



Politechnika Warszawska



Warszawa, 26.08.2024

Prof. dr hab. inż. Agnieszka Jastrzębska
Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej
Wydział Mechatroniki
Politechniki Warszawskiej
ul. św. Andrzeja Boboli 8
02-525 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Recenzję sporządzono w odpowiedzi na pismo prof. dr hab. Macieja Kubickiego, Dziekana Wydziału Chemii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, z dnia 24.07.2024 r.

Tytuł rozprawy: **Nowa generacja czujników bazujących na sfunkcjonalizowanych materiałach grafenowych** (tytuł w j. angielskim: **New generation of sensors based on Graphene-functionalized materials**)

Doktorant: **Tomasz Chudziak**
Promotor: **Prof. wiz. Artur Ciesielski**
Współpromotor: **Dr Dawid Pakulski**

Ocena ogólna

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska przygotowana przez Pana Tomasza Chudziaka dotyczy opracowania różnych metod syntezy wybranego materiału dwuwymiarowego (2D) jakim jest zredukowana forma tlenku grafenu, lub innymi słowy, chemicznej i fizykochemicznej redukcji tlenku grafenu (GO) do zredukowanego tlenku grafenu rGO. Praca doktorska obejmuje także badania parametrów funkcjonalnych otrzymanego rGO w układach sensorów ciśnienia, naprężenia i wilgotności. Praca została prawidłowo przypisana do dyscypliny nauk chemicznych (zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Edukacji i Nauki z dnia 11 października 2022 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych, Dz.U. z 2022 r., poz. 2202, z dnia 11 października 2022 r.). Przedstawione wyniki badań bez wątpienia plasują się w obszarze badawczym z zakresu nauk chemicznych (wiodąco) i materiałowych (dodatkowo, w kontekście interdyscyplinarności).

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana Tomasza Chudziaka jest opracowanie i charakterystyka nowej generacji czujników opartych na sfunkcjonalizowanych materiałach grafenowych, w szczególności zredukowanej formie tlenku grafenu (rGO). Temat ten jest niezwykle aktualny, biorąc pod uwagę intensywny rozwój nanomateriałów i ich zastosowanie w zaawansowanych technologiach. Grafen i jego pochodne, w tym tlenek grafenu (GO) oraz zredukowany tlenek grafenu (rGO), są obecnie w centrum zainteresowania naukowców i inżynierów na całym świecie ze względu na ich unikalne właściwości fizykochemiczne, takie jak wysoka przewodność elektryczna, duża wytrzymałość mechaniczna oraz wyjątkowe właściwości sensoryczne. Tematyka pracy Pana Chudziaka jest więc nie tylko oryginalna, ale również wpisuje się w globalne trendy badawcze, mające na celu opracowanie nowoczesnych materiałów



Politechnika Warszawska

funkcjonalnych, które mogą znaleźć zastosowanie w szerokim spektrum urządzeń elektronicznych, w tym w sensorach ciśnienia, naprężeń i wilgotności.

Pod względem interdyscyplinarności, rozprawa doktorska łączy różne dziedziny nauki, takie jak chemia materiałowa, fizyka, inżynieria materiałowa oraz nanotechnologia, co świadczy o szerokim podejściu do problematyki badawczej. Zastosowanie materiałów grafenowych, zwłaszcza rGO, w sensorach opartych na zmianach mechanicznych i chemicznych (ciśnienie, naprężenie, wilgotność), stanowi istotny wkład w rozwój nie tylko chemii materiałów, ale także w inżynierię sensorów i rozwój zaawansowanych urządzeń pomiarowych.

W kontekście oryginalności, warto podkreślić, że doktorant nie ograniczył się jedynie do badania jednej techniki syntezy rGO. W swojej pracy porównał dwie główne metody redukcji tlenu grafenu: redukcję chemiczną oraz termiczną, co pozwoliło na uzyskanie szerszej perspektywy na procesy odpowiedzialne za modyfikację właściwości rGO. Takie podejście jest wyjątkowo istotne, ponieważ pozwala na lepsze zrozumienie mechanizmów odpowiedzialnych za zmianę właściwości fizykochemicznych tego materiału, co ma kluczowe znaczenie w procesie projektowania nowych materiałów do aplikacji technologicznych. Porównanie metod syntezy rGO w kontekście ich wpływu na właściwości sensoryczne czyni tę rozprawę oryginalnym i unikalnym wkładem do literatury naukowej.

Zagadnienie sensorów bazujących na materiałach dwuwymiarowych, takich jak rGO, ma kluczowe znaczenie dla rozwoju nowoczesnych technologii. Opracowanie nowoczesnych, precyzyjnych i wysoce czułych czujników, które są jednocześnie trwałe i mogą działać w różnych warunkach środowiskowych, jest jednym z priorytetowych celów współczesnej inżynierii sensorów. Również fakt, że opracowane przez doktoranta czujniki bazują na tanich i łatwo dostępnych materiałach, czyni je obiecującą alternatywą dla bardziej skomplikowanych i kosztownych rozwiązań dostępnych na rynku. Potencjalne zastosowania tych sensorów są szerokie, począwszy od monitorowania parametrów środowiskowych, poprzez zastosowania biomedyczne, aż po rozwój inteligentnych urządzeń elektroniki użytkowej (wearables). Praca ta wnosi zatem znaczący wkład w rozwój technologii sensorów, oferując nowe rozwiązania w kontekście zarówno technologii produkcji, jak i funkcjonalizacji materiałów grafenowych.

Podkreślić należy również, że doktorant wykazał się nie tylko szeroką wiedzą teoretyczną, ale także umiejętnościami praktycznymi, co jest widoczne w szczegółowo zaplanowanych i przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych. Przeprowadzona analiza parametrów fizykochemicznych oraz funkcjonalnych rGO w kontekście jego zastosowania w sensorach ciśnienia, naprężeń i wilgotności jest nie tylko dowodem na staranność naukową, ale także na głębokie zrozumienie problematyki badawczej. Praca Pana Chudziaka dostarcza cennych danych, które mogą zostać wykorzystane w dalszym rozwoju materiałów grafenowych oraz ich aplikacji w urządzeniach pomiarowych.

Rozprawę doktorską Pana Tomasza Chudziaka można więc uznać za dzieło o dużej wartości naukowej, które wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny nauk chemicznych, a także posiada ogromny potencjał aplikacyjny w dziedzinie sensorów i urządzeń pomiarowych. Współczesna nauka kładzie duży nacisk na tworzenie rozwiązań interdyscyplinarnych, a praca Pana Tomasza Chudziaka idealnie wpisuje się w ten



Politechnika Warszawska

nurt, oferując nowe podejścia do syntezy, funkcjonalizacji i aplikacji materiałów grafenowych, które mogą znaleźć zastosowanie w nowoczesnych systemach monitorujących i pomiarowych.

Jakość merytoryczna i redakcyjna

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana Tomasza Chudziaka wyróżnia się wysoką jakością redakcyjną, co jest widoczne na każdym etapie jej opracowania. Struktura pracy jest przemyślana i logiczna, co znacząco ułatwia czytelnikowi śledzenie poszczególnych etapów badań. Praca obejmuje łącznie 173 strony, co świadczy o szczegółowym podejściu autora do zagadnienia. Oprócz głównego tekstu, rozprawa zawiera również starannie opracowaną listę cytowań, skróty pojęć, a także informacje dotyczące osiągnięć naukowych doktoranta, jego publikacji, udziału w konferencjach międzynarodowych oraz uczestnictwa w projektach badawczych. Tego typu dodatki świadczą o profesjonalnym podejściu autora oraz o jego zaangażowaniu w działalność naukową.

Jednym z głównych atutów pracy jest spójność zarówno w zakresie przedstawionych zagadnień, jak i sposobu ich opisu. Praca została podzielona na sześć głównych rozdziałów, z których każdy w sposób logiczny prowadzi do kolejnych wniosków. Już w pierwszym rozdziale autor szczegółowo omawia aktualny stan wiedzy na temat materiałów grafenowych, sensorów 2D oraz ich parametrów, co stanowi solidną podstawę do dalszych badań. Taki szczegółowy przegląd literatury naukowej, połączony z analizą istniejących technologii, nadaje rozprawie solidne fundamenty teoretyczne. Autor wykazał się umiejętnością krytycznego spojrzenia na temat oraz umiejętnością wyodrębnienia kluczowych elementów, które stanowiły punkt wyjścia dla dalszych badań.

W kolejnych rozdziałach praca prezentuje się równie dobrze. W rozdziale drugim, autor opisał metodologie charakteryzacji materiałów, co jest szczególnie istotne z punktu widzenia wiarygodności wyników eksperymentalnych. Metody takie jak SEM, XPS, Raman, XRD, czy FTIR zostały szczegółowo omówione, a ich dobór i zastosowanie świadczy o zaawansowanym podejściu badawczym doktoranta. Co więcej, autor nie ograniczył się do prostej prezentacji wyników, ale dokonał również ich dogłębnej analizy i interpretacji, co podkreśla jego zdolności analityczne.

Podobnie w rozdziałach trzecim i czwartym, autor precyzyjnie przedstawił procesy redukcji chemicznej oraz termicznej tlenku grafenu (rGO). Co ważne, opisy te są nie tylko klarowne i zrozumiałe, ale również poparte odpowiednimi odniesieniami do literatury oraz analizami fizykochemicznymi, co daje pełny obraz procesu syntezy i jego efektów. Autor bardzo starannie przedstawia związki pomiędzy strukturą, właściwościami chemicznymi i przewodnictwem materiałów rGO, co jest istotne z punktu widzenia ich zastosowania w sensorach. Ponadto, praca nie ogranicza się jedynie do analizy technicznych aspektów, ale uwzględnia również takie kwestie jak potencjalna toksyczność materiałów, co może mieć znaczenie w przyszłych aplikacjach medycznych czy w urządzeniach noszonych na ciele.

Rozdziały piąty i szósty, poświęcone konkretnym zastosowaniom opracowanych materiałów w sensorach ciśnienia, naprężeń oraz wilgotności, są – zgodnie z oceną – jednymi z najciekawszych i najważniejszych części pracy. Autor w klarowny sposób przedstawił metodologię badań oraz wyniki eksperymentów, które dowodzą skuteczności zastosowanych hybryd grafenowych w tych aplikacjach. Opisy są spójne i utrzymane



Politechnika Warszawska

na wysokim poziomie redakcyjnym, co sprawia, że nawet skomplikowane zagadnienia są zrozumiałe. Autor konsekwentnie stosuje jasno określoną terminologię i zachowuje podobny poziom szczegółowości opisu w całej pracy, co pozytywnie wpływa na jej odbiór.

Z punktu widzenia kompletności, rozprawa doktora Chudziaka spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom naukowym tego rodzaju. Autor starannie zaplanował każde z etapów badań, co pozwoliło na uzyskanie spójnych i pełnych wyników. Opisy każdego z etapów pracy są wystarczająco szczegółowe, aby czytelnik mógł zrozumieć metodykę, wnioski oraz znaczenie badań. Warto podkreślić, że autor pracy w rozdziale "Generalne wnioski i perspektywy" zwięźle podsumował wyniki swoich badań, wskazując na przyszłe kierunki rozwoju technologii bazujących na materiałach grafenowych. To świadczy o tym, że doktorant ma jasną wizję kontynuacji badań oraz ich dalszych, potencjalnych zastosowań.

Wniosek końcowy

Podsumowując, z pełnym przekonaniem oceniam rozprawę doktorską przygotowaną przez Pana Tomasza Chudziaka jako pracę na bardzo wysokim poziomie, zarówno pod względem naukowym, jak i merytorycznym. Jego praca, prowadzona pod opieką prof. wiz. Artura Ciesielskiego oraz dr Dawida Pakulskiego, spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dziennik Ustaw 2021, poz. 478, z późniejszymi zmianami), co sprawia, że z pełną odpowiedzialnością rekomenduję ją do obrony.

Rozprawa Pana Chudziaka przedstawia solidny wkład w rozwój badań nad materiałami dwuwymiarowymi, w szczególności nad zastosowaniami grafenu i jego pochodnych w sensorach. Praca ta nie tylko prezentuje nowatorskie podejście do syntezy i funkcjonalizacji powierzchni nanomateriałów, ale także oferuje perspektywiczne rozwiązania, które mogą znaleźć zastosowanie w komercyjnych urządzeniach. Doktorant w sposób kompleksowy i systematyczny zrealizował wszystkie założone cele badawcze, a ich realizacja została poparta odpowiednimi metodami eksperymentalnymi, charakteryzacją materiałową oraz wnikliwą analizą wyników. Wyniki tych badań mają realny potencjał aplikacyjny, co czyni tę pracę wartościową z punktu widzenia rozwoju technologii opartej na materiałach grafenowych.

Dodatkowo, rozprawa ta jest imponująca pod względem redakcyjnym i organizacyjnym. Autor wykazał się nie tylko głęboką znajomością tematu, ale także umiejętnością jasnego, spójnego i logicznego prezentowania wyników swoich badań. Styl pisarski autora charakteryzuje się klarownością, co pozwala na zrozumienie skomplikowanych zagadnień naukowych nawet osobom niebędącym specjalistami w tej dziedzinie.

Co istotne, wybitna aktywność naukowa doktoranta, udokumentowana publikacjami w renomowanych, wysoko punktowanych czasopismach oraz udziałem w międzynarodowych konferencjach i projektach badawczych, świadczy o jego dynamicznym rozwoju naukowym i dążeniu do doskonałości w dziedzinie badawczej. Publikacje te nie tylko potwierdzają wartość naukową jego pracy, ale także dowodzą, że przedstawione badania są istotne i doceniane przez międzynarodową społeczność naukową.



Politechnika Warszawska

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe aspekty uważam, że rozprawa doktorska Pana Tomasza Chudziaka zasługuje na wyróżnienie. Prezentuje ona wysoką jakość badań, staranność w realizacji celów, szeroki zakres prac eksperymentalnych oraz wyraźny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie nauki chemiczne. Ponadto, umiejętność interpretacji wyników i formułowania wniosków, poparta zaawansowaną charakterystyką materiałową, stanowi o dojrzałości badawczej doktoranta, co predestynuje go do pomyślnej obrony rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'A. Jastrzebska', written over a dotted line.

Prof. dr hab. inż. Agnieszka Jastrzębska