

Kraków, 29.10.2024r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Wydział Energetyki i Paliw

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

[wnowak@agh.edu.pl](mailto:wnowak@agh.edu.pl)

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskie mgr inż. Pauliny Copik „THE MATHEMATICAL MODEL OF OXY-FUEL COMBUSTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE ON THE GRATE FURNACE INTEGRATED WITH CO<sub>2</sub> CAPTURE ”**

## **Wstęp**

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z 25.10.2024 pismo RIE-BD.512.42.2024.

## **Zasadność tematyki**

Termiczna utylizacja odpadów jest metodą, która wymaga uważnego monitoringu i kontroli z powodu ich potencjalnego negatywnego wpływu na środowisko. Spalanie

prowadzone jest w szeregu różnych technologii, które w mniej lub bardziej udany sposób pozwalają unieszkodliwiać odpady komunalne na drodze termicznej. Wśród nich na szeroką skalę proces spalania prowadzi się w kotłach rusztowych stosując powietrze jako utleniacz. Jednak takie rozwiązanie formułuje kilka problemów. Odmiany morfologiczne odpadów komunalnych znacznie różnią się między sobą zarówno własnościami fizykochemicznymi, jak i kinetycznymi. Powoduje to nakładanie się procesów termicznych przebiegających w fazie gazowej i w fazie stałej co w rezultacie prowadzi do niekorzystnych zjawisk, których efektem są straty w postaci niecałkowitego spalania oraz powstawanie związków zanieczyszczeń gazowych niekorzystnych z ekologicznego punktu widzenia. Zjawisk tych, przy spalaniu odpadów w kotłach rusztowych za pomocą mieszanki powietrznej nie da się uniknąć, z uwagi na charakterystyczne własności technologiczne zachodzące w jednej przestrzeni reakcyjnej. Ponadto skład chemiczny substancji mineralnej różnych odmian morfologicznych jest na tyle odmienny, że utrudnia spalanie mieszaniny odpadów z uwagi na temperatury spiekania popiołów przynależnych do różnych odmian morfologicznych. Proces termicznego unieszkodliwiania odpadów komunalnych, aby był wysokosprawny termicznie i bezpieczny ekologicznie musi przebiegać w warunkach rozdziału w czasie i przestrzeni procesów termicznego rozkładu odpadów oraz spalania gazów pirolitycznych i karbonizatu.

W przypadku tradycyjnego spalania, w celu spalania określonej ilości odpadu doprowadza się, z pewnym nadmiarem, określoną ilość powietrza – które zawiera jedynie ok. 21% tlenu oraz aż ok. 79% azotu, nieistotnego z punktu widzenia realizowanego procesu spalania. W wyniku reakcji utleniania składników paliwa otrzymujemy spaliny, których głównym składnikiem jest jednak wciąż  $N_2$  (ok. 79%), a udział dwutlenku węgla, „rozcieńczonego” w całej objętości spalin wynosi jedynie ok. 16%. Tym samym, z punktu widzenia potencjalnej sekwestracji  $CO_2$ , taki skład spalin jest wyjątkowo niekorzystny, gdyż separacja gazów wymagałaby wysokich nakładów i byłaby uciążliwa w realizacji.

W przypadku spalania tlenowego z kolei, proces spalania paliwa poprzedzony jest wstępną separacją powietrza. Jeżeli prowadzony proces charakteryzować będzie się wysoką sprawnością, to w efekcie uzyskamy mieszkankę gazową tlenu i azotu o dużym udziale  $O_2$ , dochodzącym do 95%. Tak przygotowany utleniacz doprowadzany jest do procesu spalania, przy znacznie mniejszym  $\lambda$ . W efekcie gaz spalinowy będzie składał się głównie z  $CO_2$  (ok. 90%) oraz  $N_2$  (pozostałego z procesu separacji) i  $O_2$  (pochodzącego z nadmiaru utleniacza). Tym samym, realizacja procesu sekwestracji dwutlenku węgla będzie tu znacznie ułatwiona.

Realizacja procesu spalania w takich niekonwencjonalnych warunkach pozwala, dzięki wyeliminowaniu azotu z gazowego substratu, na ograniczenie ilości spalin o ok. 80%,

co tym samym prowadzi do skoncentrowania pozostałych składników, głównie CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>, w mniejszej objętości.

Spalanie odpadów komunalnych w atmosferze tlenowej będące przedmiotem zainteresowania kandydatki koreluje z aktualnymi trendami badawczymi w dziedzinie spalania tlenowego, głównie ze względu na jego potencjał w ograniczaniu emisji CO<sub>2</sub> i innych zanieczyszczeń. Tlenowe spalanie jest kluczowym elementem technologii dekarbonizacji, w tym systemów wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS), które stają się coraz bardziej popularne w dążeniu do neutralności klimatycznej. Dodatkowo, spalanie tlenowe wpisuje się w nurt zrównoważonej gospodarki odpadami, wspierając cele gospodarki o obiegu zamkniętym, które mają na celu minimalizację negatywnego wpływu odpadów na środowisko. Istotne są również wyzwania technologiczne, jakie niesie za sobą adaptacja do spalania w atmosferze tlenowej, co otwiera nowe możliwości badawcze w zakresie optymalizacji tych procesów, ich efektywności energetycznej oraz redukcji zanieczyszczeń.

***W kontekście recenzowanej dysertacji doktorskiej, należy podkreślić, że jej tematyka koreluje z aktualnymi trendami badawczymi w tej dziedzinie.***

## **Układ pracy**

Prezentowana rozprawa doktorska składa się z 4 monotematycznych artykułów wymienionych poniżej.

**P. Wienchol\***, A. Szlęk, M. Ditaranto, Waste-to-energy technology integrated with carbon capture – Challenges and opportunities, *Energy* (IF: 9.000), Volume 198, 2020, 117352, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117352>

Number of citations: 120

II. **P. Wienchol\***, A. Korus, A. Szlęk, M. Ditaranto, Thermogravimetric and kinetic study of thermal degradation of various types of municipal solid waste (MSW) under N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and oxy-fuel conditions, *Energy* (IF: 9.000), Volume 248, 2022, 123573, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123573>

Number of citations: 17

III. **P. Copik\***, A. Korus, A. Szlęk, M. Ditaranto, 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, *Energy* (IF: 9.000), Volume 285, 2023, 129328, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129328>.

Number of citations: 2

IV. **P. Copik\***, A. Szlęk, M. Ditaranto, 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, Archives of Thermodynamics (IF: 0.800), Volume 4, 2024, doi: 10.24425/ather.2024.151233

Number of citations: 0

Rozdział 1 przedstawia znaczenie badań oraz ogólne tło i motywację do przeprowadzenia tych badań. Rozdział 2 prezentuje cele rozprawy. Rozdział 3 zawiera ogólną koncepcję technologii przekształcania odpadów w energię zintegrowaną z wychwytywaniem dwutlenku węgla. Opisano stan techniki tej technologii o ujemnej emisji CO<sub>2</sub> oraz kluczowe możliwości i wyzwania związane z jej techniczną oraz środowiskową.

Rozdział 4 poświęcony jest termogravimetrycznej i kinetycznej analizie degradacji termicznej odpadów w różnych warunkach. Przeanalizowano różne atmosfery i szybkości nagrzewania w celu uzyskania danych kinetycznych dotyczących termicznego rozkładu materiałów odpadowych. Rozdział 5 przedstawia kampanię eksperymentalną przeprowadzoną na stanowisku badawczym w skali laboratoryjnej, mającą na celu analizę profili ewolucji gazu podczas degradacji termicznej w różnych warunkach oraz przygotowanie karbonizatów powstałych z odpadów do analizy kinetycznej. Rozdział 6 koncentruje się na wyjaśnieniu rozwoju modelu, w tym założeń i równań modelu, oraz podsumowaniu najważniejszych wyników symulacji. W tym rozdziale zweryfikowano trzecią hipotezę dotyczącą możliwości obniżenia temperatury złoża przy użyciu recykulowanych spalin, jednocześnie osiągając wysoką temperaturę powyżej złoża. Rozdział 7 przedstawia podsumowanie i wnioski z pracy. Rozdziały 3 do 6 podkreślają najważniejsze aspekty Artykułów I-IV, które są zamieszczone w sekcji załączników, przy czym artykuły te są spójne z problematyką rozprawy oraz ściśle odpowiadają jej kluczowym zagadnieniom badawczym.

Ocena zastosowanego piśmiennictwa jest poprawna. Kandydatka uwzględniła szeroki zakres literatury, co wspiera Jej badania i wskazuje na dobrą znajomość dziedziny. Wykorzystane źródła są odpowiednie i aktualne.

Cel pracy został właściwie sformułowany. Połączenie badań eksperymentalnych oraz modelowania matematycznego służy pogłębieniu fundamentalnej wiedzy na temat technologii, lepszemu zrozumieniu organizacji procesu w rzeczywistej instalacji spalania, co ma na celu uczynienie go wykonalnym i efektywnym, a także weryfikacji sformułowanych hipotez badawczych.

Zastosowane metody badawcze są, moim zdaniem, poprawne. Dobór metod eksperymentalnych oraz modelowania matematycznego jest trafny i adekwatny do postawionych celów badawczych. Dzięki temu możliwe jest nie tylko pogłębienie wiedzy na temat procesów przekształcania odpadów i wychwytywania dwutlenku węgla, ale również efektywne przeanalizowanie technicznych i środowiskowych aspektów tej technologii.

## **Elementy nowości naukowej i aspekty praktyczne rozprawy doktorskiej**

*Najważniejsze oryginalne osiągnięcia recenzowanej pracy doktorskiej, które stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego:*

1. Przeprowadzenie kompleksowego przeglądu technologii przekształcania odpadów w energię oraz szczegółowa analiza zjawisk podczas spalania tlenowego, zintegrowanych z wychwytywaniem CO<sub>2</sub>. Podejście to umożliwia określenie aktualnego stanu wiedzy, a także identyfikację możliwości i wyzwań tej techniki z perspektywy jej wykonalności technicznej i środowiskowej, co jest istotne dla dalszego rozwoju i optymalizacji tej technologii.
2. Identyfikacja procesów zachodzących podczas spalania odpadów w atmosferze tlenowej oraz sformułowanie założeń i równań matematycznych modelu opisującego te procesy.
3. Przygotowanie procedur eksperymentalnych na urządzeniu termogravimetrycznym oraz przeprowadzenie serii analiz eksperymentalnych w celu uzyskania krzywych TG i DTG w różnych warunkach operacyjnych.
4. Wyznaczenie parametrów kinetycznych poszczególnych etapów (piroliza, spalanie karbonizatu) termicznej degradacji różnych materiałów odpadowych w zróżnicowanych warunkach.
5. Zbadanie wpływu atmosfery na degradację termiczną materiałów odpadowych z wykorzystaniem urządzeń laboratoryjnych.
6. Opracowanie modelu matematycznego spalania odpadów w atmosferze powietrza oraz jego walidacja na podstawie danych z instalacji w skali przemysłowej.
7. Modyfikacja modelu matematycznego na warunki spalania odpadów w atmosferze tlenowej oraz ocena wpływu różnych dróg dystrybucji utleniacza na przebieg procesu spalania.

Wyniki pokazały, że zmiana atmosfery z obojętnej na zgazowującą nie wpływa na rozkład termiczny próbek poniżej 600 °C, a parametry kinetyczne dla pirolizy są podobne w atmosferze N<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>. Jednak w atmosferze zgazowującej pojawia się drugi pik powyżej 600 °C podczas rozkładu materiałów lignocelulozowych, co przypisuje się reakcjom CO<sub>2</sub> z węglem resztkowym. W przypadku materiałów lignocelulozowych atmosfera O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> powoduje, że reakcje z węglem i gazem nośnym są bardziej dynamiczne i zachodzą w niższej temperaturze, przez co częściowo nakładają się na proces pirolizy, co jest widoczne na krzywych DTG oraz większych wahaniami energii aktywacji powyżej pewnej wartości  $\alpha$ .

Stwierdzono, że parametry kinetyczne obliczone metodami izokonwersyjnymi mogą być stosowane do materiałów odpadowych. Metody Friedmana i Vyazovkina okazały się bardziej efektywne niż OFW i KAS dla badanych materiałów, ponieważ krzywe teoretyczne uzyskane na podstawie danych kinetycznych z tych metod najlepiej odzwierciedlały wyniki pomiarów. Badanie wykazało również znaczenie atmosfery podczas odgazowania odpadów i formowania stałych pozostałości. Atmosfery zgazowujące i utleniające wzmacniały reakcje wtórne. W odniesieniu do właściwości węgla powstałych podczas powolnej i szybkiej pirolizy badanych odpadów, stwierdzono, że wyższa szybkość nagrzewania prowadziła do węgla o mniejszej porowatości, co sprawiało, że były mniej reaktywne.

Zaprezentowane wyniki wykazały, że parametry spalania, takie jak temperatura i czas trwania procesu, silnie zależą od składu utleniacza. Zwiększona zawartość tlenu w dostarczonym gazie skracala proces spalania o około 30-50% i podnosiła temperaturę zarówno w strefie reakcji gazowych, jak i na ruszcie. Badanie potwierdziło również, że recyrkulacja spalin skutecznie kontroluje temperaturę procesu. Co więcej, wyniki wskazują, że użycie recyrkulowanych spalin jako utleniacza jest wystarczające do suszenia i pirolizy odpadów. W związku z tym, spalanie tlenowe odpadów w piecu rusztowym może zapewnić lepsze dopalanie oraz wyższe temperatury przy jednoczesnym zrównoważonym, "bez-CO<sub>2</sub>" procesie termicznej konwersji paliwa.

Wyniki pracy przyczynią się do rozwoju spalarni odpadów zintegrowanych z wychwytywaniem dwutlenku węgla, poszerzając wiedzę na temat degradacji termicznej odpadów w różnych warunkach i będą użyteczne przy projektowaniu komór spalania tlenowego dla odpadów.

Podsumowując, praca doktorska wnosi istotny wkład naukowy poprzez zastosowanie nowoczesnych metod badawczych do analizy tlenowego spalania odpadów. Przeprowadzone badania, obejmujące modelowanie matematyczne, eksperymenty termogravimetryczne i

analizę kinetyki degradacji termicznej, przyczyniają się do lepszego zrozumienia i optymalizacji tego procesu. Wyniki pracy mają znaczący wpływ na rozwój nowych technologii utylizacji odpadów oraz dekarbonizacji, jednocześnie oferując praktyczne rozwiązania dla przyszłych zastosowań w inżynierii spalania.

W kontekście praktycznym, te aspekty mogą mieć znaczący wpływ na optymalizację procesów utylizacji odpadów w przemyśle, zwiększenie efektywności energetycznej instalacji spalania oraz redukcję emisji zanieczyszczeń, zwłaszcza CO<sub>2</sub>. Mogą również przyczynić się do rozwijania bardziej zrównoważonych technologii przekształcania odpadów w energię, co ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia celów dekarbonizacji i zrównoważonego rozwoju.

### **Poziom warsztatowy**

Rozprawa doktorska, będąca przedmiotem recenzji, jest owocem intensywnych prac badawczych, wymagających znacznego wysiłku zarówno w aspekcie obliczeniowym, jak i eksperymentalnym. Kandydatka wykazuje się bardzo dobrym przygotowaniem do przeprowadzenia zaawansowanych eksperymentów, co jest wsparte solidną wiedzą teoretyczną oraz kompetencjami w zakresie samodzielnych badań naukowych. Imponująca jest biegłość, z jaką kandydatka stosuje metody badawcze i interpretuje uzyskane dane, świadcząca o głębokim zrozumieniu tematu i metodologii. Wybór tematu dysertacji oraz analizowanej literatury naukowej jest trafny i świadczy o rzetelności podejścia badawczego.

### **Uwagi krytyczne**

Podczas analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej zwróciłem uwagę na pewne aspekty, które wymagają uwagi krytycznej. Należy jednak podkreślić, że te uwagi nie umniejszają wartości naukowej pracy, lecz są raczej refleksją nad możliwościami dalszego wzbogacenia dyskursu naukowego. Szczegółowe punkty krytyczne zostaną omówione poniżej.

1. Pierwszy artykuł „Waste-to-energy technology integrated with carbon capture - Challenges and opportunities” opublikowany w *Energy* 198 (2020) 117352. Praca przedstawia przegląd dostępnych obecnie metod wychwytywania CO<sub>2</sub>, kładąc szczególny nacisk na spalanie tlenowe odpadów komunalnych. Zwracam uwagę

na pominięcie prac naukowych Tomasza Czakierta, Wojciecha Nowaka, Janusza Kotowicza i Haliny Kruczek i innych polskich naukowców jest istotne, ponieważ ich dorobek wnosi istotny wkład w rozwój technologii spalania oxy-fuel oraz zagadnienia związane z wychwytem CO<sub>2</sub> i wykorzystaniem różnych typów paliw odpadowych. Pominięcie dorobku tych naukowców może prowadzić do niepełnego obrazu aktualnego stanu wiedzy na temat spalania tlenowego.

2. Drugi artykuł „Thermogravimetric and kinetic study of thermal degradation of various types of municipal solid waste(MSW)under N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and oxy- fuel conditions” również opublikowany w *Energy* 248 (2022) 123573. Wniosek, że zmiana atmosfery z inertnej na gazotwórczą nie wpływa na rozkład termiczny próbek poniżej 600°C, jest zgodny z literaturą. Jednak brakuje dogłębnej analizy, dlaczego reakcje CO<sub>2</sub> z węglem (char) stają się istotne dopiero powyżej tej temperatury. Wnioski mogłyby lepiej wyjaśnić, dlaczego ten próg temperatury jest kluczowy, biorąc pod uwagę różne typy materiałów, co mogłoby prowadzić do bardziej precyzyjnych zaleceń dotyczących optymalizacji procesów pirolizy w różnych typach odpadów. Chociaż zauważono, że atmosfera O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> przyspiesza reakcje węgla drzewnego, co może nakładać się na proces pirolizy, wniosek ten mógłby zostać bardziej szczegółowo rozwinięty. Warto by było rozważyć, jak te nakładające się procesy wpływają na sprawność energetyczną i emisje zanieczyszczeń w rzeczywistych aplikacjach. Obserwacje dotyczące fluktuacji energii aktywacji są ciekawe, ale wymagają głębszej analizy mechanizmu tych zjawisk. Dane dotyczące energii aktywacji dla różnych materiałów są interesujące, jednak wnioski mogłyby lepiej wyjaśniać praktyczne implikacje tych wartości. Brakuje dyskusji na temat tego, jak te dane mogą wpłynąć na skalowanie procesów przemysłowych. Czy wyniki te są użyteczne jedynie w badaniach laboratoryjnych, czy też mogą zostać przekształcone w realne zmiany w instalacjach przemysłowych? Wniosek, że technologia spalania odpadów w warunkach oxy-fuel może poprawić proces i zwiększyć różnorodność odpadów, które mogą być spalane, jest pozytywny, ale niewystarczająco krytyczny. Nie omówiono szczegółowo potencjalnych ograniczeń tej technologii, takich jak problemy związane z kosztami implementacji, potrzebą dużej ilości tlenu oraz zarządzaniem emisjami zanieczyszczeń specyficznych dla technologii oxy-fuel. Bez analizy takich czynników wnioski mogą wydawać się zbyt optymistyczne, szczególnie w kontekście rzeczywistej implementacji na dużą skalę.



3. Trzeci artykuł „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” opublikowany w *Energy* 285 (2023) 129328. Stwierdzenie, że zmiana atmosfery z inertyjnej na gazotwórczą nie wpływa na rozkład termiczny poniżej 600°C, jest zgodne z literaturą, ale nie uwzględnia w pełni możliwych różnic dla różnych typów odpadów. Wnioski nie analizują, jak te zmiany atmosfery mogą wpływać na różne grupy odpadów i ich złożone reakcje poniżej tego progu temperatury, zwłaszcza przy obecności drobnych składników organicznych, które mogą reagować inaczej. Stwierdzenie, że próbka SCG wytwarza bardziej kaloryczny gaz, bogatszy w wodór i metan, jest użyteczne, ale brak dyskusji na temat tego, jak te różnice wpływają na dalsze zastosowanie w kontekście rzeczywistych procesów przemysłowych. Czy te różnice można wykorzystać w sposób praktyczny, np. do lepszego odzysku energii w zakładach WtE (waste-to-energy)? Jakie są implikacje różnic w składzie gazów w kontekście projektowania instalacji do termochemicznej konwersji odpadów? Wniosek dotyczący konieczności modelowania procesów WtE z uwzględnieniem różnych atmosfer i odpadów jest słuszny, ale wymaga bardziej krytycznej analizy wyzwań technologicznych. Na przykład, problem korozji i obniżania temperatury topnienia popiołów z powodu obecności SiO<sub>2</sub> i K<sub>2</sub>O to realne wyzwanie, które nie zostało wystarczająco rozwinięte. Konieczność kosztownych działań związanych z czyszczeniem i konserwacją może znacząco wpłynąć na ekonomiczną opłacalność instalacji, co powinno być bardziej szczegółowo omówione.
4. Artykuł czwarty „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” opublikowany w *Archives of Thermodynamics* w 2024 roku. Mimo że praca przedstawia nowatorskie podejście do modelowania spalania odpadów w warunkach oxy-fuel, ograniczenie modelu do jednowymiarowego (1D) może być zbyt uproszczone, aby oddać złożoność rzeczywistych procesów spalania w piecach rusztowych. W praktyce piec działa w sposób wielowymiarowy (3D), a złożone procesy, takie jak dystrybucja temperatury, przepływ gazów czy nierównomierne spalanie, mogą nie być dokładnie odwzorowane w modelu 1D. Brakuje krytycznego odniesienia się do ograniczeń wynikających z tego uproszczenia i potencjalnych błędów, które mogą

z tego wynikać w rzeczywistych warunkach. Model zakłada jednorodne właściwości odpadów, jednak w rzeczywistości odpady komunalne (MSW) są bardzo zróżnicowane pod względem składu chemicznego i fizycznego. Wnioski nie odnoszą się do tego, jak zmiany w składzie odpadów, takie jak wilgotność, zawartość substancji organicznych czy skład chemiczny, mogą wpływać na efektywność spalania i wyniki modelu. Bez uwzględnienia tej zmienności, model może dawać wyniki trudne do zastosowania w praktyce, gdzie odpady są znacznie bardziej heterogeniczne. Stwierdzenie, że recyrkulacja gazów spalinowych skutecznie kontroluje temperaturę procesu, jest interesujące, ale wymaga bardziej szczegółowego omówienia. W praktyce recyrkulacja spalin może prowadzić do różnych problemów, takich jak osadzanie się cząstek na wymiennikach ciepła, a także zmniejszenie efektywności spalania. Brakuje krytycznej analizy potencjalnych problemów technicznych związanych z recyrkulacją spalin, a także kosztów związanych z wdrożeniem tej technologii w instalacjach przemysłowych. Wnioski koncentrują się na aspektach termicznych i czasowych procesu spalania, ale pomijają szczegóły dotyczące emisji zanieczyszczeń, które są kluczowe w kontekście spalania odpadów. W przypadku oxy-fuel szczególnie istotne są kwestie emisji NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl i metali ciężkich. Wyniki badań nie poruszają wystarczająco tego zagadnienia, co pozostawia lukę w ocenie środowiskowej technologii.

## **Wnioski końcowe**

Podsumowując, rozprawa doktorska inż. Pauliny Copik zatytułowana „THE MATHEMATICAL MODEL OF OXY-FUEL COMBUSTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE ON THE GRATE FURNACE INTEGRATED WITH CO<sub>2</sub> CAPTUR” bezpośrednio odpowiada na zapotrzebowanie naukowe związane z rozwojem spalarni odpadów zintegrowanych z technologią wychwytu dwutlenku węgla.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*, a kandydatka prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w tej dziedzinie, co świadczy o jej znajomości podstawowych zagadnień i umożliwia rzetelne podejście do realizacji celów badawczych postawionych w pracy. Kandydatka wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, co jest istotnym elementem jej kompetencji badawczych w

zakresie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Dzięki temu potrafi efektywnie realizować postawione cele badawcze oraz rozwijać własne umiejętności analityczne i metodologiczne.

W ramach przedstawionej rozprawy doktorskiej mgr inż. Paulina Copik wykazała się znaczącym wkładem naukowym, który został ujęty w następujących punktach nowości naukowej:

1. Rozprawa ta łączy badania eksperymentalne z modelowaniem matematycznym, co umożliwiło uzyskanie nowej wiedzy na temat technologii spalania odpadów. Dzięki przeprowadzeniu zarówno badań doświadczalnych, jak i tworzeniu modeli matematycznych, mgr inż. Paulina Copik nie tylko pogłębiła wiedzę teoretyczną, ale także zaproponowała praktyczne rozwiązania mogące wpłynąć na optymalizację technologii w warunkach przemysłowych.
2. Wyniki pokazały, że zmiana atmosfery z inertnej na gazotwórczą nie wpływa na rozkład termiczny próbek poniżej 600°C, a parametry kinetyczne dla procesu pirolizy są podobne w atmosferach N<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>. Jednak w atmosferze gazotwórczej, powyżej 600°C, pojawia się drugi pik podczas rozkładu materiałów lignocelulozowych, co przypisuje się reakcjom węgla (char) z CO<sub>2</sub>. W przypadku materiałów lignocelulozowych atmosfera O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> powoduje, że reakcje między węglem a gazem nośnym zachodzą szybciej i przy niższej temperaturze, częściowo nakładając się na proces pirolizy, co zostało potwierdzone przez krzywe DTG oraz większe wahania energii aktywacji powyżej pewnej wartości  $\alpha$ .
3. Badania podkreśliły znaczenie atmosfery podczas odgazowywania odpadów i formowania pozostałości stałych. Atmosfery gazotwórcze i utleniające wzmacniają reakcje wtórne.
4. Przedstawione wyniki pokazały, że parametry spalania, takie jak temperatura i czas trwania procesu, silnie zależą od składu utleniacza. Zwiększona zawartość tlenu w dostarczonym gazie skraca czas spalania o około 30-50% i podnosi temperaturę w strefie reakcji gazowych oraz na ruszcie.
5. Badania potwierdziły, że recyrkulacja spalin skutecznie kontroluje temperaturę procesu. Wyniki wskazują również, że recyrkulowane spaliny jako utleniacz są wystarczające dla procesów suszenia i pirolizy. Spalanie odpadów w technologii oxy-fuel w piecu rusztowym może zapewnić lepsze wypalenie i wyższe temperatury, z jednoczesną zrównoważoną „bez-CO<sub>2</sub>” termiczną konwersją paliwa.

Podsumowując przeprowadzoną recenzję rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że przedłożona rozprawa w pełni spełnia kryteria określone w obowiązującym prawie dotyczącym nadawania stopni i tytułów naukowych art. 190 ust.3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn.zm.) Rozprawa ta odzwierciedla zarówno dogłębną wiedzę teoretyczną, jak i umiejętności badawcze kandydatki. W związku z powyższym, rekomenduję, aby Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej przyjęła rozprawę doktorską inż. Pauliny Copik i dopuściła Ją do kolejnego etapu postępowania kwalifikacyjnego.

