

Częstochowa, 27.11.2025 r.

Prof. dr hab. Stanisław Kukla
emeryt – ostatnie zatrudnienie:
Katedra Matematyki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

Opinia

o rozprawie doktorskiej mgr inż. Marii Zadoń pt. „Analiza numeryczna nagrzewania tkanki z wykorzystaniem połączonych modeli przepływu ciepła i dystrybucji tlenu”

Promotor pracy: dr hab. inż. Marek Jasiński

Podstawa formalna wykonania opinii:

- pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej dr hab. inż., prof. PŚ Alicji Piaseckiej-Belkhat z dnia 30.09.2025 r.

1. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska pt. „Analiza numeryczna nagrzewania tkanki z wykorzystaniem połączonych modeli przepływu ciepła i dystrybucji tlenu” zawiera 194 strony i składa się z dwunastu rozdziałów poprzedzonych spisem treści i spisem oznaczeń. Po ostatnim, dwunastym rozdziale w rozprawie zamieszczono bibliografię oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Bibliografia zawiera 222 pozycje, w tym pięć prac, których współautorką jest Doktorantka.

W rozdziale pierwszym Doktorantka przedstawiła wprowadzenie do tematyki rozprawy. W oddzielnym podrozdziale wskazała, że chociaż modele przepływu biociepła i modele dystrybucji tlenu w tkankach biologicznych są prezentowane w literaturze w licznych pracach, to brak jest modelu uwzględniającego występowanie tych dwóch zjawisk jednocześnie. Wypełnienie tak określonej luki badawczej uzasadnia celowość badań podjętych w rozprawie doktorskiej. W kolejnych podrozdziałach Autorka sformułowała cel i tezę pracy, przedstawiła zakres pracy prezentując skrótowo zawartość kolejnych rozdziałów rozprawy oraz omówiła jednostki stosowane w modelach dystrybucji tlenu. Jako cel rozprawy doktorskiej przyjęła

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 01.12.2025
RDJMei255/5112025
nr zał.

stworzenie podstaw analizy zjawisk opisanych przez modele przepływu biociepła i dystrybucji tlenu w tkance biologicznej oraz reakcji fotochemicznych zachodzących podczas terapii fotodynamicznej. Rozprawa doktorska ma wykazać zawarte w tezie pracy stwierdzenie, że „efektywne modelowanie terapii związanych z dostępnością tlenu w tkance wymaga uwzględnienia procesów związanych z przepływem biociepła i dystrybucją tlenu w tkance, a także odpowiednich równań związanych z reakcjami chemicznymi zachodzącymi podczas zabiegu”. Doktorantka nadmieniła, że praca doktorska została wykonana w latach 2021-2025 w ramach Wspólnej Szkoły Doktorskiej prowadzonej w Politechnice Śląskiej.

W pięciu kolejnych rozdziałach rozprawy, Doktorantka zawarła przegląd artykułów naukowych, których tematyka jest związana z tematyką pracy doktorskiej. W rozdziale drugim pracy zawarto przegląd literatury dotyczącej przepływu biociepła. Omówiono efekty termiczne w tkance podczas nagrzewania oraz wpływ impulsu cieplnego na zmiany w komórkach. W podrozdziale pierwszym zaprezentowano równania stosowane w modelowaniu matematycznym przepływu ciepła w tkankach biologicznych. Omawiając równanie Pennesa wyróżniono człon reprezentujący wydajność źródeł ciepła. Wskazano na składowe określające ciepło generowane przez metabolizm komórkowy, ciepło dostarczane w czasie terapii oraz opisujące wymianę ciepła z krwią przepływającą przez tkankę. Zwrócono uwagę na pewne ograniczenia równania Pennesa. Jako rozszerzenie tego modelu Doktorantka przedstawia model matematyczny przewodzenia ciepła, którego podstawą jest równanie Cattaneo-Vernotte. Kolejnym prezentowanym równaniem stosowanym w opisie przewodzenia ciepła w tkance biologicznej jest równanie z dwoma czasami opóźnień. Zwrócono uwagę, wskazując na pozycje literatury, że zarówno model z równaniem Cattaneo-Vernotte jak i model z dwoma czasami opóźnień są często wykorzystywane w analizie transportu ciepła w tkankach biologicznych. Autorka prezentuje także uogólnione równanie z dwoma czasami opóźnień wykorzystywane do opisu transportu ciepła w tkance traktowanej jako ośrodek porowaty. Omawia również warunki brzegowe i początkowe, które uzupełniają równania przewodzenia ciepła w omawianych modelach. Parametry termofizyczne tkanek biologicznych Autorka omawia w kolejnym podrozdziale rozdziału drugiego. Parametry te występują w każdym modelu przewodzenia ciepła i mają istotny wpływ na dokładność matematycznego opisu zmian temperatury tkanki. Autorka prezentuje na rysunkach zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury i zależność objętościowego ciepła właściwego od przewodności cieplnej. Ostatni podrozdział rozdziału drugiego jest poświęcony modelowaniu uszkodzenia tkanki w wyniku działania źródła ciepła powodującego wzrost temperatury tej tkanki. Doktorantka wskazuje na zastosowanie całki Arrheniusa, która pozwala na określenie stopnia zniszczenia

tkanki w wyniku oddziaływania termicznego. Przedstawia zestawienie parametrów całki Arrheniusa dla różnych tkanek podkreślając, że wartości tych parametrów są silnie zależne od rodzaju analizowanej tkanki. Rozdział drugi pracy Autorka kończy omówieniem związku współczynnika perfuzji i całki Arrheniusa.

W rozdziale trzecim rozprawy Doktorantka omówiła oddziaływanie światła na tkankę biologiczną wskazując na mechanizmy fizyczne, które mają znaczenie dla opisu propagacji światła w tkance. Kolejno omawia absorpcję energii świetlnej przez tkankę, rozproszenie światła w tkance, odbicie i załamanie światła. Zwraca uwagę, że światło może wywoływać różne efekty biologiczne w zależności od właściwości wiązki światła i charakterystyki optycznej tkanki. Na podstawie zaprezentowanej analizy wyprowadza wniosek, że precyzyjne dopasowanie parametrów źródła światła do właściwości tkanki ma istotne znaczenie dla uzyskania oczekiwanego efektu w terapii z użyciem wiązki laserowej. W oddzielnym podrozdziale Autorka omawia parametry optyczne tkanki: współczynnik absorpcji, współczynnik rozpraszania oraz współczynnik anizotropii rozpraszania. Przytacza związek zredukowanego współczynnika rozproszenia i całki Arrheniusa. Drugi podrozdział rozdziału trzeciego jest poświęcony modelowaniu matematycznemu propagacji światła w tkankach biologicznych. W modelach propagacji światła w tkankach stosowane jest równanie różniczkowo-całkowe opisujące natężenie promieniowania oraz równanie dyfuzji optycznej. Autorka nadmienia, że w literaturze używane są również inne modele propagacji promieniowania, w szczególności model, w którym wykorzystywana jest metoda Monte Carlo oraz model oparty na metodzie szerokiej wiązki laserowej.

Rozdział czwarty rozprawy jest poświęcony zagadnieniom związanym z dysocjacją oksyhemoglobiny. Doktorantka omawia krzywe dysocjacji oraz parametry, których zmiana powoduje przesunięcia krzywej dysocjacji. Do parametrów zmieniających powinowactwo hemoglobiny do tlenu zalicza ciśnienie parcjale tlenu, ciśnienie parcjale dwutlenku węgla, pH krwi, temperaturę oraz stężenie 2,3-bisfosfoglicernianu (2,3-DPG). W oddzielnych podrozdziałach rozdziału czwartego Autorka przedstawia podstawowe modele pozwalające na zbudowanie krzywych dysocjacji, które występują w literaturze i są wykorzystywane w pracy. Są to modele, które powstawały w różnym czasie w okresie ponad stu ostatnich lat: model Hilla (1910), model Adaira (1925), model Kelmana (1966) oraz model Dasha i Bassingthwaighe'a (2010). Wpływ pH, ciśnienia parcjalego dwutlenku węgla, stężenia 2,3-DPG oraz temperatury na krzywe dysocjacji oksyhemoglobiny przedstawiono na oddzielnych wykresach. Przedstawiono również porównanie krzywych dysocjacji oksyhemoglobiny, które otrzymano na podstawie wymienionych modeli dla ustalonych wartości parametrów. Bardziej

szczegółowe porównanie wyników zaprezentowano na oddzielnych rysunkach w trzech zakresach ciśnienia parcjalnego tlenu i odpowiednio dobranych zakresach saturacji. Wyniki prezentowane na rysunkach są szczegółowo omówione w tekście. Ostatnie dwa podrozdziały dotyczą dysocjacji mioglobiny i dysocjacji dwutlenku węgla. Omówiono mechanizm dysocjacji mioglobiny i mechanizm dysocjacji dwutlenku węgla. Na podstawie literatury przedstawiono matematyczne opisy wysycenia mioglobiny tlenem w zależności od ciśnienia parcjalnego tlenu oraz wysycenia hemoglobiny dwutlenkiem węgla w zależności od ciśnienia parcjalnego dwutlenku węgla.

W rozdziale piątym przedstawiono model Krogha dystrybucji tlenu w obszarze tkanki wyznaczonym przez kapilarę i związany z nią walec Krogha. Omówiono założenia tego modelu, przytoczono równanie ciśnienia parcjalnego w cylindrycznym obszarze tkanki, sformułowano warunki brzegowe oraz podano rozwiązanie analityczne zagadnienia, które w literaturze jest znane jako rozwiązanie Krogha-Erlangera. Ponadto przedstawiono dyskusję roli parametrów występujących w modelu matematycznym w przypadku, gdy warunek brzegowy uwzględnia opór wewnątrznaczyniowy. W dalszej części przeglądu Doktorantka omawia modele zużycia tlenu w tkance. Zwraca uwagę, że wybór odpowiedniego modelu zależy w szczególności od rodzaju reakcji chemicznych, szybkości zużycia tlenu i dostępności tlenu w tkance. Matematyczny opis dystrybucji tlenu w obszarze kapilary stanowią równania różniczkowe, w których uwzględniony jest tlen tworzący oksyhemoglobinę i tlen w postaci wolnych cząsteczek. Natomiast w obszarze tkanki opis stanowi równanie ciśnienia parcjalnego tlenu oraz stężenia utlenowanej mioglobiny. Ostatni podrozdział rozdziału piątego dotyczy zastosowań modelu Krogha. Autorka omawia przykłady zastosowań modelu Krogha prezentowane w artykułach naukowych.

W dalszej części przeglądu literatury, w rozdziale szóstym pracy, Doktorantka prezentuje wyniki dotyczące terapii fotodynamicznej. Jako kluczowe w tego rodzaju terapii wymienia fotouczulacz, światło o odpowiedniej długości fali i tlen obecny w tkance. Wskazuje na możliwe zastosowania terapii fotodynamicznej, jej ograniczenia i omawia procesy zachodzące podczas tej terapii. Zwraca uwagę na możliwe wystąpienie efektu hipertermicznego podczas ekspozycji tkanek na światło. Przedstawia model matematyczny terapii fotodynamicznej, który stanowi sześć sprzężonych równań różniczkowych opisujących koncentracje sześciu form cząsteczek. Uzasadnia wprowadzenie do tego modelu pewnych uproszczeń i przytacza trzy równania różniczkowe stanowiące zredukowany model terapii fotodynamicznej.

W kolejnych pięciu rozdziałach rozprawy Doktorantka przedstawiła wyniki badań własnych. W rozdziale siódmym zaprezentowała analizę zmian ciśnienia parcjalnego tlenu

w tkance pod wpływem impulsu cieplnego. Symulacje numeryczne przeprowadzono na podstawie połączonych modeli przepływu biociepła oraz dystrybucji tlenu z uwzględnieniem oddziaływania zewnętrznego impulsu cieplnego na tkankę. Do badania przepływu biociepła przyjęto obszar tkanki, w którym rozkład temperatury opisuje równanie Pennesa z zadaniem warunkiem początkowym i odpowiednimi warunkami brzegowymi. Dystrybucję tlenu w osiowosymetrycznym walcu Krogha opisuje zagadnienie brzegowe dla kierunku promieniowego i zagadnienie brzegowe dla kierunku osiowego. Rozwiązanie zagadnienia przepływu biociepła otrzymano stosując jawny schemat metody różnic skończonych, natomiast rozkład tlenu wyznaczono stosując metodę strzałów. Omawiając metody rozwiązania Doktorantka przedstawia zaimplementowane w środowisku MATLAB procedury, które umożliwiają wyznaczenie krzywych dysocjacji oksyhemoglobiny. Analizę wyników obliczeń numerycznych poprzedzają zestawienia parametrów przyjętych w analizie przepływu biociepła i parametrów przyjętych w analizie dystrybucji tlenu. Wyniki badań numerycznych prezentowane są na wykresach, pierwsze wykresy przedstawiają rozkład temperatury w rozważanym obszarze tkanki, kolejne przedstawiają rozkład całki Arrcheniusa i współczynnika perfuzji w wybranych chwilach czasu oraz przebiegi temperatury, całki Arrcheniusa i współczynnika perfuzji w wybranych węzłach. Pozostałe wyniki obliczeń numerycznych prezentowane w tym podrozdziale dotyczą rozkładu ciśnienia parcjalnego tlenu w cylindrze Krogha w kierunku promieniowym i w kierunku osiowym. Każdy prezentowany wykres jest omawiany w tekście rozprawy. Oddzielny podrozdział poświęcony jest weryfikacji wyników obliczeń numerycznych. W celu weryfikacji wykorzystano zagadnienie początkowo-brzegowe przewodnictwa ciepła, dla którego znane jest rozwiązanie w postaci analitycznej. Podobne porównanie wyników przeprowadzono dla zagadnienia dystrybucji tlenu w walcu Krogha. Ponadto, uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi przez innych autorów. Stwierdzono, że w większości przypadków uzyskano dobrą zgodność wyników, a niewielkie różnice w porównaniu z wynikami prezentowanymi w literaturze dotyczą dystrybucji tlenu w pobliżu wlotu kapilary.

W rozdziale ósmym rozprawy zaprezentowano analizę wrażliwości modelu dystrybucji tlenu w walcu Krogha. Na wstępie Autorka dokonuje krótkiego przeglądu literatury i uzasadnia potrzebę sformułowania i rozwiązania zadania wrażliwości modelu. W pierwszym podrozdziale przedstawia model matematyczny wyprowadzając równania potrzebne do badania wrażliwości. Następnie omawia metodę numerycznego rozwiązania zagadnienia. W kolejnym podrozdziale przedstawia wyniki obliczeń numerycznych prezentując funkcje wrażliwości na wykresach. Funkcje te pozwalają na określenie wpływu zmian określonych

parametrów na ciśnienie parcjale tlenu. Na rysunkach przedstawiono funkcje wrażliwości współczynnika Krogha, zapotrzebowania na tlen, współczynnika przenoszenia masy, zdolności transportu przez krew, prędkości przepływu krwi w kapilarze, współczynnika Hilla, ciśnienia tlenu odpowiadającego 50% nasycenia hemoglobiny, rozpuszczalności tlenu w tkance i współczynnika dyfuzji tlenu w tkance. Na oddzielnym rysunku przedstawiono rozkład zmian ciśnienia parcjalego tlenu przy jednoczesnej zmianie siedmiu rozważanych parametrów. Prezentowaną analizę uzupełniają wyniki weryfikacji poprawności otrzymanych funkcji wrażliwości. W celu weryfikacji wykorzystano rozwiązanie analityczne otrzymane dla szczególnego przypadku ciśnienia krytycznego. Porównanie wyników analizy wrażliwości dla siedmiu parametrów przedstawiono na wykresach. Przedstawiając w tablicy błędy względne dla analizowanych parametrów Autorka zwraca uwagę, że uzyskane wyniki charakteryzują się bardzo niskim błędem względnym.

Rozdział dziewiąty rozprawy jest poświęcony analizie dystrybucji tlenu z uwzględnieniem czynników przeciwdziałających hipoksji. Autorka podkreśla, że ten rozdział stanowi uzupełnienie przedstawionych wcześniej rozważań dotyczących modelowania transportu tlenu o analizę czynników, które odgrywają szczególną rolę w przeciwdziałaniu hipoksji. W badaniach skupia się na analizie wpływu mioglobiny na dyfuzję i magazynowanie tlenu w tkankach oraz na analizie zjawiska grupowania mitochondriów w kontekście efektywności zaopatrzenia tlenowego. Doktorantka przytacza równanie różniczkowe radialnego transportu tlenu w tkance, w którym jest uwzględnione nasycenie mioglobiny tlenem i zużycie tlenu przez komórki. W celu badania wpływu grupowaniu mitochondriów Autorka wprowadza funkcję, która opisuje zapotrzebowanie na tlen w zależności od ciśnienia parcjalego tlenu. Wyniki obliczeń numerycznych poprzedza tablica wartości parametrów przyjętych w obliczeniach. Na rysunkach przedstawiono wykresy krzywych obrazujące rozkład ciśnienia parcjalego tlenu w kierunku osiowym i promieniowym z uwzględnieniem i bez uwzględnienia grupowania mitochondriów. Na oddzielnym rysunku zobrazowano rozkład ciśnienia parcjalego tlenu w kierunku osiowym i promieniowym z uwzględnieniem i bez uwzględnienia mioglobiny. Weryfikację poprawności obliczeń przeprowadzono przez porównanie uzyskanych wyników z rezultatami prezentowanymi w literaturze.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono analizę niezależnych modeli terapii fotodynamicznej i biociepła. W prezentowanym modelu matematycznym przepływu biociepła uwzględniono funkcje źródła ciepła związane z perfuzją i metabolizmem oraz wpływ promieniowania lasera. W opisie reakcji fototermicznych uwzględniono część nierozproszoną i część rozproszoną promieniowania. Model reakcji fotochemicznych stanowią prezentowane

równania opisujące stężenie tlenu i fotouczulacza. Autorka wyjaśnia powody nieuwzględnienia w modelach zależności parametrów termofizycznych tkanki od temperatury. Przepływ danych podczas symulacji komputerowych przedstawiono w postaci diagramu. Rozwiązanie numeryczne zagadnienia przepływu biociepła otrzymano stosując metodę elementów brzegowych, natomiast równania opisujące rozchodzenia się promieniowania optycznego oraz procesy terapii fotodynamicznej rozwiązano stosując metodę różnic skończonych. Przytoczono postacie dyskretne równań użytych w obliczeniach numerycznych. Prezentację wyników symulacji numerycznych poprzedza tablica wartości parametrów przyjętych w obliczeniach. Na rysunkach przedstawiono wykresy zależności temperatury i uszkodzeń termicznych od promieniowania laserowego, historię temperatury, przebieg całki Arrheniusa i współczynnika perfuzji w wybranych węzłach. Przedstawiono również przebiegi czasowe stężeń tlenu singletowego i trypletowego, fotouczulacza oraz maksymalnej szybkości dostarczania tlenu, a także porównanie stężeń tlenu singletowego i trypletowego po upływie określonego czasu. Weryfikację wyników symulacji wykonano przez porównanie z wynikami otrzymanymi w artykule naukowym cytowanym w pracy.

Rozdział jedenasty jest poświęcony modelowaniu połączonych procesów fototermicznych i fotochemicznych zachodzących w tkance biologicznej podczas terapii fotodynamicznej. Modele matematyczne wykorzystywane w analizie termicznej i podczas terapii fotodynamicznej, prezentowane w rozdziale dziesiątym, zostały w tym rozdziale połączone poprzez zależności związane z perfuzją oraz dostarczaniem tlenu do tkanki. Autorka prezentuje diagram przepływu danych podczas symulacji komputerowych i omawia metody rozwiązania postawionego problemu. Prezentację wyników obliczeń numerycznych w tym rozdziale podzielono na dwie części. W pierwszej części przedstawiono rozkład temperatury w tkance w wybranych chwilach czasu oraz wykresy krzywych obrazujące przebiegi temperatury i całki Arrheniusa, przebiegi współczynnika perfuzji i efektywnego współczynnika rozpraszania, przebiegi maksymalnej szybkości dostarczania tlenu i stężenia tlenu trypletowego, przebiegi stężeń fotouczulacza oraz tlenu singletowego. Prezentowane krzywe otrzymano dla różnych typów kapilar. Kolejne wyniki omawiane w tym rozdziale dotyczą rozkładu maksymalnej szybkości dostarczania tlenu, rozkładu stężenia tlenu trypletowego, rozkładu stężenia fotouczulacza i rozkładu stężenia tlenu singletowego. W oddzielnych podrozdziałach przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych i analizę tych wyników w obszarze walca Krogha. Podkreślono, że w analizie rozważono wiele walców Krogha różniących się wymiarami kapilar, prędkościami przepływu krwi oraz szybkością zużycia tlenu. W celu uwzględnienia w modelu złożonych form kapilar wprowadzono współczynnik krętości, którego

wartość wpływa na lokalną prędkość przepływu krwi w kapilarze. W drugiej części badań numerycznych prezentowanych w rozdziale jedenastym przedstawiono na rysunkach rozkłady ciśnienia parcjalnego tlenu dla wybranych kapilar z podobszaru nowotworowego w kierunku osiowym i w kierunku promieniowym, przebiegi zdolności dostarczania tlenu, rozkłady maksymalnej szybkości dostarczania tlenu oraz przebiegi i rozkłady stężenia tlenu trypletowego, stężenia fotouczulacza oraz tlenu singletowego. Poprawność uzyskanych wyników została potwierdzona przez porównanie z wynikami przedstawionymi w literaturze i porównanie z rozwiązaniami analitycznymi. W ostatnim, dwunastym rozdziale rozprawy Doktorantka sformułowała w sześciu punktach wnioski oraz określiła kierunki dalszych badań.

2. Ocena pracy

Problemy naukowe, które są przedmiotem opiniowanej rozprawy doktorskiej są związane z modelowaniem matematycznym przepływu biociepła i dystrybucji tlenu w tkance biologicznej. Tematyka rozprawy jest interesująca i ważna z praktycznego punktu widzenia, gdyż wyniki uzyskane na podstawie zaproponowanych modeli mogą być użyteczne przy planowaniu leczenia i w trakcie leczenia pacjentów z chorobą nowotworową. Należy zauważyć, że tematyka rozprawy wpisuje się w zakres badań dotyczących przepływu biociepła i niszczenia tkanki nowotworowej, które są prowadzone w Katedrze Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.

Doktorantka prawidłowo określiła zakres badań. Powołując się na literaturę, wskazała na lukę badawczą uzasadniając podjęcie badań w przedstawionym zakresie. Przegląd literatury przedstawiony w pięciu rozdziałach pracy jest szczegółowy, ukierunkowany na problemy prezentowane przez innych autorów, które są związane z przedmiotem rozprawy. Prawie 40% prac przedstawionych w bibliografii zostało opublikowane w ostatnich dziesięciu latach, a wśród nich 45 artykułów zostało opublikowane w czasopismach naukowych w ostatnich pięciu latach. Świadczy to o tym, że prezentowane w rozprawie rozważania teoretyczne i badania numeryczne są aktualne w świetle literatury światowej. Ponadto uważam, że dobór literatury w bibliografii przedstawionej w pracy jest właściwy. Praca jest napisana z dużą starannością, poprawnie pod względem językowym.

Główną część rozprawy doktorskiej stanowi pięć rozdziałów, w których Doktorantka przedstawiła wyniki badań własnych. W każdym z tych rozdziałów przedstawiono model matematyczny analizowanego procesu, omówiono metody rozwiązania, zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych, analizę wyników i podsumowanie. Uważam, że układ pracy

jest odpowiedni, a zamieszczone na końcu głównych rozdziałów podsumowania ułatwiają śledzenie prezentowanych treści. Stwierdzam, że prezentowane modele matematyczne są sformułowane poprawnie, a stosowane metody numeryczne są właściwie dobrane. Poprawność otrzymanych wyników uzasadniono przez porównanie szczególnych przypadków z wynikami prezentowanymi w artykułach naukowych innych autorów lub z wynikami rozwiązań analitycznych. Wyniki obliczeń numerycznych prezentowane na rysunkach i w tablicach są szczegółowo omówione i analizowane. Wnioski sformułowane w ramach analiz są uzasadnione i mogą mieć praktyczne znaczenie.

Według mojej opinii praca napisana jest poprawnie pod względem merytorycznym. Uwzględnienie w opisie matematycznym dystrybucji tlenu w tkance w czasie nagrzewania tkanki, świadczy o oryginalności rozprawy doktorskiej. Rozważania przedstawione w rozprawie wymagały od Autorki zarówno bardzo dobrego przygotowania w zakresie biomechaniki jak i metod numerycznych, a także dobrego przygotowania matematycznego. Sformułowany przez Doktorantkę w pierwszym rozdziale rozprawy cel pracy został w pełni osiągnięty, a sformułowaną tezę pracy potwierdziły prezentowane wyniki symulacji komputerowych. Doktorantka zaprezentowała w rozprawie doktorskiej wiedzę teoretyczną i wykazała się praktycznym wykorzystaniem metod komputerowych, co uzasadnia moją pozytywną ocenę jej umiejętności samodzielnej pracy naukowej.

3. Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską oceniam jednoznacznie pozytywnie, uważam że jest pracą o wysokiej wartości merytorycznej, zawierającą oryginalne badania sformułowanego problemu naukowego, wnoszącą wkład w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marii Zadoń pt. „Analiza numeryczna nagrzewania tkanki z wykorzystaniem połączonych modeli przepływu ciepła i dystrybucji tlenu” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone ustawą Prawo o szkolnictwie wyższymi i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) Art. 187.

Podsumowując, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Marii Zadoń do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

prof. Stanisław Kukla

/podpis odręczny/