Prof. dr hab. inż. Krzysztof T. Wojciechowski
Wydział Inżynierii Matriałowej i Ceramiki,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 9.06.2026

Recenzja pracy doktorskiej

Doktorant: mgr inż. Muhammad Abiyyu Kenichi Purbayanto
Tytuł rozprawy: *Optically Tunable van der Waals Heterostructures based on Two-dimensional MXene Materials*
Promotor: prof. dr hab. inż. Agnieszka Maria Jastrzębska

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej .

Podstawa prawna: art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.
Przedmiotem recenzji jest ocena:
1. Poziomu wiedzy teoretycznej doktoranta w dyscyplinie.
2. Umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.
3. Oryginalności rozwiązania problemu naukowego.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Muhammada Abiyyu Kenichiego Purbayanto pt. *Optically Tunable van der Waals Heterostructures based on Two-dimensional MXene Materials* została przygotowana pod opieką prof. dr hab. inż. Agnieszki Marii Jastrzębskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Praca została napisana w języku angielskim i ma postać rozprawy doktorskiej opartej na zbiorze powiązanych tematycznie publikacji naukowych, poprzedzonym obszerną częścią opisową.

Rozprawa została przygotowana w formie wydania książkowego i liczy 391 stron. Już sam sposób opracowania, objętość oraz układ pracy odbiegają od typowej rozprawy doktorskiej opartej na cyklu publikacji. Część opisowa zawiera 47 rysunków oraz 3 tabele, nie licząc rysunków i tabel zawartych w siedmiu publikacjach włączonych do rozprawy oraz spis literatury zawierający 252 pozycje. Autor zamieścił również spisy rysunków i tabel a także osobną tabelę symboli i skrótów. Na podkreślenie zasługuje staranność przygotowania pracy, przejrzysty skład, konsekwentna organizacja materiału oraz drobiazgowy sposób przygotowania i opisu materiału ilustracyjnego.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów. Rozdział 1 przedstawia problem naukowy, cele pracy, wykaz publikacji stanowiących podstawę rozprawy, pozostały dorobek publikacyjny autora, aktywność konferencyjną, udział w projektach badawczych oraz ogólny układ rozprawy. Rozdział 2

zawiera przegląd literatury dotyczący MXenów oraz heterostruktur van der Waalsa opartych na tych materiałach. Kolejne rozdziały omawiają wyniki badań przedstawione w publikacjach włączonych do cyklu, natomiast rozdział 7 zawiera podsumowanie pracy i perspektywy dalszych badań.

Zasadniczą podstawę rozprawy stanowi siedem publikacji naukowych oznaczonych jako P1–P7. Prace te zostały opublikowane w bardzo dobrych i znakomitych czasopismach międzynarodowych, m.in. *Advanced Functional Materials, Advanced Materials, Langmuir, ACS Applied Materials & Interfaces, Nanoscale Horizons oraz Physical Chemistry Chemical Physics*. Istotne znaczenie ma fakt, że doktorant jest pierwszym autorem wszystkich siedmiu publikacji stanowiących podstawę rozprawy. We wstępie autor przedstawił również parametry bibliometryczne tych prac, w tym wartości Impact Factor oraz punktację MNiSW.

Oprócz siedmiu publikacji głównych autor zamieścił wykaz jedenastu dodatkowych publikacji, z których część również dotyczy tematyki MXenów, materiałów dwuwymiarowych, heterostruktur oraz ich właściwości fizykochemicznych i funkcjonalnych. Rozprawę uzupełniają oświadczenia współautorów dotyczące ich wkładu merytorycznego i procentowego w poszczególne prace. Ma to istotne znaczenie formalne, ponieważ rozprawa ma charakter publikacyjny i powstała w środowisku dużej, interdyscyplinarnej współpracy naukowej.

Na podstawie podziękowań oraz informacji zawartych w rozdziale 1 można stwierdzić, że rozprawa powstawała w bardzo aktywnym otoczeniu badawczym, obejmującym współpracowników z Politechniki Warszawskiej oraz jednostek zagranicznych. Współpraca ta dotyczyła m.in. przygotowania faz MAX, syntezy i przetwarzania MXenów, wytwarzania cienkich warstw, spektroskopii Ramana, badań XRD i XPS oraz obliczeń DFT. Z punktu widzenia oceny rozprawy jest to istotne, ponieważ wskazuje na funkcjonowanie doktoranta w dojrzałym, interdyscyplinarnym środowisku naukowym.

3. Tematyka i cel badań

Tematyka rozprawy dotyczy projektowania, wytwarzania i charakterystyki optycznie przestrajalnych heterostruktur van der Waalsa opartych na dwuwymiarowych materiałach z grupy MXenów. Praca mieści się na pograniczu inżynierii materiałowej, nanotechnologii, chemii materiałów i optoelektroniki. Jej głównym przedmiotem są relacje między składem chemicznym, strukturą powierzchniową, oddziaływaniami międzyfazowymi, pracą wyjścia oraz właściwościami optycznymi i fotoelektrochemicznymi heterostruktur zawierających MXeny.

Problem naukowy rozprawy wynika z ograniczeń utrudniających zastosowanie MXenów w układach optoelektronicznych i fotoaktywnych. Do najważniejszych należą ograniczona odporność na utlenianie, szybka rekombinacja nośników ładunku, niewystarczająca selektywność odpowiedzi optycznej oraz trudności związane z powtarzalnym otrzymywaniem struktur cienkowarstwowych o kontrolowanych właściwościach. Autor wychodzi z założenia, że budowa heterostruktur van der Waalsa opartych na MXenach i innych materiałach dwuwymiarowych może umożliwić racjonalne kształtowanie ich właściwości optycznych, poprawę stabilności oraz regulację transferu ładunku na granicach międzyfazowych.

Cele pracy zostały sformułowane wokół czterech zasadniczych zagadnień: opracowania stabilnych oksydacyjnie heterostruktur MXenowych poprzez ich sprzężenie z bardziej stabilnymi materiałami dwuwymiarowymi; przestrajania właściwości optycznych MXenów, w tym przesunięcia absorpcji z zakresu ultrafioletowego w stronę zakresu widzialnego; zrozumienia oddziaływań międzyfazowych odpowiedzialnych za właściwości optyczne heterostruktur; oraz kontroli transferu ładunku na granicach 2D/2D poprzez modyfikację pracy wyjścia MXenów.

Znaczenie naukowe rozprawy polega na pogłębieniu wiedzy o oddziaływaniach światło–materia w heterostrukturach van der Waalsa zawierających MXeny oraz na wyjaśnieniu roli interfejsów materiałów dwuwymiarowych w kształtowaniu właściwości optycznych, fotoelektrochemicznych i transportowych. Praca ma również znaczenie aplikacyjne, ponieważ dotyczy materiałów potencjalnie użytecznych w fotodetektorach, układach fotokatalitycznych, cienkich warstwach optoelektronicznych, strukturach samooczyszczających oraz rozwiązaniach związanych z konwersją i wykorzystaniem promieniowania słonecznego.

4. Ocena rozprawy w kontekście wiedzy teoretycznej doktoranta

W odniesieniu do poziomu wiedzy teoretycznej autora rozprawy należy stwierdzić, że rozprawa dobrze dokumentuje jego przygotowanie teoretyczne w zakresie inżynierii materiałowej. Szczególnie istotny jest rozbudowany rozdział przeglądowy, w którym autor omawia strukturę, metody syntezy, funkcjonalizację powierzchniową, właściwości optyczne i elektronowe MXenów oraz możliwości ich łączenia z innymi materiałami dwuwymiarowymi w heterostruktury van der Waalsa. Przegląd ten nie ma charakteru wyłącznie opisowego, lecz stanowi podstawę do sformułowania problemu badawczego: w jaki sposób kontrolować stabilność, fotoaktywność, pracę wyjścia i transfer ładunku w układach opartych na MXenach. Zakres literatury, sposób jej uporządkowania oraz powiązanie części przeglądowej z kolejnymi publikacjami wskazują, że doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną właściwą dla dyscypliny oraz specjalistyczną wiedzę w zakresie materiałów dwuwymiarowych, heterointerfejsów i zjawisk optoelektronicznych.

Pewnym ograniczeniem części teoretycznej jest dość szerokie stosowanie pojęcia heterostruktur van der Waalsa. W części rozprawy termin ten obejmuje nie tylko klasyczne układy 2D/2D, lecz także heterointerfejsy typu MXene/tlenek lub MXene/półprzewodnik. Nie jest to błąd merytoryczny, ale wymaga ostrożności terminologicznej, ponieważ mechanizmy oddziaływań międzyfazowych, transportu ładunku i stabilizacji strukturalnej nie muszą być identyczne we wszystkich tych układach.

Druga uwaga dotyczy proporcji przeglądu literatury. Autor bardzo szeroko przedstawia zalety MXenów oraz potencjał ich zastosowań optoelektronicznych, natomiast nieco mniej miejsca poświęca ograniczeniom interpretacyjnym typowym dla tej klasy materiałów, takim jak niejednorodność grup funkcyjnych powierzchni, wpływ częściowej oksydacji na wyznaczane właściwości optyczne, rozbieżności między przewidywaniami DFT a wynikami eksperymentalnymi oraz trudności w jednoznacznym rozdzieleniu wkładów adsorpcji, fotolizy, fotokatalizy i transportu ładunku. Zagadnienia te pojawiają się w rozprawie, jednak mogłyby zostać wyraźniej zintegrowane jako krytyczny kontekst interpretacji wyników.

5. Ocena rozprawy w kontekście umiejętności samodzielnego prowadzenia badań

Ocena samodzielności badawczej w przypadku rozprawy opartej na publikacjach wieloautorskich wymaga uwzględnienia specyfiki współczesnych badań materiałowych, które są realizowane przez zespoły o komplementarnych kompetencjach i z wykorzystaniem zaawansowanej infrastruktury badawczej. W takich warunkach pierwsze autorstwo nie oznacza samodzielnego wykonania wszystkich eksperymentów i analiz, lecz wskazuje na wiodącą rolę w realizacji i opracowaniu badań.

W analizowanym przypadku udział doktoranta został szczegółowo udokumentowany w sekcjach *Author Contributions* wszystkich siedmiu publikacji stanowiących podstawę rozprawy, w rozdziale 1.4 rozprawy oraz w oświadczeniach współautorów. Dokumenty te są wzajemnie spójne i wskazują na wiodący udział autora w projektowaniu badań, przygotowaniu i charakterystyce materiałów, analizie oraz interpretacji wyników, opracowaniu materiału ilustracyjnego i przygotowaniu pierwotnych wersji manuskryptów. Istotnym argumentem przemawiającym za jego samodzielnością naukową jest również fakt, że był pierwszym autorem wszystkich siedmiu publikacji tworzących podstawę rozprawy.

Na podstawie przedstawionej dokumentacji można stwierdzić, że udział doktoranta wykraczał poza wykonanie określonych zadań eksperymentalnych i obejmował współtworzenie koncepcji badań oraz ich naukową interpretację. W konsekwencji rozprawa potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, rozumianej jako zdolność do formułowania problemów badawczych, planowania i realizacji programu badań, krytycznej analizy wyników oraz ich prezentacji w formie publikacji naukowych.

6. Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego

Oryginalny wkład autora rozprawy polega przede wszystkim na rozwinięciu spójnej koncepcji projektowania heterostruktur i heterointerfejsów opartych na MXenach, ukierunkowanych na kontrolę właściwości optycznych, stabilności oksydacyjnej i transferu ładunku. Kolejne publikacje nie są przypadkowym zestawem wyników, lecz tworzą logiczną sekwencję: od analizy właściwości optycznych, elektronowych i pracę wyjścia MXenów, przez kontrolowaną oksydację i stabilizację cienkich warstw, po projektowanie interfejsów MXene/GO, MXene/g-C_3N_4 oraz MXene/perowskit.

Za szczególnie wartościowe uważam trzy elementy pracy. Po pierwsze, autor wykazał, że kontrolowana oksydacja Ti_3CN MXene może być wykorzystana nie tylko jako zjawisko degradacyjne, lecz jako narzędzie projektowania fotoaktywnych heterostruktur TiO_2/Ti_3CN. Po drugie, pokazał możliwość stabilizacji cienkich warstw MXenowych przez sprzężenie z GO/rGO przy zachowaniu lub poprawie właściwości optoelektronicznych, co ma znaczenie dla przezroczystych i stabilnych układów fotoaktywnych. Po trzecie, rozwinął koncepcję regulacji transferu ładunku na granicach międzyfazowych przez dobór komponentu półprzewodnikowego oraz modyfikację pracy wyjścia MXenu, co zostało zilustrowane w układach $V_4C_3T_x$/protonated g-C_3N_4 oraz $Ti_3C_2/MAPbI_3$.

Oryginalność rozprawy nie polega więc wyłącznie na otrzymaniu pojedynczych nowych układów materiałowych, lecz na konsekwentnym rozwijaniu zasad projektowania funkcjonalnych

heterointerfejsów MXene-based dla zastosowań optoelektronicznych i fotoaktywnych. W tym ujęciu właściwości optyczne, stabilność i własności elektronowe są regulowane przez kontrolę składu MXenu, chemii powierzchni, stopnia utlenienia oraz charakteru kontaktu międzyfazowego.

Należy zaznaczyć, że nie wszystkie publikacje w jednakowym stopniu dotyczą klasycznych heterostruktur van der Waalsa typu 2D/2D. Część wyników odnosi się raczej do heterointerfejsów MXene/tlenek lub MXene/półprzewodnik. Nie obniża to wartości naukowej rozprawy, ale wymaga precyzyjnego rozumienia jej zakresu: zasadniczym przedmiotem pracy są szeroko rozumiane heterostruktury i heterointerfejsy oparte na MXenach, a nie wyłącznie modelowe układy van der Waalsa zbudowane z dwóch idealnych materiałów dwuwymiarowych.

Jednocześnie przedstawione wyniki skłaniają do kilku pytań o charakterze bardziej fundamentalnym:

1) W przypadku heterostruktur TiO_2/Ti_3CN interesujące jest, który z czynników odgrywa dominującą rolę w obserwowanej fotoaktywności: sama obecność fazy TiO_2, specyficzna morfologia uzyskanych nanokrystalitów czy też transfer ładunku zachodzący na granicy faz?

2) W odniesieniu do heterostruktur MXene/GO oraz MXene/g-C_3N_4 chciałbym zapytać, w jakim stopniu obserwowane zmiany właściwości optycznych i fotoelektrochemicznych wynikają z rzeczywistego transferu ładunku, a w jakim z efektów ekranowania światła, zmian powierzchni właściwej lub modyfikacji stanów powierzchniowych?

3) Po trzecie: interesującym zagadnieniem pozostaje także kwestia uniwersalności zaproponowanych strategii projektowania: czy opracowane zależności między pracą wyjścia, składem powierzchniowym MXenów i transferem ładunku można przenieść na inne rodziny MXenów, czy też mają one charakter specyficzny dla badanych układów materiałowych?

Od strony redakcyjnej rozprawa jest przygotowana bardzo starannie. Układ pracy, spisy rysunków i tabel oraz sposób powiązania części opisowej z publikacjami świadczą o dużej dbałości autora o formę opracowania. Nie zauważyłem uchybień edytorskich, które obniżałyby wartość merytoryczną rozprawy.

7. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr. inż. Muhammada Abiyyu Kenichiego Purbayanto pt.: *Optically Tunable van der Waals Heterostructures based on Two-dimensional MXene Materials* stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Rozprawa potwierdza wysoki poziom wiedzy teoretycznej kandydata do stopnia doktora w zakresie inżynierii materiałowej, zwłaszcza materiałów dwuwymiarowych, MXenów, heterostruktur, heterointerfejsów i zjawisk optoelektronicznych. Przedstawiony cykl publikacji dokumentuje również jego umiejętność prowadzenia pracy naukowej: od sformułowania problemu, przez udział w projektowaniu i realizacji badań, po interpretację wyników i ich publikację w renomowanych czasopismach międzynarodowych.

Uważam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jej wartość polega na rozwinięciu spójnej strategii projektowania układów opartych na MXenach, w których właściwości optyczne, odporność na utlenianie oraz właściwości elektronowe są regulowane przez kontrolę składu, chemii powierzchni oraz charakteru interfejsu.

Na szczególne podkreślenie zasługuje poziom dorobku publikacyjnego: siedem publikacji głównego cyklu, wszystkie z kandydatem jako pierwszym autorem, opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach międzynarodowych. Jego udział został formalnie udokumentowany w publikacjach, rozprawie i oświadczeniach współautorów, a całość pracy wyróżnia się spójnością naukową, aktualnością problematyki i wysoką jakością opracowania.

W związku z powyższym **wnoszę o dopuszczenie Pana mgra inż. Muhammada Abiyyu Kenichiego Purbayanto do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.**

Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy rozprawy, spójność i jakość cyklu publikacyjnego, pierwszoautorską pozycję autora we wszystkich publikacjach stanowiących podstawę rozprawy oraz udokumentowany wiodący udział w realizacji programu badawczego, **uważam za w pełni uzasadnione wyróżnienie rozprawy doktorskiej**.

