

dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Systemów Energetycznych
i Urządzeń Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: pawel.madejski@agh.edu.pl

Kraków, 27.03.2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Behrouz Adibimanesh
zatytułowanej **"Mathematical and data-driven modeling of biomass
conversion for energy optimization"** wykonanej w Instytucie Maszyn
Przepływowych PAN im. Roberta Szewalskiego w Gdańsku pod opieką promotora
dr hab. inż. Sylwii Polesek-Karczewskiej, prof. IMP PAN

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Z-cy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn
Przepływowych PAN im. Roberta Szewalskiego w Gdańsku, Pana dr hab. inż. Grzegorza
Żywicy, prof. IMP PAN – zgodnie z pismem nr RN-521.5.2025.

2. Zasadność podjęcia tematu

Podjęcie tematu rozprawy wynika z rosnącej potrzeby transformacji systemów
energetycznych w kierunku zrównoważonego rozwoju oraz redukcji emisji gazów
cieplarnianych. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera efektywne wykorzystanie
biomasy oraz odpadów biodegradowalnych jako alternatywnych źródeł energii. Procesy
termochemicznej konwersji, takie jak zgazowanie i spalanie, stanowią istotny element
nowoczesnych systemów energetycznych, jednak ich złożoność – wynikająca
z jednoczesnego występowania sprzężonych zjawisk fizycznych i chemicznych oraz ich
wieloskalowego charakteru – znacząco utrudnia ich analizę, projektowanie i optymalizację.

Ograniczona skuteczność tradycyjnych metod badawczych i modelowych, które koncentrują się najczęściej albo na szczegółowej analizie pojedynczych urządzeń, albo na poziomie całych systemów, nie zapewniając spójnego podejścia integrującego oba te poziomy, stanowi istotne ograniczenie. Zaprezentowany w rozprawie temat jest odpowiedzią na powstałą lukę pomiędzy zrozumieniem procesów zachodzących w skali mikro a ich praktycznym zastosowaniem w skali przemysłowej. Dodatkowym istotnym czynnikiem motywującym podjęcie badań jest rosnąca ilość odpadów, w szczególności osadów ściekowych, których bezpieczne i efektywne energetycznie zagospodarowanie stanowi poważne wyzwanie technologiczne i środowiskowe.

W odpowiedzi na powyższe wyzwania zakres rozprawy skupia się na zastosowaniu nowoczesnych narzędzi obliczeniowych i analitycznych, takich jak modelowanie numeryczne, metody uczenia maszynowego oraz koncepcja cyfrowego bliźniaka. Integracja tych podejść umożliwia zarówno szczegółowe odwzorowanie procesów zachodzących w reaktorach, jak i predykcję zachowania całych systemów oraz ich optymalizację w czasie rzeczywistym. W związku z powyższym podjęcie tematu rozprawy jest w pełni uzasadnione zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i praktycznego. Opracowanie kompleksowych, wieloskalowych ram analizy i optymalizacji procesów konwersji biomasy odpowiada na aktualne potrzeby rozwoju nowoczesnych systemów energetycznych oraz wpisuje się w globalne trendy związane z gospodarką obiegu zamkniętego i dekarbonizacją gospodarki.

Praca ma charakter numeryczny wraz z eksperymentalną weryfikacją uzyskiwanych wyników, co znacząco podnosi jej poziom, wskazując na poprawne przeprowadzenie zakresu badań numerycznych. Uzyskane wyniki oraz konkluzje pozwalają stwierdzić, że przedstawiona praca doktorska mgr inż. Behrouz Adibimanesh wnosi wkład w bibliografię przedmiotu analizowanego zagadnienia.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Behrouz Adibimanesh posiada 127 stron, 5 rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, spis symboli i oznaczeń, bogatą bibliografię złożoną ze 190 pozycji literaturowych, jak również spis rysunków i tabel. Rozprawa została napisana w języku angielskim.

Rozdział 1 (16 stron, 1 rysunek) przedstawia kontekst badań związany z transformacją energetyczną oraz znaczenie konwersji biomasy i odpadów. Omawia złożoność procesów termochemicznych i ograniczenia tradycyjnych metod modelowania, podkreślając potrzebę integracji modelowania numerycznego, uczenia maszynowego i podejścia systemowego.



Wprowadza także cel pracy i strukturę, wskazując na konieczność rozwoju wieloskalowego podejścia do analizy i optymalizacji systemów energetycznych. Rozdział zakończono przedstawieniem celu, jakim jest **opracowanie i przedstawienie całościowych ram służących do analizy i optymalizacji systemów termochemicznej konwersji energii**. Cel ten Doktorant ma zamiar osiągnąć poprzez trzy powiązane ze sobą filary badawcze, które stanowią strukturę pracy.

1. **Rozwój podstawowego modelowania procesu przetwarzania biomasy w gazyfikatorach poprzez opracowanie nowatorskich metod numerycznych.** Obejmowało to stworzenie własnej metody dynamicznego sprzężenia Eulera i Lagrange'a (DCEL) w celu uwzględnienia kurczenia się cząstek i ich dynamiki, oraz jej porównanie z zaawansowaną metodą rozszerzonych elementów dyskretnych (XDEM) w celu oceny kompromisu między kosztami obliczeniowymi a dokładnością prognoz.

2. **Rozszerzenie zakresu o analizę i optymalizację na poziomie systemu poprzez zastosowanie technik uczenia maszynowego (ML).** Obejmowało to stworzenie opartego na danych modelu spalarni osadów ściekowych w celu prognozowania kluczowych wskaźników wydajności (np. temperatury paleniska, efektywności wymiany ciepła) oraz określenia optymalnych warunków pracy w celu zwiększenia efektywności energetycznej.

3. **Wdrożenie cyfrowego bliźniaka działającego w czasie rzeczywistym w celu optymalizacji energii w pętli zamkniętej.** Ten ostateczny cel integruje modele fizyczne, obliczenia analityczne i rzeczywiste dane operacyjne w dynamicznym środowisku symulacyjnym (AnyLogic) w celu stworzenia wirtualnej repliki systemu spalania, umożliwiającej analizę scenariuszy i identyfikację istotnych strategii oszczędzania energii.

W Rozdziale 2 (36 stron, 17 rysunków, 2 tabele) Doktorant analizuje proces zgazowania biomasy w złożu stałym oraz wpływ właściwości paliwa na jego przebieg. Kluczowym osiągnięciem jest opracowanie metody DCEL, umożliwiającej modelowanie transportu ciepła i masy z uwzględnieniem zmiennej objętości cząstek. Przedstawiono szczegóły modelu, wyniki symulacji oraz jego walidację poprzez porównanie z metodą XDEM i danymi eksperymentalnymi. Liczne rysunki ilustrują procesy fizyczne i wyniki symulacji.

Rozdział 3 (ok. 22 strony, 13 rysunków, 10 tabel) poświęcony jest zastosowaniu uczenia maszynowego do analizy spalania osadów ściekowych. Opisuje przygotowanie danych, zastosowane algorytmy (np. GBM, ANN), selekcję cech i metryki oceny modeli. Wyniki obejmują analizy porównawcze, wrażliwości i optymalizacji.

Rozdział 4 (ok. 17 stron, 11 rysunków, 1 tabela) prezentuje zastosowanie cyfrowego bliźniaka do optymalizacji energetycznej instalacji spalania osadów ściekowych. Opisano modelowanie analityczne, symulacje dynamiczne w AnyLogic oraz integrację danych rzeczywistych. Przeprowadzono walidację i analizę scenariuszy, wykazując możliwość redukcji zużycia energii.

Rozdział 5 (4 strony) podsumowuje wyniki pracy i wskazuje główne wnioski dotyczące skuteczności integracji modelowania numerycznego, uczenia maszynowego i cyfrowego bliźniaka. Zawiera również propozycje dalszych badań, takie jak rozwój modeli i ich zastosowanie w warunkach przemysłowych.

We wnioskach Doktorant podkreśla, że zaprezentowana nowatorska platforma modelowania wieloskalowego stanowi sprawdzoną metodę integracji analiz na poziomie cząsteczkowym, składnikowym oraz systemowym w ramach jednego procesu. Dowodzi to również, że rozpatrywanie tych elementów osobno nie wystarcza do rozwiązania współczesnych problemów energetycznych.

Metoda DCEL stanowi przystępne narzędzie do modelowania reaktywnych złożeń porowatych i jest obiecująca pod względem wydajności obliczeniowej i niezawodności. Ma potencjał wypełnienia luki między zbyt uproszczonymi modelami 1D a wymagającymi ogromnych nakładów obliczeniowych symulacjami CFD-DEM o wysokiej wierności.

Pomyślne zastosowanie hybrydowej metodologii łączącej Aspen z uczeniem maszynowym stanowi solidny wzór do optymalizacji złożonych procesów przemysłowych, w których modelowanie oparte na zasadach podstawowych jest czasochłonne lub kosztowne, umożliwiając szybkie przeprowadzanie wirtualnych eksperymentów oraz ustalanie optymalnych wartości zadanych.

Praktyczne wdrożenie cyfrowego bliźniaka zostało w pełni zrealizowane i zweryfikowane w oczyszczalni ścieków, która stanowiła studium przypadku, wykazując konkretne korzyści ekonomiczne i środowiskowe.

Przedstawiony podział rozprawy na poszczególne rozdziały jest poprawny, a wykonany przegląd literaturowy jest bardzo rozbudowany, co świadczy o dużym wysiłku podjętym przez Doktoranta w celu ustalenia aktualnego stanu rozwoju badanych metod i rozwiązań. Cel pracy jest zgodny z tematem rozprawy, natomiast rozprawa nie zawiera tez naukowych, co zwykle występuje w rozprawach doktorskich.

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne, które powinny zostać poddane dyskusji i omówieniu w trakcie obrony rozprawy.

1. Na jakiej podstawie został przyjęty czas nagrzewania się cząstek, wykorzystany jako warunek brzegowy (Tabela 2.2). Wskazane jest przeanalizowanie wpływu tego warunku na uzyskiwane wyniki, gdyż w obliczeniach nieustalonych, czas oraz odpowiednie dobranie kroku czasowego determinuje jakość uzyskanych wyników. Czy taka analiza została przeprowadzona, a jeśli nie, to na jakiej podstawie została pominięta i wybrano właśnie takie parametry.
2. Dlaczego wartości całkowitej produkcji komponentów gazu („total gas component generation”), przedstawione na rysunkach 2.8., 2.10 i 2.11., zostały wyrażone w jednostce (kg). Trudno jest interpretować te wyniki, skoro wartości parametru badanego (przepływ paliwa, mm/s) dotyczą przepływu w czasie? W tym miejscu powinna występować jednostka opisująca generację gazu w czasie albo odpowiednia interpretacja wartości w (kg). Czy to jest ilość gazu, która znajduje się w reaktorze w danej chwili czasowej? Jeżeli tak, to nie jest to generacja gazu w danej chwili tylko wypełnienie reaktora gazem w danym momencie.
3. W opisie modelu DCEL (rozdział 2) brakuje informacji na temat podziału analizowanego obszaru na objętości kontrolne (opracowanie siatki numerycznej) poza jednym zdaniem na stronie 36: *„Z drugiej strony, siatkę domeny należy utworzyć metodą Eulera”* („*Conversely, the domain should be meshed using the Eulerian approach*”). Brak analizy i omówienia sposobu tworzenia siatki w obliczeniach numerycznych jest pewnym zaniedbaniem i proces ten powinien zostać omówiony przez Doktoranta, jak również sposób wyboru rodzaju i wielkości objętości kontrolnych.
4. Przedstawione w rozdziale 2.3.3. porównanie wyników uzyskanych z wykorzystaniem dwóch różnych modeli zostało wykonane tylko dla jednego zestawu dobranych parametrów wejściowych (np. rodzaj paliwa, średnica cząstek, czas nagrzewania itp.). Aby poprawnie ocenić jakość uzyskiwanych wyników, należy przeprowadzić porównanie dla większej liczby danych wejściowych, tak aby jednoznacznie stwierdzić, dla jakich zakresów można skutecznie stosować opracowany model. W rozdziale opisującym model XDEM brakuje także wykazu warunków początkowych i brzegowych, które mogą się różnić od modelu DCEL, a które zostały zastosowane w obliczeniach. Wykazanie różnic w wartościach dla dwóch podejść może ułatwić interpretację wyników i różnic w wynikach, jakie wykazały modele DCEL oraz XDEM.

Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Przedstawiony przez doktoranta temat jest sformułowany zgodnie z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim. Doktorant wykazuje się dogłębną znajomością literatury związanej z tematyką procesów konwersji termochemicznej energii oraz optymalizacji systemów. Wśród wskazanych prac w przeglądzie literaturowym znajdują się aktualne wyniki z zakresu badanej problematyki, do czego bezpośrednio nawiązuje doktorant w rozprawie. Metody badawcze użyte przez Doktoranta są aktualne i odpowiednie dla prowadzonych badań, zarówno dla rozwoju własnego modelu, jak i zastosowania metod uczenia maszynowego. Zastosowane przez Doktoranta metody badawcze umożliwiły osiągnięcie postawionego celu. Struktura pracy tworzy spójną i logiczną całość. Poziom językowy i stylistyczny pracy jest poprawny.

Jako główne osiągnięcia Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy wskazać:

1. Opracowanie metody DCEL jako przystępnego narzędzia do modelowania reaktywnych złożeń porowatych.
2. Opracowanie platformy modelowania wielkoskalowego dla integracji obliczeń na poziomie cząsteczkowym, komponentowym oraz systemowym w ramach jednego procesu.
3. Skuteczne zastosowanie hybrydowej metodologii łączącej wyniki z oprogramowania Aspen z uczeniem maszynowym.
4. Praktyczne wykonanie cyfrowego bliźniaka wraz z wdrożeniem w oczyszczalni ścieków.

W podsumowaniu recenzji informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy. Doktorant zrealizował postawiony cel, przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu **opracowania i przedstawienia całościowych ram służących do analizy i optymalizacji systemów termochemicznej konwersji energii.**

Autor rozprawy, mgr inż. Behrouz Adibimanesh, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie zagadnień modelowania procesów cieplnych i przepływowych, systemów termochemicznej konwersji energii, modelowania numerycznego, niezbędnych do przygotowania pracy doktorskiej.



Rozprawa doktorska mgr inż. Behrouz Adibimanesh pt. „*Mathematical and data-driven modeling of biomass conversion for energy optimization*” będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

W świetle przedstawionej oceny wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Paweł Maciejowski". The signature is fluid and cursive, with a large initial 'P'.