

Prof. dr hab. Ewa Klugmann-Radziemska
Wydział Chemiczny
Katedra Konwersji i Magazynowania Energii
Politechnika Gdańska

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Fabiana Schodena pt.: „Investigation of non-toxic dye-sensitized
solar cell materials for circular design approaches”

Podstawą formalną przedłożenia niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 24 października 2023 r. nr 150/2023, powołująca recenzentów pracy doktorskiej.

Ocena zasadności podjęcia tematu

Tematyka pracy doktorskiej obejmuje technologie o znaczeniu kluczowym dla gospodarki: gospodarki o obiegu zamkniętym w obszarze urządzeń do konwersji energii odnawialnej.

W dobie wyczerpywania się zasobów energetycznych i rosnącego zanieczyszczenia środowiska naturalnego, wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych oraz ograniczenie użycia materiałów toksycznych i szkodliwych, stają się koniecznością. Recykling i powtórne wykorzystanie materiałów stanowi kluczową częścią holistycznego ekoprojektu, który uwzględnia efektywność, okres eksploatacji, okres zwrotu nakładów energetyczny (EPBT – Energy Payback Time), bezpieczeństwo i dostępność materiałów.

Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne (DSSC – Dye Sensitized Solar Cells) są - w przeciwieństwie do dominujących na rynku modułów fotowoltaicznych opartych na technologii krystalicznego krzemu (monokrystalicznych oraz polikrystalicznych) - oparte na technologii bezkrzemowej, z wykorzystaniem materiałów funkcjonalnych, takich jak nanocząstki metali i tlenków metali, barwniki organiczne czy polimery przewodzące. Ogniwa te są niedrogie, łatwe w produkcji i wytrzymują długą ekspozycję na światło i ciepło w porównaniu z tradycyjnymi ogniwami słonecznymi na bazie krzemu. Choć nie są zbyt wydajne, są bardzo skuteczne w szerokim zakresie warunków nasłonecznienia.

W swojej pracy doktorskiej mgr inż. Fabian Schoden podjął aktualny problem opracowania technologii wytwarzania tego typu ogniw, wykorzystującej wyłącznie materiały nietoksyczne, o niskim zapotrzebowaniu na energię na etapie produkcji.

Z przedstawionych powyżej powodów podjęcie rozważanego w pracy tematu uważam za uzasadnione.

Ocena merytoryczna pracy

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska została napisana pod kierownictwem naukowym prof. dr hab. inż. Tomasz Błachowicza (Politechnika Śląska) oraz prof. dr. ing. Evy Schwenzfeier-Hellkamp (HSBI Hochschule Bielefeld) i wykonana w Politechnice Śląskiej.

Doktorant sformułował i udowodnił następującą hipotezę: *materiały do produkcji ogniw DSSC, mogą podlegać cyklicznym procesom technologicznym tak, aby uzyskana stabilność parametrów strukturalnych, optycznych i elektrycznych, dawała możliwość ich ponownego wykorzystania w urządzeniach fotowoltaicznych.*

W pracy mgr inż. Fabian Schoden skupił się na przeprowadzeniu eksperymentów, wskazujących na możliwość powtórnego wykorzystania materiałów, użytych do produkcji ogniw DSSC (recyklingu) lub regeneracji ogniw. W konsekwencji przedstawił ekonomiczne uzasadnienie realizowania obiegu zamkniętego w produkcji i wykorzystaniu fotowoltaicznych ogniw barwnikowych.

Praca składa się z sześciu zasadniczych rozdziałów: Wprowadzenie, Podstawy teoretyczne, Metodologia, Wyniki badań eksperymentalnych, Dyskusja, Podsumowanie i wnioski.

Rozprawa ma łącznie 182 strony, zawiera 74 rysunki i 11 tabel. Struktura pracy jest poprawna, a układ jej treści - przejrzysty. Cytowana literatura jest obszerna, spis zawiera 171 pozycji literaturowych, w tym odwołania do stron internetowych.

W części literaturowej Doktorant przedstawił analizę dostępnych informacji, mogących mieć znaczenie w projektowaniu technologii recyklingu i regeneracji, jak również procesów produkcji ogniw barwnikowych, umożliwiających takie późniejsze z nimi postępowanie, sprzyjające ochronie środowiska. Ważne z tego punktu widzenia są

doświadczenia pozyskane z analizy metod recyklingu ogniw fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu.

W części eksperymentalnej omówiono metody analityczne i techniki pomiarowe zastosowane w trakcie realizowania pracy.

Badaniom dotyczącym recyklingu poddano ogniwa wyprodukowane w latach 2018-2020 (podłoża szklane o grubości 2-3mm).

Z kolei badania dotyczące regeneracji prowadzono na próbkach ogniw: wykonanych na komercyjnie dostępnych podłożach szklanych w warstwach TiO_2 , próbkach wykonanych na podłożach odzyskanych z używanych ogniw z ręcznie nakładami warstwami oraz próbkach ogniw starszych – pochodzących z 2015r., regenerowanych elektrolitem, z dodatkiem nowej warstwy TiO_2 na warstwie oryginalnej oraz z zastąpieniem starej warstwy TiO_2 nową.

Badano sprawność konwersji ogniw (PCE) w warunkach STC, z wykorzystaniem symulatora słonecznego LS0500 produkcji LOT-Quantum Design GmbH.

Przedstawiona praca stanowi dokumentację kompleksowych badań, mających na celu wskazanie potencjalnych możliwości regeneracji i recyklingu ogniw barwnikowych, co pozwoli na realizację założeń gospodarki cyrkularnej. Należy podkreślić, że w toku realizacji pracy doktorskiej Doktorant stosował różne metody pomiarowe. Na podstawie analizy otrzymanych wyników formułował wnioski, które służyły weryfikacji przyjętych założeń.

W mojej ocenie oryginalnym osiągnięciem pracy jest:

- udowodnienie postawionej tezy w efekcie przeprowadzenia zaplanowanych i przeprowadzonych samodzielnie eksperymentów,
- wykonanie badań różnymi metodami, w tym metodą skaningowej mikroskopii elektronowej SEM-EDX, metodą emisyjnej spektroskopii optycznej indukcyjnie wzbudzanej plazmy ICP-OES, z zastosowaniem mikroskopii sił atomowych,
- wykazanie, że procesy regeneracji i recyklingu można opracować procesy produkcyjne, spełniające zasady gospodarki obiegu zamkniętego; zastosowanie metody CIRCO, która opiera się na dokonaniach naukowców z Politechniki w Delft

i nazywana jest „Produkty, które trwają” - obejmuje pięć modeli biznesowych o obiegu zamkniętym i sześć strategii projektowania w obiegu zamkniętym.

Wyniki badań, prowadzonych przez Doktoranta zostały opublikowane w 5 artykułach w czasopismach naukowych, w 4 z nich Doktorant jest pierwszym autorem:

- Fabian Schoden, Marius Dotter, Dörthe Kniefelkamp, Tomasz Blachowicz, and Eva Schwenzfeier-Hellkamp. Review of State of the Art Recycling Methods in the Context of Dye Sensitized Solar Cells. *Energies*, 14(13):3741, 2021.
- Fabian Schoden, Anna Katharina Schnatmann, Emma Davies, Dirk Diederich, Jan Lukas Storck, Dörthe Kniefelkamp, Tomasz Blachowicz, and Eva Schwenzfeier-Hellkamp. Investigating the recycling potential of glass based dye-sensitized solar cells - melting experiment. *Materials*, 14(21):6622, 2021.
- Fabian Schoden, Joscha Detzmeier, Anna Katharina Schnatmann, Tomasz Blachowicz, and Eva Schwenzfeier-Hellkamp. Investigating the Remanufacturing Potential of Dye-Sensitized Solar Cells. *Sustainability (Switzerland)*, 14(9):5670, 2022.
- Fabian Schoden, Anna Katharina Schnatmann, Tomasz Blachowicz, Hildegard Manz-Schumacher, and Eva Schwenzfeier-Hellkamp. Circular Design Principles Applied on Dye-Sensitized Solar Cells. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22):15280, 2022
- Anna Katharina Schnatmann, Fabian Schoden, and Eva Schwenzfeier-Hellkamp. Sustainable PV Module Design - Review of State-of-the-Art Encapsulation Methods. *Sustainability (Switzerland)*, 14:9971, 2022.

Dorobek ten oceniam jako dobry.

Uwagi o charakterze merytorycznym

- Proszę o komentarz dotyczący wybranych do badań związanych z recyklingiem ogniw – dlaczego dokonano akurat takiego wyboru i czy materiał ten może być uznany jako reprezentatywny dla różnych ogniw (różnych producentów i z różnych okresów produkcji) – proszę o komentarz w odniesieniu do ogniw poddanych regeneracji.
- Jaki był skład mieszaniny trawiącej $H_2SO_4 + HF$ i co przemawia za takim wyborem roztworu trawiącego?

- Jaki był udział Doktoranta w wykonywanych badaniach (które badania wykonywał samodzielnie, które były wykonywane z Jego udziałem ewentualnie zlecone)?
- Jakie problemy nastręcza różny skład chemiczny szkła w procesach jego recyklingu?
- Czy otrzymywana bardzo niska wartość współczynnika PCE (rzędu 0,025%) nie jest w granicach błędu pomiarowego? Proszę przedstawić analizę błędu pomiarowego.
- Większość narzędzi metody Circo ma charakter jakościowy. Czy Doktorant dokonał analizy z wykorzystaniem innych metod, pozwalających na analizy ilościowe, np. środowiskowej oceny cyklu życia (LCA - *Life Cycle Assessment*), która również jest techniką z zakresu zarządczych i pozwala na ocenę potencjalnych zagrożeń środowiska, dając możliwość porównania procesu bez i z uwzględnieniem recyklingu.

Uwagi o charakterze edytorskim

Jak każda praca, rozprawa nie jest wolna od błędów stylistycznych i interpunkcyjnych, nie wpływa to jednak na moją wysoką ocenę strony edytorskiej.

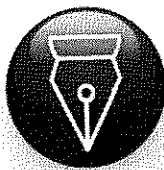
- W przedstawionym spisie literatury nie zamieszczono DOI (*Digital Object Identifier*), co ułatwiłoby szybki dostęp do artykułów.
- Str. 142 pozycja [92] *Michael Tupy, Pavel Mokrejs, Dagmar Merinska, Petr Svoboda, and Josef Zvonicek. Windshield recycling focused on effective separation of PVB sheet, 2014.* – niepełne dane, brak tytułu czasopisma
- Pozycje [16] i [18] (str.133) są zdublowane.
- Rys. 1 na str. 11 oraz Rys. 2 na str. 44 pochodzi z artykułu: *Jan Lukas Storck, Marius Dotter, Bennet Brockhagen, and Timo Grothe. Evaluation of Novel Glycerol/PEO Gel Polymer Electrolytes for Non-Toxic Dye-Sensitized Solar Cells with Natural Dyes Regarding Long-Term Stability and Reproducibility. Crystals, 10:1158, 2020*, a nie z: *Fabian Schoden, Marius Dotter, Dorte Kniefelkamp, Tomasz Blachowicz, and Eva Schwenzfeier-Hellkamp. Review of State of the Art Recycling Methods in the Context of Dye Sensitized Solar Cells. Energies, 14(13):3741, 2021.*
- Dlaczego zdanie w 1 akapicie od dołu na stronie 13 zawiera odwołanie do [26] *Jan Lukas Storck, Marius Dotter, Bennet Brockhagen, and Timo Grothe. Evaluation of Novel Glycerol/PEO Gel Polymer Electrolytes for Non-Toxic Dye-Sensitized Solar Cells with Natural Dyes Regarding Long-Term Stability and Reproducibility. Crystals, 10:1158, 2020?*

Wnioski końcowe

Reasumując, recenzowana praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie podjętego zagadnienia naukowego. Autor rozważa w niej problem, który ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego i gospodarczego. Trafnie określił założenia dotyczące jego analizy i z sukcesem ją zrealizował. Przeprowadzając swoje wywody wykazał się dobrą znajomością ogólnej wiedzy teoretycznej, a także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w tym badań z wykorzystaniem różnych metod.

Wyrażam moje uznanie dla wkładu pracy doktoranta, i pragnę podkreślić wysokie znaczenie naukowe uzyskanych wyników oraz ocenić recenzowaną przeze mnie rozprawę doktorską bardzo pozytywnie. Jednocześnie stwierdzam, że praca mgr inż. Fabiana Schodena w pełni spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i niniejszym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Gdańsk, dnia 21 listopada 2023r.



Signed by /
Podpisano przez:

Ewa Klugmann-
Radziemska
Politechnika
Gdańska

Date / Data:
2023-11-21 12:07