Jolanta FIEDUCIK[1], Jan GODLEWSKI[2]

Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski (1), Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska (2)

doi:10.15199/48.2015.09.07

Ekonomiczne i środowiskowe aspekty skoncentrowanej fotowoltaiki

Streszczenie. *W artykule przeanalizowano możliwość wykorzystania promieniowania słonecznego do wytwarzania energii elektrycznej, ze szczególnym uwzględnieniem roli skoncentrowanego promieniowania słonecznego. Skoncentrowana fotowoltaika (CPV), przy użyciu wielowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, pozwala na obniżenie kosztów instalacji oraz kosztów wytwarzania energii elektrycznej. Rozwój nowych technologii wytwarzania energii elektrycznej z użyciem skupionego promieniowania słonecznego pozwala także na wykorzystanie korzystających z wysokiej temperatury do generacji energii elektrycznej na różnej drodze. W artykule przeanalizowano także aspekt ekonomiczny i środowiskowy, wynikający z wprowadzania nowych technologii do wytwarzania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego.*

Abstract. *The paper examines the possibility of using solar energy to generate electricity, with particular emphasis on the role of concentrated solar radiation. Concentrated photovoltaics (CPV), using multi-layer photovoltaic cells, reduces installation costs as well as generating electricity costs. Development of new technologies for generating electricity using focused solar radiation allows also for the use of high temperature of suitable materials to generate electricity in different ways. The article examines also the economic and environmental aspects, resulting from the introduction of new technologies for generating electricity from solar energy. (**Economic and environmental aspects of concentrated photovoltaics**).*

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, skoncentrowana fotowoltaika, skoncentrowane elektrownie słoneczne, aspekt ekonomiczny.
Keywords: photovoltaic cells, concentrated photovoltaics, concentrated solar power plants, economic aspect.

Wprowadzenie

Obecnie, coraz szersze wykorzystywanie promieniowania słonecznego do wytwarzania energii elektrycznej powoduje rozwój nowych metod i technologii przetwarzania energii słonecznej w energię elektryczną. Działania w tym zakresie są wielowątkowe i dotyczą m.in. wzrostu wydajności ogniw fotowoltaicznych, obniżenia kosztów przetwarzania energii słonecznej w energię elektryczną, poszukiwania nowych sposobów wytwarzania energii elektrycznej, a także obniżenia kosztów środowiskowych tych działań. Często te działania wzajemnie się przenikają i końcowy rezultat jest wynikiem szeregu zmian technicznych i technologicznych w danej dziedzinie.

Ostatnio dokonano olbrzymiego skokowego postępu, w zakresie wzrostu wydajności przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną. Uzyskany wzrost wydajności ogniw fotowoltaicznych z około 15% do około 45%, został spowodowany wytworzeniem wielowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, wykorzystujących znacznie szerszy zakres promieniowania słonecznego do otrzymywania energii elektrycznej niż dotychczasowe ogniwa jednowarstwowe. Ogniwa wielowarstwowe, o podobnej powierzchni, są jednak droższe niż ogniwa jednowarstwowe. Aby uzyskać możliwość zastosowania wydajnych fotowoltaicznych ogniw wielowarstwowych, pojawiła się konieczność koncentracji promieniowania słonecznego na niewielkich, ale wydajnych ogniwach, bez budowy kosztownych wielowarstwowych ogniw fotowoltaicznych o dużych powierzchniach. Koszty wykonania systemu optycznego skupiającego promieniowanie słoneczne w postaci zwierciadła lub soczewki o dużej powierzchni, są znacznie mniejsze od kosztów wielowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego o dużej powierzchni. W wyniku tych działań zaczęła się intensywnie rozwijać skoncentrowana fotowoltaika (CPV – Concentrated Photovoltaic). Rozwój techniki oraz technologii związanych ze skupianiem promieniowania słonecznego spowodował także rozwój innych technologii wytwarzania prądu elektrycznego, bazujących na podgrzaniu do wysokich temperatur cieczy lub ogniw termoelektrycznych. Podgrzane ciecze, będące zwykle w finalnej formie w postaci pary, są kierowane do turbiny, która sprzężona jest generatorami wytwarzają prąd elektryczny. Wydajność takich układów jest wysoka, dochodzi obecnie do 35% i stale wzrasta. Systemy wytwarzające energię elektryczną na tej drodze noszą nazwę elektrowni słonecznych pracujących na skoncentrowanym promieniowaniu słonecznym (CSP – Concentrated Solar Power). Skupione promieniowanie może także być użyte do wytwarzania energii elektrycznej w układach nie zawierających cieczy, a posiadających tylko ogniwa termoelektryczne.

Biorąc pod uwagę, że będące w użyciu klasyczne ogniwa fotowoltaiczne mają wydajność około 15%, pojawienie się nowych technologii pozwalających na realizację wydajności przetwarzania energii słonecznej na poziomie około 40%, zdecydowanie zmienia aspekty ekonomiczne i środowiskowe dotyczące wytwarzania energii elektrycznej z energii słonecznej. W tym artykule przedmiotem krótkiej analizy będą skutki ekonomiczne i środowiskowe, wynikające z zastosowania nowych technologii do wytwarzania prądu elektrycznego z promieniowania słonecznego.

Wybrane metody koncentracji promieniowania słonecznego

Systemy wytwarzające energię elektryczną z promieniowania słonecznego wykorzystują promieniowanie słoneczne padające bezpośrednio lub po jego przetworzeniu, jak to ma miejsce w przypadku koncentratorów luminescencyjnych.

Ogniwa fotowoltaiczne wykorzystujące bezpośrednie promieniowanie słoneczne mogą być umieszczone:

- równolegle do powierzchni Ziemi,
- ustawione pod pewnym kątem lub,
- podążające za ruchem Słońca tak, że zawsze są ustawione prostopadle do kierunku padania promieniowania słonecznego.

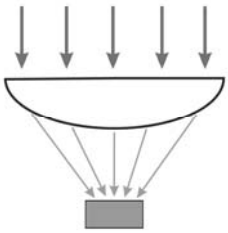
Wymienione powyżej ustawienia powierzchni ogniw fotowoltaicznych są stosowane dla ogniw o powierzchniach zbliżonych do powierzchni areału, na którym zostały zainstalowane.

Inną, alternatywną metodą wytwarzania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego jest skupienie tego promieniowania z całej powierzchni padania, na niewielkiej powierzchni, w której jest umieszczony przetwornik

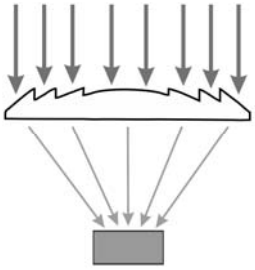
promieniowania słonecznego na energię elektryczną. W miejscu skupienia promieniowania może być umieszczony element fotowoltaiczny lub odpowiedni system termodynamiczny wytwarzający prąd elektryczny. W tym ostatnim przypadku mamy do czynienia ze skoncentrowaną fotowoltaiką (CPV) lub skoncentrowaną elektrownią słoneczną (CSP).

Koncentracja promieniowania słonecznego może odbywać się na różnej drodze. Podstawowe systemy optyczne używane do koncentracji promieniowania słonecznego wykorzystują klasyczne soczewki, soczewki Fresnela, zwierciadła płaskie i wklęsłe – paraboidalne, zwierciadła wklęsłe liniowe, liniowe soczewki Fresnela oraz koncentratory luminescencyjne.

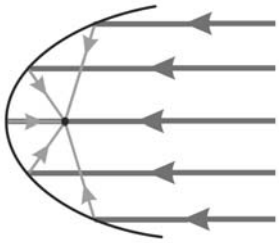
a)



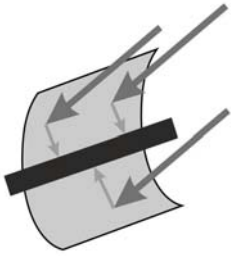
b)



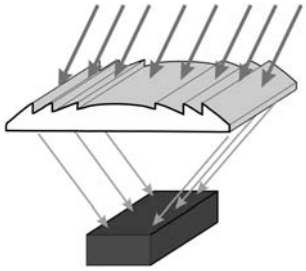
c)



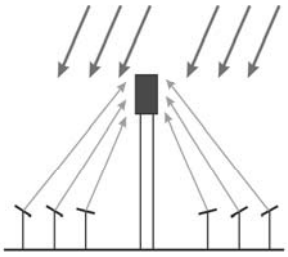
d)



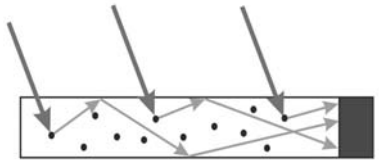
e)



f)

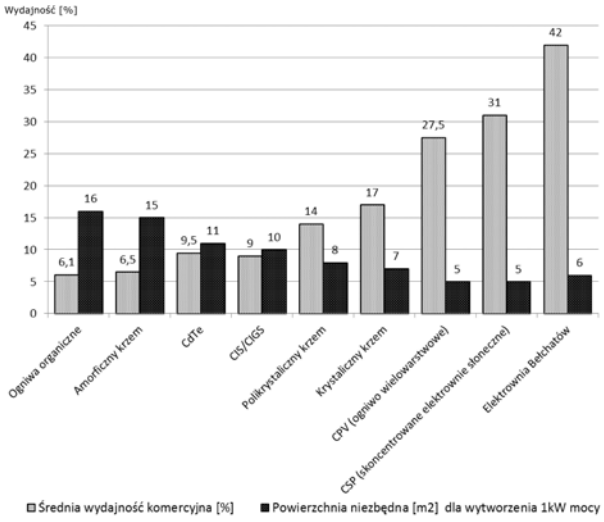


g)



Rys. 1. Podstawowe metody koncentracji promieniowania słonecznego; a) klasyczna soczewka, b) soczewka Fresnela, c) zwierciadło paraboidalne, d) zwierciadło wklęsłe-liniowe, e) liniowa soczewka Fresnela, f) system zwierciadeł skupiających promieniowanie na wieży oraz g) koncentratory luminescencyjne (na podstawie [2])

W budowanych systemach fotowoltaicznych, koncentracja promieniowania słonecznego dochodzi do wartości będącej wielokrotnością natężenia naturalnego promieniowania słonecznego i praktycznie stopień koncentracji promieniowania słonecznego dochodzi do wartości 2000. Natężenie promieniowania słonecznego po skupieniu dochodzi do olbrzymiej wartości wynoszącej około 2 x 10^6 W/m^2. Systemy koncentrujące energię słoneczną, aby mogły właściwie funkcjonować, muszą być nadążne za ruchem Słońca.



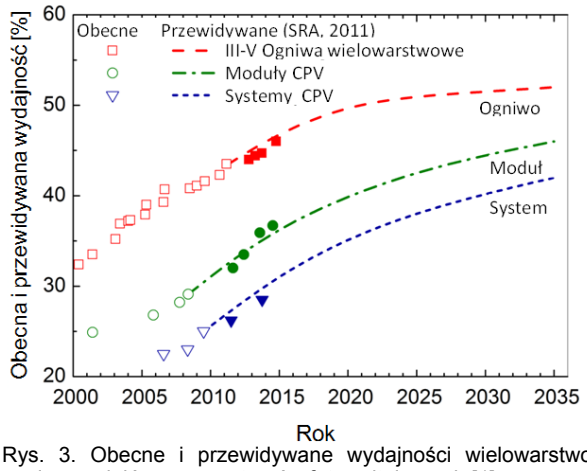
Rys. 2. Wydajność systemów fotowoltaicznych wytwarzających prąd na bazie różnych ogniw fotowoltaicznych oraz powierzchnia wymagana do wytworzenia jednego kilowata mocy. Dla modułów fotowoltaicznych przyjęto oświetlenie (AM 1,5) - 1000 W/m^2 , w temperaturze 25°C. Równolegle, pokazano odpowiednie dane dla elektrowni bazującej na węglu brunatnym w Bełchatowie (na postawie [3, 4, 5] oraz informacji o elektrowni Bełchatów)

Wydajność ogniw, modułów i systemów fotowoltaicznych

Wydajność pojedynczego ogniwa, zespołu ogniw w modułach, czy systemu wytwarzającego energie elektryczną z energii słonecznej do sieci elektrycznej jest różna. Pojedyncze ogniwo ma największą wydajność, mniejsza końcowa wydajność jest już dla ogniw zmontowanych w moduły, a najmniejsza po wygenerowaniu w systemie energii elektrycznej do użycia. Na bazie różnych danych, na

rysunku 2, przedstawiono wydajność generowania energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych, wykorzystujących różne rodzaje ogniw fotowoltaicznych.

Z rysunku 2 widać, że im większą wydajność mają fotoogniwa, tym mniejsza powierzchnia potrzebna jest do wytworzenia mocy 1 kW. Warto zauważyć, że powierzchnia niezbędna do wytworzenia 1 kW w elektrowni z węgla brunatnego jest podobna jak dla źródeł pochodzenia słonecznego. Należy oczekiwać, że parametry pokazane na rysunku 2, będą wraz z czasem, coraz bardziej korzystne dla fotowoltaiki, z powodu wzrostu wydajności ogniw i systemów fotowoltaicznych. W ramach nowych technologii fotowoltaicznych przewidywany jest wzrost wydajności ogniw, modułów oraz systemów fotowoltaicznych opartych na wielozłączowych ogniwach. Odpowiednie dane zostały przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Obecne i przewidywane wydajności wielowarstwowych ogniw, modułów oraz systemów fotowoltaicznych [1]

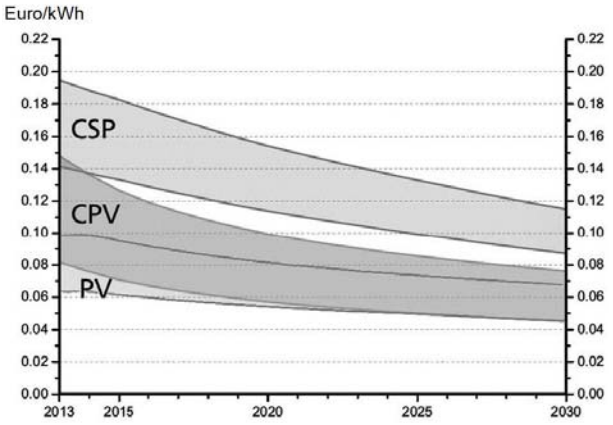
Oszacowania obecnych i przyszłych kosztów uzyskania energii elektrycznej przy wykorzystaniu promieniowania słonecznego

Koszty uzyskania energii elektrycznej są wielowątkowe i precyzyjne ich określenie jest niełatwe. Koszty te zależą od:

- kosztów inwestycji,
- trwałości urządzeń wytwarzających prąd,
- kosztów utrzymania i obsługi,
- kosztów paliwa,
- kraju wytworzenia,
- podatków i oprocentowania kredytów,
- warunków środowiskowych oraz
- innych czynników.

Obecnie, na bazie energii słonecznej, prąd elektryczny wytwarza się z użyciem płaskich ogniw fotowoltaicznych, fotowoltaiki skoncentrowanej lub skoncentrowanej energii słonecznej w systemach innych niż fotowoltaiczne. Wśród kosztów uzyskania energii elektrycznej w tych urządzeniach dominują koszty inwestycji oraz koszty paneli fotowoltaicznych i innych urządzeń wytwarzających prąd elektryczny. W przypadku skoncentrowanej fotowoltaiki (CPV) koszty inwestycji wynoszą od 1,4 do 2,2 Euro/Wp, a siłowni typu CSP od 2,0 do 3,5 Euro/Wp. Koszty te są obecnie zwykle wyższe niż dla klasycznej fotowoltaiki, ale z biegiem lat będą maleć i należy oczekiwać, że w przyszłym okresie, od 15 do 20 lat, koszty te będą niższe niż z obecnie najbardziej ekonomicznych źródeł wytwarzających prąd elektryczny. Aktualnie szacuje się, że najniższe koszty wytwarzania energii elektrycznej są realizowane w elektrowniach pracujących na bazie węgla brunatnego i wynoszą 0,04 Euro/kWh.

Obecne i przewidywane koszty wytwarzania energii elektrycznej z klasycznych paneli fotowoltaicznych, CPV oraz CSP są przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Koszty wytwarzania energii elektrycznej w przypadku klasycznej fotowoltaiki (PV), CPV oraz CSP [1]

Powyższe dane, na rysunku 4, dotyczą przypadku, gdy wielkość parametru DNI (direct normal irradiation) wynosi około 2000 kWh/(m^2 rok). Dla Polski wartość DNI nie przekracza 1300 kWh/(m^2 rok), co czyni uzyskanie energii elektrycznej z promieniowania słonecznego nieco droższym. Zmniejszenie parametru DNI o około 500 kWh/(m^2 rok) powoduje wzrost ceny energii elektrycznej za jeden kilowat o około 3 centy.

Podsumowanie i wnioski

Gwałtowny rozwój techniki i technologii związanych z wytwarzaniem energii elektrycznej na podstawie energii słonecznej powoduje, że koszty jej uzyskania staną się porównywalne z klasycznymi źródłami wytwarzającymi energię elektryczną. Obecnie, jak już wspomniano, najniższe koszty wytworzenia jednego kilowata energii elektrycznej są uzyskiwane w elektrowniach pracujących na bazie węgla brunatnego i wynoszą około 4 centów na kilowatogodzinę. Podobnej wielkości kosztów wytwarzania energii elektrycznej na bazie promieniowania słonecznego oczekuje się w roku 2030, przy czym należy jednocześnie zauważyć, że przyszłe koszty wytwarzania energii elektrycznej z węgla brunatnego do tego czasu wzrosną. Należy też oczekiwać zdecydowanego rozwoju technologii opartych na CSP, ponieważ obecnie te systemy są dalekie od możliwych maksymalnych wydajności teoretycznych. Jednocześnie należy zauważyć, że systemy wytwarzające prąd na bazie procesów termicznych pracują zwykle całodobowo, bazując na magazynowaniu ciepła zgromadzonego w ciągu dnia, co zabezpiecza ciągłe dostawy energii elektrycznej na bazie promieniowania słonecznego.

LITERATURA

[1] 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

[2] Khamooshi M. i inni, A Review of Solar Photovoltaic Concentrators, International Journal of Photoenergy, http://dx.doi.org/10.1155/2014/958521

[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): 99-101, 2012

[4] Raport ArzonSolar 2014, www.arzonsolar.com

[5] Cost Analysis of Solar Photovoltaics, Raport International Renewable Energy Agency, 2012

***Autorzy**: dr Jolanta Fieducik, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Nauk Technicznych, ul. Oczapowskiego 11, 10-900 Olsztyn, E-mail: jolanta.fieducik@uwm.edu.pl; prof. dr hab. Jan Godlewski, Politechnika Gdańska, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: jago@mif.pg.gda.pl.*