

Dr hab. Marcin Molenda, prof. UJ
Uniwersytet Jagielloński
Wydział Chemii
Zakład Technologii Chemicznej
ul. Gronostajowa 2
30-387 Kraków
tel: (12) 6862419
marcin.molenda@uj.edu.pl



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział Chemii

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pani mgr. inż. Zuzanny Zarach
pt. „*Metal chalcogenide-based electrode materials for*
***electrochemical energy storage applications*”**

“Materiały elektrodowe na bazie chalcogenków metali do zastosowań
w elektrochemicznym magazynowaniu energii”

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Zuzanny Zarach pod w/w tytułem została przygotowana na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej pod kierunkiem promotora dr. hab. inż. Andrzeja Nowaka, prof. PG i promotora pomocniczego dr. inż. Mariusza Szkody.

Recenzowana dysertacja dotyczy badań chalcogenkowych materiałów elektrodowych do zastosowań w elektrochemicznym magazynowaniu energii, w szczególności w superkondensatorach (SCs) i akumulatorach sodowo-jonowych (SIB). Podjęta w rozprawie tematyka jest bardzo aktualna i doskonale wpisuje się w światowe trendy w obszarze badań nad współczesną elektrochemią materiałów funkcjonalnych oraz jest zgodna z priorytetami europejskimi i międzynarodowymi. Jest także wyrazem trwającego wyścigu

ul. Gronostajowa 2

30-387 Kraków

tel. +48 12 686 26 00

fax +48 12 686 27 50

sekretar@chemia.uj.edu.pl

www.chemia.uj.edu.pl



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział Chemii

technologicznego w obszarze rozwiązań dla zachodzącej transformacji energetycznej, w tym dla magazynowania i konwersji energii.

Jak pokazują ostatnie raporty agencji analitycznych (m.in. Benchmark Mineral Intelligence, McKinsey, Roland Berger) prognozujące rozwój rynku magazynowania energii (akumulatory jonowe Li-ion i Na-ion, przepływowe, superkondensatory), zapotrzebowanie w roku 2030 może osiągnąć 5,5–8 TWh/rok, w zależności od scenariusza rozwoju. Światowa produkcja ogniw Li-ion w roku 2024 przekroczyła poziom 1,5 TWh (wzrost o 30% względem roku 2023), przy czym produkcja w samych Chinach wyniosła 1,2 TWh, co doskonale uwidacznia stopień uzależnienia od tej gospodarki.

Szacuje się, że całkowita światowa produkcja ogniw na koniec roku 2025 wyniesie ok. 2 TWh, przy deklarowanych mocach produkcyjnych na poziomie 2,5-3 TWh/rok. Ten niewątpliwie dynamiczny wzrost rynku akumulatorów litowo-jonowych związany jest z upowszechnianiem się pojazdów elektrycznych (EV) oraz zwiększeniem udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w miksie energetycznym. Systemy magazynowania energii oparte na akumulatorach Li-ion, a także w niedalekiej przyszłości na Na-ion, będą więc pełnić kluczową rolę w sieciach elektroenergetycznych wykorzystujących niestabilne OZE, dla zapewnienia wymaganego buforowania energii i bilansowania mocy. Kluczowe funkcje magazynu energii (akumulatora, superkondensatora), wpływające m.in. na jego bezpieczeństwo operacyjne oraz efektywność systemu, zależą przede wszystkim od właściwości fizykochemicznych zastosowanych materiałów aktywnych (elektrodowych) i elektrolitów. W tym kontekście nie można pominąć aktualnej sytuacji geopolitycznej oraz wynikających z niej zagrożeń dla bezpieczeństwa łańcucha dostaw komponentów ogniw i surowców niezbędnych do produkcji materiałów aktywnych. Przykładowo, w lipcu 2025 r. Chiny - odpowiadające m.in. za 99% światowej produkcji materiału LFP - wprowadziły ograniczenia eksportowe dotyczące technologii materiałów katodowych do ogniw Li-ion. W październiku 2025 r. restrykcje te zostały rozszerzone, do poziomu zakazu eksportu bez licencji, na metale ziem rzadkich, zaawansowane materiały LFP i

ul. Gronostajowa 2

30-387 Kraków

tel. +48 12 686 26 00

fax +48 12 686 27 50

sekretar@chemia.uj.edu.pl

www.chemia.uj.edu.pl



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział Chemii

technologie ich wytwarzania oraz urządzenia dla linii produkcyjnych ogniw. Na początku listopada 2025 r. restrykcje te zostały następnie czasowo zawieszone na okres jednego roku. Powyższe fakty dobrze ilustrują, jak istotnym czynnikiem ryzyka dla globalnego łańcucha dostaw pozostają decyzje geopolityczne, a także jak silnie mogą one wpływać na dostępność kluczowych materiałów i technologii dla sektora magazynowania energii. W tym kontekście warto podkreślić, że zdolność do efektywnego magazynowania energii może stać się jednym z kluczowych źródeł strategicznej przewagi konkurencyjnej gospodarek, szczególnie w warunkach dynamicznej transformacji energetycznej i niestabilności globalnych rynków surowcowych. Jasno wskazuje to celowość i potrzebę intensyfikacji badań nad opracowaniem rozwiązań materiałowych, opartych na dostępnych surowcach, które mogłyby ograniczyć zależność od importu i zwiększyć odporność technologii magazynowania energii na podobne zaburzenia w przyszłości. Uważam, że cele postawione w recenzowanej rozprawie doktorskiej w pełni odpowiadają tej potrzebie.

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim w formie monografii publikacyjnej na podstawie cyklu trzech prac opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach branżowych. Praca liczy łącznie 207 stron na co składają się m. in.: obszernie (62 strony) wprowadzenie teoretyczne zawierające 408 pozycji literaturowych, trzy zasadnicze rozdziały publikacyjne zawierające krótkie streszczenia każdej z publikacji oraz materiały dodatkowe, część zawierająca podsumowanie i główne wnioski, zestawienie osiągnięć naukowych oraz oświadczenia współautorów dotyczące wkładu autorskiego, które są spójne i nie budzą żadnej wątpliwości. Struktura dokumentu jest przejrzysta i logiczna oraz bardzo starannie zredagowana.

Rozdział poświęcony wprowadzeniu teoretycznemu został opracowany na bardzo wysokim poziomie merytorycznym i metodycznym. Autorka w sposób logiczny i spójny przedstawia podstawy elektrochemicznego magazynowania energii, omawiając zarówno fundamentalne mechanizmy gromadzenia ładunku, jak i

ul. Gronostajowa 2

30-387 Kraków

tel. +48 12 686 26 00

fax +48 12 686 27 50

sekretar@chemia.uj.edu.pl

www.chemia.uj.edu.pl



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział Chemii

kluczowe parametry charakteryzujące pracę superkondensatorów oraz ogniw elektrochemicznych. Szczególnie cennym elementem jest szerokie i jednocześnie precyzyjne omówienie różnic pomiędzy mechanizmami pojemnościowymi, pseudopojemnościowymi i faradajowskimi, co stanowi istotny fundament do dalszych rozważań eksperymentalnych. Na podkreślenie zasługuje również kompleksowy i aktualny przegląd materiałów elektrodowych stosowanych w superkondensatorach oraz akumulatorach sodowo-jonowych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów chalcogenkowych. Autorka nie ogranicza się do opisu właściwości poszczególnych grup materiałów, lecz w sposób dojrzały naukowo analizuje zależności pomiędzy strukturą, składem chemicznym a właściwościami elektrochemicznymi, wskazując zarówno potencjał aplikacyjny, jak i istniejące ograniczenia. Rozdział cechuje się dużą przejrzystością, poprawnością terminologiczną oraz bardzo dobrą jakością językową. Cytowana literatura obejmuje zarówno pozycje przeglądowe, jak i najnowsze prace oryginalne, co świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktorantki w aktualnym stanie wiedzy. Całość tworzy solidne podstawy teoretyczne dla części eksperymentalnej (publikacyjnej) rozprawy oraz w pełni uzasadnia podjętą przez Autorkę tematykę badawczą.

Ocena dysertacji, której zasadniczą część stanowią prace opublikowane w bardzo dobrych, międzynarodowych czasopismach recenzowanych, jest w sposób oczywisty ułatwiona. Fakt, że wyniki badań zostały już pozytywnie zweryfikowane w toku rygorystycznych procedur recenzyjnych, stanowi jednoznaczne potwierdzenie ich wysokiej jakości merytorycznej, wartości oraz nowości naukowej, a także poprawności metodycznej. Na szczególne podkreślenie zasługuje również fakt, że Doktorantka jest pierwszym autorem we wszystkich publikacjach oraz jest autorem korespondencyjnym, co bez wątplenia wskazuje na jej wiodącą rolę w planowaniu badań, ich realizacji oraz opracowaniu wyników. Z tego względu w dalszej części recenzji skoncentruję się na wskazaniu — z punktu widzenia

ul. Gronostajowa 2

30-387 Kraków

tel. +48 12 686 26 00

fax +48 12 686 27 50

sekretar@chemia.uj.edu.pl

www.chemia.uj.edu.pl



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

recenzenta — najistotniejszych elementów poszczególnych publikacji składających się na rozprawę.

„Publikacja nr 1, opublikowana w czasopiśmie *Electrochimica Acta* i stanowiąca rozdział 2 rozprawy, dotyczy analizy zjawiska wzrostu pojemności elektrody 1T/2H-MoS₂ w wyniku jej modyfikacji powierzchniowej nanocząstkami platyny. Autorka wykazała, że platynowa elektroda przeciwna w układzie trójelektrodowym nie jest elektrochemicznie obojętna, lecz ulega częściowej redepozycji na powierzchni elektrody roboczej, prowadząc do jej modyfikacji chemicznej i strukturalnej oraz nietypowego wzrostu pojemności podczas długotrwałego cyklowania. Przeprowadzona analiza elektrochemiczna i strukturalna jest kompleksowa, a interpretacja wyników poprawna i dobrze osadzona w aktualnym stanie wiedzy. Uważam, że rezultaty zawarte w publikacji mają istotne znaczenie zarówno aplikacyjne, jak i metodyczne.

Publikacja nr 2, została opublikowana w czasopiśmie *Applied Surface Science* i stanowi rozdział 3 rozprawy, poświęcona jest badaniom materiałów kompozytowych typu TiO₂/N-MoS₂ otrzymanych w procesie hydrotermalnym i przeznaczonych do zastosowań jako elektrody bezlepiszczowe (binder-free) w superkondensatorach. Praca ta wyróżnia się umiejętnym połączeniem inżynierii materiałowej z analizą mechanizmów magazynowania ładunku. Szczególnie istotne jest trafne powiązanie obecności defektów strukturalnych i domieszkowania azotem z poprawą przewodnictwa elektrycznego oraz intensyfikacją procesów pojemnościowych. Przeprowadzona analiza elektrochemiczna i fizykochemiczna cechuje się wysokim poziomem kompletności i poprawności metodycznej, zaś interpretacja wyników jest spójna i dobrze osadzona w aktualnym stanie wiedzy. Publikacja ta w istotny sposób poszerza wiedzę na temat możliwości modyfikacji właściwości strukturalnych i elektronowych materiałów elektrodowych opartych na MoS₂ stabilizowanym na podłożu funkcjonalnym, stanowiąc ważne uzupełnienie pierwszego etapu badań przedstawionych w rozprawie.

Wydział Chemii

ul. Gronostajowa 2

30-387 Kraków

tel. +48 12 686 26 00

fax +48 12 686 27 50

sekretar@chemia.uj.edu.pl

www.chemia.uj.edu.pl



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział Chemii

Publikacja nr 3, opublikowana w czasopiśmie *Small* i stanowiąca rozdział 4 rozprawy, dotyczy badań materiałów kompozytowych typu $\text{SnS}_x\text{@C}$ przeznaczonych do zastosowań jako anody w akumulatorach sodowo-jonowych. Praca koncentruje się na określeniu wpływu warunków procesu pirolizy na właściwości mikrostrukturalne, chemiczne i elektrochemiczne kompozytów anodowych $\text{SnS}_x\text{@C}$, w których matryca węglowa uzyskana została ze skrobi, a więc surowca odnawialnego. Stanowi to doskonałe dopełnienie wcześniejszych badań Doktorantki, rozszerzając ich zakres o inną klasę materiałów chalcogenkowych oraz odmienny, objętościowy, mechanizm magazynowania ładunku oparty na reakcjach konwersji, zaś zastosowanie surowców odnawialnych wzmacnia zrównoważony charakter materiałowy rozwiązania (technologii). Systematyczna analiza wpływu temperatury pirolizy na skład fazowy, mikrostrukturę oraz wydajność elektrochemiczną otrzymanych kompozytów została powiązana z mechanizmami degradacji materiału zachodzącymi podczas pracy w ogniwie sodowym, monitorowanymi *in operando* techniką spektroskopii Ramana. Zastosowanie tej zaawansowanej techniki spektroskopowej pozwoliło na bezpośrednią obserwację przemian strukturalnych zachodzących w elektrodzie podczas pracy ogniwa i w efekcie pozwoliły na wskazanie optymalnych warunków procesu syntezy. Publikacja ta charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem merytorycznym, dojrzałą interpretacją wyników oraz wyraźnym znaczeniem aplikacyjnym w kontekście rozwoju zrównoważonych technologii magazynowania energii w systemach sodowo-jonowych. W tym kontekście naturalnie nasuwa się pytanie, czy Doktorantka rozważała powiększenie skali (scale-up) opracowanego procesu syntezy kompozytów $\text{SnS}_x\text{@C}$ do warunków półtechnicznych (bądź przemysłowych) oraz jakie, jej zdaniem, byłyby kluczowe wyzwania technologiczne związane z przejściem z procesu okresowego do procesu ciągłego, w szczególności w zakresie kontroli mikrostruktury, jednorodności materiału oraz stabilności parametrów pirolizy, niezbędnych do utrzymania wysokiej wydajności elektrochemicznej.



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział Chemii

Choć przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska, a nie całokształt dorobku naukowego Doktorantki, to jednak nie sposób pominąć faktu, że jej aktywność publikacyjna jest niewątpliwie imponująca. Na całkowity dorobek składa się 17 oryginalnych prac naukowych opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach z tzw. Listy Filadelfijskiej, o łącznym współczynniku wpływu $IF_{2024} = 88,5$ oraz sumarycznej liczbie 2280 punktów MNiSW. Ponadto jest współautorką 1-go rozdziału w monografii, 2-ch udzielonych patentów UPRP, 1-go zgłoszenia patentowego w EPO oraz kierownikiem projektu NCN Preludium i wykonawcą w 6-ciu innych projektach finansowanych ze źródeł zewnętrznych. Powyższe osiągnięcia jednoznacznie świadczą o bardzo wysokiej aktywności naukowej Doktorantki, czego wyrazem są także liczne nagrody i wyróżnienia.

Podsumowując, uważam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Zuzanny Zarach stanowi w pełni oryginalne osiągnięcie naukowe, przedstawia bardzo wysoki poziom merytoryczny i wnosi istotne elementy nowości naukowej, tym samym całkowicie wypełnia warunki i wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 742). Na tej podstawie przedkładam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Chemiczne Politechniki Gdańskiej o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej

Mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy, istotny wkład w rozwój wiedzy w obszarze materiałów do elektrochemicznego magazynowania energii, a także wyraźny potencjał aplikacyjny uzyskanych rezultatów, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej Pani mgr. inż. Zuzanny Zarach. Przedstawione w pracy rozwiązania materiałowe odpowiadają na zapotrzebowanie rynku technologii magazynowania energii, w szczególności w kontekście

ul. Gronostajowa 2

30-387 Kraków

tel. +48 12 686 26 00

fax +48 12 686 27 50

sekretar@chemia.uj.edu.pl

www.chemia.uj.edu.pl



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

rozwoju systemów wykorzystujących odnawialne źródła energii. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że opracowane materiały i koncepcje technologiczne nie bazują na surowcach krytycznych ani trudno dostępnych, co istotnie zwiększa ich atrakcyjność wdrożeniową, bezpieczeństwo łańcucha dostaw oraz odporność na uwarunkowania geopolityczne. W mojej ocenie rozprawa w sposób jednoznaczny spełnia kryteria pracy wyróżniającej się zarówno pod względem naukowym, jak i potencjalnych implikacji gospodarczych.

Wydział Chemii

dr hab. Marcin Molenda, prof. UJ

Kraków, 08-12-2025 r.

ul. Gronostajowa 2

30-387 Kraków

tel. +48 12 686 26 00

fax +48 12 686 27 50

sekretar@chemia.uj.edu.pl

www.chemia.uj.edu.pl