

dr hab. Marek Kocik  
Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN  
ul. Fiszera 14, 80-952 Gdańsk  
kocik@imp.gda.pl

Gdańsk, 14 czerwca 2019

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Terebuna

„Wpływ parametrów reaktora APPJ o częstotliwości radiowej na skuteczność modyfikacji i dekontaminacji powierzchni" wykonana na zlecenie Rady Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w oparciu o pismo Pani Dziekan prof.dr hab.inż. Henryki D. Stryczewskiej z dnia 2 maja 2019, na podstawie otrzymanego egzemplarza rozprawy doktorskiej

### 1. Wstęp

Przedłożona do recenzji rozprawa jest pracą o charakterze eksperymentalnym z elementami modelowania komputerowego i mieści się w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Objętość rozprawy wraz z wykazem literatury oraz wykazem najważniejszych oznaczeń obejmuje 143 strony. Wykaz cytowanej literatury zawiera 214 pozycji. Doktorant nie zamieścił dodatkowego spisu swoich publikacji, podał jedynie informacje, że wydał 38 publikacji z czego 12 w tematyce związanej z rozprawą doktorską. W spisie wykorzystanej literatury znajduje się ich osiem. Są to publikacje współautorskie, dwie w czasopismach z listy filadelfijskiej – Sensors and Materials i IEEE Trans. on Plasma Science, dwie w Przeglądzie Elektrotechnicznym oraz cztery w materiałach pokonferencyjnych na platformie IEEE Explore. Rozprawa została podzielona na pięć głównych rozdziałów uzupełnionych podsumowaniem i wykazem literatury. Tytuł rozprawy *Wpływ parametrów reaktora APPJ*

*o częstotliwości radiowej na skuteczność modyfikacji i dekontaminacji powierzchni w pełni odpowiada zawartości pracy.*

## 2. Uwagi dotyczące tematyki rozprawy, sformułowanego celu i tezy oraz zakresu pracy

Przedmiotem zainteresowania Autora dysertacji jest zastosowanie plazmy niskotemperaturowej do obróbki powierzchni ze szczególnym uwzględnieniem materiałów wrażliwych na wysoką temperaturę. Uważam, że wybór tematyki jest bardzo aktualny i uzasadniony, biorąc pod uwagę rosnące zainteresowanie metodami plazmowej obróbki materiałów biologicznych oraz materiałów w przemyśle, jak np. samochodowym czy drukarskim. Zrozumienie tych tendencji Autor udowadnia przez swój dobór materiałów do badań, tj. papieru i polistyrenu oraz nasion cebuli. W przypadku papieru i polistyrenu celem plazmowej obróbki powierzchni ma być zwiększenie zwilżalności tych materiałów. Jest to niezwykle ważne np. w procesach druku oraz klejenia. W przypadku nasion cebuli, celem była dekontaminacja ich powierzchni oraz stymulacja kiełkowania. Istnieje wiele sposobów na wytwarzanie plazmy nietermicznej nadającej się do tego celu. W przedstawionym w rozprawie przeglądzie literatury autor wymienia systemy z wyładowaniem koronowym, barierowym, mikrofalowym w najrozmaitszych konfiguracjach. Jako najpraktyczniejsze ze względu na geometrię wyładowania, Autor wskazuje wyładowania typu plasma-jet. Przedstawia różne możliwe realizacje takiego reaktora oraz wskazuje problemy jakie wiążą się z ich zastosowaniem, jak konieczność używania gazów szlachetnych np. helu w celu otrzymania stabilnego wyładowania czy pracy pod obniżonym ciśnieniem. Chęć przezwyciężenia tych trudności była motywacją do podjęcia badań przedstawionych w rozprawie. Celem rozprawy w ujęciu Autora to taki dobór parametrów roboczych reaktora plasma-jet zasilanego napięciem o częstotliwości radiowej, aby nadawał się on do modyfikacji powierzchni usuwania wybranych zanieczyszczeń biologicznych w warunkach ciśnienia atmosferycznego.

Dla realizacji tak przyjętego celu Autor stawia tezę, że układ wyładowczy typu plasma-jet z elektrodą centralną zasilaną napięciem o częstotliwości radiowej, przy odpowiednim doborze składu i wartości przepływu gazu roboczego, umożliwi skuteczną dekontaminację biologiczną, modyfikację powierzchni oraz stymulację procesu kiełkowania.

Zakres pracy obejmuje badania eksperymentalne wpływu plazmowej obróbki na zwilżalność powierzchni papieru i polistyrenu oraz na skuteczność usuwania patogenów z powierzchni nasion cebuli. Przebadano także wpływ obróbki plazmowej na energię i zdolność kiełkowania nasion cebuli. Badania eksperymentalne Autora, poprzedzone były pracami prowadzonymi do optymalizacji reaktora APPJ poprzez taki dobór parametrów wyładowania, aby osiągnąć stabilną, w miarę jednorodną plazmę o temperaturze poniżej 100°C w niewielkiej odległości od płomienia plazmowego, pracując pod ciśnieniem atmosferycznym z przepływem gazu roboczego mającego w składzie możliwie dużo gazów nieszlachetnych, jak tlen czy azot. Wyniki modelowania komputerowego wypływu gazu roboczego z dyszy reaktora oraz modelowania reakcji chemicznych mogących zachodzić w czasie wyładowania są uzupełnieniem badań eksperymentalnych.

### 3. Ogólna charakterystyka rozprawy i uwagi merytoryczne

Ogólny przegląd literatury zawarty jest w rozdziale pierwszym i drugim, ale odniesienia do literatury pojawiają się również w pozostałych rozdziałach. Rozdział pierwszy zwięźle wprowadza w zagadnienia analizowane w rozprawie i podaje powody, dla których reaktor APPJ znalazł się w kręgu zainteresowań naukowych Doktoranta. W rozdziale drugim znajduje się obszerny przegląd reaktorów typu jet zasilanych częstotliwością radiową i pracujących w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Następnie Autor opisuje kilka wybranych metod diagnostyki plazmy, jak pomiar temperatury, obrazowanie smugowe, symulacje komputerowe i kompatybilność elektromagnetyczna. Ten wybór jest nieprzypadkowy – wszystkie opisane w tym rozdziale metody zostały przez Autora wykorzystane do przeprowadzenia badań przedstawionych w dalszych rozdziałach. Należy zauważyć jednak, że opis metody obrazowania smugowego jest nieprecyzyjny. Na stronie 21 czytamy: „Światło po skolimowaniu przez soczewkę S1 (rys. 2.8) przechodzi przez badany obszar O, gdzie w wyniku ruchu gazu ulega załamaniu.” Światło załamuje się na granicy ośrodków o różnym współczynniku załamania. Przyczyn powstania takich obszarów w gazie jest wiele, a ruch gazu jest jedną z wielu możliwości. Dodatkowo, na rys. 2.8 brakuje osi optycznej.

Kolejne dwa podrozdziały poświęcone są omówieniu zastosowania plazmy nierównowagowej do modyfikacji powierzchni i dekontaminacji biologicznej.

Zasadniczą część pracy stanowią kolejne rozdziały, tj. trzeci, czwarty i piąty.

Rozdział trzeci dotyczy samego reaktora plazmowego. Autor przebadął kilka różnych elektrod wyładowczych różniących się kształtem bądź rozmiarem. Sprawdzał również wpływ składu gazu roboczego i parametrów elektrycznych wyładowania na kształt i równomierność obłoku plazmy oraz temperaturę w funkcji odległości od wyładowania. W rezultacie określił zakres parametrów wyładowania właściwych dla realizacji zaplanowanych eksperymentów. W szczególności określił częstotliwość rezonansową dla różnych mieszanin gazu roboczego, ustalił limit mocy wyładowania na 40-50W, wyznaczył odległość, w jakiej powinny znajdować się obrabiane próbki od płomienia plazmowego (6 cm). Warto również wspomnieć o zbadaniu kompatybilności elektromagnetycznej, co jest istotne, jeśli urządzenie byłoby zastosowane w praktyce.

Przeprowadzono również pomiar ozonu i  $\text{NO}_2$  powstających w wyładowaniu. W celu określenia rodzaju i ilości innych związków powstających w plazmie wyładowania Autor skorzystał z modelu teoretycznego. Niestety, przedstawione symulacje dotyczą tylko jednej konfiguracji parametrów. Na podstawie skromnych danych doświadczalnych trudno jest więc zweryfikować poprawność przewidywań.

Kolejnym zagadnieniem, podjętym przez Autora w tym rozdziale jest charakteryzacja wypływu gazu roboczego z dyszy reaktora oraz jego zachowanie w kontakcie z obrabianą próbką materiału. W pierwszej kolejności Autor przedstawił symulacje wypływu gazu roboczego z dyszy reaktora wykonane za pomocą pakietu COMSOL z modułem do symulowania przepływu laminarnego. Symulacje zostały przeprowadzone dla różnych natężeń przepływu, dla przypadku obrabiania powierzchni płaskiej oraz dla przypadku obrabianiu ziaren umieszczonych na powierzchni płaskiej bądź na sicie. Szczególnie interesujące okazały się badania opływu ziaren, gdyż wobec ich nieregularnego kształtu osiągnięcie równomiernego rozkładu okazało się trudne i dopiero po zastosowaniu sita, osiągnięto zadowalające rezultaty. Niewątpliwą wadą przeprowadzonych symulacji było nieuwzględnienie wpływu pola elektrycznego na przepływ gazu. Generowany w wyładowaniu przepływ EHD może w niektórych przypadkach radykalnie zmienić obraz przepływu. Wiadomo, że symulacje uwzględniające wpływ pola elektrycznego są bardzo trudne i być może nawet zbędne w tym przypadku, ale wypadałoby zrobić chociaż