



Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krystiana Machaja pt. „Badania stosowalności technologii stałotlenkowych ogniw paliwowych oraz amoniaku jako paliwa w sektorze morskim”

Podstawą niniejszej recenzji było zlecenie dr. hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Wrocławskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska Krystiana Machaja skupia się na badaniu możliwości wykorzystania amoniaku jako alternatywnego paliwa w stałotlenkowych ogniwach paliwowych (SOFC). Praca ta wnosi istotny wkład w dziedzinę energetyki, zwłaszcza w kontekście redukcji emisji CO₂ i poszukiwania nowych, ekologicznych źródeł energii. Praca podzielona jest na cztery główne sekcje, które obejmują: (i) badanie pojedynczych ogniw SOFC zasilanych amoniakiem, (ii) badania rozwojowe stosów NH₃-SOFC, (iii) analizę post-mortem ogniw i stosów, oraz (iv) badanie numeryczne instalacji zawierającej NH₃-SOFC.

Kluczowym elementem pracy jest analiza wydajności i trwałości ogniw SOFC zasilanych amoniakiem, w tym wpływ różnych warunków pracy na ich degradację. Autor przeprowadził zarówno eksperymentalne, jak i numeryczne badania, które pozwoliły na głębsze zrozumienie procesów zachodzących w ogniwach oraz na identyfikację potencjalnych problemów, takich jak pękanie ogniw czy korozja elementów stalowych. Wyniki tych badań mają istotne znaczenie dla przyszłego rozwoju technologii SOFC, zwłaszcza w kontekście wykorzystania amoniaku jako paliwa.

Dodatkowo, praca doktorska Machaja charakteryzuje się wysokim poziomem interdyscyplinarności, łącząc wiedzę z zakresu chemii, fizyki, inżynierii materiałowej i energetyki. Badania te są istotne zarówno z punktu widzenia teoretycznego, jak i praktycznego, otwierając nowe perspektywy dla zastosowania amoniaku w systemach energetycznych, co może mieć znaczący wpływ na przyszłe strategie redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Podsumowując, praca doktorska Krystiana Machaja stanowi ważny wkład w dziedzinę badań nad stałotlenkowymi ogniwami paliwowymi i ich zastosowaniem w ekologicznych systemach energetycznych. Autor wykazał się umiejętnością przeprowadzenia

**Warsaw University
of Technology**

prof. Jarosław Milewski
Institute of Heat Engineering
jaroslaw.milewski@pw.edu.pl
21/25 Nowowiejska Street
00-665 Warsaw
Poland



kompleksowych badań, które przyczyniają się do rozwoju wiedzy w tej ważnej dziedzinie technologii.

Główne osiągnięcia naukowe

Głównym przedmiotem badań doświadczalnych w rozprawie doktorskiej Krystiana Machaja były stałotlenkowe ogniwa paliwowe (SOFC) zasilane amoniakiem. Eksperymenty zostały przeprowadzone w Instytucie Energetyki, w ramach Zakładu Wysokotemperaturowych Procesów Elektrochemicznych, który jest częścią Centrum Technologii Wodorowych (CTH2). Badania koncentrowały się na konstrukcji i testowaniu ogniw SOFC, gdzie ogniwa o wymiarach 5 cm × 5 cm poddawano serii pomiarów elektrochemicznych, w tym mierzenia temperatury za pomocą termopar i precyzyjnego kontrolowania strumienia gazów do elektrod. Przeprowadzono również analizę niepewności pomiarowej, korzystając ze stacji elektrochemicznej Zahner IM6ex, analizując niepewności pomiarowe i dokładność odczytu napięć i natężeń.

W pracy doktorskiej zbadano również konstrukcję stosów SOFC, składających się z powtarzalnych pakietów ogniw elektrochemicznych, które zawierały elementy takie jak interkonektory, separatory i uszczelki, badając ich wydajność oraz zachowanie w różnych warunkach. Kolejnym etapem badań była eksperymentalna weryfikacja stosów SOFC pod kątem parametrów elektrochemicznych, co pozwalało na ocenę poprawności działania każdego ogniwa w stosie, jego stopnia degradacji oraz wyznaczenia mocy elektrycznej osiągananej przez stos. Tym samym możliwa była ocena zasadności aplikacji technologii SOFC w rzeczywistych układach energetycznych.

Dodatkowo, badania obejmowały różne scenariusze badawcze, w tym bezpośrednie zasilanie amoniakiem oraz wykorzystanie zewnętrznego reaktora krakingu do produkcji mieszaniny wodoru i azotu z amoniaku. Skupiono się na analizie elektrochemicznej konwersji amoniaku, która obejmowała kraking amoniaku na powierzchni katalizatora anodowego ogniwa, prowadzący do produkcji mieszaniny wodoru i azotu, oraz na badaniu wpływu tej konwersji na parametry pracy i wydajność stosów SOFC.

Rozprawa doktorska Krystiana Machaja wnosi znaczący wkład w dziedzinę zastosowania amoniaku w stałotlenkowych ogniwach paliwowych (SOFC). W pracy tej skupiono się na **analizie możliwości wykorzystania amoniaku jako alternatywnego paliwa, co ma kluczowe znaczenie w kontekście redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz w poszukiwaniu nowych, zrównoważonych źródeł energii.** Autor osiągnął następujące wyniki:



- przeprowadzenie szczegółowych badań na ogniwach SOFC zasilanych amoniakiem, które dostarczyły istotnych informacji na temat ich efektywności i trwałości. Badania te są kluczowe dla dalszego rozwoju tej technologii.
- udoskonalenie modelu numerycznego ogniwa paliwowego, co pozwoliło na lepsze zrozumienie procesów termodynamicznych i elektrochemicznych zachodzących w ogniwach SOFC. Model ten jest narzędziem umożliwiającym precyzyjne symulacje i przewidywanie wydajności ogniw.
- wykonano ocenę zastosowania technologii NH_3 -SOFC w sektorze transportu morskiego, uwzględniając różne tryby zasilania i ich wpływ na wydajność systemu. Wyniki te mają znaczenie dla przyszłego rozwoju zrównoważonego transportu morskiego.
- przeprowadzono liczne symulacje i eksperymenty, które dostarczyły nowych danych na temat efektywności i możliwości operacyjnych systemów SOFC zasilanych amoniakiem. Te badania są krokiem naprzód w zrozumieniu i optymalizacji stosowania amoniaku jako paliwa.

W rozprawie doktorskiej Krystiana Machaja na szczególną uwagę zasługują innowacyjne podejścia do zastosowania amoniaku jako alternatywnego paliwa w stałotlenkowych ogniwach paliwowych (SOFC). Kluczowym osiągnięciem jest eksploracja potencjału amoniaku, który jest paliwem o niskiej emisji węgla, jako źródła wodoru dla ogniw SOFC. To podejście ma fundamentalne znaczenie w kontekście globalnych wysiłków na rzecz redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz promowania zrównoważonych źródeł energii.

Należy także podkreślić innowacyjne wykorzystanie amoniaku jako alternatywnego paliwa w stałotlenkowych ogniwach paliwowych (SOFC), co stanowi przełom w dążeniu do zrównoważonej energetyki i redukcji emisji CO_2 . Opracowanie i ulepszenie modelu numerycznego ogniwa paliwowego, które pozwala na dokładne symulacje i przewidywanie wydajności ogniw SOFC, jest kolejnym istotnym wkładem w tę technologię. Praca ta nie tylko otwiera nowe możliwości dla przyszłych badań i rozwoju technologii SOFC, ale również ma potencjalne zastosowania przemysłowe i komercyjne, szczególnie w sektorach dążących do zmniejszenia swojego śladu węglowego, co podkreśla jej znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne.

Podsumowując, praca doktorska Krystiana Machaja stanowi cenny wkład w rozwój technologii SOFC, szczególnie w kontekście wykorzystania amoniaku jako zrównoważonego paliwa. Wyniki te otwierają nowe perspektywy dla przemysłu energetycznego i mogą przyczynić się do zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych."



Uwagi krytyczne

Uwagi merytoryczne do pracy

Rozprawa doktorska dotyczy złożonej i ambitnej tematyki związanej z modelowaniem matematycznym ogniw paliwowych z wykorzystaniem amoniaku jako paliwa. Mimo iż temat jest intrygujący i aktualny, praca wykazuje znaczące braki zarówno w strukturze, jak i w treści merytorycznej, co podważa jej wiarygodność i użyteczność naukową.

Po pierwsze, nieproporcjonalny podział pracy na część przeglądową i naukową (50:100) wskazuje na brak równowagi w strukturze rozprawy. Zbyt duża część poświęcona jest przeglądowi literatury kosztem rozwinięcia własnych badań naukowych.

Ważnym mankamentem jest brak jasno postawionej tezy badawczej, co jest kluczowe dla każdej pracy naukowej. Brak definicji głównego przedmiotu badań, czyli „analizy pracy stosów”, powoduje, że trudno jest śledzić logikę argumentacji i ocenić wartość naukową pracy.

Autor nie opiera swojego modelowania matematycznego na kinetyce reakcji, co jest znaczącym niedociągnięciem, szczególnie w kontekście modelowania procesów zachodzących w ogniwach paliwowych. Brak równań kinetycznych zarówno dla krakingu amoniaku, jak i procesów zachodzących w ogniwie paliwowym, znacząco obniża wartość merytoryczną pracy. Jest to szczególnie istotne, ponieważ kinetyka reakcji jest fundamentalna dla zrozumienia i modelowania procesów chemicznych i inżynierskich.

Niedostateczne przedstawienie danych eksperymentalnych, takich jak brak zdjęć badanych stosów czy niejasności dotyczące sposobu podawania amoniaku do stosu, obniża przejrzystość i wiarygodność prezentowanych badań. Ponadto, różnice w liczbie ogniw użytych w różnych eksperymentach (10 a potem 9) nie zostały wyjaśnione, co rodzi pytania co do spójności i dokładności procedur badawczych.

Autor nie przedstawił również szczegółów technicznych dotyczących zewnętrznego reaktora katalitycznego, co jest znaczącym brakiem, biorąc pod uwagę jego rolę w badanym systemie. Brak pomiarów składu gazu pomiędzy reaktorem a ogniwem SOFC oraz niezdefiniowane unikatowe aspekty rozwiązania dedykowanego do transportu morskiego są kolejnymi przykładami niekompletności pracy.



Model matematyczny ogniwa paliwowego, będący kluczowym elementem pracy, został zweryfikowany tylko na podstawie pojedynczej krzywej prądowo-napięciowej, co jest niewystarczające do pełnego zrozumienia i oceny modelu. Brak równań kinetyki reakcji i niepełna analiza wpływu temperatury i przepływów na działanie ogniw dodatkowo obniża wartość modelu.

Autor nie wyjaśnia także, jak zintegrował rozwijany model OpenFuelCell z modelem całej instalacji w programie Aspen HYSYS, co jest kluczowe dla zrozumienia całościowego podejścia do problemu. Niejasności dotyczą również modelowania dodatkowych elementów systemu, takich jak dopalacz, oraz wykorzystania bibliotek termodynamicznych i urządzeń w Aspen HYSYS.

Zakończenie pracy, obejmujące wnioski i analizę post-mortem, również pozostawia wiele do życzenia. Autor nie dostarcza wystarczających dowodów na poparcie swoich stwierdzeń, a wnioski często wydają się być nieoparte solidnymi danymi eksperymentalnymi lub teoretycznymi.

Podsumowując, choć temat rozprawy jest obiecujący i aktualny, wykonanie pracy pozostawia wiele do życzenia. Kluczowe aspekty teoretyczne i eksperymentalne zostały pominięte lub niewystarczająco rozwinięte. Niejasności i braki w metodologii, analizie danych oraz w prezentacji wyników znacząco obniżają wartość naukową tej pracy. W konsekwencji, rozprawa ta wymaga znacznych poprawek, aby mogła być uznana za solidny wkład w dziedzinie modelowania ogniw paliwowych.

Uwagi redakcyjne

Zaleca się przeniesienie spisów tabel i rysunków na koniec rozprawy. Obecna lokalizacja na początku dokumentu może nieco zakłócać strukturę i czytelność pracy, a także odwracać uwagę czytelnika od głównego tekstu. Umieszczenie ich na końcu pozwoli czytelnikom na łatwiejsze odnalezienie i odniesienie się do nich w razie potrzeby, jednocześnie utrzymując skupienie na treści głównej.

W tekście zauważono pewne literówki, jak na przykład „dyfuzję Knudsenaw strukturze porowatej”. Zaleca się dokładną korektę tekstu w celu wyeliminowania takich błędów, co podniesie ogólną jakość pracy i jej profesjonalizm. Literówki, choć z pozoru drobne, mogą wpłynąć na postrzeganie pracy jako mniej starannej.



W rozprawie po tytułach, takich jak „Tabela 11. Równania ROM wykorzystane w modelu instalacji SOFC na statku.”, nie powinno stawiać się kropek. Jest to kwestia standardów redakcyjnych, które mają na celu zapewnienie spójności i profesjonalizmu prezentacji tekstu. Usunięcie kropek z tytułów tabel i rysunków przyczyni się do zwiększenia klarowności i estetyki dokumentu.

Podsumowując, choć ogólnie praca nie budzi większych zastrzeżeń redakcyjnych, powyższe drobne korekty mogą znacząco przyczynić się do poprawy jej formy i czytelności. Zaleca się uwzględnienie tych uwag w ostatecznej wersji dokumentu.

Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji należy podkreślić, że odnoszące się do opiniowanej rozprawy uwagi krytyczne nie mają wpływu na pozytywną jej ocenę. Doktorant w pełni zrealizował postawione cele. Uważam, że należy podkreślić kompleksowy charakter przeprowadzonych badań, praca doktorska zawiera zarówno część doświadczalną jak i modelowanie matematyczne analizowanych procesów. Tym samym według mojej opinii spełnia wymagania wyrażone w art. 221 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Warszawa, 2024-02-10

Milewski

prof. dr hab. inż. Jarosław Milewski

Instytut Techniki Ciepłej

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

**Warsaw University
of Technology**

prof. Jarosław Milewski
Institute of Heat Engineering
jaroslaw.milewski@pw.edu.pl
21/25 Nowowiejska Street
00-665 Warsaw
Poland