



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
KATEDRA CHEMII NIEORGANICZNEJ
Prof. dr hab. inż. Marta Radecka

Kraków 07.09.2026

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ
INŻYNIERIA CHEMICZNA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: „Zjawiska transportu masy, ładunku i ciepła w mikrofluidalnych ogniwach fotoelektrochemicznych”

Autor rozprawy: mgr inż. Mikita Davykoza

Promotorzy: Prof. dr hab. inż. Juliusz Winiarski

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Chemiczna Politechniki Wrocławskiej. Podstawa prawna art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami).

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana M.Davykoza zawiera ocenę wraz z uzasadnieniem następujących elementów:

- Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria chemiczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej;
- Czy przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Mikita Davykoza „Zjawiska transportu masy, ładunku i ciepła w mikrofluidalnych ogniwach fotoelektrochemicznych” jest dobrze uzasadniona zarówno z punktu widzenia aktualnych wyzwań energetycznych, jak i ograniczeń technologicznych ogniw fotowoltaicznych trzeciej generacji.

Do zalet barwnikowych ogniw słonecznych (DSSC) należą m.in. niskie koszty wytwarzania, możliwość pracy na elastycznych podłożach, szerokie możliwości modyfikacji właściwości fizykochemicznych oraz wysoka efektywność

działania w warunkach oświetlenia rozproszonego. Proces skalowania jest jednak ograniczany przede wszystkim przez transport masy w elektrolicie, wzrost oporów wewnętrznych oraz problemy ze stabilnością cieplną. Integrację DSSC z rozwiązaniami mikrofluidalnymi należy więc ocenić jako trafny i perspektywiczny kierunek badań. Wymuszony przepływ elektrolitu może ograniczać bariery dyfuzyjne, natomiast zastosowanie mikroprzepływowych wymienników ciepła umożliwia efektywne zarządzanie temperaturą układu. Dodatkową zaletą jest wykorzystanie konfiguracji typu *gapless*, sprzyjającej redukcji niekorzystnych efektów transportowych i elektrycznych. Zaproponowane podejście łączy zatem zagadnienia fotowoltaiki, elektrochemii, transportu masy i mikrofluidyki w spójną koncepcję badawczą. Tematyka ma wysoką wartość poznawczą i aplikacyjną, a uzyskane wyniki mogą istotnie przyczynić się do rozwoju skalowalnych i bardziej stabilnych systemów DSSC.

W pracy sformułowano następujące cele naukowe:

1. Zaprojektowanie i wytwarzanie ogniw μ DSSC w dwóch konfiguracjach – bez przestrzeni elektrodowej (tzw. *gapless*) oraz z przestrzenią elektrodową (tzw. *gap*).
2. Wyznaczanie oporów związanych z transportem ciepła, masy i ładunku.
3. Znaleźnienie powiązań tych właściwości w zależności od warunków prądowo-napięciowych pracującego ogniwa, temperatury ogniwa, intensywności i temperatury barwowej oświetlenia.

oraz zaproponowano hipotezę badawczą:

Redukcja oporów transportu masy poprzez zastosowanie konfiguracji *gapless* ogniwa μ DSSC oraz redukcja oporów transportu ładunku poprzez stosowanie ograniczenia oświetlanej powierzchni fotoaktywnej (stosowanie przesłon) przyczyni się do zwiększenia sprawności i innych parametrów charakterystycznych ogniwa.

Rozprawa doktorska obejmuje siedem rozdziałów merytorycznych, bibliografię oraz streszczenia w języku polskim i angielskim, zachowując typową dla tego rodzaju prac strukturę. Praca liczy łącznie 103 strony.

W części teoretycznej (rozdziały 1-3) przedstawiono rozwój źródeł energii, znaczenie energetyki odnawialnej oraz podstawy działania ogniw fotowoltaicznych, ze szczególnym uwzględnieniem DSSC, procesów fotoelektrochemicznych, transportu ładunku i modeli elektrycznych. Następnie omówiono podstawy mikrofluidyki, zjawiska transportu masy i ciepła w mikrokanałach oraz zasadę działania mikroprzepływowych wymienników ciepła. Rozdziały 4-7, stanowiące część badawczą pracy, poświęcone są zaprojektowaniu mikrofluidalnego ogniwa μ DSSC zintegrowanego z mikroprzepływowym wymiennikiem ciepła, opisie stanowiska badawczego oraz zastosowanych metod eksperymentalnych. W dalszej części przedstawiono wyniki badań charakterystyk prądowo-napięciowych, sprawności konwersji mocy, współczynników wypełnienia (FF, IFF), efektywności wymiany ciepła oraz wpływu

oporów transportu masy i ładunku na pracę ogniwa. Pracę kończy dyskusja uzyskanych wyników, ocena potencjału aplikacyjnego opracowanego rozwiązania oraz przedstawienie najważniejszych wniosków końcowych.

Pierwszy rozdział obejmujący historię źródeł energii, strukturę światowej produkcji, elektrownie węglowe, gazowe, jądrowe, wiatrowe, słoneczne i magazynowanie energii, jest zbyt szeroki w stosunku do tematyki pracy poświęconej mikrofluidalnym DSSC. Część z tych treści można uznać za zbyt odległą od głównego problemu badawczego a skrócenie go mogłoby wyraźnie poprawić proporcje pracy.

Doktorant natomiast bardzo dobrze porusza się w literaturze dotyczącej mikrofluidalnych barwnikowych ogniw fotoelektrochemicznych/ μ DSSC, które są znacznie węższą i bardziej eksperymentalną dziedziną niż klasyczne DSSC.

Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej Pana Mikity Davykoza należy zaliczyć wkład w rozwój najnowszego kierunku mikrofluidalnych barwnikowych ogniw fotoelektrochemicznych tj. μ DSSC jako zintegrowany układ transportu energii.

Doktorant opracował wielowarstwowe mikrofluidalne DSSC o powierzchni fotoaktywnej przekraczającej 7 cm², połączone bezpośrednio z mikrofluidalnym wymiennikiem ciepła. Zaproponował tzw. konfigurację gapless, której zadaniem było ograniczenie oporu transportu masy pomiędzy elektrodami. Pełne urządzenie uzyskiwało sprawność co najmniej około 6% w standardowych warunkach testowych, przy współczynniku wypełnienia dochodzącym do 68%. Analiza wskazywała jednocześnie, że po wyeliminowaniu ograniczeń związanych z rezystancją szeregową potencjał samego układu fotoelektrochemicznego jest znacznie większy. Podawanych w pracy wartości około 19–22% nie należy jednak traktować jako zmierzonej sprawności pełnego modułu; wynikają one z analizy granicznych warunków pracy przy redukcji wpływu rezystancji szeregowej.

Co szczególnie istotne, w konfiguracji gapless przepływ elektrolitu nie powodował spadku sprawności. Pokazuje to, że prawidłowo zaprojektowana mikrofluidyka nie musi być dodatkowym obciążeniem dla DSSC, lecz może stać się jego integralną funkcją.

Przedstawione w rozprawie wyniki badań oraz ich analiza stanowią podstawę do sformułowania następujących pytań i uwag, do których proszę Doktoranta o ustosunkowanie się.

1. Mezoporowata warstwa TiO₂ jest jednym z kluczowych elementów barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego, ponieważ jej właściwości strukturalne i powierzchniowe wpływają zarówno na ilość zaadsorbowanego barwnika, jak i na transport oraz rekombinację ładunku. W rozprawie nie przedstawiono jednak szczegółowej charakterystyki zastosowanego TiO₂, m.in. jego składu fazowego (anataz, rutil lub ich mieszanina), powierzchni właściwej, porowatości czy punktu izoelektrycznego. Jakie właściwości miał zastosowany materiał i jaki,

zdaniem Doktoranta, wpływ mogły one mieć na uzyskane parametry pracy μ DSSC?

2. Proszę o doprecyzowanie określenia „TCO-FTO”. Ponieważ FTO stanowi szczególny przypadek materiałów z grupy TCO (Transparent Conductive Oxides), mam wątpliwość, czy w tym miejscu nie wystarczyłoby użyć określenia „FTO”. Czy zapis „TCO-FTO” ma w tym kontekście jakieś dodatkowe znaczenie, czy też jego zastosowanie wynika z chęci jednoczesnego podkreślenia zarówno klasy materiału (TCO), jak i konkretnego rodzaju warstwy przewodzącej (FTO)?
3. Z czego wynika obserwowany spadek sprawności μ DSSC wraz ze wzrostem natężenia promieniowania i który z mechanizmów — transport masy, rekombinacja czy opory elektryczne — ma zdaniem Doktoranta dominujące znaczenie? Czy wymuszony przepływ elektrolitu pozwala ograniczyć tę zależność?
4. W pracy przyjęto klasyfikację ogniów fotowoltaicznych obejmującą trzy generacje. Tymczasem w literaturze coraz częściej pojawia się pojęcie czterech generacji, choć brak w tym zakresie pełnej zgodności (DOI: 10.1039/C3NR02733C, DOI: 10.1016/j.seta.2021.101287, DOI: 10.3390/ma15165542, DOI: 10.1039/D3YA00179B, DOI: 10.1063/5.0211610) . Jak Doktorant ocenia zasadność takiego podziału i gdzie, jego zdaniem, powinna przebiegać granica między III a IV generacją technologii fotowoltaicznych?

Rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie oparte na obszernym materiale eksperymentalnym i poświęcone problematyce o istotnym znaczeniu naukowym, zawierającej elementy nowości. Doktorant wykazuje bardzo dobrą znajomość literatury przedmiotu oraz potrafi twórczo rozwijać podejmowane zagadnienia.

Na pozytywną ocenę zasługuje również sposób zaplanowania i realizacji badań. Zastosowane metody i techniki eksperymentalne zostały dobrane adekwatnie do postawionych celów. Uzyskane wyniki poddano rzetelnej analizie i trafnej interpretacji, co świadczy o dojrzałości badawczej Doktoranta.

Sformułowane cele naukowe i hipoteza badawcza, konsekwentnie przeprowadzony program eksperymentalny oraz sposób opracowania wyników potwierdzają bardzo dobre przygotowanie Doktoranta do samodzielnego prowadzenia działalności naukowej. Rozprawa potwierdza również jego odpowiedni poziom wiedzy teoretycznej. Przeprowadzone przez Pana mgr inż. Mikitę Davykoza badania stanowią oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i wnoszą wartościowy wkład do rozwoju analizowanej problematyki.

Rozprawa doktorska napisana jest większości jasnym i ścisłym językiem. Tekst opracowany jest starannie zarówno pod względem edytorskim jak i merytorycznym. W spisie treści skróty typu FF, IFF, PCE, DSSC, μ DSSC, J-V bez osobnego wykazu skrótów obniżają czytelność. W pracy doktorskiej tytuły rozdziałów powinny być możliwie samodzielnie zrozumiałe. Dodatkowo

rozwiniecie skrótu powinno być używane konsekwentnie w całej pracy. Np. zamiast: 6.1.3. Analiza sprawności fotokonwersji (PCE) ogniwa μ DSSC powinno być: 6.1.3. Analiza sprawności konwersji mocy (PCE) mikrofluidalnego barwnikowego ogniwa fotowoltaicznego (μ DSSC). Dotyczy to również stosowanych symboli. Podpis Rysunek 18 zawiera dwukrotnie różny opis dla podpunktu G. natomiast brak jest opisu dla H. Błędy te jednak nie wpływają na całościową ocenę pracy.

3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mikita Davykoza spełnia wymagania określone w art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (tekst jedn. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571, z późn.zm).

W związku z tym przedkładam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Chemiczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora Panu mgr inż. Mikita Davykoza w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria chemiczna.

