. 86) – jest C, H, N, S, O, Cl i S, powinno być C, H, N, S, O, Cl i Hg.

Nasuwa się również pytanie, na ile zaproponowaną metodę z użyciem bomby kalorymetrycznej można traktować jako ilościową, biorąc pod uwagę warunki powadzenia pomiaru różne od tych panujących w układzie kotła (ciśnienie, temperatura, skład atmosfery gazowej, ...) – prosiłbym Doktoranta o zajęcie stanowiska w tej kwestii. Co nie zmienia faktu, że już sama jakościowa informacja w tym zakresie jest niezwykle cenna i może wskazywać kierunki działań służących ograniczaniu emisji rtęci do otoczenia.

5. *Rozdział 7:* Błędne stwierdzenie znaleźć można w zapisie (str. 96) „*W warunkach rzeczywistych, w przypadku np. suszarek taśmowych, czas przebywania w strefie*

wysokich temperatur stanowiłby iloczyn prędkości posuwu materiału wewnątrz komory grzewczej oraz długości aktywnej strefy prażenia”.

Sformułowanie (str. 111) „różnicowanie związków tworzących rtęć” wydaje się mało trafne.

Inne drobne przejęzyczenia to przykładowo na str. 107 w akapicie 2 – jest *roztwór wodorotlenku potasu*, powinno być *roztwór chlorku potasu*.

W ramach badań zrealizowanych w dużej skali laboratoryjnej, do analizy wybrano fragment testu odpowiadający stosunkowo wysokiemu jak na technikę pyłową nadmiarowi powietrza ($\lambda=1,9$). Czy z punktu widzenia przeprowadzonego eksperymentu, z jakiegoś powodu, było to zamiarem samym w sobie? – proszę Doktoranta o krótkie wyjaśnienie.

6. *Rozdział 8*: Nawiązując do stwierdzenia ze strony 139 paragraf 3, wydaje się, że opracowany algorytm w przedstawionej postaci umożliwia obliczenia procesu spalania jedynie w atmosferze O_2+N_2 o ewentualnie podwyższonym udziale tlenu; natomiast przeprowadzenie obliczeń dla spalania tlenowego (oxy-fuel), tj. w mieszaninie gazowej O_2+CO_2 , a w praktyce $O_2+CO_2+N_2$, wymagałoby wprowadzenia pewnych modyfikacji w obrębie wzoru 31.

Podpis pod rysunkiem 72 (str. 161) został mylnie zamieszczony.

Pragnę jednak podkreślić, że zamieszczone powyżej uwagi i komentarze w żaden sposób nie umniejszają wartości naukowej przedłożonej do zaopiniowania rozprawy doktorskiej.

Za kluczowe osiągnięcie Doktoranta w przedstawionej dysertacji naukowej uważam opracowanie i przetestowanie zestawu nowych praktycznych narzędzi umożliwiających kompleksowe podejście do problemu emisji rtęci z obiektów energetycznych spalających paliwa stałe.

4. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny **rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie** bardzo ważnego **problemu naukowego**, jakim jest prognozowanie emisji rtęci z obiektów energetycznych spalających paliwa stałe z jednoczesną identyfikacją potencjalnych możliwości jej skutecznego ograniczania. **Doktorant wykazuje przy tym ogólną wiedzę teoretyczną w reprezentowanej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. W mojej ocenie, przedstawiona **rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595, z późn. zm.), w szczególności odpowiada warunkom określonym w art. 13 tejże Ustawy**. Uważam

również, że rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Cholewińskiego „Wpływ warunków spalania i rodzaju paliwa na emisję rtęci w czasie spalania pyłu węglowego” mieści się w dyscyplinie naukowej *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*. **W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.**

Jednocześnie biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych prac oraz wartość merytoryczną rozprawy, jak również poziom doskonałości naukowej reprezentowany przez Kandydata do stopnia doktora, z pełnym przekonaniem **wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Cholewińskiego „Wpływ warunków spalania i rodzaju paliwa na emisję rtęci w czasie spalania pyłu węglowego”.**

