

Dr hab. inż. Marcin Drajewicz, prof. PRz
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
ul. Żwirki i Wigury 4, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 24 czerwca 2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Wierzbickiego

pt.: „*Investigation of the stability of oxygen electrode of solid oxide electrolysis cell (SOEC) operated with steam as a sweep gas for simultaneous production of high purity oxygen and hydrogen*”. Podstawa opracowania recenzji – pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Warszawskiej z dnia 15 maja 2025 r.

Rozprawa mgr. inż. Michała Wierzbickiego podejmuje zagadnienie aktualne i niezwykle istotne z punktu widzenia współczesnej energetyki – rozwój i optymalizacja technologii wysokotemperaturowej elektrolizy pary wodnej (SOEC), jako metody produkcji zielonego wodoru i tlenu. Autor w sposób przekonujący osadza temat pracy w kontekście globalnych strategii transformacji energetycznej, powołując się na konkretne dokumenty strategiczne państw i instytucji międzynarodowych. Już we wstępie podkreśla rosnące znaczenie technologii wodorowych w dążeniu do neutralności klimatycznej oraz wskazuje na istotne ograniczenia dotychczasowych metod separacji tlenu.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Wierzbickiego porusza aktualny i istotny temat badawczy, dotyczący stabilności elektrody tlenowej w stałotlenkowych ogniwach elektrolitycznych (SOEC), pracujących w warunkach zastosowania pary wodnej jako gazu omywającego. Praca została przygotowana w ramach programu Doktoratów Wdrożeniowych i prezentuje zarówno wysoki poziom

merytoryczny, jak i wyraźny potencjał aplikacyjny, szczególnie w kontekście rozwoju technologii wodorowych i efektywnego zagospodarowania produktów elektrolizy.

Wprowadzenie do rozprawy zostało szeroko zakrojone i umiejscawia podejmowaną tematykę w kontekście globalnych trendów energetycznych, polityki klimatycznej i strategii wodorowych wielu państw. Autor w sposób przystępny i rzeczowy omawia dynamiczny rozwój sektora zielonego wodoru oraz rosnącą rolę elektrolizy w jego produkcji. Cennym elementem jest przegląd technologii elektrolizerów, z uwzględnieniem stanu komercjalizacji i efektywności technicznej różnych rozwiązań.

Pracę podzielono prawidłowo na 6 rozdziałów. Składa się z trzech części. Część literaturowa jest bardzo rozbudowana i świadczy o doskonałym rozeznaniu autora w tematyce. Obejmuje ona zarówno zagadnienia fundamentalne, jak i zasady działania ogniw SOC, zjawiska elektrochemiczne, termodynamikę elektrolizy oraz przegląd materiałów elektrodowych i elektrolitów. Szczególnie wartościowe są podrozdziały poświęcone mechanizmom degradacji – analizie stabilności mikrostruktury warstwy LSCF, wpływowi pary wodnej i czystego tlenu na elektrody, a także konsekwencjom długoterminowej pracy ogniw. Następne rozdziały prezentują bardzo dobrze zaplanowaną i zrealizowaną kampanię eksperymentalną. Autor opracował stanowisko badawcze z dedykowanym piecem, układem doprowadzenia gazów, nawilżaczem i kontrolą ciśnienia, dostosowane do pracy z ogniwami o powierzchni 5×5 cm. Zaplanowano testy krótko- i długoterminowe z wykorzystaniem pary wodnej, azotu oraz tlenu, jako gazów omywających. W szczególności należy docenić zastosowanie wielu komplementarnych metod badawczych: pomiarów I-V, EIS, DRT, a także badań SEM, EDS, XRD. Autor wykazuje doskonałą orientację w literaturze przedmiotu, co świadczy o solidnym przygotowaniu teoretycznym. Przeprowadzono badania długoterminowe pracy ogniw przy różnych gazach omywających (para wodna, azot, tlen), z zachowaniem wysokiego rygoru metodologicznego. Szczególnie istotne są wyniki dotyczące wpływu pary wodnej na stabilność elektrody LSCF – jednego z kluczowych materiałów dla elektrody tlenowej – oraz możliwość jej zastosowania do odzysku tlenu bez konieczności stosowania kosztownych procesów separacyjnych. Wyniki badań są precyzyjnie przedstawione i poddane pogłębionej analizie. Praca zawiera liczne wykresy, dane liczbowe, mikrofotografie oraz porównania z literaturą. Interpretacja wyników jest logiczna, spójna i prowadzi do trafnych wniosków. Autor właściwie identyfikuje korzyści oraz potencjalne ograniczenia zastosowania pary wodnej jako gazu omywającego, wskazując także na

kierunki dalszych badań. Struktura rozprawy jest przejrzysta, język poprawny, a styl naukowy – adekwatny do rangi pracy. Szczególnie należy podkreślić interdyscyplinarność podejścia: praca łączy elementy inżynierii materiałowej, elektrochemii, energetyki i technologii chemicznej. Autor mógłby szerzej odnieść się do możliwych zastosowań praktycznych odzyskiwanego tlenu. Wskazane byłoby przedstawienie szerszej perspektywy na komercjalizację badanych rozwiązań (analiza ekonomiczna, modele integracji systemowej). Brakuje nieco danych statystycznych dotyczących powtarzalności wyników (liczba próbek, odchylenia standardowe).

Na podstawie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Wierzbickiego, nie stwierdzono istotnych błędów merytorycznych w zakresie metodologii, czy interpretacji danych, jednak można wskazać kilka miejsc, które mogą być uznane za potencjalne źródła niedoskonałości, ograniczeń lub błędów eksperymentalnych. Najważniejsze z nich:

1. Nieskuteczność przyjętych hipotez badawczych: Autor jednoznacznie stwierdza, że obie hipotezy badawcze – zakładające stabilność materiału LSCF w parze wodnej i czystym tlenie – zostały zdyskredytowane. Choć nie jest to błąd ale, świadczy o niepełnej trafności wstępnych założeń eksperymentu: *“Primary hypothesis disproved... Secondary hypothesis disproved.”*
2. Brak doboru alternatywnego materiału katody: Mimo negatywnych wyników stabilności LSCF, autor nie przeprowadził testów z innym materiałem elektrody tlenowej, co mogłoby pogłębić wartość poznawczą pracy. Jest to ograniczenie zakresu badawczego, które autor sam przyznaje w dyskusji: *“Both proposed investigation paths revealed poor stability of the LSCF material... The sustaining of the initial performance... cannot be guaranteed with this material.”*
3. Ograniczony czas testów względem wymagań przemysłowych: Testy trwały 1000 godzin, co jest akceptowalnym wynikiem w warunkach laboratoryjnych, ale niewystarczającym, by ocenić pełną trwałość materiału w rzeczywistych zastosowaniach przemysłowych (np. >5000h).
4. Możliwa niejednorodność warunków pomiarowych: Z dokumentacji wynika, że kilka testów przeprowadzono w różnych konfiguracjach przepływu gazów i warunków startowych. Istnieje więc ryzyko, że część zmian elektrochemicznych i mikrostrukturalnych wynikała nie tylko z rodzaju gazu, ale także ze zmiennych warunków eksperymentalnych, co utrudnia jednoznaczną interpretację: *„The electrochemical measurements with the long-*

term observation allowed to question the hypothesis... the performance loss... with complicated evolution...”

5. Brak jednoznacznej analizy wpływu temperatury lokalnej: Chociaż temperatura testowa została ustalona, autor nie analizuje wpływu możliwych nierównomierności rozkładu temperatury w ogniwie na degradację, co może być istotne w analizie mikropęknięć i delaminacji.

6. Brak wystarczającej stabilności elektrody LSCF w parze wodnej: Autor przeprowadził długoterminowe testy z parą wodną jako gazem omywającym (ASG) i wykazał, że materiał LSCF ($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$), mimo że powszechnie stosowany w SOC, nie zapewniał dostatecznej stabilności przy pracy w takich warunkach: *“The electrochemical analysis for cells operated with steam as ASG indicated that the oxygen electrode did not present sufficient stability in the 1000 h experiment.”*

7. Intensywna degradacja mikrostruktury – dekompozycja LSCF: W analizach wykryto rozwarstwienie i powstawanie wtórnych faz zawierających Sr, co doprowadziło do znacznej degradacji elektrody: *“Microstructural investigations showed that in case of steam the creation of many secondary phases and fatal de-mixing of the LSCF layer is responsible for extreme degradation rate of the cell.”*

8. Podobna degradacja w obecności czystego tlenu: Pomimo hipotezy, że tlen jako ASG może być bardziej stabilnym środowiskiem niż para, testy wykazały porównywalną degradację elektrody LSCF, z innym mechanizmem – delaminacją: *“The poor stability of the cell was also discovered when cell was swept with pure oxygen [...] the behavior of the cell fitted more to the pattern that is connected with delamination-based degradation.”*

9. Wątpliwości co do wpływu zawartości tlenu w gazie nośnym: Testy z azotem wykazały, że niski poziom tlenu niekoniecznie ogranicza degradację: *“The tests with nitrogen used as a ASG, allowed to obtain the reference data and disprove supposition of significant impact on degradation, related to low oxygen content in the sweep gas.”*

10. Drobne uwagi językowo-redakcyjne: Choć tekst jest ogólnie bardzo dobrze przygotowany, w wersji angielskiej pojawiają się nieliczne potknięcia stylistyczne, jak:

- “the all the results” (zamiast: “all the results”),
- „are more steep then ones” (powinno być: „than the ones”).

Nie mają one jednak wpływu na zrozumienie treści naukowej.

Autor bardzo uczciwie i otwarcie zidentyfikował ograniczenia technologiczne i naukowe wynikające z przeprowadzonych badań. Główne uwagi krytyczne dotyczą braku trwałości materiału LSCF, jako elektrody tlenowej w SOEC przy zastosowaniu alternatywnych gazów omywających (para, tlen). Z punktu widzenia naukowego jest to cenna wartość pracy – negatywny wynik również wnosi istotną wiedzę, ponieważ eliminuje błędne założenia i kieruje uwagę badaczy na potrzebę opracowania nowych, odporniejszych materiałów.

Podsumowując, rozprawa doktoranta – mgr. inż. Michała Wierzbickiego spełnia wszystkie kryteria stawiane pracom doktorskim: prezentuje nowy wkład do wiedzy naukowej, jest oparta na samodzielnie przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych, a uzyskane wyniki mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne. Praca dowodzi wysokich kompetencji badawczych autora i jego zdolności do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej wyróżnienie i dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyki.

Dagmara Moraw