



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

prof. dr hab. Alina Dudkowiak

 WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I FIZYKI TECHNICZNEJ
 ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań
 tel.: +48 (61) 665 3181
 e-mail: alina.dudkowiak@put.poznan.pl
 www.phys.put.poznan.pl


Poznań, dnia 1 kwietnia 2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. Mohsena Dehbashi

 pt. *“Predicting and Analyzing the Thermal and Electrical Properties of Materials Using Advanced Machine Learning Models”*

wykonanej pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. inż. Jerzego Bodzenty i promotora pomocniczego dr inż. Justyny Juszczyk-Synowiec w Zakładzie Fizyki Stosowanej, Instytutu Fizyki, Politechniki Śląskiej

Nowoczesne technologie stawiają wymagania w zakresie miniaturyzacji i integracji urządzeń oraz wykorzystywania w ich konstrukcji cienkich warstw o pożądanych właściwościach termicznych, elektrycznych lub optycznych. Dobrze zdefiniowane parametry warstw decydują o sprawności i stabilnym działaniu różnych układów, w tym do przechowywania energii lub opto- czy mikroelektronicznych. Badania opisane w rozprawie doktorskiej skupiają się na opracowaniu metodologii pozwalającej na precyzyjniejsze wyznaczanie parametrów przewodnictwa cieplnego lub elektrycznego materiałów, w szczególności cienkich warstw, na podstawie wyników eksperymentalnych wspomaganymi zaawansowanymi modelami uczenia maszynowego. Podjęta tematyka jest istotna nie tylko w kontekście prowadzenia badań z pogranicza dyscyplin naukowych (w tym inżynierii materiałowej i nauk fizycznych), ale także ze względu na zapotrzebowanie i konieczność charakteryzacji układów w skali nano- i submikronowej, umożliwiające optymalne wykorzystanie ich potencjału.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana w formie monografii naukowej, liczącej 104 strony. Układ rozprawy doktorskiej nie jest standardowy, tradycyjnie na początku powinna znajdować się strona tytułowa, zamiast spisu rozdziałów informujących o jej zawartości. Na stronach 6-21, mgr Mohsen Dehbashi zawarł wprowadzenie i przegląd literaturowy, podzielone na dwie części, w których opisano metody wykorzystywane do określania parametrów przewodnictwa termicznego lub elektrycznego materiałów. W dalszych rozdziałach znajdujemy opis wyzwań związanych z precyzyjnym określeniem właściwości funkcjonalnych układów niskowymiarowych i cienkich warstw. Mgr Mohsen Dehbashi w rozdziale „Motywacja i hipoteza”

Biuro Dziekana

 wpłynęło dnia 07.04.2026
 RD JNA 197151/2026
 nr zał.

przedstawił, między innymi, opis problemu i argumenty przemawiające za koniecznością przeprowadzenia badań w ramach wybranej tematyki oraz stawiane cele i hipotezy. W rozdziałach 5 i 7 została szeroko omówiona zastosowana metodologia i procedury wyznaczania właściwości termicznych i elektrycznych badanych układów. Uzyskane wyniki i ich dyskusję mgr Mohsen Dehbashi zaprezentował w zwięzły sposób odpowiednio, w rozdziale 6 (9 stron (s. 45-53)) i rozdziale 8 (15 stron (s. 61-75)), a w rozdziale 9 – wnioski dotyczące możliwości przewidywania i analizowania przewodnictwa cieplnego lub elektrycznego cienkich warstw na podstawie zaproponowanych przez niego podejść oraz perspektywy dalszego rozwijania badań w tym obszarze. W dalszej części rozprawy doktorskiej zamieszczono załączniki A-C, zawierające informacje uzupełniające, w tym o różnych aktywnościach i osiągnięciach mgr. Mohsena Dehbashi. Całość kończy spis literatury zawierający 74 pozycje.

Mgr Mohsen Dehbashi, w rozprawie doktorskiej zaprezentował interesujące, autorskie podejście wyznaczania przewodności cieplnej materiałów wykorzystując metodę skaningowej mikroskopii termicznej (S_{Th}M) w połączeniu z modelami uczenia maszynowego i technikami normalizacji.

W modzie kontaktowym, metoda S_{Th}M pozwala na jednoczesne pomiary sygnału termiczno-topograficznego w identycznych warunkach. Kompleksowa analiza danych umożliwia ustalenie zależności pomiędzy morfologią powierzchni, a zachowaniem termicznym badanego materiału, co daje wgląd w mechanizmy rządzące przenoszeniem ciepła w małej skali. Ze względu na wpływ topografii powierzchni cienkiej warstwy i kontaktu ostrze-próbka na pomiary właściwości termicznych, poprawna interpretacja danych pozyskiwanych tą metoda może być utrudniona, dlatego Autor zaproponował wykorzystanie metody uczenia maszynowego (regresję Random Forest) do precyzyjnego przewidywania właściwości termicznych badanych materiałów. Wprowadził także procedurę normalizacji (odniesioną do kwarcu) i współczynnik grubości podłoża. Umożliwiło to wyeliminowanie ograniczeń analizy wyników S_{Th}M (zmienności mikro- i nanostrukturalnej (topograficznej) powierzchni oraz wpływu podłoża), a w konsekwencji uzyskanie wyników przewodności termicznej lepszej jakości (precyzyjnych i wiarygodnych).

Modele wykorzystane przez Autora zostały przetestowane na odpowiednich zestawach danych i ilościowo zwalidowane, obejmując właściwości termiczne materiałów referencyjnych i wartości literaturowe. Osiągnięta dokładność predykcyjna świadczy, że zaproponowane przez mgr. Mohsena Dehbashi podejście w dużym stopniu eliminuje ograniczenia instrumentalne i wskazuje na korzyści wynikające ze zintegrowania techniki eksperymentalnej z modelowaniem obliczeniowym.

Połączenie eksperymentu, oferującego wysoką rozdzielczość przestrzenną (lokalnie wyznaczoną topografię powierzchni) i możliwość badania lokalnych właściwości termicznych (analizę dyssypacji

ciepła) w skali nano, oraz technik uczenia maszynowego pozwala na ograniczenie artefaktów (zmiennosc kontaktu i morfologii) wpływających na rzeczywiste wartości parametrów, określających transport ciepła w cienkich warstwach (o grubości mniejszej niż 100 nm). Wydaje się, że pomimo złożoności charakteryzacji cienkich warstw, zaproponowane podejście można wykorzystać do przewidywania i analizy przewodnictwa cieplnego dla szerokiego zakresu materiałów. Jednocześnie, Autor wskazuje potencjalne możliwości dalszego rozwijania i udoskonalania metodologii, co być może pozwoli na standaryzowaną i skalowalną termiczną charakteryzację funkcjonalnych cienkich warstw.

W rozprawie doktorskiej, mgr Mohsen Dehbashi podjął również próbę zastosowania symulacji numerycznych do określenia wpływu różnych parametrów na dokładność pomiarów przewodnictwa elektrycznego. Do pomiarów przewodności elektrycznej cienkich warstw o dowolnym kształcie i dowolnej grubości (w tym nieregularnych cienkich warstw) wykorzystuje się metodę van der Pauwa (sondy czterostrzowej). Jednakże, metoda ta jest czuła na geometrię próbki i efekty krawędziowe, które mogą wpływać na wyniki przewodności elektrycznej, dlatego konieczne jest ich skorygowanie. Autor zaproponował rozwiązanie, w którym metoda elementów skończonych (FEM) i uczenie maszynowe zostały niezależnie zastosowane do korygowania zniekształceń geometrycznych próbki oraz związanych z umiejscowieniem sondy. Założył, że uwzględnienie skończonych wymiarów próbki, zmiennego położenia sondy oraz efektów krawędziowych powinno umożliwić uzyskanie wiarygodnych wartości przewodności elektrycznej, parametru charakterystycznego dla badanego materiału.

Przeprowadzone badania obejmowały porównanie wyników symulacji numerycznych i eksperymentalnych przewodności elektrycznej, otrzymanych dla 4 różnych cienkich warstw tlenku indowo-cynowego (ITO) oraz 5 próbek metalicznych (Cu, W, Ni, Fe, Sn) i sondy w konfiguracji kwadratowej (cztery ostrza rozmieszczone w wierzchołkach kwadratu, na dowolnym obszarze na powierzchni próbki). Ponadto, mgr Mohsen Dehbashi stworzył 3-wymiarowy model wykorzystujący FEM do zwalidowania wyników eksperymentalnych i porównał uzyskane wartości z rzeczywistą wartością przewodności elektrycznej używaną jako parametr modelu.

Na podstawie przeprowadzonych badań mgr Mohsen Dehbashi wnioskował, że zastosowane podejście wykorzystujące model bazujący na FEM pozwala wprowadzić ograniczenia geometryczne (eliminujące efekty wynikające z nieidealnych warunków pomiarowych metodą sondy czterostrzowej i próbki) oraz uzyskać skorygowane wyniki przewodności elektrycznej w dużym stopniu zgodne z wartościami rzeczywistymi. Pokazał również, że algorytmy uczenia maszynowego,

na podstawie dostarczonych danych empirycznych, pozwalają bezpośrednio przewidywać poprawne wartości przewodności elektrycznej w różnych warunkach eksperymentalnych.

Wydaje się, że proponowany przez Autora sposób przewidywania, weryfikacji i walidacji wyników pokazuje korzyści wynikające ze stosowania symulacji numerycznych i metod sztucznej inteligencji w analizie wyników eksperymentalnych, w tym szczególnym przypadku, określania przewodności elektrycznej. Zaprezentowane podejście ma potencjał, który może być wykorzystany nie tylko w dziedzinie nauk-inżynieryjno-technicznych, w tym w badaniach materiałów, ale również w różnych dziedzinach naukowych lub w obszarze gospodarki czy techniki.

Opisane w rozprawie doktorskiej zagadnienia dotyczące podjętej tematyki badawczej zostały dobrze opracowane, z uwzględnieniem odpowiednio dobranych odnośników literaturowych, co wskazuje na ogólną wiedzę teoretyczną mgr. Mohsena Dehbashi w dyscyplinie inżynieria materiałowa, w szczególności w zakresie metod wykorzystywanych do wyznaczania termicznych i elektrycznych właściwości cienkich warstw. Zaproponowana koncepcja badań, zastosowana metodologia, odpowiedni dobór metod i modeli obliczeniowych oraz interpretacja wyników pokazały korzyści wynikające z wykorzystania metod uczenia maszynowego do analizy wyników eksperymentalnych, zwłaszcza w przypadku pomiarów właściwości termicznych próbek. Zawarty w rozprawie doktorskiej, rozdział dotyczący opisu wyników i ich dyskusji nie jest zbyt obszerny, ale końcowe wnioski zostały poprawnie sformułowane.

Wydaje się, że wszystkie z założonych w rozprawie doktorskiej celów badawczych zostały zrealizowane. Część wyników zawartych w rozprawie doktorskiej lub związanych z jej tematyką została opublikowana w czasopiśmie z bazy JCR (*International Journal of Heat and Mass Transfer i Materials*) oraz w rozdziale monografii, jak również prezentowana na konferencji międzynarodowej. Dodatkowo, mgr Mohsen Dehbashi jest współautorem 3 publikacji indeksowanych w bazie Scopus, które nie są powiązane z tematyką rozprawy doktorskiej.

Podczas publicznej obrony chciałabym, żeby Autor odniósł się do pewnych kwestii, które pojawiły się podczas czytania rozprawy:

- 1) poza wprowadzeniem dodatkowych danych referencyjnych, w jaki jeszcze sposób można byłoby rozwinąć proponowaną przez Pana metodologię wyznaczania przewodności termicznej?
- 2) nadal mamy pewne rozbieżności pomiędzy skorygowanymi a rzeczywistymi wartościami przewodności termicznej, czy mógłby Pan oszacować o ile można byłoby je skorygować po udoskonaleniu metodologii?
- 3) czy może Pan określić jakie są ograniczenia dla stosowania metod uczenia maszynowego w inżynierii materiałowej, w tym do charakteryzacji cienkich warstw?

- 4) jak można wyjaśnić (str. 89) 100-krotnie wyższe wartości przewodności elektrycznej próbki „ITO (a) at Rotation 1” w porównaniu z innymi próbkami ITO?
- 5) str. 65, niestety Tabela 8-3 nie została przywołana w tekście.

Zgodnie z zapisami art. 187 ust. 4 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.) „Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim”. W związku z powyższym, należałoby uzupełnić rozprawę doktorską mgr. Mohsena Dehbashi funkcjonującą w obiegu i przekazaną do biblioteki o wymagane ustawowo streszczenia.

Podsumowując, rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną mgr. Mohsena Dehbashi w zakresie inżynierii i informatyki materiałowej, w szczególności doskonalenia metod charakteryzowania cienkich warstw. Przeprowadzona analiza wyników i wnioski sformułowane na ich podstawie, wskazują na oryginalne rozwiązanie problemu oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez mgr. Mohsena Dehbashi. Rozprawa doktorska wnosi nowe informacje do nauki związane z wykorzystaniem zawansowanych modeli uczenia maszynowego do przewidywania i analizy właściwości cieplnych lub elektrycznych materiałów.

Biorąc pod uwagę powyższą opinię stwierdzam, że przekazana do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1-3 ww. Ustawy, dlatego też przedkładam wniosek o przyjęcie mojej rekomendacji i dopuszczenie pana mgr. Mohsena Dehbashi do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w zakresie dyscypliny inżynieria materiałowa.

Prof. Alina Dudkowiak

/podpis odręczny/