

## **The investigation of basic parameters of the work of monocrystalline photovoltaic cells in laboratory and real conditions**

**Katarzyna CHLISZCZ**

*Wydział Mechaniczny, Katedra Energetyki  
Politechnika KosZalińska, Ul. Raclawicka 15-17, 75-620 KosZalin,  
Email: tasiach@gmail.com*

*Artykuł przedstawia wyniki badań przeprowadzone w celu określenia wpływu natężenia promieniowania na pracę monokrystalicznych ogniw fotowoltaicznych. Eksperyment przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych. Analiza uzyskanych wyników wskazała, że zarówno w stanie sztucznego napromieniowania jak i naturalnego słonecznego badane fotoogniwa wykazywały zbliżone sprawności. Dotyczy to zarówno połączenia szeregowego jak i równoległego paneli fotowoltaicznych.*

*KEY WORDS: w języku angielskim pisać czcionką Times New Roman CE, wielkość pisma 10 punktów, odstęp między wierszami przynajmniej 11 punktów, pismo pochyle (kursywa)*

## 1. Wstęp

Ciągły rozwój cywilizacji wiąże się z większym zużyciem energii. W Polsce do celów energetycznych wykorzystywane są głównie paliwa stałe, których stosowanie jest głównym powodem zanieczyszczenia środowiska. Dodatkowo zasoby paliw kopalnych są ograniczone, co prowadzi do wzrostu ich cen. (Jastrzębska, 2007)

Alternatywą dla tradycyjnych paliw jest korzystanie z odnawialnych źródeł energii to jest: Słońca, wody, wiatru, biomasy oraz energii geotermalnej. Potencjał w nich zawarty jest w stanie zapewnić w znacznym stopniu obecne zapotrzebowanie energetyczne. (Klugmann i Klugmann – Radziemska, 1999)

## 2. Przegląd literatury

### 2.1. Energia słoneczna

Główną gwiazdą w układzie słonecznym jest Słońce, które jest rozżarzoną kulą gazową składającą się w 71% z wodoru i 27% helu. Pozostałą część stanowią m.in. tlen, azot oraz węgiel.

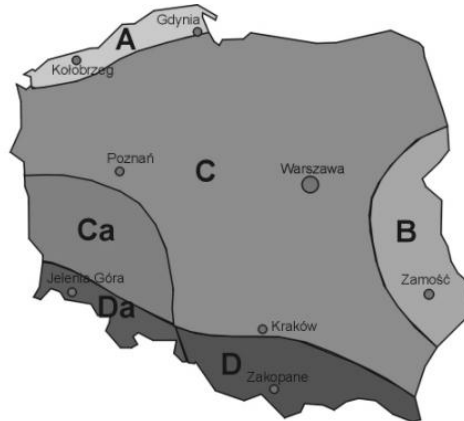
Energia, którą generuje ta gwiazda powstaje podczas procesu syntezy jądra wodoru, deuteru oraz trytu. Przyjmuje się, że całkowita moc, jaką Słońce wysyła w przestrzeń wynosi ok.  $3,816 \cdot 10^{26}$  W. Z wyemitowanej przez Słońce energii, 28% nie dociera do powierzchni Ziemi tylko w wyniku odbicia i rozproszenia zostaje w przestrzeni kosmicznej. (Smolec, 2000)

Wysyłane promieniowanie słoneczne ma zakres fal o długości od  $0,1 \mu\text{m}$  do  $10 \mu\text{m}$ . Około 46% energii pochodzi z promieniowania widzialnego, 7% od ultrafioletu, a z podczerwieni 47%. (Gronowicz, 2008)

Do głównych zalet wykorzystania energii Słońca zalicza się:

- niewyczerpywalność zasobów,
- brak emisji gazów cieplarnianych,
- brak zanieczyszczeń,
- brak hałasu.

## 2.2. Nasłonecznienie w Polsce



Rys.1. Podział Polski ze względu na roczne sumy napromieniowania (<http://www.bro-bud.com>)

Polska znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego, a jej granice rozciągają się pomiędzy 49°N a 54,5°N. W oparciu o roczne sumy napromieniowania wydzielono cztery strefy główne oraz dwie podstrefy (rys.1).

Strefy główne to:

- A – pas nadmorski, który ogranicza izolinia 950 kWh/(m<sup>2</sup>·rok), a jego stacja aktynometryczna znajduje się w Kołobrzegu,
- B – wschodnia część kraju, ograniczona przez izolinię 950 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) ze stacją w Zamościu,
- C – pozostała część Polski, którą ogranicza izolinia 900 kWh/(m<sup>2</sup>·rok), a stacja aktynometryczna jest w Brwinowie koło Warszawy,
- D – południowa część kraju, ograniczona izolinią 900 kWh/(m<sup>2</sup>·rok) od strony północnej, reprezentowana przez stację Zakopane.

Podstrefy:

- Ca – górne dorzecze Odry z Radzyminem,
- Da – Sudety i obszar Podgórze Sudeckiego z Jelenią Górą.

Tereny obejmujące Polskę charakteryzują się czasem 1600 godzin usłonecznienia. Najbardziej podatnym na działanie promieniowania słonecznego jest obszar nadmorski, a najmniej Dolny Śląsk. Strefa A i B charakteryzują się największym dopływem energii promieniowania słonecznego w ciągu roku. Rocznie wynosi ona ok. 950 – 1200 kWh/m<sup>2</sup>·rok. Najmniej energii dociera do południowej części kraju. (Klugmann – Radziemska, 2010)

### 2.3. Zjawisko fotowoltaiczne

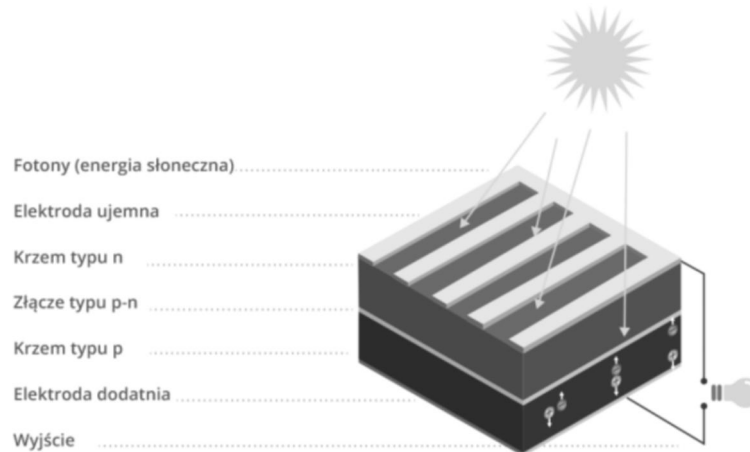
Zjawisko fotowoltaiczne jest procesem w trakcie, którego podczas padania promieni słonecznych na półprzewodnik wytwarza się napięcie elektryczne. Jest to wynikiem efektu fotoelektrycznego wewnętrznego, w którym nośniki ładunku przemieszczają się między pasmami energetycznymi.

Jako pierwszy zaobserwował je w 1839 roku Alexander Edmond Becquerel, który sprawdzał jak zachowują się dwie, wykonane z tego samego materiału elektrody zanurzone w elektrolicie. Podczas naświetlania powstało między nimi napięcie elektryczne. (Lewandowski i Klugmann – Radziemska, 2017)

Aby zjawisko mogło zajść padający foton nie może mieć energii mniejszej niż energia przerwy energetycznej, która dla krzemu w temperaturze 300K jest równa 1,12 eV. (Jastrzębska, 2013)

### 2.4. Ogniwo fotowoltaiczne

Głównym elementem systemu fotowoltaicznego jest ogniwo (rys.2), które typowo wykonane jest z krzemu. Materiał ten jest podstawą produkcji półprzewodników określonych, jako *n* z nośnikami większościowymi elektronami oraz typu *p*, w których dominują dziury elektronowe. Kolejny element to kontakty elektrody górnej oraz dolnej. Elektroda górna musi być kilkakrotnie cieńsza od dolnej, aby jak najwięcej promieni słonecznych dotarło w miejsce złącza. Ogniwo pokryte jest powłoką antyrefleksyjną mającą za zadanie zmaksymalizowanie absorpcji promieniowania słonecznego. (Klugmann – Radziemska, 2010)



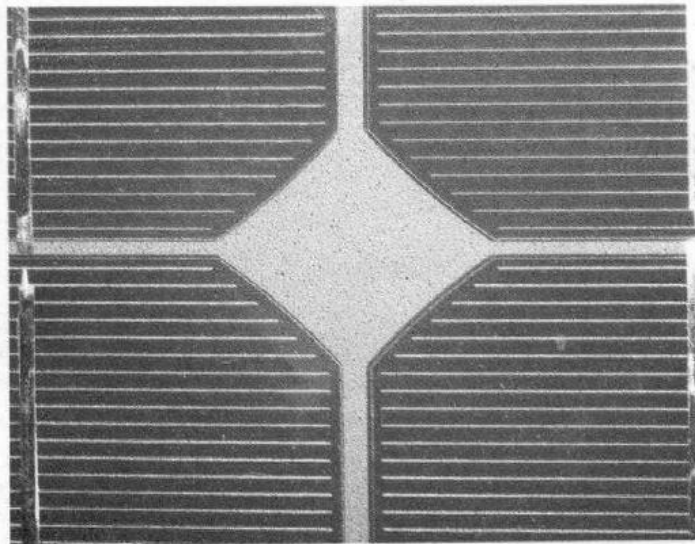
Rys.2. Budowa ogniwa fotowoltaicznego (<http://elve.pl>)

## 2.5. Rodzaje ogniw

Do najbardziej znanych ogniw fotowoltaicznych należą ogniwa krzemowe. Można je podzielić na:

- monokrystaliczne,
- polikrystaliczne,
- amorficzne.

Ogniwa monokrystaliczne dzięki swojej uporządkowanej strukturze uznawane są za najlepsze. Ich sprawność dochodzi do ok. 20%. Charakteryzuje je także długa żywotność. Ze względu na trudność wytwarzania monokryształu krzemu są one drogie i często nieopłacalne. Wyjątkiem może być profesjonalna instalacja, gdzie dla inwestora najważniejsza jest jak najwyższa sprawność i trwałość, a cena nie odgrywa tak ważnej roli. Ogniwa monokrystaliczne można poznać m.in. po ich obciętych rogach tworzących rąb (rys.3.).



Rys.3. Fragment modułu monokrystalicznego (Oszczak, 2012)

Ogniwa, które charakteryzuje niejednorodna struktura to ogniwa polikrystaliczne. Osiągają one niższe sprawności na poziomie ok. 12%. Oprócz tego, że ich sprawności są niższe niż w przypadku ogniw monokrystalicznych charakteryzuje je także niższa trwałość. Do głównych zalet ogniw polikrystalicznych należy ich cena.

Ogniwa amorficzne, wytwarzane są w technologii cienkowarstwowej polegającej na pokrywaniu szklanej płytki krzemem. Ich sprawność dochodzi do 6%. Są

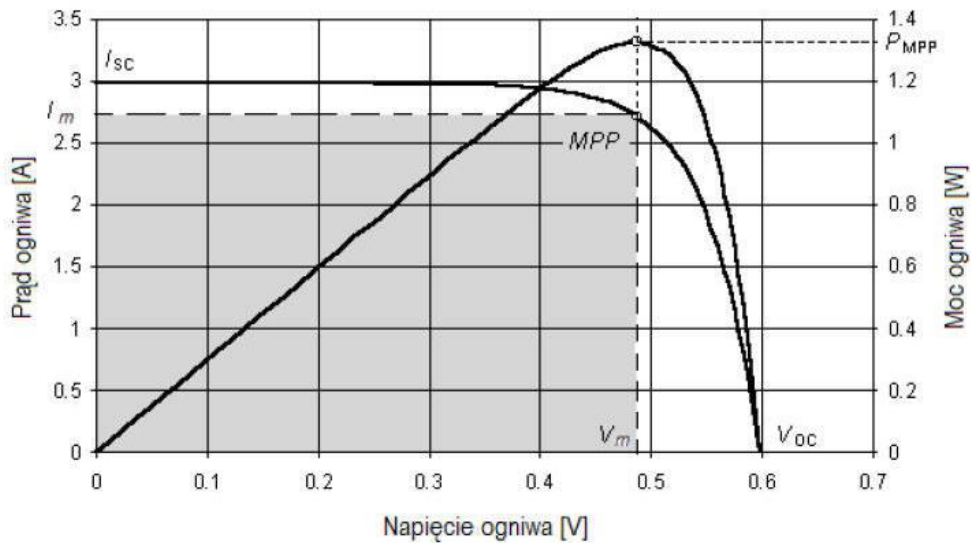
wykorzystywane w kalkulatorach, zegarkach i w innych urządzeniach gospodarstwa domowego. Coraz częściej pojawiają się także, jako pokrycie dachów czy elewacji. (Oszczak, 2012)

## 2.6. Charakterystyka prądowo – napięciowa

Charakterystyka prądowo-napięciowa (rys.4) przedstawia zależność natężenia prądu wyjściowego od napięcia przy danym natężeniu promieniowania słonecznego. Dzięki charakterystyce tej można wyznaczyć takie parametry pracy jak: współczynnik wypełnienia  $FF$  (*File Factor*), moc maksymalną  $P_M$  oraz sprawność  $\eta$ .

Charakterystyczne punkty na tym wykresie to:

- napięcie obwodu otwartego, ( $U_{oc}$ ) – napięcie przy nieobciążonym generatorze fotowoltaicznym
- prąd zwarcia ( $I_{sc}$ ) – natężenie prądu w trakcie zwarcia generatora fotowoltaicznego
- $MPP$  – punkt, w którym ogniwo osiąga moc maksymalną (o współrzędnych  $I_M, U_M$ ) (Klugmann – Radziemska, 2010)



Rys.4. Charakterystyka prądowo – napięciowa oraz zależność mocy od napięcia (<http://www.instantsi.pl>)

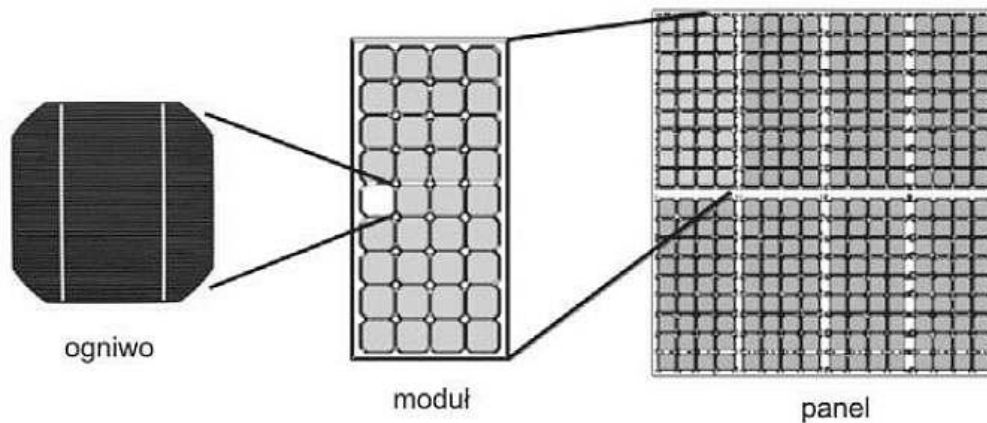
Współczynnik wypełnienia  $FF$  mówi o tym, w jakim stopniu charakterystyka prądowo-napięciowa osiąga kształt prostokąta o jak największej powierzchni. Jest to stosunek mocy maksymalnej do iloczyny napięcia ogniwa otwartego i prądu zwarcia.

Moc maksymalna  $P_M$  określa najwyższą możliwą do oddania przez ogniwo fotowoltaiczne moc.

Sprawność ogniwa fotowoltaicznego jest definiowana, jako stosunek mocy maksymalnej, którą oddało ogniwo do padającego na nie promieniowania. (Chojnacki i inni, 2008)

## 2.7. Sposoby łączenia ogniw słonecznych

Ze względu na małą moc pojedynczego ogniwa należy je łączyć w moduły. Połączone wzajemnie moduły tworzą panele fotowoltaiczne (rys.5.).

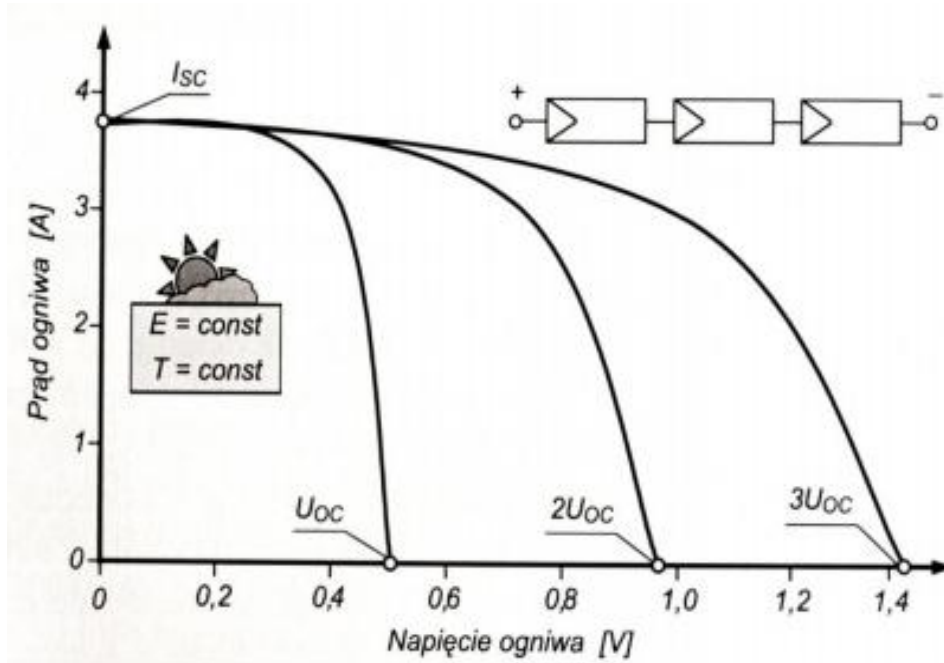


Rys.5. Ogniwo, moduł i panel (<http://www.elektro.info.pl>)

Moc modułu zależy od ilości i sposobu połączonych ogniw w układach: szeregowych, równoległych oraz szeregowo – równoległych. (Chojnacki i inni, 2008)

### 2.7.1. Połączenie szeregowe

W połączeniu szeregowym elektroda ujemna pierwszego modułu jest połączona z elektrodą dodatnią następnego. W wyniku takiego połączenia uzyskuje się większe napięcie całkowite. (Chojnacki i inni, 2008)

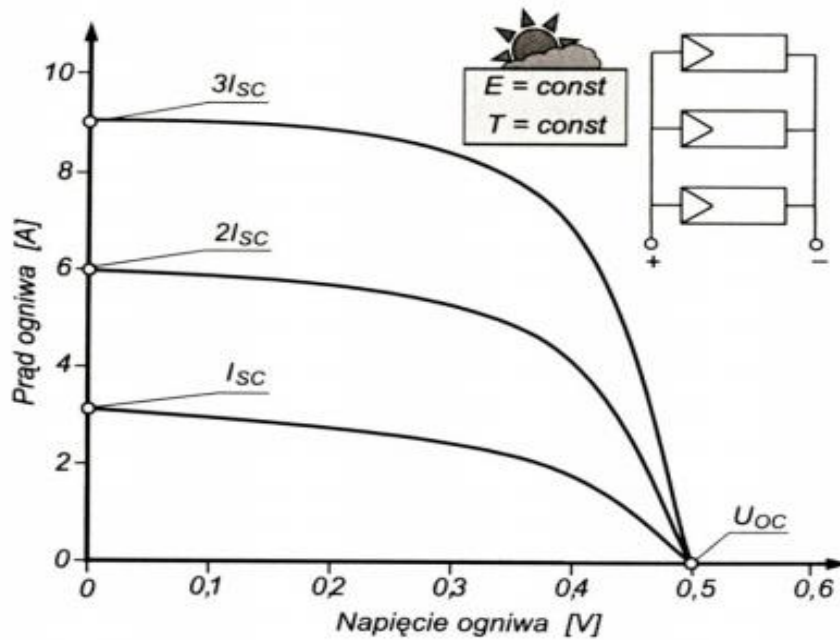


Rys.6. Wpływ połączenia szeregowego na charakterystykę prądowo – napięciową (Sarniak, 2008)

### 2.7.2. Połączenie równoległe

W połączeniu równoległym musi być podłączona ujemna elektroda pierwszego ogniwa z ujemną następnego przy jednoczesnym połączeniu ze sobą elektrod dodatnich. Dzięki takiemu połączeniu uzyskuje się większą wartość natężenia prądu. (Chojnacki i inni, 2008)

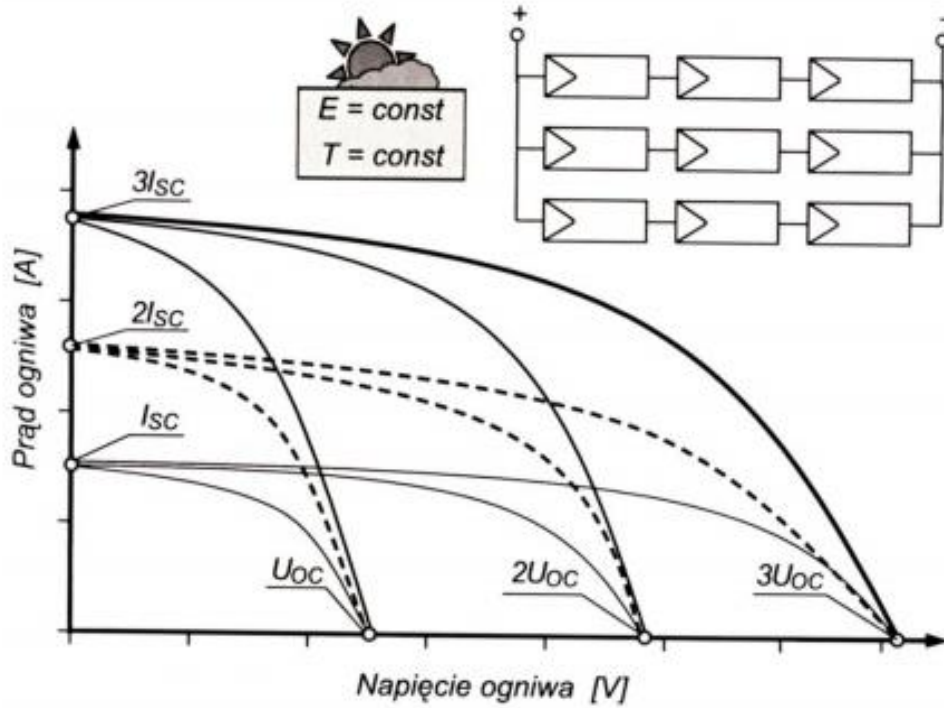




Rys.7. Wpływ połączenia równoległego na charakterystykę prądowo - napięciową (Sarniak, 2008)

### 2.7.3. Połączenie szeregowo – równoległe

Połączenie szeregowo – równoległe jest połączeniem obu wymienionych wyżej metod. (Chojnacki i inni, 2008)



Rys.8. Wpływ połączenia szeregowo – równoległego na charakterystykę prądowo – napięciową (Sarniak, 2008)

### 3. Metodyka obliczeń

Współczynnik wypełnienia  $FF$ :

$$FF = \frac{U_M * I_M}{U_{oc} * I_{sc}} \quad (1)$$

$U_M$  – napięcie w punkcie mocy maksymalnej [V]

$I_M$  – natężenie prądu w punkcie mocy maksymalnej [A]

$U_{oc}$  – napięcie obwodu otwartego [V]

$I_{sc}$  – prąd zwarcia [A]

Moc maksymalna  $P_M$ :

$$P_M = U_M * I_M = FF * U_{oc} * I_{sc} [W] \quad (2)$$

Sprawność  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_M}{G \cdot A} * 100 [\%] \quad (3)$$

G – natężenie promieniowania słonecznego [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

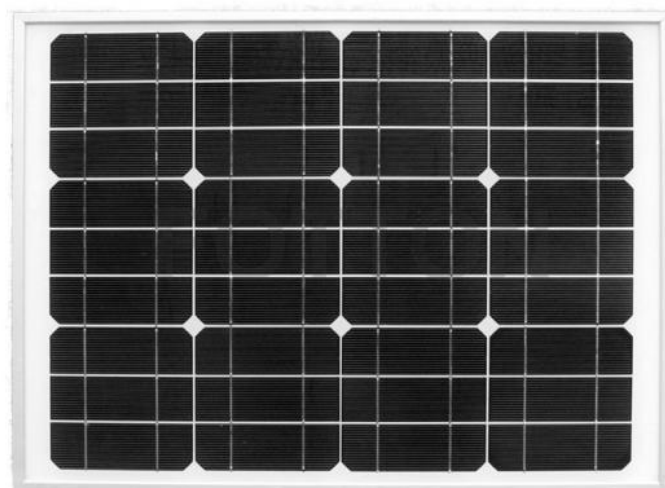
A – pole powierzchni [ $\text{m}^2$ ]

#### 4. Badanie podstawowych parametrów pracy ogniwa monokrystalicznego

Celem badania było zapoznanie się z parametrami pracy ogniwa monokrystalicznego w warunkach laboratoryjnych przy zmiennym natężeniu promieniowania oraz w warunkach rzeczywistych.

##### 4.1. Przedmiot badań

Badanie przeprowadzono na czterech połączonych ze sobą równolegle monokrystalicznych modułach fotowoltaicznych marki Fotton, model FTM30W (rys.9). Parametry elektryczne jednego, podane przez producenta przedstawiono w tab. 1.



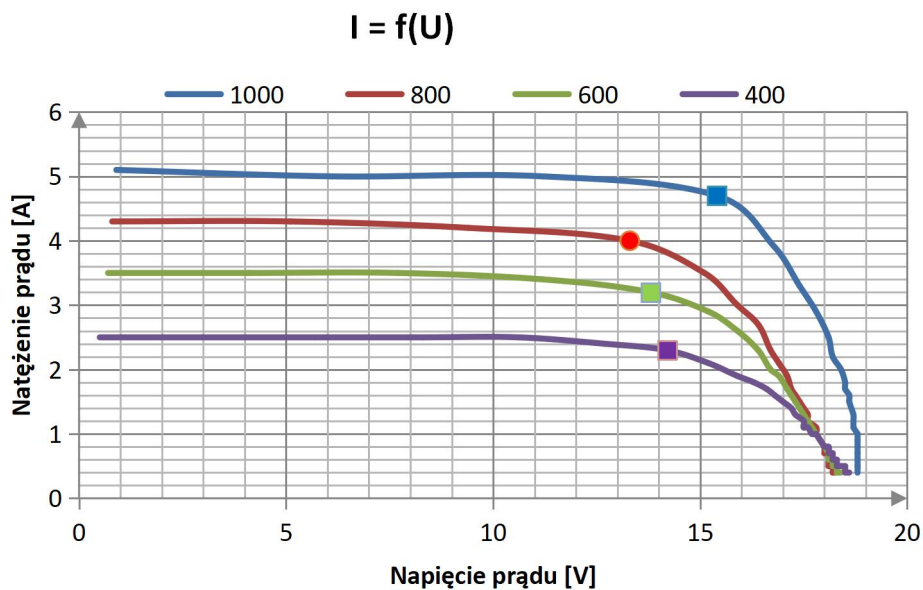
Rys.9. Moduł fotowoltaiczny Fotton FTM30W (<https://sklep.centropol.pl>)

Tab.1. Dane elektryczne w standardowych warunkach testowych: oświetlenie  $1000\text{W/m}^2$ , AM 1,5, temperatura ogniwa  $25^\circ\text{C}$

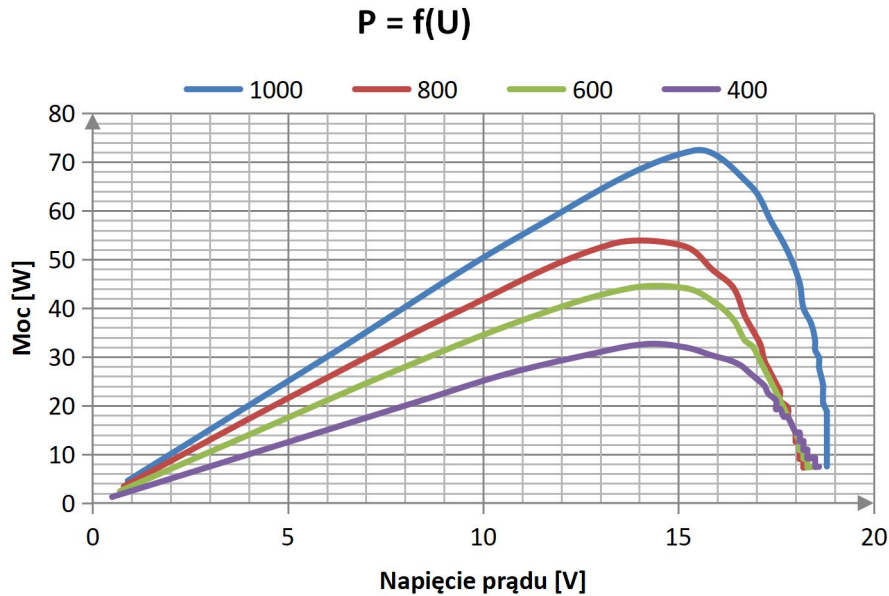
Wielkość	Jednostka	Wartość
Moc maksymalna ( $P_M$ )	Wp	30
Napięcie obwodu otwartego ( $U_{oc}$ )	V	22,2
Prąd zwarcia ( $I_{sc}$ )	A	1,80
Napięcie w pkt. mocy maksymalnej ( $U_M$ )	V	18,1
Prąd w pkt. mocy maksymalnej ( $I_M$ )	A	1,67
Tolerancja	%	$\pm 3$
Waga	kg	3,2

#### 4.2. Wyniki badań parametrów pracy ogniwa monokrystalicznego w warunkach laboratoryjnych przy zmiennym natężeniu promieniowania

Dzięki przeprowadzonym badaniom wyznaczono charakterystyki: prądowo – napięciową (rys.10.) oraz mocy od napięcia (rys.11.) dla czterech różnych natężeń promieniowania: 400, 600, 800 oraz  $1000\text{ W/m}^2$ . W trakcie pomiarów zwiększano rezystancję od 0 do  $60\ \Omega$ .



Rys.10. Wpływ zmiany natężenia promieniowania na charakterystykę prądowo - napięciową



Rys.11. Wpływ zmiany natężenia promieniowania na charakterystykę mocy od napięcia

Tab.2. Wpływ zmiany natężenia promieniowania na parametry pracy ogniwa w warunkach laboratoryjnych

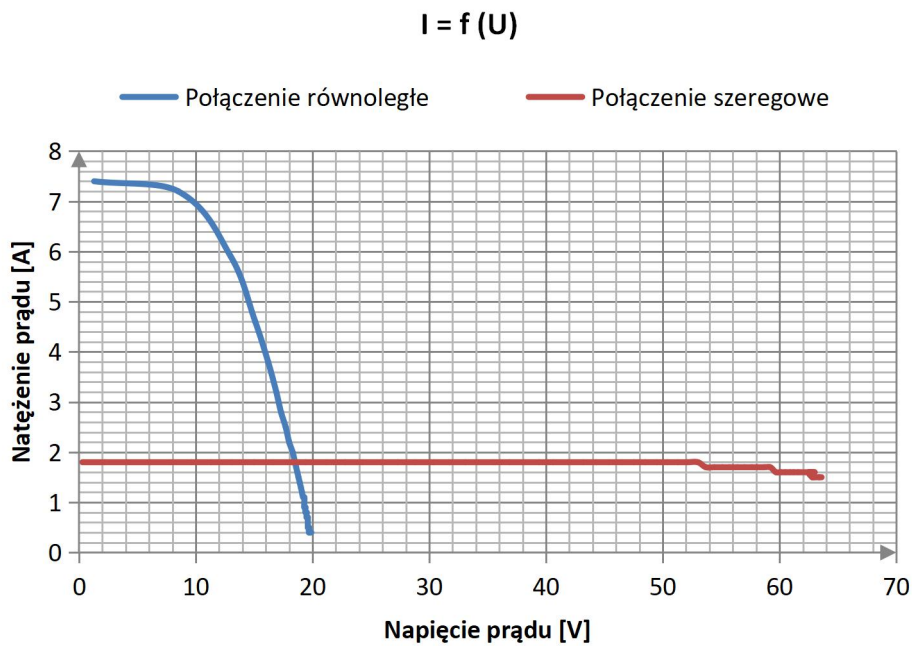
Wielkość	Jedn.	Pomiar			
		1000	800	600	400
Natężenie promieniowania (G)	W/m <sup>2</sup>	1000	800	600	400
Pole powierzchni (A)	m <sup>2</sup>	0,768	0,768	0,768	0,768
Prąd zwarcia (I <sub>SC</sub> )	A	5,1	4,3	3,5	2,5
Napięcie układu otwartego (U <sub>OC</sub> )	V	18,8	18,3	18,4	18,6
Prąd w pkt mocy maksymalnej (I <sub>M</sub> )	A	4,7	4	3,2	2,3
Napięcie w pkt mocy maksymalnej (U <sub>M</sub> )	V	15,4	13,3	13,8	14,2
Współczynnik wypełnienia (FF)	-	0,75	0,68	0,69	0,70
Moc maksymalna (P <sub>M</sub> )	W	72,38	53,2	44,16	32,66
Sprawność (η)	%	9,4	8,7	9,6	10,6

Na podstawie charakterystyk (rys.11). i (rys.12) obserwuje się, że, wraz ze wzrostem natężenia promieniowania  $G$  rośnie prąd zwarcia  $I_{SC}$ . Na napięcie biegu jałowego  $U_{OC}$  wartość natężenia  $G$  nie ma dużego wpływu. Ogniwa uzyskały

największą wartość mocy maksymalnej  $P_M$  przy  $1000 \text{ W/m}^2$ . Wyniosła ona  $72,38 \text{ W}$ . Najmniejszą moc maksymalną osiągnięto przy  $400 \text{ W/m}^2$ . Była ona równa  $32,66 \text{ W}$ . Największą wartość współczynnika wypełnienia osiągnięto przy pomiarze z natężeniem promieniowania  $1000 \text{ W/m}^2$ . Sprawność jaką osiągnęły moduły mieściła się w granicach od  $8,7$  do  $10,6\%$ .

#### 4.3. Wyniki badań parametrów pracy ogniwa monokrystalicznego w warunkach rzeczywistych

W warunkach rzeczywistych ogniwa były badane dla dwóch różnych połączeń: równoległego i szeregowego. Pomiary wykonano w bezchmurny i słoneczny dzień, gdy natężenie promieniowania wynosiło ok.  $1000 \text{ W/m}^2$ . Podobnie jak w przypadku pomiarów w warunkach laboratoryjnych zwiększano rezystancję w zakresie od  $0$  do  $60 \Omega$ . Rezultaty tych pomiarów pokazano za pomocą charakterystyki prądowo – napięciowej (rys.12.) oraz tabeli wielkości obliczonych (tab.3.).



Rys.12. Wpływ sposobu połączenia ogniw fotowoltaicznych na charakterystykę prądowo - napięciową

Tab.3. Wpływ połączenia ogniw fotowoltaicznych na parametry prac w warunkach rzeczywistych

Wielkość	Jedn.	Połączenie	
		równoległe	szeregowe
Natężenie promieniowania (G)	W/m <sup>2</sup>	1000	1000
Pole powierzchni (A)	m <sup>2</sup>	0,768	0,768
Prąd zwarcia (I <sub>SC</sub> )	A	7,4	1,8
Napięcie układu otwartego (U <sub>OC</sub> )	V	19,9	63,6
Prąd w pkt mocy maksymalnej (I <sub>M</sub> )	A	5,9	63
Napięcie w pkt mocy maksymalnej (U <sub>M</sub> )	V	13	1,6
Moc maksymalna (P <sub>M</sub> )	W	76,7	100,8
Współczynnik wypełnienia (FF)	-	0,52	0,88
Sprawność (η)	%	9,99	13,13

Na rys.12. doskonale widać jak sposób połączenia modułów wpływa na parametry ich pracy. Przy połączeniu równoległym prąd zwarcia I<sub>SC</sub> wyniósł 7,4 A i był ponad 4 razy większy od tego przy połączeniu szeregowym. Napięcie szeregowe wpłynęło na wartość napięcia układu otwartego U<sub>OC</sub>. W przypadku połączenia równoległego wyniosło ono 19,9 V, a dla połączenia szeregowego było ponad 3 razy większe i osiągnęło wartość 63,6 V.

Moduły połączone szeregowo były w stanie wygenerować maksymalnie 100,8 W. Współczynnik wypełnienia wyniósł wtedy 0,88, a moduły osiągnęły sprawność 13,13%. Przy połączeniu równoległym osiągnięto mniejsze wartości. Moc maksymalna jaką wtedy wygenerowały ogniwa była równa 76,7W przy współczynniku wypełnienia 0,52. Sprawność połączonych równoległe ogniw wyniosła 9,99%.

## 5. Podsumowanie

Ze względu na nieustanny rozwój cywilizacji i wyczerpywalność podstawowych źródeł energii, którymi na obecną chwilę w Polsce są paliwa kopalniane poszukuje się jej alternatywnych źródeł. W artykule przedstawiono jeden ze sposobów wykorzystania energii Słońca – zjawisko fotowoltaiczne. Omówiono parametry pracy ogniw fotowoltaicznych przy różnych natężeniach jednego z najważniejszych czynników czyli promieniowania słonecznego. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych.

Badane moduły wykonane były z monokrystalicznych ogniw, charakteryzujących się uporządkowaną strukturą kryształu krzemu w całym obszarze.

Artykuł pokazuje, że zwiększenie natężenia promieniowania powoduje wzrost mocy maksymalnej generowanej przez fotoogniwo, a także proporcjonalny wzrost prądu zwarcia. Parametr ten ma jednak mały wpływ na napięcie obwodu otwartego. Artykuł obrazuje także, że ogniwo osiągało większe wartości w przypadku pomiarów na zewnątrz, przy naturalnym świetle niż badając je w warunkach laboratoryjnych.

Kolejnym wnioskiem, który nasuwa się po przeanalizowaniu pomiarów jest to, że aby wykorzystać maksymalny potencjał energii słonecznej i fotoogniw należy odpowiednio dobrać rezystancję. Linia rezystancji musi przechodzić jak najbliżej punktu mocy maksymalnej.

Jak pokazano na rys.12. w zależności od tego czy potrzebujemy większego napięcia czy natężenia prądu możemy odpowiednio połączyć ogniwa szeregowo lub równolegle.

Dodatkowo zauważono, że osiągnięte sprawności były niższe niż podaje większość literatury oraz nie udało się osiągnąć takich wartości jak podaje producent.



## **6. Literatura**

1. Chojnacki J. i inni: Odnawialne i niekonwencjonalne źródła energii. Poradnik, TARBONUS, Kraków – Tarnobrzeg 2008, s. 107 – 109.
2. Ciok Z.: Ochrona środowiska w elektroenergetyce, Podstawowe Problemy Współczesnej Techniki, PWN, Warszawa 2001.
3. Gronowicz J.: Niekonwencjonalne źródła energii, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom – Poznań 2008, s. 123 – 124.
4. Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007, s. 18.
5. Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013, s. 83.
6. Klugmann E., Klugmann – Radziemska E.: Alternatywne źródła energii. Energetyka fotowoltaiczna, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok 1999, s. 13.
7. Klugmann – Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010, s. 24 – 26, 51, 58.
8. Lewandowski W., Klugmann – Radziemska E.: Proekologiczne Odnawialne Źródła Energii. Kompendium, PWN, Warszawa 2017, s. 334, 342.
9. Oszczak W.: Kolektora słoneczne i fotoogniwa w Twoim domu, Wydział Komunikacji i Łączności, Warszawa 2012, s. 104–107.
10. Sarniak M.: Podstawy fotowoltaiki. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008
11. Smolec W.: Fototermiczna konwersja energii słonecznej, PWN, Warszawa, 2000
12. <http://www.instsani.pl/513/parametry-pracy-paneli-pv>
13. [http://www.bro-bud.com/wklady\\_akcesoria/makroterm\\_solar\\_dlaczego.html](http://www.bro-bud.com/wklady_akcesoria/makroterm_solar_dlaczego.html)
14. <http://elve.pl/oferta/>
15. <http://www.elektro.info.pl/artukul/id6490,instalacje-fotowoltaiczne-dobor-falownika-przewodow-oraz-ich-zabezpiezen>
16. <https://sklep.centropol.pl/panel-sloneczny-bateria-sloneczna-fotton-ftm-30-12v-dc-p-613.html>