



Wrocław, 08.09.2021 r.

dr hab. inż. Norbert Modliński, prof. PWR  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
Katedra Inżynierii Konwersji Energii  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
norbert.modlinski@pwr.edu.pl

### RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Zuzanny Kaczor  
z tytułowanej "Numerical modelling of solar pyrolysis process of the waste biomass"  
wykonanej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej pod opieką  
promotora dr hab. inż. Sebastiana Werle, prof. PŚ.

#### 1. Podstawa opracowania

Poniższa Recenzja wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina - zgodnie z pismem nr RIE-BD/4/390/2020/2021.

#### 2. Znaczenie problematyki podjętej w rozprawie

Rozprawa poświęcona jest problematyce solarnej pirolizy biomasy odpadowej i wpisuje się w szeroki nurt tzw. dekarbonizacji rozumianej jako ograniczanie emitowania dwutlenku węgla do powietrza. Nurt ten widoczny jest praktycznie w każdej branży przemysłu. Badania m.in. Światowej Organizacji Zdrowia wskazują, że emisja dwutlenku węgla związana ze spalaniem przede wszystkim węgla przyczynia się do powstawania i nasilania zmian klimatu, takich jak fale upałów oraz gwałtownych zjawiska pogodowe, które bez wątpienia wpłyną na pogorszenie jakości życia kolejnych pokoleń. Odpowiedzią na te wyzwania jest wzrost wydatków w nowe technologie wykorzystania odnawialnych źródeł energii na świecie, do



których bez wątplenia należy energetyczne wykorzystanie biomasy. Termiczne przekształcanie biomasy (tutaj piroliza) pozwala na uniknięcie problemów eksploatacyjnych podczas utylizacji w jej pierwotnym stanie takich jak spalanie. Tym bardziej wykorzystanie skoncentrowanej energii słonecznej jako źródło ciepła w procesie pirolizy wydaje się bardzo atrakcyjnym rozwiązaniem, którego potencjał należy zweryfikować w dalszych badaniach zarówno eksperymentalnych jak i numerycznych.

### 3. Zakres rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska ma formę spójnego tematycznie zbioru czterech publikacji w recenzowanych czasopismach międzynarodowych z Impact Factor (IF) dotyczących problematyki modelowania matematycznego procesu pirolizy solarnej.

Rozprawa liczy 114 stron i obejmuje: wykaz monotematycznych publikacji, wykaz stosowanych skrótów i oznaczeń, wstęp, przedstawienie celów i tezy pracy, omówienie publikacji oryginalnych składających się na rozprawę doktorską, kserokopie publikacji.

Tytuł pracy doktorskiej odpowiada tematyce analizowanych publikacji, zaś łączna wartość IF wynosi 17.305. Tak wysoki IF świadczy o tym, że praca reprezentuje wysoki poziom naukowy i badania zostały przeprowadzone w sposób właściwy, co zostało pozytywnie ocenione przez recenzentów tych czasopism. Wszystkie te prace są pracami zbiorowymi, w których Doktorantka jest pierwszą Autorką. Wkład Autorki rozprawy w czterech publikacjach został oszacowany na 55%, 55%, 60% i 55%.

W pracy I „Numerical studies on capability to focus solar radiation with mirrors of different curvatures” Zuzanna Kaczor, Zbigniew Buliński, Sebastian Werle, Thermal Science, wkład Doktorantki obejmował budowę modelu numerycznego, przygotowanie siatki numerycznej, dobór ustawień solvera, wykonanie symulacji; zbieranie, przetwarzanie i interpretacja wyników.

W pracy II „Mathematical Model of the Solar Pyrolysis of Biomass” Zuzanna Kaczor, Zbigniew Buliński, Sebastian Werle, Journal of Energy Resources Technology Doktorantka była odpowiedzialna za budowę modelu numerycznego: zbieranie danych o geometrii i materiałach użytych w reaktorze pirolitycznym, przygotowanie siatki numerycznej, wykonanie symulacji, analiza, interpretacja i prezentacja wyników.



W pracy III „Modelling approaches to waste biomass pyrolysis: a review” Zuzanna Kaczor, Zbigniew Buliński, Sebastian Werle, Renewable Energy, wkład Doktorantki obejmował sformułowanie zakresu i celu pracy, gromadzenie, selekcję i analizę literatury, sformułowanie wniosków, opracowanie struktury tekstu i sposobu prezentacji wyników.

W pracy IV „Application of inverse methodology to estimate unknown parameters of the mathematical model of biomass solar pyrolysis” Zuzanna Kaczor, Zbigniew Buliński, Szymon Sobek, Sebastian Werle, Renewable Energy, Doktorantka była odpowiedzialna za przygotowanie matematycznego modelu reaktora pirolizy, przygotowanie modelu numerycznego (CFD) reaktora i opracowanie kodu przeprowadzającego analizę odwrotną, wykonanie obliczeń numerycznych i analitycznych, interpretację wyników.

Rozprawa jak i publikacje są napisane bardzo starannie, poprawnym językiem. Można doszukać się drobnych usterek (np. „fuel finish burning” na stronie 15, rozumiem, że chodziło o „final combustion”). Według mnie nie należy przywiązywać do nich wagi. Pod względem redakcyjnym pracę oceniam wysoko. Układ pracy jest czytelny i logiczny. Ponadto praca jest bardzo starannie opracowana graficznie.

Cele pracy zostały szczegółowo określone jako:

1. identyfikacja zjawisk składowych procesu pirolizy słonecznej i krytyczna analiza ich znaczenia dla zasadniczego przebiegu proces
2. ocena złożoności modelu niezbędnego do uzyskania wiarygodnych wyników
3. identyfikacja niezbędnych parametrów potrzebnych do budowy modelu oraz określenie, które parametry procesu są najistotniejsze z punktu widzenia ich wpływu na wyniki symulacji i eksperymentu
4. wyznaczenie nieznanymi parametrów pracy układ doświadczalnego
5. identyfikacja warunków cieplnych występujących w reaktorze na potrzeby definicji kluczowych warunków brzegowych

Przedstawiony cel pracy jest zgodny z tematem rozprawy a wymieniony zakres wyczerpuje tematykę przedstawioną w tytule rozprawy. Lektura całości pracy pozwala na stwierdzenie, że cele szczegółowe, zostały osiągnięte.

Prace powstały dzięki dofinansowaniu badań przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego „Study on the solar pyrolysis process of the waste biomass” nr 2016/23/B/ST8/02101.



#### 4. Wartość naukowa i merytoryczna

Autorka skupia się na przeprowadzeniu analizy procesu solarnej pirolizy biomasy przede wszystkim w oparciu o technikę CFD (Computational Fluid Dynamics) oraz inne metody numeryczne.

Dogłębna analiza literatury oraz istniejącego stanu wiedzy dotyczącej omawianego zagadnienia pozwoliła autorce na właściwą identyfikację luki w aktualnych badaniach. Autorka trafnie zauważa, że dotychczasowe badania numeryczne poświęcone są pojedynczym dużym cząstkom biomasy (Single Particle Model) lub znacznie upraszczają geometrię reaktora pirolizy, skupiając się na niewielkim obszarze obliczeń pokrywającym mieszaninę gazów i małych cząstek biomasy. Trudno nie zgodzić się z autorką, że istnieje niewiele prac, w których warunki brzegowe obliczeń określone są w oparciu o dane wyznaczone eksperymentalnie lub analitycznie w oparciu o dane z rzeczywistego eksperymentu. Opisana dalej metodologia badawcza rozprawy adresuje powyższe wnioski.

Obiektem badań numerycznych była przede wszystkim istniejąca instalacja laboratoryjna do solarnej pirolizy. W pierwszym kroku Autorka słusznie decyduje się na rozgraniczenie numerycznego modelu doprowadzania ciepła do reaktora na drodze promieniowania skupionej wiązki promieni słonecznych od modelu samego reaktora z uwzględnieniem zjawisk wymiany ciepła i pirolizy w nim panujących. Powodem jest duża różnica w wymiarach samego reaktora oraz układu źródła ciepła – reaktor. Ponadto źródło ciepła od lampy można w reaktorze zasymulować w relatywnie prosty sposób.

Metodologia badawcza zawarta w rozprawie sprowadza się do przeprowadzenia sekwencji następujących czynności:

1. 2-d badania numeryczne modelu koncentratora promieniowania słonecznego w oparciu o technikę CFD. Zbadano proces skupiania promieni słonecznych zwierciadłami o różnych krzywiznach w kontekście możliwości działania takiego układu w warunkach polskich. Wyniki przedstawiono w publikacji I
2. 2-d badania numeryczne wymiany ciepła w reaktorze solarnym w oparciu o technikę CFD. Założono, że biomasa w formie peletu jest owinięta miedzianą gazą i umieszczona w rurze miedzianej zaizolowanej na zewnątrz z wyjątkiem obszaru doprowadzenia ciepła. Model jest dwuwymiarowy, osiowosymetryczny. Model posłużył do weryfikacji wstępnych założeń dotyczących konstrukcji i parametrów eksploatacyjnych reaktora laboratoryjnego oraz do identyfikacji tych parametrów które mają największy wpływ na proces. Badaniom poddano pola rozkładu temperatury w reaktorze i biomase dla



- różnej wartości ciepła doprowadzonego. Pozwoliło to autorce na przeprowadzenie analizy czułości wpływu najważniejszych parametrów wymiany ciepła oraz kinetyki na wyniki obliczeń. Wyniki przedstawiono w publikacji II
3. dokonano szerokiego przeglądu dostępnych publikacji pod kątem metod, założeń, uproszczeń i danych przyjmowanych w modelowaniu matematycznych pirolizy biomasy przez innych badaczy. Wyniki przedstawiono w publikacji III
  4. budowa uproszczonego 0-d modelu bilansu energii w reaktorze. W oparciu o ten model przeprowadzono analizę odwrotną mającą na celu wyznaczenie najważniejszych warunków brzegowych modelu procesu realizowanego w finalnym, wykonanym reaktorze pirolitycznym. Opisana procedura pozwala na określenie tych parametrów będących wartościami wejściowymi do modelu CFD, które są trudne lub niemożliwe do zmierzenia, w oparciu o pomiar temperatury materiału reaktora. Autorka porównuje dwie metody: deterministyczną oraz stochastyczną z grupy metod Monte-Carlo. Wyniki przedstawiono w publikacji IV
  5. 3-d symulacje CFD reaktora pirolizy. Model CFD wykorzystano do weryfikacji metody optymalizacyjnej opisanej powyżej. Weryfikacja obejmuje sprawdzenie, czy metoda odwrotna jest w stanie odtworzyć wartości założone w modelu CFD. Weryfikacja polegała na sprawdzeniu, czy wykorzystując wyniki symulacji CFD (średnia temperatura reaktora) jako dane odniesienia do algorytmów odwrotnych, algorytmy będą zwracać wartości szukanych parametrów równe tym przyjętym w CFD. Wyniki przedstawiono w publikacji IV.

W swojej pracy Autorka wykorzystuje oprogramowanie komercyjne Ansys Fluent do obliczeń CFD. Warto odnotować fakt, że wykorzystywany w obliczeniach dwu-etapowy model pirolizy zaimplementowano jako dodatek (User Defined Function). Na potrzeby budowy modelu 0-d, przygotowania danych (przeprowadzenia analizy odwrotnej), analizy wyników wykorzystano również inne narzędzia obliczeniowe wymagające sporządzenia własnych algorytmów w aplikacjach MatLAB, EES i MS Excel.

Zadanie badawcze podjęte przez autorkę wymagało szerokiej wiedzy z zakresu teorii procesów i zjawisk występujących podczas pirolizy solarnej (wymiana ciepła, kinetyka chemiczna, mechanika płynów), modelowania numerycznego oraz związanej z głęboką znajomością problematyki, technologii oraz warunków pracy reaktorów.

**Temat należy uznać za trudny, aktualny, związany z wypełnieniem luki w dotychczasowych pracach badawczych. W związku z powyższym wybór poruszanej w rozprawie Pani mgr inż.**



Zuzanny Kaczor problematyki badawczej uznaje za trafny oraz interesujący z naukowego i aplikacyjnego punktu widzenia.

## 5. Pytania problemowe

W pracy nie znalazłam elementów, które budziłyby większe merytoryczne wątpliwości. Niemniej jednak chciałbym podnieść następujące kwestie:

- 1) Czy w ramach eksperymentu dostępne były pomiary dotyczące samego procesu pirolizy, takie jak ubytek masy, skład części lotnych w celu szerszej walidacji modelu?
- 2) W publikacji II opisywany jest model solarnej pirolizy biomasy. Model matematyczny nie obejmuje jedynie zagadnienia pojedynczej cząstki biomasy (Single Particle Model) lecz całego reaktora wraz z peletem. Celem było określenie wpływu przyjętych danych materiałowych na rozkładu temperatur w złożu biomasowym.
  - a) W rozdziale 1.3 Chemistry Description napisano, że stałe szybkości pirolizy wyznacza się w oparciu o TGA. Jakiego rzędu są szybkości nagrzewania cząstek biomasy w instalacji solarnej? Czy odpowiadają one szybkościom w TGA?
  - b) W symulacjach wykorzystano parametry kinetyczne z publikacji (Gronli M., Melaaen M., 2000). Czy szybkości nagrzewania również korespondują z warunkami w modelu opracowanym przez Doktorantkę?
  - c) Mam uwagę do opisu rysunku 2. Sekwencja „two-step competing model” sugeruje, że mamy do czynienia z modelem dwu-reakcyjnym (Kobayashi). W mojej ocenie powinno być „two-stage model”.
  - d) W rozdziale 2 Numerical Model zawarte jest zdanie “The idea of the research is to analyze the impact of pyrolysis conditions on the composition and yield of pyrolysis products: gas, tar, and char”. W dalszej części publikacji nie zawarto informacji na ten temat. Proszę o komentarz.
  - e) Czy w rozważaniach dotyczących parametrów pirolizy solarnej (kinetyka, skład produktów) uzasadnione jest wykorzystanie szczegółowych modeli sieciowych (np. Bio-CPD, FG-Bio, Bio-FLASHCHAIN)?
  - f) Dlaczego temperatura biomasy pokazana na Rys. 5 nie została porównana z wynikiem pomiarów opartych o termopary zanurzone w biomasie jak pokazano na Rys. 8 (str.21) części opisowej?



- 3) Celem pracy IV było określenie nieznanymi parametrów ogrzewania reaktora w procesie pirolizy słonecznej biomasy. Nieznany jest strumień ciepła pochłonięty przez reaktor i dwa współczynniki przenikania ciepła: przez ściany reaktora do azotu przepływającego przez wewnętrzne kanały i przez zewnętrzne ściany do otoczenia. Parametry znajduje się stosując dwie różne metody odwrotne: Levenberga-Marquardta i Metropolis-Hastingsa. Jako model zastępczy procesu nagrzewania zastosowano zerowymiarowy bilans energii dla miedzianego korpusu reaktora. Metodologię poszukiwania parametrów badano tworząc fikcyjne dane nagrzewania dla ustalonych parametrów przy pomocy modelu 3-d przewodzenia w korpusie reaktora. Weryfikacja jest natychmiastowa bo polega przede wszystkim na porównaniu ustalonych parametrów z wyznaczonymi metodą odwrotną.
- a) Tak przeprowadzona weryfikacja powinna pokazać niedokładność numeryczną metody i błąd przybliżenia równania przewodzenia 3-d równaniem zerowymiarowym. Zaskakująca jest wobec tego zgodność obliczeń z rys. 10 i 11. Weryfikacja dokładności numerycznej metody powinna opierać się na fikcyjnych danych uzyskanych przy pomocy równania zerowymiarowego. Proszę o komentarz.
  - b) Odnoszę wrażenie, że w publikacji zamiennie stosuje się pojęcia „weryfikacja” i „walidacja”. Jak Autorka definiuje każde z tych pojęć?
  - c) W podpunkcie 5.3.1 w tytule mowa o modelu 1-d. Powinno być 0-d.

## 6. Wnioski końcowe

Oceniana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Zuzanny Kaczor mieści się w dyscyplinie naukowej: inżynieria środowiska, górnictwo i Energetyka. Moja ocena merytoryczna pracy jest wysoka.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy, a Doktorantka zrealizowała postawione sobie podstawowe cele, przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu. Stwierdzam zatem, że recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Zuzanny Kaczor pt. „Numerical modelling of solar pyrolysis process of the waste biomass” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone Art. 13.1 Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, oraz przepisami wprowadzającymi Ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1669 z późn. zm.).



Stawiam zatem wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o przyjęcie przedłożonej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pani mgr inż. Zuzanny Kaczor do dalszego procedowania.

*Modliński Robert*