

Dr hab. inż. Sebastian Molin, prof. PG
Katedra Inżynierii Materiałów Funkcjonalnych
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

25-09-2023

Recenzja rozprawy doktorskiej

“Modelowanie mikrostrukturalnych uwarunkowań procesów zachodzących w porowatych elektrodach węglanowego ogniwa paliwowego”

Autorstwa mgr. inż. Samiha Haj Ibrahima

Wstęp

Niniejsza recenzja powstała na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa na Politechnice Warszawskiej na podstawie uchwały z dnia 26 maja 2023.

Praca powstała na Politechnice Warszawskiej, w dyscyplinie naukowej – inżynieria materiałowa, w dziedzinie nauk – nauki inżynieryjno-techniczne. Promotorem recenzowanej rozprawy jest dr hab. inż. Tomasz Wejrzanowski, prof. uczelni, pracownik Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Tematyka badawcza oraz tytuł rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy aspektów związanych z rozwojem porowatych elektrod węglanowych ogniwa paliwowych (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell), pracujących w zakresie wysokich temperatur (>600°C). W dobie światowego kryzysu energetycznego oraz problemów z globalnym ociepleniem, nowoczesne, wydajne źródła energii, do których niewątpliwie należą ogniwa MCFC, stanowią ważne technologie o strategicznym znaczeniu. Praca bardzo dobrze wpisuje się więc w bieżące potrzeby, wyznaczone chociażby przez tzw. Cele Zrównoważonego Rozwoju ONZ (Sustainable Development Goals), w szczególności celu numer 7 – dostępnej/taniej i czystej energii (SDG7 – Affordable and Clean Energy).



Tytuł rozprawy: „*Modelowanie mikrostrukturalnych uwarunkowań procesów zachodzących w porowatych elektrodach węglanowego ogniwa paliwowego*” dobrze definiuje cele oraz rzeczywistą zawartość pracy, chociaż autor pracuje tylko z jedną wybraną elektrodą (katodą), stąd też tytuł mógł być jeszcze bardziej uszczegółowiony.

Motywacja do wykonania pracy

Grupa promotora doktoranta, prof. Tomasza Wejrzanowskiego, wraz z prof. Jarosławem Milewskim z Instytutu Techniki Ciepłej, prowadzą badania w tematyce MCFC od wielu lat, w związku z czym prace doktoranta były kontynuacją wybranych, interesujących zagadnień badawczych. Bardzo dobrym pomysłem było więc dołączenie do rozprawy Rozdziału 4 – „Geneza pracy”, opisu stanu badań prowadzonego przez własną grupę, zastanego przez doktoranta, który ułatwia recenzentowi/czytelnikom orientację w dokonaniach grupy oraz indywidualnym wkładzie doktoranta. Rozdział ten także opisuje i motywuje ogólną potrzebę wykonania bardziej dokładnych badań wpływu mikrostruktury na wydajność ogniwa MCFC.

Opis poszczególnych części pracy wraz z uwagami

Praca została napisana w tradycyjny sposób - niezależnego i samostanowiącego dzieła, tj. nie jako zbiór publikacji naukowych. Praca zawiera łącznie 115 stron (wliczając spis literatury), przy czym właściwa treść rozprawy zaczyna się od strony 5 (Streszczenie). Merytoryczna część rozprawy liczy więc 110 stron.

Rozdział 1 – Wstęp

Ogólny wstęp do tematyki ogniwa paliwowych, zajmujący 13 stron, zawierający niezbędne informacje by się łatwiej odnaleźć w późniejszych częściach pracy. Przedstawiono ogólną zasadę działania ogniwa paliwowych ze zwróceniem uwagi na mechanizmy strat, zwięźle przedstawiono historię ogniwa paliwowych, zwracając szczególną uwagę na wysokotemperaturowe ogniwa, tj. tlenkowe ogniwa paliwowe SOFC oraz węglanowe ogniwa paliwowe MCFC, które trochę szerzej zostały opisane w kolejnym podrozdziale.

Rozdział ten wprowadza pojęcia ogniwa paliwowych, ich najważniejsze cechy oraz rodzaje. Treść rozdziału jest bardzo dobrze dobrana oraz jego objętość także wydaje się dobrze dopasowana.

W kilku miejscach zauważyć można pewne niedociągnięcia czy uproszczenia, np. brak odnośnika do Rysunku 5. Do uproszczeń zaliczyłbym stwierdzenie, że „przewodność jonowa tlenu YSZ

występuje w wysokiej temperaturze (600-1000°C)”, strona 19. Oczywiście przewodność jonowa występuje w całym zakresie temperatur, tylko w różnej wielkości.

Rozdział 2 – Węglanowe ogniwa paliwowe

Bardziej szczegółowe wprowadzenie w najważniejsze aspekty węglanowych ogniw paliwowych zawarto na kolejnych 16 stronach pracy. W kolejnych podrozdziałach opisano kolejno wpływ składu chemicznego katody (podrozdział 2.1) oraz mikrostruktury (podrozdział 2.2) na działanie węglanowego ogniwa paliwowego. Zawarto tutaj istotne informacje. Jednak w szczególności w punkcie dotyczącym składu chemicznego, chciałbym zapytać, czy nie jest istotna także rola struktury krystalicznej czy rodzaju przewodności materiałów elektrodowych? Wyróżnienie samego składu chemicznego wydaje się uproszczeniem. Wymienione materiały elektrodowe (GSC, LSCF) są perowskitami o mieszanym przewodnictwie jonowo-elektronowym. Także nie do końca jasne jest dla mnie, dlaczego dla pozostałych materiałów elektrodowych występują różnice w wartościach napięcia OCV?

Na stronie 29, przy opisie dodatków do katod, pada stwierdzenie „wartość przewodności elektrycznej wynosząca 0.8 S cm^{-1} , wymagana do prawidłowej pracy węglanowego ogniwa paliwowego” – chciałbym zapytać skąd taka konkretna wartość? Jakiej jest jej uzasadnienie czy znaczenie w praktyce?

W części dotyczącej wpływu mikrostruktury opisano najważniejsze pojęcia, które dalej przewijają się jako główna tematyka pracy, tj. wpływ porowatości, powierzchni właściwej oraz rozkładu wielkości porów na działanie ogniwa węglanowego. Jest to część napisana w bardzo opisowy sposób. Moim zdaniem dobrze byłoby tutaj zawrzeć trochę bardziej sformalizowane informacje, może jakieś prawa czy wzory opisujące zależności między wielkościami. Jednym z podstawowych zagadnień, często poruszanych w ramach rozwoju elektrod tlenkowych ogniw paliwowych, jest np. model Bruggemana dotyczący właściwości materiałów kompozytowych. Czy ten lub podobne modele mają szerokie zastosowanie w przypadku ogniw MCFC?

W ostatnim podrozdziale 2.3 opisano ważne zagadnienia ekonomiczne, zaznaczając dotychczasowe wdrożenie ogniw MCFC w dużej skali (60 MW). W szczególności, rozdział jasno wskazuje, iż dużą zaletą ogniw MCFC są „tanie” materiały elektrodowe, przez co technologia może w dłuższej perspektywie znaleźć szerokie zastosowanie, gdzie np. ogniwa PEM wykazują ograniczenia związane ze stosowaniem trudno dostępnych materiałów.

Treść Rozdziału 2 została dobrze przemyślana, jest spójna i daje czytelnikowi dobry ogłęd zagadnień materiałowych oraz strukturalnych węglanowych ogniw paliwowych.

Rozdział 3 – Modelowanie mikrostruktury i zjawisk w materiałach o otwartej porowatości

Rozdział o objętości 14 stron, wprowadza w zagadnienia modelowania właściwości funkcjonalnych materiałów. Jako iż moja własna wiedza w zakresie modelowania materiałów i elektrod jest znikoma, uważam, że jest to bardzo wartościowy rozdział i dobrze wprowadza w najważniejsze zagadnienia. W rozdziale opisano metody tworzenia geometrii oraz metody matematyczne modelowania: metodę elementów skończonych (MES), metodę elementów dyskretnych (DEM), oraz metodę objętości skończonych (MOS). Wskazano zastosowania konkretnych metod wraz z przykładami, ich zalety oraz ograniczenia.

Rozdział 4 – Geneza pracy

Niejako jako podsumowanie przeglądu literatury i wstępnych rozdziałów w pracy zawarto krótki (3 strony), ale bardzo ważny rozdział wskazujący przyczyny powstania (genezę) pracy. Autor rozprawy wskazuje „*dominująca teoria reakcji zachodzącej na punktach potrójnych nie jest w stanie wyjaśnić w pełni relacji między mikrostrukturą elektrod, a końcową wydajnością ogniw MCFC ich wykorzystujących*”. W tym miejscu mam pewien niedosyt, gdyż wcześniej nie pojawia się zagadnienie punktów potrójnych, które rzeczywiście stanowią najważniejsze elektrochemiczne miejsce.

Autor wskazuje także, iż „niezbędne jest przeprowadzenie badań, które pozwolą wyjaśnić zależności między mikrostrukturą elektrod, a zjawiskami w nich zachodzącymi w trakcie pracy ogniwa”. To zagadnienie jest dobrze zbudowane na przedstawionym we wstępnych rozdziałach opisie stanu wiedzy.

W trzech punktach przedstawiono motywację do przeprowadzenia badań zawartych w pracy. Wydają się one także dobrze uargumentowane i dobrze sprecyzowane.

W tej części brakuje mi jednak odniesienia literaturowego. Jak zauważa autor: „skupienie się na katodzie jest związane z faktem, że doniesienia literaturowe wskazują właśnie na ten element pod kątem możliwego poprawienia wydajności całego urządzenia” – brakuje tutaj odnośników literaturowych, których prosiłbym o przedstawienie.

Miejscami, treść rozdziału (np. zakres trzech technik i następujące zdania) wydaje się lepiej pasować do kolejnego rozdziału, ale rozumiem trudność w odpowiednim podzieleniu informacji czy zakresu rozdziałów.

W rozdziale tym zawarto także informacje o wcześniejszych pracach grupy, wraz ze współpracownikami, pod kierunkiem prof. Tomasza Wejrzanowskiego. Jest to bardzo ważna część, która wskazuje na dotychczasowy rozwój badań i oddolną potrzebę dalszych badań realizowanych w ramach rozprawy doktorskiej. Zaznaczono aktywną współpracę przy rozprawie z grupą prof. Jarosława Milewskiego (Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, PW) oraz Instytutem Stochastyki na Uniwersytecie w Ulm, w Niemczech.

Rozdział 5 – Cel i zakres pracy

Na jednej stronie zwięźle opisano cele pracy. Pierwsze zdanie „*celem pracy jest określenie wpływu mikrostruktury katody na procesy fizykochemiczne zachodzące w trakcie pracy ogniwa*” jasno i wyraźnie opisuje ogólny cel pracy. W celu osiągnięcia celu „zaplanowano stworzenie modelu katody węglanowego ogniwa paliwowego o zróżnicowanej mikrostrukturze oraz przeprowadzenie ... badań naukowych”. Dodatkowo, szeroko opisano zakres pracy zawarty w rozprawie, począwszy od „*wytworzenia próbek katod*” po „*analizę możliwości wyjaśnienia wpływu mikrostruktury katody na procesy zachodzące w trakcie pracy*”.

W tym miejscu warto zaznaczyć, iż praca stanowi połączenie mniejszej części eksperymentalnej (przygotowanie próbek) oraz modelowania. Autor rozprawy podejmował się więc trudnego zagadnienia połączenia dwóch zagadnień, które niestety często traktowane są oddzielnie, co stanowi później problemy przy analizach. Moim zdaniem, połączenie obu części w jednej pracy jest ważnym, choć trudnym, aspektem przedstawionej rozprawy i zasługuje na podkreślenie.

Rozdział 6 – Badane materiały

Bardzo krótki rozdział (niecałe 2 strony), który opisuje zastosowane materiały oraz sposób wytworzenia próbek, które w dalszych częściach pracy były badane. Szczegóły eksperymentalne zostały dobrze opisane i powinny być wystarczające do prób powtórzenia eksperymentów przez zainteresowanych. W pracy łącznie przygotowano sześć rodzajów próbek, różniących się zawartością czynnika porotwórczego (PVB, mąka). Próbki w jasny sposób przedstawiono w tabeli.

W tym miejscu trochę brakuje mi opisu, dlaczego wybrano akurat takie materiały, jakie były zastosowane kryteria wyboru. Prace eksperymentalne na pewno stanowią

kontynuację/rozwińnięcie prac wcześniej prowadzonych w grupie, jednak brakuje tutaj informacji, czy są to nowe, oryginalne składy czy już wcześniej były szeroko stosowane.

Zastanawiający jest także proces spiekania przygotowanych materiałów, w szczególności ostatni krok temperaturowy – spiekania proszku niklu. Proces spiekania niklu w przygotowanych materiałach zachodzi w temperaturze 800°C. Jak została określona ta temperatura oraz czy były sprawdzane inne warunki spiekania?

Opis słowny przygotowanych próbek, podany nad tabelą z ich opisem, wydaje się niezgodny z danymi z tabeli dla próbek P5 i MP6. W szczególności „dodatkowa próbka z PVB” budzi moje wątpliwości.

Rozdział 7 – Metodyka badań

W rozdziale (12 stron) opisano zastosowane metody pomiarowe, eksperymentalne oraz szczegóły procesu modelowania. Rozdział ten zawiera jedynie niezbędne informacje, nie podaje podstawowych zasad pracy urządzeń, co wydaje się prawidłowe. Opis metod nie budzi wątpliwości, poziom szczegółowości jest odpowiedni.

Przy opisie metodyki badań, brakuje mi jednak części opisującej badania ogniów paliwowych prowadzonych we współpracy z ITC PW. Ostatnie zdanie w rozdziale 7 odnosi się do tego zagadnienia, jednak nie podano żadnych warunków eksperymentalnych, poza tym, że zastosowano opracowane materiały. Wydaje się to zauważalnym brakiem w opisie, w szczególności, iż późniejsze badania ogniów stanowią ważną część wyników osiągniętych w rozprawie.

Rozdział 8 – Wyniki badań i ich omówienie

Kluczowy dla rozprawy rozdział zawarty został na 29 stronach, co stanowi najdłuższy rozdział rozprawy. Opis wyników zaczęto od przedstawienia wyników dotyczących charakterystyki proszków substratów. Przedstawiono zdjęcia SEM użytych proszków niklu, mąki oraz PVB. Zdjęcia uzupełniono pomiarami rozkładu wielkości cząstek proszków. Ukazano parametry dla proszków w początkowym stanie, nie uwzględniając pomiarów po procesie mielenia, które mogłyby także być interesujące.

W kolejnej części wyników, opisano szczegółowo mikrostruktury wytworzonych katod MCFC. Zaprezentowano szereg zdjęć SEM, obrazów tomograficznych oraz trójwymiarowych struktur katod. Zdjęcia SEM wskazują na zauważalne różnice w mikrostrukturach wytworzonych

materiałów, co zostaje w dalszej części potwierdzone danymi ilościowymi. Na podstawie posiadanych danych, pokazano, iż w celu otrzymywania powtarzalnych i zbieżnych wyników, należy analizować obszar o rozmiarze charakterystycznym co najmniej 100 μm . W oparciu o opracowaną metodologię analizy, obliczono podstawowe parametry porowatych próbek, tj. porowatość, powierzchnię właściwą, czy średnią wielkość porów próbek w zależności od ilości zastosowanego czynnika porotwórczego. Dodatkowo, przedstawiono rozkład wielkości porów. Zagadnienia te, chociaż wydają się dosyć podstawowe, wymagały dużego wkładu doktoranta i stanowią kluczowe wyniki rozprawy.

Na podstawie opracowanych mikrostruktur, zaproponowano metody generacji reprezentatywnych modeli mikrostruktury katod MCFC, które także zwalidowano w pracy. Jest to zagadnienie warte podkreślenia. Samo wyznaczenie parametrów próbek w oparciu o pomiary SEM i tomograficzne jest często trudnym wyzwaniem, natomiast wygenerowanie na tej podstawie bliźniaczych modeli cyfrowych jest kolejnym, bardzo dużym wyzwaniem. Poprzez liczne iteracje procesu generacji modeli, udało się uzyskać bardzo dobre wyniki dla podstawowych parametrów (porowatość, krętość), w tym także rozkład wielkości porów. Przy wyznaczaniu powierzchni właściwej katod napotkano na widoczne rozbieżności wyników eksperymentalnych i generacji modeli. Spowodowane to było drobną mikrostrukturą rzeczywistych materiałów, które w mikroskali posiadały „chropowatość”, która przy zastosowaniu podstawowego sposobu generacji mikrostruktury była niemożliwa do odtworzenia. W celu rozwiązania napotkanego problemu, zaproponowano oryginalną metodę modyfikacji generacji, z zastosowaniem nowych kul pokrywających powierzchnię większych sfer. Model ten przygotowano we współpracy z Uniwersytetem w Ulm. Po modyfikacji uzyskano bardzo wysoką zbieżność powierzchni właściwej modelowanych materiałów oraz wielkości pomiarowych.

W oparciu o stworzone modele cyfrowe materiałów, dobrze odzwierciedlające rzeczywiste mikrostruktury, przeprowadzono badania (z wykorzystaniem modelowania komputerowego) przepuszczalności katod MCFC. Dodatkowo wyznaczono parametr zwężenia porów (ang. constrictivity). Co ważne, uzyskane wyniki przedstawiono także w porównaniu do modeli literaturowych. Poprzez modelowanie, określono wpływ wielkości porogenu na średnią wielkość porów, zwężanie porów oraz przepuszczalność. W pracy stwierdzono, że przepuszczalność katod jest bardzo ważnym czynnikiem w pracujących ogniwach węglanowych, jednak w tym miejscu nie zauważono korelacji między przepuszczalnością a gęstością mocy ogniw zmierzonych w ITC. O ile uważam, iż zawarcie wyników pomiarowych rzeczywistych ogniw jest bardzo ważne i

zdecydowanie podnosi poziom merytoryczny pracy, to ilość informacji o samych pomiarach, co już zaznaczyłem wcześniej, jest niestety niezadowalająca. W tym rozdziale podano kilka szczegółów (np. skład gazu), jednak wydaje się, iż bardziej ta część pasowałaby do części eksperymentalnej.

Na końcu rozdziału z wynikami pracy doktorskiej przedstawiono wyniki symulacji podciągania kapilarnego w mikrostrukturze katod MCFC. Zagadnienie to wydaje się bardzo istotne z praktycznego punktu widzenia i także stanowiło ważne zagadnienie w pracy. Na podstawie wygenerowanych mikrostruktur określono rozkład elektrolitu wewnątrz mikrostruktury katod. W szczególności pokazano dokładne rozkłady 3D dla wybranej mikrostruktury.

W tym miejscu uzyskano jedne z najbardziej wartościowych wyników rozprawy. W wyniku porównania wyników badań ogniw paliwowych z parametrami materiałów, wskazano na korelację wyników gęstości mocy z powierzchnią interfejsu gaz-elektrolit. Na podstawie tych wyników zaproponowano dodatkowy model reakcji katodowej, uwzględniający możliwość tworzenia się cienkich warstw elektrolitu na powierzchni większych porów. Podczas działania ogniw paliwowych, nowa powierzchnia aktywna powoduje zwiększenie wydajności ogniw.

Rozdział 9 – Podsumowanie oraz wnioski

W tym 2-stronicowym rozdziale zwięźle podsumowano wykonane prace i uzyskane wyniki. Przedstawione zostały ciekawe wnioski, które budują wartość naukową przedstawionej pracy. Łącznie przedstawiono dziewięć wniosków, które wydają się dobrze udokumentowane w pracy i stanowią oryginalny dorobek doktoranta.

Rozdział 10 – Kierunki dalszych badań

Pracę kończy krótkie (1 strona) ale wartościowe wskazanie możliwych kierunków dalszych badań. Jest to zawsze ważna część pracy, która wskazuje na dobre opanowanie materiału przez doktoranta i na otwartość w określaniu przyszłych badań. W szczególności, doktorant wskazuje na potrzebę walidacji modeli na większą ilość możliwych materiałów, co nie budzi wątpliwości. Także, zaproponowany model dodatkowej reakcji elektrochemicznej wymaga dalszych badań i potwierdzenia eksperymentalnego.

Literatura

W pracy łącznie zacytowano 134 pozycje literaturowe, co zajęło 13 stron rozprawy. W bibliografii zawarto prace krajowe jak i w zdecydowanej większości międzynarodowe. Dobór literatury nie



budzi zastrzeżeń. Cytowane prace obejmują szeroki zakres czasowy, zawierając pozycje klasyczne jak i bardzo współczesne doniesienia literaturowe.

Kwestie wymagające wyjaśnienia

Rozprawa, łącząca zagadnienia eksperymentalne wraz z modelowaniem komputerowym z całą pewnością zasługuje na docenienie interdyscyplinarności. Jako eksperymentator, myślę, że jednak dobrze byłoby zawrzeć większą ilość szczegółów dotyczących pomiarów ogniw paliwowych, tym bardziej, że na końcu budują one narrację do wprowadzenia dodatkowego modelu reakcji elektrochemicznej. Także brakuje mi informacji, jak uzyskane wyniki gęstości mocy odnoszą się do wartości literaturowych. Czy ogniwa z poprawionymi katodami wykazują wysokie/bardzo wysokie poziomy mocy?

W przypadku ogniw węglanowych, czy jest możliwe określenie udziału wkładu rezystancji poszczególnych elementów ogniwa (anoda/katoda, elektrolit, zjawiska dyfuzyjne) na końcową wydajność? Autor bada jedynie katodę, natomiast w jakim stopniu to właśnie ta elektroda wpływa na całkowitą wydajność ogniw?

Do określenia porowatości, rozkładu wielkości porów oraz powierzchni właściwej wykorzystano metodę tomografii, która zdecydowanie jest metodą nowoczesną i bardzo wartościową. Ciekawym zagadnieniem wydaje się zbieżność wyników uzyskiwanych metodami tomograficznymi z metodami tradycyjnymi (pomiar porowatości metodą np. Archimedesą, pomiar powierzchni BET). Czy autor mógłby odnieść się do możliwych błędów pomiarowych różnych metod oraz uzasadnić zastosowanie metody tomografii komputerowej?

Czy poprzez zastosowanie opracowanych modeli, doktorant byłby w stanie wskazać na konstrukcję optymalnej mikrostruktury katody? Wykonane badania oraz zaproponowany model mogą stanowić bardzo wartościowy punkt wyjścia do określenia mikrostruktury „idealnej” elektrody.

Uwagi dodatkowe

Chciałbym podkreślić, iż praca została napisana na wysokim poziomie merytorycznym i edytorskim. Ilość błędów jest zdecydowanie poniżej średniej. Zastosowany język jest w większości precyzyjny, ale też przystępny. Praca została napisana w sposób umożliwiający jej śledzenie nie tylko ścisłym specjalistom z dziedziny. Na pochwałę zasługuje także szata graficzna rozprawy. Wykresy przedstawiające uzyskane wyniki są przedstawione w sposób jasny i czytelny. Wykresy są „proste” w najlepszym tego słowa znaczeniu.

Podsumowanie recenzji

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotycząca badania oraz modelowania komputerowego katod węglanowego ogniwa paliwowego dotyczy bardzo interesującego, ciekawego i aktualnego zagadnienia naukowo-technicznego. Ogniwa paliwowe, w tym w szczególności ogniwa wysokotemperaturowe, stanowią obiecujące, ale także w dużej mierze już stosowane urządzenia, które jednak nadal posiadają ogromny potencjał rozwojowy.

Na podkreślenie oryginalności pracy zasługuje charakter eksperymentalno-teoretyczny. Pomimo, iż część eksperymentalna stanowi stosunkowo małą część, jest to na pewno ważne i oryginalne osiągnięcie doktoranta.

Na podstawie rozprawy stwierdzam, iż doktorant opanował w stopniu bardzo dobrym warsztat naukowy związany z tematyką ogniw MCFC, w szczególności z modelowania oraz opisu właściwości materiałów porowatych, które także mogą mieć zastosowanie w innych dziedzinach.

W oparciu o powyższe, stwierdzam, iż rozprawa przedstawiona mi do recenzji rozprawa „Modelowanie mikrostrukturalnych uwarunkowań procesów zachodzących w porowatych elektrodach węglanowego ogniwa paliwowego” autorstwa mgr. inż. Samiha Haj Ibrahima spełnia wszystkie wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej rozprawy przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Materiałowa na Politechnice Warszawskiej.

Z poważaniem,



Sebastian Molin