

Warszawa, lipiec 2026 r.

Prof. dr hab. inż. Janusz LEWANDOWSKI
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Roksany Rolka

pt.: „Akumulacja energii w magazynach wykorzystujących materiały zmiennofazowe
z domieszkami”

Przedmiotem rozważań w pracy doktorskiej mgr inż. Pauliny Rolka są zagadnienia związane z poszukiwaniem materiałów zmiennofazowych dla celów magazynowania ciepła charakteryzujących się możliwie dużą jednostkową pojemnością cieplną, możliwie dużą przewodnością cieplną determinującą czas ładowania i rozładowania magazynu. Głównym celem jaki stawia sobie Doktorantka jest *„poprawa przewodnictwa cieplnego niskotemperaturowych organicznych materiałów zmiennofazowych”*, a postawiona w pracy teza brzmi: *„Dodanie wybranych domieszek do niskotemperaturowych organicznych materiałów zmiennofazowych spowoduje zwiększenie przewodnictwa cieplnego powstałej w ten sposób mieszaniny”*. W tej postawionej w sposób bardzo ogólny tezie brakuje uzupełniania, że Doktorantce udało się wykazać, iż dwa szczegółowo przebadane dodatki: nanografen oraz nanocząstki tlenku tytanu pozwalają uzyskać pożądaną cechę mieszaniny wypełniającej magazyn ciepła.

Problem magazynowanie ciepła, jest jednym z kluczowych dla realizacji cywilizacyjnego celu postawionego przez kraje Unii Europejskiej, jakim jest osiągnięcie w horyzoncie 2050 roku stanu gospodarki neutralnej klimatycznie. Nie ulega zatem wątpliwości, że opiniowana praca dotyczy problemu technicznego, który ciągle jeszcze nie jest w pełni rozwiązany. Spełnia zatem podstawowe wymaganie jakie stawiane jest rozprawom doktorskim.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska zawarta jest na 164 stronach, obejmuje dziewięć rozdziałów oraz wykaz oznaczeń skrótów i akronimów, streszczenia w języku polskim oraz angielskim, bibliografię zawierającą 180 pozycji literatury, zestawienie publikacji Autorki rozprawy i Jej pozostałego dorobku zawodowego oraz 4 załączniki.

1. Omówienie treści rozprawy

W pierwszym rozdziale pracy doktorskiej, zatytułowanym „*Wstęp*”, Doktorantka porusza dwa wątki. Pierwszy to ogólne informacje na temat perspektyw gospodarki światowej w horyzoncie 2050 roku. Punktem wyjścia dla tych rozważań jest Raport Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPPC) z 2021 roku. Na tle wniosków z tego raportu Doktorantka przedstawiła główne założenia i cele polityki klimatyczno - energetycznej krajów UE, zarówno końcowy jakim jest klimatycznie neutralna gospodarka w horyzoncie 2025 roku, jak i etapowy związany przede wszystkim ze zmniejszeniem emisji dwutlenku węgla do 2030 roku. Osiągnięcie tych celów wymaga oczywiście szybkie ograniczania spalania paliw kopalnych i wzrostu wykorzystania odnawialnych źródeł energii w zakresie wytwarzanie energii elektrycznej, przemyśle, gospodarstwach domowych i transporcie. Na tym tle omawiany jest drugi wątek związany z rolą jakie powinny spełniać w realizacji tych działań magazyny ciepła, ze szczególnym uwzględnieniem magazynów wykorzystujących materiały zmiennofazowe, których poprawa własności istotnych z punktu widzenia magazynowania, a przede wszystkim ładowania i rozładowywania, to główny obszar badań zrealizowanych w ramach doktoratu.

Rozdział 2 poświęcony jest omówieniu dotychczasowego stanu wiedzy, obejmującym takie zagadnienia jak: sposoby magazynowania ciepła, charakterystyka materiałów zmiennofazowych, zastosowania materiałów zmiennofazowych, konstrukcje zmiennofazowych magazynów energii oraz ich ograniczenia w zastosowaniach i eksploatacji. Omówiono takie zagadnienia jak: właściwości materiałów zmiennofazowych, rodzaje i ich klasyfikacja oraz zastosowanie. Szczególną uwagę poświęcono działaniom prowadzącym do zwiększenia przewodności cieplnej materiałów zmiennofazowych poprzez dokładanie do nich domieszek w postaci nanomateriałów o wysokiej przewodności cieplnej. W obszarze takich działań zlokalizowana jest tematyka badawcza pracy. Bardzo wysoko oceniam ten rozdział pracy i uważam, że jest dowodem na umiejętność Doktorantki przedstawienia w skondensowanej i jednocześnie pełnej formie stanu wiedzy w zakresie istotnym dla udokumentowania rangi problemów rozwiązywanych w ramach pracy doktorskiej.

Rozdział trzeci poświęcony został określeniu celu i zakresu pracy oraz sformułowania jej głównej tezy, która została przytoczona już w niniejszej opinii.

Zdefiniowany przez Doktorantkę zakres pracy obejmuje przeprowadzenie badań dotyczących 9 problemów związanych z udowodnieniem postawionej tezy. Zwróci tu należy

uwagę na badania o charakterze aplikacyjnym jakim jest „*opracowanie wytycznych konstrukcyjnych dla magazynów energii z materiałami zmiennofazowymi z domieszkami*”.

W rozdziale 4 Doktorantka omawia zastosowaną metodykę badawczą, którym najistotniejszym elementem jest porównywanie na tych samych stanowiskach badawczych, tymi samymi metodami pomiarowymi własności materiałów zmiennofazowych (PCM) z ich odpowiednikami z dodatkami nanocząstek materiałów o wysokiej przewodności (NEPCM).

Autorka na początku rozdziału opisuje i omawia szczegółowo stosowane w literaturze metody do określenia pojemności cieplnej (w tym ciepła utajonego), temperatury przemiany fazowej i przewodności cieplnej bazowych materiałów zmiennofazowych oraz z domieszkami, po czym rozważając zalety i wady poszczególnych metod pomiarowych, dokonuje ich wyboru i przedstawia jego uzasadnienie. Doktorantka decyduje się na użycie metody różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) jako głównej metody do charakteryzacji pojemności cieplnej oraz temperaturowego zakresu przemiany fazowej badanych bazowych i domieszkowanych materiałów zmiennofazowych, kierując się możliwością prowadzenia pomiarów w szerokim zakresie temperatur i wyborem zadawanych szybkości ogrzewania/chłodzenia, który przekłada się na czas trwania pomiarów, szczególnie istotny w kontekście uniknięcia sedymentacji nanocząstek z materiału zmiennofazowego. Ponadto stosuje metodę T-history do walidacji otrzymanych wyników dla bazowych materiałów. Natomiast do charakteryzacji współczynnika przewodności cieplnej bazowych i domieszkowanych materiałów postanawia użyć metodę gorącego drutu, jako metodę stosowaną przy sporządzaniu specyfikacji materiałów zmiennofazowych przez ich producentów (w ramach certyfikacji znakiem jakości RAL Phase Change Materials) oraz metodę rurowego aparatu Poensgena, pozwalającą na pomiar w stanie ustalonym i dotychczas nie stosowaną do charakteryzacji materiałów zmiennofazowych. Następnie prezentuje bardzo szczegółowo budowę stanowisk badawczych i specjalistycznych przyrządów pomiarowych wykorzystywanych w badaniach. Do badań z użyciem metody DSC stosuje komercyjny przyrząd pomiarowy DSC Q2000 firmy TA Instruments, a z użyciem metody T-history stanowisko pomiarowe składające się m. in. z dwóch autorskich komór termicznych zawierających w swojej budowie ogniwa Peltiera. W badaniach przewodności cieplnej z użyciem metody gorącego drutu stosuje komercyjny analizator pomiarowy TEMPOS firmy METER Group wraz z sondami KS-3 i SH-3, zaś z użyciem metody rurowego aparatu Poensgena stanowisko badawcze z urządzeniem pomiarowym własnej konstrukcji. W obu przypadkach Doktorantka wykorzystuje własne, dedykowane oprogramowanie przygotowane w środowisku LabVIEW.

W rozdziale 5 Autorka przedstawia wyniki pomiarów eksperymentalnych i analizę badań własności termofizycznych bazowych niskotemperaturowych komercyjnych materiałów zmiennofazowych bazujących na parafinie i wosku - RT22 HC i RT28 HC, aby dokładnie określić ich własności przed dodaniem domieszek. Przedstawia otrzymane w pomiarach charakterystyki przepływu ciepła w funkcji temperatury (metoda DSC), profile temperatur w funkcji czasu (metoda T-history), rozkłady entalpii w zależności od temperatury (metoda T-history), rozkłady akumulacji energii w funkcji temperatury dla procesów ogrzewania i chłodzenia. Porównuje wyniki pomiarów pojemności cieplnej i temperatury przemiany fazowej otrzymane w rezultacie badań własnych metodami T-history i DSC wraz z wynikami z trójwarstwowego kalorymetru (3LC) przedstawianymi przez producenta. Uwzględniając niepewności pomiarów wskazuje na uzyskanie dobrej zgodności między trzema różnymi metodami pomiarowymi i stwierdza, że „materiał RT22 HC w zakresie temperatur 14 – 29°C może zmagazynować średnio ok. 185 kJ/kg, a średnia zmagazynowana energia w RT28 HC w zakresie temperatur 21 – 36°C wynosi ok. 244 kJ/kg. Przy czym w przypadku materiału RT28 HC w badaniach eksperymentalnych przy użyciu DSC i THM uzyskano niższą pojemność cieplną w procesie chłodzenia niż deklarowana przez producenta, na co mogło wpłynąć zaobserwowane zjawisko przechłodzenia”. Badania z użyciem metody DSC i T-history wykazały występowanie przechłodzenia w materiale RT28 HC, na co Doktorantka zwróciła uwagę i opisała w pracy. Ponadto stwierdzono, że „przemiana fazowa RT22 HC odbywa się w zakresie temperatur 18 – 23°C, a RT28 HC w zakresie temperatur 25 – 31°C”. W oparciu o dobrą zgodność wyników pomiarów między metodami Autorka przyjęła, że metoda DSC oraz zastosowana szybkość nagrzewania/chłodzenia (1 K/min) jest odpowiednia i może być użyta w dalszym etapie badań do określenia własności termofizycznych materiałów zmiennofazowych z domieszkami. Natomiast pomiary współczynnika przewodności cieplnej z użyciem komercyjnego urządzenia TEMPOS (metoda gorącego drutu) i badania w stanie ustalonym przy użyciu urządzenia własnej konstrukcji (metoda rurowego aparatu Poensgena) wykazały dobrą zgodność i pozwoliły ustalić, że „przewodność cieplna RT22 HC w stanie stałym wynosi 0,14 – 0,18 W/m·K, natomiast w cieczy ok. 0,12 W/m·K. Z kolei przewodność cieplna RT 28 HC w ciele stałym wynosi 0,31 – 0,33 W/m·K, a w cieczy 0,13 – 0,2 W/m·K”. W oparciu o powyższe wyniki Doktorantka stwierdza, że metoda rurowego aparatu Poensgena może być stosowana w pomiarach przewodności cieplnej materiałów zmiennofazowych oraz sugeruje jej użycie w dalszych badaniach domieszkowanych materiałów zmiennofazowych.

Najważniejszy dla oceny omawianej rozprawy jest rozdział 6 zawierający wyniki badań materiałów zmiennofazowych po dodaniu nanocząstek grafenu lub tlenku tytanu. Zawiera on dokładny opis sposobu przygotowania metodą dwuetapową materiałów zmiennofazowych z wybranymi domieszkami (nanocząstki grafenu lub tlenku tytanu (IV), plus surfaktant SDBS). Doktorantka dokonała wyboru domieszek w oparciu o przeprowadzony przegląd literatury i analizę poprawy przewodności cieplnej innych materiałów zmiennofazowych z domieszkami, prezentowaną w rozdziale 2 rozprawy. Jak wskazuje nanocząstki grafenu zostały wybrane, gdyż wśród domieszek węglowych zapewniają najwyższą poprawę współczynnika przewodności cieplnej, a nanocząstki tlenku tytanu (IV) spośród nanocząstek tlenków metali. Następnie prezentuje wstępne badania przewodności cieplnej realizowane przy skorzystaniu z metody rurowego aparatu Poesngena i badania własności termofizycznych wykonywane z użyciem metody T-history dla próbek materiału RT22 HC domieszkowanego samymi nanocząstkami grafenu, w efekcie których dostrzega problem sedymentacji domieszek z mieszaniny, gdy znajduje się ona w stanie ciekłym. Dostrzega konieczność podjęcia działań zapobiegających sedymentacji nanocząstek z domieszkowanych materiałów zmiennofazowych. Dlatego po przeglądzie aktualnych metod poprawy stabilności domieszkowanych materiałów zmiennofazowych oraz roztworów koloidalnych w literaturze i analizy ich efektów, decyduje się na zastawanie działań niwelujących ten negatywny efekt - użycie dwóch połączonych metod: sonikacji (stosowania ultradźwięków) i dodania środków powierzchniowo czynnych (surfaktantów) przy przygotowaniu mieszanin. W dalszych badaniach stosuje dodatkową domieszkę - dodecylobenzenosulfonian sodu (SDBS, surfaktant), gdyż jak uzasadnia „był on najczęściej stosowany przez innych badaczy, jako stabilizator nano-domieszkowanych PCM o podobnym zakresie temperatury przemiany fazowej”. Autorka opisuje sposób przygotowania próbek domieszkowanych materiałów zmiennofazowych po zastosowaniu działań naprawczych i prezentuje powstałe próbki zachowujące stabilność w temperaturze pokojowej. Następnie przedstawia już docelowe badania własności termofizycznych z zastosowaniem metody DSC i pomiary przewodności cieplnej z użyciem urządzenia własnej konstrukcji (metoda rurowego aparatu Poensgena) i analizatora TEMPOS (metoda gorącego drutu) dla próbek RT22 HC z domieszkami grafenu lub tlenku tytanu (IV) o frakcji masowej 1%, 3%, 5% plus surfaktant SDBS lub próbek RT28 HC z domieszkami grafenu o frakcji masowej 1%, 3%, 5% plus surfaktant SDBS. Rezultatem badań jest osiągnięcie zwiększonej przewodności cieplnej wraz ze wzrostem zawartości masowej zastosowanych domieszek i wykazanie, że „dodając do materiału RT22 HC

domieszki grafenu i SDBS osiąga się wyższą poprawę przewodności cieplnej niż stosując domieszki tlenku tytanu (IV) i SDBS”. „Po dodaniu nanocząstek grafenu (o udziale masowym z zakresu 1 – 5%) i SDBS do RT22 HC osiągnięto od 3 do ok. 5 razy większą przewodność cieplną w ciele stałym i od 2 do ok. 2,5 razy wyższą w cieczy, w odniesieniu do przewodności cieplnej bazowego RT22 HC”, a dodając nanocząstki „grafenu (o udziale masowym z zakresu 1 – 5%) i SDBS do RT28 HC osiągnięto wzrost przewodności cieplnej od 1,2 do 1,8 razy w ciele stałym i od 1,1 do ok. 1,4 razy w cieczy, w odniesieniu do przewodności cieplnej bazowego RT28 HC”. Ponadto Doktorantka prezentuje wpływ domieszek na zmniejszenie pojemności cieplnej badanych materiałów – przedstawia opracowane charakterystyki częściowej i całkowitej zmagazynowanej energii w zależności od udziału wagowego użytych domieszek z których stwierdza, że „domieszki nanocząstek grafenu (o zawartości masowej 1 – 5%) i SDBS zmniejszyły całkowitą zmagazynowaną energię RT22 HC o 9 – 28 %, a domieszki tlenku tytanu (IV) (o zawartości masowej z zakresu 1 – 5%) i SDBS o 16 – 24%”. Natomiast „domieszki nanocząstek grafenu (o zawartości masowej 1 – 5%) i SDBS spowodowały obniżenie całkowitej zmagazynowanej energii dla RT28 HC o 8 – 32 %”. Dodatkowo bazując na opracowanej charakterystyce współczynnika przewodności cieplnej w funkcji pojemności cieplnej i udziału wagowego domieszek wskazuje, kompromis pomiędzy zwiększeniem przewodności cieplnej a redukcją pojemności cieplnej, który dla materiałów na bazie RT22 HC i RT28 HC zaproponowano dla dodatku domieszek nanocząstek grafenu o 1% udziale masowym i SDBS. Przy czym zaznacza, że indywidualne rozwiązania konstrukcyjne magazynów mogą wymagać innych parametrów domieszek, co wymaga podjęcia oddzielnych analiz dla konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych.

W kolejnym rozdziale 7 zaprezentowano badania wizualne stabilności zawiesiny w domieszkowanych materiałach zmiennofazowych, w których wykazano problem sedymentacji oraz osiadania domieszek z mieszaniny. Badania obejmowały obserwacje w jaki sposób dochodzi do powstawania rozwarstwienia w mieszaninie w procesach ogrzewania i chłodzenia w próbkach materiałów z i bez stabilizatora (SDBS). W wyniku przeprowadzonych badań wizualnych Autorka stwierdza, że „podczas ogrzewania próbki NEPCM ze stabilizatorem przemiana fazowa powoduje, że stabilizator (surfaktant, w tym przypadku SDBS) przestaje działać lub jego działanie staje się ograniczone.” Dlatego najważniejszym wnioskiem z przeprowadzonych w tym rozdziale badań jest stwierdzenie, że przemiana fazowa powoduje osłabienie działania stabilizatora (surfaktantu), co powoduje, że domieszkowany materiał zmiennofazowy „mimo dodatku SDBS nie jest stabilny w wielu cyklach przemian fazowych, co ogranicza jego przydatność w magazynach energii”.

W rozdziale 8 Doktorantka skupiła się na przedstawieniu nowej metody przeciwdziałania skutkom sedymentacji domieszek z ich mieszanin z materiałów zmiennofazowych. Zaproponowała zastosowanie procesu barbotażu (procesu bąbelkowania). Przedstawiła przygotowane stanowisko pomiarowe i wyniki wstępnie przeprowadzonych badań z użyciem procesu barbotażu do porywania sedymentu (opadniętych wcześniej domieszek z mieszaniny z materiałem zmiennofazowym) z dna zbiornika i ponownego ich wymieszania z bazowym materiałem zmiennofazowym. Dokonując wstępnych badań eksperymentalnie sprawdziła skuteczność zaproponowanej metody, a następnie opracowało wytyczne konstrukcyjne dla magazynów energii z domieszkowanymi materiałami zmiennofazowymi. Rozdział 8 kończy przedstawienie propozycji nowej konstrukcji magazynu energii cieplnej.

Rozdział 9 zawiera podsumowanie, w którym przedstawiono najważniejsze wyniki i wnioski z realizowanych prac badawczych oraz określono wkład w nie autorki rozprawy. Doktorantka odniosła się do tezy i celu rozprawy, przedstawiając dowody potwierdzające osiągnięcie zakładanego celu i udowodnienie zdefiniowanej tezy.

Ogólna ocena pracy

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Pauliny Roksany Rolka to w „epoce modelowania matematycznego” rzadki przypadek pracy eksperymentalnej, na dodatek zrealizowanej w sposób kompleksowy, a rozprawa może być przykładem wzorcowego raportu z takich prac. Już to stwierdzenie mogłoby być uznane za na tyle pozytywną ocenę, że stanowi rekomendację dopuszczania pracy do publicznej obrony. Tak zwięzła ocena byłaby jednak niestosowna, wobec olbrzymiego nakładu pracy jaką Doktorantka włożyła w swoje badania. Koniecznie jest podkreślenie, że prezentowane w rozprawie doktorskiej badania mają charakter nowatorski pod kilkoma względami. Mianowicie Doktorantka zaprezentowała nowe zastosowanie metody rurowego aparatu Poensgena do pomiarów współczynnika przewodności cieplnej w stanie stałym i w cieczy dla bazowych oraz domieszkowanych materiałów zmiennofazowych (RT22 HC i RT28HC). Przy czym badania eksperymentalne przeprowadziła posługując się urządzeniem pomiarowym autorskiej konstrukcji. Otrzymane wyniki metodą rurowego aparatu Poesngena walidowała z wynikami pomiarów uzyskanymi przy zastosowaniu komercyjnego analizatora TEMPOS, działającego w oparciu o metodą gorącego drutu, uzyskując dobrą zgodność.

Doktorantka opracowała i zaprezentowała charakterystyki współczynnika przewodności cieplnej, a także pojemności cieplnej w zależności od udziału masowego domieszek – nanocząstek grafenu i SDBS lub nanocząstek tlenku tytanu (IV) i SDBS –

dodawanych do materiałów RT22 HC i RT28 HC. Także przedstawiła charakterystyki - funkcji pojemności cieplnej, pozwalające na wyznaczenie optymalnej zawartości wybranych domieszek, jaką należy zastosować do materiałów RT22 HC i RT28 HC w kontekście ich zastosowania jako materiałów akumulujących w zmiennofazowych magazynach energii.

Również nowością są prezentowane w rozprawie doktorskiej badania dotyczące stabilności mieszanin niskotemperaturowych PCMs z domieszkami, potwierdzające problem sedimentacji nanocząstek i występowanie rozwarstwienia nanocząstek po pewnym czasie, nawet w przypadku zastosowania dodatkowo stabilizatora (surfaktantu SDBS). W konsekwencji prowadzące do zaniku poprawy własności termofizycznych badanych materiałów z biegiem czasu i wykluczające użycie tych materiałów bez wprowadzenia dodatkowych rozwiązań konstrukcyjnych w magazynach energii. Doktorantka opierając się o rezultaty przeprowadzonych w rozprawie badań eksperymentalnych, analiz i badań wizualnych zaproponowała zastosowanie procesu barbotażu jako nowej metody do zapobiegania skutkom sedimentacji.

Ta jednoznacznie pozytywna ocena powoduje, że przedstawione niżej uwagi krytyczne mają już zdecydowanie drugorzędne znaczenie i zamieszczono je poniżej tylko dla dochowania tradycji recenzji doktorskiej.

Uwagi krytyczne

1. Z przeprowadzonych prac wynika, co potwierdza w swoich komentarzach w rozprawie Doktorantka, uzyskane wyniki mają charakter szczególny, dotyczą dwóch konkretnych materiałów zmiennofazowych i dwóch domieszek. Praca ma więc charakter „case study” i należy się z tym pogodzić. Trzeba jednak wyrazić żal, że Autorka nie podjęła próby choć częściowego uogólnienia uzyskanych wyników.
2. W przypadku mieszanin problemem jest nie tylko sedimentacja, ale też starzenie się materiału, co w przypadku magazynu ciepła ma istotne znaczenie – może ten problem (jeśli istnieje ?) powinien być wskazany jako kierunek dalszych badań ?
3. W pisaniu raportów naukowych, a takim jest rozprawa doktorska pojawia się problem na ile możemy używać w nim języka popularnego czy technicznego, a na ile ma to być język zgodny z pojęciami fizyki. Takie wątpliwości pojawiają się w przypadku „energii cieplnej”. Zgodnie z fizyką taka forma energii nie istnieje. Ciepło jest sposobem przekazywania energii podobnie jak praca.

Wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom, które są podstawą do ubiegania się o stopień naukowy doktora, w szczególności:

- w pracy podjęto oryginalny problem badawczy z istotnymi elementami o charakterze poznawczym i naukowym,
- praca zawiera wszystkie elementy pracy naukowej od postawienia hipotezy badawczej do wykazania jej poprawności,
- wyczerpująco opisuje stan wiedzy w przedmiocie rozprawy i jednoznacznie wskazuje własne osiągnięcia,
- rozprawa została przygotowana zgodnie ze zasadami pisania raportów z badań wykonywanych w ramach pracy doktorskiej,
- Doktorantka wykazała umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników badań.

Z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Roksany Rolka pt.: „Akumulacja energii w magazynach wykorzystujących materiały zmiennofazowe z domieszkami” spełnia wymogi ustawowe i w oparciu o powyższe stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Wniosek o wyróżnienie rozprawy

Rozprawę doktorską Pani mgr inż. Pauliny Rolki uważam za wzór pracy doktorskiej o pomiarowym charakterze. Skala problemu, rozległy zakres badań, skuteczne rozwiązanie trudnego wielowymiarowego problemu o charakterze zarówno praktycznym jak i poznawczym znacząco przekracza zakres typowych prac doktorskich. Wszystkie te elementy upoważniają mnie do podstawienia formalnego wniosku o wyróżnienie rozprawy.

