

dr hab. inż. Maciej Sibiński, prof. uczelni.
Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
ul Stefanowskiego 18
90-537 Łódź

Łódź 29.11.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Fabiana Schodena

Investigation of non-toxic dye-sensitized solar cell materials for circular design approaches

Promotorzy:

prof. dr hab. Tomasz Błachowicz

prof. dr inż. Eva Schwenzfeier-Hellkamp

1. Aktualność i oryginalność tematyki oraz teza i cel rozprawy.

Przedstawiona dysertacja dotyczy wszechstronnej analizy możliwości wykorzystania ogniw słonecznych DSSC w obiegu gospodarki cyrkularnej. Doktorant podjął się zadania o dużym znaczeniu dla funkcjonowania instalacji fotowoltaicznych we współczesnym systemie generacji energii elektrycznej, jakim jest możliwość regeneracji, utylizacji oraz przerobu wtórnego ogniw słonecznych. Do tego celu Autor wybrał ogniwa słoneczne uczulane barwnikiem (DSSC) które stanowią obecnie niszową część konstrukcji fotowoltaicznych a ich sprawność odbiega znacząco od rekordów uzyskiwanych w kategoriach ogniw nieorganicznych, jednak ze względu na swoją budowę stwarzają one możliwość osiągnięcia niskoemisyjnego procesu produkcji.

W przypadku wprowadzenia tego typu konstrukcji na rynek możliwość wielokrotnego użytkowania oraz przerobu wtórnego elementów składowych zapewni w pełni przyjazny dla środowiska obieg produktu i z tego punktu widzenia jest bardzo ważna dla dalszego rozwoju oraz wdrażania technologii fotowoltaicznych. Z powyższych przyczyn uważam podjęty temat za aktualny i ważny. Jednocześnie należy uznać, że jest to oryginalny wątek badawczy jako, że nie występują dotąd zdefiniowane procedury obiegu zamkniętego dla ogniw słonecznych o komponentach organicznych.

2. Rozwiązanie postawionego zadania – metody i samodzielność autora.

Autor w swojej pracy posłużył się zróżnicowanymi narzędziami analizy technicznej i ekonomicznej przyjętego problemu badawczego, wykorzystując, jako odwołanie dotychczasowe procesy opracowane dla ogniw krzemowych. Jest to w pełni uzasadnione, jako, że technologia krzemowa stanowi obecnie nie tylko ponad 90% rynku fotowoltaicznego, lecz jest również najdłużej wykorzystywaną komercyjnie technologią fotowoltaiczną. Dało to możliwość wypracowania procesów przerobu wtórnego modułów krzemowych z których najstarsze są już po założonym okresie eksploatacji. Jednocześnie badana przez Doktoranta technologia ogniw barwnikowych z założenia cechuje się krótszym okresem eksploatacji i jako taka wymagać będzie szybszych działań nakierowanych na opracowanie procesów recyklingu.

Istotnym i wartym podkreślenia elementem zrealizowanego planu badawczego jest wszechstronne podejście do postawionego problemu polegające zarówno na przebadaniu procesów technologicznych przerobu wtórnego i regeneracji zużytych ogniw DSSC jak również na analizie ekonomicznej i próbie budowy modelu biznesowego dla takiego procesu. Jest to oczywiście zadanie bardzo szerokie i wykraczające poza ramy przedstawionej dysertacji, jednak zaprezentowane wyniki mogą stanowić istotny, interdyscyplinarny wkład do opracowania odpowiednich procedur i modeli w przyszłości. Doceniając dużą wagę podjętych badań należy jednocześnie podkreślić pewne braki, wynikające po części z bardzo obszernego zakresu prowadzonych prac jak również z ich dużej innowacyjności.

Na uwagę zasługuje fakt wykorzystania przez Autora nowego narzędzia analizy dostępnej literatury za pomocą programu VOSviewer. Jest to o tyle ważne, że Doktorant posługuje się narzędziem programowym nie tylko w celu sprawniejszej analizy dostępnej literatury, lecz również w celu poprawnego zdefiniowania zakresu prowadzonych badań co poprawia celowość i podnosi wartość wykonywanych eksperymentów i jest znaczącą innowacją metodologiczną warsztatu naukowego. Za pomocą tak poprowadzonej analizy literaturowej Autor udowodnił wzrastające zainteresowanie podjętym tematem badawczym i zdefiniował najważniejsze problemy naukowe. Przyjęta metodologia badawcza jest właściwa dla podjętego zagadnienia a jej opis jest jasny i wyczerpujący. W dyskusji wyników Autor odnosi się bezpośrednio i jednoznacznie do wskazanych wcześniej eksperymentów.

Ważnym osiągnięciem pracy jest sformułowanie modelu biznesowego procesu wytwarzania, wykorzystania i przerobu ogniw DSSC na bazie wyników przeprowadzonych eksperymentów technicznych, analizy otoczenia biznesowego jak również doświadczeń uzyskanych z podobnych procesów prowadzonych dla ogniw i modułów krzemowych. Za oryginalne osiągnięcie autora uważam zwłaszcza interpretację i wykorzystanie wyników eksperymentów regeneracji i przerobu wtórnego ogniw DSSC do zaproponowania oryginalnych modeli ich użytkowania przez odbiorcę końcowego jak również do oszacowania korzyści ekonomicznych i ekologicznych poszczególnych etapów tego procesu.

Istotnym elementem pracy badawczej Autora była również publikacja uzyskanych wyników naukowych. Wyniki zaprezentowane w dysertacji zostały w znaczącej części opublikowane w międzynarodowych czasopismach MDPI w spółczynnikach wpływu

od 3.2 do 3.9. Ilość cytowani prac autora w bazie Web of Science Core Collection wynosi 54 a wartość IH= 5. Świadczy to o zainteresowaniu środowiska naukowego prowadzonymi pracami oraz o wadze uzyskanych osiągnięć, choć brakuje nieco publikacji w czasopismach innych wydawców.

Przedstawiona praca jest poprawna od strony formalnej i ma budowę właściwą dla dysertacji doktorskich. Układ pracy jest przejrzysty i zgodny z powszechnie przyjętą strukturą IMRAD. Zaprezentowany wstęp teoretyczny odpowiada podjętemu tematowi pracy choć jest dosyć enigmatyczny i mógłby zostać rozszerzony w niektórych aspektach – zwłaszcza dotyczących parametrów opto-elektronicznych ogniw słonecznych DSSC oraz mechanizmów starzeniowych zachodzących w tych przyrządach.

Za szczególnie cenne elementy pracy uważam

- Synergiczne wykorzystanie kroków technologicznych oraz analizy procesowej z użyciem modeli gospodarki cyrkularnej (Circo).
- Wykorzystanie nowej metodologii badań literaturowych w celu określenia znaczenia i potencjalnego zakresu tematu badawczego
- Zastosowanie nowoczesnych narzędzi analizy literatury naukowej (VOSviewer)
- Wnioski aplikacyjne, wyciągnięte na podstawie analizy wyników eksperymentalnych.
- Ekonomiczne ujęcie problemu obiegu wtórnego dla organicznych ogniw słonecznych.
- Interdyscyplinarne podejście do złożonego problemu technologicznego, dające możliwość szerszej analizy badanego zagadnienia oraz dostarczające informacji na temat jego rzeczywistych walorów aplikacyjnych.

Na podstawie spostrzeżeń faktów można stwierdzić, że Doktorant posiadał zdolność samodzielnego planowania i prowadzenia eksperymentów badawczych na podstawie przyjętego zakresu pracy jak również umiejętność publikacji uzyskanych wyników naukowych zgodnie z przyjętymi standardami.

3. Wiedza autora z zakresu dziedziny naukowej oraz umiejętność prezentacji wyników.

Na podstawie przedstawionych wyników pracy oraz publikacji Doktoranta można stwierdzić, że uzyskał on szeroką wiedzę z omawianego zakresu oraz następujące umiejętności badawcze:

- Kompleksowe planowanie i prowadzenie interdyscyplinarnych badań naukowych oraz dobór właściwych narzędzi badawczych z zakresu teoretycznej analizy problemu, statystyki, prowadzenia procesów technologicznych oraz analizy wyników.
- Wiedza teoretyczna i umiejętności praktyczne z zakresu procesów produkcyjnych ogniw uczulanych barwnikiem.

- Odpowiedni dobór metod badawczych, obsługa urządzeń i interpretacja wyników otrzymanych za pomocą zróżnicowanych technik charakteryzacji materiałowej, optycznej i elektrycznej warstw i elementów półprzewodnikowych.
- Poznanie i wykorzystanie procesów przemysłowych stosowanych w obiegu cyrkularnym elementów fotowoltaicznych.
- Umiejętność krytycznej analizy wyników pomiarów, oraz przygotowania publikacji naukowych.

4. Uwagi krytyczne i zastrzeżenia do treści rozprawy doktorskiej

Szeroki zakres tematyczny pracy jak również jej interdyscyplinarny charakter stawiają wysokie wymagania wobec Doktoranta i stwarzają okazję do popełnienia błędów. Do podstawowych uchybień przedstawionej pracy zaliczyć można sposób definicji celu naukowego.

Zdefiniowany przez Doktoranta cel pracy o brzmieniu: „*zbadanie materiałów używanych do produkcji ogniw DSSC, które można wielokrotnie wykorzystać*” jest bardzo ogólny. Podobnie opisowe określenie, że jak dotąd brak jest raportów dotyczących eksperymentów z zakresu przerobu wtórnego, odzyskiwania surowców oraz modelu cyrkulacyjnego obiegu komponentów ogniw DSSC, co jest przyjętym przez Autora celem pracy (str. 53). Takie sformułowanie celu pracy nie jest precyzyjne i właściwe w pracy doktorskiej. Celem takim mogłoby być wykonanie eksperymentów w zdefiniowanym zakresie, które w zamierzeniu mają doprowadzić do konkretnego efektu -np. udowodnienia postawionej hipotezy badawczej.

Ponadto nie można zgodzić się z twierdzeniem Autora podanym w uzasadnieniu podjęcia tematu, że niskie koszt wytworzenia ogniw słonecznych Chinach są spowodowane wyłącznie zmianą technologii ich produkcji. Czynnikiem wpływającym na koszty produkcji ogniw słonecznych na dalekim wschodzie jest więcej jak choćby niskie koszty energii elektrycznej pochodzącej z nie ekologicznych źródeł wytworzenia. Nowe dyrektywy UE odnoszą się do tych czynników i wprowadzają obowiązek obciążenia produktu kosztami energochłonności procesu wytwórczego, co dodatkowo poprawi przewagę konkurencyjną ogniw DSSC.

Istotny mankament pracy stanowi również brak omówienia i analizy mechanizmów starzeniowych ogniw i modułów słonecznych a w szczególności ogniw DSSC oraz ich wpływu na zmianę parametrów ogniw i modułów PV oraz okres bezawaryjnej pracy tych elementów. Bez znajomości tych zjawisk trudno o szczegółową ocenę wartości zaproponowanych technologii służących ponownemu uzdatnianiu ogniw.

Do bardziej szczegółowych uwag krytycznych zaliczyć można następujące punkty:

- 1) Brak wykreślenia pełnych charakterystyk badanych próbek ogniw. Zmiany charakterystyki prądowo-napięciowej i wynikającej z nich charakterystyki mocy dają pełniejszy obraz uzyskanych wyników niż pokazane zbiorczo w jednej tabeli (Table 4) orientacyjne wyniki liczbowe.

- 2) Rozdział 2.3 Zatytułowany został „DSSC materials and functioning principle” a jego kolejne podrozdziały (2.3.1-2.3.6) dotyczą elementów składowych ogniw DSSC oraz zastosowanych do ich budowy materiałów. W tym ujęciu niezrozumiałe jest umieszczenie w tym rozdziale podrozdziału 2.3.7 który dotyczy zupełnie innych typów ogniw słonecznych – ogniw organicznych i perowskitowych. W dodatku omawianie dwóch zupełnie odmiennych, oryginalnych konstrukcji ogniw w jednym podrozdziale jest bardzo zdawkowe i pozbawione sensu. Ogniwa te jednocześnie nie stanowią przedmiotu badań Autora oraz nie wchodzi w zakres jego dalszych prac eksperymentalnych. Rozdział ten należałoby przedstawić oddzielnie, lub – co wydaje się bardziej wskazane w ogóle pominąć a same typy ogniw umieścić jedynie w przeglądzie konstrukcji fotowoltaicznych umieszczonym na wstępie pracy.
- 3) Prąd zwarcia ogniwa słonecznego, oznaczany jako I_{sc} oraz gęstość prądu zwarcia J_{sc} to dwie różne wielkości i nie należy ich stosować zamiennie. W szczególności opis wyznaczania wartości współczynnika wypełnienia FF, umieszczony na stronie 74 powinien zostać skorygowany. Ponadto Autor w spisie symboli J_{sc} oznacza błędnie jako prąd zwarcia ogniwa natomiast na oznaczenie napięcia ogniwa używa w pracy zamiennie symbolu U (jak na str 70 we wzorze na moc ogniwa) lub V (spis symboli oraz inne miejsca pracy).
- 4) Wykorzystywane rysunki nie zawsze spełniają poprawnie zakładaną rolę informacyjną i nie są na poziomie odpowiadającym dysertacji naukowej. Niektóre rysunki (np. Fig 1, Fig 4) są niskiej jakości natomiast inne jak zdjęcia popularnie wykorzystywanych urządzeń laboratoryjnych (Fig 9, 10, 11, 13, 14, 16) niewiele wnoszą do treści prezentowanych badań. Ponadto prezentowana aparatura laboratoryjna nie występuje w kolejności zgodnej z listą przedstawioną na początku rozdziału 3.2.
- 5) Niektóre z rysunków nie zostały umieszczone we właściwym miejscu pracy, co utrudnia odbiór i prawidłową analizę wyników (np. Rys 48, prezentujący wyniki opisywane w rozdziale 4.3.5 został umieszczony w rozdziale 4.4.1 – prawdopodobnie wyłącznie z przyczyn edycyjnych).

Ponadto do istotnych kwestii które powinny zostać poruszone w trakcie publicznej dyskusji należą poniższe pytania:

- 6) W jaki sposób w warunkach przemysłowych w normalnym trybie użytkowania można zrealizować proces ponownego napełniania ogniw DSSC elektrolitem zaproponowany przez Autora?
- 7) Dlaczego zdaniem Autora do ogniw DSSC konieczne jest zastosowanie filtrów UV w celu ograniczenia degradacji warstwy TiO_2 skoro podłoże szklane pełni w sposób naturalny rolę takiego filtra?
- 8) Jakiego typu ogniwa (z roku 2018 oraz 2020) wykorzystano do badania? Kto był ich wytwórcą i jakie były ich dane nominalne/katalogowe (ewentualnie jakie były oryginalne parametry tych przyrządów zmierzone po wyprodukowaniu)?
- 9) W pracy brakuje oszacowania kosztów poszczególnych elementów procesów uzdatniania, przerobu wtórnego i utylizacji elementów ogniw DSSC. Czy Autor jest w stanie oszacować koszty zaproponowanych przez siebie procesów regeneracji i utylizacji ogniw barwnikowych?

- 10) Jak badania Autora można odnieść do kompletnych modułów fotowoltaicznych zbudowanych na bazie ogniw DSSC z uwzględnieniem ich hermetyzacji za pomocą warstw polimerowych a także do występujących w nich mechanizmów starzeniowych?

5. Ocena końcowa

Pomimo przedstawionych uwag krytycznych zaprezentowane w rozprawie doktorskiej wyniki analizy teoretycznej jak i prowadzonych prac eksperymentalnych stanowią oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego a także wykazują wysoką ogólną wiedzę teoretyczną Autora i potwierdzają jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na tej podstawie stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi stawiane w art. Art. 186 oraz 187 Ustawy z dnia z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Marcin Siliński