

dr hab. inż. Izabela Lubowiecka, prof. nadzw. PG

Gdańsk, 11. 08. 2023 r.

Katedra Mechaniki Budowli  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Politechnika Gdańska  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny SKORUPY

pt. „*Multi-scale modelling of heat and mass transfer in tissues and cells during cryopreservation including interval methods*”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny SKORUPY pt. „*Multi-scale modelling of heat and mass transfer in tissues and cells during cryopreservation including interval methods*”, wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Alicji Piaseckiej-Belkhat, prof. PŚ, opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 26 kwietnia 2023 roku oraz na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak w piśmie z tego samego dnia.

### 2. Ogólna charakterystyka i struktura pracy

Przedstawiona do recenzji praca składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii oraz streszczeń w języku polskim i angielskim i liczy łącznie 200 stron.

Praca dotyczy istotnego problemu niepewności parametrów modeli matematycznych stosowanych w analizie procesu wymiany ciepła i masy podczas kriokonserwacji tkanek i komórek biologicznych. Niepewności te związane są z naturalną różnorodnością materiałów biologicznych oraz doświadczalnymi metodami oznaczania tychże parametrów, co automatycznie obarcza je błędem. Autorka proponuje uwzględnienie zakresów zmienności wybranych parametrów modeli przez zastosowanie w analizie liczb interwałowych i rozmytych.

Pracę rozpoczyna zestawienie użytych symboli i oznaczeń. W rozdziale pierwszym Autorka przedstawia cel i zakres pracy oraz formułuje tezę. Dowiadujemy się także jak złożonym procesem jest kriokonserwacja i jakie zjawiska jej towarzyszą. Stanowi to

Biurowisko Dziekana

wpłynęło dnia 11.08.2023

RDMe.11751511.2023

nr ..... zał. ....

wprowadzenie do dalszych części pracy zawierających modele matematyczne towarzyszących omawianych zjawisk i przykłady obliczeń. Jednocześnie Autorka wskazuje na znaczenie podjętych badań w biologii i medycynie. Tutaj także zwraca się uwagę na „nieprecyzyjny” charakter wielu zmiennych opisujących proces kriokonserwacji wynikający z dużej różnorodności właściwości fizycznych materiału i pewną losowość procesów zachodzących w strukturach biologicznych. Doktorantka wskazuje na możliwość uwzględnienia w modelach wyznaczonych w eksperymencie niepewności tych zmiennych poprzez reprezentacje parametrów z użyciem liczb rozmytych i przedziałowych. Takie podejście wzbogaca reprezentację zjawisk fizycznych poprzez istniejące modele matematyczne. Jest to rozwiązanie różne się od podejścia probabilistycznego, często stosowanego w podobnych zagadnieniach.

Rozdział drugi przedstawia obecny stan wiedzy w zakresie kriokonserwacji i zawiera opis stosowanych w tym procesie technik i materiałów.

Rozdział trzeci przedstawia zagadnienia transportu ciepła i masy, wprowadza podstawowe równania i modele opisujące zachodzące procesy oraz definiuje związane z nimi pojęcia.

Rozdział czwarty wprowadza czytelnika w opis arytmetyki i algebry rozmytej i interwałowej wykorzystywanej w pracy do analizy podjętych zagadnień transportu z uwzględnieniem zakresów zmienności wartości parametrów wykorzystywanych do obliczeń z użyciem wspomnianych wyżej modeli. Zawarte są tam podstawowe działania matematyczne zdefiniowane w zbiorach liczb rozmytych i przedziałowych umożliwiające sformułowanie równań i wzbogacenie wykorzystywanych do obliczeń metod numerycznych.

Rozdziały piąty i szósty to przykłady numeryczne ilustrujące odpowiednio zagadnienie transportu ciepła oraz masy. W równaniach opisujących analizowane zagadnienia uwzględniono parametry o charakterze przedziałowym i rozmytym. Do rozwiązań numerycznych zastosowano schemat różnic skończonych w wersji jawnej i niejawnej, w zależności od analizowanego przypadku. Rozdział piąty opisuje przykłady problemu wymiany biociepła w trzech wariantach. W przykładach pierwszym i trzecim stosuje się podejście rozmyte i interwałowe; w przykładzie drugim, dotyczącym wymiany biociepła z przemianą fazową, pokazano tylko rozwiązanie z zastosowaniem liczb przedziałowych. Uzyskane wyniki zostały porównane i przedyskutowane. Rozdział szósty przedstawia przykłady obliczeń w zagadnieniach transportu masy poprzez dyfuzję, osmozę oraz przepływ masy i ciepła uwzględniający konwekcję i dyfuzję jednocześnie. W przykładach numerycznych ilustrujących analizowane zjawiska, podobnie jak poprzednio, uwzględniono

niepewności parametrów modeli poprzez liczby interwałowe i rozmyte. Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych porównano z wartościami znanymi z literatury, uzyskanymi na drodze doświadczalnej i obliczeniowej. W przykładach numerycznych stosuje się liczby rozmyte tak trapezowe jak i trójkątne oraz przedstawia porównanie uzyskanych wyników.

Przeprowadzone w pracy rozważania teoretyczne i badania numeryczne pozwoliły na sformułowanie, w rozdziale siódmym wniosków końcowych, podsumowanie całości oraz nakreślenie kierunków dalszych badań.

W pracy zawarto także spis cytowanej literatury w postaci 208 pozycji polskich i zagranicznych, w tym także źródeł internetowych. Literatura bardzo dobrze nawiązuje do problematyki poruszanej w pracy. Jest ona związana głównie z problemami kriokonserwacji tkanek i komórek biologicznych, stanowiącymi podstawę podjęcia tematyki, rozważań teoretycznych i numerycznych w zagadnieniach przepływu ciepła i masy a także arytmetyki i algebry zbiorów rozmytych i liczb interwałowych.

Na końcu pracy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim.

### **3. Ocena rozprawy**

Głównym celem pracy jest przedstawienie modeli matematycznych wymiany ciepła i masy w tkance biologicznej podczas procesu kriokonserwacji z uwzględnieniem niepewności parametrów w opisie matematycznym poprzez wprowadzenie liczb przedziałowych i rozmytych. Zaletą takiego podejścia jest bezpośrednie powiązanie niepewności danych wejściowych do modelu z niepewnością wyniku. Ze względu na charakter zachodzących w procesie kriokonserwacji zjawisk, jest to modelowanie wieloskalowe. Do rozwiązania sformułowanego problemu początkowo-brzegowego zastosowano przedziałową i rozmytą metodę różnic skończonych.

Oryginalny element pracy stanowi adaptacja teorii zbiorów rozmytych i liczb interwałowych w zagadnieniach transportu masy i ciepła w procesie kriokonserwacji, choć samo zastosowanie zbiorów rozmytych do uwzględnienia niepewności w analizie mechanicznej było stosowane wcześniej. Takie podejście wydaje się szczególnie ważne, nie tylko w sytuacji dużej różnorodności wartości parametrów modelu opisującego dane zjawisko (tutaj kriokonserwacja) lecz też, gdy mamy do czynienia z małą liczbą próbek, co jest często spotykanym problemem np. w badaniach tkanek ludzkich i stanowi pewną wadę w przypadku stosowania podejścia probabilistycznego. Ponadto, wydaje się ono nie mieć ograniczeń

takich, jak wynikające z rozkładu prawdopodobieństwa w przypadku propagacji niepewności w ujęciu stochastycznym.

Uważam, że podjęcie tematyki poruszanej w pracy jest celowe i ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne. Istnieją bowiem liczne trudności związane z przeprowadzeniem procesu kriokonserwacji materiału biologicznego tak, aby nie uległ uszkodzeniu a zatem zjawisko to wymaga dokładniejszych analiz i lepszego opisu matematycznego. Sam proces kriokonserwacji jest niesłychanie ważny we współczesnej medycynie, nie tylko w związku z możliwością mrożenia i przechowywania komórek zwierzęcych i ludzkich, ale także z uwagi na rozwój inżynierii tkankowej i transplantologii. Wpisuje się to także w aktualne priorytety badań naukowych, tak medycznych jak i technicznych.

Przedstawiona przez Doktorantkę analiza jest jednocześnie kompleksowa i szczegółowa, a podjęta tematyka wymaga wiedzy z zakresu mechaniki, biologii i chemii. Zawiera wprowadzenie teoretyczne do zagadnienia kriokonserwacji, zagadnień zachodzących w tym procesie przepływów masy i ciepła oraz arytmetyki liczb rozmytych i przedziałowych z uwzględnieniem ich w schemacie różnicowym wybranym do analizy numerycznej. Podane rozwiązania są poparte obliczonymi numerycznie przykładami, a wyniki obliczeń poprzez porównanie z danymi z literatury, w tym także doświadczalnymi, co stanowi rodzaj ich walidacji.

Praca jest merytorycznie poprawna a układ rozdziałów oraz ich treść dobrze służy czytelności i logice przeprowadzonych wywodów. Na uwagę zasługuje rozpoczynające pracę zestawienie użytych symboli i oznaczeń, co ułatwia śledzenie przedstawionych rozważań.

#### **4. Uwagi krytyczne**

##### *4.1. Uwagi ogólne*

- 1) W odczuciu recenzenta nie jest jasne jak dobrane zostały zakresy zmienności parametrów fizycznych modeli.

Czy była badana wrażliwość stosowanych modeli na zmiany tych parametrów? Czy zmienność różnych parametrów przyjęta na tym samym poziomie 5% odpowiada fizyce opisanego zjawiska? Czy przedstawiona metodyka może być stosowana przy większych zmiennościach parametrów i jakie są granice jej stosowalności?

- 2) Na jakiej podstawie dobrano typ liczby rozmytej zastosowanej w analizie? Czy ma to związek z rozkładem wartości zmiennej wewnątrz przedziału? Czy można ocenić

który typ liczb rozmytych stosowanych w pracy (trójkątne czy trapezowe) dają lepsze wyniki w analizowanych przykładach i w związku z tym są bardziej wskazane do stosowania?

- 3) W niektórych przykładach wykonano symulacje przy różnych poziomach  $\alpha$ -cięcia liczby rozmytej. Czy w przypadku różnych parametrów a charakterze rozmytym przyjęto takie samo  $\alpha$  w danej symulacji? Co było motywacją przyjęcia wartości  $\alpha$  na danym poziomie? Czy wiązało się to tylko ze zwiększeniem zakresu zmienności, przekładającego się np. na zwiększenie bezpieczeństwa mrożonej próbki?
- 4) Przy omawianiu powolnego zamrażania (*slow freezing*) Autorka zwraca uwagę na długie czasy symulacji, jakie to czasy?
- 5) Czy w kodach obliczeniowych wykorzystano gotowe procedury/pakiety obliczeniowe (jeśli tak, to jakie?), czy wszystkie obliczenia zostały zaimplementowane przez Doktorantkę samodzielnie?
- 6) Czy proponowany sposób uwzględnienia niepewności może być stosowany w formie nieinwazyjnej, bez ingerencji w schemat numeryczny, np. gdy obliczenia prowadzimy z użyciem oprogramowania komercyjnego?

#### 4.2. Uwagi szczegółowe

W tekście stwierdzono drobne błędy edycyjne oraz wymienione poniżej usterki:

- Autorka podaje, że praca składa się z sześciu rozdziałów, podczas gdy już spis treści zawiera ich siedem.
- Na stronie 81 jest odwołanie do równań 5.20 i 5.22; wydaje się, że powinno być do równań 5.19 i 5.21.
- Na stronie 78: różnica w wartościach liczby rozmytej trójkątnej i trapezowej pojawia się przy wartości  $\alpha = 1$  a nie, jak podano, przy  $\alpha = 0$ .
- W równaniach 5.78 zbędny wydaje się indeks  $j$ ; równania dotyczą zagadnienia jednowymiarowego.
- Podanie na wykresach, na których pokazuje się więcej niż jeden wynik (więcej niż dwie krzywe), wprowadzenie legendy ułatwiłoby ich interpretację. Wprawdzie wyjaśnienia znajdują się w tekście, więc nie jest to istotna wada, a jedynie pewne utrudnienie.

Wszystkie opisane powyżej uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej przedstawionej rozprawy ani nie zmieniają pozytywnej opinii Recenzenta.

#### **5. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest przygotowana na wysokim poziomie merytorycznym. Świadczy to o umiejętnościach Pani mgr inż. Anny Skorupy w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz analizy ich wyników. Ponadto świadczy także o wiedzy Autorki z zakresu mechaniki, modelowania matematycznego, metod numerycznych, a także biologii i chemii.

Opiniowana dysertacja dotyczy zagadnień trudnych i ważnych z punktu widzenia techniki i medycyny oraz jasno przedstawia oryginalne podejście do propagacji niepewności, poprzez wykorzystanie liczb interwałowych i rozmytych, w modelowaniu zjawisk towarzyszących procesowi kriokonserwacji materiału biologicznego.

Ponadto, praca przygotowana jest w sposób czytelny i bardzo staranny.

**Podsumowując stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2018, poz. 1668, z dnia 20 lipca 2018 roku) oraz stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Anny Skorupy do publicznej obrony.**



Signed by /  
Podpisano przez:

Izabela Katarzyna  
Lubowiecka

Date / Data:  
2023-08-13 20:53