



Barwnikowe mikroogniwa fotowoltaiczne

Mikita Davykoza¹, Roman Szafran²

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, KN Gambrinus

²Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, Katedra Biochemii, Biologii Molekularnej i Biotechnologii

e-mail: 245853@student.pwr.edu.pl, roman.szafran@pwr.edu.pl

Streszczenie

W pracy zostały zaprezentowane wyniki badań nad opracowaniem fotowoltaicznych ogniw barwnikowych (ang. *dye-sensitized solar cell*, DSSC), wykorzystujących jako sensybilizatory barwniki pochodzenia naturalnego. Przeanalizowano wpływ rozpuszczalników organicznych na efektywność ekstrakcji sensybilizatorów organicznych z materiału roślinnego oraz ich wpływ na finalną sprawność mikroogniwa barwnikowego. Wykorzystując jako źródła sensybilizatorów popularne i szeroko dostępne na rynku sezonowe owoce, udało się wytworzyć ogniwo o sprawności równej 0,52%, na bazie ekstraktu z czarnej porzeczki. Po przeanalizowaniu zależności sprawności ogniwa od pH ekstraktu stwierdzono, że optymalna jest naturalna kwasowość ekstraktów, wynosząca pH = 3–4. Również mieszaniny różnych ekstraktów nie wykazały lepszych właściwości uczulających od pojedynczych ekstraktów. Badania doprowadziły do opracowania nowej konstrukcji mikroogniw ze zredukowanymi oporami transportu masy w obrębie ciekłego elektrolitu oraz możliwości uzupełnienia/wymiany elektrolitu oraz regeneracji barwników uczulających, bez konieczności ingerencji w konstrukcję układu.

Słowa kluczowe: ogniwa DSSC, barwniki fotoczułe, ekstrakcja barwników, naturalne sensybilizatory, mikroogniwa fotowoltaiczne, systemy mikrofluidalne

1. Wprowadzenie

Ciągły wzrost zapotrzebowania światowej gospodarki na energię elektryczną, przy jednoczesnej konieczności ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, wpływających na nieodwracalne zmiany klimatu na naszej planecie, wymusza poszukiwanie nowych, przyjaznych dla środowiska źródeł energii. Jednym z ekologicznych źródeł energii są fotowoltaiczne ogniwa barwnikowe DSSC (ang. *dye-sensitized solar cells*), które zamieniają energię słoneczną na elektryczną, dzięki wykorzystaniu barwników organicznych pochodzenia naturalnego lub też syntetycznych barwników, m.in. rutenowych. Cechują się one niskim kosztem wytwarzania oraz relatywnie prostą konstrukcją. Niezbędnym komponentem takiego ogniwa jest półprzewodząca warstwa nanocząstek TiO_2 (tlenku tytanu), z zaadsorbowanym na niej sensybilizatorem. Zaadsorbowany barwnik poszerza zakres długości fal świetlnych, zdolnych do wzbudzenia i przekazania elektronu w paśmie przewodnictwa tlenku tytanu [1]. Obecnie najlepszymi barwnikami dla ogniwa DSSC są barwniki na bazie rutenu (Ru), które posiadają sprawność około 11–12% [2]. W związku z wysoką ceną tego pierwiastka oraz jego ograniczoną zawartością w skorupie ziemskiej, poszukuje się alternatywnych barwników organicznych, w tym pochodzenia naturalnego.

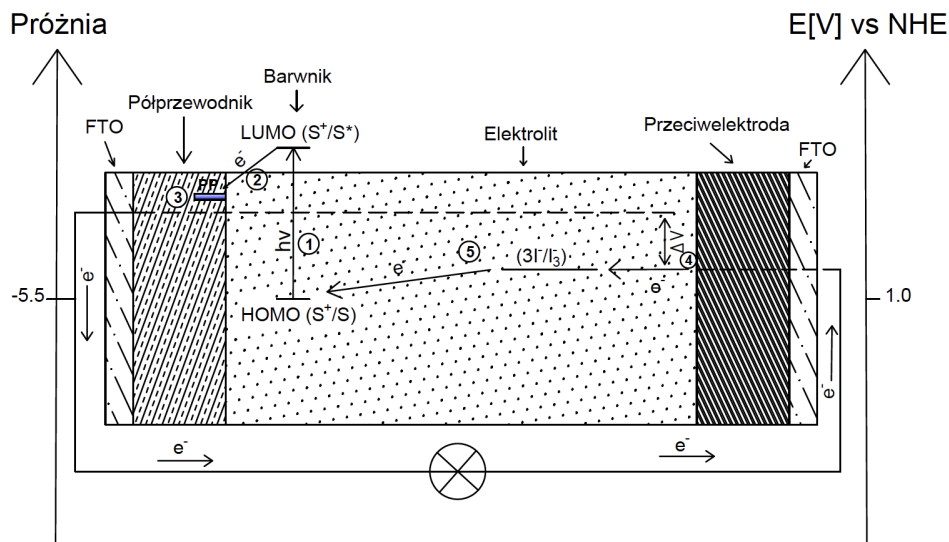
W pracy zostaną zaprezentowane wyniki badań nad opracowaniem fotowoltaicznych ogniw barwnikowych, wykorzystujących jako sensybilizatory barwniki pochodzenia naturalnego. Barwniki te zostały otrzymane poprzez ekstrakcję rozpuszczalnikami o różnych właściwościach chemicznych i fizycznych materiału pochodzenia roślinnego, głównie owoców jagodowych.

Został określony wpływ różnych sensybilizatorów na sprawność ogniwa barwnikowego, jak również zbadane zostało widmo absorpcji barwników w spektrum UV-VIS w zależności od użytego rozpuszczalnika. Podjęto również próbę opracowania mieszaniny kilku ekstraktów, w celu poszerzenia zakresu absorbowanych długości promieniowania świetlnego, a tym samym zwiększenia sprawności ogniwa. Zaprojektowane mikroogniwa oraz opracowane metody nanoszenia cienkich warstw materiału, wraz z pogłębioną analizą zachodzących procesów, stanowiły podstawę opracowania nowego rozwiązania konstrukcyjnego. Konstrukcja zawiera system mikrokanałów, które umożliwiają doprowadzanie, w sposób okresowy, elektrolitu do ogniwa oraz regenerację barwnika.

2. Budowa oraz zasada działania

Zasada działania wszystkich ogniw fotowoltaicznych polega na wychwytywaniu fotonu pochodzącego z promieniowania słonecznego poprzez jego absorpcję na warstwie fotoczułej, a następnie przeniesienie elektronu [3].

W ogniwach DSSC za te czynności odpowiadają różne powłoki. Zasada działania ogniwa została zilustrowana na rys. 1. Warstwa półprzewodnika pełni funkcję przenośnika elektronów – rys. 1 (3), natomiast barwnik zaadsorbowany w porowatej strukturze nano-TiO₂ jest odpowiedzialny za absorpcję fotonu. Na podstawie widma absorpcji promieniowania poszczególnych barwników można określić maksimum długości fali, przy której proces będzie zachodził najskuteczniej, przy czym jedynie foton o energii wystarczającej do wzbudzenia cząsteczki barwnika (od poziomu HOMO do LUMO) zostanie zaabsorbowany – rys. 1 (1). Przy wzbudzeniu cząsteczki barwnika tworzy się para elektron-dziura (ekscyton) [4]. Elektron z najwyższego obsadzonego orbitalu molekularnego barwnika wędruje do najniższej nieobsadzonego (LUMO), gdzie przechodzi do pasma przewodnictwa (PP) tlenku tytanu – rys. 1 (2).



Rys. 1. Zasada działania ogniwa DSSC



Rys. 2. Budowa mikroogniwa barwnikowego

Powstała dziura pozostaje w paśmie HOMO i odbierana jest przez nośnik ładunku, pochodzący z elektrolitu – rys. 1 (5) [5]. Utleniony mediator (I_3^-) dyfunduje do katody (Pt), gdzie jest redukowany – rys. 1 (4) [6]. Proces jest cykliczny, przy zamkniętym obiegu ładunków.

3. Wytwarzanie ogniwa barwnikowego

Ogniwo, z podziałem na poszczególne warstwy, zostało przedstawione na rys. 2. Szkło FTO TEC 10 (3,2 mm) (Osilla, UK), zostało dokładnie umyte i odtłuszczone za pomocą izopropanolu (Archem, PL) w myjce ultradźwiękowej. Roztwory barwników zostały przygotowane poprzez ekstrakcję (72 h) przetłoczonej masy owocowej rozpuszczalnikiem, w stosunku 60 g/50 ml ekstrahenta. Zmianę pH ekstraktu uzyskiwano poprzez dodatek 1% roztworu kwasu octowego lub NaOH.

Pasta tytanowa TiO_2 została przygotowana poprzez zmieszanie następujących składników: tlenek tytanu (IV) (Sigma-Aldrich, DE) 21 nm – 10 g, kwas cytrynowy 0,1 M – 30 ml, PEG (glikol polietylenowy) 4000 – 1 ml, TTIP (Tytanu (IV) izopropanolan) – 1 ml, niejonowy surfaktant Triton X-100 – 0,5 ml. Nanoszenie cienkiej warstwy pasty tytanowej na szkło FTO zostało przeprowadzone metodą „doctor blade” oraz poprzez napyłanie cienkiej powłoki za pomocą aerografu. Druga metoda prowadziła jednak do kilkukrotnego wzrostu zużycia materiałów. Grubość warstwy została zmierzona za pomocą elektronicznej śruby mikrometrycznej i wynosiła średnio 20 μm (doctor blade), oraz 10–15 μm dla warstwy napyłanej. Szkło z naniesioną warstwą tlenku tytanu było wstępnie suszone w suszarce, w temperaturze 52–62°C w ciągu 2–3 min, a następnie wyprażane w piecu muflowym. Powłokę prażono w temp. 450°C przez 30 min. Po schłodzeniu fotoanodę umieszczano w zlewce z uprzednio przygotowanym ekstraktem roślinnym na okres 3 h.

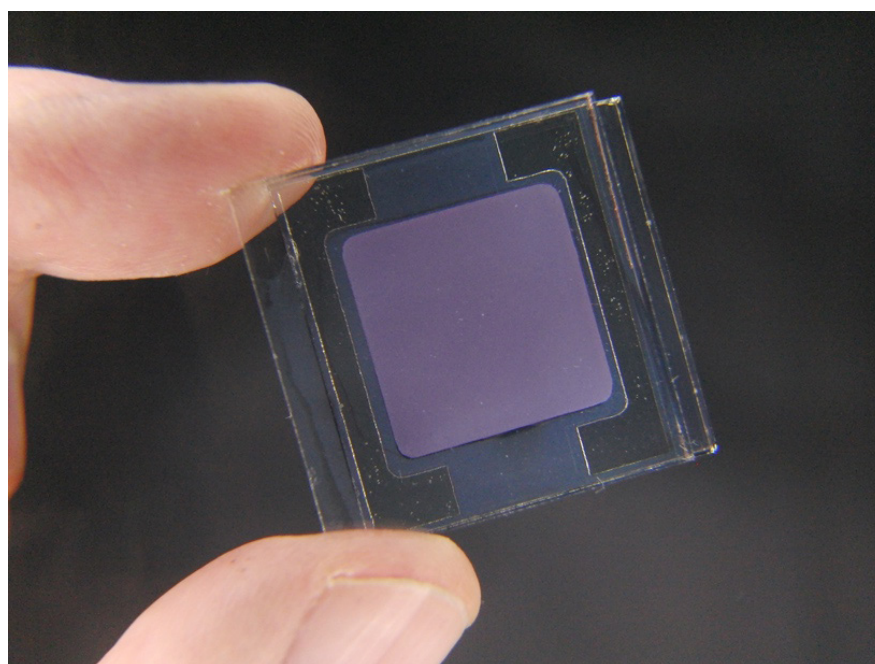
Przeciwelektrodę (katodę) otrzymano poprzez naniesienie warstwy sadzy na powierzchnię szkła FTO nad płomieniem świecy w ciągu 20 s [7].

Gotowe elektrody łączono razem za pomocą błony klejowej 3M wycinanej laserowo, po czym wypełniano przestrzeń między elektrodami elektrolitem. Elektrolit został przygotowany w następujący sposób: 8,3 g KI (0,5 M, Sigma-Aldrich, DE) i 1,27 g (0,05 M, Archem, PL) rozpuszczano w 100 ml glikolu etylenowego.

4. Analiza wyników i wnioski

W ramach pracy zaprojektowano i wykonano mikroogniwa DSSC na bazie naturalnych sensybilizatorów pochodzenia roślinnego. Przykładowe ogniwo przedstawione zostało na rys. 3. Wymiary ogniwa wynoszą 25 × 25 mm, a pole powierzchni aktywnej 2,2 cm². Z lewej i prawej strony ogniwa zlokalizowane zostały powierzchnie kontaktu elektrycznego (występy), gdzie

przyłączane były zaciski przewodów pomiarowych. W górnej i dolnej części ogniwa uwidocznione zostały mikrokanały doprowadzające i odprowadzające elektrolit, które prowadzą do krawędzi ogniwa. Kanały te służą do wprowadzania i wymiany elektrolitu w ogniwie oraz umożliwiają regenerację sensybilizatora. Centralną część ogniwa zajmuje mikrokomora o wysokości 60 mikrometrów i wymiarach $1,5 \times 1,5$ cm, wewnątrz której, na górnej i dolnej powierzchni, naniesione zostały elektrody. Zabarwienie powierzchni tlenku tytanu na fioletowo na rys. 3, świadczy o adsorpcji sensybilizatora na jego powierzchni.



Rys. 3. Opracowane i skonstruowane mikroogniwo DSSC

4.1. Badania absorpcji ekstraktów roślinnych

W trakcie badań laboratoryjnych zostały określone pasma absorpcji promieniowania świetlnego naturalnych barwników, w zależności od użytego rozpuszczalnika. Badania wykonano dla borówki amerykańskiej, czerwonej porzeczki oraz winogrona ciemnego ekstrahowanych etanolem, metanolem i acetonem; winogrona ciemnego ekstrahowanego etanolem przy różnym pH; czarnej porzeczki, maliny oraz czarnej i kamczackiej jagody ekstrahowanych etanolem; mieszanek winogrona ciemnego i porzeczki czerwonej ekstrahowanych etanolem z borówką ekstrahowaną metanolem.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe widma absorpcyjne dla wybranych układów. Do badań spektrofotometrycznych ekstrakty były każdorazowo w ten sam sposób kilkukrotnie rozcieńczane odpowiednim rozpuszczalnikiem w celu umożliwienia prawidłowego odczytu absorpcji.

Badania spektrofotometryczne wykazały najwyższą absorpcję światła dla borówki ekstrahowanej alkoholem etylowym, przy długości fali = 525 nm.

Różnica w wartości absorbancji dla różnych rozpuszczalników wynika głównie ze stężenia związku uczulającego (prawo Lamberta–Beera). Na intensywność zabarwienia powierzchni tlenku tytanu dodatkowo wpływ może mieć organizacja przestrzenna cząsteczek na jego powierzchni, struktura przestrzenna molekuł zależna od pH roztworu, obecności innych uczulaczy oraz grup funkcyjnych (grupy karboksylowe, fosfonowe) [8].

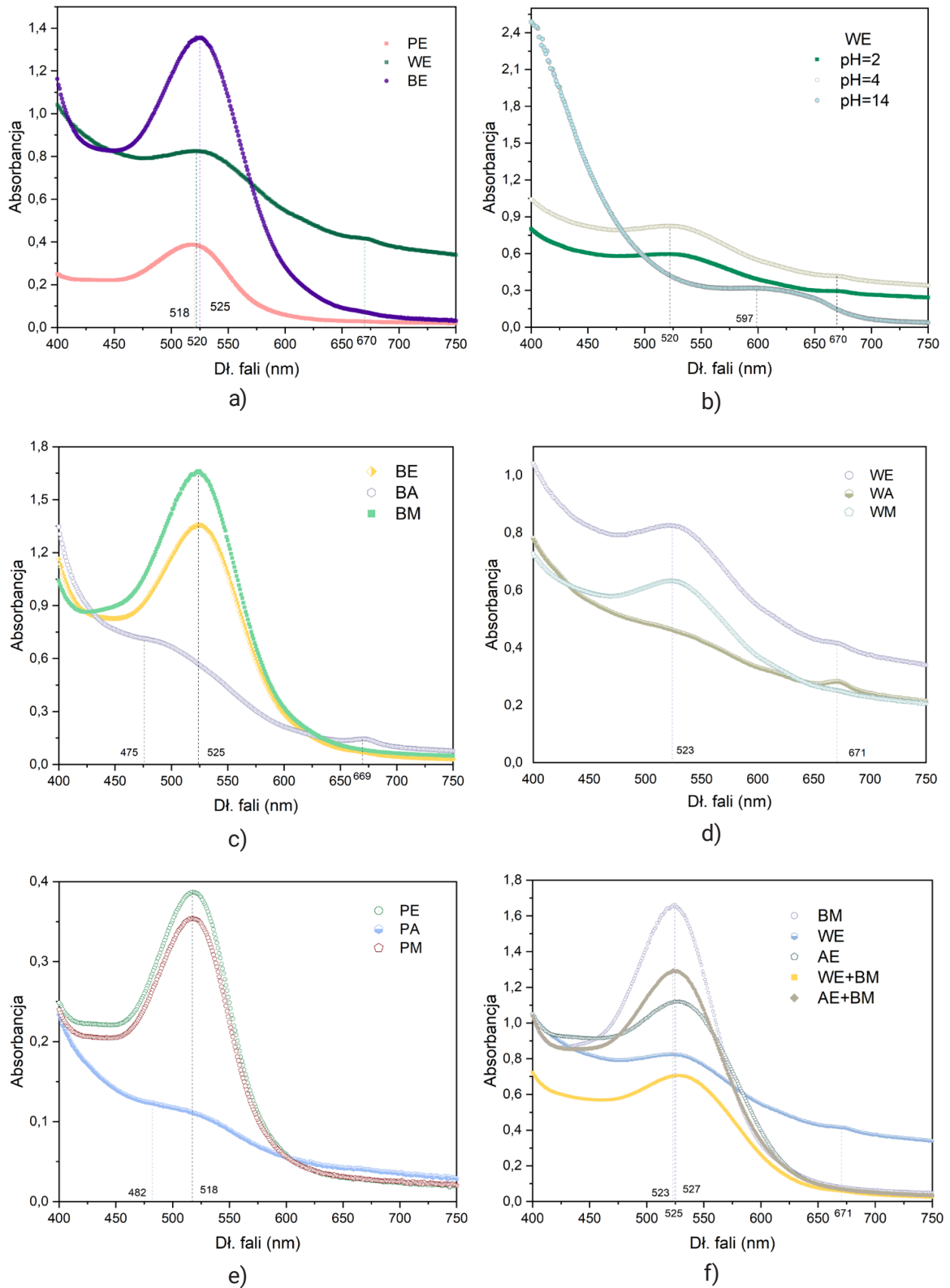
Rozpuszczalniki polarne protonowe (metanol, etanol) wykazywały lepsze właściwości ekstrakcyjne, co potwierdzają wysokie wartości absorbancji ekstraktów. Aceton okazał się zdecydowanie gorszym rozpuszczalnikiem, dając 2,5 razy niższą skuteczność ekstrakcji barwnika (rys. 4c). Z powodu swojej wysokiej polarności aceton może powodować zmniejszenie siły elektroakceptorowej grup karboksylowych, co następnie prowadzi do zmniejszenia sprawności ogniw oraz gorszej adsorpcji barwnika na powierzchni tlenku tytanu. Dodatkowo na rys. 4 (c, e) można zaobserwować zjawisko solwatochromizmu w rozpuszczalniku (przesunięcia pasma), które prowadzi do przesunięcia maksimum absorbancji w kierunku bliskiego UV, co jest zjawiskiem niekorzystnym [9].

Zmiana pH podczas ekstrakcji wpłynęła na przesunięcie pików absorbancji oraz zmianę jego wysokości. Zjawisko to zostało najlepiej zilustrowane na rys. 4 (b). Dla tego przypadku zaobserwowano przesunięcie pików przy wysokim pH ku podczerwieni o ponad 70 nm.

Większość barwników osiąga maksimum absorpcji w zakresie 500–550 nm, co pokrywa się z energią przejścia $\pi - \pi^*$ dla antocyjanów. Dodatkowy pik zaobserwowany na rys. 4 (a–d) przy długości fali w pobliżu 670 nm prawdopodobnie pochodzi od betalainy z grupy antocyjanów, posiadającej w swojej strukturze wiązania azotowe [10]. Wiązania te przyczyniają się do obniżania energii wzbudzenia.

4.2. Badania charakterystyki prądowo-napięciowej ogniw

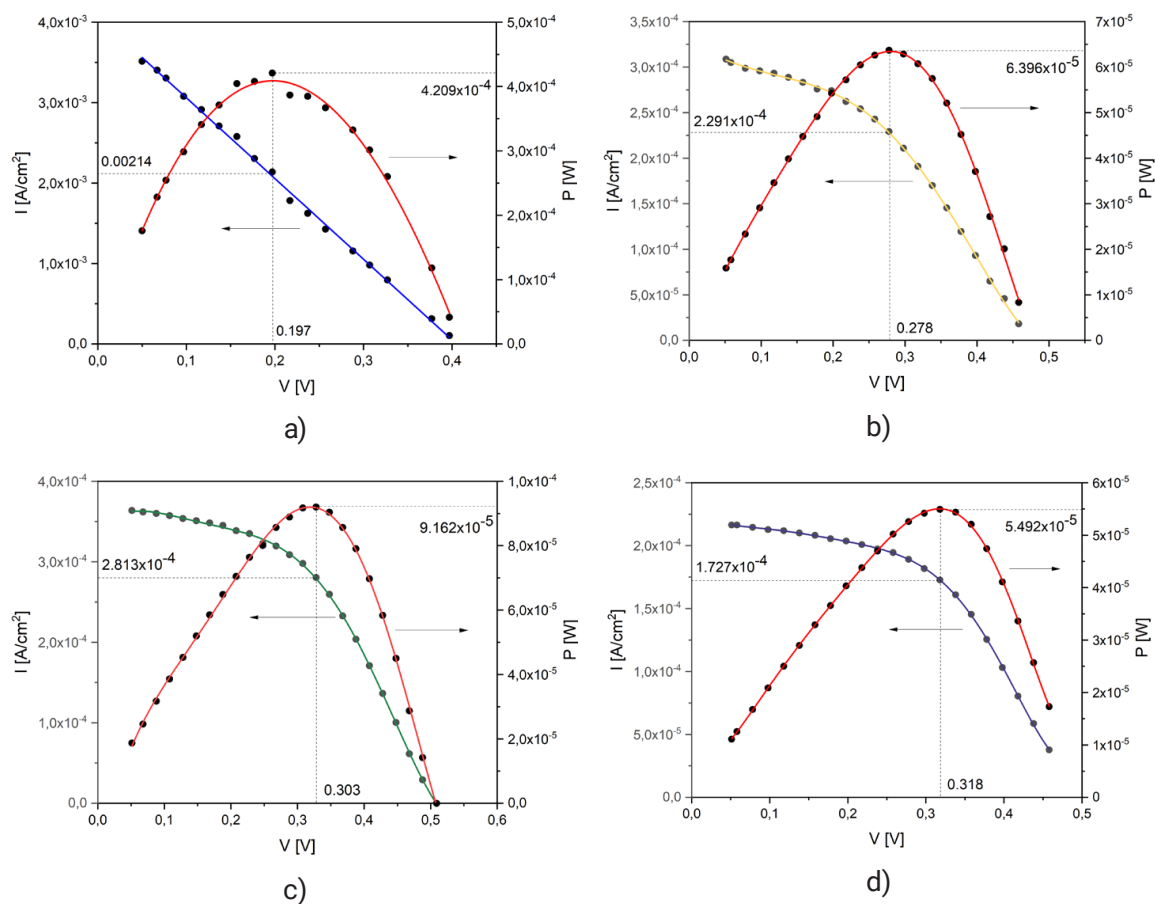
W celu wykonania pomiarów charakterystyki prądowo-napięciowej I–V, przygotowany został układ pomiarowy z obciążeniem elektrycznym Rigol DL3021, dwoma multimetrami cyfrowymi Voltcraft: VC850 i R-200 oraz źródłem światła. Podczas pierwszej części badań (badania wstępne), jako źródło światła wykorzystano lampę halogenową o mocy 500 W, co pozwoliło na zbadanie ogniw w warunkach przybliżonych do rzeczywistych – NOCT (ang. *normal operating cell temperature*). Moc wiązki światła wynosiła 800 W/m², a temperatura ogniwa 35–50 °C, przepływ powietrza wokół ogniwa wymuszony był za pomocą dmuchawy. Jego prędkość wynosiła 1–1,5 m/s, co odpowiada warunkom NOCT. Pomiar natężenia światła wykonano za pomocą miernika Voltcraft SLX-300. Badania wstępne pozwoliły na zoptymalizowanie konstrukcji i metod fabrykacji ogniw oraz weryfikację poprawności działania zestawu pomiarowego. Przeprowadzono również wstępną selekcję otrzymanych ekstraktów i rozpuszczalników.



Rys. 4. Widma absorpcji światła przez wyekstrahowane barwniki organiczne: a) czerwona porzeczka (PE), ciemne winogrona (WE), borówka amerykańska (BE) – ekstrahowane etanolem, b) ciemne winogrona ekstrahowane etanolem – zależność od pH, c) borówka amerykańska, d) winogrono ciemne, e) porzeczka czerwona – każde ekstrahowane alkoholem metylowym, etylowym i acetonem, f) mieszaniny winogrona ciemnego i porzeczki czerwonej ekstrahowanych etanolem (WE, AE) z metylowym ekstraktem borówki amerykańskiej (BM)

W dalszej części badania prowadzono z wykorzystaniem wyselekcjonowanych ekstraktów oraz ogniw o zoptymalizowanej konstrukcji. Kolejny etap badań został zrealizowany po 6 miesiącach od wykonania ogniw. Pozwoliło to na zweryfikowanie trwałości mikroogniw oraz stałości ich parametrów z upływem czasu. Tym razem badania przeprowadzono w warunkach STC (ang. *standard test condition*), którym odpowiada moc padającej wiązki światła 1000 W/m^2 , temperatura ogniw $25\text{--}35^\circ\text{C}$. Jako źródło światła wykorzystano lampę LED o mocy 100 W , CRI > 95 , temperaturze barwowej 5500 K (Fomei LED WIFI 100B).

Na podstawie otrzymanych wyników eksperymentalnych sporządzono charakterystyki prądowo-napięciowe I-V dla zbudowanych ogniw, a następnie wyznaczone zostały na ich podstawie wartości napięcia i natężenia w punkcie pracy ogniwa oraz napięcie rozwarcia i prąd zwarcia (V_{OC} , I_{SC}). Stały się one podstawą obliczenia współczynników wypełnienia FF i sprawności poszczególnych ogniw słonecznych η . Przykładowe charakterystyki I-V dla czarnej porzeczki, jagody czarnej i kamczackiej oraz maliny przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Charakterystyki I-V dla sensybilizatorów ekstrahowanych etanolem z: a) czarnej porzeczki, b) czarnej jagody, c) jagody kamczackiej, d) maliny

Wyniki obliczeń zebrano w tab. 1. Najwyższa sprawność otrzymanych ogniów wynosiła $\eta = 0,52\%$, przy współczynniku wypełnienia równym 0,30 (ekstrakt etanolowy z czarnej porzeczki).

Tabela 1. Zestawienie parametrów otrzymanych mikroogniw

Nr	Barwnik	Rozpuszczalnik	λ_{\max} [nm]	Warunki testowania	V_{oc} [V]	I_{sc} $\left[\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}\right]$	FF [%]	η [%]
1	Czarna porzeczka	C ₂ H ₅ OH	–	NOCT	0,397	3,51	30,2	0,526
2	Borówka amerykańska	CH ₃ OH	525	NOCT	0,287	0,22	35,5	0,028
3	Borówka amerykańska	C ₂ H ₅ OH	525	NOCT	0,431	0,28	40,3	0,062
4	Aronia	C ₂ H ₅ OH (1/3)	527	NOCT	0,132	0,14	40,8	0,009
5	Borówka amerykańska	CH ₃ OH	525	STC	0,195	0,15	39,3	0,0113
6	Borówka amerykańska	C ₂ H ₅ OH	525	STC	0,231	0,052	41,9	0,0051
7	Borówka amerykańska	C ₃ H ₆ O	475; 669	STC	0,130	0,019	41,4	0,0010
8	Winogrono ciemne	CH ₃ OH	523	STC	0,126	0,039	43,8	0,0021
9	Winogrono ciemne	C ₂ H ₅ OH	523; 671	STC	0,304	0,145	41,8	0,018
10	Winogrono ciemne	C ₃ H ₆ O	671	STC	0,101	0,045	50,5	0,0023
11	Porzeczka czerwona	CH ₃ OH	518	STC	0,180	0,079	40,0	0,0057
12	Porzeczka czerwona	C ₂ H ₅ OH	518	STC	0,133	0,032	36,4	0,0015
13	Porzeczka czerwona	C ₃ H ₆ O	482	STC	0,097	0,018	54,6	0,001
14	Winogrono ciemne (pH = 4)	C ₂ H ₅ OH	520; 670	STC	0,282	0,144	41,7	0,0169
15	Winogrono ciemne (pH = 14)	C ₂ H ₅ OH	597	STC	0,372	0,0486	38,0	0,0069
16	Winogrono ciemne + borówka	C ₂ H ₅ OH + CH ₃ OH	527	STC	0,180	0,0286	26,2	0,0016
17	Aronia + borówka	C ₂ H ₅ OH (1/3) + CH ₃ OH	523	STC	0,239	0,102	39,3	0,0096

Zaobserwowano niekorzystny wpływ wzrostu pH ekstraktu na sprawność ogniwa. Zwiększenie stężenia jonów hydroksylowych powoduje zwiększenie przerwy energetycznej TiO₂, w szczególności ujemne przesunięcie pasma przewodnictwa, co skutkuje podwyższonym napięciem otwartego obwodu (V_{oc}). Redukuje się przy tym natężenie prądu płynącego przy zwarceniu układu (I_{sc}) oraz zmniejsza się potrzebna siła uwolnienia elektronu na orbital.

Mimo tego niższy prąd często jest kompensowany wyższym współczynnikiem wypełnienia FF , co w konsekwencji powoduje wyższe sprawności ogniw [6]. Zjawisko to jest po części obserwowane podczas badań z wykorzystaniem ekstraktu winogron przy zmiennym pH ekstraktu (tab. 1 – nr 14 i 15). Wzrost pH w roztworze winogrona zwiększył napięcie w obwodzie o 24%, kosztem obniżania natężenia prądu zwarcia, natomiast w naszym przypadku zmniejszyła się wartość współczynnika FF i sprawność ogniwa. Mogło to być efektem bardzo wysokiego stężenia jonów hydroksylowych ($\text{pH} = 14$) i wynikającej z tego desorpcji barwnika. Bardzo wysokie lub niskie wartości pH roztworu uczulającego podczas adsorpcji barwnika na TiO_2 , mogą prowadzić do niekorzystnego obniżenia sprawności ogniwa i współczynnika FF .

Większa absorbanca ekstraktu nie zawsze powoduje wyższą sprawność ogniwa. Można to obserwować na rys. 4 (c) oraz tab. 1 – nr 2 i 3. Mimo wyższej absorbancji ekstraktu uzyskano niższą sprawność ogniwa. Powodem tego może być gorsza adsorpcja sensybilizatora z roztworu na powierzchni tlenku tytanu. Zjawisko to zaobserwowano w przypadku wykorzystania metanolu jako ekstrahenta. Mogło również dojść do niekorzystnego zjawiska agregacji cząsteczek barwnika na powierzchni półprzewodnika, co zmniejsza efektywność przeniesienia elektronu, na co może mieć wpływ wysoka polarność rozpuszczalnika.

Uważa się, że rozpuszczalnik wpływa na poziomy energetyczne w barwniku i kolejno w półprzewodniku [11], czego efektem może być wyższe napięcie w ogniwie na bazie ekstraktu z borówki (tab. 1 – nr 3 i 6), winogrona (tab. 1 – nr 9) ekstrahowanych etanolem, w porównaniu do ekstraktów metanolowych i acetonowych (tab. 1 – nr 2; 5 i 7; 8 i 10). Przy powtórnym badaniu (II etap badań) zauważono odwrotną sytuację związaną z maksymalną sprawnością wśród ogniw na bazie ekstraktu z borówki. Ogniwo uczulane ekstraktem metanolowym (tab. 1 – nr 5) wykazało wyższe sprawności niż kolejne, uczulane ekstraktem etanolowym (tab. 1 – nr 6) i acetonowym (tab. 1 – nr 7). W przypadku badań wykonanych bezpośrednio po wytworzeniu ogniw, ogniwa na bazie borówki ekstrahowanej etanolem (tab. 1 – nr 3) wykazywały wyższe wartości parametrów prądowych (V_{oc} , I_{sc} , η , FF), niż przygotowane na bazie ekstraktu metanolowego (tab. 1 – nr 2). Można to wyjaśnić szybszą degradacją w czasie ogniw uczulanych ekstraktami etanolowymi (niższa stabilność adsorbentu na powierzchni tlenku tytanu).

Próby komponowania mieszanin sorpcyjnych z różnych ekstraktów nie przyniosły oczekiwanych rezultatów. Po zmieszaniu ekstraktów z borówki i winogrona lub porzeczki czerwonej w stosunku 1:1, uzyskano spadek sprawność ogniwa, co mogło być spowodowane wzajemnym rozcieńczeniem ekstraktów. Uzyskane wyniki wskazują również na niekorzystny spadek sprawności ogniw po 6 miesiącach od wykonania, do 50% ich wyjściowej wartości.

5. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano wpływ rozpuszczalników organicznych na efektywność ekstrakcji sensybilizatorów organicznych z materiału roślinnego oraz ich wpływ na finalną sprawność mikroogniwa barwnikowego. Używając popularnych, szeroko dostępnych na krajowym rynku sezonowych owoców i jagód, udało się wytworzyć ogniwo o sprawności równej 0,52%, na bazie ekstraktu z czarnej porzeczki w etanolu. W porównaniu do pozostałych przebadanych w pracy sensybilizatorów, wartość ta była 10-krotnie wyższa. Po przeanalizowaniu zależności sprawności ogniw od pH ekstraktu stwierdzono, że optymalna jest naturalna kwasowość ekstraktów, wynosząca $\text{pH} = 3\text{--}4$. Zwiększenie czy obniżenie stężenia jonów wodorowych i hydroksylowych nie miało korzystnego wpływu na zdolność generowania prądu w ogniwie. Również mieszaniny różnych ekstraktów nie wykazały lepszych właściwości uczulających od pojedynczych roztworów.

Prace badawcze doprowadziły do opracowania nowej konstrukcji mikroogniw o wysokości komory nie przekraczającej 60 mikrometrów, co wpływa na redukcję oporów transportu masy w obrębie ciekłego elektrolitu. Wyprowadzenie mikrokanałów do krawędzi ogniwa umożliwiło uzupełnianie i wymianę elektrolitu oraz pozwoliło na regenerację barwników uczulających, bez konieczności ingerencji w konstrukcję układu. Rozwiązanie powyższych problemów stanowi krok w kierunku komercjalizacji ogniw DSSC. Dzięki prostemu powieleniu liczby ogniw, możliwe jest skonstruowanie paneli fotowoltaicznych dużej mocy, przy zachowaniu efektywności i trwałości równej pojedynczemu układowi.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane dzięki dofinansowaniu KN Gambrinus w ramach funduszu aktywności studenckiej FAST miasta Wrocławia, umowa dotacyjna nr BWU-3/2020/F1 z dnia 06.07.2020, tytuł projektu „Badania wydajności mikrofluidalnych ogniw słonecznych jako innowacyjnych źródeł energii odnawialnej”.

Literatura

- [1] Tiwana P., Docampo P., Johnston M.B., Snaith H.J., Herz L.M., *Electron mobility and injection dynamics in mesoporous ZnO, SnO₂, and TiO₂ films used in dye-sensitized solar cells*, ACS Nano 2011, 5(6), 5158–5166. DOI: 10.1021/nn201243y.
- [2] Nazeeruddin M.K., Péchy P., Renouard T., Zakeeruddin S.M., Humphry-Baker R., Comte P., Liska P., Cevey L., Costa E., Shklover V., Spiccia L., Deacon G.B., Bignozzi C.A., Grätzel M., *Engineering of efficient panchromatic sensitizers for*

- nanocrystalline TiO₂-based solar cells*, Journal of the American Chemical Society 2001, 123(8), 1613–1624. DOI: 10.1021/ja003299u.
- [3] Sharma K., Sharma V., Sharma S.S., *Dye-sensitized solar cells: Fundamentals and current status*, Nanoscale Research Letters 2018, 13(1), 381, 1–46. DOI: 10.1186/s11671-018-2760-6.
- [4] Gerischer H., *The principles of photoelectrochemical energy conversion*, Photovoltaic and Photoelectrochemical Solar Energy Conversion 1981, 199–261. DOI: 10.1007/978-1-4615-9233-4_5.
- [5] Wu J., Lan Z., Hao S., Li P., Lin J., Huang M., Fang L., Huang Y., *Progress on the electrolytes for dye-sensitized solar cells*, Pure and Applied Chemistry 2008, 80, 2241–2258. DOI: 10.1351/pac200880112241.
- [6] Kay A., Grätzel M., *Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder*, Solar Energy Materials and Solar Cells 1996, 44(1), 99–117. DOI: 10.1016/0927-0248(96)00063-3.
- [7] Wu J., Lan Z., Lin J., Huang M., Huang Y., Fan L., Luo G., Lin Y., Xie Y., We Y., *Counter electrodes in dye-sensitized solar cells*, Chemical Society Reviews 2017, 46(19), 5975–6023. DOI: 10.1039/c6cs00752j.
- [8] Zhang L., Cole J.M., *Anchoring groups for dye-sensitized solar cells*, ACS Applied Materials & Interfaces 2015, 7(6), 3427–3455. DOI: 10.1021/am507334m.
- [9] Venkatraman V., Yemene A.E., de Mello J., *Prediction of absorption spectrum shifts in dyes adsorbed on titania*, Scientific Reports 2019, 9(1), 16983. DOI: 10.1038/s41598-019-53534-2.
- [10] Ramamoorthy R., Radha N., Maheswari G., Anandan S., Manoharan S., Williams R.V., *Betalain and anthocyanin dye-sensitized solar cells*, Journal of Applied Electrochemistry 2016, 46(9), 929–941. DOI: 10.1007/s10800-016-0974-9.
- [11] Sang-Aroon W., Tontapha S., Amornkitbamrung V., *Photovoltaic performance of natural dyes for dye-sensitized solar cells: A combined experimental and theoretical study*, Elsevier Inc., 2019.