



Europejski
Instytut Miedzi
Copper Alliance



Energia odnawialna

Ogniwa fotowoltaiczne – nowe technologie

Europejski Instytut Miedzi

Nr ref EIM: EIM051680

Wstęp

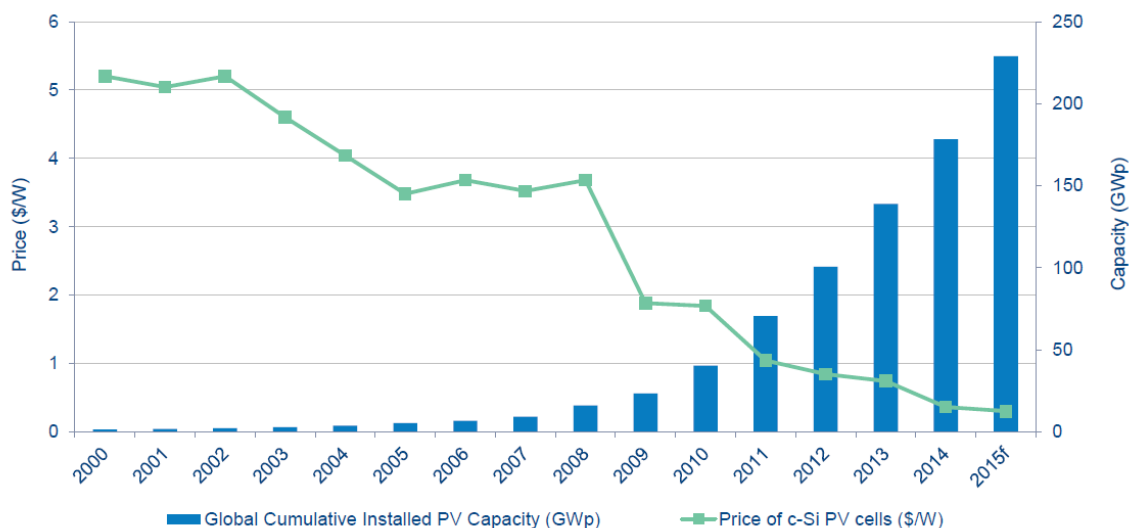
Przewiduje się, że odnawialne źródła energii będą podstawą przyszłego systemu elektroenergetycznego. Spośród wszystkich technologii OZE, jedną z najbardziej popularnych jest fotowoltaika. Badania nad efektywnym wykorzystaniem promieniowania słonecznego do produkcji energii trwają już ponad siedemdziesiąt lat. Aktualnie większość systemów fotowoltaicznych wykorzystuje ogniwa krzemowe. Pozwalają one na przetwarzanie promieniowania słonecznego na energię elektryczną ze sprawnością ponad 20%. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie badaczy nowymi technologiami ogniw fotowoltaicznych, nazywanymi ogniwami o absorpcji cząsteczkowej. Nowe technologie będą mogły być wykorzystywane zarówno w urządzeniach o dużej mocy (zastosowania tradycyjne) jak i mniejszej mocy, np. fotowoltaika zintegrowana z budynkiem, samochody elektryczne, internet rzeczy. Niniejszy artykuł ma na celu ocenę potencjału wykorzystania miedzi, związanego z rozpowszechnieniem ogniw najnowszych generacji.

Konwencjonalne i nowe ogniwa fotowoltaiczne - stan wiedzy

Przewiduje się, że przed 2050, ponad 16% światowej konsumpcji energii elektrycznej będzie pokryte przez fotowoltaikę [1]. Obecnie wyróżnia się trzy typy ogniw PV:

- Ogniwa krzemowe;
- Ogniwa cienkowarstwowe;
- Ogniwa o absorpcji cząsteczkowej.

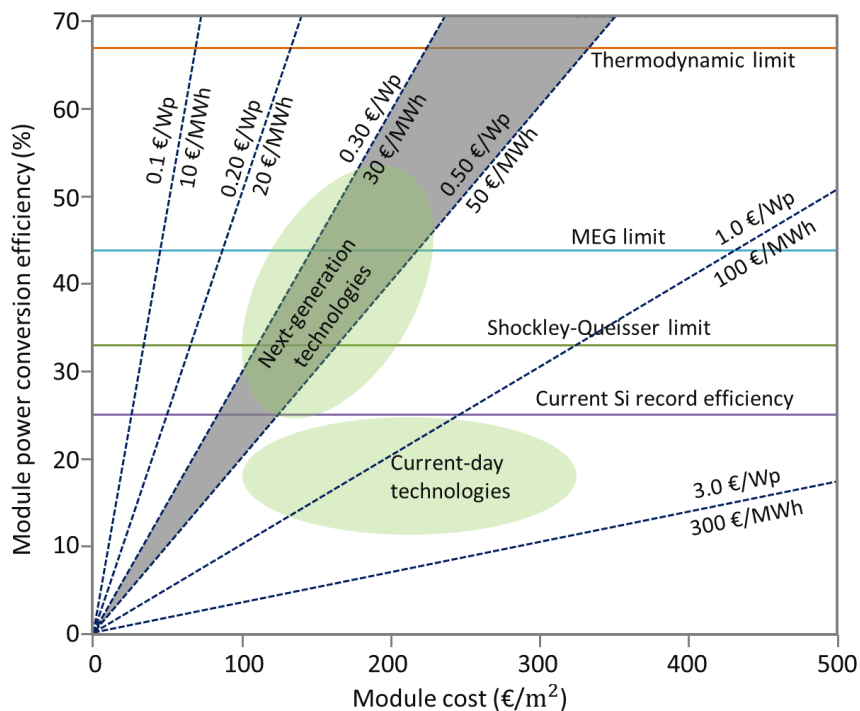
Aktualnie najbardziej popularne w zastosowaniach komercyjnych są ogniwa krzemowe. Wynika to ze stosunkowo niskiej ceny. Ich koszt specyficzny [$\$/W$] spadł z ponad $76\$/W$ w 1977 do $0,30\$/W$ w 2015 (rys. 1). W efekcie koszt produkcji energii elektrycznej przez ogniwo krzemowe jest zbliżony do ceny energii płaconej przez małych konsumentów, np. w Niemczech 280 €/MWh .



Rys. 1 Zmiana ceny ogniwa fotowoltaicznego vs. całkowita zainstalowana moc PV (źródło: Arthur D Little: *Emerging technologies in Solar PV: identifying and cultivating potential winners*)

Pomimo znacznego spadku ceny krzemu w ostatnich dekadach i przewidywanego utrzymania trendu, cena wciąż jest zbyt wysoka aby ogniwa PV mogły konkurować z innymi technologiami produkcji energii elektrycznej. Na cenę produkcji energii wpływa całkowity koszt modułu PV oraz sprawność przetwarzania energii. Moduł obejmuje ogniwa fotowoltaiczne, jak również elementy takie jak przewody, podpory, przełączniki, falowniki

itd. Sumaryczny koszt tych elementów jest zbliżony do ceny ogniw. Sprawność jest przedstawiana jako część promieniowania słonecznego przekształcona w energię elektryczną. Obecnie moduły PV oparte na krzemie są blisko granicy maksymalnej osiągalnej sprawności. Aby fotowoltaika mogła być konkurencyjna dla innych technologii, koszt produkcji energii z modułu PV musiałby być w granicach pomiędzy 30 a 50€/MWh. Wartość ta może zostać osiągnięta przy sprawności 40% i koszcie specyficznym modułu 140-170€/m² lub 30% i 110-130€/m² (rys. 3). Według analizy Shockley-Queisser [2], ogniwo fotowoltaiczne o pojedynczym złączu może przetworzyć maksymalnie 33% promieniowania słonecznego. Najwyższy wynik osiągnięty w warunkach laboratoryjnych dla ogniwa krzemowego to 25,6% [3]. Dla ogniw wielozłączowych teoretyczna wartość maksymalnej sprawności to 68% [4].



Rys. 2 Ceny generacji PV w zależności od sprawności i ceny modułu (na podstawie [5])

W ogniwach opartych na krzemie elektrony i dziury powstają podczas absorpcji światła przez półprzewodnik [6]. Ze względu na dużą stałą dielektryczną tych materiałów, elektrony i dziury szybko zostają oddzielone od siebie, nie oddziałując wzajemnie. Jednak używając nowych materiałów można uniknąć stosowania półprzewodników o wysokiej stałej dielektrycznej. Przykładem takich technologii są ogniwa barwnikowe i organiczne. Inną możliwością jest zastosowanie nanokryształów, takich jak kropki kwantowe (Quantum Dots – QDs), powiększając pasmo wzbronione, przez co możliwa jest absorpcja większej ilości fotonów. Z sukcesem przetestowano dodanie kropek kwantowych do ogniw opartych na **miedzi, cynku, cynie i siarczku (CZTS)** i mieszanice **miedzi, indu, galu, selenu (CIGS)**.

Ogniwa fotowoltaiczne wykorzystujące nowe materiały (barwnikowe i kropki kwantowe) mogą być produkowane w procesach niskotemperaturowych, co ogranicza ich koszt. Jednak obecnie takie ogniwa charakteryzuje niska sprawność, co najmniej dwukrotnie mniejsza od najlepszych komercyjnych ogniw krzemowych [7]. Wyższą sprawność osiągnięto dla ogniw na bazie perowskitów, przetwarzających energię ze skutecznością 20,1% [8]. Poza tym dużym zainteresowaniem naukowców i inwestorów cieszy się technologia skoncentrowanych ogniw fotowoltaicznych (concentrated photovoltaics cells – CPV). W takich ogniwach skoncentrowane światło słoneczne odpowiada równowartości promieniowania 302 słońc, co pozwala na osiągnięcie sprawności na poziomie 44,4%. Technologia ta jednak wciąż jest zbyt droga do zastosowań komercyjnych.

Nowe technologie PV: negatywny wpływ na rynek ogniw krzemowych

Ogniwa cienkowarstwowe z tellurku kadmu (CdTe) mogą być produkowane stosunkowo tanio w porównaniu z ogniwami krzemowymi. Obecnie ich maksymalna osiągnięta sprawność to 21,5%. Przewiduje się uzyskanie sprawności 23,0% w najbliższych latach. Wadą tych ogniw jest wysoka toksyczność kadmu i telluru. Dodatkowo trudnodostępność telluru ogranicza możliwość zastąpienia ogniw krzemowych przez CdTe.

Ogniwa z miedzi, indu, galu, selenu (CIGS) są stałym roztworem CuInSe oraz CuGaSe. Ogniwa osiągnęły sprawność 21,7% a koszty ich produkcji w ostatnich latach spadły. Co więcej jest to technologia cienkowarstwowa i ogniwa mogą być elastyczne pod względem fizycznym. Te cechy pozwalają na różnorodne zastosowania ogniw. Technologia nie jest korzystna dla zastosowań o skali przemysłowej, gdzie niepotrzebna jest elastyczność ogniwa.

Skoncentrowane ogniwa fotowoltaiczne (CPV) technologia wykorzystuje lustra i soczewki w celu koncentracji światła słonecznego do równowartości promieniowania ponad 300 słońc. Obecnie maksymalna sprawność technologii to 44,4%, jednak technologia nie jest wykorzystywana w produktach komercyjnych. Może być stosowana tylko w regionach o wysokim nasłonecznieniu, co znacznie ogranicza jej potencjał.

Ogniwa wielozłączone zawierają kilka różnych materiałów połączonych np. warstwowo. Teoretyczna maksymalna sprawność technologii, przy połączeniu nieskończonej ilości warstw, wynosi 68%. Różne materiały absorbują określoną część spektrum promieniowania elektromagnetycznego słońca. Ogniwa wielozłączone mogą pracować jako ogniwa skoncentrowane lub normalne. Koszt ogniw wielozłączowych jest wyższy od ogniw wykorzystujących tylko jeden materiał. Dodatkowo materiały wykorzystywane do badań laboratoryjnych technologii są droższe od materiałów używanych w ogniwach krzemowych. Na przykład GaAs, jeden z najczęściej testowanych materiałów, jest ok 1000 razy droższy od krzemu.

Ogniwa organiczne (OPV) mogą być produkowane niskim kosztem w dużych ilościach. Zastosowane materiały organiczne pozwalają na elastyczność i przezroczystość ogniw, co pozwala na wykorzystanie ich w architekturze oraz do zasilania czujników i urządzeń wykorzystywanych w tzw. internecie rzeczy. Pomimo niskich kosztów produkcji, sprawność OPV jest wciąż zbyt niska w porównaniu do ogniw krzemowych. Maksymalna osiągnięta sprawność w warunkach laboratoryjnych to 11,0%.

Ogniwa z kropką kwantową (QDs) charakteryzują się elastyczną szerokością pasma wzbronionego. Poprzez zmianę rozmiaru kropek kwantowych zmienia się typ absorbowanej energii słonecznej. W ogniwach jednozłączowych, zastosowanie kropek kwantowych pozwala na przechwytywanie tej części energii słonecznej, która zwykle jest tracona w postaci ciepła. QDs wciąż mają niską sprawność w porównaniu z ogniwami krzemowymi, maksymalnie osiągnięto wartość mniejszą niż 10%.

Ogniwa perowskitowe są tworzone na bazie tytanianu wapnia. Takie ogniwa zostały opracowane w latach 2000 i w krótkim czasie znacznie poprawiono ich sprawność. Najwyższa osiągnięta w warunkach laboratoryjnych sprawność to 10,1%. Głównym wyzwaniem rozwoju ogniw perowskitowych jest ich stabilność. Obecnie najdłuższy czas życia ogniwa to ok. 2000 godzin, co jest bardzo małą wartością w porównaniu z ogniwami krzemowymi (ok. 54 000 godzin).

Ogniwa barwnikowe – ta technologia pozwala na produkcję ogniw fotowoltaicznych w dowolnym kolorze, również przezroczystych. Sprawność ogniw to aktualnie ok. 8% [9,10]. Zanim możliwa będzie ich komercyjna produkcja, należy poprawić stabilność i sprawność ogniw.

Nowe technologie PV: obszary zastosowania

Ogniwa krzemowe stanowią ok. 85-90% rynku fotowoltaiki, moduły cienkowarstwowe, CdTe i CIGS razem to mniej niż 15-10% rynku. Powstające technologie PV prawdopodobnie nie zastąpią tradycyjnych ogniw (przynajmniej nie od razu), jednak mogą wpłynąć na powstanie nowych rynków i zastosowań, gdzie konieczne będą ich unikalne właściwości [11]. Rynek ogniw PV obejmuje produkcję energii dużej mocy jak również zasilanie małych i średnich urządzeń. Dla zastosowań dużej mocy ogniwa perowskitowe mogłyby być użyte w połączeniu z ogniwami krzemowymi. Zastosowanie perowskitów pozwala na zwiększenie ilości absorbowanego promieniowania słonecznego, a tym samym sprawności ogniwa. Instytut Fraunhofera ISE osiągnął w ten

sposób sprawność ponad 25,6% [12]. Zastosowanie ogni perowskitowych w połączeniu z krzemowymi może być dobrym rozwiązaniem na pierwszym etapie rozwoju ogni perowskitowych. Jeśli rozwiązany zostanie problem stabilności jak i wykorzystania metali ciężkich (ołów), ogniwa perowskitowe byłyby technologią o największym potencjale wyparcia ogni krzemowych w zastosowaniach dużej mocy.

Ogniwa perowskitowe oraz organiczne mogą być również wykorzystywane w zastosowaniach szczególnych, odpowiednich dla ich cech charakterystycznych, np. elastyczności, przezroczystości, itd. Wyróżnia się cztery potencjalne rynki dla nowych technologii PV:

- Sektor budownictwa: np. okna w budynkach biurowych,
- Sektor transportu: samochody, ogrzewanie i klimatyzacja w pociągach,
- Sektor zdalny off-grid: osłony przeciwsłoneczne, szklarnie,
- Małe autonomiczne urządzenia sieciowe (small autonomous network device – SAND): zasilanie urządzeń internetu rzeczy.

Wykorzystanie miedzi w ogniach najnowszych technologii

Zastosowanie miedzi w nowych ogniach fotowoltaicznych wzbudziło duże zainteresowanie ze strony środowisk naukowych. Miedź może być wykorzystywana do poprawy parametrów ogni, np. fenantrolina miedzi podnosi sprawność ogni barwnikowych [13], związki CuI oraz CuSCN mogą być użyte do poprawy parametrów ogni perowskitowych [14]. Pomimo obiecujących pierwszych wyników, brakuje szczegółowych danych na temat zastosowania miedzi w nowych ogniach, dlatego niemożliwe jest określenie potencjalnego zapotrzebowania na miedź w tym obszarze. Miedź jest jednym z głównych składników ogni CIGS, ocenia się że do produkcji ogniwa o mocy 1 MW potrzebne jest 50 kg miedzi [15].

Dodatkowo, jeśli osiągnięty zostanie odpowiedni poziom rozwoju nowych technologii PV, przewiduje się wzrost zapotrzebowania na ogniwa. Nowoczesne, jak również tradycyjne panele fotowoltaiczne wykorzystują miedź do transportu elektronów. Instalacje dużej mocy wykorzystują miedź do łączenia modułów PV, uziemienia, połączenia z falownikiem oraz urządzeniami pomiarowymi. Ilość miedzi w pozostałych elementach elektrowni (falowniki, transformatory, itd.) jest niewielka, ponieważ większość z nich wykonana jest na bazie aluminium. Wynikające zapotrzebowanie na miedź jest proporcjonalne do rozmiaru elektrowni fotowoltaicznej. Można założyć, że zapotrzebowanie na miedź w nowych obszarach zastosowań PV jest zbliżone do zapotrzebowania elektrowni fotowoltaicznych.

Przeprowadzono wiele badań na temat zapotrzebowania na miedź w rozwiązaniach fotowoltaicznych. Badanie BBF [16] ocenia wykorzystanie pomiędzy 7 i 5,5 ton na zainstalowany MW mocy. International Copper Association (ICA) ocenia zużycie 4 ton miedzi na 1 MW mocy fotowoltaiki [17].

Literatura

- [1] International Energy Agency: „Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy“, 2014. www.iea.org
- [2] William Shockley and Hans J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p -n Junction Solar Cells", Journal of Applied Physics , Volume 32, pp. 510- 519 (1961)
- [3] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, "Prog. Photovoltaic" 22, 701-710 (2014)
- [4] A. de Vos, "Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells", Journal of Physics D - Applied Physics, vol. 13, May 14, 1980, p. 839-846
- [5] M. C. Beard, J. M. Luther, A. J. Nozik, "The promise and challenge of nanostructured solar cells", Nature nano-technology, vol 9, December 2014
- [6] P. Würfel, From basic principle to advanced concepts, Physics of solar cells, Wiley 2009
- [7] P. N. Nayak, D. Cahen, "Updated Assessment of Possibilities and Limits For Solar Cell", Advanced Materials 2014, 26, 1622
- [8] J. Berry et al, "Hybrid Organic-Inorganic Perovskites (Hoips): Opportunities and Challenges", Advanced Materials, 27 5102-5112
- [9] B. Lee et al. "Journal of the American Chemical Society", 2014, 136, 15379
- [10] J. Burschka et al. "Journal of the American Chemical Society", 2011, 133, 18042
- [11] X10D Efficient, low-cost, stable tandem organic devices, EU FP7-ICT-2011-7-287818
- [12] Fraunhofer Institute ISE, „Emerging Photovoltaic Technologies“
- [13] M. Freitag, Q. Daniel, M. Pazoki, K. Sveinbjörnsson, J. Zhang, L. Sun, A. Hagfeld, G. Boschloo, „High-efficiency dye-sensitized solar cells with molecular copper phenantroline as solid hole conductor“, Energy & Environmental Science, 2015, 8, 2634
- [14] J.A. Christians, R.C. Fung. P.V. Kamat, "An inorganic hole conductor for organo-lead halide perovskite solar cells. Improved hole conductivity with copper iodide", Journal of American Chemistry, 2014 Jan 15;136(2):758-64
- [15] Global Solar, "The Emerging Electrical Markets for Copper", Bloomsbury Minerals Economics Ltd., July 6, 2010; page 59
- [16] BBF Associates & Konrad J.A. Kundig, „Market Study: current and projected wind and solar renewable electric generating capacity and resulting copper demand“, 2011
- [17] J-S. Jacques, „Copper: critical to sustainable development“, Technical Workshop, London, October 2016