

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, 24.01.2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Agaty Widuch zatytułowanej
"Development novel approaches for modeling dense granular flows"

wykonanej na Politechnice Śląskiej w Gliwicach pod opieką promotora
prof. dr hab. inż. Wojciecha Adamczyka

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina – zgodnie z pismem nr RIE-BD.512.79.2023.

2. Zasadność podjęcia tematu

Zrealizowany temat w rozprawie doktorskiej mgr inż. Agaty Widuch dotyczy analizy numerycznej przepływów ziarnowych, w tym w szczególności zjawiska fluidyzacji stosowanego w wielu gałęziach przemysłu, takich jak przemysł chemiczny, przemysł farmaceutyczny, przemysł spożywczy, przemysł energetyczny. W przypadku przemysłu energetycznego, zjawisko fluidyzacji jest stosowane w kotłach opalanych paliwami stałymi typu BFB (Bubbling Fluidized Bed) lub CFB (Circulating Fluidized Bed), umożliwiającym m.in. utylizowanie różnych gatunków paliw, a także ograniczenie emisji zanieczyszczeń gazowych do środowiska.

Ideą pracy jest opracowanie hybrydowego systemu modelowania i integracja z systemem sterowania kotłem 460 MWe Elektrowni Łagisza CFB, w celu usprawnienia doboru parametrów pracy kotła, redukcji emisji zanieczyszczeń oraz poprawy ogólnej sprawności wytwarzania.

Stosowanie numerycznych metod modelowania przepływów wielofazowych, jak również metod uczenia maszynowego, w erze ciągłego rozwoju mocy obliczeniowych, jest drogą umożliwiającą tworzenie wirtualnych obiektów „digital twins” (cyfrowych bliźniaków), które są w stanie dokładnie odzwierciedlać rzeczywisty charakter pracy maszyn i urządzeń. Z tego powodu, zagadnienia podjęte w rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Agaty Widuch uznają za trafne, aktualne oraz interesujące, nie tylko z naukowego punktu widzenia, ale także z powodów możliwej aplikacji uzyskanych wyników w przemyśle. Praca ma charakter numeryczno-eksperymentalny, a przeprowadzone analizy, wnikliwe spostrzeżenia i wnioski pozwalają na stwierdzenie, że przedstawiona praca doktorska Pani mgr inż. Agaty Widuch wnosi wkład w bibliografię przedmiotu badanego zagadnienia.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Agaty Widuch posiada łącznie 133 strony, 7 rozdziałów, które stanowią główną część pracy, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis symboli i oznaczeń, bibliografię złożoną ze 145 pozycji literaturowych i 3 stron internetowych. Rozprawa została napisana w języku angielskim.

Główna część rozprawy składa się z siedmiu numerowanych rozdziałów, zawierających treści, które można podzielić na część dotyczącą opisu matematycznego stosowanych metod modelowania oraz metod uczenia maszynowego, część poświęconą opisowi badań eksperymentalnych i numerycznych do śledzenia zderzeń cząstek oraz część przedstawiającą wyniki modelowania dużego kotła energetycznego typu CFB (Circulating Fluidized Bed).

Rozdział 1 to „Wprowadzenie”, który składa się z 16 stron szczegółowego wprowadzenia dla uzasadnienia naukowego problemu przedstawionego w rozprawie. W rozdziale tym przedstawiony został podstawowy opis procesu fluidyzacji wraz z zastosowaniem tego zjawiska w kotłach fluidalnych CFB. Na podstawie przeglądu literaturowego Autorka stwierdza, że obecnie można wskazać cztery różne podejścia do modelowania komputerowego złożonych procesów w trakcie pracy kotła fluidalnego, takich jak stosowanie „Discrete Element Model”, „Empirical and Semi-Empirical Models”, „Multifluid Euler-Euler Models” oraz „Hybrid Euler-Lagrange Models”. Analizując i wskazując zalety

oraz wady wymienionych podejść, Autorka podkreśla cel swojej pracy jako koncepcję połączenie dwóch z wymienionych podejść („Discrete Element Model” oraz „Hybrid Euler-Lagrange Model”) w jeden spójny algorytm. Jako główną tezę badawczą, Doktorantka przedstawia możliwość integracji hybrydowego systemu modelowania z systemem sterowania kotła CFB bloku o mocy 460 MWe w Elektrowni Łagisza w celu redukcji emisji zanieczyszczeń i poprawie ogólnej sprawności oraz wspieraniu algorytmów przewidywania w zakresie sterowania i optymalizacji pracy kotła. Najważniejszym wyzwaniem jest opracowanie systemu modelowania, który symuluje pracę kotła CFB z wystarczającą dokładnością i szybkością, aby móc wykorzystać system do przewidywania zachowania się kotła w trakcie jego pracy.

W rozdziale 2 „Mathematical models” Doktorantka omówiła modele matematyczne, stosowane do modelowania procesów przepływów wielofazowych, z naciskiem na zastosowanie do symulacji przepływów ziarnistych, takie jak „Standard Euler-Euler approach”, „Hybrid Euler-Lagrange approach” oraz „Discrete Element Method”. Rozdział posiada 10 stron, oraz 1 rysunek.

Rozdział 3 „Machine learning and neural networks” składa się z 15 stron, zawiera 9 rysunków. W rozdziale omówione zostały szczegółowo metody uczenia maszynowego w tym sieci neuronowe, z kategorii drzew decyzyjnych „Decision trees”, Perceptron wielowarstwowy („Multilayer Perceptron”) oraz wybrane wskaźniki (MAE, MSE, RMSE, R^2) do oceny wyników prognozowanych wartości, co stanowi kluczowy element w stosowaniu wybranych metod.

W rozdziale 4 „Experimental test-rig for tracking particle collisions”, zawierającym 8 stron, 3 rysunki oraz 2 tabele, Autorka zaprezentowała stanowisko badawcze wykorzystywane do badań nad śledzeniem zderzeń cząstek. Rozdział ten omawia konfigurację stanowiska eksperymentalnego wykorzystanego do walidacji wyników z modelu numerycznego. Z zastosowaniem szybkiej kamery oraz właściwego oprogramowania Doktorantka była w stanie zaobserwować procesy kolizji cząstek. W rozdziale znajdują się także wyznaczone niepewności pomiarowe, które mogą mieć duży wpływ na uzyskiwane wyniki eksperymentalne w analizowanym procesie, w szczególności podczas walidacji modelu numerycznego.

Rozdział 5 „The development of simplified collision approach” omawia uproszczone podejście z zastosowaniem „Surrogate model”. Uczenie maszynowe został przedstawione jako kluczowe zagadnienie w celu połączenia dwóch modeli CFD „Hybrid Euler-Lagrange” oraz „Discrete Element Method”. Opisano także budowę modelu oraz jego implementację

do oprogramowania komercyjnego ANSYS. W rozdziale zawarto porównanie wyników symulacji z pomiarami eksperymentalnymi. Dodatkowo opisano symulacje zjawiska fluidyzacji w kotle małej skali, pozwalające na weryfikację zastosowania uproszczonego modelu odzwierciedlającego to zjawisko. Wszystko zostało zawarte na 35 stronach, i wykorzystano 27 rysunków oraz 2 tabele.

W rozdziale 6 „Hybrid approach for modeling large scale CFD boiler”, który zawiera 22 strony, 14 rysunków oraz 4 tabele, Doktorantka przedstawiła wyniki hybrydowego podejścia do modelowania kotła typu CFB dużej mocy. W rozdziale zostały omówione schematy przekazywania danych pomiędzy modułem kotła oraz infrastruktury IT, a także model geometryczny i siatka numeryczna użyta do obliczeń, rodzaje warunków brzegowych, aczkolwiek bez przedstawienia większej liczby szczegółów.

Rozdział 7 „Summary and conclusions” przedstawia podsumowanie z zaznaczeniem najważniejszych wyników oraz rekomendacji dla dalszych badań.

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne, dla których powinny zostać udzielone szczegółowe odpowiedzi:

1. W podrozdziale 5.6.1 Autorka przedstawia uproszczoną geometrię kotła typu CFB, a na rysunku 5.23 zaznaczone zostały wymiary modelu geometrycznego. Wg. schematu wysokość komory wynosi 10 cm, pole przekroju posiada wymiar 1 cm x 1 cm. W jaki sposób dobrano te parametry geometryczne, i w jaki sposób są one w stanie odwzorować zjawiska zachodzące w komorach kotłów CFB, skoro model geometryczny jest ok. 100 razy mniejszy niż rzeczywiste kotły dużej mocy? W rozdziale nie mogę także znaleźć informacji o liczbach kryterialnych, które powinny zostać przeanalizowane w przypadku, gdy następuje skalowanie badanych zagadnień przepływowo-ciepłnych.
2. W podrozdziale 5.6.3, Doktorantka prezentuje porównanie wyników uzyskane metodą HEL i HELSCM, wykazując różnice w uzyskanych wartościach prędkości (składowa prędkości w kierunku osi y) oraz wartości ciśnienia. W żadnym z przypadków nie przedstawia jednak porównania z zastosowaniem metryk i parametrów oceny błędu, a tylko różnice w bezwzględnych wartościach. Z punktu widzenia porównania wyników modelowania dla dwóch różnych podejść, wskazana jest także interpretacja wyników i zaobserwowanych różnic, wraz próbą podania

głównych powodów. Czy powodem jest tylko zastosowany algorytm, czy połączenie z metodą numeryczną i czy zawsze można się spodziewać podobnych różnic itd.?

3. W rozdziale 6.5 Doktorantka przedstawia opracowany model kotła oraz siatkę numeryczną, nie przybliżając sposobu jej walidacji na etapie tworzenia. Siatka numeryczna może mieć znaczący wpływ na uzyskiwane wyniki, a Doktorantka odwołała się do poprzednich prac, w tym prac promotora, gdzie siatki były rozwijane i walidowane dla podejścia HEL (Hybrid Euler-Lagrange). Na jakiej podstawie Doktorantka założyła, że dla zastosowania podejścia HELSCM nie pojawią się dodatkowe efekty, dla których metodyka tworzenia siatki może być inna i mieć wpływ na uzyskiwane wyniki?
4. Podczas omawiania wyników oraz w części podsumowującej, Doktorantka wskazuje wyniki z przeprowadzonych badań numerycznych. Brakuje w tej części odniesienia do założonego i najważniejszego wyzwania pracy tj. opracowania systemu modelowania, który symuluje pracę kotła CFB z wystarczającą dokładnością i szybkością, aby móc wykorzystać system do przewidywania zachowania się kotła w trakcie jego eksploatacji. Opis dla tych wyzwań powinien zostać wskazany w tej części pracy bardziej szczegółowo, wraz z informacją jakie wyniki o tym świadczą i jak można je zastosować od oceny pracy kotła.

Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy. W pracy można spotkać kilka literówek, brakujących znaków interpunkcyjnych i niedociągnięć redakcyjnych. Liczba ich jest jednak niewielka i nie wpływa w żaden sposób na ocenę pracy.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Przedstawiony przez Doktorantkę temat jest sformułowany zgodnie z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim. Doktorantka wykazuje się dogłębną znajomością zarówno krajowej, jak i zagranicznej literatury związanej z analizowaną tematyką. Zastosowane metody badawcze skutecznie umożliwiły osiągnięcie postawionego celu pracy.

Struktura pracy tworzy spójną i logiczną całość, a praca jest przejrzysta dla czytelnika. Formalna struktura pracy doktorskiej została zachowana zgodnie z wymogami edycji prac doktorskich. Poziom językowy i stylistyczny pracy jest poprawny.

Jako główne osiągnięcia Doktorantki w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, moim zdaniem, wskazać:

1. Opracowanie i zweryfikowanie koncepcji połączenia dwóch podejść modelowania przepływów wielofazowych („Discrete Element Model” oraz „Hybrid Euler-Lagrange Model”) w jeden spójny algorytm.
2. Opracowanie i aplikacja metod uczenia maszynowego wraz z wykorzystaniem sieci neuronowych do algorytmu i komunikacji pomiędzy dwoma podejściami oraz do poprawy przewidywania wartości na podstawie wyników z modelu.
3. Zastosowanie opracowanego algorytmu w analizie pracy kotła dużej mocy typu CFB w bloku elektrowni Łagisza w Będzinie.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy. Doktorantka zrealizowała postawione sobie podstawowe cele, przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu opracowania koncepcji połączenia dwóch podejść modelowania („Discrete Element Model” oraz „Hybrid Euler-Lagrange Model”) w jeden spójny algorytm.

Autorka rozprawy, mgr inż. Agata Widuch, wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie zagadnień modelowania komputerowego w mechanice płynów (CFD), w tym zagadnień modelowania przepływów wielofazowych, w zakresie stosowania metod uczenia maszynowego i sieci neuronowych oraz ogólnej problematyki poprawy charakterystyk pracy kotłów energetycznych w szczególności kotłów fluidalnych typu CFB.

Rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Widuch pt. *„Development novel approaches for modeling dense granular flows”* będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Spełnia w całości warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.).

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Śląskiej w Gliwicach o dopuszczenie Doktorantki do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Podpisał Paweł Madejski