

Estera BOŻEK\*, Arkadiusz SWAT, Krzysztof SORNEK

## **ANALIZA MOCY OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH W SKONCENTROWANYM PROMIENIOWANIU SŁONECZNYM**

Energetyka słoneczna jest w dzisiejszych czasach dziedziną prężnie się rozwijającą. Na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie trwają prace badawcze nad możliwościami wykorzystania skupionego promieniowania słonecznego. Zasilanie modułów fotowoltaicznych jest jednym z nich. Zastosowanie tej technologii pozwala zwiększyć ilość generowanej przez moduł PV mocy elektrycznej w stosunku do modułu o tej samej powierzchni usytuowanego w sposób standardowy. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań nad zwiększaniem wydajności ogniw fotowoltaicznych poprzez zastosowanie koncentratora promieniowania słonecznego. W pierwszej kolejności porównano trzy sytuacje tj. gdy moduł usytuowany był: stacjonarnie, obrotowo oraz w skoncentrowanym promieniowaniu świetlnym. Badaniem tym dowiedziono że zastosowanie tej technologii ma swoje uzasadnienie. Wykazano również, że ważnym jest, aby ogniwo fotowoltaiczne zasilane skupionym światłem było odpowiednio chłodzone, na co wskazują wyniki badań zaprezentowanych w punkcie 3.2 niniejszego artykułu.

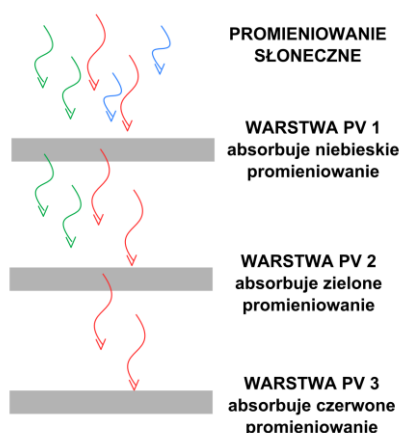
### **1. WSTĘP**

Obecnie instalacje oparte na odnawialnych źródła energii zyskują coraz większe zainteresowanie. Jest to podyktowane nie tylko wymogami Unii Europejskiej kładącej pewne zobowiązania na kraje członkowskie, lecz również osobistym dążeniem użytkowników do niezależności energetycznej i zmniejszania kosztów utrzymania budynków. Najbardziej pożądaną formą energii jest energia elektryczna. Spośród znanych metod generacji prądu opartych na odnawialnych źródłach energii dla małych instalacji, to ogniwa fotowoltaiczne są najprostszą i najtańszą formą wytworzenia prądu elektrycznego. Jednak największy problem stanowi wydajność takich modułów, którą ustawicznie próbuje się zwiększyć.

---

\* Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Wydział Energetyki i Paliw, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, ebozek@agh.edu.pl

W najpopularniejszych rodzajach ogniw krzemowych sprawność wynosi ok. 8-15%, oraz więcej, w zależności od zastosowanej technologii. Poza wykorzystaniem ogniw monokrystalicznych, których sprawności są wyższe, stosuje się również technologię zwiększania wydajności poprzez wykonywanie układu kilku ogniw o różnej szerokości przerwy energetycznej czyli tzw. ogniw wielowarstwowych (Rys.1). W ten sposób, promieniowanie które nie zostało zaabsorbowane w pierwszej warstwie ze względu na niedopasowanie energii fali promieniowania do szerokości przerwy energetycznej zostaje wykorzystane w kolejnych warstwach. Dzięki temu zmniejszono straty i możliwe jest wykorzystanie większego zakresu długości fal z widma światła słonecznego. Zazwyczaj jednak im wyższa sprawność konwersji tym wyższe koszty inwestycyjne.

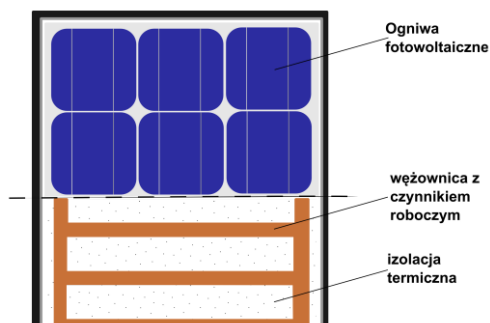


Rys. 1. Schemat działania ogniw wielowarstwowych [1]

Natomiast w Massachusetts Institute of Technology trwają prace nad zwiększeniem sprawności ogniw fotowoltaicznych poprzez wykorzystanie promieniowania ciepłego w ogniwach termofotowoltaicznych. Przy użyciu specjalnych powłok promieniowanie słoneczne przekształcane jest na fale o długości odpowiedniej dla konkretnego ogniw fotowoltaicznego. W urządzeniu tym promieniowanie słoneczne absorbowane jest przez wierzchnią warstwę modułu wykonaną z wielościennych nanorurek węglowych gdzie temperatura sięga nawet niemalże 1000 °C. Powstała energia cieplna przekazywana jest do drugiej warstwy – emitera, wykonanego z jednowymiarowych kryształów fotonicznych. Następnie emiter przekazuje fale podczerwone o określonej długości do ogniw fotowoltaicznego który z kolei konwertuje je na energię elektryczną [2].

Kolejnym rozwiązaniem zwiększającym sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego jest zastosowanie procesu ciągłego chłodzenia modułów fotowoltaicznych. Faktem jest, że wzrost temperatury modułu powoduje spadek jego spraw-

ności. Szacuje się, że spadek ten wynosi ok. 0,5% przy każdym wzroście temperatury ogniwa o 1 stopień. Na rynku komercyjnym dostępne są już różne wersje chłodzonych modułów fotowoltaicznych (rys. 2). Układ realizowany jest poprzez wbudowany w moduły system wentylacyjny w którym ciepło jest odprowadzane do układu ogrzewania i wentylacji budynku lub poprzez odprowadzenie ciepła systemem rurek z płynnym czynnikiem roboczym gdzie ciepło może być wykorzystane np. do zasilenia wody użytkowej [3].



Rys. 2. Przekrój chłodzonego ogniwa fotowoltaicznego

Innym, zdecydowanie bardziej wydajnym sposobem uzyskania wyższych sprawności konwersji energii promieniowania na energię elektryczną jest wykorzystanie układu koncentrującego światło. Taki system pozwala na uzyskanie sprawności już na poziomie ponad 40%, a badania takich układów są dopiero w fazie początkowej. W technologii tej wykorzystuje się niewielkie ogniwo PV skierowane na skoncentrowane promieniowanie słoneczne (rys. 3).

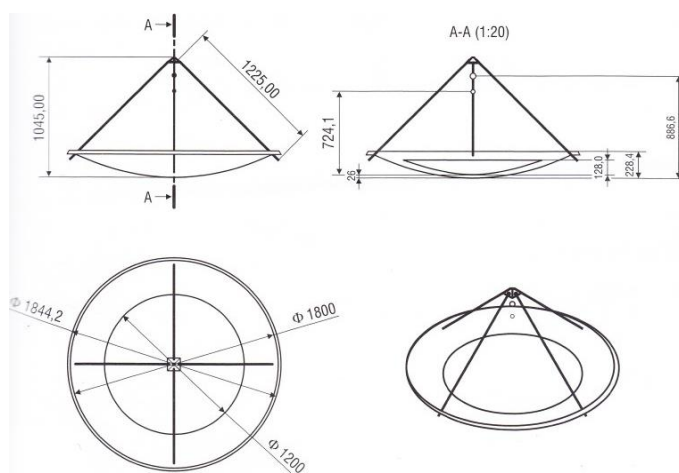


Rys. 3. Koncentrator promieniowania słonecznego z ogniwem fotowoltaicznym

Należy zaznaczyć, iż cena instalacji z samymi modułami fotowoltaicznymi jest uzależniona głównie od ich powierzchni, natomiast cena systemu skupiającego promieniowanie jest o wiele niższa. W związku z tym koszty opisanego systemu są mniejsze od standardowej instalacji fotowoltaicznej o tej samej mocy. Na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie przeprowadzono wstępne badania nad technologią zasilania ogniwa PV skupionym światłem. Koncentrator promieniowania słonecznego umieszczony jest na dachu Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego. Ilustracja nr 4 przedstawia opisaną urządzenie wraz z zamontowanym w pobliżu ogniwka ogniwem fotowoltaicznym.

## 2. UKŁAD POMIAROWY

W celu skupienia promieni świetlnych na dachu budynku Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego AGH w Krakowie skonstruowano koncentrator promieniowania słonecznego (rys. 5). Urządzenie to składa się z dwóch elementów skupiających tj. talerza paraboloidalnego o średnicy 1,8m oraz pierścienia wyklejonego folią refleksyjną otaczającego lustro o średnicy – 1,2 m (rys. 4.). Pomimo, iż powierzchnia lustra jest mniejsza niż powierzchnia pierścienia to koncentracja promieni świetlnych skupionych przy użyciu jedynie samego lustra jest większa niż przy użyciu folii, a to ze względu na fakt, iż lustro charakteryzuje się bardzo wysokim współczynnikiem refleksyjności. Koncentrator połączony jest z układem śledzącym położenie słońca opartym na algorytmie astronomicznym. Elementami wykonawczymi są dwa siłowniki liniowe obracające koncentratorem w dwóch płaszczyznach zmieniając kąty azymutu i elewacji [4].



Rys. 4. Schemat koncentratora promieniowania [4]



Rys. 5. Zdjęcia koncentratora promieniowania

Do badań konwersji energii skoncentrowanego promieniowania słonecznego wykorzystano mały panel fotowoltaiczny o mocy nominalnej 0,8W. Powierzchnia polikrystalicznego krzemu w zastosowanym module wynosi 80 cm<sup>2</sup>. Podczas badań zasilany skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym moduł fotowoltaiczny podłączony był do obciążenia o zmiennym oporze. W ten sposób wyznaczono charakterystyki energetyczne urządzenia, a tym samym maksymalne wartości mocy panelu PV.

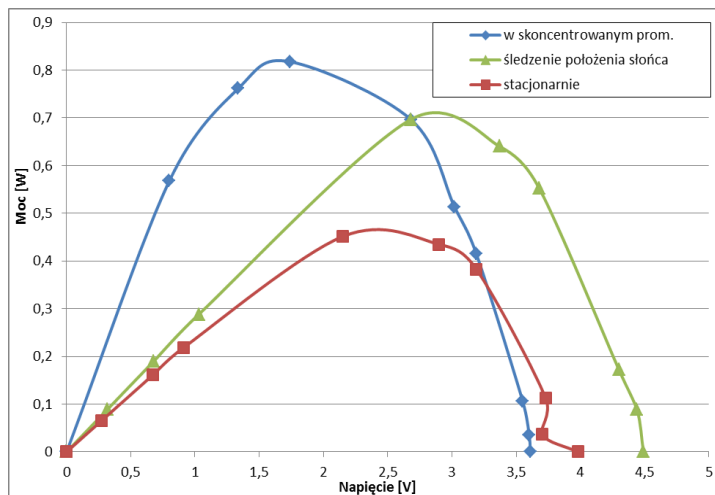
### 3. BADANIE MOCY OGNIWA FOTOWOLTAICZNEGO

#### 3.1. PORÓWNANIE MOCY OGNIWA PV STACJONARNEGO OBROTOWEGO I W KONCENTRATORZE

W celu wykazania stosowności wykorzystania skoncentrowanego promieniowania słonecznego na potrzeby zasilania ogniw fotowoltaicznych przeprowadzono badanie trzech wariantów. Wykonano pomiary napięcia i natężenia prądu zmieniając obciążenie układu dla tego samego modułu, ale w różnym usytuowaniu, tj:

- a) moduł fotowoltaiczny zamocowany stacjonarnie i skierowany na stronę południową oraz nachylony pod kątem ok 30°.
- b) moduł fotowoltaiczny skierowano na tarczę słoneczną i zamocowano w układzie śledzenia położenia słońca
- c) panel fotowoltaiczny skierowany na tarczę koncentratora i umieszczono w pobliżu ogniska tak by nie nastąpiło jego uszkodzenie na skutek wysokich temperatur.

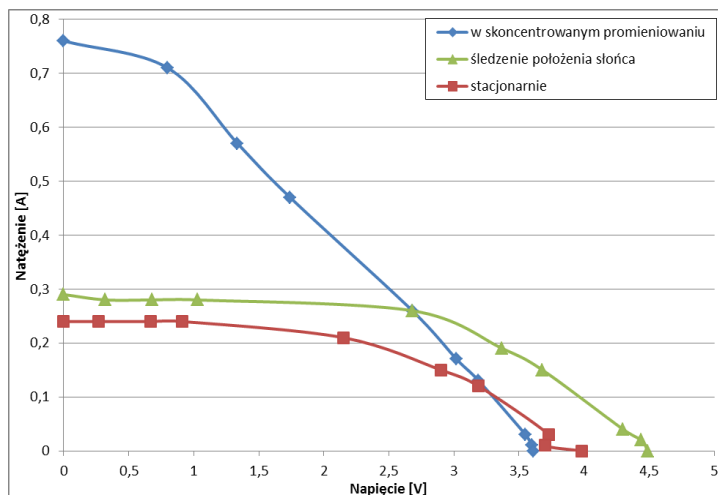
Wyniki zaprezentowano w formie wykresów charakterystyki mocy (rys. 6) oraz prądu (rys. 7) do napięcia. Ponadto najważniejsze punkty charakterystyczne zawarto w tabeli 1.



Rys. 6. Charakterystyka mocy modułu PV w trzech różnych sytuacjach

Należy mieć na uwadze, że zdecydowana większość instalacji fotowoltaicznych montowana jest w sposób stacjonarny i to zazwyczaj pod kątem odpowiadającym kątowi nachylenia dachu budynku na którym montowany jest system. Na wykresie rys.6. widać, że najwyższą wartość mocy otrzymano podczas pomiaru ogniwa zasilanego skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym. W stosunku do tego samego panelu zasilanego w sposób klasyczny tj. usytuowanie stacjonarne, otrzymana moc jest niemalże dwukrotnie wyższa. Aby otrzymać takie parametry elektryczne w stacjonarnym panelu PV jak dla panelu umieszczonego w pobliżu ogniska koncentratora, konieczne byłoby zainstalowanie większej powierzchni modułów co wiąże się z wyższymi nakładami finansowymi. Ponadto, panel fotowoltaiczny w układzie stacjonarnym osiąga o ok. 45% niższą moc w stosunku do modułu PV umocowanego w taki sposób aby utrzymywał stały kąt padania promieni.

Zauważyć jednak należy, że punkt optymalny (MPP – Maximum Power Point) w pomiarze dla ogniwa zasilanego skupionym promieniowaniem słonecznym przesunięty jest w kierunku niższych napięć w stosunku do pozostałych dwóch pomiarów. Instalacje fotowoltaiczne sprzężone są jednak z kontrolerem ładowania, który „wyszukuje” punkt MPP i dostosowuje do niego pracę układu inwerterów.



Rys. 7. Charakterystyka prądowa modułu PV w trzech różnych sytuacjach

Osiągnięty przez moduł fotowoltaiczny umieszczony w skupionym promieniowaniu prąd zwarciaowy jest nawet ponad 3-krotnie wyższy niż prąd zwarciaowy otrzymany w module stacjonarnym. Jego wartość jednak spada nieco szybciej niż w pozostałych dwóch przypadkach (rys.7).

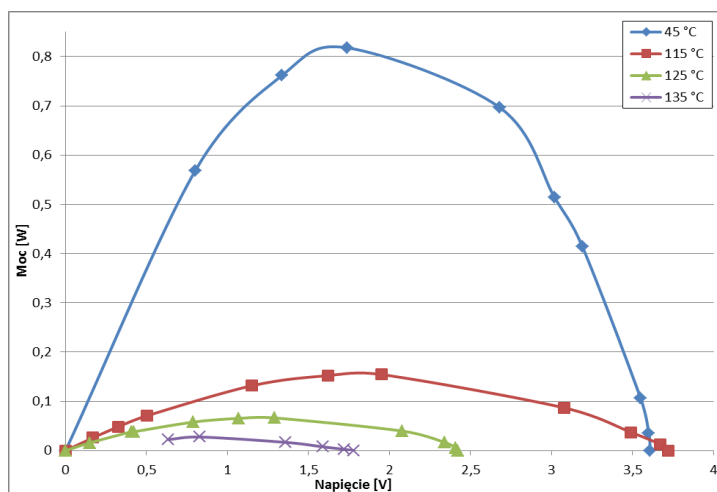
Jednak różnice w otrzymanych wartościach dla krzywej niebieskiej oraz zielonej są stosunkowo nieduże co jest spowodowane panującą w ognisku koncentratora promieniowania słonecznego wysoką temperaturą. Problem ten można rozwiązać poprzez zastosowanie dodatkowego systemu chłodzącego. W kolejnych badaniach planuje się wykonanie kolektora podobnego do przedstawionego na rys.2, gdzie temperatura ogniwa fotowoltaicznego byłaby obniżana poprzez przepływający w rurkach umocowanych na tylnej powierzchni modułu czynnik roboczy. Odebrane w ten sposób ciepło odpadowe wykorzystać można np. w celu dodatkowego zasilania wody użytkowej.

Tabela 1. Zestawienie wartości najważniejszych punktów pomiarowych w badaniu ogniwa PV stacjonarnego, obrotowego i zasilanego skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym

Mierzony parametr	Ogniwo fotowoltaiczne		
	Stacjonarne (pod kątem ok. 30°)	Obrotowe (śledzenie słońca)	W skoncentrowanym promieniowaniu
Moc maksymalna [W]	0,45	0,69	0,81
Napięcie dla mocy maksymalnej [V]	2,15	2,68	1,74
Natężenie dla mocy maksymalnej [A]	0,22	0,27	0,47
Napięcie układu rozwartego [V]	3,98	4,49	3,61
Prąd zwarcia [A]	0,25	0,29	0,76

## 3.2. SPADEK MOCY NA SKUTEK WYSOKICH TEMPERATUR

Faktem jest, że wzrost temperatury ogniwa fotowoltaicznego negatywnie wpływa na ilość generowanej przez niego energii elektrycznej. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań prowadzone były w najcieplejszym okresie roku – lecie. Były to więc idealne warunki do przeprowadzenia testu wykazującego jak duży wpływ na sprawność ogniwa ma wzrost temperatury. Temperaturę modułu fotowoltaicznego zwiększano poprzez zbliżanie go do ogniska koncentratora promieniowania słonecznego, a jej pomiar odbywał się przy zastosowaniu termopary typu K zamocowanej na tylnej powierzchni modułu. Na wykresach rys. 8 oraz rys. 9 zaprezentowano charakterystyki tego samego modułu, ale o różnych temperaturach. Pomiar przeprowadzono dla trzech temperatur: 115 °C, 125 °C, 135 °C i porównano z wynikami otrzymanymi w poprzednim badaniu gdzie ogniwo usytuowane było w „bezpiecznej” odległości od ogniska koncentratora. Temperatura 135 °C okazała się być krytyczną. Podczas tego pomiaru moduł fotowoltaiczny uległ zniszczeniu, stąd krzywe fioletowe są „niedokończone”.

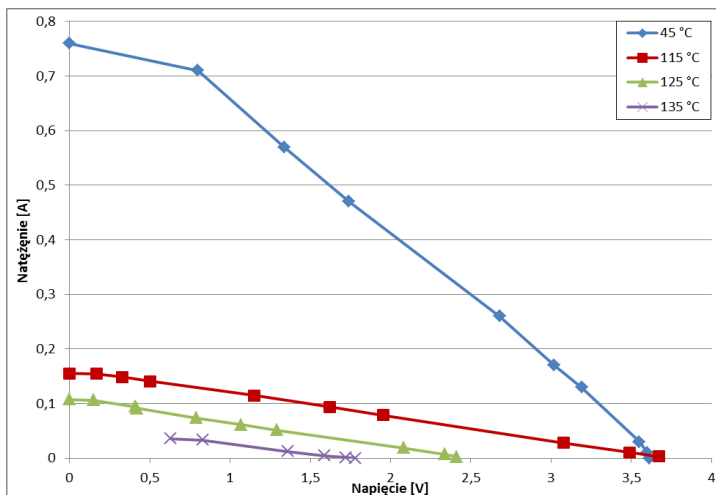


Rys. 8. Charakterystyka mocy modułu PV dla jego różnych temperatur

Odczytując wykres rys. 8 od razu widać jak ogromny wpływ na sprawność modułu ma jego temperatura. Dla wartości powyżej 100 °C, generowana przez moduł moc elektryczna jest ponad 5,5 krotnie niższa niż w przypadku modułu o niższej temperaturze tj. usytuowanym w bezpiecznej odległości od ogniska. Pomimo, że ogniwo było zbliżane do ogniska co powodowało, iż energia promieniowania dostarczana do jego powierzchni zwiększała się, jego wydajność drastycznie spadła przez rosnącą temperaturę. Widać również, że nawet dla bardzo wysokich temperatur moc ogniwa wciąż spada. Np. moc wygenerowana przez panel o temperaturze maksymalnie zbadanej



tj. 135 °C jest o ok. 85% niższa niż w przypadku mocy wygenerowanej przez panel o temperaturze 115 °C.



Rys. 9. Charakterystyka prądowa modułu PV dla jego różnych temperatur

Ze względu na przegrzanie panelu fotowoltaicznego dla temperatury 135 °C nie wyznaczono prądu zwarcia panelu. Pomimo tego, kształt krzywej fioletowej jest zachowany i ostatnią zmierzoną wartością prądu tj. ok. 30mA można uznać za szacowaną wartość prądu zwarcia w tym pomiarze, co zaznaczoną linią przerywaną na wykresie rys. 9. Osiągane maksymalne wartości natężenia prądu dla modułu o temperaturach wyższych niż 100 °C są o ponad 80% niższe niż w przypadku modułu o temperaturze 45 °C. W tabeli 2 umieszczono zmierzone podczas badań wartości najważniejszych parametrów energetycznych.

Tabela 2. Zestawienie wartości najważniejszych punktów pomiarowych w badaniu ogniwa PV o różnych temperaturach pracy

Mierzony parametr	Ogniwo fotowoltaiczne			
	45 °C	115 °C	125 °C	135 °C
Moc maksymalna [W]	0,81	0,15	0,06	0,02
Napięcie dla mocy maksymalnej [V]	1,74	1,62	1,07	0,63
Natężenie dla mocy maksymalnej [A]	0,47	0,09	0,06	0,03
Napięcie układu rozwartego [V]	3,61	3,67	2,41	1,72
Prąd zwarcia [A]	0,76	0,16	0,11	~0,03*

(\*) wynik ekstrapolacji jak na rysunku 9.

#### 4. WNIOSKI

Przedstawione w artykule wyniki badań miały na celu wykazanie czy zastosowanie standardowych ogniw fotowoltaicznych zasilanych skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym jest stosowne. Analiza przeprowadzonych pomiarów dowodzi, że wykorzystanie skupionego promieniowania świetlnego w celu zasilenia ogniwa fotowoltaicznego przynosi pozytywny efekt i powoduje zwiększenie ilości generowanej przez moduł PV mocy, a zasięg odbicia promieni słonecznych przez koncentrator jest dosyć szeroki. Osiągane wartości natężenia prądu oraz mocy są w tym przypadku wyższe niż dla takiego samego modułu fotowoltaicznego skierowanego bezpośrednio na tarczę słoneczną. Wykorzystanie jednak tej technologii wiąże się z pewnym zasadniczym problemem. Mianowicie, skierowanie na powierzchnię ogniwa fotowoltaicznego większego natężenia promieniowania słonecznego powoduje podniesienie jego temperatury. Objawia się to znacznym spadkiem sprawności konwersji energii promieniowania na energię elektryczną. Zjawisko to zaprezentowane zostało na wykresach rys.8 i rys.9 gdzie widoczne jest, że moc modułu umieszczonego w pewnej „bezpiecznej” dla niego odległości od ogniska jest dość wysoka, natomiast dla sytuacji w której moduł zbliżany był do punktu skupienia jego sprawność obniżała się, a w krytycznym momencie, na skutek wysokich temperatur, moduł uległ zniszczeniu. Gdyby jednak panel fotowoltaiczny poddać ciągłemu i wydajnemu procesowi chłodzenia w trakcie jego pracy, to efektywność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną byłaby na pewno dużo wyższa. Analiza wyników pozyskanych z przeprowadzonych pomiarów jest podstawą do prowadzenia dalszych badań w kierunku wykorzystania urządzeń koncentrujących promienie słoneczne w celu zasilania ogniw PV, przy czym dalsze badania powinny być prowadzone z zastosowaniem dodatkowego układu chłodzącego moduł fotowoltaiczny.

*Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mariusz Filipowicz, Prof. AGH  
Praca wykonana w ramach działalności statutowej WEiP, AGH  
„Badania uwarunkowań zrównoważonego rozwoju energetycznego”*

#### LITERATURA

- [1] GODLEWSKI J., *Wydajna fotowoltaika – potencjalne możliwości*, [w:] Czysta Energia - nr 5/2013, Poznań 2013.
- [2] CHANDLER D. L., *How to tap the sun's energy through heat as well as light*, [w:] <http://www.mit.edu/newsoffice/2014/how-to-tap-the-suns-energy-through-heat-as-well-as-light-0119.html>. [ostatni dostęp: 30.01.2014r]
- [3] <http://tehaco-energy.com/produkty/kolektory-sloneczne/hybrydowe-kolektory-sloneczne-pvt/> [ostatni dostęp: 30.01.2014r]

- [4] FILIPOWICZ M., WAJSS P., TOMSKI M., SZUBEL M., SORNEK K, GASTOŁ M., BOŻEK E., *Wykorzystanie skoncentrowanego promieniowania słonecznego w warunkach polskich*, Rynek Instalacyjny 12/2012, Warszawa 2012, s.30-32.

#### ANALYSIS OF ELECTRIC POWER GENERATED BY PHOTOVOLTAIC CELLS IN CONCENTRATED SOLAR RADIATION

Solar power engineering is rapidly developing nowadays. The researches focused on the possibilities of the use of concentrated solar radiation are in progress at the Department of Energy and Fuels AGH in Krakow. One of the possibilities is to power a photovoltaic modules. This technology allows to increase the amount of electrical power generated by the PV module compared to the module of the same area positioned in the standard way. This article presents the results of research on increasing the efficiency of photovoltaic cells through the use of solar radiation concentrator. First of all three cases were compared: a module located stationarily, rotatably and in concentrated light. This study demonstrated that the use of this technology its justified. It was also shown that it is important to properly cool the photovoltaic cell which is powered by concentrated solar radiation, as indicated by results presented in Section 3.2 of this article.