

Louisville, 18 listopada, 2024 r.

Dr. Jacek B. Jasinski
Conn Center for Renewable Energy Research
University of Louisville
Louisville, KY 40292, USA
Tel: +1-502.852.6338 | E-mail: jacek.jasinski@louisville.edu

Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr. Wojciecha Mecha, pt. „Procesy fizyczne warunkujące trwałość i sprawność energetyczną polimerowych ogniw słonecznych”

Praca doktorska Pana mgr Wojciecha Mecha, zatytułowana „Procesy fizyczne warunkujące trwałość i sprawność energetyczną polimerowych ogniw słonecznych”, wykonana w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, pod kierunkiem prof. dr. hab. Krzysztofa P. Korony, koncentrowała się na systematycznych badaniach procesów fizycznych zachodzących w polimerowych ogniwach fotowoltaicznych, mając na celu poprawę ich stabilności i wydajności. Autor zbadał zarówno różne typy ogniw, optymalizując ich konstrukcję i analizując parametry elektryczne i optyczne, jak również mechanizmy degradacji takich ogniw. **Badania te przyniosły istotne osiągnięcia, takie jak udokumentowanie wpływu wygrzewania warstwy aktywnej na wydajność i stabilność ogniwa, opracowanie nowych pochodnych fullerenowych jako akceptorów oraz wykazanie istotnego zwiększenia wydajności ogniwa i uzyskanie wysokiej, jak na warunki laboratoryjne, wartości 9,2% dzięki zastosowaniu trójskładnikowej warstwy aktywnej zawierającej dwie fazy akceptorowe i jedną donorową.** W szerszym kontekście, praca ta wpisuje się w, rozwijającą się dziedzinę badań nad polimerowymi ogniwami fotowoltaicznymi, które w porównaniu do tradycyjnych ogniw krzemowych, oferują potencjalnie niższe koszty produkcji oraz możliwość wytwarzania ich na podłożach elastycznych. Jednak wyzwania związane ze stabilnością i wydajnością polimerowych ogniw organicznych wciąż ograniczają ich komercyjne wykorzystanie. Zrozumienie procesów fizycznych, takich jak degradacja pod wpływem czynników zewnętrznych, jak również interakcji między składnikami ogniwa podczas jego wytwarzania, a potem eksploatacji, ma kluczowe znaczenie. Tematyka polimerowych ogniw słonecznych ma także szersze znaczenie w kontekście globalnych wyzwań związanych z odnawialnymi źródłami energii, redukcją emisji gazów cieplarnianych i walką ze zmianami klimatu. W szczególności w dobie rosnącego zapotrzebowania na zrównoważone technologie energetyczne, ogniwa te mogą stanowić istotny element przyszłych systemów energetycznych, a badania nad ich wydajnością i trwałością przyczyniają się dla zwiększenia konkurencyjności i rozwoju tej technologii.

Od strony formalnej, omawiana rozprawa, składa się kolejno ze strony tytułowej, podziękowań, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, oraz wstępu, gdzie zwięźle umotywowane zostało podjęcie omawianych badań. Dalej w rozdziałach 2-4, zatytułowanych kolejno *Wprowadzenie teoretyczne*, *Techniki badawcze* i *Wyniki doświadczalne* znajduje się główna część rozprawy, omówiona szerzej poniżej. Podsumowanie najważniejszych wniosków badań zamieszczone jest w rozdziale 5, a dalej - w rozdziałach 6 i 7 - znajdują się kolejno - wykaz publikacji autora oraz bibliografia, zawierająca 428 odnośników literaturowych.

Rozdział 2 pt. Wprowadzenie teoretyczne koncentruje się na fundamentalnych aspektach, dotyczących ogniw fotowoltaicznych, ze szczególnym uwzględnieniem ogniw organicznych, które zyskują na znaczeniu w kontekście zrównoważonej energii. W pierwszej części omówiona jest zasada działania ogniw fotowoltaicznych, polegająca na absorpcji promieniowania słonecznego i zamianie energii świetlnej na energię elektryczną. Kluczowym elementem jest dobór odpowiednich materiałów aktywnych, które powinny mieć optymalnie dopasowane poziomy energetyczne, aby efektywnie absorbować światło w szerokim zakresie spektralnym. Podkreślone jest znaczenie badań nad wydajnością ogniw, które w przypadku ogniw organicznych koncentrują się m.in. na poszukiwaniu nowych półprzewodników organicznych oraz optymalizacji kombinacji materiałów donorowych i akceptorowych. W kontekście teoretycznych limitów wydajności, omówiony jest limit Shockley'a-Queisser'a, który określa maksymalną sprawność ogniw jednozłączowych, uwzględniając straty energii. Stabilność ogniw polimerowych jest kolejnym omawianym istotnym zagadnieniem. Autor zauważa, że ogniwa enkapsulowane wykazują znacznie lepszą odporność na degradację w porównaniu do ogniw przechowywanych na powietrzu. W rozdziale tym autor opisuje również różnorodne metody badawcze, takie jak technika śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPP tracking) oraz badania w komorach klimatycznych, które symulują warunki atmosferyczne, w jakich ogniwa będą pracować. Wreszcie, szczegółowo omawia też materiały stosowane w warstwie aktywnej, jak również ich właściwości oraz wpływ na wydajność i stabilność ogniw. Rozdział stanowi dosyć obszerne i kompleksowe wprowadzenie do aktualnych trendów i wyzwań w dziedzinie fotowoltaiki organicznej.

W **rozdziale 3 pt. Techniki badawcze** autor przedstawia natomiast zastosowane w doktoracie metody przygotowania warstw i ogniw, a także techniki pomiarowe i analityczne wykorzystane zarówno do charakteryzacji, jak i oceny jakości i trwałości tych układów. W szczególności opisuje tu proces przygotowania ogniw, obejmujący szereg kroków, w tym osadzanie warstw aktywnych, suszenie w próżni czy napylenie elektrod. W kontekście pomiarów fotoelektrycznych, opisuje metodę pomiaru i analizy charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V), pozwalającą na ocenę wydajności ogniw oraz ich stabilności w czasie. Natomiast w celu określenia, jaka część widma słonecznego była pochłaniana przez warstwę aktywną, co wpływa na generowany prąd i ogólną wydajność ogniw, autor mierzył także widma absorpcji w szerokim zakresie spektralnym od podczerwieni do ultrafioletu. W rozdziale tym autor zwrócił również uwagę na pomiary wydajności kwantowej, które dostarczają informacji na temat efektywności przetwarzania energii fotonów na prąd elektryczny. Omówił także wykorzystane w doktoracie techniki mikroskopowe (tzn. mikroskopię optyczną z kontrastem Nomarskiego, AFM i TEM), umożliwiające szczegółową analizę morfologii i struktury warstw aktywnych. Dodatkowo opisał również spektroskopię fotoelektronów wzbudzonych

promieniowaniem rentgenowskim (XPS) oraz dyspersyjną spektroskopię energii (EDS), tzn. techniki spektroskopowe, które okazały się kluczowe w analizie składu chemicznego i strukturalnego, pozwalając na identyfikację różnych faz donorowych i akceptorowych oraz ocenę ich rozkładu w warstwach aktywnych ogniw.

Rozdział 4 pt. Wyniki doświadczeń rozpoczyna się (w **podrozdziale 4.1**) od analizy wpływu wygrzewania warstwy aktywnej na stabilność, wydajność oraz parametry elektryczne ogniw organicznych. Badania przeprowadzono na dwóch typach warstw aktywnych: PTB7-Th:PC70BM oraz PBDB-T-2F:BTP-4Cl-12, które były poddawane różnym temperaturom wygrzewania. Badania wykazały, że wygrzewanie w temperaturach od 90 do 130°C znacząco poprawia stabilność próbek, a optymalną temperaturą okazało się 110°C, co potwierdzają analizy charakterystyk I-V. Jak wykazano wygrzewanie takie przyczynia się do lepszego usunięcia resztek rozpuszczalnika, co ma pozytywny wpływ na transport nośników i zmniejszenie oporu szeregowego, a także na długoterminową stabilność i wydajność ogniw. Przeprowadzona analiza wykazała także, że wygrzewanie poprawia również powtarzalność wyników pomiarów, co jest istotne dla praktycznych zastosowań ogniw słonecznych.

Następnie w **podrozdziale 4.2** omówione są badania nad indenowymi pochodnymi fullerenów C₆₀ i C₇₀, koncentrujące się na wpływie tych pochodnych na właściwości optyczne oraz wydajność ogniw, w których pełnią rolę materiału akceptorowego. Badania wykazały, że długość bocznego łańcucha alifatycznego w tych pochodnych ma kluczowe znaczenie dla rozpuszczalności oraz efektywności separacji faz donor-akceptor w warstwie aktywnej, co przekłada się na stabilność i wydajność ogniwa. W eksperymentach porównano nowe pochodne z dobrze znanymi materiałami referencyjnymi: PC60BM i PC70BM. Wyniki pokazały, że ogniwa z pochodnymi C₇₀ charakteryzowały się mniejszą stabilnością i szybszymi czasami degradacji w porównaniu do ogniw z pochodnymi C₆₀. Ponadto badania pokazały również, że w obu przypadkach najwyższe wydajności i stabilności osiągnięto dla ogniw z pochodnymi z heksylowym łańcuchem bocznym czyli odpowiednio dla ogniw z C₆₀-IPH i C₇₀-IPH. Dodatkowo, analiza widm absorpcyjnych pokazała, że pochodne C₇₀ absorbują więcej światła w zakresie widzialnym, co przekłada się na wyższy fotoprąd i wydajność ogniwa. Różnice w separacji faz donor-akceptor w warstwach z różnymi pochodnymi fulerenowymi określone zostały m.in. na podstawie przeprowadzonych analiz mikroskopowych struktury warstwy.

Podrozdział 4.3 poświęcony jest trójskładnikowym warstwom aktywnym i koncentruje się na zastosowaniu dwóch akceptorów: BTP-4Cl-12 oraz PC70BM. Zbadane zostały różne proporcje tych akceptorów, co ujawniło, że dodanie PC70BM do układu z BTP-4Cl-12 zwiększa efektywny zakres absorpcji i prowadzi do poprawy wydajności ogniw, szczególnie dla optymalnego składu odpowiadającego stosunkowi 1:(1:0,75). W badaniach zaobserwowano, że degradacja ogniw jest najsilniejsza w pierwszych dniach, co może być związane z reakcją tlenu z BTP-4Cl-12, jednak po pewnym czasie degradacja spowalnia. W przypadku wyższych zawartości PC70BM, wydajność ogniw maleje z powodu niedopasowania separacji faz donor:akceptor. Autor sugeruje, że optymalizacja warunków enkapsulacji oraz kontrola atmosfery podczas produkcji ogniw mogą przyczynić się do zwiększenia ich stabilności. Wnioski z badań wskazują na złożoność oddziaływań między składnikami warstwy aktywnej oraz ich wpływ na ogólną wydajność i trwałość ogniwa.

W **podrozdziale 4.4** omówione są badania wpływu dodatków do rozpuszczalnika, takich jak DIO, CN, NMP oraz CBA, na właściwości warstw aktywnych, szczególnie w kontekście separacji faz donorowych i akceptorowych. Analiza XPS pozwoliła na dokładne zmierzenie zawartości materiałów donorowych (PBDB-T-2F) i akceptorowych (BTP-4Cl-12 oraz PC70BM) na górnej i dolnej powierzchni warstwy aktywnej. Wyniki pokazały, że na górnej powierzchni występowała silna korelacja między zawartością BTP-4Cl-12, jak również silna antykorelacja między zawartością PBDB-T-2F, a wydajnością ogniw, co sugeruje, że większa ilość akceptorów na tej powierzchni prowadzi do lepszej efektywności urządzenia. W próbkach z dodatkiem DIO zaobserwowano, że wysoka zawartość PBDB-T-2F (aż 88%) na górnej powierzchni prowadziła do blokady elektronów, co negatywnie wpływało na wydajność ogniw. Natomiast w przypadku dodatków CN i CBA, ich obecność skutkowała zmniejszeniem zawartości PBDB-T-2F na górnej powierzchni, co było korzystne dla wydajności ogniw. Badania wykazały również, że zawartość materiałów na dolnej powierzchni warstwy aktywnej miała ograniczony wpływ na wydajność ogniw. Ponadto, ogniwa referencyjne, uzyskane bez dodatków do rozpuszczalnika, charakteryzowały się jednymi z najlepszych wydajności, co wskazuje na korzystny wpływ czystego rozpuszczalnika na gradient materiałów w warstwie aktywnej. Wnioski z badań sugerują, że optymalizacja składu warstwy aktywnej oraz dobór odpowiednich dodatków do rozpuszczalnika mogą znacząco wpłynąć na wydajność ogniw.

Podrozdział 4.5, to ostatnia z części omawiających wyniki doświadczalne. Autor koncentruje się tutaj na badaniach ogniw o odwróconej konfiguracji, w szczególności wpływu warstw selektywnie przewodzących (ETL i HTL) na wydajność i stabilność takich ogniw. Badania pokazały, że ogniwa odwrócone osiągają o około 15% niższą sprawność w porównaniu do ogniw prostych. Zastosowanie warstwy ZnO, zarówno w formie planarnej, jak i nanocząstek, przyniosło najlepsze wyniki, a optymalna grubość warstwy HTL MoO_3 wynosiła 8 nm. Badania wykazały również, że ogniwa odwrócone charakteryzują się szybszą degradacją, co potwierdzają wyniki pomiarów charakterystycznych czasów T_{80} i T_{50} , które były znacznie krótsze niż dla ogniw prostych. Dodatkowo, napięcie obwodu otwartego dla ogniw prostych było wyższe (0,81-0,82 V) w porównaniu do ogniw odwróconych (0,73 V), co sugeruje, że struktura warstw selektywnie przewodzących ma kluczowe znaczenie dla efektywności ogniw. Wnioski z badań podkreślają, że optymalizacja grubości warstw oraz ich składu jest kluczowa dla poprawy wydajności i stabilności ogniw odwróconych.

Podsumowując, ogólnie od strony merytorycznej praca przedstawia ważne badania, w wyniku których udało się uzyskać szereg istotnych rezultatów. Mam jednak kilka szczegółowych uwag i pytań, z których najważniejsze zamieszczam poniżej. Ponadto, muszę niestety stwierdzić, że dokument zawiera sporo błędów redakcyjnych, w tym błędy literowe i interpunkcyjne, kalki językowe i często trudne do zrozumienia zdania, jak również brak spójności w formatowaniu tekstu, a także w podpisach i oznaczeniu rysunków. Jest to o tyle niefortunne, że obniża to ogólną wartość rozprawy podczas, gdy większość z tych błędów można było wychwycić i usunąć.

Komentarze i pytania:

1. Na stronie 25 pojawia się stwierdzenie: „Ponieważ fullereny C_{60} są idealnie symetrycznymi sferami, przejścia singlet-tryplet są wzbronione”. **PYTANIE:** Wprawdzie podane są odnośniki

literaturowe, ale czy w czasie obrony można byłoby omówić tę kwestię i uzasadnić to stwierdzenie?

2. Na stronie 35 pojawia się stwierdzenie: „W literaturze najczęściej zakłada się V_{offset} równe 0,3 V [42], [165]–[167], natomiast w moich badaniach wyznaczyłem, że najlepiej pasuje wartość 0,55 V zarówno dla ogniów prostych (rozdział 2.4), jak i odwróconych (rozdział 2.5)”. **PYTANIE:** Jaka jest przyczyna tak dużej, niemal dwukrotnej różnicy?
3. Na stronie 44 pojawia się następujący komentarz do rysunku: „Na rysunku 2.7.1 przedstawiono przykładowy wykres unormowanej wydajności ogniwa w czasie z dopasowaną funkcją zaniku wykładniczego”. **UWAGA:** W najlepszym razie to stwierdzenie jest nieprecyzyjne, bo dopasowana funkcja, to suma dwóch zaników wykładniczych.
4. Na stronie 45 pojawia się stwierdzenie: „Dwa czasy degradacji opisują dwa dwa mechanizmy degradacji w ogniwie, szybki τ_1 , który następuje najczęściej w pierwszych kilku dniach oraz długi τ_2 , trwający nawet tysiące dni”. **PYTANIE:** Jaki jest fizyczny mechanizm każdego z tych dwóch procesów? Wygląda, że to dosyć powszechnie występujące zachowanie czasowe więc prawdopodobnie dobrze już przebadane.
5. Na stronach 58-59 znajduje się następujące stwierdzenie: „Kolejną metodą zmiany grubości wytworzonej warstwy jest zmiana stężenia rozwirowanego roztworu. Zakłada się, że zmiana stężenia powoduje wprost proporcjonalną zmianę grubości warstwy [337], [338], [342]–[344]. Jednak istnieje kilka zakresów zależności zmiany grubości w funkcji stężenia, dla różnych rzędów wielkości stężenia (np. inna proporcjonalność dla roztworów bardzo rozrzedzonych, a inna dla bardzo stężonych)”. **PYTANIE:** Co jest przyczyną tych różnych zależności i czy znane są mechanizmy?
6. Na stronie 77 pojawia się następujące stwierdzenie: „Dla pików, którego nie da się jednoznacznie zidentyfikować podczas pomiarów przy pomiarach pobudzania jedną anodą, po zastosowaniu drugiej anody linie się przesuwają i rozdzielają, co z całkowitą pewnością pozwala na identyfikację linii atomowej”. **UWAGA:** To zdanie jest trudne do zrozumienia (przynajmniej dla osób, które nie znają szczegółów układu XPS), a przede wszystkim błędne, bo linie nie rozdzielają się, a przesuwają się jedynie linie związane z processami rozpraszania Auger’a.
7. **UWAGA:** W wielu tabelach, jak np. w tabeli 4.1.1 na stronie 85 wiele wyznaczonych wartości podanych jest ze zbyt dużą ilością cyfr po przecinku. Z wielkości wyznaczonych błędów pomiarowych dodanych w niektórych rubrykach widać, że liczba cyfr znaczących jest mniejsza.
8. Na stronie 95 pojawia się stwierdzenie: „Pierwszy to niewielkie obniżanie się absorpcji wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania”. **PYTANIE:** Jaki jest mechanizm odpowiedzialny za ten trend?
9. Na stronie 96 pojawia się stwierdzenie: „Wydaje się, że przesunięcie w tym przypadku może być spowodowane zwiększaniem się rozmiarów agregatów BTP-4Cl-12 wraz z wygrzewaniem, co zmienia separacje faz donor:akceptor. Zgodnie z teorią w roztworach widma absorpcji przesuwają się w wyższe energie, gdzie wielkość agregatów zmniejsza się (molekuły są coraz dalej od siebie)”. **PYTANIE:** Czy w czasie obrony można to w skrócie przybliżyć?

10. Na stronie 96 pojawia się stwierdzenie: „Widoczne jest, że ogniwa PBDB-T-2F:BTP-4Cl-12 degradują się znacznie szybciej, niż próbki z warstwą aktywną PBDBT-2F:BTP-4Cl-12. I”. **UWAGA:** Wydaj się, że pomyłkowo użyta została ta sama nazwa warstwy dla obu typów ogniw.
11. Na stronie 106 pojawia się stwierdzenie: „Absorpcja ta odpowiada przejściom singlet-single $S_0 \rightarrow S_2$ i $S_0 \rightarrow S_3$ [393].”. **PYTANIE:** Czy w czasie obrony można to w skrócie przybliżyć?
12. Na stronie 116 pojawia się stwierdzenie: „Wydaje się, że próbki C_{70} starzeją się tym szybciej, im niższą miały wydajność wejściową oraz próbki z fullerenami C_{60} były bardziej stabilne, choć nie ma na to logicznego wytłumaczenia.”. **PYTANIE:** Czy jest możliwe, że fulereny C_{70} mają więcej defektów niż C_{60} , a przez to mają więcej niewysyconych wiązań i są bardziej podatne na procesy degradacyjne?
13. Na stronie 134 pojawia się stwierdzenie: „Spadek V_{oc} ma związek ze zmianą położenia poziomów energetycznych HOMO/LUMO akceptora, najprawdopodobniej przez reakcje z tlenem pozostałym po kontakcie ogniw z powietrzem.”. **PYTANIE:** Czy w czasie obrony można to w skrócie omówić?
14. Na stronie 175 pojawi się stwierdzenie „Co jest zaskakujące największe spadki oporu upływu, a więc największą degradację pod tym względem, obserwowano dla próbek CN, CBA i referencyjnej, czyli próbki o najwyższej wydajności początkowej, jak i jednej z najbardziej stabilnych.”. **PYTANIE:** Co może być tego przyczyną?
15. **PYTANIE:** Odnośnie rysunku 4.5-3, to jak interpretowany jest gwałtowny spadek wydajności po około 8 tygodniach dla ogniwa z TiO_x i dalszy przebieg w czasie pokrywający się z przebiegami dla ogniw z warstwami ZnO ?

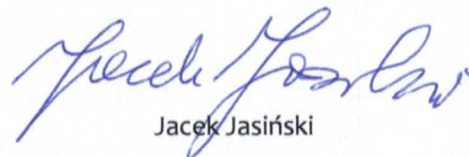
Podsumowując, mimo kilku wspomnianych wcześniej niedociągnięć, w mojej ocenie rozprawa doktorska Pana mgr. Wojciecha Mecha, wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Krzysztofa P. Korony, spełniania warunki wymagane w § 21 pkt 2–4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu z dnia 29 czerwca 2022 r., dotyczące określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz stopnia doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim. Rozprawa ta potwierdza ogólną wiedzę Pana Wojciecha w dziedzinie fizyki ciała stałego, jak również dobre zrozumienie zjawisk i procesów zachodzących w urządzeniach optoelektronicznych takich jak organiczne ogniwa słoneczne. Ponadto, zgodnie z wymaganymi kryteriami, przedmiotem omawianej rozprawy jest oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego – w tym wypadku systematyczne zbadanie procesów fizycznych w polimerowych ogniwach fotowoltaicznych, opartych na nowatorskich materiałach aktywnych i optymalizacja struktur takich ogniw w celu poprawy ich stabilności i wydajności. Pan mgr Wojciech Mech przeprowadził takie badania które, co już wcześniej podkreślałam, zaowocowały szeregiem ważnych osiągnięć, m.in.:

1. Optymalizacja temperatury wygrzewania warstwy aktywnej i wykazanie, że wygrzewanie w temperaturze 90-110°C pozwala na usunięcie resztek rozpuszczalnika co znacząco poprawia stabilność i wydajność ogniw.

2. Otrzymanie nowych materiałów akceptorowych w formie pochodnych indenowych fullerenów C_{60} i C_{70} , zbadanie tych pochodnych jako materiały akceptorowe i wykazanie efektywnej separacji faz donor-akceptor dzięki modyfikacjom długości łańcucha bocznego. Wykazanie również, że spośród szeregu zbadanych pochodnych, zastosowanie pochodnych z heksylowym łańcuchem bocznym, tzn. C_{60} -IPH i C_{70} -IPH, daje najlepsze wydajności i stabilności produkowanych ogniw.
3. Zastosowanie trójskładnikowej warstwy aktywnej PBDB-T-2F:(BTP-4Cl-12:PC70BM) i uzyskanie wysokiej jak na warunki laboratoryjne wydajności do 9,2% poprzez optymalizację stosunku akceptorów, co pozwoliło na zwiększenie zakresu absorpcji i poprawę fotoprądu. Stwierdzono przy tym, że zawartość BTP-4Cl-12 wiąże się z szybszą degradacją w obecności tlenu, podczas gdy PC70BM wykazuje większą stabilność.
4. Zbadanie wpływu dodatków do rozpuszczalnika na separację faz donor:akceptor i wydajność ogniwa i pokazanie, że ogniwa z dodatkiem CN osiągały wyższą wydajność, dzięki korzystniejszemu rozmieszczeniu donorów i akceptorów. Poza tym, ogniwa bez dodatków wykazały jedno z najlepszych wydajności, co sugeruje, że czysty rozpuszczalnik pozytywnie wpływa na gradient materiałów.
5. Otrzymanie i zbadanie ogniw o odwróconej konfiguracji pokazujące, że ogniwa takie mają niższą wydajność o 15% względem prostych, a także charakteryzują się szybszą degradacją i niższym napięciem obwodu otwartego.

Należy również dodać, że Pan Wojciech ma także znaczący dorobek naukowy, a mianowicie 13 publikacji, w tym 3 z pierwszym autorstwem, przy czym tylko część wyników prezentowanych w rozprawie została już opublikowana, a pozostałe są w przygotowaniu do publikacji.

Biorąc wszystko pod uwagę, ogólnie pozytywnie oceniam rozprawę doktorską Pana mgr. Wojciecha Mecha i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Jacek Jasiński

DODATKOWE UWAGI REDAKCYJNE:

- Przykłady licznych błędów literowych (wymienione są tu tylko błędy z **pierwszych 45 stron**):
 - STRESZCZENIE: „wyższe napięcia będącego”
 - STRESZCZENIE: „jak i ~~w~~-stabilność ogniów”
 - Strona 9: „Wraz oddalaniem”
 - Strona 14: „pomiędzy atomami dominująę pojedyncze wiązania kowalencyjne”
 - Strona 18: „z racji wysokie~~m~~u współczynnikow~~i~~ absorpcji”
 - Strona 18: „1 g materiału aktywny na 1 m²”
 - Strona 24: „podczas przechodzenia na poziom akceptoryy”
 - Strona 24: „oraz wysokiego przewodnictw~~u~~ elektronowego”
 - Strona 35: „do zmniejszania wydajnośc”
 - Strona 37: „na początku nie pływ~~n~~ie prąd”
 - Strona 37: „Najwyższ~~e~~ moc generowane jest w punkcie”
 - Strona 37: „odpowiadającym napięci V mpp”
 - Strona 39: „opornikiem R_s symulujący opór szeregowy oraz równoległe z opornikiem R_{sh} symulujący opór upływu.”
 - Strona 40: „zmniejszeniu ulega również gęstość prądu zwarc~~i~~ J_{sc}”
 - Strona 40: „warstwy selektywnie przewodzący~~ch~~”
 - Strona 41: „nośników materiału donorow~~e~~ i akceptorowego”
 - Strona 41: „Jedną z głównych przyczyn jest termalizac~~j~~i elektronów”
 - Strona 41: „tym absorbowane część widma”
 - Strona 41: „a efektywn~~ą~~ separowaniem ekscytonów”
 - Strona 41: „założenie oświetlania przez promieniowan~~i~~a ciała doskonale czarnego”
 - Strona 42: „Pokazuje to, że jest jeszcze teoretyczn~~e~~ zakres”
 - Strona 42: „podczas generowan~~i~~e fotoprądu”
 - Strona 42: „reaguje potem z półprzewodnikiem organiczn~~ych~~”
 - Strona 43: „prawdopodobnie przez ~~tworzenie~~-ograniczenie reakcji”
 - Strona 43: „nieorganiczne warstwy ogniwa przez~~z~~ kontaktem z”
 - Strona 45: „opisują dwa ~~dwa~~-mechanizmy”
 - Strona 45: „dla mniej stabil~~n~~y próbek”
 - Strona 45: „dodaje się stałą wartość PCE_∞ określają~~cy~~ ustabilizowanie”
 - Strona 45: „przy czym rodzaj~~e~~ użytego polimeru ma niewielki wpływ”

- Strona 8: zamiast „gdzie liczba określa efektywną **długość** atmosfery” powinno raczej być „gdzie liczba określa efektywną **grubość warstwy** atmosfery”.
- Strona 12: określenie „co znacząco utrudnia **aplikacje**” to kalka z języka angielskiego; lepszym określeniem byłoby „co znacząco utrudnia **zastosowania**”
- Strona 16: zamiast „orbital **antyściżowy**” powinno być „orbital **antywiążący**”
- Strona 18: zamiast „przerwę energetyczną **dopiera się**” powinno być „przerwę energetyczną **dobiera się**”
- Strona 18: „takimi metodami jak **spincoating, dip-coating** czy **blade-coating**”
- Strona 27: zamiast „(setki **eV**)” powinno być chyba: „(setki **meV**)”
- Strona 37: zamiast „są urządzeniami raczej mało **efektywnymi**” powinno być „są urządzeniami raczej mało **wydajnymi**”.
- Strona 40: Stwierdzenie „lub z anomaliami **w postaci S-shape'u**” jest trochę nie po polsku
- Strona 41: zamiast „dla niepoprawnie działających ogniw **jest S-shape**” powinno być „dla niepoprawnie działających ogniw **jest tzw. S-shape**”
- Strona 41: zamiast „Obecność S-shape'u jest złożona i często wymaga bardzo **szczególnych** badań to ustalenia” powinno być: „Obecność **tzw. S-shape'u** jest złożona i często wymaga bardzo **szczegółowych** badań to ustalenia”
- Trudno zrozumieć następujące zdanie an stronie 41: „Im niższa przerwa energetyczna tym absorbowane **część** widma słonecznego o wyższej intensywności”
- Strona 42: zamiast „Dla **trzy-złączowych** ogniw” powinno być „Dla **trójzłączowych** ogniw”
- Strona 43: zamiast „Jeśli obecna jest w konstrukcji ogniwa warstwa HTL PEDOT:PSS, **może być rozpuszczana**” powinno być „Jeśli obecna jest w konstrukcji ogniwa warstwa HTL PEDOT:PSS, **to może być ona rozpuszczana**”
- Strona 43: zamiast „**rozwiązaniem** tego problemu” powinno być „**rozwiązaniem** tego problemu”
- Strona 43: zamiast „między warstwą **aktywną**” powinno być „między warstwą **aktywną**”
- Strona 76: Następujące zdanie jest bardzo niejasne: „Do elektrod przykładane jest napięcie przez co trajektoria elektronów zostaje zakrzywiona i podążają po kształcie analizatora.”
- Strona 77: zamiast „zależy od materiału **katody** użytej w dziale rentgenowskim.” Powinno być „zależy od materiału **anody** użytej w dziale rentgenowskim.”
- Strony 90-91: część tekstu formatowana jest do lewej strony zamiast justowana.
- Strona 92: Następujące zdanie jest niegramatyczne: „Najprawdopodobniej mechanizm jest identyczny z próbkami PTB7-Th:PC 70 BM.”.

- Strona 105: zamiast „przedstawia **powierzchnie z wieloma zagnieceniami**” powinno chyba raczej być „przedstawia **mocno pofałdowane** (albo chropowate) **powierzchnie**”
- Strona 118: Zdania w pierwszej osobie jak to przykładowe tutaj brzmią trochę dziwnie: „Postanowiłem zatem zastosować to, co najlepsze w każdej konfiguracji i zaplanowałem warstwę aktywną z dwoma akceptorami: PBDB-T-2F:(BTP-4Cl- 12:PC 70 BM).”
- W niektórych miejscach, np. na stronie 142 pojawia się określenie „**współczynnik wypełnienia**” a w innych, jak np. na stronie 140 „**fill factor**”. Taki brak konsystencji w stosowanym nazewnictwie, jak również formatowaniu dokumentu przewija się przez cały dokorat, co zdecydowanie obniża jakość tego dokumentu.
- Strony 152-153: zamiast „**Lorentza**” powinno być „**Gausa**”.
- Strona 173: zamiast „co również **znacząco mniej**” powinno być „co również **jest** **znacząco mniej**”.