

# Analiza SWOT jako technika heurystyczna w celu określenia potencjału aplikacyjnego ogniw słonecznych trzeciej generacji

**Streszczenie.** Celem pracy było przeanalizowanie na podstawie analizy SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) ograniczeń obecnie opracowanych rozwiązań dla fotowoltaiki organicznej w kierunku komercjalizacji. Szczegółowym rozważaniom poddano ogniwa słoneczne trzeciej generacji w aspekcie istniejących nielicznych zastosowań praktycznych oraz wizję przyszłości. Stwierdzono, iż wciąż wyzwaniem pozostaje przeskalowanie technologii jak i stabilność w warunkach atmosferycznych dlatego tak istotne są badania morfologii powierzchni wytwarzanych warstw w celu minimalizacji kosztów i używanych substancji chemicznych (aspekty ekonomiczne i ekologiczne).

**Abstract.** The aim of the work was to analyze, based on a SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) analysis, the limitations of currently developed solutions for organic photovoltaics towards commercialization. Third generation solar cells were considered in detail in terms of the few existing practical applications and the vision of the future. It was found that scaling the technology and stability in atmospheric conditions are still a challenge, which is why it is so important to study the surface morphology of the produced layers in order to minimize the costs and chemicals used (economic and ecological aspects). (SWOT analysis as a heuristic technique to determine the application potential of third-generation solar cells)

**Słowa kluczowe:** ogniwa słoneczne trzeciej generacji, analiza SWOT, ekologia

**Keywords:** third-generation solar cells, SWOT analysis, ecology

## Wstęp

Organiczne ogniwa słoneczne zaliczane są do ogniw trzeciej generacji i obejmują ogniwa perowskitowe, barwnikowe, polimerowe, czy małowzrostkowe. Ponadto, ogniwa słoneczne trzeciej generacji mogą być domieszkowane w celu poprawy ich parametrów fotowoltaicznych poprzez zastosowanie np. kropek kwantowych czy nanoinkluzyj plazmionicznych (Ag, Au), a także alotropowych odmian węgla (grafen, nanorurki węglowe). Dodatkowo organiczne ogniwa słoneczne mogą być konstruowane jako ogniwa tandemowe czy potrójne, w tym także o architekturze odwróconej. Nie sposób nie wspomnieć o najnowszych trendach w fotowoltaice organicznej związanych z konstrukcją ogniw bezfulerenowych, bezolowiowych czy ogniw na bazie związków biologicznych i biodegradowalnych, a także na podłożach elastycznych, czy z elektrolitem żelowym bądź stałym [1].

Rodzajów organicznych ogniw słonecznych jest bardzo dużo, aczkolwiek wciąż ich potencjał aplikacyjny jest niewielki, poza kilkoma znanymi pilotażowymi instalacjami i snutą przez naukowców wizją przyszłości zastosowań fotowoltaiki organicznej. Dla przykładu, już dziesięć lat temu w 2014 firma Heliatek zainstalowała w Szanghaju pierwszy na świecie system fotowoltaiczny zintegrowany z budownictwem BIOPV (*Building Integrated Organic Photovoltaic*) oparty o organiczne ogniwa fotowoltaiczne. Ogniwami BIOPV pokryto powierzchnię 20 m<sup>2</sup>, a łączna moc instalacji fotowoltaicznej wynosi tylko 0,62 kWp (Wp to Wato-piki). Organiczne ogniwa słoneczne o różnej transparentności i kolorze oraz powierzchni aż 226 m<sup>2</sup> i mocy 12 kWp zastosowano także w instalacji w Singapurze.

W celu komercjalizacji fotowoltaiki organicznej powinny być spełnione ogólne trzy warunki, nazywane "złotym trójkątem" komercjalizacji, a są to:

- wysoka wydajność konwersji światła słonecznego na energię elektryczną,
- nieduży koszt produkcji,
- długa żywotność (niezawodność urządzeń) w warunkach naturalnych.

Powyższe trzy wytyczne mają charakter ogólny i zależne są oczywiście od planowanego zastosowania ogniw czy urządzeń wytworzonych na ich podstawie, np. ładowarek słonecznych.

Wiadomym jest, iż ogniwa słoneczne trzeciej generacji zostały zaprojektowane w celu osiągnięcia wysokiej wydajności konwersji energii będąc jednocześnie tanimi w produkcji. Udowodniono, iż perowskitowe ogniwa słoneczne mają zdolność przewyższenia limitu Shockleya-Queissera, gdzie granica teoretycznej sprawności Shockleya-Queissera wynosi około 33 % dla krzemowych ogniw słonecznych. Limit Gomez-Weerd (od nazwiska wynalazców z Holandii) wynosi 44 % dla perowskitowych ogniw słonecznych i jest spowodowany zwielokrotnieniem nośników ładunków przez światło o wystarczającej energii. Czyli, w perowskitowych ogniwach słonecznych fotony o energii większej od szerokości przerwy energetycznej są absorbowane przez elektrony walencyjne, w wyniku czego następuje ich wzbudzenie i przejście z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Energia tego samego fotonu może wzbudzić dodatkowy elektron walencyjny, co przekłada się na większą ilość energii elektrycznej z tej samej ilości światła słonecznego [2].

## Znamionowanie mocy

Charakterystyki prądowo-napięciowe i parametry ogniw fotowoltaicznych, czyli tak zwane znamionowanie mocy (*power rating*) wyznaczane są przy użyciu zintegrowanego systemu pomiarowego odzwierciedlającego standardowe warunki STC (*Standard Test Condition*), czyli warunki oświetlenia AM 1,5G (*air mass*) przy 1000 W/m<sup>2</sup> i 25 °C. Przy czym wyróżnia się:

- ✓ sprawność ogniwa (PCE) określaną jako stosunek maksymalnej mocy uzyskiwanej z ogniwa do mocy padającego światła.
- ✓ napięcie otwartego obwodu (tzw. napięcie jałowe,  $V_{oc}$ ) definiowane jako napięcie na końcówkach (zaciskach) otwartego ogniwa w określonej temperaturze i przy natężeniu promieniowania równym zero.
- ✓ prąd zwarcia ( $I_{sc}$ ) czyli natężenie prądu wyjściowego ogniwa fotowoltaicznego w warunkach zwarcia elektrod ( $V = 0$ ) w określonej temperaturze i przy określonym natężeniu promieniowania.
- ✓ współczynnik wypełnienia (FF) określający jakość kształtu charakterystyki I-V i zależny od morfologii wytworzonych warstw w ogniwie i parametrów  $R_s$  i  $R_{sh}$  [3].
- ✓ zewnętrzna wydajność kwantowa (*external quantum efficiency*, EQE) definiująca liczbę wygenerowanych

nośników prądu (elektronów-dziur) odpowiadających liczbie padających fotonów o określonej długości fali. EQE opisuje zakres spektralny w którym ogniwo pracuje efektywnie i nie uwzględnia odbicia światła od powierzchni ogniwa.

✓ wewnętrzna wydajność kwantowa (*internal quantum efficiency*, IQE) uwzględniająca w odróżnieniu od EQE odbicie światła od powierzchni ogniwa.

✓ odpowiedź widmowa (często mylona z EQE) definiowana jako stosunek wartości gęstości fotoprądu do mocy promieniowania padającego na jednostkę powierzchni ogniwa fotowoltaicznego odpowiadającego długości fali [4].

W tabeli 1 przedstawiono wydajność wybranych organicznych ogniw słonecznych.

Tabela 1. Wydajność wybranych organicznych ogniw słonecznych na podstawie The National Renewable Energy Laboratory (NREL) Best research-cell efficiency chart. "https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html (accessed on 19 March 2024).

Rodzaj ogniwa	PCE [%]
Barwnikowe, DSSC	15,2
Perowskitowe	26,1
Z kropkami kwantowymi	18,1
Organiczne	19,2
Tandemowe organiczne	14,2

### Analiza SWOT dla fotowoltaiki organicznej

Od rozpoczęcia badań nad fotowoltaiką organiczną minęło 38 lat (1986 – organiczne ogniwa słoneczne, 1991 – ogniwa barwnikowe, 2009 – ogniwa perowskitowe, a w 1954 – ogniwa krzemowe), a wciąż pomimo ogromnych postępów, głównie poprzez opracowywanie nowych materiałów i technologii wytwarzania warstw, sprawność PCE nie przekracza 20 %. Aczkolwiek, należy przypomnieć iż PCE dla polimerowych ogniw słonecznych w 1995 wynosiła 1 %.

I choć w 2009 dołączyły do grona ogniw trzeciej generacji ogniwa perowskitowe osiągając PCE = 3,8% to wciąż aspekty ich komercjalizacji są dość dalekie pomimo wzrostu wartości PCE do 26,1%. Dlatego nasuwa się pytanie w jakim kierunku należy obecnie podążać aby opracowywane organiczne ogniwa słoneczne mogły zostać w niedalekiej przyszłości skomercjalizowane. W celu odpowiedzi na postawiony problem badawczy przedstawiamy analizę SWOT bazując na badaniach własnych jak i doniesieniach literaturowych dla ogniw słonecznych trzeciej generacji [5-9].

### Mocne strony w aspekcie komercjalizacji:

*Elastyczne i lekkie:*

**Fakt 1:** Organiczne ogniwa fotowoltaiczne mogą być cienkie i elastyczne, co sprawia, że mogą znaleźć zastosowanie w fotowoltaice zintegrowanej z budownictwem i tkaninach zasilanych energią słoneczną [10].

**Fakt 2:** Elastyczność ogniwa wpłynąć może także na mniejsze uszkodzenia spowodowane wiatrem i uderzeniami w porównaniu do ogniw słonecznych na podłożach sztywnych [11].

*Tańsza produkcja:*

**Fakt 1:** Ogniwa mogą być produkowane przy użyciu druku R2R (*roll-to-roll to metoda nakładania powłok na rolce elastycznego materiału, a następnie nawijania na nową rolkę po zakończeniu procesu*) lub innej taniej technologii, co obniża koszty produkcji i umożliwia skalowalność i pozwala na personalizację tworzenia niepowtarzalnych kształtów i wzorów [12].

**Fakt 2:** Łatwiejsza i tańsza produkcja na wielką skalę niż ogniwo konstruowanych na bazie materiałów nieorganicznych.

**Fakt 3:** Różnorodność stosowanych związków chemicznych (polimery, dendrymery, oligomery, czy ciekłe kryształy) [13].

**Fakt 4:** Możliwość integracji różnych typów ogniw organicznych w celu konstrukcji ogniw tandemowych [14].

*Wydajność przy słabym oświetleniu:*

**Fakt 1:** Organiczne ogniwa fotowoltaiczne mają wyższą wydajność przy słabym oświetleniu w porównaniu z ogniwami słonecznymi na bazie krzemu. To sprawia, że nadają się do stosowania w regionach o mniejszym nasłonecznieniu lub w pomieszczeniach zamkniętych (zasilanie inteligentnych budynków i urządzeń internetu rzeczy IoT).

**Fakt 2:** Ogniwa barwnikowe wykazują małą wrażliwość na kąt padania promieniowania słonecznego (mogą działać efektywnie zarówno pod wpływem promieniowania odbitego jak i załamane, a także przy częściowym zacieleniu) [15].

**Fakt 3:** Ogniwa perowskitowe mają możliwość absorbowania światła o bardzo szerokim spektrum długości fali [16].

**Fakt 4:** W rzeczywistości krzemowe ogniwa słoneczne nie są w stanie sprostać wymaganiom zastosowań elektroniki produktów i uzyskują w warunkach oświetlenia wewnętrznego PCE = 2-6 %. Dla ogniw organicznych osiągnięto PCE = 33 % przy koncentracji światła wewnętrznego do 20 000 luksów. Ogniwa organiczne wykazują doskonałą stabilność w oświetlonych pomieszczeniach [17].

*Ekologiczne i łatwe w użyciu:*

**Fakt 1:** Wykazują niższą toksyczność niż ogniwa pierwszej i drugiej generacji [18].

**Fakt 2:** Podczas produkcji ogniw barwnikowych wytwarzana jest mniejsza ilość CO<sub>2</sub> niż w przypadku krzemowego ogniwa słonecznego [19].

**Fakt 3:** Krótki okres zwrotu energii zużytej na wyprodukowanie pojedynczego modułu DSSC równy 0,4 roku (*Energy Payback Time*). Zaś dla ogniw krzemowych czas ten oscyluje w granicach 1,4-1,6 roku [20].

**Fakt 4:** Możliwość produkcji wodoru za pomocą energii słonecznej przy użyciu ogniw DSSC/perowskitowych [21].

### Słabe strony w aspekcie komercjalizacji:

*Wydajność:*

**Fakt 1:** Charakteryzują się niższą wydajnością konwersji energii światła słonecznego na energię elektryczną (PCE = 10-20%) w porównaniu z krzemowymi ogniwami słonecznymi, co może nie być wystarczające dla niektórych zastosowań.

*Problemy z trwałością i stabilnością:*

**Fakt 1:** Są mniej trwałe i stabilne w porównaniu z nieorganicznymi ogniwami słonecznymi, a ich wydajność może ulec pogorszeniu z biegiem czasu ze względu na ekspozycję na światło UV, wilgoć i inne czynniki środowiskowe [22].

*Wielkość produkcji i komercjalizacja:*

**Fakt 1:** Produkowane są w znacznie mniejszych ilościach w porównaniu do krzemowych ogniw słonecznych, co czyni je obecnie mniej opłacalnymi komercyjnie w produkcji na wielką skalę.

**Fakt 2:** Ogranicza to również dostępność masową do organicznych ogniw słonecznych i może zwiększyć ich koszt.

*Zakres odporności na temperaturę:*

**Fakt 1:** Mają niższą odporność na temperaturę w porównaniu z ogniwami słonecznymi na bazie krzemu [23].

**Fakt 2:** Mogą ulec degradacji lub nieprawidłowo pracować w wysokich temperaturach, co ma wpływ na ich wydajność i długość życia.

*Ograniczona żywotność:*

**Fakt 1:** Mają krótszą żywotność w porównaniu do krzemowych ogniw słonecznych, dla których producent daje zwykle około 10-15 lat [24].

**Fakt 2:** Ograniczenia żywotności mogą sprawić, że będą mniej przydatne do niektórych zastosowań wymagających długoterminowego działania niezawodności i trwałości.

#### **Możliwości i szanse w aspekcie komercjalizacji:**

*Nowe rynki i branże dla fotowoltaiki organicznej:*

**Możliwość 1:** W rolnictwie można by wykorzystać organiczne ogniwa słoneczne do zasilania nawadniania i systemu monitorowania upraw oraz podczas transportu do zasilania pojazdów elektrycznych, łodzi i dronów. Agrofotowoltaika, umożliwiała zastosowanie organicznych ogniw/modułów przezroczystych i gwarantuje idealną, umiarkowaną ilość cienia oraz zapewnia maksymalną ochronę upraw pomimo mniejszej wydajności ogniw organicznych niż nieorganicznych [25, 26].

**Możliwość 2:** W architekturze można by organiczne ogniwa słoneczne zintegrować z fasadami budynków, oknami i dachami i zmniejszyć zużycie energii (*Building Integrated Organic Photovoltaic*). Pomimo pilotażowej instalacji firmy Heliatak w 2014 jak przedstawiono powyżej i kilku pilotażowych instalacji na bazie ogniw perowskitowych czy barwnikowych nadal nie są ogniwa trzeciej generacji powszechnie stosowane.

*Współpraca i inwestycje dużych firm:*

**Możliwość 1:** Wiele firm już inwestuje w rozwój i produkcję organicznych ogniw słonecznych, współpracując z naukowcami i tworząc własne laboratoria badawcze do ich konstrukcji, tym samym następuje transfer nauki do przemysłu.

*Rosnące zapotrzebowanie na odnawialne źródła energii:*

**Możliwość 1:** Coraz większy nacisk jest stawiany na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i przejście na energię odnawialną co stwarza znaczącą szansę dla rozwoju fotowoltaiki organicznej jako zrównoważonej i przyjaznej dla środowiska alternatywy w odniesieniu do krzemowych ogniw słonecznych.

*Korzystne polityki i zachęty rządowe:*

**Możliwość 1:** Oferty i propozycje rządów w formie dotacji, zachęt podatkowych czy finansowych do adaptacji technologii energii odnawialnej, w tym fotowoltaiki organicznej, mogłyby przyczynić się do rozwoju tematyki.

*Rosnąca świadomość konsumentów i zapotrzebowanie na zrównoważone i przyjazne dla środowiska produkty:*

**Możliwość 1:** Wzrost świadomości ekologicznej u konsumentów z szerokiego przedziału wiekowego oraz odpowiedzialność za planetę i przyszłe pokolenia stwarza szansę na implementację w praktyce także fotowoltaiki organicznej.

*Rozwój nowych materiałów i technik pomiarowych:*

**Możliwość 1:** Postęp w opracowywaniu nowych, ekologicznych materiałów do wytwarzania organicznych ogniw słonecznych może prowadzić do poprawy ich wydajności i stabilności.

**Możliwość 2:** Działanie w myśl zasad zielonej chemii, inżynierii i technologii w celu eliminacji nietrafionych rozwiązań już na etapie wytwarzania warstw (np. identyfikacja morfologii warstw poprzez zastosowanie kamery termowizyjnej) w celu ograniczenia kosztów i ochrony środowiska (rozpuszczalniki, katalizatory) [27].

#### **Zagrożenia w aspekcie komercjalizacji:**

**Zagrożenie 1:** Istniejące obecnie na rynku krzemowe ogniwa słoneczne jak i inne odnawialne technologie energetyczne, takie jak energia wiatrowa i wodna, mają już ugruntowaną pozycję i oferują wyższą wydajność i niezawodność w porównaniu do ogniw organicznych. Istniejący stan rzeczy stwarza zagrożenie dla przyjęcia i komercyjnej rentowności organicznych ogniw słonecznych.

**Zagrożenie 2:** Ponadto istotnym elementem są ograniczenia technologiczne i wyzwania badawcze przed którymi wciąż znajdują się ogniwa organiczne, czyli osiągnięcie złotego trójkąta komercjalizacji w aspekcie wydajności, trwałości i stabilności. Niestety proces komercjalizacji spowalnia fakt, iż większość prac badawczych skupia się tylko na aspektach materiałowych w kierunku syntezy i próby zastosowań nowych związków czy też kompozycji w skali laboratoryjnej poprzez wytwarzanie warstw głównie metodą nanoszenia wirowego, co znacznie ogranicza komercjalizację ogniw organicznych.

**Zagrożenie 3:** Należy zauważyć, że technologia powlekania wirowego jest rozwiązaniem nieprzyjaznym środowisku, gdyż podczas wytwarzania warstw zużywa się dużą ilość rozpuszczalników, które powodowałyby dodatkowe wydatki przy przetwarzaniu na dużą skalę, w celu spełnienia przepisów przemysłowych i składowania odpadów. Poza ścisłymi ograniczeniami określonymi przez produkcję komercyjną istotnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę, jest także stabilność operacyjna. Ponadto problem rozpuszczalności związany ze stosowaniem ekologicznie przyjaznych rozpuszczalników do produkcji ogniw organicznych często związany jest z obniżeniem sprawności ogniw poprzez separację faz materiałów donora i akceptora w warstwie aktywnej [28, 29].

**Zagrożenie 4:** Stosunkowo niewiele jest prac nad przeskalowaniem technologii czy eliminacją dodatkowych kosztów i ochroną środowiska już na etapie wytwarzania warstw w ogniwie. To są czynniki które spowalniają przyjęcie i komercjalizację ogniw organicznych [30, 31].

**Zagrożenie 5:** Ponadto, aby osiągnąć sukces należy skupić się na opracowaniu ogniw organicznych na podłożach elastycznych o dużej powierzchni. W tym celu należy opracować materiały elastyczne z elektrodami przezroczystymi (obecnie stosowany jest najczęściej poli(tereftalan etylenu) (PET) z tlenkiem indowo-cynowym (ITO)) o gładkiej powierzchni, niskiej rezystancji i doskonałych właściwościach mechanicznych w celu zastosowań np. w BIPV (*Building Integrated Photovoltaic*) czy VIPV (*Vehicle Integrated Photovoltaic*). Wyzwaniem jest tutaj także morfologia powierzchni elektrody elastycznej, chropowatość, defekty strukturalne oraz zbyt niska kompatybilność z przetwarzaniem typu R2R, co ogranicza ich zastosowanie w elastycznej elektronice. Metody wytwarzania elektrod elastycznych w procesie na mokro mogą z kolei prowadzić do niejednorodnego rozkładu lub agregacji materiału przewodzącego (np. nanodruły w zawiesinie), co powoduje otrzymanie elektrod o wysokim prągu perkolacji i dużej chropowatości powierzchni oraz niezadowalających parametrach przewodności i przezroczystości. Niestety wciąż wydajność ogniw organicznych na podłożach elastycznych jest niezadowalająca w kierunku komercjalizacji, chociaż przebadano całą gamę materiałów przewodzących, w tym nanorurki węglowe, grafen, polimery przewodzące i nanodruły metaliczne. Należy także wspomnieć o wyzwaniach związanych z wpływem grubości wytwarzanych warstw a wydajnością ogniw organicznych i rekombinacją nośników ładunków [32-34].

**Zagrożenie 6:** Ponadto w przypadku ogniw barwnikowych należy wspomnieć o problemach z elektrolitem ciekłym (wciąż najczęściej stosowanym w ogniwach DSSC). Prowadzone są badania nad zastąpieniem go elektrolitem żelowym lub stałym. Dodatkowo, w ogniwach DSSC problemem jest wysoki koszt platyny i rutenu (dlatego poszukiwane są nowe materiały) [35, 36].

**Zagrożenie 7:** Z kolei w ogniwach perowskitowych problematycznym dla zastosowań komercyjnych jest obecność ołowiu w perowskitach z jodkiem metyloamoniowo-ołowiowym ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ), który zanieczyszcza środowisko i jest niebezpieczny dla zdrowia ludzi i zwierząt (trwają prace nad zastąpieniem ołowiu w perowskitach np. rubidem) [37-39].

**Zagrożenie 8:** Kolejnym problemem do rozwiązania w ogniwach perowskitowych w celu ich komercjalizacji jest brak stabilności w atmosferze powietrza (rozkładają się pod wpływem wilgoci), dlatego najnowsze proponowane rozwiązania architektoniczne oferują ogniwa hybrydowe perowskitowo-krzemowe [40-41].

**Zagrożenie 9:** Także w ogniwach DSSC jest problem z ich stabilnością długoterminową (trwają prace nad zastąpieniem jodu w ogniwie np. kobaltem). Hermetyzacja/enkapsulacja i ochrona ogniw jest kluczowym wyzwaniem, któremu należy sprostać, aby poprawić ich trwałość w celu komercjalizacji [42].

**Zagrożenie 10:** Dużą wartość ma także opracowanie odpowiedniej metodologii w celu optymalizacji procesu przygotowania/syntezy materiałów oraz eliminacja procesów syntezy wieloetapowych i zawierających toksyczne rozpuszczalniki i katalizatory nieorganiczne.

**Zagrożenie 11:** W przypadku materiałów pochłaniających światło konieczne jest zaprojektowanie i syntetyzowanie materiałów o wysokich parametrach stabilności optycznej i termodynamicznej, a jednocześnie dużej tolerancji na warunki kwasowe, czy zasadowe. Dlatego też obecnie zamiast polimerów proponowane są związki małowcząsteczkowe o odpowiednio zaprojektowanej strukturze chemicznej oraz materiały bezfulerenowe [43].

**Zagrożenie 12:** Uwzględnienie dysocjacji ekscytonów, transportu nośników ładunków, procesu wytwarzania warstw z materiałów pochłaniających światło nadal wymaga dalszych badań, co odzwierciedla wciąż niski poziom współczynnika wypełnienia (FF) dla ogniw organicznych związany z morfologią wytwarzanych warstw.

**Zagrożenie 13:** Kolejnym ryzykiem jest ryzyko regulacyjne i polityczne, gdyż mamy wciąż do czynienia ze zmianami, co może powodować niepewność oraz ryzyko związane z komercjalizacją ogniw organicznych.

**Zagrożenie 14:** Ponadto należy wspomnieć o istniejącym ryzyku związanym z łańcuchem dostaw: od wytwarzania materiałów o odpowiednim stopniu czystości i wydajności do dystrybucji także w aspekcie ich dostępności i ceny, oraz o ryzyku ekonomicznym, które jest zależne od: kosztów produkcji, popytu rynkowego i konkurencji ogniw organicznych w odniesieniu do ogniw nieorganicznych dostępnych na rynku.

### Podsumowanie i wizja przyszłości

Na koniec przedstawiamy nasze rekomendacje dla rozwoju badań w zakresie komercjalizacji fotowoltaiki organicznej. Teoretycznie ogniwa organiczne są tańsze od krzemowych ogniw słonecznych i mogą osiągnąć sprawność przekraczającą granicę Shockleya-Queissera. Jednak kluczowym jest poprawa stabilności ogniw organicznych na drodze do ich komercjalizacji. Wizje przyszłości, które pojawiły się w dyskusjach na temat komercjalizacji ogniw słonecznych trzeciej generacji wydają się atrakcyjne i wielokrotnie wprowadzają w błąd czytelnika,

gdyż nie są to istniejące komercyjne zastosowania. Biorąc pod uwagę przeprowadzoną analizę SWOT należy stwierdzić, iż w celu praktycznych zastosowań organicznych ogniw słonecznych wyzwaniem wciąż pozostaje stabilność ogniw w warunkach atmosferycznych oraz przeskalowanie technologii dla powierzchni wielkoformatowych i elastycznych. Gdy zostaną osiągnięte te dwa wyzwania to możemy stosować ogniwa organiczne np. jako:

- warstwy np. na ścianach namiotów ratunkowych w miejscach zniszczonych przez żywioły i w ten sposób pomoc ofiarom odbywałaby się w dużo lepszych warunkach i nie byłaby ograniczona brakiem dostępu do sieci elektrycznej.

- części zintegrowanych pojazdów fotowoltaicznych (VIPV) – szyby, dachy, jako metody wspomagające zwiększanie zasięgu wyspecjalizowanych pojazdów elektrycznych z akumulatorem (BEV: *Battery Electric Vehicle*), o różnej wielkości, od rowerów elektrycznych i samochodów po prywatne samoloty.

- drony zasilane energią słoneczną, co jest uważane za nie wykonalne w przypadku krzemowych ogniw słonecznych, mogące służyć do monitorowania klimatu lub długoterminowej obserwacji odległych lokalizacji do celów ekologicznych lub narodowych.

- urządzenia do noszenia na ciele (Internet rzeczy), słuchawki, smartwatche, inteligentne okulary, czy podświetlanie ubrań, toreb, bezprzewodowe ładowanie telefonu poprzez włożenie go do kieszeni oraz mobilne, samoladujące się zasilacze.

Podsumowując, organiczne ogniwa wykazują już obecnie sprawność PCE na poziomie 14-26%, głównie dzięki bardzo szerokim badaniom nad materiałami organicznymi jako komponenty warstwy aktywnej czy warstwy transportującej ładunki dodatnie. Jednakże, w celu komercjalizacji ogniw słonecznych trzeciej generacji pożądanym jest ukierunkowanie dalszych badań na ogniwa słoneczne elastyczne o długotrwałej żywotności oraz przyjazne dla środowiska. W szczególności należy ściśle powiązać projektowanie struktury molekularnej związków organicznych z innowacjami w inżynierii urządzeń i kompatybilnością z technologiami druku.

*Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych” otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe”. (Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/NCBR/2018).*

### LITERATURA

- [1] Shah N., Shah A.A., Leung P.K., Khan S., Sun K., Zhu X., Liao Q. A review of third generation solar cells, *Processes* 11 (2023) 1852.
- [2] de Weerd C., Gomez L., Capretti A., Lebrun D., Matsubara E., Lin J., Ashida M., Spoor F., Siebbeles L., Houtepen A., Suenaga K., Fujiwara Y., Gregorkiewicz T. Efficient carrier multiplication in  $\text{CsPbI}_3$  perovskite nanocrystals, *Nature Communications* 9 (2018) 4199.
- [3] Żdanowicz T. Odbiór systemu fotowoltaicznego (PV) – procedury i dokumentacja – cz. 2, *Magazyn fotowoltaika*, 1 (2018) 16-24.
- [4] Żdanowicz T. Pomiarów ogniw i modułów fotowoltaicznych – normy i praktyka, Cz. II. Pomiarów w warunkach laboratoryjnych – błędy powodowane źródłem światła, *Magazyn fotowoltaika*, 1 (2020) 20-24.
- [5] Li M., He F. Organic solar cells developments: What's next? *Next Energy* 2 (2024) 100085

- [6] Solak E.K., Irmak E. Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance, *RSC Adv.*, 13 (2023) 12244 -12269.
- [7] Jiang Y., Bai Y., Wang S. Organic solar cells: From fundamental to application, *Energies*, 16 (2023) 2262.
- [8] Kirchartz T., Kaienburg P., Baran D. Figures of merit guiding research on organic solar cells, *J. Phys. Chem. C* 122 (2018) 5829 – 5843.
- [9] Wu J., Gao M., Chai Y., Liu P., Zhang B., Liu J., Ye L. Towards a bright future: The versatile applications of organic solar cells, *Materials Reports: Energy* 1 (2021) 100062.
- [10] Sun L., Fukuda K., Someya T. Recent progress in solution-processed flexible organic photovoltaics, *npj Flexible Electronics* 6 (2022) 89.
- [11] Lee H., Jeong S., Kim J.H., Jo Y.R., Eun H.J., Park B., Yoon S.C., Kim J.H., Lee S.H., Park S. Ultra-flexible semitransparent organic photovoltaics, *npj Flexible Electronics* 7 (2023) 27.
- [12] Weerasinghe H.C., Macadam N., et al. The first demonstration of entirely roll-to-roll fabricated perovskite solar cell modules under ambient room conditions, *Nature Communications* 15 (2024) 1656.
- [13] Yi J., Zhang G., Yu, H. et al. Advantages, challenges and molecular design of different material types used in organic solar cells, *Nat Rev Mater* 9 (2024) 46–62.
- [14] Ullah F., Chen C.C., Choy W.C.H. Recent developments in organic tandem solar cells toward high efficiency, *Adv. Energy Sustainability Res.* 2 (2021) 2000050.
- [15] Munoz-Garcia A.B., Benesperi I., et al. Dye-sensitized solar cells strike back, *Chem. Soc. Rev.*, 50 (2021) 12450-12550.
- [16] Liu S., Biju V.P., Qi Y., Chen W., Liu Z. Recent progress in the development of high-efficiency inverted perovskite solar cells, *npj Asia Materials* 15 (2023) 27.
- [17] Cui Y., Wang Y., Bergqvist J. et al. Wide-gap non-fullerene acceptor enabling high-performance organic photovoltaic cells for indoor applications, *Nat Energy* 4 (2019) 768–775.
- [18] Cellura M., Luu I.Q., Guarino F., Longo S. A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells, *Science of the Total Environment* 908 (2024) 168019.
- [19] Riede M., Spoltore D., Leo K. Organic solar cells—The Path to Commercial Success, *Adv. Energy Mater.* 11 (2021) 2002653.
- [20] Muteri V., Cellura M., Curto D., Franzitta V., Longo S., Mistretta M., Parisi M.L. Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels, *Energies* 13 (2020) 252.
- [21] Song H., Luo S., Huang H., Deng B., Ye J. Solar-driven hydrogen production: Recent advances, challenges, and future perspectives, *ACS Energy Lett.* 7 (2022) 1043-1065.
- [22] Ding P., Yang D., Yanga S., Ge Z. Stability of organic solar cells: toward commercial applications, *Chem. Soc. Rev.*, 53 (2024) 2350-2387.
- [23] Duan L., Uddin A., Progress in stability of organic solar cells, *Adv. Sci.* 7 (2020) 1903259.
- [24] Li Q., Monticelli C., Zanelli A. Life cycle assessment of organic solar cells and perovskite solar cells with graphene transparent electrodes, *Renewable Energy*, 195 (2022) 906-917.
- [25] Dipta S.S., Schoenlaub J., Rahaman M.H., Uddin A. Estimating the potential for semitransparent organic solar cells in agrophotovoltaic greenhouses, *Applied Energy*, 328 (2022) 120208.
- [26] Meitzner R., Schubert U.S., Hoppe H. Agrivoltaics - The perfect fit for the future of organic photovoltaics, *Adv. Energy Mater.* 11 (2021) 2002551.
- [27] Bogdanowicz K.A., Iwan A. Review on thermoelectrical properties of selected imines in neat and multicomponent layers towards organic opto-electronics and photovoltaics, *Opto-Electronics Review* 29, 4 (2021) 201-212.
- [28] Rodriguez-Mas F., Valiente D., Ferrer J.C., Alonso J.L., de Avila S.F. Towards a greener photovoltaic industry: Enhancing efficiency, environmental sustainability and manufacturing costs through solvent optimization in organic solar cells, *Heliyon* 9 (2023) e23099.
- [29] Ganesan S., Mehta S., Gupta D., Fully printed organic solar cells – a review of techniques, challenges and their solutions, *Opto-Electronics Review* 27 (2019) 298-320.
- [30] Lu X., Xie C., Liu Y. et al. Increase in the efficiency and stability of large-area flexible organic photovoltaic modules via improved electrical contact, *Nat Energy* (2024).
- [31] Yang F., Huang Y., Li Y., Li Y. Large-area flexible organic solar cells, *npj Flexible Electronics* 5 (2021) 30.
- [32] Li S., Li Z., Wan X., Chen Y. Recent progress in flexible organic solar cells, *eScience* 3 (2023) 100085.
- [33] Sun Y., Liu T., Kan Y., Gao K., Tang B., Li Y. Flexible organic solar cells: Progress and challenges, *Small Sci.* 1 (2021) 2100001.
- [34] Lee J., Park S.A., Ryu S.U., Chung D., Park T., Son S.Y. Green-solvent-processable organic semiconductors and future directions for advanced organic electronics, *J. Mater. Chem. A*, 8 (2020) 21455-21473.
- [35] Ahmed U., Alizadeh M., Rahim N.A., Shahabuddin S., Ahmed M.S., Pandey A.K. A comprehensive review on counter electrodes for dye sensitized solar cells: A special focus on Pt-TCO free counter electrodes, *Solar Energy*, 174 (2018) 1097-1125.
- [36] Sen A., Putra M.H., Biswas A.K., Behera A.K., Groß A. Insight on the choice of sensitizers/dyes for dye sensitized solar cells: A review, *Dyes and Pigments*, 213 (2023) 111087.
- [37] Yue Z., Guo H., Cheng Y. Toxicity of perovskite solar cells, *Energies*, 16 (2023) 4007.
- [38] Saliba M., Matsui T., Domanski K., Seo J.Y., Ummadisingu A., Zakeeruddin S.M., Correa-Baena J.P., Tress W.R., Abate A., Hagfeldt A., Grätzel M. Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance, *Science*, 354, 6309 (2016) 206-209.
- [39] Khatoun S., Yadav S.K., Chakravorty V., Singh J., Singh R.B., Hasnain M.S., Mozammil Hasnain S.M. Perovskite solar cell's efficiency, stability and scalability: A review, *Materials Science for Energy Technologies* 6 (2023) 437-459.
- [40] Chowdhury T.A., Zafar M.A.B., Sajjad-UI Islam M., Shahinuzzaman M., Islam M.A., Khandaker M.U. Stability of perovskite solar cells: issues and prospects, *RSC Adv.* 13 (2023) 1787.
- [41] Duan L., Walter D., Chang N., Bullock J., Kang D., Phang S.P., Weber K., White T., Macdonald D., Catchpole K., Shen H. Stability challenges for the commercialization of perovskite-silicon tandem solar cells, *Nature Reviews Materials* 8 (2023) 261-281.
- [42] Lu Q., Yang Z., Meng X., Yue Y., Ahmad M.A., Zhang W., Zhang S., Zhang Y., Liu Z., Chen W. A review on encapsulation technology from organic light emitting diodes to organic and perovskite solar cells, *Advanced Functional Materials* 31, 23 (2021) 2100151.
- [43] Luo D., Jang W., Babu D.D., Kim M.S., Wang D.H., Kyaw A.K.K. Recent progress in organic solar cells based on non-fullerene acceptors: materials to devices, *J. Mater. Chem. A*, 10 (2022) 3255-3295.