



**WYDZIAŁ FIZYKI
I INFORMATYKI
STOSOWANEJ**

Uniwersytet Łódzki

Łódź, dnia 08.01.2026 r.

Prof. dr hab. Paweł Kowalczyk
Kierownik Katedry Fizyki Ciała Stałego
Uniwersytet Łódzki
ul. Pomorska 149/153
90-236 Łódź
e-mail: pawel.kowalczyk@uni.lodz.pl

**Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Mileny Ojrzyńskiej
pt. „Właściwości fizyczne nanomateriałów eksfoliowanych w fazie ciekłej”**

W przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. Jerzego Antonowicza z Politechniki Warszawskiej, mgr inż. Milena Ojrzyńska podejmuje tematykę związaną z charakteryzacją własności nanomateriałów powstających po rozwarstwianiu w fazie ciekłej. W moim odczuciu materiał eksperymentalny zawarty w dysertacji jest bardzo bogaty i doskonale wpisuje się w światowe trendy naukowe dając szansę na utworzenie w Warszawie centrum wytwarzania materiałów 2D. Z informacji zawartych na końcu rozprawy wynika, iż Pani Milena Ojrzyńska jest współautorką 7 prac z czego w 3 jest pierwszym autorem, a dwie z nich stanowią trzon przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej. Wyniki swoich badań Autorka dysertacji prezentowała na sześciu konferencjach naukowych w tym na czterech z nich w formie wystąpienia ustnego. Jest również współautorką patentu, który również wydaje się powiązany tematycznie z rozprawą i wskazuje na długoletnie doświadczenie zespołu, w którym wykonywała swoją pracę doktorską, w zakresie metod wytwarzania i badania grafenu. W trakcie trwania swojego doktoratu realizowała dwa projekty naukowe, w szczególności była beneficjentem programu Diamentowy Grant co już samo w sobie świadczy o jej doskonałości naukowej. Drugim projektem, w którym uczestniczyła było Preludium Bis z Narodowego Centrum Nauki, w którym pełniła rolę wykonawcy. Z informacji zawartych w rozprawie wynika również, że Doktorantka odbyła trzymiesięczny staż naukowy powiązany z rozprawą na Uniwersytecie w Kassel w Niemczech oraz była promotorem kilku prac inżynierskich co wskazuje na to, że nie tylko jest zainteresowana aspektami naukowymi ale również dydaktycznymi.

Rozprawa doktorska przygotowana została w jednolitej i zwartej formie i liczy 164 strony. Podzielona została na sześć rozdziałów i uzupełniona krótkim podsumowaniem osiągnięć naukowych Autorki, trzema załącznikami i Bibliografią liczącą 182 pozycje. W rozdziale pierwszym Autorka

omówiła Materiały, z którymi pracowała – Grafit, grafen, płatki grafenowe, disiarczek molibdenu i wodorotlenek niklu. W rozdziale drugim omówiła w przystępny sposób metody wytwarzania nanomateriałów, a w rozdziale trzecim metody ich charakteryzacji, które wykorzystywała w swoich badaniach. Rozdział czwarty w całości poświęcony został charakterystyce wytworzonych przez Autorkę próbek. Jest to najdłuższy i jednocześnie najważniejszy rozdział w całej rozprawie. W rozdziale piątym Doktoranta krótko podsumowuje uzyskane wyniki, a w szóstym przedstawiona została metodologia badawcza. Taki układ pracy jest poprawny, aczkolwiek wydaje mi się, że pracę nieco lepiej by się czytało, gdyby metodologia pomiarowa została włączona do rozdziału trzeciego bądź gdyby stanowiła rozdział czwarty.

Stronę formalną przedstawionej do recenzji rozprawy oceniam wysoko. Praca jest estetyczna a rysunki dobrej jakości i czytelne. Mimo, dużej staranności przy przygotowaniu rozprawy, rzuciły mi się w oczy drobiazgi, które wymieniam poniżej:

- Niektóre skróty są wprowadzane więcej niż raz np. CVD na str. 27 i 28, czy CV na str. 121 (2x) i 135 (2x),
- Znaleźć można błędne końcówki np. str. 38 „energii promieniowania elektromagnetycznej”, „płatki grafenowe” na str. 80. Wydaje mi się, że pojawiają się też podwójne spacje (np. na stronie 48, czy 59),
- Rozmiary etykiet na rysunkach nie są jednolite np. rysunki 1.1, 3.4 czy 4.9, a także niekiedy rozmiary legend są tak małe, że trudno odczytać treść (w wersji papierowej) np. rys. 4.6 czy 4.30,
- Niektóre zdania są trudne w odbiorze np. na dole strony 46: „W widmie Ramana obserwuje się jedynie te drgania, podczas których polaryzowalność cząsteczki zmienia się w taki sposób, że nie sięga ekstremum w położeniu równowagi”, czy też ostatnie zdanie na stronie 53: „Dyfraktogram jest zależnością między natężeniem wiązki ugiętej od kąta 2 Theta pomiędzy wiązką padającą a wiązką ugiętą”,
- Na stronie 67 w ostatnim akapicie jest odwołanie do rysunku 4.6d, gdy tymczasem pewnie powinno być 4.3d,
- Strona 68, 69: Średnia grubość płatków na bazie AFM na rys. 4.3b to 2.2 nm a w tabeli 3 Dc wynosi 3 nm,
- Kolejność odwołań do sekcji rysunków jest zaburzona np. 4.3c pojawia się po 4.4f (str. 69), a 4.4b przed 4.4a (str. 71),
- Niekiedy w pracy ilość warstw podawana jest liczbą zmiennoprzecinkową co pewnie jest literówką i chodziło Autorce o grubość wyrażoną w nanometrach (np. druga linijka na stronie 74),
- Zapis jednostek jest niekiedy zapisywany ze spacją a niekiedy bez spacji separującej od wartości, np. strona 84: „7 nm” i „4nm”,
- Moim zdaniem praca by zyskała gdyby Autorka opisała w rozdziale 2 metodę HPH, a z kolei w rozdziale 3 analizę widm CV,
- Nie odnalazłem w pracy odnośnika do rysunku 4.17,
- Na stronie 102 w drugiej linijce wydaje mi się, że jest literówka w oznaczeniu próbki – jest 5/21 a chyba powinno być 10/21,
- Pewne opisy związane z CV mogłyby zostać rozszerzone co poprawiłoby czytelność pracy.

Proszę o pozostawienie tych uwag edytorskich w trakcie obrony bez komentarza.

Merytoryczną stronę pracy oceniam wysoko. Autorka podjęła się wyzwania związanego z analizą własności fizycznych nanomateriałów wytworzonych przy użyciu potencjalnie skalowalnych metod, w tym rozwarstwiania grafitu w cieczy, rozwarstwiania w homogenizatorze wysokociśnieniowym grafitu i MoS₂ i eksfoliacji wodorotlenku niklu ultradźwiękami. Należy tu podkreślić zaangażowanie Autorki w opracowanie technologii rozwarstwiania grafitu w oleum, która wydaje się być bardzo efektywnym sposobem na uzyskanie bardzo wysokiej jakości grafenu płatkowego. Oszacowane przez Autorkę grubości płatków wynoszą około 2.2 nm (poniżej 10 warstw) i klasyfikowane mogą być jako grafen. Bardzo podobała mi się w pracy cała sekcja dotycząca analizy opartej o szerokość połówkową pasma 2D i współczynnik R^2 . Pokazane tam również zostało, że asymetria modu 2D wynika ze zmian jednego z dwóch podpasm. Ta część pracy jest bardzo dobrze przygotowana, wyjaśnienia metodologii są bardzo klarowne, wyniki jednoznaczne i przedstawione w bardzo poglądowy i estetyczny sposób. Podobała mi się również sekcja w której Autorka porównała wyniki rozwarstwiania w oleum z modelowymi płatkami rozwarstwanianymi taśmą klejącą oraz próbkami dostępnymi na rynku w postaci produktów komercyjnych. Pozwala to dostrzec jak dobrej jakości jest grafen płatkowy uzyskiwany dzięki metodzie, przy opracowaniu której Autorka pracowała. Bardzo wartościowa jest również moim zdaniem klasyfikacja grafenu płatkowego wprowadzona w podrozdziale 4.2.3. Wydaje mi się, że jest to dobry punkt startowy do wprowadzenia ogólnej i uniwersalnej klasyfikacji tego typu materiałów. Uważam również, że bardzo ważnym wynikiem przedstawionym w pracy jest wyznaczenie zespolonego współczynnika załamania światła dla wodorotlenku niklu oraz pokazanie, że współczynnik ten zależy od grubości czy też jakości uzyskanego materiału. Wydaje mi się, że dane te są na tyle wartościowe, że warto rozważyć ich udostępnienie np. na portalu refractiveindex aby inni naukowcy mogli z tych danych w swobodny i otwarty sposób korzystać.

W trakcie lektury przedstawionej do recenzji pracy nasunął mi się szereg uwag i pytań, które wymienione są poniżej:

- Eksfoliacja grafitu do grafenu płatkowego na mokro prowadzi do pewnego rozkładu grubości płatków. Jaka może być przyczyna, że rozkład ten jest normalny a nie prostokątny?
- Strona 71: Dane XPS są bardzo zdawkowo opisane – czy szacowanie z dokładnością do 0.01% jest uzasadnione i czy analiza maksimum od tlenu w badanych próbkach ma sens?
- Strona 95: badania Ramanowskie różnych frakcji MoS₂ po wirowaniu pokazują przesunięcia modów A_{1g} i E_g. Czy jednak dla mikstur zawierających różne grubości płatków nie należałoby się spodziewać raczej zmian szerokości połówkowej głównych modów, a nie ich przesunięcia?
- Strona 95, rys. 4.16e: Czy można w przypadku MoS₂ mówić o płatkach czy jest to nieco na wyrost? Nie pokazano również w pracy wyników AFM dla wodorotlenku niklu i dla płatków grafenu uzyskanych w homogenizatorze ciśnieniowym, czy takie dane są dostępne?
- Strona 106: Analiza R^2 jest tu bardzo skromna. Czy bazując na danych z podrozdziału 4.2.1 można tu oszacować np. rozmiary płatków?

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mileny Ojrzyńskiej związana jest z badaniami nanomateriałów w postaci płatków wytworzonych głównie w fazie ciekłej technikami, które

perspektywicznie mogą pozwolić na skalowalność procesów w kierunku masowej produkcji przemysłowej. Zawarte w niej wyniki są oryginalne i zostały przedstawione w serii kilku artykułów naukowych. Rozprawa przygotowana przez mgr inż. Milenę Ojrzyńską stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje jednoznacznie o dogłębnej wiedzy w dyscyplinie nauki fizyczne oraz o zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę. Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mileny Ojrzyńskiej spełnia warunki stawiane przez *Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (tj. Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do publicznej obrony rozprawy.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoką jakość wyników naukowych, liczbę opublikowanych artykułów naukowych, w których Pani Milena Ojrzyńska jest pierwszym Autorem, a także kilka artykułów, w których jest współautorem i w końcu rangę czasopism naukowych, w których prace Doktorantki zostały opublikowane wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych Politechniki Warszawskiej o przyznanie Pani mgr inż. Milenie Ojrzyńskiej wyróżnienia za przygotowaną rozprawę doktorską.


Prof. dr hab. Paweł Kowalczyk