

Tomasz Topoliński

Bydgoszcz, 07.08.2023 r.

Profesor

Politechnika Bydgoska

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. Tomasza Fąsa

pt. „Narzędzia oceny właściwości mechanicznych tkanki z obrzękiem limfatycznym”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Dziedziny Nauk Inżynieryjno-Technicznych Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy z dnia 05.07.2023 roku oraz pismo – zlecenie Przewodniczącego Rady Dziedziny Nauk Inżynieryjno-Technicznych dr. hab. inż. Mieczysława Cieszki, prof. uczelni, z tego samego dnia na wykonanie tej recenzji.

2. Przedmiot i zawartość rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa mgr. Tomasza Fąsa pt. „Narzędzia oceny właściwości mechanicznych tkanki z obrzękiem limfatycznym”. Na stronie tytułowej znajduje się też podtytuł „Zastosowanie metod: wgłębnikowej z modelem membranowym oraz pletyzmografii powietrznej”. Recenzowana praca doktorska składa się z 10 rozdziałów i ze spisu literatury, obejmującego 256 pozycji piśmiennictwa. Tekst rozprawy liczy łącznie 155 stron. W pracy znajduje się 128 rysunków i 12 tabel.

Rozprawę rozpoczyna, po stronie tytułowej i podziękowaniach oraz spisie treści, wykaz skrótów podzielony na część ogólną oraz części przypisane modelowi membranowemu i pletyzmografii. Dalej znajdują się streszczenia w języku polskim i angielskim wraz ze słowami kluczowymi.

W rozdziale 1 - o tytule „Wstęp” - przedstawiono cel rozprawy jako „propozycję i badanie dwóch narzędzi pomiarowych” możliwych w przyszłości do zastosowania jako narzędzi diagnostycznych w ocenie istnienia i postępów chorób związanych z obrzękiem limfatycznym. Przedstawiono tło i genezę prowadzonych badań. Wskazano też przewidywane możliwości proponowanych narzędzi do oceny postępów leczenia, a zatem skuteczności zastosowanych terapii. Opisano ideę zastosowania metod: wgłębnikowej jako metody o charakterze lokalnym i pletyzmografii powietrznej o charakterze nielokalnym. Przedstawiono w sposób skrótowy

zakres pracy poprzez określenie zawartości poszczególnych rozdziałów. Rozdział ten kończy sformułowanie dwóch hipotez badawczych.

W rozdziale 2 – „Obrzęk limfatyczny” - zawarto cztery podrozdziały, z czego trzy pierwsze to opisy anatomii prawidłowej i patologicznej skóry i układu limfatycznego oraz własności mechanicznej skóry. W podrozdziale 2.4 opisano natomiast formy terapii kompresyjnej manualnej, z wykorzystaniem prostych akcesoriów jak np. pończochy uciskowe – uniwersalne i spersonalizowane czy masażu pneumatycznego o różnym obszarze oddziaływania, głównie na kończyny dolne.

„Metody pomiaru właściwości tkanek, kończyn i nacisku na tkanki” to tytuł **rozdziału 3** recenzowanej pracy. W podrozdziale 3.1 opisano niełatwe pomiary własności mechanicznych tkanek obrzękowych prowadzone w warunkach *in vivo*, *ex vivo* i *in vitro* wskazując na zróżnicowanie, co oczywiste, uzyskanych wyników. W przypadku badań na pacjentach dotyczy to jedynie badań *in vivo* metodami statycznymi i dynamicznymi, w tym także metodami wgłębnikowymi mniej, czy bardziej złożonymi. Opisano także testy z fałdomierzami a także, chyba najpopularniejszy, pitting test. W podrozdziale 3.2 zaprezentowano sposoby pomiaru chwilowej objętości kończyn metodami organoleptycznymi, metodami zanurzeniowymi i optoelektronicznymi i poprzez wykorzystanie skanerów i fotogrametrii. Wskazano, że te ostatnie, z racji rozwoju technik cyfrowych pewno w przyszłości będą miały coraz większe znaczenie. W podrozdziale 3.3 została opisana w ujęciu poszerzonym pletyzmografia, rozumiana jako zbiór metod i narzędzi umożliwiający pomiar objętości ciała lub jego części, także zmian tej objętości w czasie. Zaprezentowano pletyzmografię całego ciała, pletyzmografię tensometryczną i oporową - w znacznej części już zapomnianą, a także powietrzną i wodną. Opisano także videopletyzmografię i pletyzmografię laserową. Rozdział 3 kończy przedstawienie stosowanych metod pomiaru nacisku akcesoriów naciskowych zakładanych na kończynę.

W rozdziale 4 przedstawiono koncepcję badań własnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury Doktorant podjął decyzję o zamodelowaniu badań wgłębnych z wykorzystaniem, do tej pory nie stosowanego w interpretacji testów wgłębnikowych, modelu membranowego teoretycznego i przeprowadzeniu symulacji tego modelu oraz budowie modelu fizycznego wraz z przeprowadzeniem badań eksperymentalnych. Analiza literatury była także podstawą powiązania przez doktoranta pletyzmografii powietrznej z masażem pneumatycznym, często stosowanym w terapii obrzęku limfatycznego, a to doprowadziło do podjęcia decyzji o podjęciu badań teoretycznych, fizycznych i praktycznych dla tego rodzaju pletyzmografii. Wg koncepcji Doktoranta procedura badawcza zawierać będzie: projekt i wykonanie modeli fizycznych, sformułowanie modeli matematycznych, budowę stanowisk pomiarowych, realizację pomiarów i walidację metody.

W rozdziale 5 opisano przygotowanie modeli fizycznych. Uczyniono to na tle literaturowych opisów modeli fizycznych tkanek i modeli organów. Te modele współcześnie tworzone są bardzo często w oparciu o technologie wytwarzania przyrostowe umożliwiające dobre odwzorowanie kształtu i własności mechanicznych. W pracy, jeden z modeli to elastomerowa membrana oparta na powierzchni cieczy o stałej objętości do testów wgłębnikowych, drugi to elastyczny lub sztywny zbiornik z wodą destylowaną o możliwym regulowanym przepływie i kontrolowaną zmianą objętości cieczy do testów pletyzmograficznych. W obu przypadkach elementy mocujące, ustalające i regulacyjne zostały wykonane w technologii druku 3D.

Model matematyczny dla metody wgłębnikowej przedstawiono w **rozdziale 6**. Jest to model zaczerpnięty z literatury, który pozwala określić przemieszczenia membrany o znanych własnościach mechanicznych i geometrii nad nieściśliwą cieczą dla różnych poziomów zagłębienia wgłębnika. Przy wykorzystaniu pakietu Matlab z zastosowaniem algorytmu Rungiego-Kutty Doktorant, będąc współautorem tych obliczeń, zaprezentował ich wyniki w postaci charakterystyk przemieszczeń punktów membrany w funkcji ich odległości od jej

środką dla sytuacji, gdy membrana ślizgała się idealnie po wgłębniku lub gdy takiej możliwości nie było dla trzech różnych poziomów zagłębienia wgłębnika: 2, 6 i 10 mm. Przedstawiono także rozkład naprężeń stycznych i obwodowych oraz charakterystyki przemieszczeń membrany, dodatkowo w funkcji napięcia wstępnego membrany.

Testy na modelu fizycznym i walidację dla metody wgłębnikowej przedstawiono w **rozdziale 7**. Tam też zaprezentowano stanowisko do zadawania wstępnego napięcia membran. Stanowisko to umożliwia uzyskanie pożądanego napięcia membrany, a następnie przygotowanie zespołu mocowania membrany opisanego w rozdziale 6. Następnie na innym stanowisku dokonywano kontrolowanego zagłębienia wgłębnika i pomiarów sił potrzebnej do zagłębienia i ciśnienie cieczy pod membraną. Wyniki porównano z symulacją numeryczną stwierdzając wysoką zgodność, chociaż jak napisał Doktorant uzyskano istotną rozbieżność pomiędzy wartościami modułu Younga i wartościami wstępnego napięcia membrany.

W **rozdziale 8** przedstawiono podstawy teoretyczne pomiarów w pletyzmografii powietrznej. Opisano założenia mankietu powietrznego na model kończyny i trzy fazy dokonania pomiaru:

- napełnianie mankietu (dętki) powietrzem, co pociąga za sobą zmiany liczby molekuł powietrza, jego ciśnienia, objętości i temperatury, a także spadek objętości kończyny,
- pomiar właściwy, kiedy zakończono pompowanie powietrza i objętość kończyny maleje,
- faza kalibracji, kiedy prowadzi się kontrolowane zmiany objętości mankietu.

Przeprowadzono dyskusję związaną z działaniem pletyzmografu z przyjęciem jego działania w warunkach izotermicznych dla gazu doskonałego i modelu stanu gazu rzeczywistego opisanego równaniem van der Waalsa, opis kalibracji pletyzmografu i propozycję uwzględnienia zmian temperatury. Przeanalizowano także uproszczony model mechaniczny fragmentu kończyny z mankiem kompresyjnym wskazując na zmienności przemieszczeń i naprężeń w kierunku promieniowym.

W **rozdziale 9** przedstawiono implementację rozważań teoretycznych związanych z pletyzmografem do badań z modelami fizycznymi. Najpierw opisano dobór systemu pomiarowego i testy poszczególnych jego elementów, w tym mankietu kompresyjnego, czujników nacisku i czujnika temperatury. Dalej zaprezentowano trzy wersje urządzenia pomiarowego: z kalibracją manualną bez pomiaru temperatury, z kalibracją manualną i pomiarem temperatury oraz z kalibracją automatyczną i zbiornikiem na sprężone powietrze, wszystko sterowane przez mikrokontroler z modułem przekaźników i z wynikami wysyłanymi do komputera. Cykl pracy urządzeń odpowiadał rozważaniom z rozdziału 8. Opisano w nim przeprowadzone testy skuteczności pracy zbudowanych układów pomiarowych nazwane przez Doktoranta testami stacjonarnymi i niestacjonarnymi. Pozwoliły one na uzyskanie charakterystyk zmian ciśnienia i temperatury, a zatem i zmian objętości pod mankiem w czasie. Analiza zgodności uzyskanych wyników z pomiarami bezpośrednimi pozwoliła sformułować Doktorantowi stwierdzenie zawarte na końcu tego rozdziału, że „przedstawiony w najbardziej zaawansowanej wersji prototyp pletyzmografu okazał się przydatny... dla określenia zmian objętości pod mankiem” i „dla estymacji właściwości mechanicznych tkanki podskórnej”.

Rozdział 10 to „Podsumowanie i wnioski”. W podsumowaniu zawarto parę zdań na temat działań związanych ze sposobami wykorzystania modelu membranowego do budowy i funkcjonowania urządzenia wgłębnikowego do oceny charakterystyki naciskowej lokalnej diagnostyki obrzęku limfatycznego. Omówiono także drugie urządzenie – pletyzmograf powietrzny o oryginalnym systemie pomiarowym, który sprawdzono na modelach fizycznych i kończynie Doktoranta jako pozwalający na pomiar zmian objętości obiektu typu kończyna w wyniku ucisku i określenia jej mechanicznych własności powierzchniowych. W części drugiej tego rozdziału sformułowano 10 wniosków o charakterze poznawczym, użytecznym i co do

przyszłych badań. Rozdział został zakończony jednozdaniowym stwierdzeniem o potwierdzeniu postawionych w rozdziale 1 tez naukowych.

Pracę doktorską kończy **spis literatury**. Spis ten zawiera 256 pozycji z czego 16 jest polskojęzycznych, pozostałe, to przede wszystkim anglojęzyczne. Ponad 200 pozycji to literatura medyczna czy okołomedyczna, pozostałe to literatura z zakresu mechaniki, mechatroniki, informatyki czy statystyki. Numeracja literatury została utworzona wg kryterium pojawienia się w rozprawie. Na 256 pozycji jest 31 pozycji internetowych. Z przytaczanych prac 53 to pozycje drukowane w XX wieku. Jedna z nich ma rok wydania 1950, a kilkanaście pozycji jest z lat 60- i 70-tych.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

a. Ocena doboru tematu i postawionych celów rozprawy

Analizując dostępną literaturę oraz najnowsze doniesienia ze świata pogranicza techniki i medycyny trudno nie zauważyć ciągłego postępu w diagnostyce i terapii. Ta ostatnia rozumiana jako działalność medyczna, której celem jest przywrócenie równowagi organizmu człowieka dotkniętego chorobą lub kalectwem albo poprawieniu jego jakości życia, za pomocą odpowiednich zabiegów medycznych, pielęgnacyjnych czy rehabilitacyjnych, z użyciem stosownych leków, materiałów, urządzeń albo ćwiczeń. Ogromne znaczenie w tym postępie stanowią nowe i udoskonalane urządzenia diagnostyczne i terapeutyczne, często bardzo złożone i wykorzystujące skomplikowane procesy fizykochemiczne, często nadszpiewanie proste lub o niedużej złożoności a skuteczne i pomocne dla lekarza i pacjenta. I w ten ostatni obszar dla chorób związanych z obrzękiem limfatycznym wpisują się rozwiązania proponowane przez Doktoranta. Zwykle w recenzjach w tym miejscu oceniający zawierają stwierdzenie czy rozpatrywany problem badawczy jest aktualny. Tu mógłby ktoś zasiać wątpliwość w odpowiedzi na analizy statystyk publikowanych np. przez Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego, według którego w Polsce najistotniejszymi przyczynami zgonów za rok 2021 są: choroby układu krążenia 34,8%, nowotwory 18%, Covid 17,9%, objawy chorobowe i przyczyny nieznane 7,1% czy choroby układu oddechowego 5,4% itd. I trudno tu poszukiwać przyczyn określonych jako obrzęki limfatyczne. Ale wystarczy popatrzeć na zdjęcia osób dotkniętych tym zaburzeniem zdrowotnym w znacznym stopniu, publikowane w ocenianej pracy, i powiązać je z informacją podaną na stronie 14, iż „długotrwały obrzęk nóg (także limfatyczny) jest powszechnie występującym problem zdrowotnym”...i...”niezależnie od płci, odsetek”... chorych to...”7-20%”. A jak ważnym i aktualnym problemem zdrowotnym jest ten, który akurat każdego z nas dziś dotyczy - wiemy najlepiej sami.

Zatem próbę analizy teoretycznej dwóch metod służących do diagnostyki obrzęku limfatycznego z ich weryfikacją fizyczną z wykorzystaniem zaprojektowanych urządzeń, którą Doktorant podjął się w opiniowanej rozprawie uznaję za aktualny problem badawczy, ważny z punktu widzenia naukowego, ale również ważny z przewidywanego, przyszłego zastosowania praktycznego.

Uwzględniając powyższe za pozytywną cechę rozprawy należy uznać postawienie przez Doktoranta interesujących i oryginalnych celów do rozwiązania, osadzonych w problematyce naukowej inżynierii mechanicznej, ale równocześnie w realiach praktyki inżynierskiej.

b. Hipotezy rozprawy

Doktorant zawarł w rozprawie dwie hipotezy badawcze o następującym brzmieniu:

- model membranowy może stanowić podstawę do wyznaczenia modułu Younga cienkiej powłoki, rozpiętej nad ciałem nieściśliwym, którego moduł Younga jest znacznie niższy (stanowi to przybliżenie modelu skóry na tkance podskórnej wypełnionej płynem),
- możliwa jest konstrukcja urządzenia, realizującego pletyzmograficzny pomiar zmian objętości przy ciśnieniach właściwych dla terapii uciskowej (do 120mmHg).

Obie hipotezy są akceptowalne.

c. Ocena naukowej wartości rozprawy

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta uznaje:

- krytyczne przeanalizowanie dużej ilości dostępnych pozycji literatury naukowo-badawczej krajowej i zagranicznej, z którego wyniknęła potrzeba sformułowania własnych problemów badawczych, celów i zakresu oraz tez rozprawy,
- wykorzystanie rozwiązań teoretycznych literaturowych i własnych opisu odkształcenia cienkiej membrany na nieściśliwej cieczy i ich oryginalna weryfikacja w eksperymencie na przygotowanym i wytworzonym modelu fizycznym, w tym świadomość ograniczeń proponowanego rozwiązania,
- budowę oryginalnego, prostego, o dużej funkcjonalności i znacznym zakresie realizacji eksperymentu, stanowiska do prób wciskania wgłębnika,
- propozycję zweryfikowanego w oparciu o modele fizyczne pletyzmografu powietrznego automatycznie mierzącego objętość fragmentu kończyny i jej, tj. objętości, zmiany w czasie,
- możliwość estymacji, przy zastosowaniu pletyzmografu, własności mechanicznych tkanki podskórnej,
- budowę oryginalnego, prostego, o dużej funkcjonalności i znacznym zakresie realizacji eksperymentu, stanowiska do realizacji pletyzmografii powietrznej,
- wskazanie dla obu zaproponowanych urządzeń możliwości wykorzystania w diagnostyce medycznej,
- łatwość skojarzeń wiedzy teoretycznej z wielu obszarów z wiedzą inżynierską, co skutkowało komplementarnością dokonanych przez Doktoranta analiz w przyjętym przez Niego zakresie.

4. Uwagi krytyczne

a. Uwagi merytoryczne

Poniżej wskazano na dyskusyjne lub ujemne strony rozprawy:

- tytuł pracy sugeruje, że Doktorant opracował narzędzia i je zweryfikował jako przyrządy diagnostyczne w chorobach z występowaniem obrzęku kończyn zwłaszcza dolnych, w tym obrzęku limfatycznego a tak do końca się nie stało; brak uniwersalności

przyrządów w odniesieniu do stanu chorobowego tworzyłoby konieczność określenia zakresów ich stosowalności - a to wymagałoby innych obszarów badań weryfikacyjnych, w których własności badanych materiałów były zbliżone do własności tkanek zmienionych chorobowo, a także by proponowane urządzenia dopasowywały się do złożoności i różnorodności rzeczywistej geometrii kończyn zdeformowanych przez obrzęk,

- ocena odkształcenia tkanek skórnej i podskórnej daje możliwość przeprowadzenia jedynie oceny fenomenologicznej obrzęku kończyn,
- ucieczka od problemów etycznych w badaniach przedklinicznych czy klinicznych, kilkakrotnie wskazywana przez autora, nie rozwiązuje problemu co do rzeczywistych - spodziewanych zalet opisanych i zweryfikowanych metod w wykorzystaniu w diagnostyce,
- uznaję, iż fakty i działania przedstawione w pracy to dorobek Doktoranta, chociaż na str. 8 znajduje się informacja, że praca stanowi dokumentację współpracy – jednoosobowej? – z zespołem medycznym; w wykazie literatury jest tylko jedna praca współautorska Doktoranta i to z 2018 a zatem opracowana przed tym rokiem - być może brakuje po prostu właściwych informacji.

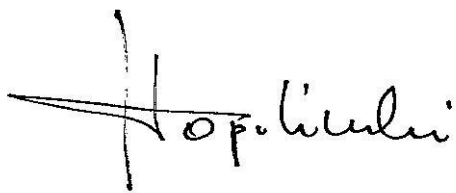
b. Uwagi dotyczące redakcji rozprawy

Rozprawa napisana poprawnie z prawidłowym układem tekstu, na dobrym poziomie merytorycznym. Ważniejsze uwagi dotyczące redakcji rozprawy są następujące:

- w całej pracy personifikuje się podmioty martwe; np. model kładzie nacisk, rozdział prezentuje itd. itp.; a przecież to autor w rozdziale prezentuje, w rozdziale omawia czy na rysunku przedstawiono itd. itp.,
- w języku polskim większość zdań rozpoczyna się od wielkiej litery i kończy kropką; w środku zdania wielką literą piszemy np.: nazwy miast, krajów, imiona i nazwiska..., a zatem przy wymienianiu nie powinniśmy używać wielkich liter, jak przykładowo na str.11,
- przyjęcie numeracji wg kolejności ich występowania w pracy jest kłopotliwe, zwłaszcza przy dużej liczbie tych pozycji – np. na str. 21 po pozycji [86] występuje pozycja [106],
- w czterech miejscach rozprawy – podpisy pod rysunkami na str. 20, 22, 27 i 54 - mój mózg odmówił posłuszeństwa,
- występują dość liczne błędy literowe (tzw. literówki) i braki czy nadmiar znaków edycyjnych, np. 4₈, 5₁₇, 5₇, 12¹², 15₁, 16³, 30⁶, 97_{7,4,3} i szereg innych,
- niektóre rysunki są o nie najlepszej czytelności z opisami w języku angielskim,
- opierając się na analizie uznanego edytora PWN i czasopism Springer'a numeracja rozdziałów i podrozdziałów powinna wyglądać jak np. 1. Wstęp, 2. Obrzęk limfatyczny, 2.1. Układ limfatyczny, odpowiednio numeracja rysunków np. rys.1.1. i tabel np. Tabela 7.2.,
- bardzo rzadko używane jest numerowanie rysunków w podrozdziałach przy ich niedużych objętościach, co prowadzi do ich nieczytelności.

5. Wniosek końcowe

Stwierdzam, na tle przeprowadzonych analiz przedstawionych w niniejszej recenzji, uwzględniających osiągnięcia i uwagi krytyczne, że rozprawa mgr. Tomasza Fąsa o tytule „Narzędzia oceny właściwości mechanicznych tkanki z obrzękiem limfatycznym” spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku co do rozpraw doktorskich, jest usytuowana w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna i może być dopuszczona do publicznej obrony.



Prof. L. L. L.