

Dr hab. inż. Sławomir Stelmach, prof. IChPW
Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla
ul. Zamkowa 1
41-803 Zabrze

Zabrze, dn. 20.08.2021 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Agaty Wajdy

pt.:

„OKREŚLENIE OPTYMALNYCH WARUNKÓW SPALANIA ODPADÓW STAŁYCH W PIECU OBROTOWYM W SKALI PRZEMYSŁOWEJ”

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej w Gliwicach -
prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Określenie optymalnych warunków spalania odpadów stałych w piecu obrotowym w skali przemysłowej”, została opracowana przez Panią mgr inż. Agatę Wajdę na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, w Katedrze Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych przy wykorzystaniu infrastruktury badawczej Katedry oraz dane pomiarowe pozyskane podczas wizyt studyjnych na dwóch instalacjach przemysłowych. Promotorem przedmiotowej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Tomasz Jaworski, prof. PŚ.

Zgodnie z obecnymi trendami i popularyzacją idei gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) zagospodarowanie odpadów powinno się odbywać z zachowaniem hierarchicznej struktury postępowania - zapobieganie powstawaniu, ponowne wykorzystywanie, recykling, odzysk oraz unieszkodliwianie. Spalanie odpadów jest w tak rozumianym modelu najmniej pożądaną z punktu widzenia GOZ formą ich wykorzystania, ale wiele rodzajów odpadów nie nadaje się do zagospodarowania w inny sposób, dlatego spalarnie będą musiały pozostać trwałym elementem łańcucha gospodarki odpadami. Dotyczy to w szczególności spalarni odpadów niebezpiecznych, które muszą bezwzględnie podlegać termicznemu unieszkodliwieniu, celem wyeliminowania zagrożenia (chemicznego i/lub biologicznego) dla środowiska naturalnego, w tym zdrowia i życia ludzi.

Przedmiotem recenzowanej pracy doktorskiej jest właśnie w ogólnym ujęciu spalanie odpadów niebezpiecznych, a w ujęciu szczegółowym – piec obrotowy jako zasadnicze urządzenie unieszkodliwiające substancje niebezpieczne. Autorka rozprawy podjęła żmudne naukowo-badawcze działania w celu doprecyzowania opisu ruchu materiału poddawanego spalaniu w piecu obrotowym, optymalizacji doboru składu mieszanki odpadów wprowadzanej do pieca dla uzyskania najkorzystniejszych efektów termicznej destrukcji wsadu, a także opracowania numerycznego modelu spalania odpadów w urządzeniu będącym przedmiotem rozprawy.

Układ edycyjny recenzowanej rozprawy doktorskiej jest typowy dla prac o naukowym charakterze i w zrozumiałym, logicznym sposobie przedstawia istotę zagadnień opracowanych przez jej autorkę. Rozprawa obejmuje 127 stron i jest podzielona na 9 rozdziałów: 1. Wprowadzenie, 2. Cel, zakres pracy i tezy badawcze, 3. Termiczne przekształcanie odpadów w gospodarce odpadami, 4. Piec obrotowy w gospodarce odpadami w Polsce, 5. Badanie ruchu złoża materiału stałego w piecu obrotowym, 6. Optymalizacja doboru materiału wsadowego do pieca obrotowego, 7. Model spalania odpadów stałych w piecu obrotowym, 8. Analiza błędów i niepewności oraz 9. Podsumowanie i wnioski. Rozdziały 3-7 zawierają dodatkowe podrozdziały. Treść rozprawy zawiera 36 rysunków oraz 26 tabel (brak odrębnego spisu rysunków i tabel). Zawarta w rozprawie bibliografia obejmuje 107 pozycji literaturowych, w tym jedną publikację autorki rozprawy.

We wprowadzeniu do rozprawy autorka opisała krótko istotność zagadnienia termicznej konwersji odpadów, szczególnie odpadów niebezpiecznych, przedstawiając także ogólny opis pracy pieca obrotowego - urządzenia wykorzystywanego najczęściej celem termicznego unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych. Omówiła również krótko istotę problematyki przygotowania mieszanek paliwowych dla optymalizacji przebiegu procesu spalania odpadów niebezpiecznych i stabilizacji warunków pracy pieca obrotowego, a także znaczenie modelowania numerycznego dla umożliwienia osiągnięcia wymienionych efektów. Podjęcie przez nią działań na tym polu miało na celu (co zaprezentowała w rozdziale 2) określenie optymalnych warunków spalania odpadów stałych w piecu obrotowym w skali przemysłowej. Praca z założenia dotyczyła utylizacji odpadów niebezpiecznych z wykorzystaniem pieca obrotowego i szkoda, że ta szczególna cecha odpadów (niebezpieczność) nie została podkreślona w celu pracy.

Przedstawione przez autorkę w rozdziale 2 tezy pracy wydają się bardzo ogólne, a przez to relatywnie łatwe do udowodnienia. W świetle zaprezentowanych w dalszej części pracy wyników badań eksperymentalnych i modelowania wydaje się, że możliwe było sformułowanie bardziej szczegółowych tez, których udowodnienie w oparciu o uzyskane wyniki nie byłoby problematyczne.

W rozdziale 3 i 4, które potraktować należy jako szersze wprowadzenie do podjętej przez autorkę tematyki, przedstawione zostały ogólne informacje na temat spalania odpadów stałych, w tym omówienie ich rodzajów, analiza uwarunkowań prawnych procesu (determinujących w pewnym zakresie reżim procesowy termicznego unieszkodliwiania odpadów), opis urządzeń wykorzystywanych do termicznego przekształcania odpadów, a także szersze omówienie roli spalania odpadów w systemie gospodarki o obiegu zamkniętym. Ponadto autorka dosyć szczegółowo przedstawiła kwestie związane z konstrukcją i pracą pieców obrotowych, dokonując m.in. porównania reżimów pracy pieców obrotowych wykorzystywanych w spalarniach odpadów oraz cementowniach. Zaprezentowała także informacje na temat aktualnego stanu w zakresie wykorzystania przedmiotowej technologii na rynku krajowym. Dokonała szczegółowego opisu dwóch instalacji termicznej utylizacji odpadów niebezpiecznych, w których odbyła wizyty studyjne, a pozyskane podczas nich dane procesowe i technologiczne posłużyły jej do opracowania i walidacji modeli przedstawionych w dalszej części pracy.

Rozdział 5 autorka dedykowała badaniom ruchu materiału złoża w piecu obrotowym. We wstępnych podrozdziałach dokonała szczegółowej charakterystyki tego zjawiska w oparciu o modele znane z literatury przedmiotu. W celu przeprowadzenia własnych badań wykorzystwała prosty układ laboratoryjny symulujący pracę pieca obrotowego w trybie zimnym oraz zastosowała metodę znacznikową dla określenia charakterystyki ruchu materiałów wybranych do badań. Kwestią dyskusyjną pozostaje prawidłowość doboru materiałów w kontekście odwzorowania rzeczywistych składników odpadów niebezpiecznych. Nie jest to z pewnością sprawa prosta, biorąc pod uwagę niezwykle szerokie spektrum substancji/materiałów, które mogą znaleźć się w masie odpadów wprowadzanej do rzeczywistego urządzenia. W wyniku przeprowadzonych badań, wykorzystując opisany w rozdziale algorytm matematyczny, autorka rozprawy wyznaczyła rozkłady czasów przebywania poszczególnych badanych materiałów w reaktorze obrotowym. Ustaliła m.in., że czas przebywania materiału w reaktorze jest zależny od gęstości

oraz kąta naturalnego usypu materiału, przy czym nie udało się określić różnicy w sile wpływu na ruch materiału tych dwóch parametrów, ze względu na ich proporcjonalność.

W kolejnym rozdziale (rozdział 6) autorka przedstawiła wyniki swoich prac odnoszące się do optymalizacji doboru składu mieszanki odpadowej kierowanej do unieszkodliwienia w piecu obrotowym. Dobór ten jest niezwykle istotny dla zapewnienia prawidłowości funkcjonowania instalacji. Opis prac własnych poprzedziła kwerendą stosownej literatury, dokonując identyfikacji kluczowych kwestii związanych z przedmiotem analizy. Na podstawie przeglądu literatury doktorantka stwierdziła, że brak jest istotnych danych na temat zagadnienia przygotowania mieszanki odpadowej do utylizacji w piecu obrotowym, jak również nie są znane żadne narzędzia wspomagające taki proces. Skłoniło to autorkę do opracowania prototypowego narzędzia w postaci aplikacji, która może być niezwykle pomocna dla operatorów instalacji spalania odpadów niebezpiecznych przy doborze składu mieszanek odpadowych kierowanych w danym momencie do pieca. W celu jego opracowania wykorzystała dane dotyczące parametrów jakościowych rzeczywistych odpadów pozyskane podczas wizyt studyjnych w zakładach realizujących proces termicznej utylizacji odpadów niebezpiecznych. Opracowane narzędzie wykorzystuje następujące parametry analizowanych składników przygotowywanej mieszanki odpadowej: kaloryczność, pH, zawartość chloru, zawartość soli zasadowych (Na, K, Ca) oraz zawartość halogenków. Pozwala ono na dobór składników mieszanki odpadów w celu optymalnego (czyli zapewniającego zachowanie stabilnych parametrów pracy instalacji oraz eliminującego wystąpienie problemów eksploatacyjnych) skomponowania wsadu kierowanego do pieca obrotowego. Przedstawione przez autorkę rozprawy narzędzie, mimo swojej relatywnej prostoty, jest z pewnością rozwiązaniem utylitarnym, mogącym zdecydowanie usprawnić funkcjonowanie instalacji spalania odpadów niebezpiecznych.

Rozdział 7 autorka rozprawy poświęciła na przedstawienie efektów swoich prac z zakresu modelowania wymiany ciepła i masy w piecu obrotowym i komorze dopalania. Zagadnienie to jest niezwykle złożone, dlatego siłą rzeczy konieczne było poczynienie stosownych uproszczeń i założeń (np. nie uwzględniono promieniowania przy obliczeniach wymiany ciepła w fazie stałej). Autorka przedstawiła na wstępie przegląd wybranych prac z zakresu modelowania zjawisk zachodzących w piecach obrotowych podczas spalania odpadów, produkcji cementu, jak również redukcji rud

żelaza. Przechodząc do opisu opracowanych modeli zaprezentowała przyjęte warunki brzegowe, opisy metodyki modelowania wymiany ciepła w warstwie odpadów (dla mieszanek odpadów o określonej charakterystyce fizykochemicznej) oraz w fazie gazowej wraz z uzyskanymi wynikami obliczeń. Obliczenia procesu wymiany ciepła w fazie stałej wykonała w oparciu o opracowany przez siebie algorytm obliczeniowy, natomiast modelowanie w fazie gazowej – stosując program ANSYS Fluent. Wyniki obliczeń transportu ciepła w fazie stałej nie zostały niestety szerzej skomentowane przez autorkę rozprawy. Natomiast wyniki obliczeń modelowych wymiany ciepła i masy w fazie gazowej z zastosowaniem programu ANSYS Fluent zostały porównane z danymi pomiarowymi z obiektu rzeczywistego. Porównanie to wykazało pewne różnice wyników obliczeń i danych pomiarowych, ale mając na uwadze przyjęte do obliczeń uproszczenia oraz złożoność rzeczywistych zjawisk zachodzących w pracującym piecu spalającym niezwykle złożone chemicznie mieszaniny odpadów, uzyskane wyniki można uznać na tym etapie za zadowalające. Z pewnością stanowią one dobrą bazę do dalszego doskonalenia modelu.

Finalizując prezentację przeprowadzonych przez siebie prac autorka rozprawy dokonała krótkiej analizy błędów i niepewności (rozdział 8) dla przeprowadzonych przez siebie badań ruchu ciała stałego z pomiarem czasu przebywania materiału w obrotowym cylindrze oraz 24-godzinnych pomiarów temperatury uzyskanych ze spalarni odpadów medycznych. Niestety wyniki wykonanych obliczeń zostały przedstawione bez komentarza.

Na koniec analizy treści rozprawy należy stwierdzić, że wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych przez autorkę prac przedstawione w podsumowaniu (rozdział 9) wydają się zbyt lakoniczne. Biorąc pod uwagę szeroki zakres oraz dużą trudność podjętych przez nią prac można by oczekiwać nieco szerszej analizy podsumowującej.

Autorka recenzowanej rozprawy wykazała się dużą wiedzą z zakresu chemii, inżynierii chemicznej oraz inżynierii środowiska, w tym szczególnie głęboką znajomością kwestii związanych z termicznym przekształcaniem odpadów z wykorzystaniem procesu spalania w piecach obrotowych. Połączenie wiedzy z tych obszarów pozwoliło jej na przygotowanie spójnej merytorycznie rozprawy, która – pomijając jej zasadniczy cel, a więc uzyskanie stopnia doktora – może stanowić użyteczną wiedzę dla projektantów i eksploataatorów instalacji spalania odpadów niebezpiecznych w piecach obrotowych, ale również dla naukowców zajmujących się

tą tematyką. Część efektów pracy przedstawionych przez doktorantkę (przede wszystkim aplikacja umożliwiająca właściwy dobór składników mieszanki odpadowej kierowanej do spalania) ma zdecydowanie charakter użyteczny.

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską oceniam ogólnie pozytywnie, pozwolę sobie jednak na sformułowanie kilku uwag i pytań, które nie umniejszają jednakże wartości dzieła przygotowanego przez doktorantkę. W niniejszej recenzji przedstawione zostaną tylko najważniejsze z nich. Drobne korekty edytorskie i mniej istotne komentarze zostały zaznaczone w wersji elektronicznej rozprawy i przekazane doktorantce.

1. Tezy pracy w mojej ocenie zostały sformułowane zbyt ogólnie. Mając na uwadze ilość zagadnień, które doktorantka poruszyła w swojej rozprawie, można było pokusić się o postawienie bardziej szczegółowych tez, z których udowodnieniem (w mojej opinii) doktorantka nie miałaby żadnych problemów.
2. W kilku miejscach w pracy pojawia się stwierdzenie, że dominującym procesem zachodzącym podczas termicznej konwersji odpadów niebezpiecznych w piecu obrotowym jest zgazowanie (np. str. 21 i 32). W mojej ocenie taki reżim pracy układu powodowałby trudności z dotrzymaniem legislacyjnie wymaganego poziomu zawartości węgla organicznego (lub części palnych) w powstającym żużlu. Proszę autorkę o ustosunkowanie się do tej kwestii podczas obrony.
3. Dla przeprowadzenia badań ruchu materiału w złożu uformowanym w piecu obrotowym doktorantka wybrała pięć różnych materiałów (właściwie cztery, bo jeden był mieszanką dwóch z nich). Praca dotyczyła generalnie zagadnienia spalania odpadów niebezpiecznych, zatem proszę o wskazanie jakie zdaniem doktorantki rodzaje odpadów niebezpiecznych mogą symulować materiały wybrane przez nią do badań. Proszę również o informację, jakznaczono badane materiały i czy przyjęta metoda mogła w istotny sposób wpłynąć na zmianę właściwości fizycznych znaczonego materiału.
4. Jedną z cech odpadów przyjętą przez autorkę dla ich charakteryzowania pod kątem doboru kompozycji mieszanki przeznaczonej do spalania była wartość pH. Proszę o informację, jak zdaniem autorki rozumieć należy ten parametr. Czy chodzi o pH wyciągu wodnego?
5. W celu przeprowadzenia modelowania wymiany ciepła i masy w piecu obrotowym doktorantka wykonała badania rozkładu termogravimetrycznego odpadu przygotowanego do badań, których celem było pozyskanie informacji na

temat szybkości ubytku masy podczas nagrzewania i składu wydzielanych gazów. Badania te zostały wykonane w warunkach beztlenowych, a więc *de facto* symulowały proces pirolizy (a nie zgazowania lub spalania). Proszę autorkę o komentarz w tej kwestii.

6. Model wymiany ciepła w warstwie materiału został opracowany w sposób uproszczony dla wieloskładnikowego odpadu. Odnoszę wrażenie, że przyjęty skład mieszanki odpowiada bardziej zmieszonym odpadom komunalnym niż odpadom niebezpiecznym. Proszę autorkę o komentarz.
7. Jednym z założeń poczynionych przy modelowaniu fazy gazowej był brak ruchu pieca obrotowego. Czy zdaniem autorki uwzględnienie tego ruchu mogłoby mieć istotny wpływ na wynik modelowania?
8. Wyrażam nadzieję, że podczas swojej dalszej kariery naukowej, doktorantka zwróci baczniejszą uwagę na przygotowywanie publikacji z unikaniem błędów językowych i edycyjnych. Aspekt ten ma również znaczenie w naukowej pracy twórczej.

Przedstawione w niniejszej recenzji uwagi i konstatacje nie umniejszają naukowej i praktycznej wartości ocenianej pracy, a w mojej opinii stanowią przyczynek do dalszej, konstruktywnej dyskusji w trakcie obrony pracy doktorskiej. Wyrażam nadzieję, że w trakcie obrony publicznej doktorantka odniesie się do większości przedstawionych przeze mnie uwag. Przygotowaną przez nią rozprawę, nacechowaną znaczącym ładunkiem aspektów użytkowych, oceniam pozytywnie. W mojej ocenie stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej autorka wykazała się szczegółową wiedzą teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Po szczegółowej analizie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej ostatecznie stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, w związku z art. 179 ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Agaty Wajdy do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

