

Recenzja rozprawy doktorskiej

Podstawę opracowania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej stanowiło pismo Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk, Pana dr. hab. inż. Grzegorza Żywicy, prof. IMP PAN, z dnia 13 lutego 2026 roku.

Recenzja dotyczy rozprawy mgr. inż. Behrouza Adibimanesha pt.: „Mathematical and data-driven modeling of biomass conversion for energy optimization”, przygotowanej pod kierunkiem dr. hab. inż. Sylwii Polesek-Karczewskiej.

Ocena celowości podjętej tematyki

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wpisuje się w jeden z najbardziej aktualnych nurtów inżynierii energetycznej, jakim jest optymalizacja procesów konwersji biomasy i odpadów biogenicznych. W obliczu globalnej transformacji energetycznej i dążenia do gospodarki o obiegu zamkniętym, efektywne wykorzystanie paliw odnawialnych, takich jak biomasa lignocelulozowa czy osady ściekowe, stanowi wyzwanie zarówno poznawcze, jak i technologiczne.

Główną wartością pracy jest jej holistyczne, wieloskalowe podejście. Autor słusznie zauważa, że tradycyjne modelowanie koncentruje się albo na szczegółowej analizie pojedynczego reaktora (np. zgazowarki), albo na wydajności całego systemu, co prowadzi do luki poznawczej. Aby ją wypełnić,

Doktorant zaproponował spójne podejście łączące:

- modelowanie fundamentalne na poziomie cząstki paliwa (metoda DCEL),
- analitykę danych i uczenie maszynowe (ML) do przewidywania kluczowych wskaźników wydajności,
- technologię cyfrowych bliźniaków (Digital Twin) do optymalizacji w czasie rzeczywistym.

Tematyka jest więc nie tylko aktualna, ale i innowacyjna, a podjęte zadanie badawcze – łączenie metod numerycznych CFD, uczenia maszynowego i symulacji dynamicznych w jeden spójny system – należy uznać za ambitne i w pełni uzasadnione. Cele pracy, sformułowane w rozdziale 1.3, są jasne i logicznie prowadzą do przedstawionych w dalszych częściach badań.

Praca zawiera kilka oryginalnych osiągnięć:

- opracowanie i implementacja metody DCEL,
- porównanie dokładności i wydajności obliczeniowej różnych metod ML dla procesu spalania osadów,
- opracowanie i walidacja działającego prototypu cyfrowego bliźniaka dla instalacji termicznego przekształcania osadów.



Ocena rozprawy

Rozprawa została napisana w języku angielskim i ma typową dla prac doktorskich strukturę. Na jej treść składa się 5 głównych rozdziałów, poprzedzonych dedykacją, podziękowaniami, streszczeniami (w języku angielskim i polskim) oraz obszernym spisem literatury (190 pozycji), co świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w literaturze przedmiotu.

Rozdział 1 (Wprowadzenie) to kompetentnie napisany przegląd literatury, który nie tylko wprowadza w tematykę, ale też doskonale uzasadnia potrzebę prowadzenia własnych badań. Autor krytycznie analizuje stan wiedzy w zakresie modelowania numerycznego zgazowania, metod ML w optymalizacji procesów oraz zaawansowanych symulacji (w tym Digital Twin).

Rozdział 2 stanowi znaczący wkład oryginalny. Autor opracował autorską, dwuwymiarową (2D) metodę sprzężoną Eulerowsko-Lagrange'owską (DCEL) do modelowania pirolizy w złożu stałym. Kluczową zaletą metody jest uwzględnienie zmiennej objętości cząstek (kurczenia się) oraz jej wpływu na ruch złoża. Porównanie z zaawansowaną metodą XDEM (3D) jest bardzo cenne – pokazuje, że prostsza metoda DCEL, choć mniej szczegółowa, jest dwukrotnie szybsza i daje wyniki porównywalne z danymi eksperymentalnymi (RMSE=0.0878). Badania parametryczne nad prędkością podawania paliwa i wielkością cząstek dostarczają praktycznych wskazówek dla projektantów reaktorów.

Rozdział 3 to przykład skutecznego zastosowania uczenia maszynowego w inżynierii. Autorzy (główny wkład Doktoranta) zbudowali model hybrydowy Aspen Plus – ML. Na podstawie 76 symulacji Aspen wytrenowano trzy typy modeli (równoległy, ANN i łańcuchowy). Szczególnie interesująca jest nowatorska technika regresji łańcuchowej (chained regression), która uwzględnia korelacje między zmiennymi wyjściowymi. Jej wysoka dokładność ($R^2=0.91$) i 28-krotnie krótszy czas inferencji w porównaniu do ANN czynią ją praktycznym narzędziem do optymalizacji. To pokazuje dojrzałość badawczą Autora, który potrafi wybrać nie tylko najdokładniejszą, ale i najbardziej wydajną obliczeniowo metodę.

Rozdział 4 jest zwieńczeniem i ukazuje najwyższy poziom integracji. Autor przechodzi od modelowania i optymalizacji statycznej do wdrożenia koncepcji cyfrowego bliźniaka działającego w czasie rzeczywistym. W środowisku AnyLogic zintegrowano: obliczenia analityczne składu spalin i temperatury spalania, model regresji liniowej (z Rozdziału 3) oraz dane operacyjne z 24-godzinne go okresu. Walidacja modelu ($R^2=0.71$) potwierdza jego zdolność do odtwarzania rzeczywistych trendów. Najważniejszym osiągnięciem jest analiza 5 scenariuszy, która doprowadziła do strategii redukcji zużycia biogazu o 40% (z 273 do 164 m³/dobę) przy jednoczesnym skróceniu czasu nieakceptowalnie niskiej temperatury w piecu z 421 do 281 minut. To konkretny, wymierny wynik o dużym potencjale wdrożeniowym.

Rozdział 5 (Podsumowanie) zawiera syntetyczne wnioski końcowe oraz interesujące kierunki dalszych prac, co świadczy o umiejętności krytycznej oceny własnych osiągnięć i planowania przyszłych badań.

Uwagi do rozprawy

1. W modelu pominięto suszenie biomasy, a proces rozpoczyna się od pirolizy. Jakie jest uzasadnienie tego pominięcia? Czy założenie to nie wpływa w istotny sposób na dynamikę frontu termicznego, szczególnie w górnej części złoża? Czy przeprowadzono analizę wrażliwości pokazującą, że założenie to nie wpływa istotnie na przewidywany rozkład temperatury i szybkość wydzielania gazu? Bez tego trudno ocenić, czy uproszczenie to nie prowadzi do systematycznego błędu.
2. „Parameter K is the permeability of the material, which is influenced by the structure of the porous (or granular) medium, as well as the density and viscosity of the fluid. As such, K plays a critical role in pressure changes within the bed. In general, it is a tensor. In the case of isotropic material, and this assumption is made for simplicity in this study, this quantity reduces to a scalar.” – nie widziałem w pracy zdefiniowanej wartości tego współczynnika
3. Założono stały rozkład porowatości (z mniejszą wartością w osi reaktora). W rzeczywistości porowatość zmienia się dynamicznie wraz z kurczeniem się cząstek. Czy próbowano oszacować wpływ tego uproszczenia na wyniki, na przykład poprzez analizę porównawczą z XDEM, który ten efekt uwzględnia?
4. Autor zakłada, że rozkład porowatości w reaktorze jest stały w czasie i zmienia się tylko radialnie (w kierunku ścianki). Wyniki XDEM (Rys. 2.17) pokazują, że porowatość zmienia się w czasie na skutek kurczenia się cząstek i ich przemieszczania. Czy przeprowadzono analizę wrażliwości pokazującą, że założenie to nie wpływa istotnie na przewidywany rozkład temperatury i szybkość wydzielania gazu?
5. Zbiór danych składa się z 76 symulacji Aspen Plus. Czy to nie jest stosunkowo mała liczba dla modeli ML, szczególnie dla ANN? Jakie ryzyko przeuczenia (overfittingu) wiąże się z taką liczbą danych i w jaki sposób zostało ono zaadresowane (poza walidacją krzyżową)?
6. Parametry wejściowe zostały zmienione w „rzeczywistym możliwym zakresie”. Czy w tym zakresie zidentyfikowano jakieś obszary nieliniowości lub nieciągłości, które mogłyby stanowić wyzwanie dla modeli regresyjnych?
7. Model chained ML został wytrenowany i zoptymalizowany dla konkretnej instalacji. Jakie kroki należałoby podjąć, aby dostosować go (np. za pomocą transfer learningu) do innej instalacji o podobnej technologii, ale innych parametrach (skład osadu, wydajność)? Czy dla wybranego modelu (chained lub ANN) oszacowano przedziały ufności predykcji? Jak bardzo rozszerzają się one dla ekstremalnych wartości parametrów wejściowych (spoza zakresu treningowego)?
8. Praca podaje punktowe wartości predykcji (np. R^2 , MAE, MSE). Dla praktycznego wdrożenia w instalacji przemysłowej kluczowa jest również znajomość niepewności przewidywań (przedziały ufności).
9. W Rozdziale 4, aby osiągnąć 40% redukcję biogazu, konieczne jest obniżenie wilgotności osadu o 40%. Autor słusznie zauważa, że suszenie jest energochłonne. Czy w modelu cyfrowego bliźniaka uwzględniono bilans energetyczny tego dodatkowego suszenia?
10. W rozdziale 2, przy opisie dyskretyzacji (równania 2.27, 2.34), zabrakło wyjaśnienia, dlaczego wybrano schemat zupełnie niejawni (implicit) zamiast np. schematu Cranka-Nicolsona, który mógłby być dokładniejszy dla problemów nieustalonych.
11. Pominięcie fazy suszenia i założenie suchej biomasy, Autor wyraźnie stwierdza: “At this stage of gasification model development, it is assumed that the biomass feedstock is dry” (str. 33). W rzeczywistych warunkach biomasa (zwłaszcza w reaktorze zgazowania) zawiera wilgoć, której odparowanie pochłania znaczną ilość ciepła i opóźnia nagrzewanie cząstek. **Czy pominięcie suszenia nie wpływa na szybkość propagacji frontu pirolizy i uzyskaną zgodność z eksperymentem (Rys. 2.16)?**





Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
inicjatywa doskonałości

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej

Prof. dr hab. inż.
Wojciech Adamczyk

12. Czy próbowano wyeliminować wpływ różnic w modelowaniu promieniowania poprzez sztuczne dostosowanie parametrów (np. efektywnej emisyjności) w DCEL, aby uzyskać ilościową zgodność z XDEM? Obecne porównanie jest głównie jakościowe.
13. W wynikach optymalizacji (Tab. 3.10) pojawia się ujemna wartość SHTR = -249.79 kW. Co fizycznie oznacza ujemna wartość? W kontekście Tabeli 3.5 wartości SHTR wahają się od -367 do 127 kW. Proszę o wyjaśnienie, jak interpretować ujemne wartości i czy są one akceptowalne w rzeczywistej instalacji.
14. Równanie (4.17) zawiera 20 współczynników ($a_1, b_1, \dots, f_{10}$). Wysoka liczba parametrów przy ograniczonej liczbie danych (z obliczeń analitycznych) może prowadzić do przeuczenia.
15. Współczynnik determinacji $R^2 = 0.71$ oznacza, że model wyjaśnia 71% wariancji danych. To dobry wynik, ale nie doskonały. W niektórych przedziałach czasowych (Rys. 4.3) różnica między symulacją a pomiarem sięga nawet ok. 40-50°C. Kiedy model jest najmniej dokładny (np. przy nagłych zmianach obciążenia)?
16. W opisie równania (4.17) Autor odsyła do załącznika ("Values of coefficients $a_1 - f_{10}$ can be found in the Appendix"). W dostarczonej pracy brak jest tego załącznika.

Wnioski końcowe

Przedstawione powyżej szczegółowe uwagi nie podważają zasadniczej, bardzo wysokiej oceny rozprawy. Wręcz przeciwnie – wynikają z uznania dla jej złożoności i interdyscyplinarnego charakteru. Większość z nich to pytania o detale implementacyjne i interpretacyjne, które z pewnością staną się przedmiotem owocnej dyskusji podczas obrony.

Na podstawie przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Behrouz Adibimanesh, biorąc pod uwagę powyższe komentarze i spostrzeżenia, stwierdzam, że spełnia ona wymogi Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, potwierdza wiedzę teoretyczną doktoranta w dyscyplinie, w której prowadzona jest praca, a także wykazuje jego zdolność do samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej o **dopuszczenie doktoranta** do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571 ze zm.).

Rozprawa wyróżnia się **oryginalnym i holistycznym podejściem do optymalizacji procesów termochemicznej konwersji biomasy**, łączącym trzy komplementarne filary: autorską, wysoce efektywną obliczeniowo metodę DCEL do modelowania dynamiki złoża stałego z uwzględnieniem kurczenia się cząstek, zaawansowane techniki uczenia maszynowego (w tym nowatorską regresję łańcuchową) oraz **praktyczną implementację cyfrowego bliźniaka działającego w czasie rzeczywistym**. Szczególnie wysoko oceniam **walory aplikacyjne pracy**, która wnosi istotny wkład w rozwój inżynierii energetycznej i Przemysłu 4.0, a jej wyniki mają bezpośredni potencjał wdrożeniowy. **Wnoszę zatem do Rady Naukowej o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.**

Z wyrazami szacunku
prof. dr hab. inż. Wojciech Adamczyk

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej

ul. Konarskiego 22, pok. 54, 44-100 Gliwice
+48 32 237 23 78 Wojciech.Adamczyk@polsl.pl



HR
HUMAN RESOURCES



Signed by / Podpisano przez:

Wojciech Piotr
Adamczyk
Politechnika Śląska

Date / Data: 2026-04-
21 08:05

W. Adamczyk