

Gliwice, 24 stycznia 2025 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Stanek
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
wojciech.stanek@polsl.pl

**Recenzja pracy doktorskiej
mgr inż. Bartosza Kraszewskiego**

pt.: „*Capturing rapid nonlinear phenomena using coupled thermal fluid-solid interaction numerical analysis*”

„*Rejestrowanie szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego*”

Podstawą niniejszej recenzji było zlecenie Dr hab. inż. Grzegorza Żywica, prof. IMP PAN, Zastępca Dyrektora ds. naukowych IMP PAN w Gdańsku. Promotorem pracy jest Prof. dr hab. inż. Janusz Badur.

W ramach recenzji dokonano oceny pracy doktorskiej w zakresie poprawności doboru tytułu rozprawy; układu rozprawy doktorskiej; zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej; zdefiniowanego celu pracy oraz zastosowanych metod badawczych; omówienia wyników badań; potencjału praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań; nieprawidłowości, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej. Ponadto pod uwagę brano czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Ocenę w zakresie wyżej wymienionych kryteriów przedstawiono w kolejnych punktach recenzji: 1. Tematyka pracy doktorskiej i trafność jej doboru; 2. Ogólna charakterystyka pracy; 3. Uwagi do pracy (3.1 Uwagi merytoryczne o charakterze krytycznym i dyskusyjnym; 3.2. Wybrane uwagi o charakterze redakcyjnym); 4. Wniosek końcowy.

W ramach recenzji dokonano oceny czy rozprawa (postępowanie jest prowadzone w ramach dyscypliny inżynieria mechaniczna) spełnia wymagania zgodne z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023 poz. 742 ze zm.).

1. Tematyka pracy doktorskiej i trafność jej doboru

Praca poświęcona jest badaniom w zakresie zaawansowanych analiz szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego. W rozdziale 1 (Introduction) Autor pracy przedstawia szczegółowe uzasadnienie ważności podjęcia badań w zakresie analiz szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego (podrozdział 1.1. *Motivation*) oraz szczegółowo przedstawia cel i zakres pracy (podrozdział 1.2. *Purpose and scope of the work*). W rozdziale 2 Autor pracy przedstawia szczegółowy przegląd literatury w zakresie: 1) *Momentum Fluid Structure Interaction* oraz 2) *Thermal Fluid-Structure Interaction*. W szczególności w rozdziale 1 (Introduction) Autor pracy przedstawia szczegółowo obszary przemysłu w których w zakresie poprawy efektywności energetycznej i ekologicznej oraz gospodarki materiałami (w tym w obszarze energetyki cieplnej) zastosowanie zaawansowanych analiz szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego jest bardzo istotne.

Uważam, że podjęta tematyka badań jest ważna z punktu widzenia rozwoju metod w zakresie zaawansowanych analiz dla rejestrowania szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego, co Autor pracy podkreśla jednoznacznie (na podstawie zaawansowanego przeglądu literatury) stwierdzeniami: „*jak wykazano dalej w Pracy, dziedzina analiz numerycznych oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego nie wydaje się być jeszcze odpowiednio udokumentowana w literaturze*”.

Zaplanowane i przeprowadzone w ramach pracy badania zdaniem recenzenta stanowią cenny wkład w zakresie dalszego rozwoju analiz w zakresie szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego. Uważam że zaproponowany temat i zakres pracy wpisuje się bez wątpienia w obszar ważnych i aktualnych problemów dotyczących dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Podjęcie tematu należy uznać za w pełni uzasadnione, a uzyskane wyniki są bez wątpienia oryginalne i bardzo cenne z naukowego punktu widzenia oraz zastosowań praktycznych.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Na podstawie szczegółowej analizy istniejącego stanu wiedzy (Rozdział 2 – *Przegląd literatury*) w zakresie: 2.1. *Momentum Fluid-Structure Interaction* i 2.2. *Thermal Fluid-Solid Interaction* Autor pracy szczegółowo formułuje plan badań oraz cel pracy. Głównym celem pracy jest opracowanie zaawansowanych narzędzi numerycznych dla rejestrowania szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych w tym zakresie.

Struktura ocenianej pracy doktorskiej obejmuje: 1) Szczegółowy przegląd literatury w zakresie rejestrowania szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego; 2) Opracowanie zaawansowanych narzędzi numerycznych dla oceny oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego; 3) badania eksperymentalne na stanowisku laboratoryjnym; 4) Modelowanie oraz analizę wybranego systemu za pomocą opracowanych narzędzi numerycznych (Coupled Thermal-FSI Analysis).

W rozdziale 2 „*Literature review*” Autor pracy doktorskiej zaprezentował szczegółowy przegląd literatury w zakresie: 2.1. oddziaływanie między płynem a ciałem stałym (*Momentum Fluid-Structure Interaction*) oraz 2.2. interakcji cieplnej płynu i ciała stałego (*Thermal Fluid-Structure Interaction*). Przedstawiony w pracy szczegółowy przegląd literatury również jednoznacznie podkreślają celowość przeprowadzonych badań w zakresie rejestrowania szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego.

W rozdziale 3 Autor pracy przedstawia szczegółowo opis wykorzystywanych narzędzi modelowania numerycznego w badanym obszarze. W szczególności Autor opisuje w kolejnych podrozdziałach:

- ogólne zasady modelowania w zakresie interakcji ciecz – ciało stałe (podrozdział 3.1),
- szczegóły modelowania w zakresie analizy dynamiki płynów (podrozdział 3.2),
- szczegóły modelowania w zakresie analizy dynamiki ciała stałego (podrozdział 3.3),
- propozycję integracji narzędzi numerycznych wykorzystywanych w analizach (podrozdział 3.4).

W opinii recenzenta zaproponowana metodyka integracji narzędzi numerycznych przedstawiona w podrozdziale 3.4 pracy stanowi innowacyjne podejście w zakresie rozwoju narzędzi modelowania dla oceny szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego.

W rozdziale 4 Autor pracy przedstawia szczegółowo opis wykorzystywanego w ramach badań stanowiska laboratoryjnego (*Experimental stand – a steel thin-walled container*) W szczególności Doktorant opisuje szczegółowo stanowisko, na którym były wykonywane badania doświadczalne (pomiarowe). W ramach podrozdziałów 4.1 – 4.2 opisuje ogólną charakterystykę stanowiska badawczego oraz zastosowanej aparatury pomiarowej. W podrozdziale 4.3 („*Results of experiments*”) Doktorant przedstawia szczegółowo wyniki uzyskanych rezultatów z badań laboratoryjnych. Ważnym podsumowaniem przedstawionym przez Doktoranta w rozdziale 4 na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych jest stwierdzenie zaprezentowane w podsumowaniu Rozdziału 4: „*Warto zauważyć, że nie zaobserwowano znaczącej korelacji między pomiarami odkształceń a pomiarami temperatury stali, jak również obserwowanymi temperaturami otoczenia. Oznacza to, że przepływ wody przez dno pojemnika miał tutaj znaczący wpływ*”

W rozdziale 5 („*Coupled Thermal-FSI numerical analysis*”) doktorant przedstawia wyniki analizy numerycznej oraz symulacji na podstawie opracowanych modeli matematycznych w zakresie *Coupled Thermal-FSI* (termiczna interakcja ciec-ciało stałe) w tym: 5.1 Geometry and discretization of domains; 5.1.1 Fluid domain mesh density analysis; 5.1.2 Solid domain mesh; 5.2. Materials data; 5.3 Solvers settings and boundary condtions; 5.3.1 System Coupling Solver; 5.3.2 Computational Fluid Dynamics solver; 5.3.3. Computational Soild Dynamic Solver. W podrozdziale 5.4 Doktorant przedstawia szczegółowe omówienia uzyskanych rezultatów na podstawie opracowanych w ramach pracy zaawansowanych narzędzi modelowania matematycznego w odniesieniu do szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego.

W rozdziale 6 („*Conclusions*”) Autor szczegółowo przedstawia podsumowanie wykonanych badań oraz uzyskanych ważnych wyników w ramach realizacji pracy doktorskiej. Szczegółowo podsumowuje ważność stosowanych / zaproponowanych metod w zakresie analiz termiczna interakcja ciec-ciało stałe ważnych w zakresie systemów energetycznych oraz technologii przemysłowych. Autor podkreśla ważność analiz w zakresie ekspansji cieplnej w odniesieniu do eksploatacji urządzeń energetycznych. W szczególności ważne w podsumowaniu są stwierdzenia przedstawione w kolejnych akapitach recenzji.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych (w szczególności na podstawie pomiarów w 4 punktach pomiarowych umieszczonych w wykorzystywanej instalacji laboratoryjnej) możliwe było przeprowadzenie weryfikacji zaproponowanych algorytmów numerycznych w zakresie badań dotyczących szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego.

Na str. 58 w Rozdziale 6 Autor pracy szczegółowo wymienia zalety i możliwości osiągnięcia szczegółowych wyników / spostrzeżeń dzięki zastosowaniu opracowanego w ramach pracy zaawansowanego algorytmu numerycznego, w tym:

- 1) Połączona analiza termiczna FSI pozwoliła uzyskać krzywe zmiennych najbardziej zbliżone do krzywych eksperymentalnych,
- 2) Połączona analiza termiczna FSI prawidłowo rejestruje większość zjawisk przepływowych, np. tworzenie się wirów i deformację strumienia cieczy,
- 3) Ze względu na uwzględnienie przepływu płynu, sprzężona analiza termiczna FSI umożliwia bardzo dokładne odwzorowanie wymiany ciepła w ciele stałym,
- 4) Ze względu na uwzględnienie odkształceń cieplnych, sprzężona analiza termiczna FSI umożliwia identyfikację wtórnych efektów oddziaływania ciała stałego na przepływ cieczy,
- 5) W odniesieniu do przejściowych analiz sprzężonego przenoszenia ciepła i cieplnych analiz strukturalnych jedynie analiza sprzężonego przepływu ciepła al-FSI pozwoliła na uchwycenie nieliniowego zjawiska w obszarze dna stalowego pojemnika,
- 6) Analiza sprzężona Thermal-FSI pozwoliła również na dokładniejsze określenie zmian naprężeń. Podczas gdy wartości maksymalnych zredukowanych naprężeń nie różniły się znacząco od tych uzyskanych w analizie Thermal Structural, ich położenie było inne. Jednak w przypadku zmiennych w czasie naprężeń normalnych zauważono zmiany w typie naprężenia.
- 8) Połączona analiza termiczna FSI miała kilkakrotnie dłuższy czas obliczeniowy niż analiza CHT i rząd wielkości dłuższy niż analiza cieplna konstrukcji,
- 9) W analizie Coupled Thermal-FSI krok czasowy ma taką samą wartość dla solvera CFD i solvera CSD. Ze względu na charakterystykę używanego oprogramowania wyniki solvera CSD były zapisywane z każdym krokiem czasowym, co skutkowało bardzo dużymi plikami, których przetwarzanie było problematyczne.

Uzyskane wyniki w ramach pracy doktorskiej należy zatem uznać za bardzo ważne w ramach analiz dotyczących szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego.

Badania przedstawione w pracy obejmujące symulacje za pomocą opracowanych modeli oraz badania eksperymentalne na stanowiskach laboratoryjnych należy ocenić jako bardzo ważne dla dalszego rozwoju metod rejestrowania szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego .

3. Uwagi do pracy

3.1. Uwagi merytoryczne o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

Generalnie z punktu oceny merytorycznej praca jest przygotowana bardzo dobrze. Należy jedynie wymienić drobne uwagi merytoryczne:

1) **Str 19:** Autor pracy powinien przedstawić bardziej szczegółowe opisy dotyczące wielkości / zmiennych (np. ad. wektory \mathbf{nF} , \mathbf{nS}) oraz innych wielkości używanych w opisywanych algorytmach w ramach rozdziału 3 algorytmach.

2) **Str. 20:** czy w równaniu opisującym całkowity strumień ciepła (3.3) powinien być używany wielokropek „... „ ?

3) W podrozdziale 3.1 autor powinien przedstawić dodatkowo szczegółowe podsumowanie przedstawionych algorytmów szczególnie w odniesieniu do ich zastosowań w zakresie analiz dotyczących szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego.

4) W ramach pracy brak jest informacji czy stanowisko było zaprojektowane i wykonane w ramach realizacji ocenianej pracy doktorskiej.

5) W ramach pracy powinna być bardziej szczegółowo opisana integracja danych pomiarowych uzyskanych na stanowisku laboratoryjnym z wynikami symulacji uzyskanymi za pomocą opracowanych w ramach pracy algorytmów.

6) W podsumowaniu powinno być dodatkowe odniesienie na podstawie uzyskanych rezultatów do aspektów wymienionych w podrozdziale 1.1 *Motivation*. Dodatkowo Autor powinien przedstawić do jakich technologii jest szczególnie istotne zastosowanie opracowanych w ramach pracy zaawansowanych metod analitycznych.

3.2. Wybrane uwagi o charakterze redakcyjnym

1) str. 10: W ramach pracy cytowania odnoszą się do numerów z listy „Bibliography” str. 64. Na stronie 10 Autor cytuje [Liu] .

2) str. 19: Tytuł rozdziału 3 str. 19 powinien być bardziej rozszerzony / szczegółowy.

3) Na wykresach (np. str. 26 Fig. 3.2) powinny być zamieszczone tytuły osi.

4) Rysunki 4.6 – 4.9 – brak objaśnień do poszczególnych linii przedstawionych na wykresach.

4. Wniosek końcowy

W ramach recenzji dokonano oceny pracy w zakresie poprawności doboru tytułu rozprawy; układu rozprawy doktorskiej, zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej; zdefiniowanego celu pracy oraz zastosowanych metod badawczych; omówienia wyników badań; potencjału praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań; nieprawidłowości, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej. Ponadto pod uwagę brano czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Uważam, że wszystkie wymienione kryteria kandydat do stopnia doktora spełnia bardzo dobrze.**

Jestem przekonany, że oceniona praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie o stopniach i tytułach naukowych (Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023 poz. 742 ze zm.)). Praca stanowi cenny wkład w ramach metod dotyczących analiz w zakresie szybkich zjawisk nieliniowych przy użyciu sprzężonej analizy numerycznej oddziaływania cieplnego płynu i ciała stałego. Praca zawiera jedynie drobne błędy o charakterze merytorycznym i redakcyjnym. Pracę oceniam bardzo dobrze. Należy dodać, że Kandydat jest współautorem 18 publikacji w czasopismach i materiałach konferencyjnych, w tym 4 artykułów w prestiżowych czasopismach naukowych (*Energy Conversion and Management*; *Case Studies in Thermal Engineering* oraz *Renewable Energy*).

Wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Bartosza Kraszewskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej. Uważam ponadto, że praca doktorska Pana mgr inż. Bartosza Kraszewskiego zasługuje bez wątpienia na wyróżnienie. Stawiam zatem wniosek o wyróżnienie ocenianej pracy doktorskiej.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Stanek
Katedra Techniki Ciepłej
Politechnika Śląska

Wojciech Stanek