



Silesian  
University  
of Technology

**SILESIAAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF COMPUTATIONAL  
MECHANICS AND ENGINEERING**

Anna Skorupa, BEng, MSc

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

PhD dissertation

Supervisor:  
Alicja Piasecka-Belkhat, BEng, PhD, DSc

Gliwice 2023

## **Streszczenie**

Niniejsza praca poświęcona jest modelowaniu wielkoskalowemu sprzężonych ze sobą zjawisk, które zachodzą podczas kriokonserwacji. Jest to proces, który polega na spowolnieniu aktywności materiału biologicznego poprzez obniżenie temperatury poniżej temperatury fizjologicznej, a następnie na przywróceniu funkcji kriokonserwowanych tkanek lub komórek, zachowując równocześnie ich podstawowe czynności życiowe. W celu uniknięcia negatywnych skutków procesu stosuje się związki chemiczne zwane krioprotektantami oraz regulację szybkości chłodzenia. W pracy zaprezentowano przykładowe metody kriokonserwacji, takie jak wolne zamrażanie, witrifikacja oraz protokół „śledzenia krzywej likwidus”. Przedstawiono również zjawiska transportowe, takie jak: przepływ ciepła wraz z krystalizacją, przepływ masy w kontekście dyfuzji masy i przepływu cieczy oraz transport osmotyczny. W rozprawie zamieszczono przykładowe symulacje numeryczne poszczególnych zjawisk transportowych. Rozpatrywano przepływ ciepła opisany równaniem Fouriera lub równaniem Pennesa. Rozważano również zagadnienia związane z przemianami fazowymi oraz krystalizacją kryształów lodu, w której stopień krystalizacji oszacowano za pomocą nieizotermicznego równania kinetycznego Boutrona-Mehla. W pracy badano również przepływ masy sprzężony z zagadnieniem termicznym. Wykorzystując równanie konwekcji-dyfuzji lub drugie prawo Ficka w przypadku pominięcia adwekcji, analizowano problem dyfuzji cząsteczek z roztworu kąpielii do roztworu macierzy zewnątrzkomórkowej. W pracy zawarto również opis zjawiska transportu osmotycznego za pomocą modelu dwuparametrycznego, który pozwala oszacować zmianę objętości komórek wywołaną wymianą cząsteczek wody i krioprotektanta pomiędzy roztworami zewnątrz- i wewnątrzkomórkowym. Występujący w pracy model numeryczny oparto na metodzie różnic skończonych uzupełnionej o arytmetykę interwałową oraz rozmytą, w której wykorzystano koncepcję  $\alpha$ -przekrojów. W modelu matematycznym wprowadzono w miejsce parametrów deterministycznych liczby rozmyte oraz interwałowe, biorąc pod uwagę ich nieprecyzyjność. Opracowano algorytmy i autorskie programy komputerowe w środowisku Embarcadero Delphi 10.4 Community Edition.