



RPW/1118/2025 P
Data: 2025-01-10

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Potrykusa
“Badania mikrobiologicznego ogniwa paliwowego oraz jego
modelowanie obwodowe w celu poprawy jego wydajności jako źródła
energii elektrycznej skojarzonej z oczyszczaniem ścieków”,
opracowana dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej**

1. Temat pracy na tyle aktualnego stanu wiedzy i trendów badawczych

W wyniku dynamicznego, żywiołowego rozwoju działalności przemysłowo-gospodarczej, rosnącego konsumpcjonizmu oraz pogłębiającego się kryzysu energetycznego, istotnym wyzwaniem staje się walka o czyste środowisko i rozsądną gospodarkę odpadami oraz konsekwentne poszukiwanie nowych, niekonwencjonalnych źródeł energii, spełniających warunki Green Power, w tym również - innowacyjnych źródeł energii przynależnych do t.zw. grupy Energy Harvesting. Oczekiwania społeczne i oczekiwania strategów gospodarki, dotyczące powyższego kręgu zagadnień są ogromne. W przekonaniu środowiska naukowego potrzebne są działania “na dziś”, dające szansę szybkiego wdrożenia, ale równie ważne są nowe koncepcje i badania podstawowe, które mogą przynieść wymierne efekty dopiero w bliższej lub dalszej przyszłości. Coraz częściej zdarza się też, że badania te nie mieszczą się w granicach dotychczasowego, bardzo tradycyjnego podziału wiedzy na dyscypliny naukowe, a nieraz nawet przekraczają istniejące granice dziedzin naukowych.

Praca doktorska mgr inż. Szymona Potrykusa pt. *Badania mikrobiologicznego ogniwa paliwowego oraz jego modelowanie obwodowe w celu poprawy jego wydajności jako źródła energii elektrycznej skojarzonej z oczyszczaniem ścieków* jest dobrym przykładem takiego właśnie szerokiego pola badawczego, obejmującego elektrotechnikę, energetykę mikroźródeł typu Energy Harvesting, inżynierię środowiska, inżynierię chemiczną, elektrochemię oraz mikrobiologię - i ma charakter pracy studialnej, związanej z badaniami podstawowymi, obejmującymi swoim zakresem szeroki program badań eksperymentalnych, ale zawiera również pierwiastki teoretyczne, ukierunkowane

na znalezienie modelu matematycznego ogniwa MFC (wiążącego w spójną całość wielkości fizyczne o bardzo zróżnicowanym charakterze: elektryczne, chemiczne i mikrobiologiczne), który stał się podstawą do realizacji nowatorskiego programu badań symulacyjnych. Rezultatem tych badań eksperymentalnych i symulacyjnych, prowadzonych w warunkach laboratoryjnych na pojedynczych komórkach MFC oraz na ich prostych 2-elementowych konfiguracjach szeregowych i równoległych, są oryginalne wnioski o charakterze ogólnym, które mogą znaleźć praktyczne zastosowanie przy projektowaniu i eksploatacji wielkoskalowych oczyszczalni ścieków. Aby osiągnąć założone cele i rozwiązać postawione problemy, Autor musiał zmierzyć się z wieloma trudnościami, wynikającymi z interdyscyplinarności badań, ale też nauczyć się cierpliwości, związanej z czasochłonnością eksperymentów i żmudnym charakterem podejmowanych badań.

W kontekście powyższych uwag tematyka pracy doktorskiej zasługuje w pełni na miano aktualnej i nowoczesnej. Wpisuje się w coraz to szerzej reprezentowany w świecie trend badawczy, pozwalający na synergiczne funkcjonalne powiązanie i zintegrowanie ze sobą dwóch - zdawałoby się bardzo odległych od siebie - zagadnień: procesu skutecznego i efektywnego oczyszczania ścieków oraz zadania generacji energii elektrycznej, pozyskiwanej z otaczającego środowiska.

2. Cele, teza i zakres pracy

Teza i zakres pracy zostały przedstawione przez Doktoranta na stronach 13-15. Na wstępie mgr inż. Szymon Potrykus wskazuje na genezę tematyki, która jest rezultatem umowy o współpracy naukowej pomiędzy Politechniką Gdańską, a University of Castilla-La-Macha w Hiszpanii. Autor uwypukla odmienne pola zainteresowań naukowych zaangażowanych jednostek (po stronie hiszpańskiej jest to Instytut Technologiczny z grupą badawczą z zakresu inżynierii chemicznej, zaś po stronie polskiej - Wydział Elektrotechniki i Automatyki PG z grupą badawczą skoncentrowaną na poszukiwaniu nowych elektrycznych źródeł energii) i pokazuje, jak te odległe od siebie pola badawcze zbiegły się i znalazły wspólny punkt w tematyce mikrobiologicznych ogniw paliwowych, mogących pełnić w oczyszczalniach ścieków podwójną rolę: źródeł energii elektrycznej oraz układów oczyszczających ścieki.

Teza pracy (str. 13 w. 4-6d) uwypukla znaczenie znajomości formalnego modelu matematycznego MFC, którego posiadanie otwiera drogę do badania wzajemnego oddziaływania na siebie wielkości elektrycznych i nieelektrycznych (na drodze realizacji odpowiednio zaplanowanego programu badań symulacyjnych), jak też stwarza możliwości do sformułowania warunków najlepszego wykorzystania MFC jako z jednej strony źródła energii elektrycznej, zaś z drugiej strony - układu oczyszczania ścieków. W rozdziale tym Autor

w przejrzysty sposób zestawia te zagadnienia, na które będzie w rozprawie doktorskiej szukał odpowiedzi i omawia zakres pracy, który został podzielony na trzy wyraźnie wyodrębnione części.

Proszę o komentarz do zawartego w tezie sformułowania: *accurate modeling* w świetle rozważań, dotyczących modelu matematycznego zawartych na stronach 56 i 57 rozprawy. Czy Autor, pisząc *accurate modeling* miał na myśli model dokładny, czy też model celny (trafny), będący wynikiem dobrze przemyślanego i wyważonego kompromisu pomiędzy jego dokładnością, a techniczną użytecznością, pozwalającą na możliwie szybką realizację z dostateczną dokładnością szerokiego programu badań symulacyjnych?

Dalej, proszę o doprecyzowanie różnicy pomiędzy dwoma punktami zakresu pracy, przedstawionymi w wierszach 1 i 2 oraz w wierszach 4 i 5 na stronie 15.

I wreszcie trzecie pytanie (postawione również w kontekście zawartości rozdziału 8): Czy poszukiwaniom rozwiązania problemu *maximum performance of MFC* można nadać postać matematycznego procesu optymalizacji poprzez sformułowanie go w kategorii takich terminów i pojęć matematycznych, jak: kryterium jakości/funkcja celu, funkcje ograniczeń, zbiór rozwiązań dopuszczalnych itd.

3. Charakterystyka merytoryczna poszczególnych rozdziałów i osiągnięć Doktoranta oraz uwagi krytyczne i dyskusyjne

Wagę i znaczenie podjętej tematyki Doktorant dobitnie artykułuje w krótkim podrozdziale 3.1, zatytułowanym "Energetyczne i środowiskowe cele", powołując się na europejskie dyrektywy dotyczące zrównoważonego rozwoju. Wskazuje na przewidywaną wysoką energooszczędność technologii MFC w porównaniu do metod tradycyjnych (obniżenie kosztów oczyszczania jednej jednostki objętości ścieków o 80%) oraz na znacznie wyższy stopień niezawodności działania proponowanych odnawialnych źródeł energii (zależnych od planowanej działalności gospodarczej) w porównaniu ze źródłami naturalnymi, których działanie jest związane z trudno przewidywalnymi warunkami atmosferycznymi i meteorologicznymi. Proszę o bliższe wyjaśnienie sposobu wyliczenia wskazanej oszczędności o 80% (str. 16 w. 18g oraz str 26 w. 8d). Czy jest to obniżenie kosztów inwestycyjnych, kosztów eksploatacyjnych, czy też jedno i drugie? Czy koszty oczyszczania ścieków są pomniejszane o wartość wytworzonej energii elektrycznej? Czy wyliczenie to dotyczy prototypowych instalacji laboratoryjnych, czy też wielkoskalowych oczyszczalni ścieków?

Konfigurację stanowiska laboratoryjnego Doktorant przedstawił na rysunku 4.1(str. 31), natomiast skład chemiczny syntetycznego ścieku scharakteryzował

w Tab. 4.1 (str. 30 i 31). Istotne właściwości i parametry komponentów stanowiska oraz wykorzystywanych materiałów opisuje w podrozdziale 4.3.2 (str. 28-29), zaś dane użytej specjalistycznej aparatury pomiarowej dla wielkości elektrycznych i chemicznych - w podrozdziale, 4.3.4 (str. 31, 32). Istotną trudnością w realizacji pomiarów było zapewnienie stałości warunków fizycznych oraz skutecznej eliminacji możliwych zakłóceń. Badania były czasochłonne: skokowa zmiana natężenia przepływu ścieków od wartości 0.72 L/d do wartości 7.2 L/d i z powrotem do wartości 0.72 L/d następowała co 24 godziny i rozciągnięta była w czasie na okres 10 dni.

Uzyskane rezultaty mają charakter prekursorski i są bardzo ciekawe z teoretycznego i technicznego punktu widzenia. Autor uchwycił zakresy zmian wielu wielkości wyjściowych, jak też wyciągnął interesujące wnioski związane z histerezą badanego procesu. W odniesieniu do napięcia wyjściowego histerezę tą dobrze ilustruje wykres na rys. 4.4. W podrozdziale 4.4.3 Doktorant przeanalizował ponadto (na podstawie modelu opisanego w pozycji literatury [67] – 2018 r.) krzywe napięciowo-prądowe (krzywe polaryzacji) oraz krzywą mocy MFC przed i po przeprowadzonych eksperymentach. Posłużyły one Autorowi do wyznaczenia rezystancji wewnętrznej źródła MFC.

Po każdym eksperymencie Doktorant przeprowadza szeroką dyskusję wyników i podejmuje próbę wytłumaczenia oraz teoretycznego lingwistycznego uzasadnienia przebiegu wszystkich zdjętych charakterystyk.

W odniesieniu do tej części rozprawy proszę Doktoranta o wyjaśnienie czy napięcie wyjściowe na rys. 4.2 i 4.3 jest napięciem na rezystancji obciążenia o wartości $R = 120 \Omega$? (str. 29 w. 12d). Wartość rezystancji obciążenia R powinna być wyraźnie uwidoczniiona w opisach rysunków, a jej wybór - właściwie uzasadniony.

Czy Autor może przedstawić przykładowy przebieg czasowy napięcia w 24-godzinny przedział czasowy (od chwili skokowej zmiany natężenia przepływu, aż do momentu dojścia do stanu ustalonego)? Byłby to interesujący dodatek do przedstawionych wyników.

Dalej proszę o komentarz dotyczący współczynnika korelacji, którego wartości są podane w ostatniej kolumnie Tab. 4,3.

W tytule rozdziału 4 sugerowałbym użyć sformułowania: *wpływ zmiany natężenia przepływu ścieków na **wielkości fizyczne wyjściowe i wewnętrzne***, a nie na: *parametry komórki*.

I na końcu jeszcze jedno pytanie natury ogólnej: Czy Autor zastanawiał się nad możliwością wielokrotnego powtórzenia przeprowadzonych eksperymentów pomiarowych w celu uśrednienia wyników?

Rezultaty badań, ukierunkowanych na określenie wpływu zmian rezystancji zewnętrznej na działanie ogniwa MFC, zrealizowane z wykorzystaniem tego samego stanowiska laboratoryjnego (rys. 5.1) i tej samej aparatury pomiarowej,

są przedstawione w rozdziale 5. Przyjęty zakres zmian wartości rezystancji zewnętrznej jest podyktowany wartością rezystancji wewnętrznej ($R_w = 2210 \Omega$) i wynosi $R = 120 \Omega$ do $R = 3300 \Omega$. Powyższe badania również charakteryzują się olbrzymią czasochłonnością i są rozciągnięte w czasie na okres 92 dni. Autor skupił się na wyznaczaniu zmiany wartości prądu ogniwa (rys. 5.2) i mocy wyjściowej (rys. 5.3), jak również - zużycia paliwa (rys. 5.4) przy skokowych zmianach wartości rezystancji zewnętrznej. Charakterystyki na rysunkach 5.5 i 5.6 są związane z jakością procesu oczyszczania ścieków (odpływu) i dotyczą stężenia lotnych zawiesin, kwasowości pH oraz COD kwasów, COD substratu i całkowitego COD. Wszystkie charakterystyki zdjęto przy uwzględnieniu kierunku narastania i malenia wartości rezystancji zewnętrznej. Istotnym wnioskiem jest znaczący wpływ zewnętrznej rezystancji na rozkład mikrobiologicznej populacji w ogniwie MFC. Zwrócono również uwagę na płaski przebieg funkcji mocy w otoczeniu wartości maksymalnych oraz nieznaczny wpływ rezystancji zewnętrznej na zużycie paliwa.

Podobnie jak w rozdziale poprzednim, Autor wyjaśnia i znajduje teoretyczne opisowe uzasadnienie dla przebiegu wszystkich rozpatrywanych funkcji.

W moim odczuciu ciekawe byłoby powtórzenie eksperymentu, którego wynik przedstawiono przedstawia rys. 5.2, w odwrotnym kierunku, a więc przy zmianie rezystancji zewnętrznej od wartości maksymalnej do wartości minimalnej. Jest to sposób postępowania charakterystyczny dla badania przetworników elektromechanicznych i elektromagnetycznych. Proszę Doktoranta o opinię w tej sprawie.

Rozdział 6 ma charakter odmienny i skupia się na rozważaniach, których uwieńczeniem jest własny schemat zastępczy komórki MFC. Autor zaczyna ten rozdział od przeglądu istniejących modeli, opisanych w literaturze (rys. 6.1-6.3), a następnie formułuje założenia i wymagania odnośnie poszukiwanego własnego modelu, który ma zapewnić z jednej strony wystarczającą dokładność, z drugiej zaś strony - charakteryzować się łatwością prowadzenia symulacji (rozdz. 6.2 i podrozdz. 6.3.1). Zaproponowany model (wykorzystujący również doświadczenia i wiedzę zawartą w literaturze) przedstawiono graficznie na rysunku 6.4. Na jego opis analityczny składają się równania 6.1 - 6.6.

W podrozdz. 6.3.3 Doktorant omawia sposób wyznaczania parametrów opracowanego schematu zastępczego z wykorzystaniem metody relaksacji napięcia (VRM), a następnie dokonuje weryfikacji modelu dla pojedynczej komórki (podrozdz. 6.5.3), 2 komórek połączonych szeregowo (roz. 6.5.4) oraz 2 komórek połączonych równolegle (podrozdz. 6.5.5).

Rozdział 7 i 8 Doktorant poświęcił strategiom eksploatacji ogniw paliwowych MFC przy uwzględnieniu różnego charakteru obciążenia (pasywnego obciążenia rezystancyjnego oraz zmiennego obciążenia aktywnego w postaci np. przekształtnika typu DC/AC, czy też DC/DC - str. 73, rys. 7.1) oraz przy

uwzględnieniu dwóch różnych kryteriów, opisanych przez Autora jako *intense electric energy generation* oraz *intensive wastewater treatment* (str. 71, w. 13-14d). Wyniki badań symulacyjnych prezentują odpowiednio rysunki 7.3 - 7.10 oraz rysunki 8.3 - 8.9.

Rozdział 9, zatytułowany *Wnioski*, jest zwięzłym, ale wyczerpującym i przejrzystym podsumowaniem osiągnięć Doktoranta.

4. Układ pracy doktorskiej, jej redakcja oraz bibliografia

Praca liczy 109 stron wraz ze spisem rysunków i dodatkami, a jej układ jest logiczny i uzasadniony. Autor konsekwentnie utrzymuje następującą przejrzystą strukturę rozdziałów o numerach 4, 5, 6, 7 i 8: Wstęp, Cele, Materiały i metody, Rezultaty i dyskusja.

Praca doktorska napisana jest w języku angielskim. Według mojej oceny język i interdyscyplinarna terminologia techniczna są poprawne. W przypadku prac w języku angielskim preferuję jednak wersję brytyjską, a nie - amerykańską. W paru miejscach Autor powołuje się na wzory, które dopiero zostaną podane w dalszych liniijkach (na przykład str. 20, w. 6 g). Zwracam też uwagę na to, że tabele powinny być podane w zwartej postaci, bez dzielenia ich pomiędzy kolejne strony (patrz Tabela 3.1 strony 22 i 23 oraz Tabela 4.1, strony 30 i 31). Drobne, nieliczne błędy edytorskie i redakcyjne zaznaczyłem w tekście (na przykład str. 39, w. 1,2 d, str. 68 w. 7 d, str. 31, wiersz 14 d).

Bibliografia obejmuje 123 pozycje. Jest obszerna, wyczerpująca i trafnie dobrana. Odnosi się do publikacji kluczowych i najnowszych, ale również zawiera pozycje o charakterze historycznym (na przykład pozycje [25, 26, 27, 70]).

Należy podkreślić, że Doktorant, jest współautorem 6 publikacji (jednym z 3 do 5), m.in. w czasopismach: *Energies* – 4, *Archives of Electrical Engineering* - 1.

5. Wniosek końcowy

Praca doktorska mgr inż. Szymona Potrykusa dotyczy bardzo aktualnej, nowoczesnej tematyki o istotnym znaczeniu dla zrównoważonego rozwoju, ochrony środowiska oraz dla prac badawczych nad nowymi niekonwencjonalnymi źródłami energii typu Energy Harvesting. Rozprawa ma charakter wybitnie interdyscyplinarny, przekraczając granicę nie tylko dyscyplin, ale również dziedzin nauki. Tym niemniej zakwalifikowanie jej jako rozprawy doktorskiej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne nie budzi wątpliwości i znajduje swoje pełne uzasadnienie w zakresie pracy oraz w osiągniętych rezultatach. Realizacja pracy była bardzo żmudna, czasochłonna i wymagała zaangażowania

specjalistycznej, zaawansowanej aparatury pomiarowej z zakresu elektrotechniki, elektrochemii i mikrobiologii.

Autor potwierdził swoje wysokie umiejętności planowania i przeprowadzenia eksperymentów o złożonym charakterze i złożonej naturze. Uzyskane przez Doktoranta rezultaty, będące wynikiem zarówno badań eksperymentalnych, jak i symulacyjnych, mają charakter oryginalny i mogą mieć znaczenie praktyczne w przyszłości.

Moim przekonaniu praca doktorska mgr inż. Szymona Potrykusa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim w aktualnie obowiązujących aktach prawnych i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Szymona Potrykusa do publicznej obrony w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long vertical line extending downwards.