

### **Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra SOBIKA**

#### **pt. „New Luminescent Solar Concentrators for packaging in photovoltaic modules”**

Podstawą formalną wykonania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. A. Krupkowskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, z dnia 29 czerwca 2021 r. oraz pismo Dyrektora Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej z dnia 5 lipca 2021 r. w sprawie wykonania recenzji.

#### **1. Ogólne dane o charakterze pracy**

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. Kazimierz Drabczyk, prof. IMIM, drugim promotorem jest dr inż. Grażyna Kulesza-Matlak, opiekunem ze strony wdrażającego przedsiębiorstwa jest mgr inż. Olgierd Jeremiasz.

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Sobika zrealizowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego została wykonana w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Projekt został współfinansowany przez Ministerstwo Edukacji i Nauki. Studia doktoranckie w zakresie Inżynierii Materiałowej mgra inż. Piotr Sobik realizował od października 2017 roku do czerwca 2021 z wykładowym językiem angielskim i w takim języku została napisana rozprawa doktorska.

Część badań, których rezultaty w rozprawie doktorskiej zawarł mgr inż. Piotr Sobik, dotyczące charakterystyki optycznych i elektrycznych właściwości modułów fotowoltaicznych została przeprowadzona w laboratorium wzorującym Laboratorium Fotowoltaicznym w Kozach – placówce naukowo-badawczej Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej IMIM PAN w Krakowie. Prace związane z modyfikacją materiałów i przygotowaniem modułów fotowoltaicznych prowadzone były w laboratorium Helioenergii Sp. z o.o., spółce specjalizującej się w nanotechnologiach i inżynierii materiałowej, której zespół inżynierów zajmuje się głównie technologią materiałów grubowarstwowych oraz projektami badawczymi w zakresie fotowoltaiki wprowadzając w życie nowe rozwiązania.

Wprowadzanie na rynek ogniw o powierzchni większej niż typowa 156mmx156mm wymusza zagęszczanie szyn zbiorczych busbarów i kosztowne modernizacje linii produkcyjnych. Jednozączkowe krzemowe ogniwa maksymalną wydajność osiągnęły w 2008 roku i od tamtej pory zaprzestano prowadzenia zintensyfikowanych badań nad poprawieniem wydajności energetycznej krystalicznego krzemu. Skupiono się natomiast nad poprawą jakości pokryw solarnych, zaczęto rozwijać badania nad syntezą krzemu porowatego i polimerów i niedawno doniesiono o doskonałych właściwościach takich kompozytów, które być może zrewolucjonizują rynek produkcji modułów fotowoltaicznych na bazie krzemu.

Przekroczono już 47% sprawności multizłączowych ogniw fotowoltaicznych, a każde kolejne doniesienie wyjaśnia, że zastosowano do uzyskania rekordu wielokrotną ilość słońc. Są to jednak rozwiązania kosztowne i stosowane raczej w specjalnych projektach użytecznych lub związanych z szerokimi badaniami kosmosu zintensyfikowanymi w ciągu ostatnich dekad. Rozwiązanie zaprezentowane jako rezultat doktoratu wdrożeniowego jest ekonomiczne, nowatorskie i najpewniej wkrótce zostanie zrealizowane w seryjnej produkcji przynosząc rewolucyjne zmiany m.in. w agrofotowoltaice.

## 2. Konstrukcja merytoryczna rozprawy

a) **Problematyka badawcza** Tematyka pracy dotyczy luminescencyjnych koncentratorów energii. W nich droższy półprzewodnik zamieniono na tańszy koncentrator dlatego stanowią ciekawą alternatywę dla kosztownej multizłączonej fotowoltaiki, której wydajności energetyczne zbliżają się do teoretycznej granicy (termodynamicznego limitu).

b) **Kompozycja pracy**, kolejność podawanych treści Pracę otwiera numerowany wstęp, jak to jest w zwyczaju przygotowywania naukowych tekstów w języku angielskim. Pierwsza część pracy obejmuje 6 pierwszych rozdziałów o charakterze teoretycznym. Kolejna część składająca się z pozostałych siedmiu rozdziałów ma charakter głównie empiryczny. Pracę doskonale uzupełniają sześć dodatków, które podkreślają szeroki zakres przeprowadzonych badań. Zachowano prawidłowe relacje między warstwą teoretyczną i eksperymentalną rozprawy, które wzajemnie się uzupełniają. Podkreślono, aplikacyjny charakter wdrożeniowego doktoratu, osobno go prezentując w rozdziale 13.

Doktorant przedstawia stan wiedzy i badań nad koncentratorami światła opatrzone własnymi komentarzami, co do zagrożeń jakie niesie energetyka konwencjonalna, dynamicznie postępujący rozwój i ekspansja przemysłowych przedsięwzięć na świecie wobec postępujących zmian klimatycznych zachodzących na Ziemi, których nie zatrzymanie, w niedalekiej przyszłości kilkudziesięciu lat, może doprowadzić do cywilizacyjnej katastrofy i degradacji środowiska naturalnego. Pierwsze rozdziały zawierają informacje klasyczne na temat właściwości promieniowania słonecznego, luminoforów i kapsulantów stosowanych do pakowania krzemowych modułów fotowoltaicznych. Z analizy organicznych luminoforów najczęściej wykorzystywanym do badań luminescencyjnych koncentratorów energii (LSC) jest czerwień perylenowa. Jak pisze Doktorant „wielokrotnie podnoszone próby wyjaśnienia mechanizmu fotodegradacji w barwnikach opartych na perylenie i proponowane w literaturze metody wygaszania tego niepożądanego efektu są sprzeczne”. Z jednej strony proponuje się enkapsulację barwnika bez dostępu tlenu, z innej, tlen uważany jest za czynnik mogący regenerować uszkodzony barwnik. Ponadto, luminofor taki najczęściej występuje w PMMA, a ogniwa słoneczne nie są połączone z matrycą poprzez laminację, co jest metodą typową dla produkcji modułów fotowoltaicznych.

Opracowanie rozwiązań prowadzących do obniżenia wskaźnika LCOE (Levelized Cost of Energy) dla modułu fotowoltaicznego jest priorytetowe dla dalszego zwiększania udziału energii słonecznej w ogólnej produkcji energii elektrycznej na świecie. Takie rozwiązania szybko wprowadzone na rynek doprowadziłyby do znaczącej redukcji emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery.

Materiałem o niekwestionowanej fotostabilności, alternatywnym do perylenu, jest starożytny barwnik - błękit egipski, który stosowany jest w nowoczesnych technologiach, a w pracy poświęcono mu sporo miejsca. Jego zasadniczym składnikiem jest krzemian wapniowo-miedziowy i odpowiada on za właściwości użyteczne z punktu widzenia współczesnej elektroniki, a także medycyny. Rozpada się na warstewki tysiące razy cieńsze od ludzkiego włosa, które emitują promieniowanie podczerwone zbliżone do promieniowania wykorzystywanego przez aparaturę do obrazowania medycznego, zamki samochodowe i inne. Luminofor ten mógłby znacząco wspomagać wydajność ogniw słonecznych przez efekt luminescencji, ponieważ udowodniono, że wykazuje wysoką fotostabilność, wysoką odporność chemiczną, stosunkowo wysoką wydajność kwantową, szerokie przesunięcie Stokesa i dobrą zgodność widma emisyjnego z absorpcją krzemowego złącza. Jednak nie zawsze wpływ błękitu egipskiego na poprawę wydajności energetycznej modułów z pokryciami barwionymi błękitem jest wyraźny i znaczący.

W literaturze bardzo skromnie opisane są folie laminacyjne EVA i PVB stosowane jako matryce w układach LSC. Folie te w połączeniu z barwnikiem mogą okazać się atrakcyjną formą wprowadzenia efektu luminescencyjnego do typowej budowy modułu fotowoltaicznego pod warunkiem potwierdzenia wystarczającej fotostabilności układu matryca-luminofor. Foliom EVA i PVB w pracy poświęcono teoretyczny rozdział szósty. Własne badania eksperymentalne nad EVA i PVB Doktorant zamieścił w rozdziale 8, 9 i 10. Informacje o właściwościach EVA i PVB, o parametrach technicznych koniecznych do uwzględnienia podczas pakowania modułów są materiałem na osobną publikację.

c) **Wykorzystana w pracy literatura, własne publikacje** Pracę zawarto na 114, pozostałe 31 stron to sześć załączników. Praca zawiera 81 rysunków, 10 tabel, a w załącznikach 16 rysunków i jedną tabelę. Bibliografia jest dobrana do celu oraz zakresu pracy i obejmuje 129 pozycji, z czego 70 to prace, które powstały od 2010 roku, a 27 powstało w ciągu czasu studiów doktoranckich Pana Piotra Sobika. Bibliografia jest aktualna.

Osiągnięcia Doktoranta, których jest współautorem, wchodzące w zakres rozprawy doktorskiej to 9 publikacji, które ukazały się w bardzo dobrych czasopismach głównie z dyscypliny Inżynieria Materiałowa z okresu 2015-2020. Trzy z nich ukazały się w *Microelectronics International*, pozostałe między innymi w *Materials Research Express*, *Circuit World*, *Nanotechnology Reviews*, *Archives of Metallurgy and Materials* i dwóch pozostałych o mniejszym zasięgu. W dwóch Pan Piotr Sobik jest pierwszym autorem. Pięć z tych prac dotyczy tematyki rozprawy doktorskiej.

Docenić tu należy jakość naukowo-badawczą publikacji współautorskich Doktoranta, aktualność tematyki, wysoką rangę i oddziaływanie czasopisma oraz ich ilość. Pierwsze powstały jeszcze przed rozpoczęciem studiów doktoranckich. W bazie Scopus znajdują się wszystkie publikacje Doktoranta, z informacją o 13 cytowaniach i indeksie Hirscha równym 2.

d) **Tezy pracy, cel pracy** W rozdziale 7 sformułowano tezy pracy doktorskiej, następnie przedstawiono metodologię badań.

Tezy pracy Doktorant sformułował następująco:

- i) Modyfikacja matrycy luminescencyjnego koncentratora energii (LSC) poprzez odpowiedni dobór rozpuszczalnika bez dodatkowego stabilizatora jest wystarczająca do zachowania fotostabilności barwnika czerwieni perylenowej,
- ii) Wzbogacenie powłoki szklanej błękitem egipskim zwiększa wydajność modułu fotowoltaicznego poprzez efekt podtrzymania luminescencji w podczerwieni.

Potwierdzeniem tych tez było wykonanie:

- badań wpływu różnych LSC na odpowiedź spektralną i elektryczną ogniw słonecznych,
- badań fotostabilności czerwieni perylenowej w zależności od materiału matrycy i składu kąpieli barwiącej,
- badań wpływu modyfikacji powierzchni szkła i warstwy PMMA na poziom adhezji w kompozycie szkło-PMMA.
- badań luminescencji błękitu egipskiego w odniesieniu do matrycy gospodarza.

Doktorant wybrał trzy strategie, z których wszystkie umożliwiają wspomaganie krzemowych ogniw typowych dla modułów fotowoltaicznych poprzez efekt luminescencji:

- opartą na kompozycie szkła i polimetakrylanu metylu. PMMA pełnił rolę matrycy LSC
- opartą na foliach laminacyjnych EVA i PVB, stosowanych w procesach produkcji modułów fotowoltaicznych, pełniących rolę matryc dla centrów luminescencyjnych.
- uwzględniającą ceramiczny luminofor tj. błękit egipski, który zostanie wykorzystany do stworzenia kompozytu ceramiczno-szklanego.

Celem pracy doktorskiej było rozwiązanie powyższych zagadnień oraz potwierdzenie tezy pracy poprzez opracowanie następującego dwustronnego modułu fotowoltaicznego wspomaganego LSC o wysokiej fotostabilności, wytworzonego w typowym procesie technologicznym pakowania modułów fotowoltaicznych, który stanowi główny rezultat pracy wynikający z wdrożeniowego charakteru prowadzonych w rozprawie doktorskiej badań.

Tezy pracy i cel sformułowane zostały w sposób logiczny i zrozumiały, opisujący zarówno wartość naukową prezentując walor poznawczy zdefiniowanego problemu badawczego, jak również rewolucjonizujący metodę wytwarzania krzemowych modułów z LSC podwyższającym ich wydajność nawet o 0,56%.

Zaprezentowane w pracy rozwiązanie jest doniesieniem o prototypie modułu z luminoforem z błękitu egipskiego jako LSC czego jeszcze, jak dotąd w literaturze nie odnotowano.

e) **Metodyka** Zastosowano bogatą metodologię badań, syntetycznie ujętą w rozdziale ósmym w tabeli 8.1. Doktorant do określenia morfologii proszków wykorzystał skaningowy mikroskop elektronowy SEM LEO 1530, mikroskop optyczny Keyence VHX-7000 do wizualnej kontroli pęknięć powłoki PMMA i określenia zawartość żelu w usieciowanej folii EVA. Pomiary grawimetryczne zostały wykonane na Axis AGN200C – tu określano ilość barwnika organicznego w matrycy polimerowej. Absorbpcję i całkowite odbicie w zakresie długości fal 250-1100nm Doktorant wyznaczał za pomocą spektrofotometru UV-VIS-NIR Perkin Elmer Lambda 950S; pomiary charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa I-V,  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ , Eff za pomocą Photo Emission Tech Inc. SS 200AAA, PV test Solutions SS I-V CT-02, natomiast pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych modułu I-V,  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ , Eff, za pomocą symulatora promieniowania słonecznego Endeas Quick Sun 820A. Fotoluminescencję oraz względną wydajność kwantową wyznaczano za pomocą systemu wyposażonego w QSSPC Sinton Consulting Table.

f) **Strona edytorska, szata graficzna** Jakkolwiek „nie ocenia się książki po okładce”, to dbałość o szczegóły graficzne i staranność edytorska zasługują na podkreślenie już od pierwszego kontaktu z rozprawą. Edycję pracy przeprowadzono bardzo starannie. Ze względu na jej wdrożeniowy charakter jest skomponowana jak raport z inżynierskich badań, co jest jej bezsprzeczną zaletą. Krótkie i bardzo kompaktowe rozdziały zwarcie poprowadzone, z bogatą liczbą cytowań bibliografii, są mocną merytoryczną i edycyjną stroną pracy. Doskonała jakość zdjęć, staranność przygotowanej graficznej dyskusji uzyskanych rezultatów czy to badań własności optycznych albo elektrycznych modułów modyfikowanych poprzez wkomponowanie LCA, zasługuje na podkreślenie i docenienie, co niniejszym czynię. Nie znalazłam edycyjnych uchybień w tekście, drobne potknięcia, których trudno uniknąć wymieniłam nieco później.

### 3. Osiągnięcia Doktoranta, które należy szczególnie podkreślić

W rozdziale 7 mgr inż. Piotr Sobik sformułował tezy pracy doktorskiej i pośrednio jej cel. Część badawczą pracy zawarto w rozdziałach 8-11. Osiągnięcia zawarte w rozprawie doktorskiej podsumowane zostały w rozdziałach 9, 10, 11, tj. 9.3 i 10.5. i 11.4. Wnioski zebrane zostały w rozdziale 12 na stronach 109 i 110, a wdrożeniowy charakter pracy podsumowano w rozdziale 13. W rozdziale 13 zaprezentowano prototypy ciepłarni wykonanych jako jeden z rezultatów prac o charakterze wdrożeniowym.

Pozwolę sobie przedstawić osiągnięcia Doktoranta w nieco innym zestawieniu niż te, podane na stronach 109 i 110. Są to:

- Zweryfikowanie potencjału stosowania luminescencyjnych koncentratorów energii (LSC) w zależności od udziału promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym docierającym do modułu PV. Doktorant opracował skrypt bazujący na udostępnionych przez Global Solar Atlas plikach w celu zaprezentowania obszarów świata, w których promieniowanie rozproszone w ujęciu rocznym przekracza promieniowanie bezpośrednie. Dla każdego punktu na mapie obliczył stosunek składowej promieniowania rozproszonego do promieniowania całkowitego, a na podstawie tak uzyskanych danych wykonał nowe mapy, które przedstawił na rys. 3.4, str.21. Brzmi zbyt skromnie wobec zakresu wykonanej pracy numerycznej i przez Doktoranta nie jest uznane jako osiągnięcie w ramach doktoratu.

**Badania dotyczące pierwszej tezy pracy** uznają za najważniejszy wynik pracy.

- Pełnoskalowa weryfikacja fotostabilności czerwieni perylenowej w matrycy PMMA-szkło. Badania eksperymentalne przeprowadzone w warunkach naturalnych przez firmę Helioenergia dowiodły, że materiał w postaci matrycy LSC z czerwienią perylenową ma co najmniej 10-letnią żywotność. Stąd, połączono trwale w kompozyt PMMA ze szkłem, aby wyeliminować konieczność bezpośredniego łączenia PMMA z ogniwem słonecznym za pomocą folii laminacyjnej. Dzięki temu PMMA może nadal stanowić matrycę LSC, a w procesie laminacji ogniwo słoneczne może być łączone ze szkłem.
- Uzyskanie kompozytu PMMA-szkło wymagało wcześniejszego przygotowania szkła. Funkcjonalizację szkła przeprowadzono poprzez zmianę kąta jego kontaktu, a następnie pokrycie go warstwą silanolu.

Mechanizmy degradacji interfejsu pomiędzy PMMA i szkłem zostały poddane wnikliwej i rzeczowej analizie, co z pewnością posłuży przy opracowywaniu algorytmu postępowania przy próbach tworzenia idealnego kompozytu.

- Moduły fotowoltaiczne wykonano z wykorzystaniem zmodyfikowanej folii laminacyjnej, którą w kąpielach barwiących wzbogacono o cząsteczki czerwieni perylenowej. Uzyskanie fotostabilności czerwieni perylenowej z zachowaniem dotychczasowych funkcji laminacji umożliwi produkcję modułu fotowoltaicznego wspomaganego LSC.

Doktorant przedstawił koncepcję takiego modułu na rysunku 10.1. W celu uzyskania trwałego modułu PV z wykorzystaniem zmodyfikowanej folii zweryfikowano fotostabilność barwnika w środowisku folii.

- **Dwa moduły fotowoltaiczne A i B wytworzone z modyfikowanej folii PVB wykazały wzrost sprawności o 0,48% i 0,56% odpowiednio, po zwiększeniu ilości światła docierającego do ogniw za pomocą LSC,** zaobserwowano zwiększenie prądu  $I_{sc}$  i  $I_{mpp}$ , a folia laminacyjna zastosowana jako matryca LSC wykazała duży potencjał użytkowy.
- Ze względu na niejednoznaczny charakter wyników Doktorant dokonał porównania analizy spektrogramów przed i po starzeniu oraz analizy szybkości degradacji wraz z oceną wizualną obrazów próbek przed i po starzeniu.

**Folia EVA**, użyta jako matryca nośna nie zapewnia warunków niezbędnych do fotostabilności czerwieni perylenowej. Niezależnie od rozpuszczalnika czerwien perylenowa nie wykazała oporności na światło w fazie testów laboratoryjnych z 2000 godzin naświetlania z powierzchniową gęstością mocy  $270W/m^2$  i nie ochroniła czerwieni perylenowej przed fotodegradacją.

**W przypadku folii PVB** na bazie czerwieni perylenowej w symulowanych warunkach napromieniowania jednego Słońca badane próbki wykazały wysoki współczynnik korelacji  $R^2$  pomiędzy widmami przed i po starzeniu. Czerwień perylenowa modyfikowana kąpielą metakrylową PVB nie miała wpływu na jakość modułu po laminowaniu. Uzyskano tu najwyższy współczynnik korelacji  $R^2=99,95\%$ , a największa zmiana widma dla określonej długości fali nie przekroczyła 12%.

#### **Badania dotyczące drugiej tezy pracy**

- Modelowe moduły wykonane z użyciem błękitu egipskiego dodanego do szkła wykazywały ogólny wzrost mocy wraz ze wzrostem stężenia błękitu. Jednak stosunkowo niski przyrost mocy równy 3,71% mocy wyjściowej zastosowanego ogniwa, nie wskazuje jednoznacznie na luminescencyjny charakter nośnika. Na podstawie zebranych danych eksperymentalnych jednoznacznie nie określono wzmocnienia mocy uzyskanego dzięki zastosowaniu błękitu egipskiego, ponieważ 20% domieszka błękitu egipskiego prowadzi do wzrostu albedo materiałów wokół ogniwa, podobnie jak w przypadku modułów z białą emalią lub tradycyjnych modułów z białym tyłem.
- W trakcie pomiarów, szczególnie dla modułów, w których nie zastosowano błękitu egipskiego, pogorszyły się parametry pracy ogniwa: spadła moc maksymalna. Tak więc obserwowany wzrost mocy dla modułów, w których zastosowano błękit egipski może być większy, biorąc pod uwagę kompensację strat wynikających ze wzrostu temperatury podczas naświetlania modułów. Podobny wynik uzyskano zarówno dla emalii transparentnych jak i lakierów poliuretanowych. Jak wynika z zaprezentowanych w pracy badań, błękit egipski, mimo że posiada właściwości luminescencyjne to może nie wspomagać pracy ogniwa słonecznego na pożądanym poziomie z powodu jego niskiej wydajności kwantowej oraz utraty właściwości luminescencyjnych po połączeniu z innymi materiałami w kompozyt.

#### **4. Potwierdzenie tezy pracy**

- Pierwszą tezę pracy potwierdzono. Uzyskano fotostabilny układ modułu fotowoltaicznego, przygotowany w typowym procesie produkcji modułów, bez konieczności stosowania dodatkowych stabilizatorów.
- Nie udało się potwierdzić słuszności drugiej tezy pracy. Uzyskany wzrost sprawności modułów z dodatkiem błękitu egipskiego nie przekroczył 2% dopuszczalnej niepewności pomiaru względem warunków STC. Żadna z próbek wykonanych z użyciem niebieskiego pigmentu wyprodukowana w laboratorium Helioenergia nie przekroczyła tego progu, dlatego słusznie Doktorant wnioskuje, że nie jest możliwe

jednoznaczne określenie charakteru błękitu egipskiego w przeprowadzonych badaniach, ponieważ jego domieszka prowadzi do wzrostu albedo materiałów otaczających ogniwo.

Tezy nie udało się potwierdzić, jednak zakres przeprowadzonych badań jest imponujący, ich dokumentacja jest rzetelna, a same badania wymagały umiejętności planowania i sprawnego ich przeprowadzania, synchronizowania ich tak, by inne badania w IMIM i Helioenergii mogły przebiegać w terminie uzgodnionym z jednostkami współpracującymi.

Badania wymagały dużego nakładu pracy, poznania obsługi specjalistycznej aparatury naukowo-badawczej oraz nabycia, co widać jednoznacznie w całej pracy, umiejętności analizowania i weryfikowania rezultatów, ponownego modyfikowania planów i prowadzenia nowych rozszerzonych badań.

### **Wdrożeniowy charakter pracy**

Do najważniejszych rezultatów podkreślających wdrożeniowy charakter doktoratu należą:

- dobór parametrów laminacji w systemie szkło-PVB-szkło przy użyciu laminatora ciągłego; Laminacja szkła hartowanego i niehartowanego w odpowiednich systemach; Opracowanie metody modyfikacji folii PVB przy zachowaniu fotostabilności czerwieni perylenowej; Badania nad zmianami geometrii folii laminacyjnej w procesie laminacji szkło-szkło;
- badania laminacji i modyfikacji folii PVC i PET; Weryfikacja możliwości zastosowania nowych, powierzonych luminoforów organicznych; Dobór parametrów do produkcji błękitu egipskiego; Uruchomienie stanowiska do przesiewowej weryfikacji właściwości luminescencyjnych błękitu egipskiego.

Myślę, że poza agrofotowoltaiką koncentraty LSC wkrótce znajdą zastosowanie w urbanistyce do znakowania ulic, domów, parkingów, jako reklamy świetlne i wszędzie tam, gdzie zastosowanie ich będzie ekonomicznie uzasadnione.

## **5. Uwagi recenzenta**

**Kilka moich krytycznych uwag**, o charakterze dyskusji, wszak „Nemo sine vitiiis est”.

1. W całej pracy zaprezentowano wyniki na wykresach i w tabelach. Nigdzie jednak nie znalazłam informacji o np. maksymalnej albo procentowej niepewności pomiarowej wyznaczania parametrów elektrycznych ogniwi, czy wyznaczania np. wydajności kwantowej, choćby - precyzji nastawu długości fali przez zastosowany silnik krokowy, czy precyzji wyznaczenia samej wydajności kwantowej QE. Z wykresów, przy zastosowanej skali nie można oszacować dokładności pomiarów. Wyjątkiem jest podany w pracy dopuszczalny błąd procentowy wzrostu wydajności modułów z zastosowaniem błękitu egipskiego (2%) oraz dokładność wyznaczania masy ( $d=0,0001g$ ).
2. W rozdziale 4 zamieszczono rys. 4.4. Widmo odpowiedzi spektralnej ogniwa krzemowego powinno zawierać komentarz, że Autor miał na myśli krzem krystaliczny. Z drugiej strony pokazanie widma dla równie popularnego krzemu polikrystalicznego, a nawet amorficznego byłoby mile widziane, wszak oba te materiały półprzewodnikowe stosowane są do budowy modułów PV już ponad 40 lat; krzem polikrystaliczny nawet częściej niż krystaliczny, przede wszystkim ze względów ekonomicznych.
3. Zaprezentowana w rozdziale 4 tabela 4.1 porządkuje informacje o powierzchni LSC, rodzaju ogniwa i maksymalnej wydajności elementu. Powierzchnia zdecydowała tu o takim, a nie innym zestawieniu tych wartości. Czy Doktorant zechciałby uzupełnić te dane o kilka zamieszczonych w innych niż ujęte w rozprawie publikacjach, dotyczących większej powierzchni LSC? Jak powierzchnia komórki wpływa na wydajność modułu z LSC?
4. Metodyki nie uzupełniono o statystykę próbek, choć skrupulatnie zliczając je z tabel doliczyłam się 15 grup w każdej po 3 próbki, razem więc 45. Osobną grupą jest 9 próbek z różną domieszką błękitu egipskiego i 23 próbki pokrycia szklanego barwione błękitem. I najważniejsze „próbki” dla zrealizowanego celu doktoratu wdrożeniowego - dwa moduły. Każda z próbek omawianych w rozdziale 9 i 10 przechodziła starzenie w wymiarze od 200 godzin do 1000 lub 2000. Zakładając, że np. dla trzech serii starzenie światłem UV mogło trwać np. 41 dni, to dogłębne badanie procesu było sporym wyzwaniem. I tu pytanie: Czy

starzenie próbek odbywało się w trybie ciągłym, czy czas np. 1000 godzin to zsumowany czas naświetlania np. po kilka, kilkanaście godzin dziennie?

5.  $2\Delta Q_c$  na rys. 9.3 wynosi około  $2,5^\circ$ , natomiast przytoczony na rys. 9.2 kąt kontaktu wyznaczony na goniometrze podany jest z dokładnością do setnych części stopnia. Jaka jest precyzja wyznaczenia kąta kontaktu?

Na koniec przytoczę kilka **uwag edytorskich**:

1. W zamieszczonych w pracy wzorach znak mnożenia zastąpiono znakiem „\*”, co jest uproszczeniem nie stosowanym w tekstach naukowych, natomiast w tekście znak „x” już stał się powszechny.
2. W szóstym wierszu od góry na stronie 54 powinien być przytoczony rys. 9.2 zamiast 9.1.
3. Str. 59, w piątym wierszu od dołu: „The tension source responsible for the final detachment was probably **inaccurate** thermal expansion coefficient for both materials. For glass it is  $8.5 \times 10^{-6}/K$  while for PMMA it varies from 2 to  $10 \times 10^{-5}/K$  (Wang, 1983)”. Poprawnym byłoby użycie *...probably mismatch between coefficients of thermal expansion for both materials...* lub *...great scale of mismatch...* Niedopasowanie i niedokładność nie są tu synonimami i nie mogą być zamiennie stosowane.
4. Komentarz pod rysunkiem 11.12 dotyczy rysunku 11.12j a nie 11.6j (w pracy istnieje jedynie rysunek 11.6).
5. Na stronie 116, na końcu 8 wiersza od góry powinien być dwukropek.
6. W rozdziale 13 błędnie podano numerację rysunku. Jest Rys.14.1, powinno być 13.1.
7. W spisie publikacji niekompletne informacje podano w zapisach pozycji: IEA 2015, IEA 2017, Sher 2005, Temp 2009, Worl ^^^^ . Edycję poszczególnych pozycji kończy losowo kropka, przecinek bądź brak znaku interpunkcyjnego.

**Podsumowując**, uważam, że warto podkreślić wszystkie osiągnięcia naukowe Kandydata: jest współautorem 9 prac opublikowanych w renomowanych czasopismach z listy filadelfijskiej, w dwóch z nich jest pierwszym autorem (5 prac z tematyki doktoratu). Doktorant był wykonawcą w 7 renomowanych grantach zarówno NCBiR, jak i RPO województwa śląskiego, jest współautorem jednego zgłoszenia patentowego. Mgr inż. Piotr Sobik z pewnością brał aktywny udział w konferencjach i seminariach w latach 2017-2021, jednak te informacje w rozprawie nie zostały podane. Mogę potwierdzić udział Pana Piotra Sobika w dwóch krajowych konferencjach i podkreślić umiejętność zwanego, merytorycznego i bardzo ciekawego sposobu prezentacji oryginalnych wyników zespołu, w którym realizuje swoje badania.

Uważam, że Doktorant jest zaangażowanym i pracowitym eksperymentatorem, który pod opieką swego promotora, drugiego promotora i opiekuna wdrożeniowego zdobył znaczne doświadczenie badawcze w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedłożona przez Doktoranta dysertacja jest tematycznie spójna, a wyróżniony w niej problem badawczy został samodzielnie rozwiązany przez Doktoranta i stanowi oryginalne i nowatorskie rozwiązanie problemu naukowego (zaprojektowanie i charakterystyka modułu fotowoltaicznego z luminescencyjnymi koncentratorami energii). Wymienione wyżej uwagi krytyczne dotyczące zagadnień przedstawianych w pracy i jej edycji nie umniejszają w żadnej mierze osiągnięć i mojej wysokiej oceny rozprawy doktorskiej Pana Piotra Sobika.

Praca spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w art. 13 ustawy z dn. 14.03.2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017, poz. 1789) oraz w rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 19.01.2018r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018, poz. 261.).

Na podstawie powyższej oceny, wnioskuję o dopuszczenie Pana Piotra Sobika do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a Szanownej Komisji Doktorskiej i Radzie Naukowej IMIM rekomenduję wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Sobika.

M. Pawlas - Briały