

## Research in real conditions of amorphous solar panels

**Wojciech Szczepański**

*Wydział Mechaniczny, Katedra Energetyki,  
Politechnika Koszalińska, Ul. Raławicka 15-17, 75-620 Koszalin,  
Email: wojciech.szczepanski.94@gmail.com*

*ABSTRACT. W artykule przedstawiono wyniki badań w warunkach oddziaływań rzeczywistych otoczenia amorficznych ogniw fotowoltaicznych. Eksperyment wykonano na stanowisku badawczym umiejscowionym w Laboratorium Katedry Energetyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono charakterystyki prądowo-napięciowe oraz zależności uzyskanej mocy od generowanego napięcia. Uzyskane charakterystyki wykazują typowe przebiegi natomiast generowana moc oraz sprawność są niższe od deklarowanych przez producenta.*

*KEY WORDS: ogniwo fotowoltaiczne, monokrystaliczny, polikrystaliczny, cienkowarstwowy amorficzny, amorficzny panel fotowoltaiczny, ogniwo fotoelektryczne*

---

## 1. Wstęp

Nieustanny rozwój ludzkości doprowadza do ciągłego wzrostu zużycia konwencjonalnych paliw, ich cen, jak i podwyższenie standardów ochrony środowiska, które zmuszają ludzkość do odkrywania coraz to nowszych, niekonwencjonalnych źródeł energii. Do niskoemisyjnych źródeł energii wliczają się m.in. energia wiatru, wody jak i energia Słońca. Energia słoneczna zaliczana jest do najbardziej przyjaznych dla środowiska, ponieważ nie występują w niej żadne zanieczyszczenia.

Do górnej granicy atmosfery ziemskiej dociera promieniowanie słoneczne, którego wartość zależy od ruchu Ziemi po orbicie wokół Słońca. W lipcu energia promieniowania słonecznego jest równa  $1,33 \text{ kW/m}^2$  zaś zimą występuje na poziomie  $1,42 \text{ kW/m}^2$ . Strumień energii jaki trafia do atmosfery wynosi ok.  $178 \times 10^{15} \text{ W}$ . Parametrem opisującym energię słoneczną docierającą do zewnętrznej atmosfery ziemskiej jest stała słoneczna, która wynosi  $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ . (Maria Waclawek, Tadeusz Rodziewicz 2011) Szacuje się, że w Polsce wartość napromieniowania w ciągu 20 lat badań w północnej części kraju wyniosła  $1004 \text{ kWh/m}^2$ . (Grażyna Jastrzębska 2013)

Promieniowanie słoneczne absorbowane przez powierzchnię Ziemi podlega zjawiskom rozproszenia i odbicia. Dzieli się je na trzy podstawowe rodzaje.

**Promieniowanie bezpośrednie** – to takie, które w sposób bezpośredni, bez utrudnień trafia do powierzchni Ziemi. Przenosi największą ilość energii. Kierunek padania promieniowania słonecznego ma znaczenie dla efektywności działania ogniw fotowoltaicznych.

**Promieniowanie rozproszone** – jest to promieniowanie powstające w efekcie załamania strumienia fotonów wywołanego składnikami atmosfery np. chmurami. Dociera ono jednak do powierzchni Ziemi, ale w związku z rozproszeniem fal wyłącznie do powierzchni trafiają fotony o mniejszej energii.

**Promieniowanie odbite** – tworzy się wskutek odbicia od elementów występujących na Ziemi np. budynki. Promieniowanie to nie jest wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej. (Izabela Góralczyk, Ryszard Tytko 2016)

## 2. Ogniwo fotowoltaiczne – budowa i zasada działania

### 2.1. Efekt fotowoltaiczny

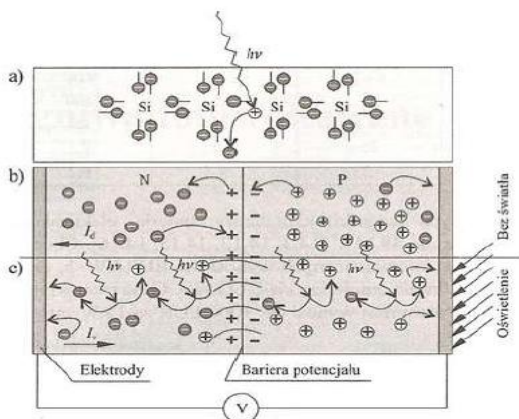
Promieniowanie słoneczne docierające do ogniwa fotowoltaicznego ulega konwersji w energię elektryczną w wyniku zjawiska fotowoltaicznego. (Wojciech Oszczak 2014)

Mechanizm efektu fotowoltaicznego polega na tworzeniu się siły elektromotorycznej pod wpływem zjawisk fizycznych w niejednorodnym materiale w

wyniku jego oświetlenia. Tym materiałem może być złącze dwóch półprzewodników np. metalu i półprzewodnika bądź półprzewodnika i elektrolitu. (Maria Waclawek, Tadeusz Rodziewicz 2011) Zjawisko fotowoltaiczne odbywa się we wszystkich półprzewodnikach. Dla każdego z półprzewodników występuje przy innej długości fal promieniowania słonecznego. Półprzewodnikami są pierwiastki, dla których bariera potencjału wynosi mniej niż 5 eV. (Grażyna Jastrzębska 2013)

Fotony posiadające odpowiednią ilość energii, powodują uwalnianie elektronów z wiązań sieci krystalicznych znajdujących się w paśmie walencyjnym a następnie ich przepływ do pasma przewodnictwa. Występują w ten sposób dziury mające potencjał dodatni w miejscu po wybitym elektronie o potencjale ujemnym. Elektron z wiązania sąsiedniego zastępuje dziurę po wcześniej uwolnionym elektronie. W miejscu gdzie znajdował się elektron powstaje nowa dziura. Jeśli w półprzewodniku występuje więcej elektronów to jest to półprzewodnik *typu n* natomiast, jeżeli w półprzewodniku znajduje się więcej dziur to jest to półprzewodnik *typu p*. (Jan Gronowicz 2010)

Płytki półprzewodników odpowiednio typu *p* i *n* połączone ze sobą tworzą złącze *p - n*. W obszarze styku dwóch płytek półprzewodnikowych występuje wewnętrzne pole elektryczne nazywane obszarem ładunku przestrzennego lub inaczej barierą potencjałów. (Izabela Góralczyk, Ryszard Tytko 2016) W momencie, kiedy płytka półprzewodnika *p - n* jest nieoświetlona to dziury przemieszczają się w kierunku półprzewodnika typu *n*, przez co w półprzewodniku płynie nieznaczny prąd dyfuzyjny  $I_d$ . W sytuacji, gdy półprzewodnik *p - n* zostanie oświetlony to fotony powodują rozdzielanie par elektron - dziura w złączu. Obszar ładunku przestrzennego wywołuje przesunięcie ujemnych ładunków w miejsce obszaru typu *n*. Do obszaru typu *p* trafiają z kolei ładunki dodatnie. Ruch ładunków typu *p* i *n* powoduje w złączu wytworzenie zewnętrznego stałego napięcia. Rozdzielone ładunki posiadają nieskończony czas życia, gdy złącze jest oświetlone a więc półprzewodnik *p - n* pracuje, jako źródło napięcia stałego. (Jan Gronowicz 2010). Na rysunku 1 schematycznie przedstawiono tworzenie się zjawiska fotowoltaicznego.



Rys.1. Efekt fotowoltaiczny; a) zjawisko powstawania dziury, b) występowanie wstecznego prądu zwarcia, c) przepływ prądu gdy złącze jest oświetlone (Jan Gronowicz 2010)

## 2.2. Podział ogniw fotowoltaicznych

Najczęściej wykorzystywanym materiałem, z którego produkowane są ogniwa fotowoltaiczne jest krystaliczny krzem. Szacuje się, że ok 90 % produkcji światowej należy do ogniw wykonywanych na bazie krzemu. Materiał ten posiada wiele zalet, pośród, których najważniejsza to powszechność występowania oraz niewielkie pasmo zabronione. (Ewa Klugmann – Radziemska 2010) Obecnie mamy do czynienia z dynamicznym rozwojem sektora przemysłowego związanego z produkcją fotoogniw, co ma wpływ na spadek ich cen. Jednocześnie odnotowuje się znaczny wzrost sprawności tego typu urządzeń. (Grażyna Jastrzębska 2007)

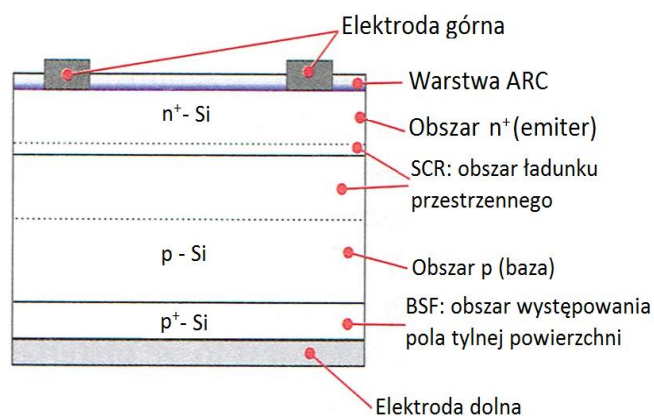


Rys.2. Podział ogniw fotowoltaicznych (<http://www.kolektory.biz/podzial-modulow-fotowoltaicznych/> 2018)

Wysoka powszechność ogniw krzemowych występuje poprzez ogólnie dostępny piasek kwarcowy. W temperaturze 1800 °C ulega rozpuszczeniu i tym samym się oczyszcza. Czystość krzemu jest równa nawet do 99,999 %. Z roztopionego i czystego krzemu otrzymuje się monokryształ ze śladową ilością boru uzyskany w warunkach próżni. (Maciej Nowicki 2012)

### Ogniwa monokrystaliczne

Gotowy monokryształ ze śladową ilością boru posłuży do wytworzenia płytki monokryształu typu p. Druga z płytek wykonywana jest przez dyfuzję fosforem przez co finalnie pozyskiwana jest płytka typu n. Szerokość przerwy zabronionej dla krzemu jest mniejsze od 1,12 eV. Złącze p - n jest w stanie odbierać wyłącznie część promieniowania słonecznego. Ok. 23 % fotonów posiada za małą energię aby wybić elektron, zaś ok. 32 % za dużą energię. Maksymalna sprawność ogniwa monokrystalicznego wynosi 32,9 %, gdy występuje całkowite pochłanianie promieniowania słonecznego. Z dwóch stron ogniwa występują metalowe elektrody. (Grażyna Jastrzębska 2007) Elektroda górna posiada powierzchnię dziesięciokrotnie mniejszą od elektrody dolnej. Elektroda dolna z kolei całościowo pokrywana zostaje powłoką metalizowaną, która pracuje jako lustro odbłaskowe odbijające fotony oraz absorbujące większą ilość fotonów w krzemie. W dolnym obszarze półprzewodnika typu p, poprzez dyfuzję domieszki z grupy III powstaje obszar typu p<sup>+</sup>. W związku z tym na granicy obszarów wytwarza się złącze p - p<sup>+</sup> co prowadzi do powstania pola elektrycznego występującego w tylnej powierzchni ogniwa (BSF). Utworzone pole elektryczne zwraca elektrony od elektrody dolnej i zwiększa możliwie rozdzielanie nośników ładunku, a tym samym wartość powstającego fotoprądu. (Radosław Figura, Wojciech Zientarski 2016)



Rys.3. Budowa typowego ogniwa fotowoltaicznego (Maria Waclawek, Tadeusz Rodziewicz 2011)

**Ogniwa polikrystaliczne**

W przeciwieństwie do ogniw monokrystalicznych ogniwa polikrystaliczne posiadają złącza p - n wytworzone z wielu kryształów identycznego materiału, możliwie z kryształów różnych materiałów. Materiałem do produkcji ogniw fotowoltaicznych polikrystalicznych jest blok krzemu. Krzemowy blok powstaje przeważnie metodą Brigmana lub metodą odlewu bloku. Otrzymany blok zostaje cięty na mniejsze bloki, z których wykonywana są krzemowe płytki posiadające grubość 0,2 mm. Cięty blok krzemowy podlega: szlifowaniu, domieszkowaniu, ułożeniu metalowych elektrod i nałożeniu przeciwodblaskowej struktury. (Radosław Figura, Wojciech Zientarski 2016) Cechą identyfikacyjną ogniw polikrystalicznych jest ich niebieski kolor, poprzez który widoczna jest dokładnie struktura kryształów. Ogniwa polikrystaliczne osiągają maksymalną sprawność na poziomie ok. 20,3 %. Niższa sprawność modułów jest rekompensacją niższej ceny produkcji. (Ryszard Tytko 2015)

**Ogniwa amorficzne**

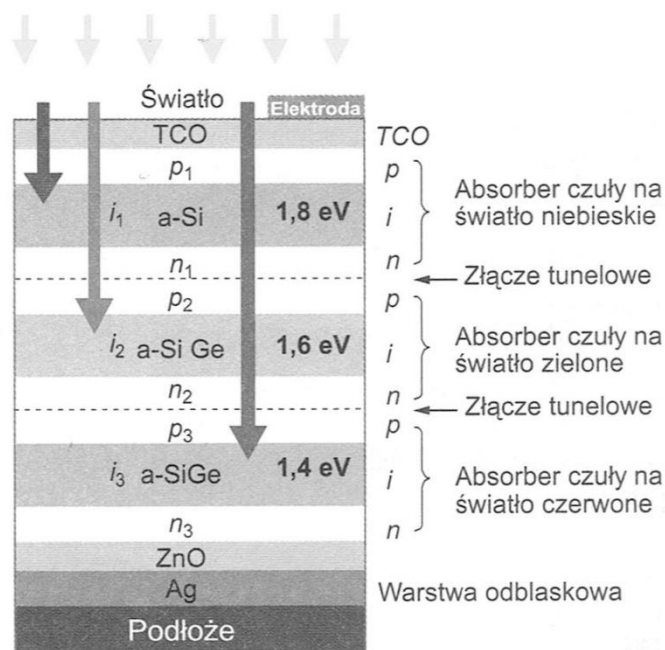
Produkując ogniwa fotowoltaiczne prócz krzemu o budowie krystalicznej wykorzystuje się amorficzny krzem (bezpociowy). Amorficzny krzem cechuje brak uporządkowania atomów jak to ma miejsce w sieci krystalicznej. Ogniwa wykonane z bezpostaciowego krzemu posiadają w swojej budowie wadór od ok. 8 do 12 %. Ogniwa amorficzne dysponują również w budowie strukturalnej wieloma niedoskonałościami. Zawierają inną budowę złącza. Pomędzy warstwami p i n występuje niedomieszkowana warstwa mająca 1  $\mu$  m grubości. Natomiast półprzewodniki typu n i p są domieszkowane fosforem i borem. Standardowe złącze p - n zostało zastąpione złączem p-i-n i n-i-p, gdzie i jest to warstwa samoistnego krzemu. Cienkowarstwowe ogniwa amorficzne charakteryzują się większym współczynnikiem pochłaniania promieniowania słonecznego oraz posiadają większą tolerancję temperaturową w przeciwieństwie do ogniw grubowarstwowych. Pod wpływem absorpcji promieniowania słonecznego w ogniwie występuje efekt Stablera - Wronskiego powodujący obniżenie nawet do ok. 40 % sprawności ogniwa w porównaniu do początkowej wartości. Długotrwałe poddanie ogniwa naświetlaniu powoduje wzrost konduktywności. Zmiany konduktywności ogniwa mogą być znaczące ale proces jest odwracalny. Amorficzne ogniwa pracują stabilnie przy temperaturze pokojowej. Efekt Stablera - Wronskiego doprowadza również do spadku mocy wyjściowej nawet do ok. 20 % nim dojdzie do stabilizacji materiału. Dlatego też ogniwa amorficzne posiadają sprawność równą od ok. 5 do 9 %. (Grażyna Jastrzębska 2013)

Technologia produkcji modułów amorficznych polega na umieszczaniu krzemu w postaci cienkich warstw na odpowiednim materiale np. szkło. Na tak wykonanym module nie dostrzega się pojedynczych ogniw. Wytwarzanie ogniw jest proste i korzystne cenowo poprzez niskie zużycie energii oraz materiału. Wydajność amorficznych ogniw fotowoltaicznych została zwiększona przy pomocy

wielozłączowych konstrukcji. Jest to nałożenie jednego materiału złącza na drugi, który pochłania większe spektrum długości fal. (Radosław Figura, Wojciech Zientarski 2016)

Obecnie występujące cienkowarstwowe ogniwa amorficzne są wykonywane w postaci jedno bądź wielozłączowych konstrukcji typu p-i-n. W górnej części złącza znajduje się przewodząca, przezroczysta warstwa tlenku indu oraz cyny (ITO). Absorber wykonany z materiałów: a-Si:H lub a-SiGe:H dla dwuzłączowych ogniw zaś dla trójzłączowych z a-SiC:H. (Maria Waclawek, Tadeusz Rodziewicz 2011)

Na rysunku 4 zaprezentowano budowę trójzłączowego ogniwa.



Rys.4. Struktura budowy ogniwa trójzłączowego (Ryszard Tytko 2009)

### 3. Badanie pracy amorficznych paneli fotowoltaicznych

Coraz częstsze stosowanie ogniw fotowoltaicznych doprowadza do opracowania dokładnych analiz związanych z użytkowaniem instalacji fotowoltaicznych. Obiektem badań jest złożony z ośmiu paneli amorficznych system fotowoltaiczny umożliwiający wytwarzanie energii elektrycznej przez konwersję energii promieniowania

słonecznego. Pomiary zostały przeprowadzone na terenie Politechniki Koszalińskiej przy ulicy Raclawickiej 15 - teren przy laboratorium OZE.

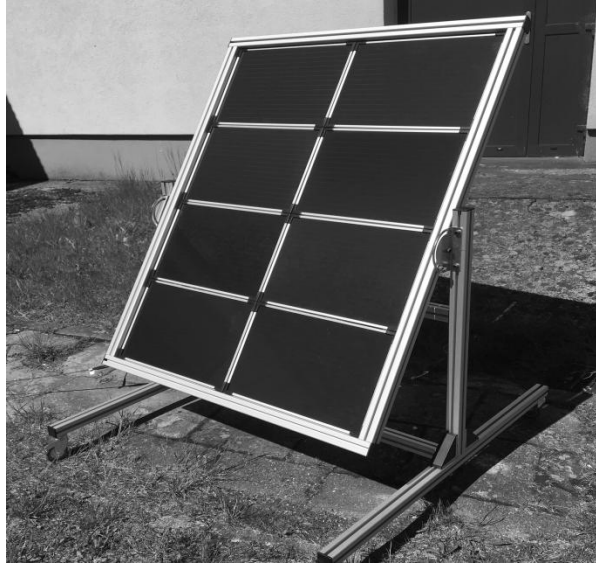
Wykorzystane w badaniu panele amorficzne firmy Conrad o wymiarach 315 x 470 x 30 mm, posiadają następujące parametry w warunkach STC: moc znamionowa: 6 W; napięcie znamionowe: 17,5 V prąd znamionowy: 342 mA; napięcie ogniwa otwartego: 21 V; prąd zwarcia: 450 mA. Każdy z paneli fotowoltaicznych został połączony w sposób równoległy. Połączenie równoległe prowadzi do wzrostu prądu całkowitego układu o tyle ile jest ogniw jednostkowych w obwodzie. Poprzez takie połączenie napięcie uzyskiwane w obwodzie jest równe napięciu pojedynczego ogniwa. Aby przeprowadzić pomiar należało posłużyć się specjalną szafą sterującą - pomiarową występującą w laboratorium Politechniki Koszalińskiej przedstawioną na rysunku 6.



Rys.6. Urządzenie sterująco - pomiarowe, za pomocą którego dokonano pomiarów (opracowanie własne)

Przy pomocy tego urządzenia możliwe było odczytanie: napięcia ogniwa otwartego, prądu zwarcia oraz natężenia prądu i napięcia w danej chwili produkcji przez panele fotowoltaiczne w momencie zmiany rezystancji układu. Zmiany obciążenia odbywały się od 1 do 60  $\Omega$ . Konstrukcja, na której były umieszczone panele fotowoltaiczne usytuowana została na zewnątrz i poddana słonecznemu promieniowaniu słonecznemu w zakresie od 600 do 1000 W/m<sup>2</sup>. Stelaż wraz z zamontowanymi panelami amorficznymi przedstawia rysunek 7.





Rys.7. Stelaż wraz z obsadzonymi amorficznymi panelami fotowoltaicznymi  
(opracowanie własne)

### 3.1. Model obliczeniowy parametrów paneli amorficznych

Moc ogniwa:

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

Moc maksymalna paneli fotowoltaicznych:

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad (2)$$

Współczynnik wypełnienia:

$$m = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3)$$

Sprawność ogniwa fotowoltaicznego:

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{G} \quad (4)$$

gdzie:  $U$  - napięcie [V],  $I$  - natężenie prądu [A],  $U_m$  - napięcie maksymalne [V],  $I_m$  - prąd maksymalny [A],  $U_{oc}$  - napięcie biegu jałowego [V],  $I_{sc}$  - prąd zwarcia [A],  $G$  - moc promieniowania słonecznego [W]

### 3.2. Tabela wielkości badanych amorficznego panelu fotowoltaicznego

W tabelach znajdujących się poniżej zaprezentowane zostały parametry zmierzone m.in: napięcie oraz natężenie prądu występujące w danej chwili wystąpienia określonego obciążenia, napięcie biegu jałowego, prąd zwarcia czy moc promieniowania słonecznego. Tabele przedstawiają także wielkości obliczone takie jak: moc paneli w określonej chwili, moc maksymalną, współczynnik wypełnienia czy sprawność paneli fotowoltaicznych.

Tabela 1 Parametry amorficznego panelu fotowoltaicznego przy natężeniu promieniowania słonecznego  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Natężenie promieniowania słonecznego $G$ [ $\text{W/m}^2$ ]	Rezystancja $R$ [ $\Omega$ ]	Natężenie prądu $I$ [A]	Napięcie $U$ [V]	Temperatura $T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Moc $P$ [W]	Prąd zwarcia $I_{sc}$ [A]	Napięcie biegu jałowego $U_{oc}$ [V]	Napięcie maksymalne $U_m$ [V]	Prąd maksymalny $I_m$ [A]	Moc maksymalna $P_m$ [W]	Współczynnik wypełnienia $m$ [-]	Sprawność fotoogniwa $\eta$ [%]
1000	0	2,5	0,4	48,6	1	2,5	0,4	16,4	1,8	29,52	29,52	2,95
	1	2,4	2,9		6,96							
	2	2,4	5,3		12,72							
	3	2,3	7,6		17,48							
	4	2,3	9,7		22,31							
	5	2,2	11,5		25,3							
	6	2,1	13		27,3							
	7	2	14,4		28,8							
	8	1,9	15,5		29,45							
	9	1,8	16,4		29,52							
	10	1,7	17		28,9							
	11	1,6	17,4		27,84							
	12	1,5	17,9		26,85							
	13	1,4	18,3		25,62							
	14	1,4	18,6		26,04							
	15	1,3	18,9		24,57							
	16	1,2	19,1		22,92							
	17	1,2	19,3		23,16							
	18	1,1	19,5		21,45							
	19	1,1	19,7		21,67							
	20	1	19,8		19,8							
	21	1	19,9		19,9							
	22	1	20		20							
	23	0,9	20,1		18,09							
	24	0,9	20,2		18,18							
	25	0,9	20,3		18,27							
	26	0,8	20,4		16,32							
	27	0,8	20,4		16,32							
	28	0,8	20,5		16,4							
	29	0,8	20,5		16,4							
	30	0,7	20,6		14,42							
	31	0,7	20,7		14,49							
	32	0,7	20,7		14,49							
	33	0,7	20,8		14,56							
	34	0,7	20,8		14,56							
	35	0,7	20,8		14,56							
	36	0,6	20,9		12,54							
	37	0,6	20,9		12,54							
	38	0,6	21		12,6							
	39	0,6	21		12,6							
	40	0,6	21		12,6							
	41	0,6	21		12,6							
	42	0,6	21		12,6							
	43	0,6	21,1		12,66							
	44	0,5	21,1		10,55							
	45	0,5	21,1		10,55							
	46	0,5	21,1		10,55							
	47	0,5	21,2		10,6							
	48	0,5	21,2		10,6							
	49	0,5	21,2		10,6							
	50	0,5	21,2		10,6							
	51	0,5	21,2		10,6							
	52	0,5	21,2		10,6							
	53	0,5	21,2		10,6							
	54	0,5	21,3		10,65							
	55	0,5	21,3		10,65							
	56	0,4	21,3		8,52							
	57	0,4	21,3		8,52							
	58	0,4	21,3		8,52							
	59	0,4	21,3		8,52							
60	0,4	21,3	8,52									

Tabela 2 Parametry amorficznego panelu fotowoltaicznego przy natężeniu promieniowania słonecznego 900 W/m<sup>2</sup>.

Natężenie promieniowania słonecznego G [W/m <sup>2</sup> ]	Rezystancja R [Ω]	Natężenie prądu I [A]	Napięcie U [V]	Temperatura T [°C]	Moc P [W]	Prąd zwarcia I <sub>sc</sub> [A]	Napięcie biegu jałowego U <sub>oc</sub> [V]	Napięcie maksymalne U <sub>m</sub> [V]	Prąd maksymalny I <sub>m</sub> [A]	Moc maksymalna P <sub>m</sub> [W]	Współczynnik wypełnienia m [-]	Sprawność fotoogniwa η [%]
900	0	2,2	0,5	47	1,1	2,2	0,5	15,2	1,7	25,84	23,49	2,87
	1	2,1	2,7		5,67							
	2	2,1	4,8		10,08							
	3	2	6,8		13,6							
	4	2	8,6		17,2							
	5	1,9	10,2		19,38							
	6	1,9	11,7		22,23							
	7	1,8	13,1		23,58							
	8	1,7	14,3		24,31							
	9	1,7	15,2		25,84							
	10	1,6	16		25,6							
	11	1,5	16,5		24,75							
	12	1,4	17		23,8							
	13	1,4	17,5		24,5							
	14	1,3	17,9		23,27							
	15	1,3	18,2		23,66							
	16	1,2	18,5		22,2							
	17	1,1	18,7		20,57							
	18	1,1	18,9		20,79							
	19	1	19,1		19,1							
	20	1	19,2		19,2							
	21	1	19,3		19,3							
	22	0,9	19,5		17,55							
	23	0,9	19,6		17,64							
	24	0,9	19,7		17,73							
	25	0,9	19,8		17,82							
	26	0,8	19,9		15,92							
	27	0,8	20		16							
	28	0,8	20		16							
	29	0,8	20,1		16,08							
	30	0,7	20,1		14,07							
	31	0,7	20,2		14,14							
	32	0,7	20,3		14,21							
	33	0,7	20,4		14,28							
	34	0,7	20,4		14,28							
	35	0,6	20,4		12,24							
	36	0,6	20,5		12,3							
	37	0,6	20,5		12,3							
	38	0,6	20,5		12,3							
	39	0,6	20,6		12,36							
	40	0,6	20,6		12,36							
	41	0,6	20,7		12,42							
	42	0,6	20,7		12,42							
	43	0,5	20,7		10,35							
	44	0,5	20,7		10,35							
	45	0,5	20,8		10,4							
	46	0,5	20,8		10,4							
	47	0,5	20,8		10,4							
	48	0,5	20,9		10,45							
	49	0,5	20,9		10,45							
	50	0,5	20,9		10,45							
	51	0,5	20,9		10,45							
	52	0,5	20,9		10,45							
	53	0,5	20,9		10,45							
	54	0,5	20,9		10,45							
	55	0,4	21		8,4							
	56	0,4	21		8,4							
	57	0,4	21		8,4							
	58	0,4	21		8,4							
	59	0,4	21		8,4							
60	0,4	21	8,4									

Tabela 3 Parametry amorficznego panelu fotowoltaicznego przy natężeniu promieniowania słonecznego 800 W/m<sup>2</sup>.

Natężenie promieniowania słonecznego G [W/m <sup>2</sup> ]	Rezystancja R [Ω]	Natężenie prądu I [A]	Napięcie U [V]	Temperatura T [°C]	Moc P [W]	Prąd zwarcia I <sub>sc</sub> [A]	Napięcie biegu jałowego U <sub>oc</sub> [V]	Napięcie maksymalne U <sub>m</sub> [V]	Prąd maksymalny I <sub>m</sub> [A]	Moc maksymalna P <sub>m</sub> [W]	Współczynnik wypełnienia m [-]	Sprawność fotoogniwa η [%]
800	0	1,8	0,4	46,5	0,72	1,8	0,4	15,9	1,4	22,26	30,92	2,78
	1	1,8	2,2		3,96							
	2	1,8	4		7,2							
	3	1,8	5,9		10,62							
	4	1,7	7,4		12,58							
	5	1,7	8,9		15,13							
	6	1,7	10,3		17,51							
	7	1,6	11,6		18,56							
	8	1,6	12,8		20,48							
	9	1,5	13,9		20,85							
	10	1,4	14,7		20,58							
	11	1,4	15,2		21,28							
	12	1,4	15,9		22,26							
	13	1,3	16,5		21,45							
	14	1,2	16,9		20,28							
	15	1,2	17,3		20,76							
	16	1,1	17,6		19,36							
	17	1,1	18		19,8							
	18	1,1	18,2		20,02							
	19	1	18,4		18,4							
	20	1	18,7		18,7							
	21	1	18,8		18,8							
	22	0,9	19		17,1							
	23	0,9	19,1		17,19							
	24	0,9	19,3		17,37							
	25	0,8	19,4		15,52							
	26	0,8	19,5		15,6							
	27	0,8	19,6		15,68							
	28	0,8	19,6		15,68							
	29	0,7	19,7		13,79							
	30	0,7	19,8		13,86							
	31	0,7	19,9		13,93							
	32	0,7	19,9		13,93							
	33	0,7	20		14							
	34	0,6	20		12							
	35	0,6	20,1		12,06							
	36	0,6	20,1		12,06							
	37	0,6	20,2		12,12							
	38	0,6	20,2		12,12							
	39	0,6	20,3		12,18							
	40	0,6	20,3		12,18							
	41	0,6	20,4		12,24							
	42	0,5	20,4		10,2							
	43	0,5	20,4		10,2							
	44	0,5	20,5		10,25							
	45	0,5	20,5		10,25							
	46	0,5	20,5		10,25							
	47	0,5	20,6		10,3							
	48	0,5	20,6		10,3							
	49	0,5	20,6		10,3							
	50	0,5	20,6		10,3							
	51	0,5	20,7		10,35							
	52	0,5	20,7		10,35							
	53	0,5	20,7		10,35							
	54	0,4	20,8		8,32							
	55	0,4	20,8		8,32							
	56	0,4	20,8		8,32							
	57	0,4	20,8		8,32							
	58	0,4	20,8		8,32							
	59	0,4	20,9		8,36							
60	0,4	20,9	8,36									

Tabela 4 Parametry amorficznego panelu fotowoltaicznego przy natężeniu promieniowania 700 W/m<sup>2</sup>.

Natężenie promieniowania słonecznego G [W/m <sup>2</sup> ]	Rezystancja R [Ω]	Natężenie prądu I [A]	Napięcie U [V]	Temperatura T [°C]	Moc P [W]	Prąd zwarcia I <sub>sc</sub> [A]	Napięcie biegu jałowego U <sub>oc</sub> [V]	Napięcie maksymalne U <sub>m</sub> [V]	Prąd maksymalny I <sub>m</sub> [A]	Moc maksymalna P <sub>m</sub> [W]	Współczynnik wypełnienia m [-]	Sprawność fotoogniwa η [%]
700	0	1,6	0,4	45,3	0,64	1,6	0,4	16,4	1,1	18,04	28,19	2,58
	1	1,6	1,9		3,04							
	2	1,5	3,4		5,1							
	3	1,5	5		7,5							
	4	1,5	6,4		9,6							
	5	1,5	7,6		11,4							
	6	1,4	8,8		12,32							
	7	1,4	10		14							
	8	1,4	11,1		15,54							
	9	1,3	12,1		15,73							
	10	1,3	12,9		16,77							
	11	1,2	13,6		16,32							
	12	1,2	14,3		17,16							
	13	1,2	15		18							
	14	1,1	15,5		17,05							
	15	1,1	16		17,6							
	16	1,1	16,4		18,04							
	17	1	16,8		16,8							
	18	1	17,2		17,2							
	19	1	17,4		17,4							
	20	0,9	17,7		15,93							
	21	0,9	17,9		16,11							
	22	0,9	18,1		16,29							
	23	0,8	18,3		14,64							
	24	0,8	18,4		14,72							
	25	0,8	18,6		14,88							
	26	0,8	18,7		14,96							
	27	0,7	18,8		13,16							
	28	0,7	19		13,3							
	29	0,7	19,1		13,37							
	30	0,7	19,2		13,44							
	31	0,7	19,3		13,51							
	32	0,7	19,3		13,51							
	33	0,6	19,4		11,64							
	34	0,6	19,5		11,7							
	35	0,6	19,6		11,76							
	36	0,6	19,6		11,76							
	37	0,6	19,7		11,82							
	38	0,6	19,7		11,82							
	39	0,6	19,8		11,88							
	40	0,6	19,8		11,88							
	41	0,5	19,9		9,95							
	42	0,5	19,9		9,95							
	43	0,5	20		10							
	44	0,5	20		10							
	45	0,5	20		10							
	46	0,5	20,1		10,05							
	47	0,5	20,1		10,05							
	48	0,5	20,1		10,05							
	49	0,5	20,2		10,1							
	50	0,5	20,2		10,1							
	51	0,5	20,2		10,1							
	52	0,5	20,3		10,15							
	53	0,4	20,3		8,12							
	54	0,4	20,3		8,12							
	55	0,4	20,4		8,16							
	56	0,4	20,4		8,16							
	57	0,4	20,4		8,16							
	58	0,4	20,4		8,16							
	59	0,4	20,4		8,16							
60	0,4	20,5	8,2									

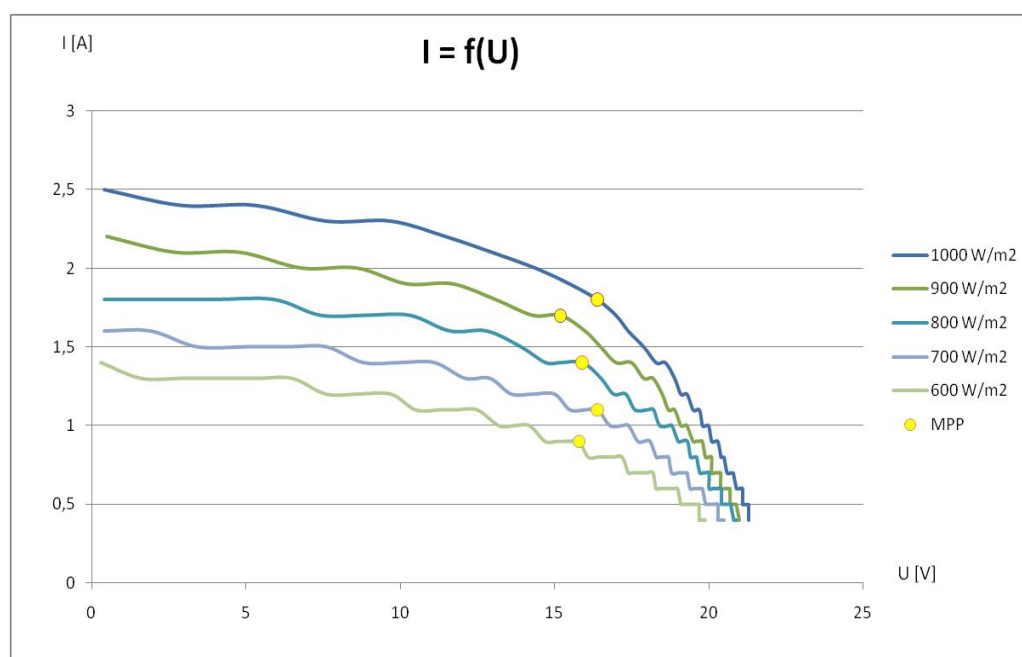
Tabela 5 Parametry amorficznych paneli fotowoltaicznych przy natężeniu promieniowania słonecznego 600 W/m<sup>2</sup>.

Natężenie promieniowania słonecznego G [W/m <sup>2</sup> ]	Rezystancja R [Ω]	Natężenie prądu I [A]	Napięcie U [V]	Temperatura T [°C]	Moc P [W]	Prąd zwarcia I <sub>sc</sub> [A]	Napięcie biegu jałowego U <sub>oc</sub> [V]	Napięcie maksymalne U <sub>m</sub> [V]	Prąd maksymalny I <sub>m</sub> [A]	Moc maksymalna P <sub>m</sub> [W]	Współczynnik wypełnienia m [ ]	Sprawność fotoogniwa η [%]
600	0	1,4	0,3	44,3	0,42	1,4	0,3	15,8	0,9	14,22	33,86	2,37
	1	1,3	1,6		2,08							
	2	1,3	2,9		3,77							
	3	1,3	4,3		5,59							
	4	1,3	5,4		7,02							
	5	1,3	6,5		8,45							
	6	1,2	7,6		9,12							
	7	1,2	8,6		10,32							
	8	1,2	9,7		11,64							
	9	1,1	10,5		11,55							
	10	1,1	11,3		12,43							
	11	1,1	11,8		12,98							
	12	1,1	12,5		13,75							
	13	1	13,2		13,2							
	14	1	13,7		13,7							
	15	1	14,2		14,2							
	16	0,9	14,7		13,23							
	17	0,9	15,1		13,59							
	18	0,9	15,5		13,95							
	19	0,9	15,8		14,22							
	20	0,8	16,1		12,88							
	21	0,8	16,4		13,12							
	22	0,8	16,7		13,36							
	23	0,8	16,9		13,52							
	24	0,8	17,2		13,76							
	25	0,7	17,4		12,18							
	26	0,7	17,5		12,25							
	27	0,7	17,7		12,39							
	28	0,7	17,9		12,53							
	29	0,7	18		12,6							
	30	0,7	18,2		12,74							
	31	0,6	18,3		10,98							
	32	0,6	18,4		11,04							
	33	0,6	18,6		11,16							
	34	0,6	18,7		11,22							
	35	0,6	18,8		11,28							
	36	0,6	18,8		11,28							
	37	0,6	18,9		11,34							
	38	0,6	19		11,4							
	39	0,5	19,1		9,55							
	40	0,5	19,1		9,55							
	41	0,5	19,2		9,6							
	42	0,5	19,3		9,65							
	43	0,5	19,3		9,65							
	44	0,5	19,4		9,7							
	45	0,5	19,4		9,7							
	46	0,5	19,5		9,75							
	47	0,5	19,5		9,75							
	48	0,5	19,6		9,8							
	49	0,5	19,7		9,85							
	50	0,5	19,7		9,85							
	51	0,4	19,7		7,88							
	52	0,4	19,7		7,88							
	53	0,4	19,7		7,88							
	54	0,4	19,8		7,92							
	55	0,4	19,8		7,92							
	56	0,4	19,8		7,92							
	57	0,4	19,8		7,92							
	58	0,4	19,9		7,96							
	59	0,4	19,9		7,96							
60	0,4	19,9	7,96									

### 3.3. Charakterystyki badanego amorficznego panelu fotowoltaicznego

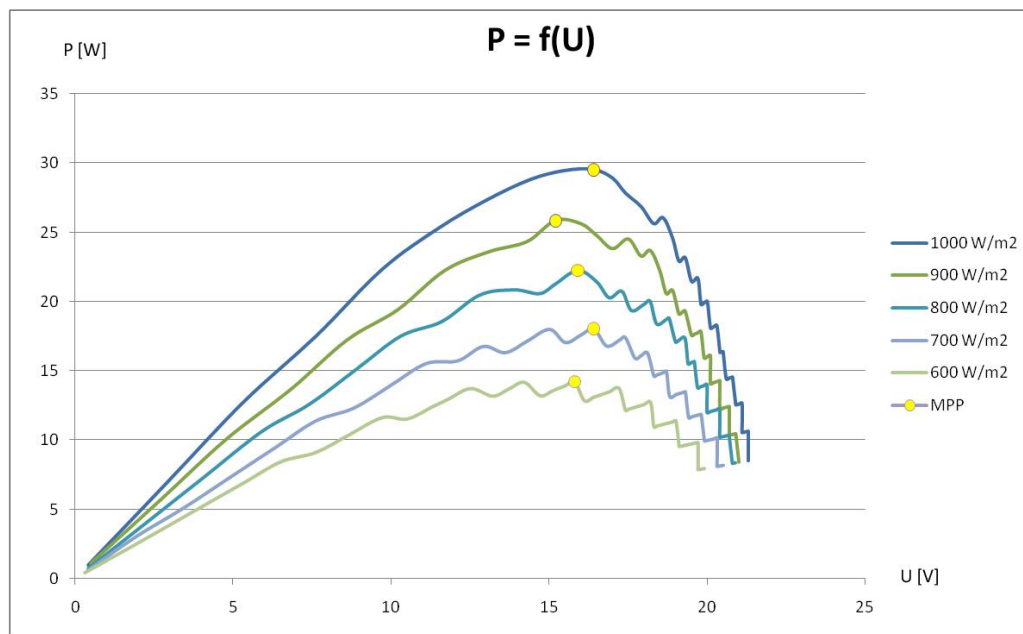
Na podstawie zmienności natężenia promieniowania słonecznego wyznaczone zostały charakterystyki: prądowo - napięciowe  $I = f(U)$  oraz mocy od napięcia  $P = f(U)$ ; wraz z umiejscowieniem na nich punktu mocy maksymalnej (MPP).

**Charakterystyki prądowo - napięciowe:**



Rys.8. Wyznaczanie charakterystyki prądowo - napięciowej w oparciu o wielkości badane (opracowanie własne)

Wykreślona charakterystyka  $I = f(U)$  obrazuje zależność napięcia od natężenia prądu. Wzrost napięcia układu powoduje spadek natężenia prądu. Na różnych poziomach natężenia promieniowania słonecznego zjawisko to zachodzi przy innych wartościach parametrów badanych.

**Charakterystyka mocy od napięcia:**

Rys.9. Wyznaczanie charakterystyki mocy w funkcji napięcia w oparciu o wielkości badane (opracowanie własne)

Charakterystyka mocy od napięcia prezentuje związek między mocą a napięciem panelu fotowoltaicznego. Wynika z niego, że wraz ze wzrostem napięcia układu moc wzrasta lecz wyłącznie do momentu osiągnięcia punktu mocy maksymalnej (MPP). Po jego przekroczeniu następuje gwałtowny spadek mocy paneli fotowoltaicznych.

#### 4. Podsumowanie

Prezentowany artykuł opisuje podstawowy podział ogniw fotowoltaicznych wraz z ich budową oraz wskazuje na rodzaj materiału wykorzystywanego do ich wytworzenia. Przedstawiono otrzymane wyniki badań w oparciu o analizę modelu matematycznego panelu fotowoltaicznego zbudowanego na podstawie modelu ogniwa fotowoltaicznego otrzymanego z amorficznego krzemu. Analiza uwzględnia wpływ zmiennego natężenia promieniowania słonecznego oraz zmiennej rezystancji układu oddziałującej na pracę panelu jak i na badane parametry elektryczne. Dokonano



porównania parametrów amorficznego panelu fotowoltaicznego podawanych przez producenta. Na podstawie parametrów panelu uzyskiwanych w warunkach STC podawanych przez producenta można wywnioskować, że wartości te odbiegają od parametrów uzyskanych w momencie pomiaru przy mocy promieniowania słonecznego równego  $1000 \text{ W/m}^2$ . Prąd zwarcia dla ośmio panelowego zestawu wynosił 2,5 A choć zgodnie z tabliczką znamionową producenta w połączeniu równoległym paneli powinien mieć wartość 3,6 A dla natężenia promieniowania słonecznego  $1000 \text{ W/m}^2$ . W przypadku napięcia biegu jałowego jego wartość była równa 0,4 V zaś producent podaje wartość 21 V. A więc łączna moc paneli powinna wynosić 48 W, a zgodnie z badaniami w punkcie mocy maksymalnej była równa 29,52 W. Zmiana mocy promieniowania słonecznego doprowadza do istotnego wpływu na prąd panelu fotowoltaicznego w połączeniu równoległym. Wartość zmiennego prądu zwarcia jest bezpośrednio związana z wartością zmiennego natężenia promieniowania słonecznego. Głównym czynnikiem powodującym wzrost mocy panelu fotowoltaicznego jest wzrost mocy promieniowania słonecznego. Wzrost mocy promieniowania słonecznego panelu ma również związek ze wzrostem temperatury pracy w sposób liniowy. Im wyższa temperatura pracy panelu tym występują większe spadki napięcia na wyjściu systemu. Spadek napięcia doprowadza do spadku mocy panelu fotowoltaicznego. Jednak w panelach fotowoltaicznych wpływ temperatury na parametry pracy jest pomijalnie mały. Uzyskana sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną w amorficznych panelach fotowoltaicznych zgodnie z badaniami występowała na poziomie ok. 3 %. Wartość uzyskanej sprawności amorficznych systemów konwersji energii jest na niewielkim poziomie w porównaniu z panelami wykonanymi w technologii monokryształicznej. Zaś koszty poniesione przy wykorzystaniu systemu amorficznych paneli są na dużo mniejszym poziomie niż użycie innych technologii paneli fotowoltaicznych.

## 5. Literatura

1. Waclawek M., Rodziewicz T.: Ogniwa słoneczne. Wpływ środowiska naturalnego na ich pracę, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2014
2. Jastrzębska G.: Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 2014
3. Góralczyk I., Tytko R.: Fotowoltaika. Urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne, Wydawnictwo Towarzystwa Słowaków w Polsce Kraków 2016

- 
4. Oszczak W.: Kolektory słoneczne i fotoogniwa w Twoim domu, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 2014
  5. Gronowicz J.: Niekonwencjonalne Źródła Energii, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji PIB 2010
  6. Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo btc Legionowo 2010
  7. Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 2007
  8. Nowicki M.: Nadchodzi era Słońca, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012
  9. Tytko R.: Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków 20156
  10. Tytko R.: Odnawialne Źródła Energii, Lotos Poligrafia sp. z o.o., 2009
  11. Figura R., Zientarski W.: Analiza parametrów pracy modułu fotowoltaicznego, Artykuł: Autobusy 12/2016
  12. <http://www.kolektory.biz/podzial-modulow-fotowoltaicznych/> (dostęp: maj 2018)