

Jolanta FIEDUCIK<sup>1</sup>

## FOTOWOLTAIKA SKONCENTROWANA, OSIĄGNIĘCIA I PERSPEKTYWY ROZWOJU

W artykule przeanalizowano możliwość wykorzystania promieniowania słonecznego do wytwarzania energii elektrycznej, ze szczególnym uwzględnieniem roli skoncentrowanego słonecznego. Przedstawiono najnowsze osiągnięcia w zakresie parametrów określających wydajności konwersji energii słonecznej na energię elektryczną w różnych rodzajach systemów fotowoltaicznych przy zastosowaniu koncentratorów promieniowania słonecznego. Skoncentrowana fotowoltaika (CPV), przy użyciu wielowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, pozwala na zwiększenie wydajności i obniżenie kosztów instalacji. W artykule przeanalizowano także zastosowanie zintegrowanych mikroogniw fotowoltaicznych wykorzystujących skoncentrowane promieniowanie słoneczne. Zastosowanie systemów sterowania panelami fotowoltaicznymi zapewnia podwyższenie wydajności instalacji fotowoltaicznych. Scharakteryzowano obecny stan fotowoltaiki na Świecie, oraz przedstawiono perspektywy rozwoju.

**Słowa kluczowe:** skoncentrowana fotowoltaika CPV, ogniwa wielozłączowe, soczewki, zwierciadła, trakery słoneczne jedno i dwuosiowe

### 1. Istota fotowoltaiki skoncentrowanej

Jednym z istotnych obszarów przetwarzania energii słonecznej na inne rodzaje energii jest fotowoltaika. Fotowoltaika pozwala na bezpośrednie uzyskanie z energii promieniowania słonecznego, niezwykle wygodnej formy energii, jaką jest energia elektryczna. Techniki przetwarzania energii stosowane w fotowoltaice opierają się na różnych systemach oraz metodach konwersji energii słonecznej. Ostatnio, szczególnie intensywnie rozwijana jest technika przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną oparta o skoncentrowane promieniowanie słoneczne (CPV–Concentrated Photovoltaic) [1, 2]. Dodatkowo, w technice opartej o skoncentrowane promieniowanie słoneczne wykorzystuje się wielowarstwowe ogniwa fotowoltaiczne, które powodują, że wydajność przetwarzania energii słonecznej na elektryczną jest większa około 2,5 raza niż to ma miejsce w klasycznych jednozłączowych ogniwach fotowoltaicznych. Ogniwa

<sup>1</sup> Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Elektrotechniki, Energetyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Oczapowskiego 11 10-900 Olsztyn, jolanta.fieducik@uwm.edu.pl

wielowarstwowe zbudowane są z kilku warstw różnych półprzewodników [3]. Wykorzystują one znacznie szerszy zakres promieniowania słonecznego, niż ogniwa jednowarstwowe. Powoduje to zwiększenie wydajności pojedynczych ogniw fotowoltaicznych z około 15% [4] do około 46% [5], w przypadku ogniw wielozłączowych. Ogniwa wielowarstwowe są jednak znacznie droższe od ogniw jednowarstwowych o takiej samej powierzchni i stąd koncentracja promieniowania słonecznego na niewielkich powierzchniach takich ogniw jest w końcowym rezultacie ekonomicznie bardziej efektywna niż otrzymywanie energii elektrycznej z jednozłączowych ogniw fotowoltaicznych o dużej powierzchni. Także koncentracja promieniowania słonecznego na niewielkich i wydajnych ogniwach jest bardziej efektywna niż budowa kosztownych wielowarstwowych ogniw fotowoltaicznych o dużych powierzchniach bez koncentracji promieniowania słonecznego. Koszt układu skupiającego promieniowanie słoneczne w formie zwierciadła lub soczewki o dużej powierzchni jest znacznie niższy niż koszt wytworzenia wielowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego o dużej powierzchni. Zasada działania CPV opiera się na skupieniu promieniowania słonecznego na małej powierzchni wielowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego z wykorzystaniem soczewek tradycyjnych, soczewek Fresnela lub zwierciadeł parabolicznych. W systemach fotowoltaicznych typu CPV, koncentracja natężenia promieniowania słonecznego  $C$  jest wielokrotnością natężenia naturalnego promieniowania słonecznego. Stopień koncentracji promieniowania słonecznego może być znaczny i w praktyce dochodzi do wartości  $C = 2000x$ . Nie zawsze stopień koncentracji promieniowania słonecznego musi być tak wysoki. W systemach fotowoltaicznych o niskiej koncentracji (LCPV – Low Concentrated Photovoltaic) na ogół wykorzystuje się klasyczne ogniwa krzemowe o nieco wyższej wydajności. W systemach o wysokiej i bardzo wysokiej koncentracji promieniowania słonecznego, wykorzystuje się wielozłączowe ogniwa fotowoltaiczne, które pierwotnie opracowane zostały do zastosowań w instalacjach kosmicznych. Koszty wykonania ogniw wielozłączowych są wysokie, ale wykorzystanie tych ogniw w systemach CPV o wysokiej koncentracji pozwala uzyskać niższe koszty produkcji energii elektrycznej w przeliczeniu na kWh, niż w klasycznych ogniwach [6]. W rzeczywistych układach z tzw. śledzeniem dwuosiowym, można uzyskać wysoką wydajność takich modułów dochodzącą do 27% [7] w stosunku do typowych modułów na bazie krystalicznego krzemu o wydajności około 20,4% lub 20,8% dla ogniw cienkowarstwowych z tellurku kadmu [8-12].

## 2. Koncentracja promieniowania słonecznego

Systemy wytwarzające energię elektryczną z promieniowania słonecznego wykorzystują promieniowanie padające bezpośrednio, promieniowanie skoncentrowane lub przetworzone, jak to ma miejsce w przypadku koncentratorów luminescencyjnych lub termo fotowoltaicznych [13, 14].

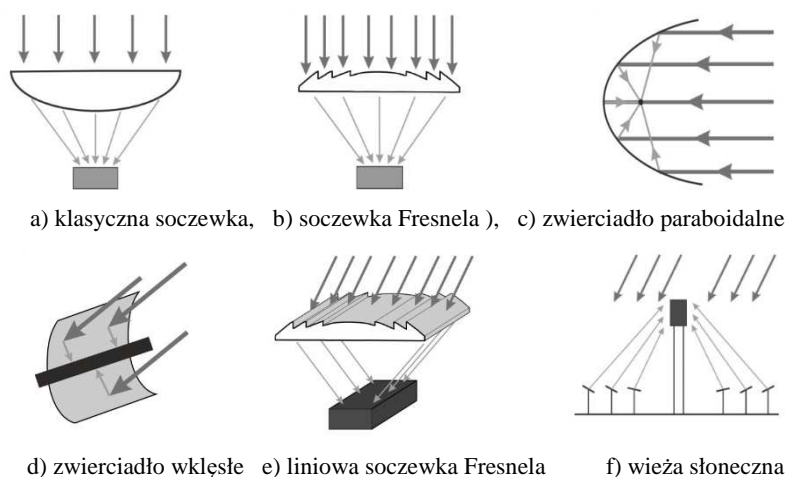
Ogniwa fotowoltaiczne wykorzystujące promieniowanie słoneczne mogą być:

- umieszczone równoległe do powierzchni Ziemi,
- umieszczone pod pewnym kątem lub,
- podążające za ruchem Słońca i ustawione zawsze prostopadle do kierunku padania promieniowania słonecznego.

Wymienione powyżej ustawienia powierzchni ogniw fotowoltaicznych są stosowane dla ogniw o powierzchniach zbliżonych do powierzchni areafu, na którym zostały zainstalowane. Inną, alternatywną metodą wytwarzania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego jest skupienie tego promieniowania z całej powierzchni padania, na niewielkiej powierzchni przetwornika promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Może to być element fotowoltaiczny lub odpowiedni system termodynamiczny wytwarzający prąd elektryczny. W tym ostatnim przypadku mamy do czynienia ze skoncentrowaną fotowoltaiką (CPV) lub skoncentrowaną elektrownią słoneczną (concentrated solar power CSP) [6, 15, 16]. Podstawowe systemy optyczne używane do koncentracji promieniowania słonecznego wykorzystują klasyczne soczewki, soczewki Fresnela [17, 18], zwierciadła płaskie i wklęsłe - paraboliczne, zwierciadła wklęsłe liniowe [19, 20].

W budowanych systemach fotowoltaicznych, koncentracja promieniowania słonecznego dochodzi do wartości będącej wielokrotnością natężenia naturalnego promieniowania słonecznego. Natężenie promieniowania słonecznego w miejscu położenia ogniw fotowoltaicznych, po tak silnym skupieniu dochodzi, więc do olbrzymiej bezwzględnej wartości wynoszącej około  $2 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ .

Aby systemy koncentrujące energię słoneczną mogły właściwie funkcjonować, konieczne jest aby precyzyjnie nadążały za ruchem Słońca. W systemach tych używa się najczęściej wielozłączowych ogniw fotowoltaicznych. Ogniw fotowoltaiczne używane w systemach z koncentratorami muszą być chłodzone.



Rys. 1. Podstawowe metody koncentracji promieniowania słonecznego na podstawie [21]

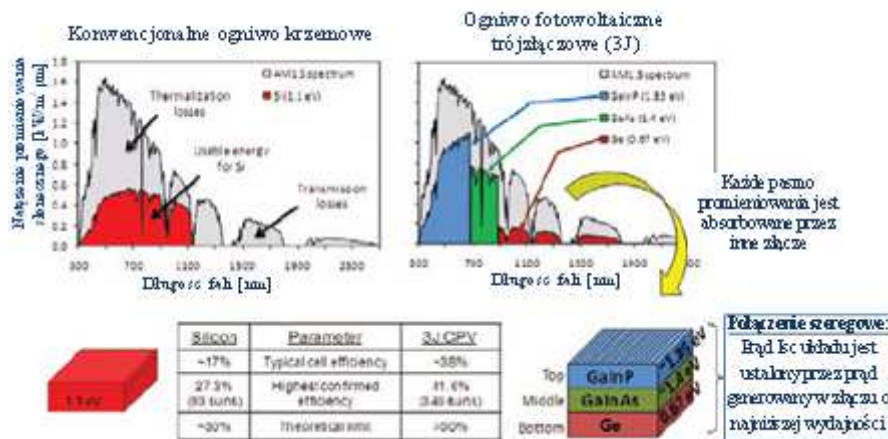
Fig. 1. Basic methods of concentration of solar radiation based on [21]

### 3. Wielozłączone ogniwa fotowoltaiczne

Multizłączone ogniwa słoneczne pochłaniają więcej światła słonecznego niż w przypadku konwencjonalnych ogniw krzemowych. Każda komórka multizłączonego ogniwa jest wykonana i przeznaczona do wychwytywania konkretnej długości fali promieniowania słonecznego. Zwiększa to liczbę fotonów, promieniowanie świetlne jest absorbowane i przekształcane w prąd. Taka konstrukcja i właściwości fizyczne ogniwa pozwalają uzyskać dużą wydajność, ponieważ wykorzystuje się praktycznie całą część widma promieniowania słonecznego, które przenosi prawie całą energię oraz zapobiega się stratom energii promieniowania wewnątrz ogniw na termalizację nośników ładunku, co ma istotne znaczenie w istniejących stratach energii promieniowania w ogniwach jednowarstwowych [22, 23].

Uzyskane na tej drodze ogniwa mogą mieć bardzo dużą wydajność, zwłaszcza w skupionym promieniowaniu słonecznym. Teoretyczna wydajność dla fotowoltaicznych ogniw zawierających nieskończenie dużą ilość złączy jest szacowana na wartość około 68%, przy użyciu nieskoncentrowanego promieniowania słonecznego i na około 87%, przy użyciu skoncentrowanego promieniowania słonecznego [25]. W 2015 roku najwyższa wydajność energetyczna ogniwa wielozłączonego, wynosiła 46% [5]. Omawiane powyżej systemy dotyczyły powierzchni skupiających promieniowanie słoneczne do jednego metra kwadratowego lub większej.

W celu ułatwienia procesów technologicznych i użytkowych zbudowano ogniwa o niewielkich wymiarach.



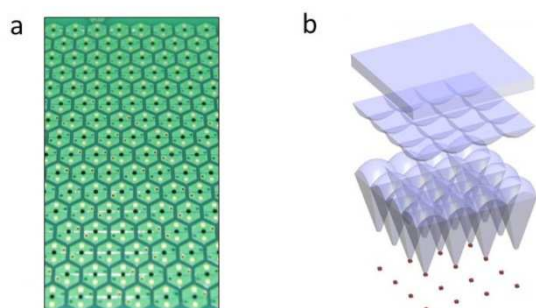
Rys 2. Schemat układu ogniwa konwencjonalnego Si i trójzłączonego InGaP/InGaAs/Ge na podstawie [24], budowa ogniwa wraz z informacjami o przerwie energetycznej poszczególnych ogniw i zakres widmowy, w którym aktywnie wytwarza energię elektryczną poszczególne ogniwo

Fig. 2 Diagram of cell-layer conventional Si cell and InGaP / InGaAs / Ge based on [24], the design of the cells together with information about the band gap of each cell and spectral range, which is actively producing electricity each cell

#### 4. Zintegrowane mikroogniwa fotowoltaiczne wykorzystujące skoncentrowane promieniowanie słoneczne

W poprzednim paragrafie dyskutowane były ogniwa wielozłączowe z systemami ogniskującymi o wymiarach od kilku centymetrów do jednego metra dla pojedynczego ogniwa. Systemy takie mogą być podatne na wiatr i nie zawsze praktyczne w użyciu. W celu omięcia tych problemów technicznych, często buduje się systemy zawierające koncentrator i ogniwo o małych wymiarach. Ogniwo wielozłączowe ma w takim przypadku wielkość rzędu mikronów, a soczewka koncentrująca to promieniowanie jest milimetrycznych rozmiarów [26]. Mikroogniwa fotowoltaiczne (MEPV) wykorzystujące skoncentrowane promieniowanie słoneczne są nową technologią i nie muszą mieć systemów chłodzących. Do produkcji zintegrowanych mikroogniw fotowoltaicznych wykorzystuje się technologie stosowane w przemyśle półprzewodnikowym do produkcji układów scalonych o bardzo dużej skali integracji oraz systemów do wytwarzania elementów optyki w mikroskali. Liniowe rozmiary ogniw PV mogą osiągać wartości od 100 do 300 $\mu\text{m}$  i w przyszłości zminimalizują koszty produkcji modułów. Miniaturyzacja tych ogniw stwarza nowe możliwości w konstrukcji systemów, w których możliwe będzie zredukowanie kosztów wytwarzania 1Wp energii elektrycznej do 1\$ [27, 28]. Aby osiągnąć ten cel wydajność energetyczna modułów fotowoltaicznych powinna osiągnąć wartość powyżej 35%. CPV umożliwia wykorzystanie modułów o dużej wydajności, ale podnosi znacząco dodatkowe koszty dla wytwarzania śledzenia i optyki, związane z wymiarami obiektów z pojedynczymi ogniwami wielozłączowymi. MEPV, wykorzystujące niższe koszty ogniw i optyki powinny zdecydowanie zmniejszyć koszty wytwarzania, wykorzystując wiedzę i technologię budowy po wykorzystaniu dotychczasowych doświadczeń z układów scalonych [29]. Architektura systemu MEPV składa się z sześciokątnych ogniw fotowoltaicznych o maksymalnej odległości od wierzchołka do wierzchołka rzędu pomiędzy 100  $\mu\text{m}$ , - 1000 $\mu\text{m}$  rys. 3a. Zintegrowane mikroogniwa fotowoltaiczne MEPV tworzą układ scalony z soczewkami z tworzywa sztucznego, a całość pokryta jest warstwą szkła rys. 3b.

MEPV mogą być wykorzystane do produkcji elastycznych modułów fotowoltaicznych przetwarzających sztuczne lub naturalne światło na energię elektryczną. Takie elastyczne moduły mogą być gięte, profilowane, aby zmieścić się praktycznie na każdej, niezbyt płaskiej powierzchni, bez pęknięcia i złamania [31]. Umożliwia to umieszczanie takich modułów na różnych elementach budynków, pojazdów, urządzeniach elektroniki użytkowej lub ubraniu. W słoneczny dzień przetworzone na energię elektryczną promieniowanie świetlne może być wykorzystane do bezpośredniego zasilania urządzeń lub gromadzone w akumulatorach. Takie układy pozwalają obniżyć koszty modułów dzięki minimalizacji zużycia materiałów półprzewodnikowych. W dodatku zintegrowana optyka umożliwia wykorzystanie mikroogniw PV o wysokiej wydajności do zwiększenia wydajności energetycznej i obniżenia kosztów pozostałych składników elementów systemu [32].

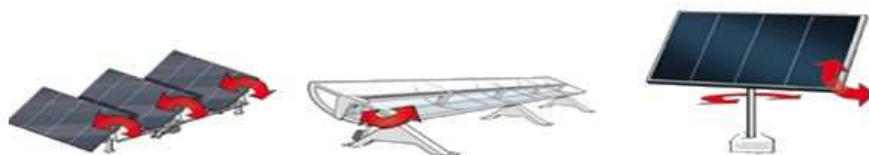


Rys. 3. Schemat zintegrowanego mikroogniwa MEPV na podstwie [30], a) układ w formie układu scalonego składa się z 216 mikroogniw c-Si PV, gdzie każde ma 720  $\mu\text{m}$  szerokości i 20  $\mu\text{m}$  grubości. Każda czarna kropka jest jednym mikroogniwem PV, b) poglądowa ilustracja zintegrowanego mikroogniwa MEPV z optyką

Fig. 3. Integrated microcells MEPV diagram based on [30]

## 5. Systemy sterowania koncentratorami energii słonecznej

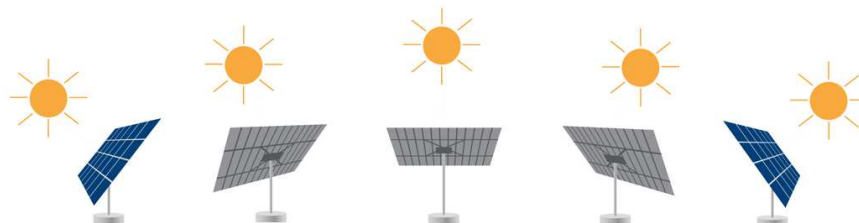
Ogniwa fotowoltaiczne osiągają najwyższą wydajność, kiedy są ustawione prostopadle do kierunku promieniowania słonecznego. Można to zrealizować stosując układy sterowania pozycją paneli w sposób ciągły śledząc ruch pozorny Słońca. Takie układy nadążne zwane tracker'ami mogą realizować zmianę położenia płaszczyzny paneli w jednej lub w dwóch osiach. Zasadę działania takich układów przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zasada działania układów nadążnych w jednej lub w dwóch osiach [32]

Fig. 4. Operational procedure for lag circuits with one or two axes [32]

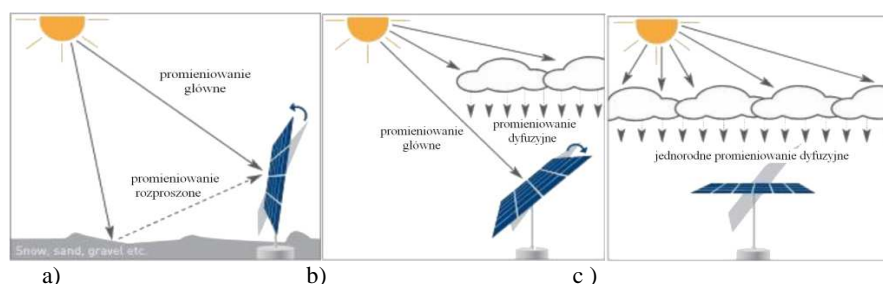
Zmiana położenia Słońca wymusza na układzie nadążnym zmianę położenia płaszczyzny ogniw fotowoltaicznych tak, aby osiągnąć najwyższą wydajność przetwarzania promieniowania słonecznego [33]. W słoneczny dzień i przy braku promieniowania odbitego rys. 5 sterowanie układu nadążnego wykorzystuje promieniowanie bezpośrednie.



Rys. 5. Działania układu nadążnego przy promieniowaniu bezpośrednim w słoneczny dzień na podstawie [32]

Fig. 5. Operational procedure for lag circuits one or two axes based on [32]

Gdy występuje promieniowanie bezpośrednie i rozproszone rys. 6a układ nadążny ustawia płaszczyznę paneli fotowoltaicznych tak, aby maksymalizować całkowitą moc promieniowania (bezpośredniego i rozproszonego) docierającego do układu. W dni z częściowym lub całkowitym zachmurzeniem układ nadążny będzie optymalizować całkowitą moc promieniowania bezpośredniego i dyfuzyjnego rys. 6b lub promieniowania dyfuzyjnego rys. 6c.



Rys. 6. Działanie układu nadążnego przy promieniowaniu rozproszonym i dyfuzyjnym na podstawie [32]

Fig. 6. Servo system performance with direct exposure to sun radiation based on [32]

Na rys. 7 przedstawiono przykładowe konstrukcje tracker'ów z zamontowanymi panelami słonecznymi.

Zastosowanie układów nadążnych zwiększa uzysk energii dzięki redukcji strat wynikających z kąta padania promieni słonecznych innego niż prostopadły, a w przypadku układów o dwóch osiach, straty te są minimalne. Zastosowanie układów nadążnych zwiększa od 20% do 40% [17, 18] wydajność przetwarzania energii promieniowania, w zależności od poziomu nasłonecznienia na danym obszarze i pory roku. W przypadku większego nasłonecznienia, trackery istotnie podnoszą efektywność w porównaniu z konstrukcjami stacjonarnymi[35]. Ukła-





Rys. 7. Konstrukcje tracker'a z panelami słonecznymi [34]

Fig. 7. Structures tracker with solar panels [34]

dy o podwójnej osi stosowane powinny być przy wysokiej koncentracji promieniowania (PV HCPV) - 100 Słońc lub większej - natomiast w niskich koncentracjach (2-100 Słońc) mogą być użyte układy o jednej osi. Dla modułów CPV układy nadążne powinny być bardzo precyzyjne i błąd ustawienia nie powinien przekraczać  $1,0^\circ$ , podczas gdy dla typowych modułów PV dokładność ustawienia do  $3^\circ$  nie wpływa praktycznie na wydajność energetyczną. Na dokładność śledzenia mogą mieć wpływ zmiany temperatury, wiatr, kondensacja, zabrudzenie czujników, czy też zużycie w trakcie eksploatacji układów mechanicznych lub elektrycznych [36, 37].

## 6. Wydajność systemów fotowoltaiki skoncentrowanej

Firmy z branży fotowoltaiki na całym świecie ciągle pracują nad podwyższeniem wydajności swoich ogniw. W 2015 roku rekordowa sprawność polikrystalicznego PV zbudowanego na bazie krzemu wyniosła 21,25% [5]. Wydajność komercyjnych modułów polikrystalicznych wynosi 15,6-16,1% bez koncentracji promieniowania słonecznego. Natomiast wydajność monokrystalicznego ogniwa fotowoltaicznego obecnie wynosi około 25% [5].

Istnieje także możliwość zamontowania ogniw fotowoltaicznych po stronie przeciwnej do naświetlanej. Technologia dwustronnych modułów fotowoltaicznych jest nowym kierunkiem w rozwoju PV. Taką możliwość daje generowanie energii nie tylko przez przednią stronę modułów, ale także przez tylną – dzięki wykorzystaniu światła odbitego (tzw. efekt albedo). Producenci modułów fotowoltaicznych w tej technologii podają, że mogą one generować nawet o 30% więcej energii niż moduły jednostronne [38].

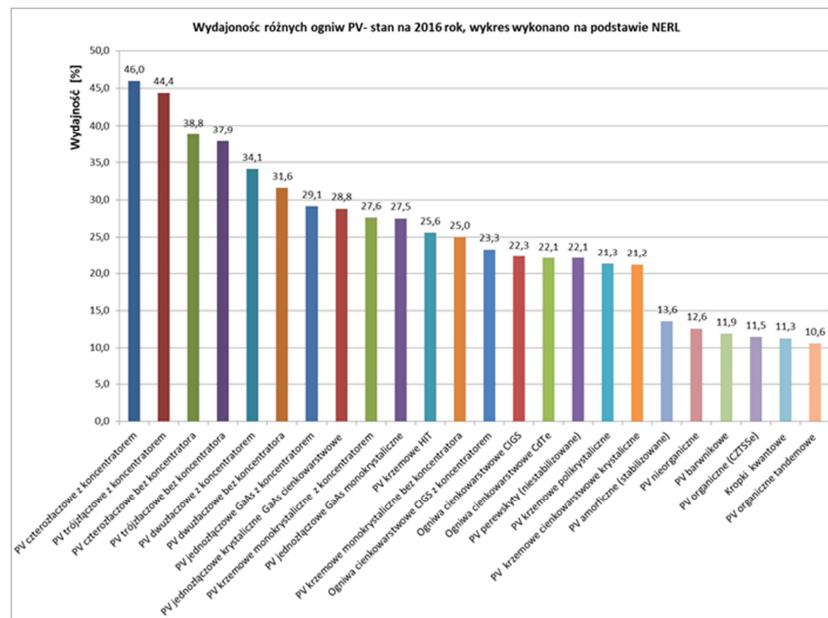
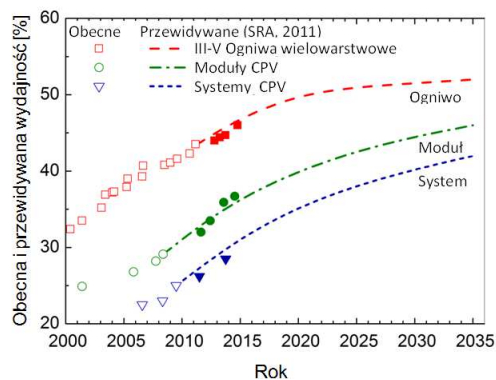


Sprawność czteroźłączowego ogniwa skoncentrowanego CPV wyniosła maksymalnie 46%, przy zastosowaniu soczewek Fresnela [5]. Wysoka koncentracja promieniowania słonecznego HCPV nadaje się do obszarów o wysokim natężeniu promieniowania bezpośredniego [39]. Poprzez koncentrację z odpowiednią optyką skupia się promieniowanie słoneczne na małych powierzchniach ogniw słonecznych. Standardem stają się poziomy natężenia powyżej  $C=400 \times$ . Wydajność ogniwa jest zależna od kilku czynników, takich jak napięcie obwodu otwartego, prądu zwarcia oraz czynnika FF. Każdy z tych czynników zależy od oświetlenia. Dla ogniw wydajność wraz z oświetleniem różnie rośnie od około 300 do 800 Słońc, a potem zwykle maleje [40-43].

Obok na rys. 8 przedstawiono obecne i oczekiwane wydajności ogniw, modułów i systemów skoncentrowanej fotowoltaiki CPV [44].

Rys. 8. Wydajność ogniw MJ, modułów i systemów CPV obecnie i w przyszłości na podstawie [45]

Fig. 8. CPV performance now and in the future based on [45]



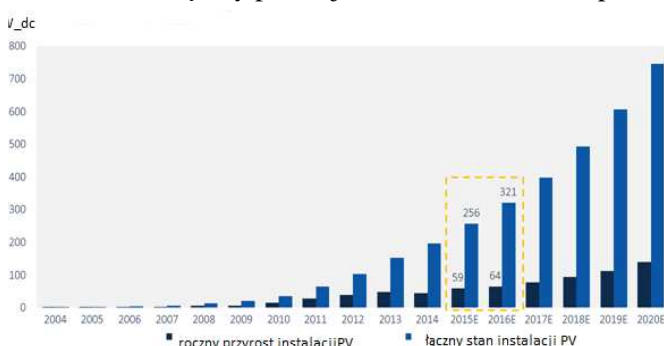
Rys. 9. Wydajności różnych ogniw PV na podstawie [5, 46]

Fig. 9. Performance of different PV cells based on [5, 46]

Reasumując ogniwa CPV wielozłączowe osiągają wydajność 46%, a systemy z wielozłączowymi CPV wytwarzające użyteczny prąd zmienny posiadają łączną wydajność około 30%, natomiast klasyczna fotowoltaika w systemach około 13%. Jest to około 2,5 razy mniej.

## 7. Elektrownie CPV na świecie

W Polsce w ostatnim czasie liczba elektrowni fotowoltaicznych PV wciąż wzrasta, ale ciągle nie ma instalacji fotowoltaicznych skoncentrowanych CPV. W roku 2015 w Polsce powstały elektrownie fotowoltaiczne PV o mocy ok. 50 MW, a ich łączny potencjał w Polsce wzrósł do ponad 74 MW, podczas gdy na



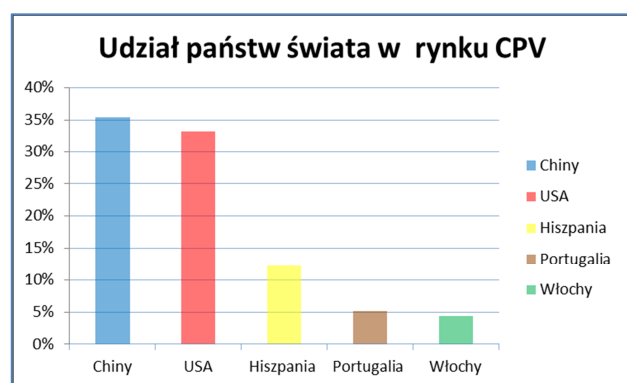
koniec 2014 r. wynosił 21 MW, a na koniec 2013 r. zaledwie 1,9 MW [47].

Światowy rynek produkcji energii elektrycznej z PV od 2004 do 2020 roku przedstawiono na rys. 10.

Rys. 10. Wykres produkcji energii z PV na świecie i perspektywy rozwoju na podstawie [48]

Fig. 10. Chart production of electricity from PV in the world based on [48]

Przewiduje się, że zainstalowana moc skoncentrowanej fotowoltaiki CPV na świecie wzrośnie ponad czterokrotnie do 1,3 GW do 2020 roku, z 282,5 MW w 2014 roku [49]. Poniżej na rys. 11 przedstawiono udział państw w których są zainstalowane CPV w zależności od mocy całkowitej w MW. Rynek producen-



tów paneli CPV jest zdominowany przez firmy z Chin i USA, które posiadają w nim udział na poziomie odpowiednio 35,4% i 33,3%. Trzecie miejsce w tej analizie zajmują firmy z Hiszpanii 12,2%, a czwarte i piąte firmy z Portugalii i Włoch 5,1% i 4,3% [50].

Rys. 11. Udział państw świata w rynku CPV na podstawie [50]

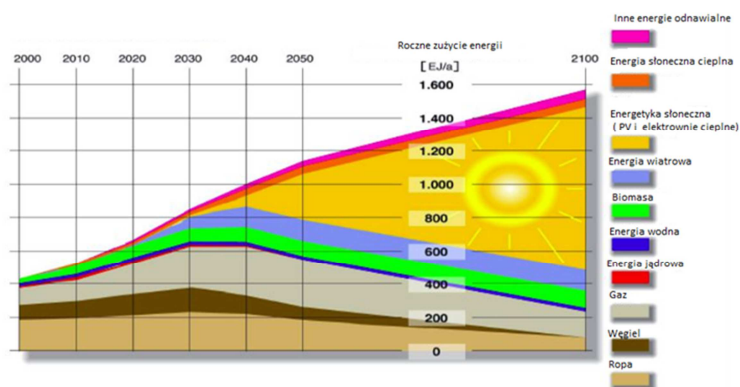
Fig. 11. Participation of the world market for CPV based on [50]

## 8. Podsumowanie

Rozwój fotowoltaiki w Polsce i na Świecie jest konieczny i naturalny. Firmy produkujące moduły fotowoltaiczne będą nadal walczyć o każdą dziesiątą część procenta wydajności. Należy podkreślić, że spore znaczenie ma redukcja strat na poziomie ogniwo-panel, technologie obustronnych paneli, trackerów i systemów skupiających promieniowanie słoneczne [51].

Dynamiczny rozwój nowych technologii w branży fotowoltaicznej zapewni wzrost wydajności całych instalacji. Ze względu na cenę i ograniczenia w wolnej powierzchni preferowane będą instalacje skoncentrowane CPV [52].

Poniżej, na rys.12 przedstawiono wykres z prognozami globalnego wykorzystania źródeł energii.



Rys. 12. Prognoza globalnego wykorzystania źródeł energii na podstawie [53]

Fig. 12. The forecast for global use of renewable Energy based on [53]

Jak wynika z prognoz jedna czwarta energii w 2050 roku będzie wykorzystywana z energii słonecznej [54, 55].

Szacuje się, że pokrycie zaledwie 0,5% powierzchni kraju panelami PV pozwoliłoby w całości zaspokoić zapotrzebowanie na energię elektryczną.

## Literatura

- [1] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) and US National Renewable Energy Laboratory (NREL), Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology (Freiburg, Germany and Golden, CO: 2016), pp. 6-7.
- [2] Zhang H.L. and others: Concentrated solar plants: review and design methodology. Renewable and Sustainable energy reviews 22, 2013, pp. 466–481.
- [3] Choubey P. C., Qudhia A. and Dewangan R.: A Review: Solar Cell Current Scenario and Future Trends, Recent Research in Science and Technology, 4(8): 2012, pp. 99–101.
- [4] Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies, GENI, 2011.

- [5] Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W.: Solar cell efficiency tables (version 47), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 24, 2016, pp. 3–11.
- [6] Scott and others: Cost Analysis for Flat-Plate Concentrators Employing Microscale Photovoltaic Cells, *Photovoltaic Specialist Conference (PVCS)*, 2013 IEEE, 39th, pp. 3431–3434.
- [7] De Simón-Martín M., Alonso-Tristán C. and Montserrat Díez-Mediavill: Performance Indicators for Sun-Tracking Systems: A Case Study in Spain. *Energy and Power Engineering*, 2014, vol. 6, pp. 292-302.
- [8] Marszałek, K. Stapiński, T.: Rozwój cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, *Prace Instytutu Elektrotechniki, Rocznik 2014, Z. 266, Strony 199—206*.
- [9] Wu X.: High-efficiency Polycrystalline CdTe Thin-film Solar Cells, *Sol. Energ.*, vol. 77, 803-814, 2004.
- [10] Mattson B.: CIGS Solar Cells, *Solar Power World*, 2016.
- [11] Weisse J. M.: *Thermoelectric Generators, Introduction to the Physics of Energy*, 2010.
- [12] Kurtz S.: Opportunities and Challenges for Developing of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry, *NREL Technical Report NREL/TP-520-43208*, 2009.
- [13] Godlewski J.: Fotowoltaika wysokich oświetleń, *Czysta Energia 1/2014*, pp. 30-31.
- [14] Kaysir M. D., Fleming S., MacQueen R.W., et al.: Luminescent solar concentrators utilizing stimulated emission, *Optics Express Vol. 24*, 2016, pp. A497-A505.
- [15] Lorenzin N., Abánades A.: A review on the application of liquid metals as heat transfer fluid in Concentrated Solar Power technologies, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, 2016, pp. 6990–6995.
- [16] Romero M., González-Aguilar J.: Solar thermal CSP technology, *Energy and Environment*, 2014, Volume 3, pp. 42–59.
- [17] Hongn M., Larsen F. S., Gea M., Altamirano M.: Least square based method for the estimation of the optical end loss of linear Fresnel concentrators, *Solar Energy 111*, 2015, pp. 264–276.
- [18] Rajae M., Ghorashi S.M.B.: Experimental measurements of a prototype high-concentration Fresnel lens and sun-tracking method for photovoltaic panel's efficiency enhancement, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, vol. 9, 2015, pp. 251-259.
- [19] Fieducik J., Godlewski J.: Ekonomiczne i środowiskowe aspekty skoncentrowanej fotowoltaiki, *Przegląd Elektrotechniczny nr 9/2015*, pp 24-26.
- [20] Dumiszewska, E. Knyps, P. Wesołowski, M. Strupiński, W.: Wielozłączone ogniwa słoneczne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, Tom R. 90, nr 5, str. 215—221.
- [21] Khamooshi M. i inni: A Review of Solar Photovoltaic Concentrators, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, p.17.
- [22] King R. R.: 40% Efficient Metamorphic GaInP/GaInAs/Ge Multijunction Solar Cells, *Appl. Phys. Lett.* 90, 183516. 2007.
- [23] Kurtz S.: Multijunction Solar Cells for Conversion of Concentrated Sunlight to Electricity, *Optics Express* 18, 2010, p. 73.
- [24] Yoon H., Banin Y.: *Refractive Primary Optics Based on All-Glass Lens*. Solergy, 2011.
- [25] De Vos A.: Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol,13, 1980, pp. 839-846.

- [26] Bardhan R. A., Arup D., Mrinmoyee Ch. et al.: Black silicon solar cell: analysis optimization and evolution towards a thinner and flexible future, *Nanotechnology* 2016, Volume: 27 pp. 5302-5302.
- [27] Paap S., Gupta V., Cruz-Campa J. L., Okandan M., Sweatt W., and others: Cost Analysis for Flat-Plate Concentrators Employing Microscale Photovoltaic Cells, 2013, *Photovoltaic Specialists Conference* pp. 3431-3434.
- [28] Cost Analysis of Solar Photovoltaics, Raport International Renewable Energy Agency, 2012.
- [29] Lentine, A. Nielson G., Okandan M., Sweatt W.C. and others: Optimal cell connections for improved shading, reliability, and spectral performance of microsystem enabled photovoltaic (MEPV) modules. 35th IEEE photovoltaic specialists conference, 2010, *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 3048-3054.
- [30] Paap S., Nat S., Gupta V., Cruz-Campa J.S., Okandan M. more authors: Cost analysis for flat-plate concentrators employing microscale photovoltaic cells, 2013, *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. pp. 3431 – 3434.
- [31] Garboushian V. and others: Integrated high-concentration PV, Near-term alternative for low-cost large scale solar electric power, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 47, 1997, pp. 315–323.
- [32] <http://www.degerenergie.de/en/higher-yield-how.html> {dostęp 24.05.2016 r.}.
- [33] <http://www.czasopismologistyka.pl/artykuly-naukowe/send/333-artykuly-na-plycie-cd-1/7572-artykul>{dostęp 24.05.2016 r.}
- [34] <http://odnawialnezrodlaenergii.pl/energia-sloneczna-aktualnosci/item/1098-trackery-solarne-czy-warto-sie-zdecydowac> {dostęp 24.05.2016 r.}.
- [35] Fathabadi H.: Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators, 2016, *Renewable Energy* Volume 95, pp. 485–494.
- [36] Carpanelli M., Borelli, G., Verdilio D., De Nardis D., Migali F., Cancro C., Graditi G.: Characterization of the Ecosole HCPV Tracker and Single Module Inverter, 11th International conference on concentrator photovoltaic systems, *AIP Conference Proceedings*, Volume: 1679, 2015.
- [37] Luque-Heredia I., Magalhães P., Muller, M.: CPV Tracking and Trackers, *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, Algora C., Rey-Stolle I. 2016.
- [38] <http://panele-fotowoltaiczne.pl/technologie-fotowoltaiczne/dwustronne-panele-fotowoltaiczne-na-ile-podnosza-oplacalnosc-inwestycji>{dostęp 24.05.2016 r.}.
- [39] Micheli, L., Fernandez E.F., Almonacid F., Mallick T.K., Tapas K., Smestad G.P.: Performance, limits and economic perspectives for passive cooling of High Concentrator Photovoltaics, *Solar energy materials and solar cells*, Volume, 153, 2016, pp. 164-178.
- [40] Wang Z., Zhang H., Zhao W., Zhou Z., Chen M.: The Effect of Concentrated Light Intensity on Temperature Coefficient of the InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell, *The Open Fuels & Energy Science Journal* 8, 2015, pp. 106-111.
- [41] Messmer E.R.: Cell Efficiency vs. Module Power Output: Simulation of a Solar Cell in a CPV Module. Chapter 11. 2013.
- [42] Bunea G, Wilson K, Meydbray Y, Campbell M, Ceuster DD.: Low Light Performance of Mono-Crystalline Silicon Solar Cells, In: 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 2006, pp. 1312–1314.

- [43] McConnell R., Fthenakis V. Concentrated Photovoltaics. Third Generation Photovoltaics. 2012.
- [44] Domínguez, C., Herrero, R. and Antón, I.: Characterization of CPV Modules and Receivers, in Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology, 2016.
- [45] Philipps S. P., Bett A., W., Horowitz K. and Kurtz S.: Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology, CPV Report, Fraunhofer ISE, NREL, January 2015.
- [46] <http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/hires/2016/1-claimsforsol.jpg> {dostęp 16.07.2016r.}.
- [47] <http://www.teraz-srodowisko.pl/media/pdf/aktualnosci/2208-Raport-rozwoj-PV.pdf> {dostęp 16.07.2016r.}.
- [48] [http://www.greentechmedia.com/content/images/articles/gtmglobal\\_install.png](http://www.greentechmedia.com/content/images/articles/gtmglobal_install.png) {dostęp 24.05.2016 r.}.
- [49] <http://renewables.seenews.com/news/global-cpv-capacity-to-hit-1-3-gw-by-2020-globaldata-495389> {dostęp 16.07.2016 r.}.
- [50] <http://pyportal.pl/nawosci/5755/raport-liczba-instalacji-cpv-osiagnie-w-2020-roku-1gw> {dostęp 24.05.2016 r.}.
- [51] Międzynarodowa Agencja Energii Odnawialnej IRENA, Perspektywy rozwoju energii odnawialnej w Polsce 2015.
- [52] Zimmermann S., Helmers H., Tiwari M.K., Michel B. Paredes S. Wiesenfarth M. Bett A.W., Poulikakos D.: A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, Volume: 89. pp. 514-521.
- [53] [solarwirtschaft.de](http://solarwirtschaft.de) {dostęp 24.05.2016 r.}.
- [54] Wang U.: The Rise of Concentrating Solar Thermal Power, Renewable Energy World, 2011.
- [55] Antonini A.: Photovoltaic Concentrators-Fundamentals, Applications, Market & Prospective, Solar Collectors and Panels, Theory and Applications, 2011.

*Podziękowanie: Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania Panu Profesorowi Janowi Godlewskiemu za cenne uwagi i naukowe dyskusje, które przyczyniły się do powstania niniejszej publikacji.*

## CONCENTRATED SOLAR, ACHIEVEMENTS AND OUTLOOK

### Summary

The article examines the possibility of using solar energy to generate electricity, with a particular focus on the role of the concentrated solar radiation. Describes the latest developments in the field of parameters that specify a conversion efficiency of solar energy into electricity in different types of photovoltaic systems using solar concentrators. Concentrated photovoltaics (CPV), using multilayer photovoltaic cells, allow an increase in performance and reduces the cost of installation. The article also examines the use of the integrated multi PV microcell utilizing concentrated solar radiation. Usage of navigated PV module systems provides an increase in performance of the photovoltaic installation. The article describes the current state of photovoltaics all over the world, and shows the prospects for future development.

**Keywords:** concentrated photovoltaics CPV, cells multi-junction, lenses, mirrors, solar tracker one- and two-axis

*Przesłano do redakcji: 28.07.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 15.09.2016 r.*

DOI: 10.7862/rb.2016.142