

Kraków, 11.05.2021 r.

Dr hab. inż. Paweł Ocioń, prof. PK  
Katedra Energetyki,  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Politechnika Krakowska

### **Recenzja pracy doktorskiej**

*Experimental investigation of the solar pyrolysis of waste biomass*

autorstwa mgr inż. Szymona Sobka

### **Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska liczy 6 rozdziałów oraz 172 strony. Rozprawa została napisana w języku angielskim. Prezentowana rozprawa doktorska jest zorganizowana zgodnie z głównymi zadaniami badawczymi Narodowego Centrum Nauki, Polska, projekt OPUS 12 "Badanie procesu pirolizy solarnej biomasy odpadowej. Główne rozdziały pracy odzwierciedlają cele badawcze, które zostały określone przez promotora dr hab. inż. Sebastiana Werle, prof. PSI, podczas przygotowania wniosku w ramach naboru do projektu OPUS 12, przyznanego jesienią 2016 roku. Zadania badawcze wyznaczone dla doktoranta zostały skonstruowane w następujący sposób:

- I. Wykonanie analizy technicznej, chemicznej i elementarnej analizowanych paliw.
- II. Zbudowanie oryginalnego stanowiska badawczego, które pozwoli na zbadanie wpływu temperatury procesu pirolizy słonecznej wybranych gatunków biomasy odpadowej na skład i uzysk produktów procesu - frakcji ciekłej i wydajność produktów procesu - frakcji ciekłej (biooleju), frakcji stałej (biowęgla) i gazu (gazu pirolitycznego).
- III. Określenie metodyki pomiaru parametrów kinetyki procesu pirolizy biomasy odpadowej.

IV. Zbadanie rozkładu energii w produktach procesu pirolizy.

5. Określenie szybkości konwersji energii chemicznej biomasy w energię chemiczną produktów użytecznych.

W rezultacie prezentowana rozprawa została przedstawiona w 6 głównych rozdziałach wraz z obszernym podsumowaniem, krytycznie oceniającym całość pracy.

We wstępie (Rozdział 1) przedstawiono kompleksową analizę aktualnego stanu polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej, sektora energetyki odnawialnej, bioenergetyki, polityki klimatycznej i energetycznej UE, sektora energii odnawialnej, wykorzystania i potencjału bioenergii, z krótką charakterystyką metod termochemicznej konwersji biomasy i odpadów. Wiele prac doktorskich dotyczyło zagadnień związanych z konwersją biomasy, w szczególności pirolizy, toryfikacji i zgazowania, dlatego też przedstawiono najnowsze badania z zakresu pirolizy solarnej.

Podano następującą hipotezę badawczą pracy:

- 1) Warunki procesu pirolizy słonecznej sprzyjają równomiernemu rozkładowi produktów pirolizy
- 2) Reakcje karbonizacji i repolimeryzacji zachodzące podczas procesu zwęglania biomasy podczas pirolizy solarnej mogą prowadzić do wytworzenia bogatego w wodór suchego gazu.
- 3) Piroliza solarna jest metodą produkcji wysokoporowatego biowęgla o specyfikacji zależnej od rodzaju substratu i warunków procesu.
- 4) Bezmodelowe prognozy kinetyczne mogą dostarczyć informacji o rzeczywistym zachowaniu procesu w reaktorze w skali laboratoryjnej.

Rozdział 2 pt. Materiały wykorzystane w pracy koncentruje się na zadaniu badawczym I, jako krótka prezentacja badanego surowca z naciskiem na motywację jego wyboru, potencjał energetyczny, prezentację właściwości paliwa oraz potrzebę dalszych badań.

Projekt i budowę laboratoryjnego reaktora pirolizy solarnej przedstawiono w Rozdziale 3 podsumowuje całe przedsięwzięcie opracowania reaktora pirolizy słonecznej w tym zaprojektowanie i zmontowanie niezawodnego reaktora pirolizy słonecznej w skali laboratoryjnej. Rozdział oparty jest na dwóch artykułach naukowych opublikowanych przez autorów: Szymon Sobek i Sebastian Werle w pierwszych latach studiów doktoranckich tj. w latach 2018-2019, a

mianowicie "Solar pyrolysis of waste biomass: Part 1 reactor design", oraz "Comparative Review of Artificial Light Sources for Solar-Thermal Biomass Conversion Research Applications", opublikowane w *Renewable Energy* (Impact Factor, IF=6.274) oraz *Ecological Chemistry and Engineering S.* (IF=1.488). Ponadto podsumowano zadanie badawcze II, dokonując kompleksowego przeglądu dostępnych źródeł światła do zastosowań w badaniach solarno-termicznych, motywację reaktora, projekt, geometrię i materiały, pomysły na zbiórkę produktów oraz najnowszy system akwizycji danych i realizację pomiarów. W rozdziale 3 podano wszystkie niezbędne informacje na temat technik pomiarowych i dalszych procedur eksperymentalnych i je omówiono.

W Rozdziale 4 przedstawiono Termogravimetryczną analizę zachowania się substratów materiału wsadowego podczas pirolizy. Rozdział opisuje techniki i metodykę pomiarów TGA. Dodatkowo, podkreślono znaczenie wiarygodnych danych TGA dla obliczeń kinetycznych, oraz potencjalne błędy, które mogą występować podczas pomiarów.

W Rozdziale 5 przedstawiono kinetyczną analizę procesu pirolizy słonecznej biomasy odpadowej, skoncentrowaną na zadaniu badawczym III. Rozdział prezentuje nowatorskie podejście do kinetyki termochemicznej konwersji biomasy oraz kinetykę konwersji termochemicznej biomasy. Zaproponowana metodyka pozwala otrzymać kompleksowe schematy kinetyczne (mechanizmy) pirolizy solarnej badanych surowców. W rozdziale przedstawiono najnowszy przegląd literatury, aktualny stan wiedzy na temat kinetyki pirolizy, wraz z prezentacją najnowszych technik, zarówno analitycznych, jak i numerycznych, tj. metody master-plot, technik dekonwolucji oraz prognoz kinetycznych. Teoria przedstawiona w rozdziale 5 oparta jest głównie na książce Sergeya Vyazovkina "Isoconversional kinetic of thermally stimulated processes" oraz prace Doktoranta.

Rozdział 6 prezentuje wyniki z badań eksperymentalnych i kinetycznych przeprowadzonych w trakcie przygotowania pracy doktorskiej. Modele kinetyczne dla słomy, drewna i osadów ściekowych wraz z wynikami badań TGA. Oprócz tradycyjnej kinetyki opartej na modelach, zastosowano oryginalne podejście do modelowania szybkości izokonwersji pirolizy biomasy odpadowej, z własnym określeniem profili modeli reakcji pozornych specyficznych dla każdego rozkładu substratu. Dane wejściowe do obliczeń pochodziły z analizy izokonwersji dla każdego z analizowanych rodzajów biomasy. Po przeprowadzeniu obliczeń kinetycznych po obliczeniach kinetycznych przedstawiono wyniki eksperymentalnej kampanii procesu pirolizy słonecznej

biomasy odpadowej. W tej części rozprawy, w oparciu o zadania badawcze IV i V, przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, w tym rozkład i jakość produktów pirolizy solarnej. Wyznaczono profile temperaturowe, jakość gazu pirolitycznego, z dużą zawartością wodoru oraz korelację powstawania związków gazowych z modelami kinetycznymi.

### **Uwagi edytorskie**

- 1) Brakuje rysunku 3.5
- 2) Zapis tysięcy 1,000 a nie 1 000
- 3) Nie grupuje się odniesień literaturowych [31,62]
- 4) Wyrażenie „heat transfer coefficient 0.014 W/(mK)” jest nieprawidłowe, powinno być thermal conductivity of 0.014 W/(mK)
- 5) W całce oznaczonej w równaniu (3.4) powinny zostać podane granice od 0 do  $t$
- 6) Rozdział 3.3.1 zamiast (length, width, height) powinno być (length x width x height).

### **Uwagi szczegółowe**

- 1) Prosiłbym o wyjaśnienie w jaki sposób otrzymano równanie (3.6)
- 2) Prosiłbym o wyjaśnienie równania (5.8)
- 3) W jaki sposób obliczano  $m$  z równania (5.9) ?
- 4) Prosiłbym o dokładnie omówienie Rysunku 1.1
- 5) Proszę wyjaśnić jak wyznaczone są wartości  $S_j^2$  oraz  $S_{min}^2$  w równaniu (5.26)

### **Wnioski końcowe**

Prace doktorska oceniam bardzo wysoko, powyższe uwagi edytorskie i szczegółowe nie umniejszają w żadnym stopniu wartości naukowej rozprawy. Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej zaliczam:

- Projekt reaktora pirolizy solarnej według oryginalnej koncepcji pośredniego ogrzewania biomasy przez przegrodę, co odpowiada na opisane w literaturze problemy strat ciepła w reaktorach wykonanych z materiałów transparentnych.

- Przeprowadzenie badań laboratoryjnych dla próbek trzech rodzajów biomasy odpadowej: drewna odpadowego, słomy odpadowej oraz osadów ściekowych.
- Wyznaczanie parametrów kinetyki reakcji pirolizy badanych paliw na podstawie pomiarów termogravimetrycznych (TGA)
- Opracowane przez Doktoranta modele kinetyczne, które pozwoliły przewidzieć zachowanie się próbek biomasy w reaktorze podczas eksperymentów w skali laboratoryjnej.

Praca wnosi nowe aspekty do zagadnień badań eksperymentalnych procesu solarnej pirolizy biomasy odpadowej. Opracowane modele obliczeniowe pozwoliły na bardzo dokładnie przewidywanie zachowania próbek biomasy w reaktorze podczas badań eksperymentalnych. Praca łączy zarówno modelowanie matematyczne jak i badania eksperymentalne. Wyniki uzyskane podczas realizacji pracy są oryginalne, a ich interpretacja świadczy o bardzo dobrej znajomości zagadnienia przez autora rozprawy. Warto podkreślić że doktorant jest autorem czternastu publikacji w tym 6 jako pierwszy autor opublikowanych w takich czasopismach jak: Renewable Energy (Elsevier), Biomass and Bioenergy (Elsevier), Desalination and Water Treatment, Fuel (Elsevier), Energy & Fuels. Doktorant również posiada bardzo wysoki indeks Hirscha = 6.

Praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez odpowiednie ustawy. Z uwagi na bardzo duży wysoki poziom pracy doktorskiej obejmującej zarówno prace projektowe, badania eksperymentalne i opracowanie modeli obliczeniowych **wnioskuje o wyróżnienie** pracy doktorskiej Pana mgr inż. Szymona Sobka. wnioskuje również o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Szymona Sobka do publicznej obrony

Owón!