

Warszawa 27.09.2023

Dr hab. inż. Artur Rusowicz, prof. uczelni
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
Ul. Nowowiejska 24
00-665 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Czyłkowskiego pt.: „Eksperymentalne badania mikrofalowych źródeł plazmy do konwersji gazów pod ciśnieniem atmosferycznym”

Recenzję wykonano na zlecenie Z-cy Dyrektora Instytutu Maszyn Przepływowych PAN dr hab. inż. Grzegorz Żywicy, profesora IMP PAN, w oparciu o pismo nr RN-421-22/21 z dnia 24.07.2023 r.

Rozprawa doktorska powstała i została zredagowana pod kierunkiem dr hab. inż. Mariusza Jasińskiego prof. Instytutu oraz dr hab. inż. Heleny Nowakowskiej, jako promotora pomocniczego.

1. Przedmiot rozprawy

Rozprawę doktorską stanowi cykl 7 monotematycznych publikacji opatrzonych szeroko opracowanym wstępem wprowadzającym w podejmowane zagadnienia. Przedmiotem przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej było przeprowadzenie badań eksperymentalnych mikrofalowych źródeł plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym do konwersji gazów o dużych natężeniach przepływu z przeznaczeniem do zastosowań przemysłowych. W pierwszym etapie badania koncentrowały się na dwóch rodzajach mikrofalowych źródeł plazmy do konwersji gazów. Były to źródła plazmy typu surfaguide oraz typu TIAGO. W drugiej części badań podjęto problem emisji przez mikrofalowe źródła plazmy promieniowania elektromagnetycznego w otaczającą przestrzeń. Promieniowanie pochodzące z mikrofalowych źródeł plazmy może być szkodliwe dla ludzi i otoczenia oraz wpływa negatywnie na efektywność i stabilność wytwarzania plazmy. Celem trzeciej i czwartej części badań autora rozprawy były, odpowiednio, badania produkcji wodoru w procesie konwersji metanu i par

substancji ciekłych w plazmie wyładowania mikrofalowego. Technologie plazmowe stanowią propozycję źródeł rozproszonej produkcji wodoru. Badania prowadzono z zastosowaniem mikrofalowych źródeł plazmy typu surfaguide. W trzeciej części badania autora rozprawy koncentrowały się na wyznaczeniu metody produkcji wodoru charakteryzującej się najkorzystniejszymi wielkościami efektywności jego produkcji. Przeprowadzono badania takich procesów jak piroliza, suchy reforming i kombinowany reforming parowy. W czwartej części badania koncentrowały się szczególnie na zaprojektowaniu mikrofalowych źródeł plazmy i procesów chemicznych, tak, aby można było przeprowadzić w sposób efektywny produkcję wodoru w procesie konwersji par substancji ciekłych. Do badań wybrano etanol, izopropanol i naftę.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań eksperymentalnych, proponowanych rozwiązań technicznych mikrofalowych źródeł plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym do konwersji gazów oraz uzyskane wyniki analiz – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy. Zakres rzeczowy rozprawy oraz zaproponowany jej zakres korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów umożliwiających jej udowodnienie.

2. Struktura redakcyjna pracy

Rozprawę doktorską zredagowano na 144 stronach w postaci **Omówienia** rozprawy oraz 7 publikacji stanowiących cykl artykułów. Umownie nazwane **Omówienie** składa się z *Wprowadzenia, Celu i zakresu rozprawy, Listy publikacji* oraz szerokiego *Omówienia wyników badań własnych z Podsumowaniem i wnioskami końcowymi*. **Omówienie** kończy spis literatury oraz oświadczenia współautorów o udziałach w publikacjach zgłoszonych w cyklu artykułów. Ostatnim elementem jest spis publikacji autora rozprawy doktorskiej nie ujętych w cyklu publikacji rozprawy.

Doktorant poza cyklem monotematycznych publikacji jest również współautorem 37 publikacji w czasopismach oraz w 40 referatów na konferencjach międzynarodowych i krajowych.

Cykl 7 publikacji monotematycznych zamieszczono na stronach 58-122. na który składają się:

1. **CZYLKOWSKI D***, JASIŃSKI M, MIZERACZYK J (2012) *On the role of the design and discharge on the Surfaguide tuning characteristics* Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review) **88** 313-315 (IF=0,244) – udział doktoranta 70%
2. NOWAKOWSKA H, **CZYLKOWSKI D**, HRYCAK B, JASIŃSKI M (2021) *Numerical and experimental analysis of radiation from a microwave plasma source of the TIAGO type* Plasma Sources Science and Technology **30** 095011 (IF=4,124) – udział doktoranta 55%

3. JASIŃSKI M, **CZYLKOWSKI D***, HRYCAK B, DORS M, MIZERACZYK J (2013) *Atmospheric pressure microwave plasma source for hydrogen production* International Journal of Hydrogen Energy **38** 11473-11483 (IF=2,93) – udział doktoranta 40%
4. **CZYLKOWSKI D***, HRYCAK B, JASIŃSKI M, DORS M, MIZERACZYK J (2016) *Microwave plasma-based method of hydrogen production via combined steam reforming of methane* Energy **113** 653-661 (IF=4,52) – udział doktoranta 60%
5. **CZYLKOWSKI D***, HRYCAK B, MIOTK R, JASIŃSKI M, DORS M, MIZERACZYK J (2015) *Hydrogen production by conversion of ethanol using atmospheric pressure microwave plasmas* International Journal of Hydrogen Energy **40** 14039-14044 (IF=3,25) – udział doktoranta 45%
6. **CZYLKOWSKI D***, HRYCAK B, MIOTK R, JASIŃSKI M, MIZERACZYK J, DORS M (2016) *Microwave plasma for hydrogen production from liquids* Nukleonika **61** 185-190 (IF=0,76) – udział doktoranta 70%
7. **CZYLKOWSKI D***, HRYCAK B, MIOTK R, JASIŃSKI M, DORS M, MIZERACZYK J (2018) *Hydrogen-enriched gas production from kerosene using an atmospheric pressure microwave plasma system* Fuel **215** 686-694 (IF=5,128) – udział doktoranta 50%

Wszystkie publikacje pochodzą z bazy JCR, udział Doktoranta w każdej z nich jest znaczący, w 6 jest autorem korespondencyjnym (*) oraz w 5 jest pierwszym autorem, co również świadczy o jego wiodącej roli przy powstawaniu publikacji.

W pierwszej publikacji (zaprezentowanej na stronach 58-61) przedstawiono badania eksperymentalne mające na celu określenie wpływu warunków wyładowania i warunków zasilania na charakterystyki strojenia źródła plazmy typu surfaguide. Przedstawiono wpływ warunków wyładowania i warunków zasilania na charakterystyki strojenia surfaguide'u, takich jak: wysokość sekcji środkowej, moc fali padającej, średnica otworu sprzęgającego, natężenie przepływu gazu roboczego, obecność metalowego cylindra ekranującego, obecność chłodzenia cieczowego rury wyładowczej. Na podstawie badań eksperymentalnych wykonano i przeanalizowano charakterystyki strojenia.

Przegląd literatury oparto na 8 pozycjach, aktualnych i dobrze dobranych do tematyki publikacji.

W drugiej publikacji (zaprezentowanej na stronach 63 – 76) oszacowano wartości mocy wypromieniowanej z mikrofalowego źródła plazmy typu TIAGO, w którym plazma o kształcie płomienia wytwarzana jest na końcu metalowej stożkowej dyszy. W publikacji zaproponowano zarówno jakościowe, jak i ilościowe oszacowanie mocy wypromieniowanej przez TIAGO. Jakościowe oszacowanie polega na porównaniu wyglądu płomienia plazmy dla tej samej mocy wchodzącej do wyładowania dla przypadku plazmy nieekranowanej oraz ekranowanej za pomocą różnych siatek. Ilościowego oszacowania wartości mocy wypromieniowanej zaproponowano porównanie różnic

wartości mocy niezbędnej do inicjacji (zapalenia) i do podtrzymania wyładowania dla przypadków bez ekranowania oraz z siatkami metalowymi

Doktorant wykonał na podstawie 49 publikacji, odpowiednich tematycznie do poruszanych zagadnień.

Celem **trzeciej i czwartej publikacji** były, odpowiednio, badania produkcji wodoru w procesie konwersji metanu i par substancji ciekłych w plazmie wyładowania mikrofalowego. Technologie plazmowe bowiem są obecnie również obiektem zainteresowania pod kątem ich przydatności do rozproszonej produkcji wodoru. Badania prowadzono z zastosowaniem mikrofalowych źródeł plazmy typu surfaguide. W **trzeciej publikacji** (zaprezentowanej na stronach 77-88) badania autora rozprawy koncentrowały się na wyznaczeniu metody produkcji wodoru charakteryzującej się najkorzystniejszymi wielkościami efektywności jego produkcji. Przeprowadzono badania takich procesów jak piroliza, suchy reforming i kombinowany reforming parowy. W **czwartej publikacji** (zaprezentowanej na stronach 90-98) badania koncentrowały się szczególnie na zaprojektowaniu mikrofalowych źródeł plazmy i procesów chemicznych, tak, aby można było przeprowadzić w sposób efektywny produkcję wodoru w procesie konwersji par substancji ciekłych. Do badań wybrano etanol, izopropanol i naftę. Mając na uwadze wymagania praktycznego zastosowania przedstawionych metod produkcji wodoru, badania prowadzono w warunkach stosunkowo dużych natężeń przepływu gazu i substancji ciekłych. W badaniach natężenie przepływu metanu wynosiło od 3000 NL/h do 9000 NL/h, zaś natężenie przepływu substancji ciekłych od 0,4 kg/h do 2,4 kg/h. Otrzymane wyniki badań, głównie energetycznej wydajności produkcji wodoru, zostały porównane z innymi wynikami badań dostępnych w literaturze naukowej.

W publikacji trzeciej zacytowano 31 pozycji literaturowych, a w czwartej 41

W **piątej publikacji** (zaprezentowanej na stronach 100-105) Doktorant rozprawy przedstawił badania dwóch procesów produkcji wodoru z par etanolu w plazmie wyładowania mikrofalowego o częstotliwości 2,45 GHz z suchego reformingu etanolu (w mieszaninie par etanolu z ditlenkiem węgla) oraz parowego reformingu etanolu (w mieszaninie par etanolu z parą wodną i azotem). Analiza chromatograficzna próbek otrzymanego strumienia gazu na wyjściu ze plazmy wykazała, obecność innych wyższych węglowodorów, co również znajduje potwierdzenie w światowych badaniach. Przegląd literatury zawiera 18 pozycji.

W **szóstej** (zamieszczonej na stronach 107-112) i **siódmej publikacji** (zamieszczonej na stronach 114-122) Doktorant przedstawił badania produkcji wodoru w procesie konwersji par substancji ciekłych z zastosowaniem źródeł plazmy typu surfaguide zasilanych mikrofalami o częstotliwości 2,45 GHz i 915 MHz. W wyniku badań eksperymentalnych zapewniał duże

wartości natężenia przepływu gazu i substancji ciekłych umożliwiające otrzymanie większej wydajności produkcji wodoru. Konwersję z par etanolu, izopropanolu i nafty przeprowadzono w mieszaninie z ditlenkiem węgla. Najwyższą wartość wydajności produkcji wodoru i energetycznej wydajności produkcji wodoru otrzymano w przypadku par izopropanolu.

Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

Praca jest bardzo starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami dotyczącymi technologii plazmowych, a szczególnie plazmy generowanej mikrofalami pod ciśnieniem atmosferycznym. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

Pierwszy komentarz dotyczy analizy ekonomicznej konwersji gazów o dużych natężeniach przepływu w mikrofalowych źródłach plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym z przeznaczeniem do zastosowań przemysłowych. Czy Doktorant może przybliżyć zagadnienia ekonomiczne zastosowania takiej konwersji i porównać je z innymi metodami. Drugie zagadnienie dotyczy trwałości elementów generatora plazmowego, czy w przypadku plazmy powstającej z mikrofal, istnieją takie problemy jak w przypadku plazmy wytwarzanej w generatorach z wyładowaniem łukowym. Trzecia kwestia, o której Doktorant wspominał w swoich publikacjach to kwestia bezpieczeństwa i ochrony zdrowia, jak bardzo są to urządzenia niebezpieczne dla zdrowia człowieka i czy można te zagrożenia skutecznie ograniczać i z jakim skutkiem. Generalnie chętnie bym globalnie zapoznał się z głównymi wadami i zaletami zastosowanej metody konwersji w porównaniu do innych metod.

Uwag edytorskich do prezentowanej rozprawy nie mam, jest to cykl publikacji w renomowanych, recenzowanych czasopismach, które przed publikacją artykułu prowadzą skrupulatną analizę merytoryczną i edytorską.

3. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do recenzji praca doktorska charakteryzuje się pod względem merytorycznym znaczną nowością tematyczną. Zagadnienia związane z konwersją wodoru w zastosowaniach przemysłowych, są obecnie kluczowymi zagadnieniami dotyczącymi energetyki. Otrzymywanie wodoru wydaje się być jednym z przyszłościowych rozwiązań prowadzących do zero emisyjnych technologii o wysokiej efektywności energetycznej. Działania w tym zakresie należy uznać za wpisujące się w ogólnoswiatową działalność na rzecz ochrony klimatu i obniżenia wykorzystania energii

pierwotnej zawartej przede wszystkim w kopalinach. Ekonomiczne metody wytwarzania plazmy, czym zajmował się Doktorant, otwierają również inne możliwości zastosowań technologii plazmowych. Doktorant modyfikował stanowisko badawcze, przeprowadzał szereg badań eksperymentalnych, prace prowadził na światowym poziomie, unikalne w skali kraju. Te przesłanki powodują, że wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Oceniając pracę pod względem redakcyjnym, stwierdzam jej bardzo wysoki poziom.

4. Ocena pracy i wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą wybitny wkład poznawczy oraz technologiczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla mechaniki, zjawisk falowych, wymiany ciepła, mechaniki płynów oraz technologii chemicznej. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak poziomu oryginalności osiągnięć technicznych, konstrukcyjnych oraz metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty poznawcze dotyczące zagadnień naukowych o wciąż otwartym charakterze. Należy podkreślić, że Doktorant realizując prace badawcze musiał zmierzyć się z koniecznością zdobycia wiedzy o charakterze interdyscyplinarnym, a rozwiązywanie wielu problemów natury konstrukcyjnej wymagało bardzo dużego poziomu kreatywności Doktoranta. Uwagę zwraca także bardzo dobrze opanowany, dojrzały warsztat pracy naukowej, czego efektem jest wiele krytycznych analiz zawartych w rozprawie. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zaś oryginalność osiągnięć badawczych Doktoranta skłania mnie do wniosku o jej wyróżnienie. Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Dariusz Cyłkowskiego spełnia wymagania Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. 2018 z. 1668 z późn. zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Mechaniczna.
3. Wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.