

## KOMERCYJNE ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII CPV NA ŚWIECIE

## Streszczenie

W artykule dokonano analizy aktualnego stanu wiedzy na temat technologii CPV, poprzez zbadanie jego statusu na rynku, w przemyśle oraz badaniach naukowych. Omówiono technologie ogniw fotowoltaicznych stosowanych w systemach CPV oraz układy optyczne służące do koncentracji promieniowania słonecznego. Przedstawiono przykłady funkcjonujących elektrowni wykorzystujących technologię koncentracji promieniowania słonecznego. Zaprezentowano całkowitą moc zainstalowanych na świecie elektrowni CPV oraz dokonano analizy kosztów inwestycyjnych. Oszacowano koszt produkcji energii elektrycznej w systemach CPV.

## WSTĘP

W ostatnich latach coraz mocniej rozwija się technologia koncentracji promieniowania słonecznego i przetwarzania energii wiązki promieniowania w ogniwach fotowoltaicznych (CPV - Concentrated Photovoltaics). Firmy, wraz z ośrodkami naukowo-badawczymi, zajmującymi się wytwarzaniem ogniw, pracują nad znalezieniem sposobu na przekształcanie energii słonecznej w energię elektryczną o możliwie niskim koszcie całkowitym za kilowatogodzinę. Wartość światowego rynku energii słonecznej (włączając w to: moduły PV, komponenty systemowe oraz instalacyjne) wzrosła z 2,5 miliarda dolarów w roku 2000 do 71,2 miliarda dolarów w roku 2010 [1,2].

Pierwsza generacja ogniw fotowoltaicznych, określana również mianem krzemowych ogniw fotowoltaicznych, jest obecnie technologią najczęściej wybieraną w przypadku zastosowań naziemnych, stanowiąc więcej niż 85% rynku ogniw fotowoltaicznych. Rekordowe sprawności dla ogniw monokrystalicznych wynoszą obecnie 25%, jednak produkty dostępne do zastosowań komercyjnych charakteryzują się sprawnością przetwarzania energii poniżej 23%. Znana jest druga generacja, opierająca się na osadzonych cienkowarstwowo półprzewodnikach oraz trzecia, która sama w sobie stanowi na razie cel do badań. W niniejszym artykule omówiono ogniwo fotowoltaiczne oraz systemy wykonane w technologii CPV.

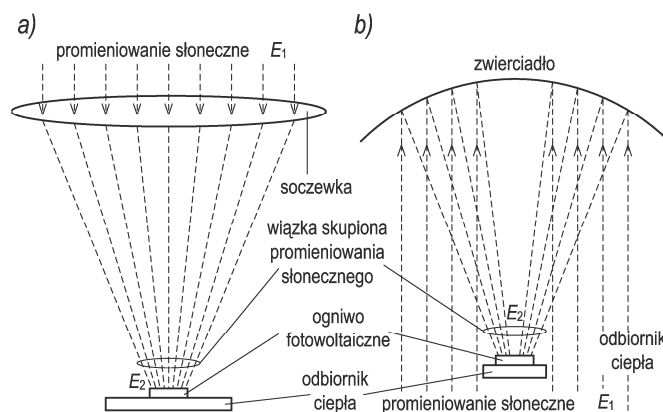
## 1. TECHNOLOGIA KONCENTRACJI PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

## 1.1. Budowa systemu CPV

Konstrukcje systemów CPV zawierają: element skupiający promieniowanie słoneczne oraz element przetwarzający wiązkę promieniowania na energię elektryczną (rys. 1). Elementami skupiającymi promieniowanie słoneczne (koncentratorami promieniowania) mogą być zarówno soczewki (rys. 1a) jak i zwierciadła (rys. 1b) skupiające. Promieniowanie słoneczne o natężeniu  $E_1$ , docierające do koncentratora w postaci soczewki, ulegają załamaniu tworząc wiązkę promieniowania skupionego o natężeniu  $E_2$ , przy czym  $E_2 > E_1$  (rys. 1a). W koncentratorach zbudowanych ze zwierciadła wiązka promieniowania skupionego o natężeniu  $E_2$ , tworzona jest na skutek odbicia promieniowania o natężeniu  $E_1$ , od powierzchni koncentratora (rys. 1b).

Istnieje wiele rozwiązań dotyczących budowy systemów soczewkowych. Jednym z najczęściej spotykanych są systemy CPV budowane są na bazie soczewek Fresnela. Ten rodzaj soczewki

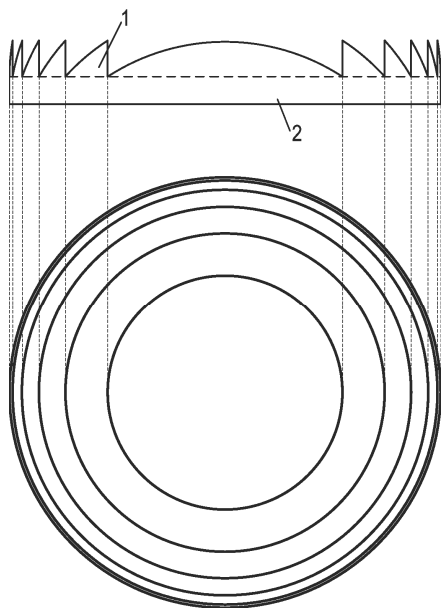
składa się z kilku złączonych ze sobą koncentrycznych pierścieni, których przekroje mają kształt pryzmatów o różnych profilach (rys. 2). Konstrukcja ta powoduje, że soczewka Fresnela charakteryzuje się krótką ogniskową przy zachowaniu niskiej masy w porównaniu z klasyczną soczewką. Dodatkową zaletą jest niski koszt wykonania soczewki oraz zastosowanie do jej produkcji tworzyw sztucznych.



Rys. 1. Budowa systemu CPV: a) z koncentratorem soczewkowym, b) z koncentratorem zwierciadlanym

Systemy koncentracji promieniowania słonecznego wykorzystujące technikę odbicia promieni buduje się przy wykorzystaniu talerza parabolicznego wyklejonego folią refleksyjną do odbijania światła [3]. Wytworzone w ten sposób zwierciadło swoim wyglądem przypomina zwykłą antenę satelitarną. W ogniskowej zwierciadła umieszczone jest ogniwo fotowoltaiczne wraz z odbiornikiem ciepła. Duże zwierciadła składają się z mniejszych luster prostokątnych lub okrągłych tworzących większe czasze. Produkowane są również konstrukcje przypominające rynnę. Tego typu rozwiązania znajdują zastosowanie głównie w systemach podgrzewających czynnik roboczy.

Przemysł CPV rozwija się przede wszystkim w USA, Meksyku, Australii i Hiszpanii. Jeden z systemów CPV zainstalowano na uniwersytecie w Ferrarze we Włoszech (rys. 3). W roku 2009 łączna moc elektrowni CPV na świecie wynosiła zaledwie 1 MW. Potencjał funkcjonujących elektrowni CPV to około 33 MW. Kolejne 700 MW mocy w systemach CPV jest w trakcie realizacji.



Rys. 2. Soczewka Fresnела: 1 – pierścien o przekroju pryzmatu, 2 – przezroczysta podstawa

Jedną z firm pracującą nad technologią CPV do pozyskiwania energii z promieniowania słonecznego jest firma IBM. W maju 2008 r. naukowcy firmy IBM użyli dużej soczewki do skupienia światła słonecznego o mocy ok. 230W w ogniwie o powierzchni zaledwie jednego centymetra kwadratowego. Skoncentrowaną energię przekształcono w 70 W użytecznej mocy elektrycznej. Według ekspertów z firmy IBM, że po rozwiązaniu dodatkowych problemów technicznych firma rozpocznie masową produkcję nowych ogniw, co powinno wpłynąć na zmniejszenie kosztów zakupu elektrowni fotowoltaicznej wyposażonej w koncentratory promieniowania słonecznego.



Rys. 3. System CPV – Uniwersytet w Ferrarze – Włochy (fot. K. Kozerski)

Zaletą technologii CPV, w porównaniu do tradycyjnej fotowoltaiki, jest większa efektywność konwersji, sięgająca nawet 40%. Analitycy wskazują jednak na przewagę "płaskiej" fotowoltaiki w obliczu szybkiego spadku cen modułów fotowoltaicznych. Szacuje się jednak, że w perspektywie dekady technologia CPV ma osiągnąć przewagę kosztową nad tradycyjną fotowoltaiką.

Zdaniem GTM Research, koszt produkcji energii w systemach CPV w 2020 roku, ma osiągnąć poziom 0,07 \$/kWh, podczas gdy

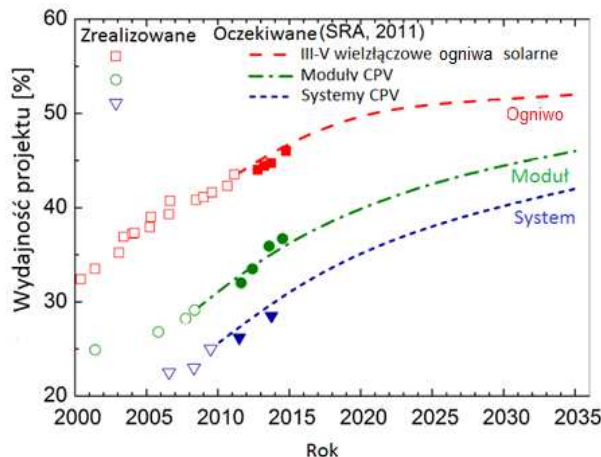
przeciętny koszt produkcji 1 kWh w systemach złożonych z modułów polikrystalicznych ma wynosić 0,09 \$/kWh.

## 1.2. Badania i technologia skoncentrowanej fotowoltaiki CPV

Elementami wykorzystywanymi w systemach CPV są układy optyczne, które powinny rekompensować koszty stosowanych w tej technologii wysoko wydajnych ogniw fotowoltaicznych. Wykonanie optycznego układu skupiającego powinno wpłynąć na uzyskanie konkurencyjnych cen wytwarzanej energii elektrycznej w porównaniu do tradycyjnych elektrowni fotowoltaicznych [4].

Systemy CPV są dedykowane do wytwarzania energii elektrycznej w nasłonecznionych regionach, gdzie wartości bezpośredniego promieniowania wynoszą ponad 2000 kWh/m<sup>2</sup> rocznie. Systemy te są zróżnicowane w zależności od współczynnika koncentracji wykorzystanej technologii (tab. 1). Ponad 90% planowanych inwestycji do końca listopada 2014, zakładało użycie wysoko skoncentrowanej fotowoltaiki – HCPV, w której stosowane są dwuosiowe układy nadążne zapewniające położenie modułów CPV prostopadle do kierunku promieniowania słonecznego. Technologia HCPV charakteryzuje się koncentracją energii promieniowania słonecznego rzędu od 300 do 1000 razy większej niż energia promieniowania słonecznego docierająca na powierzchnię Ziemi [4]. Koncentracja promieniowania słonecznego na małym obszarze umożliwia użycie wysoko wydajnych, fotowoltaicznych ogniw wielozłączowych zbudowanych z półprzewodników III-V grupy [8] (np. trójzłączowe ogniwo fotowoltaiczne wykonane z galu, indu, fosforu, arsenku oraz germanu (GaInP/GaInAs/Ge). Nisko skoncentrowana fotowoltaika (LCPV – low concentrated photovoltaics) charakteryzuje się współczynnikiem koncentracji mniejszym niż 100 raz. Systemy HCPV oraz LCPV wykorzystują głównie ogniwa zbudowane z krystalicznej postaci krzemu (c-Si) i mogą być wspomagane technologią podążania za słońcem w jednej lub dwóch płaszczyznach.

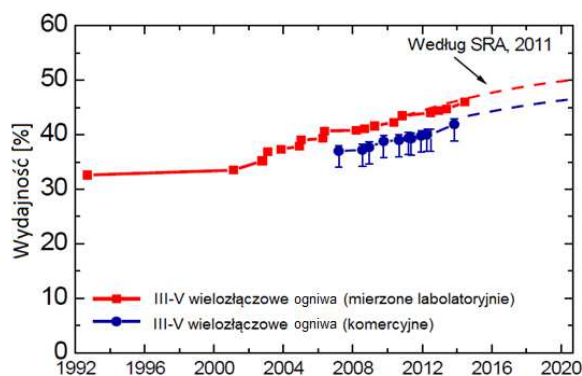
Wysoka efektywność jest jednym z kluczowych czynników wpływającym na zwiększenie konkurencyjności technologii HCPV. Dlatego badania ukierunkowane są na zwiększenie efektywności systemów HCPV na wszystkich poziomach produkcji, począwszy od ogniwa, przez moduły, a kończąc na całym systemie. Od 2000 roku odnotowuje się wzrost efektywności wielozłączowych ogniw fotowoltaicznych, modułów CPV oraz systemów CPV (rys. 4). Postęp poczyniony na przestrzeni ostatnich piętnastu lat wskazuje na duże zainteresowanie oraz potencjał tej technologii [18,19]. Kierunek rozwoju bazuje na oczekiwaniach European Photovoltaic Technology Platform z 2011 roku. W najbliższych latach przewidywany jest znaczny wzrost zaplecza badawczo-przemysłowego w stosunku do stanu obecnego.



Rys. 4. Rozwój wydajności poszczególnych elementów technologii CPV [27]

Wydajność wielozłączowych ogniw fotowoltaicznych jest kluczowym czynnikiem dla obniżenia kosztu energii elektrycznej, wyprodukowanej za pomocą technologii HCPV. Od 2002 roku wydajność ogniw wzrastała średnio o 0,9 % rocznie. W 2009 roku osiągnięto rekordową sprawność 41,6% trójzłączowych ogniw CPV [9, 17]. W tabeli 1 pokazano przykłady ogniw fotowoltaicznych, które osiągnęły rekordowe wartości sprawności powyżej 41%. Ogniwa fotowoltaiczne produkowane obecnie przez firmę Sharp [6] i Instytut Fraunhofer [7] osiągnęły sprawność przetwarzania energii na poziomie 44,4 % i 46,0 % dla trój i cztero-złączowych ogniw. Wzrost sprawności ogniw uzyskiwanej w warunkach laboratoryjnych przekłada się na zwiększanie sprawności ogniw CPV przeznaczonych do zastosowań komercyjnych (rys. 5).

Sprawność wielozłączowych ogniw przeznaczonych do użytku komercyjnego zawiera się w granicach od 38% do 42%. Zestawienie firm produkujących wielozłączowe ogniwa fotowoltaiczne zawarte jest w tabeli 1.



Rys. 5. Porównanie wydajności uzyskiwanej w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach rzeczywistych dla wielozłączowych ogniw fotowoltaicznych [27]

Tab. 1. Budowa ogniw wielowarstwowych

Budowa złącza	Sprawność	Koncentracja	Producent
	[ % ]	[ - ]	
GaInP/GaAs/ GaInAsP/GaInAs [10]	46,0	508	Instytut Fraunhofer
GaInP/GaAs/GaInAs [3]	44,4	302	Sharp
GaInP/GaAs/ GaInNAs [11]	44,0	942	Solar Junction
GaInP/GaAs/GaInAs/ GaInAs [12]	43,8	327	NREL
GaInP/Ga(In)As/ GaInAs [13,14]	42,6	327	NREL
GaInP/Ga(In)As/ GaInAs [13,14]	40,9	1093	NREL
GaInP/Ga(In)As/ GaInAs [13,14]	42,4	325	Emcore
GaInP/Ga(In)As/ GaInAs [13,14]	41,0	1000	Emcore
GaInP/GaAs/wafer/GaInAs	42,3	406	Spire [15]
GaInP/Ga(In)As/Ge [6]	41,6	364	Spectrolab
GaInP/GaInAs/Ge [16]	41,1	454	Instytut Fraunhofer

Omawiane wielozłączowe ogniwa fotowoltaiczne są zbudowane z pierwiastków III i V grupy układu okresowego. Poszczególne warstwy półprzewodników w ogniwie posiadają różną długość przerwy energetycznej na złączu p-n. Długość przerwy energetycznej

jest ściśle związana z energią potrzebną do zerwania wiązania pomiędzy elektronem a atomem znajdującym się w danym półprzewodniku. Warstwy półprzewodników w wielozłączowym ogniwie fotowoltaicznym uszeregowane są od największej długości przerwy energetycznej do najmniejszej. Warstwa o największej przerwie energetycznej znajduje się na górze złącza, zaś warstwa o najmniejszej długości przerwy energetycznej znajduje się na spodzie złącza. Redukuje to straty spowodowane termalizacją, ponieważ foton są absorbowane przez warstwy z przerwami energetycznymi o energii zbliżonej do energii fotonu. Wykorzystanie bezpośredniej przerwy energetycznej półprzewodników z grupy III-V, ułatwia wysoką absorpcję światła, nawet w cienkich warstwach.

Najbardziej powszechne wielozłączowe ogniwa fotowoltaiczne oraz systemy koncentratorów są zbudowane z sieciowo dopasowanych trójzłączowych ogniw fotowoltaicznych Ga<sub>0.50</sub>In<sub>0.50</sub>P/Ga<sub>0.99</sub>In<sub>0.01</sub>As/Ge. Struktura ta jest krystalizowana z wysoką wydajnością w reaktorach fazy gazowej z wykorzystaniem związków metaloorganicznych (MOVPE). Zastosowanie Rozwiązanie powoduje, że górne warstwy półprzewodnika w ogniwie wielozłączowym otrzymują znacznie więcej światła niż dolne warstwy, co powoduje przepływ dwa razy większego prądu fotoelektrycznego w warstwach górnych.

Najczęściej stosowanymi pierwiastkami do budowy ogniw wielozłączowych są: gal (Ga), ind (In) i german (Ge). W 2013 łączna szacunkowa roczna produkcja galu oraz indu, poprzez odzyskiwanie produktów ubocznych, wyniosła odpowiednio 280 i 770 ton [20]. Procesy odzyskiwania stanowią podstawowy sposób pozyskiwania, tych pierwiastków.

Do wykonania warstwy germanu o grubości 200 mikronów, wymagane jest zużycie materiału 0,1 g/cm<sup>2</sup>. Przy 30% strat (spowodowane stratami proszku krzemowego i uszkodzeniami) niezbędne jest zużycie 0,4 g/cm<sup>2</sup> germanu. W rzeczywistości zapotrzebowanie na german wynosi od 0,1 do 0,4 g/cm<sup>2</sup>, w zależności od tego, czy linia technologiczna wyposażona jest w urządzenia do odzyskiwania proszku krzemowego. Większość firm odzyskuje proszek krzemowy oraz inne materiały na poziomie umożliwiającym zmniejszenie łącznych strat do kilku procent. Można oczekiwać, że mniej niż 4 tony germanu jest wymagane do produkcji 1 GW, zakładając 30% efektywność modułu i 1000-krotną koncentrację. Jeżeli żadne materiały nie byłby odzyskiwane, maksymalna wymagana ilość wyniosłaby 12 ton. Wymagana ilość materiału maleje wraz ze wzrostem efektywności i koncentracji [21].

Poza przemysłem fotowoltaicznym, german wykorzystywany jest w elektronice, w optyce związanej z promieniowaniem podczerwonym, w światłowodach itp. Branża fotowoltaiczna oraz elektroniczna wykazują najszybszy wzrost popytu na ten pierwiastek. Dlatego produkcja germanu prawdopodobnie będzie musiała zostać zwiększona w celu zaspokojenia prognozowanego zapotrzebowania.

Ilości galu oraz indu, jakie są potrzebne do wytworzenia typowych ogniw wielozłączowych, jest bardzo mała. W przyszłości grubości warstw tych pierwiastków w ogniwach CPV mogą zostać zredukowane, co doprowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na gal oraz ind.

Dla ogniw metamorficznych oraz dla ogniw metamorficznych w odwróconej konfiguracji, zużycie galu oraz indu w warstwie MOVPE jest obecnie nieco wyższe niż dla sieciowo dopasowanych ogniw. Jest to spowodowane koniecznością zastosowania grubej warstwy oddzielającej (przeważnie GaInP) oraz warstwy GaInAs. Dla uzyskania podłoża GaAs o grubości 600 mikronów, przy założeniu braku strat, wymagane jest zużycie materiału 0,2 g/cm<sup>2</sup>. Dla 30 % strat i braku odzyskiwania materiału, niezbędne jest zużycie na poziomie 0,5 g/cm<sup>2</sup>. Można zatem założyć, że przy efektywnym

programie odzyskiwania, do produkcji 1 GW (przy 30% efektywności modułu i 1000-krotnej koncentracji) niezbędne jest mniej niż 5,5 tony materiału. Nawet bez recyklingu, wartość ta nie przekroczy w tym przypadku 17 ton. Istotny jest fakt, że nie przekroczy to 6 % całkowitego rocznego zapotrzebowania na ten pierwiastek.

## 2. PRZYKŁADY KOMERCYJNEGO ZASTOSOWANIA MODUŁÓW CPV

### 2.1. Próby wdrożenia CPV

Od 2011 roku, wiele firm zajmujących się CPV zostało zamkniętych, zbankrutowało lub zmieniło profil swojej działalności z systemów CPV na systemy PV. Tabela 2 zawiera informacje o firmach, które wciąż funkcjonują na rynku i kontynuują prace nad modułami HCPV.

Głównym wyzwaniem wskazywanym przez producentów systemów CPV, jest konkurencja z systemami opartymi na płaskich cienkowarstwowych modułach c-Si. Główną zaletą modułów c-Si jest ich cena, która w ostatnim czasie znacznie spadła. Pomimo spadków cen technologii cienkowarstwowych technologia CPV ma szanse zyskać przewagę na obszarach o dużym nasłonecznieniu.

**Tab. 2. Zestawienie wybranych firm oferujących technologię CPV**

Firma	Koncentracja prom.	Typ systemu	Instalacje zrealizow. [MWp]
Suncore Photovoltaic Technology	1090	soczewka, zwierciadło obrotowe, HCPVT	144,8
Soitec	500	soczewka, system nadażny	74,4
Arzon Solar (wcześniej Amonix)	HCPV	soczewka, system nadażny	38,4
Foton HC (wcześniej Amonix/Guascor)	HCPV	soczewka, system nadażny	12,3
Solar Systems/Silex Systems	500 - 1000	zwierciadło odbijające, wieża słoneczna	4,3
Magpower	HCPV	soczewka, system nadażny	4,2
Suntrix	576	soczewka, system nadażny	2,4
Arima Ecoenergy	476	soczewka, system nadażny	2,1
Beijing Enterprises Holding Co.**	HCPV	soczewka, system nadażny	1,0
EMCORE	HCPV	soczewka, zwierciadło obrotowe	0,7
Delta Electronics	HCPV	soczewka, system nadażny	0,4
Abengoa Solar	1000	soczewka, system nadażny	0,2
EverPhoton	500 - 1000	soczewka, system nadażny	0,2
RedSolar	HCPV	soczewka	0,2
MST	625	soczewka, system nadażny	< 0,1
Renovalia	HCPV	zwierciadło paraboliczne	< 0,1
Daido Steel	HCPV	soczewka, system nadażny	< 0,1
Pyron Solar	1200	soczewka, system nadażny	< 0,1
Heliotrop	1024	soczewka, system nadażny	< 0,1
Beijing Enterprises Holding Co.**	HCPV	soczewka, system nadażny	1,0

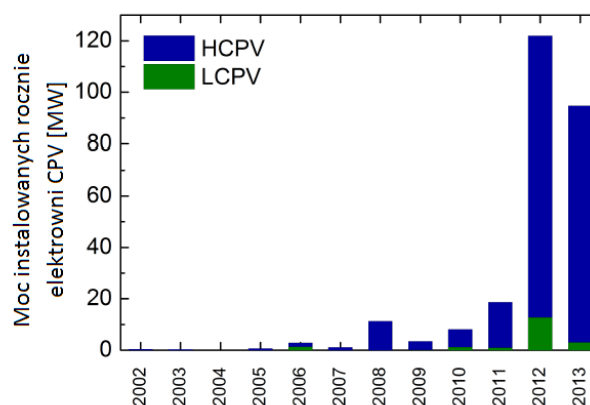
Podczas gdy istnieje szeroki zakres projektów CPV, większość firm zajmuje się HCPV i większość z nich używa podstawowych soczewek Fresnela w refrakcyjnych, punktowo - skupiających systemach. Niektóre firmy skłoniły się ku mniejszym ogniwom i większym koncentracjom, licząc na redukcję kosztów i wymagań w zakresie zarządzania termicznego. W rzeczywistości prawie wszystkie firmy zajmujące się HCPV osiągają współczynniki koncentracji 500x lub 1000x (tab. 2). Dla LCPV współczynniki koncentracji są mocniej zróżnicowane niż dla HCPV, nawet dla rozwiązań CPV zintegrowanych z modułami pływającymi na wodzie.

Kilka poważnych problemów technicznych dotknęło w ostatnim czasie wiodące firmy CPV. W roku 2012 firma Amonix, teraz Arzon Solar, zamknęła swoją 150 MW elektrownię w Las Vegas; w 2013 roku firma SolFocus, dostawca systemu z optyką Cassegraina, została zlikwidowana. Nieco wcześniej w tym samym roku, firma Soitec porzuciła plany na budowę 150 MW elektrowni w dolinie Imperial w Kalifornii, kierując się naciskami inwestora, optującego za użyciem konwencjonalnych modułów PV. Firma Solar Systems z Australii, teraz Silex, również odeszła od planów budowy 100 MW elektrowni CPV w Mildurze w Australii.

Pomimo tych trudności kilka silnych przedsiębiorstw produkujących ogniwa wielozłączone wykorzystywane w CPV, wciąż kontynuuje ulepszanie swoich produktów. W dodatku, ilość zainstalowanych elektrowni CPV znacząco rośnie od 2011 roku (rys. 6) i wciąż podejmowane są wielkie przedsięwzięcia, takie jak plany budowy 70 MW elektrowni LCPV przez firmę SunPower w środkowej Mongolii. Dodatkowo, firma Soitec kontynuuje montaż elektrowni w Południowej Afryce, Chinach i Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Firma Suncore zamontowała moduły o mocy 140 MWp w Goldmud w Chinach. Również w dziedzinie systemów śledzenia słońca poczyniono ogromne postępy. Dziś są one bardziej niezawodne i tańsze niż dotychczasowe.

### 2.2. Systemy CPV na świecie

Technologia CPV pojawiła się na rynku energii w ostatnich latach (rys. 6). Pierwsza elektrownia przekraczająca próg 1 MW została zamontowana w Hiszpanii w 2006 roku. Od tego czasu, każdego roku budowane są elektrownie o zbliżonej mocy, a moc kilku elektrowni przekracza poziom 20 MW [27].



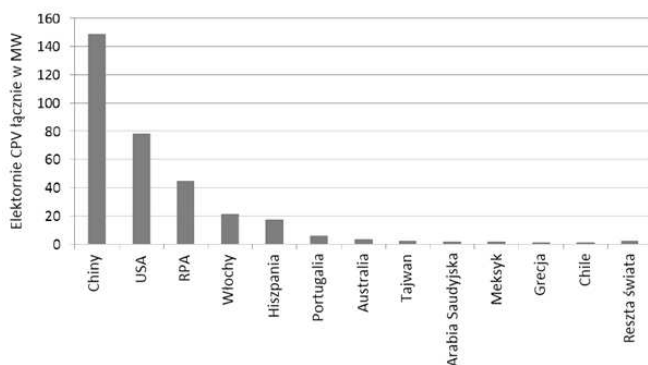
**Rys. 6. Moc instalowanych elektrowni CPV rocznie, z podziałem na HCPV i LCPV [2,27]**

Największy udział, ponad 90%, mają elektrownie HCPV z systemem śledzenia słońca w dwóch osiach. Do 2008 roku, systemy HCPV w większości były zaopatrzone w ogniwa c-Si, ale od tamtego czasu standardem stały się ogniwa wielozłączone. W systemach

LCPV wciąż wykorzystywane są lekko zmodyfikowane standardowe ogniwa lub wysoko efektywne ogniwa c-Si.

Wraz z trendem budowania elektrowni CPV o coraz większych mocach, zauważalna jest regionalna dywersyfikacja rynku (rys. 7). Pierwsze duże elektrownie CPV były budowane wyłącznie w Hiszpanii, zaś po 2010 roku oddawane były do użytku elektrownie CPV o mocach powyżej 1 MW w innych krajach. Obecnie elektrownie CPV znajdują się w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, Chinach, Włoszech, Australii oraz Republice Południowej Afryki.

W porównaniu do konwencjonalnych modułów PV, rynek CPV jest wciąż niewielki. W 2013 roku jego wartość była szacowana poniżej 100 MWp. Nowe elektrownie o łącznej mocy około 70 MWp zostały oddane do użytku pod koniec listopada 2014 roku. Kilka dużych elektrowni, o mocy około 20 MWp każda, są obecnie w fazie budowy.



Rys. 7. Moc elektrowni CPV podłączonych do sieci w wybranych krajach, do końca listopada 2014 rok [27]

### 3. SPRAWNOŚĆ I KOSZTY PRODUKCJI SYSTEMÓW CPV

#### 3.1. Sprawność systemów CPV

Przemysł związany z technologią przetwarzania skoncentrowanej energii promieniowania słonecznego (CPV) poczynił olbrzymie postępy w ostatnich latach. W chwili obecnej łączna moc nominalna zainstalowanych i podłączonych do sieci elektroenergetycznej instalacji CPV wynosi 330 MWp. Wśród funkcjonujących elektrowni znajdują się elektrownie CPV o mocach większych niż 30 MWp:

- Golmud, Chiny, wykonawca Suncore - 60 i 80 MWp,
- Touwsrivier, Republika Południowej Afryki, wykonawca Soitec: 44 MWp,
- Alamosa, Colorado, Stany Zjednoczone Ameryki Północnej, wykonawca Amonix: 30 MWp,

Dzisiejsze doświadczenie w eksploatacji elektrowni CPV, sprawdzona niezawodność oraz badania terenowe ma ponad ośmioletnią historię [22]. W tym czasie udało się poprawić znacznie sprawność przetwarzania energii w systemach CPV.

Szacuje się, że zdolność do instalowania elektrowni CPV na świecie jest powyżej 500 MW rocznie. Osiągnięty w ostatnim czasie postęp w zakresie badań i technologii CPV, w tym certyfikowane ogniwa CPV z potwierdzoną wartością sprawności przetwarzania energii promieniowania słonecznego na poziomie 46% umożliwia zwiększenie produkcji energii elektrycznej z 1 m<sup>2</sup> instalacji CPV [23].

Kluczowym powodem zwiększenia liczby wielkoskalowych elektrowni wykorzystujących technologię HCPV, jest znaczący wzrost efektywności pojedynczych modułów, co prowadzi do redukcji kosztów. Instytut Fraunhofer ISE zademonstrował w ostatnim czasie moduł CPV o wydajności 36,7%. Wydajności wielu dostępnych, komercyjnych modułów CPV również przekraczają 30%. W

ostatnich latach, efektywność systemów bazujących na prądzie stałym, wzrosła i osiągnęła 25-29%. Rynek energii przewiduje w następnych kilku latach, dalszy wzrost wydajności systemów CPV do ponad 30%. Spowodowane jest to poprawą efektywności ogniwa, jak również systemów optycznych [24,25]. Oprócz zwiększenia wydajności, wykorzystanie systemu śledzenia słońca, pozwala systemom CPV na produkowanie większej ilości energii w ciągu całego dnia, szczególnie podczas szczytu energetycznego. Moc elektrowni CPV może być dobierana w szerokim zakresie, t.j. od kW do kilkudziesięciu MW, przystosowując produkcję energii elektrycznej do lokalnego zapotrzebowania.

#### 3.2. Perspektywy dla kosztów systemu i uśrednionego kosztu energii elektrycznej

Podobnie jak typowe systemy fotowoltaiczne, instalacje CPV są przeważnie objęte dwudziestoletnią gwarancją, dlatego też muszą być wykonane starannie i solidnie. Norma IEC 62108 „Moduły fotowoltaiczne oraz systemy z koncentratorami światła (CPV) - Kwalifikacja konstrukcji i zatwierdzenie typu” wydana przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną (IEC) w 2007 roku jest obowiązującą dla komercyjnych systemów CPV. Wiele firm certyfikuje swoje produkty w oparciu o tę normę. Zostały wydane lub są opracowywane również dodatkowe normy UL/IEC (tj. ocena mocy i energii, bezpieczeństwo modułów, śledzenie słońca, optyka, montaż ogniwa).

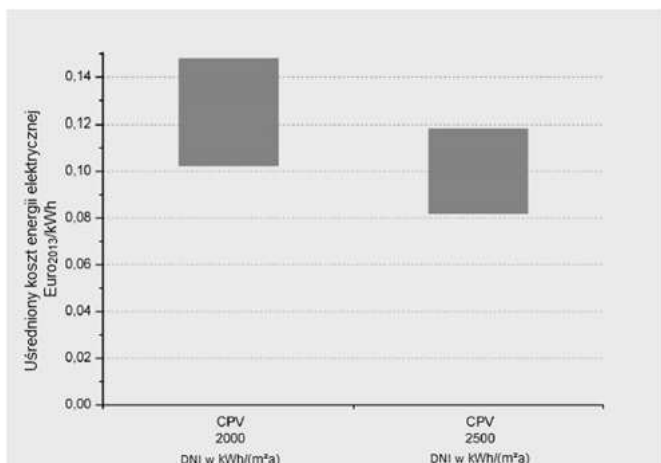
Ceny rynkowe i dane dotyczące kosztów systemów CPV są trudne do oszacowania. Spowodowane jest to młodym i dynamicznie rozwijającym się rynkiem, stosunkowo małą liczbą instalacji i firm aktywnie działających w tej dziedzinie oraz odmiennością poszczególnych instalacji w zakresie stosowanej technologii wykonania zarówno ogniwa fotowoltaicznych jak i optyki skupiającej promieniowanie słoneczne. Stąd analiza kosztów systemu i uśrednionego kosztu energii elektrycznej zawiera stosunkowo wysoki współczynnik niepewności. Sytuacja ta trwać będzie aż do momentu gdy instalacje CPV będą stanowiły liczną grupę źródeł energii.

Pod koniec roku 2013 Instytut Fraunhofer opublikował obszernie badania dotyczące uśrednionego kosztu energii elektrycznej dla systemów energii odnawialnej [4]. Badania te dotyczą również systemów CPV. Grupa naukowców z Uniwersytetu w Ottawie opublikowała zebrane dane dotyczące kosztów i uśrednionego kosztu energii elektrycznej dla systemów CPV [26].

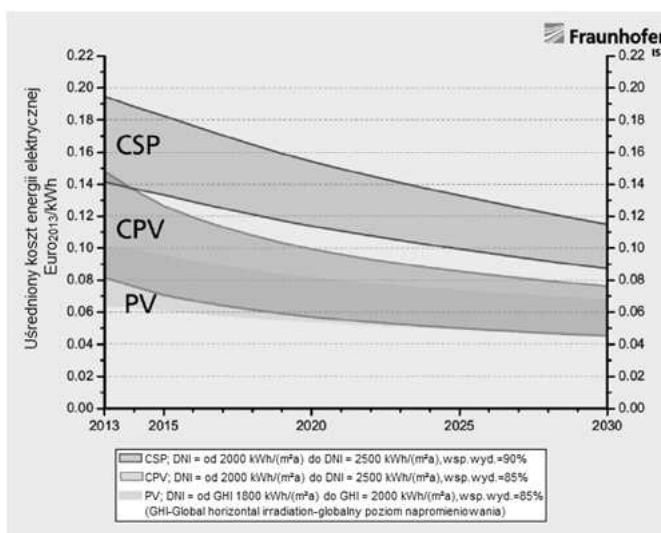
Na podstawie literatury ceny systemu CPV, włącznie z montażem elektrowni o mocy 10 MW, zostały zdefiniowane pomiędzy 1400 Euro/kWp i 2200 Euro/kWp. Tak duży rozrzut cen wynika z różnych koncepcji technologicznych, jak również ze zmiennych i regionalnie różnicowanych warunków ekonomicznych. Korzystając z założeń technicznych i finansowych znajdujących się w badaniach Instytutu Fraunhofer [4], wynika, że wartość uśrednionego kosztu energii elektrycznej waha się od 0,10 Euro/kWh do 0,15 Euro/kWh dla lokalizacji zapewniającej dostępność energii promieniowania słonecznego na poziomie co najmniej 2000 kWh/(m<sup>2</sup>a). Koszt produkcji energii elektrycznej spada do wartości od 0,08 do 0,12 Euro/kWh dla lokalizacji zapewniającej dostępność energii promieniowania słonecznego na poziomie co najmniej 2500 kWh/(m<sup>2</sup>a) (rys. 8).

Dla CPV, istnienie wiele niepewności dotyczących przyszłego rozwoju rynku i tym samym dotyczących możliwości osiągnięcia dodatkowych redukcji kosztów poprzez rozwój technologiczny. Jednakże, analizy pokazują, że CPV ma potencjał redukcji wartości uśrednionego kosztu energii elektrycznej, co zachęca do dalszego rozwoju tej technologii. Jeżeli do 2030 roku nastąpi dalszy rozwój w budowie instalacji, CPV powinno osiągnąć koszt pomiędzy 0,045 Euro/kWh a 0,075 Euro/kWh (Rys. 9). Ceny systemu, włączając

koszty budowy elektrowni CPV, będą wówczas oscylować pomiędzy 700 Euro/kWp, a 1100 Euro/kWp.



**Rys. 8.** Uśredniony koszt produkcji energii elektrycznej (LCOE) systemów CPV przy promieniowaniu słonecznym o wartości 2000 kWh/(m<sup>2</sup>a) i 2500 kWh/(m<sup>2</sup>a) w 2013 roku [5]



**Rys. 9.** Uśredniony koszt energii elektrycznej dla elektrowni PV, CSP i CPV dla promieniowania słonecznego od 2000 kWh/(m<sup>2</sup>a) do 2500 kWh/(m<sup>2</sup>a) [2,4]

## PODSUMOWANIE

Podsumowując, technologia CPV dopiero wkracza na rynek energii. Na dzień dzisiejszy, głównym problemem z jakim zmagają się technologia CPV, jest brak tanich rozwiązań technologicznych do produkcji podzespołów oraz gotowych systemów skoncentrowanej fotowoltaiki. W starciu z konwencjonalnymi systemami PV, technologia CPV charakteryzuje się większą wydajnością, natomiast koszty produkcji, wdrażanie oraz utrzymanie całego systemu jest mniej opłacalne. Obecnie konwencjonalne systemy PV posiadają szeroki wachlarz zastosowań w codziennym życiu. Systemy PV znajdują zastosowanie w gospodarstwach domowych, energetyce zawodowej oraz przemyśle. Dalszy rozwój technologii CPV niesie szansę zwiększenia konkurencyjności w stosunku do obecnie stosowanych technologii przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

## BIBLIOGRAFIA

1. K. Tanabe: A Review of Ultrahigh Efficiency III-V Semiconductor Compound Solar Cells: Multijunction Tandem, Lower Dimensional, Photonic Up/Down Conversion and Plasmonic Nanometallic Structures. *Energies*, 2009, 2, 504-530, Tokio, Japonia, 2009
2. Fraunhofer ISE: Levelized Cost of Electricity - Renewable Energy Technologies. 2013
3. R. Angel, T. Stalcup, B. Wheelwright, S. Warner, K. Hammera i inni: Shaping solar concentrator mirrors by radiative heating. *Sprawozdanie SPIE 9175 - High and Low Concentrator Systems for Solar Energy Applications IX*, San Diego, California, USA, 2014.
4. K. Sasaki, T. Agui, K. Nakaido, N. Takahashi, R. Onitsuka i inni: Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. *Obrady 9-tej Międzynarodowej Konferencji Systemów Skoncentrowanej Fotowoltaiki*, Miyazaki, Japonia, 2013.
5. Fraunhofer ISE: New world record for solar cell efficiency at 46%. <http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/press-releases-2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent>, 2014.
6. T. N. D. Tibbits, P. Beutel, M. Grave, C. Karcher, E. Oliva, i inni: New Efficiency Frontiers with Wafer-Bonded Multi-Junction Solar Cells. *Obrady 29-tej Europejskiej Konferencji i Wystawy Fotowoltaicznej Energii Słonecznej*, publikacja prasowa, Amsterdam, Holandia, 2014.
7. R. King, A. Boca, W. Hong, D. Larrabee, K. M. Edmondson i inni: Band-gap-engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells. *Obrady 24-tej Europejskiej Konferencji i Wystawy Fotowoltaicznej Energii Słonecznej*, Hamburg, Niemcy, 2009.
8. S. P. Philipps, A. W. Bett: III-V multi-junction solar cells, in *Advanced Concepts in Photovoltaics*. Wydane przez A. J. Nozik, G. Conibeer, and M. C. Beard, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, Wielka Brytania, 2014, s. 87-117.
9. D. J. Friedman, J. M. Olson, S. Kurtz: High-efficiency III-V multijunction solar cells, in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, edycja druga. Wydane przez A. Luque and S. Hegedus, John Wiley & Sons, West Sussex, Wielka Brytania, 2011, s. 314-364.
10. A. Luque: Will we exceed 50% efficiency in photovoltaics?. *Journal of Applied Physics*, tom 110, wydanie 3, 2011, s. 1-19.
11. F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher i inni: Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in Photovoltaics - Research and Applications*, tom 22, wydanie 3, 2014, s. 277-282.
12. V. Sabnis, H. Yuen, M. Wiemer: High-efficiency multijunction solar cells employing dilute nitrides. *Obrady 8-jej Międzynarodowej Konferencji Systemów Skoncentrowanej Fotowoltaiki*, Toledo, Hiszpania, 2012, s. 14-19.
13. R. M. France, J. F. Geisz, I. Garcia, M. A. Steiner, W. E. McMahon i inni: Quadruple-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Devices. *IEEE Journal of Photovoltaics*, dostępny online, 2014.
14. J. F. Geisz, A. Duda, R. M. France, D. J. Friedman, I. Garcia i inni: Optimization of 3-junction inverted metamorphic solar cells for high-temperature and high-concentration operation. *Obrady 8-jej Międzynarodowej Konferencji Systemów Skoncentrowanej Fotowoltaiki*, Toledo, Hiszpania, 2012, s. 44-48.
15. D. Aiken, E. Dons, N. Miller, F. Newman, P. Patel i inni: Commercial concentrator cell results and record IMM solar cell effi-

- ciency. Obrady 8-iej Międzynarodowej Konferencji Systemów Skoncentrowanej Fotowoltaiki, Toledo, Hiszpania, 2012, s. 44-48.
16. P. Chiu, S. Wojtczuk, C. Harris, D. Pulver, M. Timmons: 42.3% efficient InGaP/GaAs/InGaAs concentrators using bifacial epigrowth. 37-ma Konferencja IEEE Photovoltaic Specialists, Seattle, Washington, USA, 2011, s. 771-774.
  17. W. Guter, J. Schöne, S. P. Philipps, M. Steiner, G. Siefer i inni: Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight. Applied Physics Letters, tom 94, edycja 22, 2009, s. 1-6.
  18. M. Woodhouse, A. Goodrich, R. Margolis, T. L. James, M. Lokanc i inni: Supply-Chain Dynamics of Tellurium, Indium, and Gallium Within the Context of PV Manufacturing Costs. IEEE Journal of Photovoltaics, tom 3, edycja 2, 2013, s. 833-837.
  19. O. Collins: Study of By-Products of Copper, Lead, Zinc, and Nickel - Technical Report prepared for the International Lead and Zinc Study Group. the International Nickel Study Group, and the International Copper Study Group, 2012.
  20. T. Gerstmaier, M. Röttger, T. Zech, R. Moretta, C. Braun i inni: Five Years of CPV Field Data - Results of a Long-term Outdoor Performance Study. Obrady 10-tej Międzynarodowej Konferencji Systemów Skoncentrowanej Fotowoltaiki. Albuquerque, NM, USA, 2014.
  21. M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, T. Dörsam i inni: FLATCON® CPV module with 36.7 % efficiency equipped with four-junction solar cells. Progress in Photovoltaics - Research and Applications, publikacja prasowa, 2014.
  22. European Photovoltaic Technology Platform: A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, Edycja 2. [www.eupvplatform.org/publications/strategic-research-agenda-implementation-plan.html](http://www.eupvplatform.org/publications/strategic-research-agenda-implementation-plan.html), 2011.
  23. P. Pérez-Higuerasa, E. Muñoz, G. Almonacida, P. G. Vidala: High concentrator photovoltaics efficiencies - Present status and forecast. Renewable and Sustainable Energy Reviews, tom 15, wydanie 4, 2011, s. 1810-1815.
  24. J. E. Haysom, O. Jafarieh, H. Anis, K. Hinzer, D. Wright: Learning curve analysis of concentrated photovoltaic systems. Progress in Photovoltaics - Research and Applications, publikacja prasowa, 2014.
  25. Dr. Simon P. Philipps, Dr. Andreas W. Bett: Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology, Freiburg, Niemcy, 2015.

*cost in the CPV systems was estimated.*

Autorzy:

dr inż. **Radosław Figura** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, Zakład Napędu Elektrycznego i Elektroniki Przemysłowej, r.figura@uthrad.pl

inż. **Jakub Szymaniak** – absolwent Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, szymaniakkuba@gmail.com

## COMMERCIAL USE OF CPV TECHNOLOGY IN THE WORLD

### *Abstract*

*The article analyzes the current state of knowledge on the CPV technology by examining its status in the market, industry and research. Discusses the technology of photovoltaic cells used in CPV systems and optical systems used to concentrate solar radiation. The examples of operating plants using solar concentration technology were shown. The total power installed in the world CPV power plant was presented. The analysis of investment costs was shown. The electricity production*