



Prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński
Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
Katedra Energetyki
75 – 620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17
Tel. 94 3478-420, 437
email: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl



Koszalin 13.11.2024

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Copik pt.:
„The mathematical model of oxy-fuel combustion of municipal solid waste on the grate
furnace integrated with CO₂ capture”

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. Krzysztofa Labusa, w oparciu o pismo nr RIE-BD.512.42.2024 z dnia 22.10.2024 r.

Rozprawa doktorska powstała i została zredagowana pod kierunkiem
prof. dr hab. inż. Andrzeja Szłęka

Funkcje promotora pomocniczego pełnił **dr Mario Ditaranto**, SINTEF Energy Research Trondheim, Norway

Recenzję wykonano zgodnie z wytycznymi Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny IŚGiE Politechniki Śląskiej

1. Tytuł i przedmiot rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy doktorskiej brzmi: *The mathematical model of oxy-fuel combustion of municipal solid waste on the grate furnace integrated with CO₂ capture*, a jej przedmiotem jest analiza metod stosowanych w procesach eliminacji lub ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, których źródłem są m.in. procesy utleniania biopaliw. Zjawisko to stanowi obecnie znaczny problem środowiskowy oraz społeczny. Jednym ze sposobów redukcji lub eliminacji podstawowego związku chemicznego odpowiedzialnego za efekt cieplarniany, jakim jest CO₂, jest technologia jego wychwytywania. W przypadku emisji ze źródeł bioenergetycznych (BioCCS lub BECCS) metoda ta może skutkować generowaniem energii z tzw. ujemnym CO₂, co jest m.in. wynikiem biogenego pochodzenia znacznej części węgla pierwiastkowego zawartego w odpadach stałych np. pochodzenia komunalnego. Stosowane obecnie metody wychwytywania CO₂, związane są z jego jednoczesnym spalaniem wtórnym. Metoda ta jest stosowana ze względu na najmniejsze wymagane modyfikacje techniczne konieczne do realizacji tego procesu.

Procesy o znacznym zaawansowaniu technicznym związane są z koniecznością oddzielenia CO₂ ze strumienia spalin, które mogą zawierać azot, tlenek węgla CO, nadmiarowy tlen O₂, wilgoć H₂O w stanie gazowym oraz inne związki, które powstały z wiązań pierwiastków zawartych w paliwie. Metoda ta jednak jest kosztowna i powoduje obniżenie sprawności całego procesu utleniania paliw.

Kolejny sposób na obniżenie emisji CO₂ do otoczenia jest tzw. spalanie tlenowo-paliwowe, polegające na doprowadzeniu do procesu spalania czystego tlenu w miejsce powietrza atmosferycznego. Dodatkowo do komory spalania doprowadza się recyrkulowane spaliny, co w rezultacie prowadzi do uzyskania, jako głównych produktów CO₂ oraz wilgoci H₂O. W konsekwencji, ułatwia to sekwestrację CO₂. Odrębnym problemem do rozważenia w tej metodzie jest analiza wpływu zmiany atmosfery utleniania w wyniku braku jednego z reagentów jakim jest azot N₂.

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej, głównym rozważanym zagadnieniem jest analiza wpływu zmiany parametrów procesu utleniania. W tym celu, aby określić wpływ zmian atmosfery na proces degradacji termicznej, opracowano model matematyczny spalania odpadów w różnych warunkach. Pozwoliło to na ilościowe zdefiniowanie różnic między utlenianiem odpadów pochodzenia np. komunalnego w powietrzu atmosferycznym i tlenowym.

Zaproponowany model w swoim założeniu ma obejmować wszystkie etapy procesu rozpadu odpadów zachodzące w komorze spalania. Zalicza się do nich odparowanie wilgoci, pirolizę, dopalenie karbonizatów i utlenienie części lotnych nad rusztem.

Wyniki obliczeń modelowych porównano z wykonanymi badaniami eksperymentalnymi, w których wykorzystano tzw. reprezentatywne odpady komunalne. Proces degradacji termicznej realizowano w atmosferze N₂, CO₂ i O₂/CO₂ za pomocą termograwimetru (TG) i laboratoryjnym urządzeniu eksperymentalnym. Eksperymenty przeprowadzono z dynamicznym programem temperaturowym w trzech szybkościach ogrzewania. Do określenia danych kinetycznych zastosowano metody izokonwersji. Przedstawione parametry kinetyczne dostarczyły podstawowych informacji na temat konwersji odpadów stałych.

W założeniu, uzyskane wyniki badań mają przyczynić się do poszerzenia wiedzy z rozpatrywanego zakresu i rozwoju technologii spalania odpadów z zintegrowanym procesem wychwytywania dwutlenku węgla CO₂, co powinno być przydatne przy projektowaniu nowych komór spalania tlenowo-odpadowego.

Należy ocenić, że podany tytuł rozprawy doktorskiej, tematycznie odpowiada przyjętym założeniom przedstawionym w jej skróconym powyżej opisie.

2. Struktura redakcyjna (układu) pracy

Rozprawę doktorską stanowi cykl połączonych tematycznie 4 publikacji, zamieszczonych w tym opracowaniu, jako załączniki i będące w zasadzie jego odrębną częścią. Opis syntetyczny treści zawartych w tych pozycjach i zredagowany w języku angielskim, został umieszczony w pierwszej części tej pracy. Całość wraz ze wstępem w języku polskim, spisem treści, nomenklaturą, wykazem współautorskich publikacji w czasopismach i materiałach konferencyjnych, wykazem literatury, listą tabel i rysunków zawarta została na 126 stronach.

Redakcja w języku angielskim powoduje, że nie będąc *native speakerem*, Recenzent nie jest w stanie ocenić poprawności stylistycznej oraz gramatycznej w odpowiednim stopniu.

Istotnym elementem w przedstawionych do oceny materiałach jest informacja podana w wykazie **List of publications** o charakterze Doktorantki, jako współautorki we wskazanych do dorobku publikacjach. Udział zawiera się w przedziale 60 – 80% i merytorycznie dotyczy głów-



nych zadań w przygotowaniu tego materiału. Obejmuje on analizę literatury, opracowanie metodologii przeprowadzenia badań eksperymentalnych oraz założeń do zaproponowanego modelu matematycznego. Zakres ten należy uznać za odpowiedni w odniesieniu do wymogów związanych z uznaniem tego materiału, jako podstawę zgłoszenia przez Autorkę jako pracy doktorskiej.

W części pierwszej Doktorantka umieściła przede wszystkim informacje będące opisem motywacji podjęcia zrealizowanego tematu tej rozprawy. **Początek opracowania (Abstract)** syntetycznie wskazuje na konkretne aspekty dotyczące problemów związanych z technologiami i metodami sekwestracji dwutlenku węgla CO₂, produktów utleniania biopaliw stałych pochodzenia komunalnego. Rozwinięcie tego zagadnienia zostało przedstawione w **Rozdziale 1**, w którym podano informacje dotyczące zmian środowiskowych wywołanych emisją związków szkodliwych do otoczenia. W szczególności dotyczy to gwałtownego wzrostu stężenia na przestrzeni ponad 30 minionych lat, antropogenicznego dwutlenku węgla (CO₂) w głównej mierze odpowiadającego za efekt cieplarniany. Jednym z głównych źródeł emisji do atmosfery tego związku chemicznego są procesy utleniania paliw zarówno pochodzenia konwencjonalnego jak i z biopaliw. Obecnie udział objętościowy CO₂ w atmosferze wynosi ok. 400 ppm. Należy również podkreślić, że ten rodzaj dwutlenku węgla jest najbardziej radiacyjnym, niekondensującym i najdłużej żyjącym gazem cieplarnianym (GHG), który może pozostawać w atmosferze przez tysiąclecia. Przyjęte obecnie założenia mówią o konieczności eliminacji tego gazu od 100 do 1000 Gt do 2100 r. Związane jest to z koniecznością zastosowania nowych metod ograniczenia jego emisji, w większości przypadków w postaci rozwiązań konstrukcyjnych umożliwiających wydzielenie CO₂ z produktów utleniania z zamiarem składowania w odpowiednich miejscach lub ponownego energetycznego wykorzystania. W kolejnych podrozdziałach o **numeracji 1.1.1 do 1.1.3**, tej części opracowania przedstawiono dane statystyczne dotyczące wytwarzania i składowania odpadów różnego pochodzenia, w aspekcie międzynarodowym. Opisano również stosowane kiedyś i obecnie technologie utleniania odpadów, wraz z konsekwencjami środowiskowymi tych działań. **Podrozdział 1.2**, to opis technologii **BECCS (Bioenergy Carbon Capture and Storage)**, związanej z wykorzystaniem biomasy stałej w procesach energetycznych utleniania i składowaniem wychwyconego dwutlenku węgla na przykład w formacji geologicznej lub na dnie morskim. Metoda ta, zaliczana do wykorzystania biomasy w zakresie odnawialnych źródeł energii może skutkować w bilansie energetycznym nawet tzw. ujemną emisją CO₂ do atmosfery, ponieważ część traktowana jest jako konieczna w procesach fotosyntezy. Następnie w **podrozdziale 1.2** wskazano na trzy główne technologie: wstępne spalanie, dopalanie i spalanie tlenowo-paliwowe. Opisało najważniejsze aspekty tych procesów prowadzących w konsekwencji do wniosku mówiącego o obniżeniu kosztów eksploatacji urządzeń stosowanych w tej metodzie.

Kolejny **Rozdział 2 (Objectives of this study)**, to opis **Celu pracy**. Przedstawiono w nim 3 hipotezy badawcze oraz 7 działań badawczych mających doprowadzić do osiągnięcia celu pracy, jakim jest sprawdzenie zdefiniowanych w tej pracy przypuszczeń.

Podrozdział 2.1. przedstawia zakres rozprawy doktorskiej. Umieszczono w nim skrócony opis poszczególnych rozdziałów. W założeniu struktury pracy, część pierwsza obejmująca syntetyczny przegląd literatury zawarta jest w 2 pierwszych rozdziałach. Kolejne 4 (rozd. 3 – 6), to przeglądowy zarys treści 4 artykułów będących podstawą tej rozprawy doktorskiej. **Rozdział 7** to podsumowanie i wnioski.

Rozdział 3 pt.: Waste incineration integrated with carbon capture – paper I, odnosi się do pierwszego z artykułów stanowiących ten doktorat. Tytuł artykułu to: *Waste-to-energy technology integrated with carbon capture - Challenges and opportunities*. Umieszczono w nim stan wiedzy z zakresu stosowanych obecnie technologii wychwytywania dwutlenku węgla podczas energetycznego wykorzystania odpadów komunalnych jako biopaliwo. Opisało w tym arty-



kule również perspektywy rozwoju oraz związane z tym wyzwania w zakresie wykonalności technicznych, środowiskowych oraz społeczno-politycznej. W podrozdziałach 3.1. przedstawiono metodę **przetwarzania odpadów w energię z wykorzystaniem obiektów CCUS (systemu wychwytywania, składowania i wykorzystywania dwutlenku węgla)**, gdzie skupiono się na koncepcji nowych zakładów energetycznych przetwarzających odpady (**podz. 3.1.1.**), a w **podz. 3.2.**, krótki opis kolejnych działań mających miejsce w zakresie rozwoju tych technologii.

Rozdział 4 Thermogravimetric and kinetic analysis of the waste material under different atmospheres – II paper, nawiązuje do drugiego artykułu pt.: *Thermogravimetric and kinetic study of thermal degradation of various types of municipal solid waste (MSW) under N₂, CO₂ and oxy-fuel conditions*. Artykuł ten, jest kontynuacją rozpatrywanych zagadnień pod względem analizy wpływu parametrów procesu utleniania na termiczną degradację wybranych odpadów wykorzystywanych energetycznie. W tym celu, przeprowadzono badania eksperymentalne techniką termo grawimetryczną. Przebadano wpływ zmiany atmosfery utleniania w zakresie analizy udziału w niej N₂, CO₂ i O₂/CO₂. W eksperymencie przebadano kilka rodzajów stałych odpadów komunalnych (MSW), takich jak tekstylia (Tex), fusy po kawie (SCG) i PVC. Celem tych badań było określenie parametrów kinetycznych procesu utleniania tego typu odpadów, ich potencją energetyczną (w zasadzie egzergetyczny) oraz współczynnika wykładniczego do opisu procesu pirolizy w określonych powyżej parametrach zmiennej atmosfery utleniania. W **podrozdziale 4.1.** podano podstawowe informacje związane z teorią kinetyki/dynamiki procesu utleniania, w **podz. 4.2.** opisano metodykę na podstawie której zrealizowano badania eksperymentalne. Opisano procedury (**podz.4.2.1**) i wykorzystane materiały (**podz. 4.2.2.**). **Podz. 4.3.** odnosi się do uzyskanych wyników badań przedstawionych w formie graficznych zależności. **Podz. 4.4.** to tabelaryczne przedstawienie wyników badań kinetycznych.

Rozdział 5 Experimental investigation of waste decomposition in various conditions – III paper, to odniesienie do kolejnego artykułu pt.: *A comparative study on thermochemical decomposition of lignocellulosic materials for energy recovery from waste: Monitoring of evolved gases, thermogravimetric, kinetic and surface analyses of produced chars*. W materiale tym opublikowano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na laboratoryjnym reaktorze wykorzystywanym do badań parametrów procesu pirolizy. Materiałem poddanym temu procesowi były odpady tekstylne oraz fusy po kawie, co umożliwiło identyfikację obecności czynnika zgazowującego intensyfikującego konwersję węglowodorów w metodzie krakingu oraz reakcji wtórnych. Uzyskano również węgle pierwiastkowe pochodzenia odpadowego i poddano je badaniom termo grawimetrycznym, co pozwoliło na weryfikację kinetyki (dynamiki) procesu dopalania węgla w warunkach spalania tlenowego. W **podz. 5.1.** opisano stanowisko eksperymentalne i procedurę badań. Wykorzystano tutaj reaktor rurowy umieszczony wewnątrz pieca elektrycznego. Badania prowadzono w trzech różnych atmosferach: (a) obojętnej 100 obj.% N₂, (b) zgazowującej 100 obj.% CO₂ i (c) utleniającej 90/10 obj.% CO₂/O₂, przy całkowitym przepływie 400 ml/min, aby ocenić profile wydzielania się gazu podczas różnych procesów, takich jak piroliza, zgazowywanie i spalanie tlenowe. Następnie w **podz. 5.2.** umieszczono wyniki badań oraz dyskusję ich dotyczącą. **Podz. 5.2.1.** to graficzna analiza prowadzonych badań w reaktorze, a **podz. 5.2.2.** analiza kinetyczna węgla pochodzących z odpadów w formie tabelarycznej.

Rozdział 6 Mathematical modelling of the oxy-waste incineration – IV paper, nawiązuje do ostatniego artykułu pt.: *Simplified mathematical model of oxy-fuel combustion of municipal solid waste on the grate furnace: effect of different flue gas recirculation rates and comparison with conventional mode*. Przedstawiono w nim założenia do propozycji modelu matematycznego opisującego proces spalania odpadów w pełnowymiarowej instalacji. Charakterystyczną cechą konstrukcyjną tego urządzenia jest tzw. ruszt ruchomy, na którym realizuje się spalanie w warun-

kach powietrza atmosferycznego lub tlenowego. Zaproponowany model wykonano przy użyciu oprogramowania MATLAB i poddano go weryfikacji w odniesieniu do uzyskanych uprzednio wyników badań eksperymentalnych. Założenia do modelu podano w **podz. 6.1.**, gdzie w **podz 6.1.1.** przeanalizowano dostępne obecnie w literaturze rozwiązania tego typu, **podz. 6.1.2.** to propozycja własnego rozwiązania. Podz. 6.2. to przedstawienie wyników uzyskanych badań modelowych, w **podz. 6.2.1.** dla realizacji spalania w powietrzu atmosferycznym, **podz. 6.2.2.** w atmosferze czystego tlenu.

Rozdział 7 Summary and conclusions to Podsumowanie i wnioski. Opisano tutaj syntetycznie przedstawione w tym opracowaniu przyjęte założenia oraz uzyskane wyniki.

Struktura przedstawionego do oceny opracowania w tej formie nie budzi zastrzeżeń i można ją ocenić pozytywnie.

3. Cel i zastosowane metody

Cel pracy został podany w Rozdziale 2, gdzie wskazano 3 hipotezy do sprawdzenia, oraz 7 działań badawczych mających doprowadzić do realizacji tego celu. Opisane działania są zarazem zdefiniowanymi metodami za pomocą których, te działania mają być wykonane. Założenia tej rozprawy doktorskiej opisano na wstępie tej Recenzji, a zdefiniowany sposób ich realizacji jest zgodny z ogólną metodyką pracy badawczej.

Powyższe wskazuje na poprawność wykonania rozprawy doktorskiej w odniesieniu do tak postawionych wymogów.

4. Omówienie wyników badań

Wyniki przeprowadzonych badań zostały opublikowane we wskazanych jako podstawa rozprawy doktorskiej 4 współautorskich publikacjach. W części dotyczącej tego co znajduje się w poszczególnych artykułach przedstawiono skrótowe opisy tych materiałów. Należy zauważyć, że taka forma skutkuje tym, że Recenzent otrzymuje już oceniony materiał, przez poszczególne redakcje, które je opublikowały. Rodzaj i jakość czasopism (Energy, Archives of Thermodynamics), w których ukazały się te materiały, wskazuje już na odpowiednio wysoki poziom merytoryczny przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej.

Niemniej w zakresie dyskusji pojawia się pytanie dotyczące propozycji modelu matematycznego jaki powstał wyniku tych prac. W artykule 4 pt.: *Simplified mathematical model of oxy-fuel combustion of municipal solid waste on the grate furnace: effect of different flue gas recirculation rates and comparison with conventional mode*, zaproponowano, zresztą słusznie, podział na strefy komory spalania. W odniesieniu do tego przedstawiono opis procesu utleniania w oparciu o równania zachowania masy i energii z uwzględnieniem strat ciepła do otoczenia na drodze promieniowania. W rozważaniach tych brakuje natomiast moim zdaniem analizy tego procesu w ujęciu równania stechiometrycznego obejmującego wszystkie reagenty oraz produkty tego procesu. Brakuje tutaj również informacji, czy w założeniach przyjęto możliwość realizacji procesu utleniania wszystkich rozważanych materiałów jako zupełnego i całkowitego. W równaniu (4) tego artykułu znajduje się co prawda bilans masowy, wskazujący na uwzględnienie straty popielnikowej, ale czy zawsze będzie ona miała miejsce, czy też może być pomijalnie niewielka w przypadku tego typu paliwa. Kolejne rodzące się pytanie, to jak w przypadku uwzględnienia straty popielnikowej zidentyfikowano w bilansie ilość pozostałej w niej energii.



Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i Recenzent liczy na ich rozwinięcie podczas publicznej obrony.

5. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do recenzji praca doktorska nie wykazuje nieprawidłowości, o których jest mowa w wytycznych Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej. Analiza przedstawionego do oceny materiału wskazuje również na jego aplikacyjny charakter. Utylizacja odpadów komunalnych w tzw. obiegu zamkniętym z ich wielokrotnym wykorzystaniem, na pewnym etapie kończy się ich składowaniem, co zazwyczaj jest degradacyjne dla środowiska. Jednocześnie takie działania mają również swój wydzźwięk społeczno-polityczny, zazwyczaj o negatywnym charakterze. Wykorzystanie odpadów komunalnych w charakterze biopaliw z zastosowaniem metod redukcji emisji związków szkodliwych do otoczenia w tym CO₂, odpowiedzialnego za efekt cieplarniany, jest obecnie jednym najważniejszych działań w zakresie energetyki ciepłej. Poszukiwanie wszelkich metod usprawnienia tego procesu jest jak najbardziej wskazane. W tym zakresie należy stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi próbę oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. Należy również zaznaczyć, że przedstawiony materiał powstał w ramach realizacji projektu badawczego „*Experimental investigation and modelling of the oxy-incineration of municipal solid waste process for the development of technology for utilization of waste with negative CO₂ emission*” (2021/41/N/ST8/02548) finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w Polsce i realizowanego we współpracy z SINTEF Energy Research w Norwegii. Fakt ten również potwierdza aplikacyjny charakter tej rozprawy doktorskiej.

6. Ocena pracy i wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę przedstawionego do oceny opracowania jego treść i cechy merytoryczne, stwierdzam, że spełnia ono wymogi dysertacji doktorskiej. Określony zakres tematyczny, sposób realizacji założonych przez Autorkę celów wskazuje na osiągnięcie odpowiednich kompetencji wymaganych zapisami ustawy dla osób ubiegających się o stopień naukowy doktora.

Należy podkreślić, że rozpatrywana tematyka ma charakter aplikacyjny i wpisuje się w zakres energetyki ciepłej oraz inżynierię środowiska.

Podsumowując stwierdzam, że przedłożona mi do oceny praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autorkę **mgr inż. Paulinę Copik** naukowych metod doświadczalnych i obliczeniowych, stosowanych w **dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**, a tym samym wyczerpuje warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz.U.2018 poz. 1668 z późn. zm.) co uzasadnia **dopuszczenie** jej do publicznej obrony o co wnioskuje.

