

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. Chociaż 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, umożliwiającym 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 Knepfelkamp, 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 Knepfelkamp, 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 ogniów – dlaczego dokonano akurat takiego wyboru i czy materiał ten może być uznany jako reprezentatywny dla różnych ogniów (różnych producentów i z różnych okresów produkcji) – proszę o komentarz w odniesieniu do ogniów 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 nastęcza różny skład chemiczny szkła w procesach jego recyklingu?
- Czy otrzymana 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, Dorthe Knepfelkamp, 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.