

## ANALIZA TEORETYCZNA UZYSKU ENERGETYCZNEGO KRZEMOWYCH OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH W WARUNKACH SOLARNYCH MAŁOPOLSKI<sup>1</sup>

Hubert Latała, Sławomir Kurpaska

*Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano teoretyczne możliwości uzysku energii elektrycznej dla panelu fotowoltaicznego wykonanego z krzemu polikrystalicznego. Obliczenia wykonano dla miesięcznych średnich wieloletnich wartości natężenia promieniowania słonecznego dostępnego w warunkach solarnych Małopolski. Do badań wybrano, dostępne na rynku i możliwe do zastosowań w gospodarstwach tego regionu, źródło o mocy 235 Wp.

**Słowa kluczowe:** ogniwa fotowoltaiczne, ogniwa krzemowe, energetyka

### Wstęp

Współczesne rolnictwo dostarcza do atmosfery około 15-20% całkowitej emisji CO<sub>2</sub> pochodzącej z działalności ludzi. Obniżenie tej emisji można osiągnąć przez zastosowanie metod, które przejawiają się przez mniej agresywną uprawę ziemi i ograniczenie wycięcia lasów dla uzyskania nowych terenów uprawnych [Moneo 2009]. Dalszą redukcję emisji gazów cieplarnianych można uzyskać przez zmniejszenie zużycia paliw kopalnych w gospodarstwach rolnych. W okresie od 2007 do 2013 roku Unia Europejska znacznie zwiększyła budżet na badania i rozwój w dziedzinie środowiska, energii i transportu. Działania w tym obszarze koncentrują się na wspieraniu rozwoju bardziej zrównoważonych systemów energetycznych, mających na celu sprostanie wyzwaniom w dziedzinie bezpieczeństwa dostaw energii oraz zmian klimatu [Komisja Europejska 2008].

Jednym z wielu możliwych działań jest korzystanie z energii elektrycznej powstałej w wyniku konwersji promieniowania słonecznego w panelach fotowoltaicznych. Taki system zasilania jest szczególnie przydatny w miejscach gdzie nie ma dostępu do niskonapięciowej sieci energetycznej. W intensywnej produkcji rolniczej zapotrzebowanie na energię elektryczną związane jest z koniecznością stosowania różnorodnej aparatury monitorującej, kontrolno-pomiarowej, ochronnej lub sterującej. Zastosowanie źródła fotowoltaicznego w takich warunkach rozwiązuje problem zasilania energetycznego w sposób zdecentralizowany i rozproszony odgrywając kluczową rolę w tworzeniu zrównoważonego systemu gospodarowania energią [Golubiewski 2009]. Potwierdzeniem tego jest również stanowisko EPIA (Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Fotowoltaicznego), które stawia sobie za cel m.in.

---

<sup>1</sup> Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego NR N N313 445137

uproszczenie prawodawstwa w sektorze fotowoltaiki, wdrażania i przyspieszenia rozwiązań związanych z energią odnawialną.

Obecnie stosuje się źródła fotowoltaiczne oparte głównie na technologii wykorzystującej kryształy krzemu. Stanowią one 80% całkowitej produkcji. Sprawność konwersji energii słonecznej na energię elektryczną dla tych źródeł zawiera się w granicach od 12 do 15% [Solar generation 6 2011]. Pozostałą część stanowią źródła oparte na technologii cienko warstwowej. Jednak ich sprawność jest znacząco niższa w porównaniu do źródeł opartych na krzemie krystalicznym.

Znajomość potrzeb energetycznych wybranych urządzeń mogących być zasilanych z paneli fotowoltaicznych stanowi podstawę do doboru systemu zasilania. Powstaje jednak pytanie w jakiej części, energia elektryczna pochodząca z systemu konwersji promieniowania słonecznego, pokryje potrzeby odbiorników stosowanych w rolnictwie. Niebagatelną rolę odgrywa tu również duża zmienność warunków solarnych. W związku z tym w celu poprawnego oszacowania mocy źródła fotowoltaicznego istotnym problemem jest określenie na wstępie, w sposób teoretyczny, potencjału energetycznego możliwego do uzyskania z energii promieniowania słonecznego. Należy przy tym uwzględnić: geograficzne położenie obiektu, kąt pochylenia płaszczyzny panelu fotowoltaicznego, jak również jego zdolność konwersji promieniowania solarnego.

Głównym celem pracy jest określenie potencjalnej wielkości produkcji energii elektrycznej w ciągu roku dla panelu fotowoltaicznego wykonanego z krzemu polikrystalicznego. Do badań wybrano, dostępny na rynku, panel typu YL 235 P-29b. Obliczenia wykonano dla miesięcznych średnich wieloletnich wartości natężenia promieniowania słonecznego monitorowanych w latach 1971–2000 dla regionu Małopolski.

## Material i metoda

Możliwa do wykorzystania energia promieniowania słonecznego określona została na podstawie danych o nasłonecznieniu [Dane meteorologiczne 2011]. Na podstawie tych parametrów przeprowadzono analizę dla średniej miesięcznej sumy całkowitej energii promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę pochyłą pod wybranymi kątami: 0, 30, 45, 60 i 90 stopni w stosunku do poziomu. W tym celu wykonano pomocnicze obliczenia związane z wyznaczeniem długości dnia (DL) w danym miesiącu i w danej lokalizacji według wzoru:

$$DL = \frac{a \cos[(-\tan(Q)) \cdot \tan(N)]}{7,5} \quad [\text{godz.}] \quad (1)$$

gdzie:

- Q – deklinacja [°],
- N – szerokość geograficzna [°],

deklinację obliczono według wzoru:

$$Q = -23,45 \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{360} \cdot (D + 10)\right] \quad [^\circ] \quad (2)$$

gdzie:

D – kolejny dzień roku [-].

Korzystając z zależności 1 i 2 oraz sumując liczbę godzin dziennych dla poszczególnych miesięcy wyliczono ich sumę w ciągu każdego miesiąca. Następnie dla tych danych i średnich miesięcznych sum całkowitego natężenia promieniowania słonecznego dla poszczególnych miesięcy (dane meteorologiczne) wyliczono średnie natężenie promieniowania słonecznego dla kolejnych miesięcy. Dodatkowo średnie natężenie promieniowania słonecznego wyznaczono w każdym miesiącu dla 5 wybranych położań płaszczyzny (wymienione powyżej). Uzysk energii elektrycznej wyliczono dla wybranego panelu fotowoltaicznego Yinglisolar YL 235 P-29b/1650x990 Series o mocy 235 Wp korzystając z jego charakterystyki napięciowo-prądowej. Wyznaczono również teoretyczną sprawność takiego panelu związaną z pracą w analizowanych warunkach solarnych.

## Wyniki i dyskusja

Na podstawie przyjętej metodyki badań i danych meteorologicznych wyliczono liczbę godzin dziennych dla poszczególnych miesięcy. Szerokość geograficzna, na której leży Małopolska charakteryzuje się dużą zmiennością długości dnia w ciągu roku. W skrajnym przypadku wynosi ona 8 godzin i 19 minut. Różnica ta wpływa w zdecydowany sposób na ilość energii promieniowania słonecznego dostępnej na powierzchni Ziemi. Nie bez znaczenia jest również kąt pochylenia płaszczyzny, na którą pada promieniowanie. Dla porównania w miesiącu grudniu średnia miesięczna suma całkowitej energii promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę prostopadłą do poziomu jest o 65% większa w porównaniu do płaszczyzny poziomej. W czerwcu natomiast płaszczyzna prostopadła otrzymuje 25% mniej energii w porównaniu do płaszczyzny poziomej. Szczegółowe dane dotyczące średnich miesięcznych sum całkowitych energii promieniowania słonecznego uwzględniające wybrane kąty padania przedstawiono w tabeli 1.

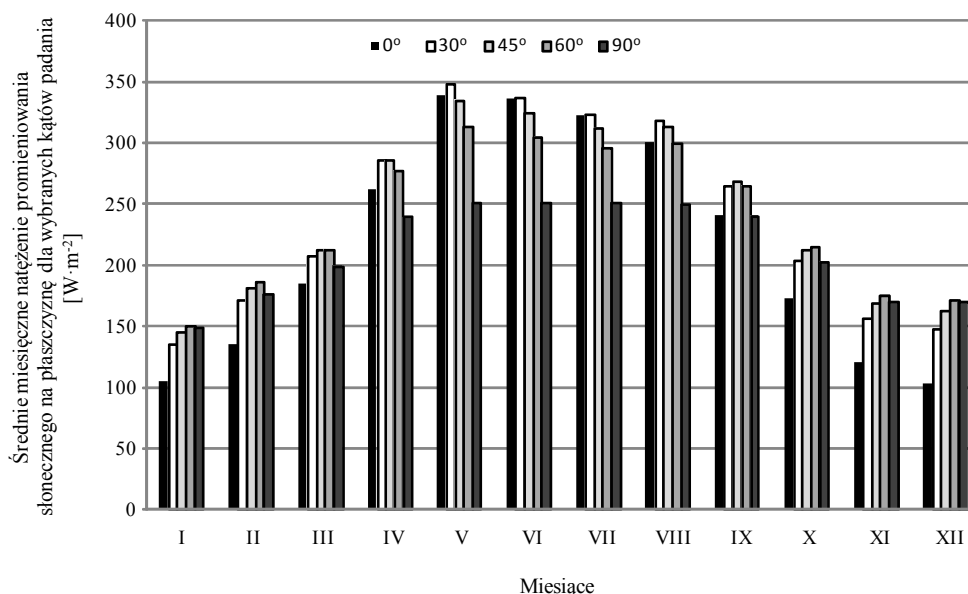
Tabela 1. Średnie miesięczne sumy całkowitej energii promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę umieszczoną pod różnym kątem wraz z liczbą godzin dziennych

Table 1. Average monthly sums of total energy of solar radiation incident on a plane positioned at different angles with number of daytime hours

Miesiąc	0°	30°	45°	60°	90°	Liczba godzin dziennych
	kWh·m <sup>-2</sup>					godz.
I	27,2	35,0	37,6	39,1	38,5	260,0
II	37,3	47,1	50,0	51,3	48,5	275,2
III	66,9	75,0	76,9	77,0	72,1	361,9
IV	107,2	116,6	116,5	113,1	97,7	408,8
V	160,8	164,7	158,9	148,4	118,9	474,0
VI	162,2	162,7	156,6	146,8	120,9	482,9
VII	155,5	155,8	150,7	142,6	121,3	482,8
VIII	130,6	138,4	136,1	130,0	108,4	434,7
IX	87,3	96,3	97,5	96,3	87,1	362,9
X	54,5	64,2	66,8	67,6	63,9	314,9
XI	30,8	40,1	43,2	44,9	43,8	256,8
XII	25,2	36,0	39,7	42,0	41,6	244,9

Źródło: obliczenia własne autorów

Pewnym uzupełnieniem analizy wyników jest przedstawienie na rysunku 1 danych dotyczących średnich miesięcznych wartości natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę dla wybranych kątów padania. W dużym uproszczeniu największych wartości natężenia promieniowania słonecznego można oczekiwać przy ustawieniu płaszczyzny pod kątem  $30^\circ$  od miesiąca kwietnia do września i  $60^\circ$  od października do marca.



Źródło: obliczenia własne autorów

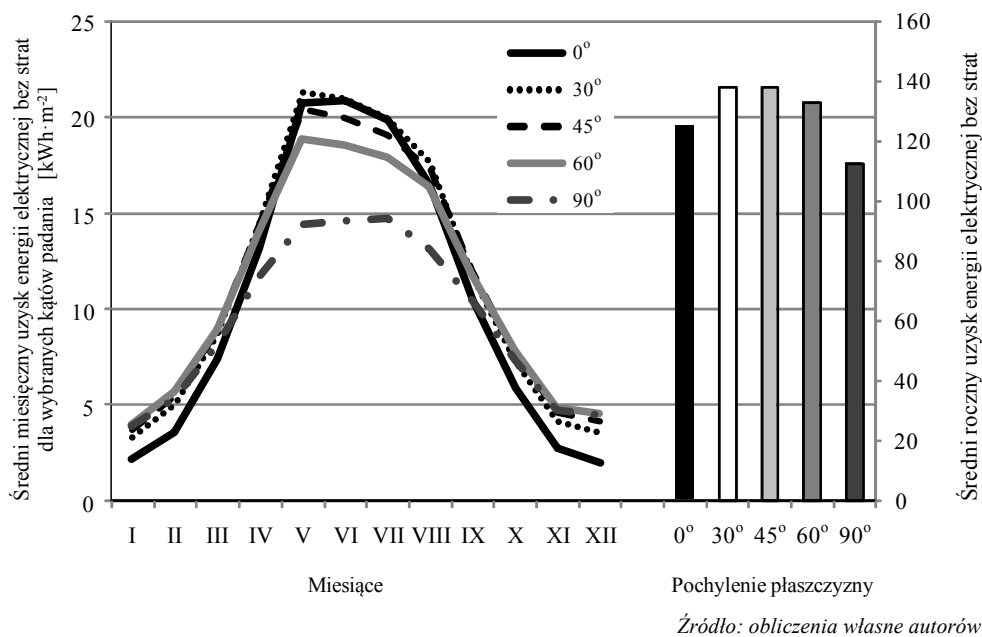
Rys. 1. Średnie miesięczne natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyznę dla wybranych kątów padania [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

Fig. 1. Average monthly intensity of solar radiation on a plane for the selected incidence angles [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

W celu dokładnej analizy związanej z uzyskiem energetycznym skorzystano z charakterystyki napięciowo-prądowej ogniwa fotowoltaicznego, danych o nasłonecznieniu oraz standardowej metodyki. Wyliczono średniomiesięczny uzysk energii elektrycznej dla wybranych kątów pochylenia ogniwa (rys. 2.) bez uwzględnienia strat. Na ich wielkość wpływa sposób przesyłu energii czy też pracy urządzeń w systemie zasilającym. Wielkość tych strat, z dużym przybliżeniem, oceniana jest na poziomie około 23% nie wliczając w to sprawności panelu fotowoltaicznego. W prezentowanej pracy nie brano pod uwagę tych wielkości ze względu na ich indywidualny charakter zależny od systemu konwersji fotoelektrycznej.

Dodatkowo na rysunku 2 (wykres kolumnowy) przedstawiono średnioroczny uzysk energii elektrycznej uwzględniając pięć różnych płaszczyzn nachylenia ogniw fotowoltaicz-

nych. Przedstawione wartości na tym wykresie nie uwzględniają również strat wynikających z pracy poszczególnych elementów systemu fotowoltaicznego i odnoszą się do jednostkowej powierzchni ogniwa. Analizując te wartości dla wybranych kątów pochylenia płaszczyzny w zakresie od 0 do 90° można zauważyć, że użytkowanie całoroczne paneli fotowoltaicznych w celach pozyskiwania energii elektrycznej powinno odbywać się przedziale pochylenia płaszczyzny od 30 do 45°.

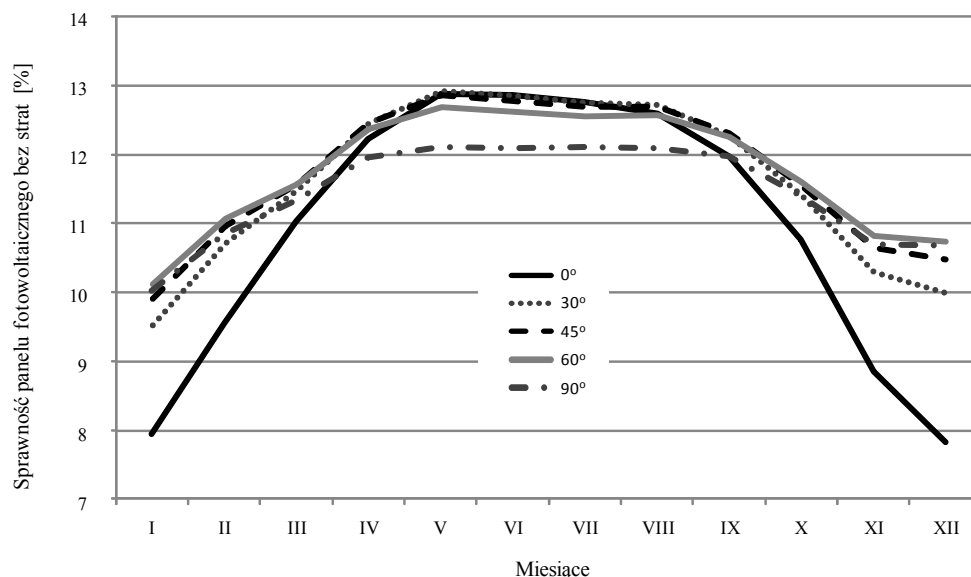


Rys. 2. Średni miesięczny i roczny uzysk energii elektrycznej bez strat dla wybranych kątów padania w [kWh·m<sup>-2</sup>]  
 Fig. 2. Average monthly and annual electric energy yield without losses for the selected incidence angles in [kWh·m<sup>-2</sup>]

Dla przyjętych warunków obliczeń wyznaczono również sprawności z jakim teoretycznie powinien pracować panel fotowoltaiczny dla arbitralnie przyjętych kątów jego pochylenia (rys. 3.). W miesiącach od kwietnia do września sprawność konwersji panelu w warunkach obliczeniowych nie powinna spaść poniżej 12%. W gorszych warunkach solarnych sprawność ta może spaść nawet o około 34%. Dotyczy to w szczególności poziomego umieszczenia paneli fotowoltaicznych. Dla pozostałych kątów pochylenia płaszczyzny różnice te nie powinny przekroczyć 16%.

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki analizy danych, najmniejszą ilość energii elektrycznej z metra kwadratowego panelu fotowoltaicznego uzyskano dla miesiąca grudnia. Ilość ta kształtowała się na poziomie około 2 kW·h w odniesieniu do poziomej płaszczyzny. Największy uzysk energii możliwy jest w miesiącu czerwcu dla płaszczyzny pod kątem 30°. Jego wartość może osiągnąć 21 kW·h. Dziesięciokrotna różnica między skrajnymi warto-

ściami musi być uwzględniona przy projektowaniu fotowoltaicznych systemów zasilających urządzenia w produkcji rolniczej. Szczególnie ze względu na specyfikę produkcji i zmienne warunki solarne.



Źródło: obliczenia własne autorów

Rys. 3. Sprawność panelu fotowoltaicznego bez strat [%]  
Fig. 3. Photovoltaic panel efficiency without losses [%]

## Wnioski

1. Z przeprowadzonej analizy uzyskanych wyników wynika, że największa średnia roczna wartość energii elektrycznej pochodząca z paneli fotowoltaicznych możliwa jest do uzyskania dla kątów pochylenia ogniwa w zakresie 30 do 45°.
2. Ze średnią teoretyczną sprawnością powyżej 12% panele fotowoltaiczne mogą pracować od kwietnia do września. W pozostałych miesiącach sprawność ta obniża się nawet o około 34%.
3. Największy uzysk energii elektrycznej, z metra kwadratowego panelu, możliwy jest do osiągnięcia w miesiącu czerwcu, dla płaszczyzny usytuowanej pod kątem 30°, jego wartość może osiągnąć 21 kW·h.

## Bibliografia

Golubiewski G., Duraczyński M. 2009. Fotowoltaika - czysta forma produkcji energii. GLOBEnergia Nr 3. s. 8. ISSN 1897-1288.

- Moneo M., Iglesias A.** 2009. Udział rolnictwa w wytwarzaniu gazów cieplarnianych. Universidad Politécnica de Madrid – Hiszpania. [Dostęp 03.2009] [http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2\\_Zmiany\\_klimatu/-\\_Udzia\\_rolnictwa\\_3jt.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2_Zmiany_klimatu/-_Udzia_rolnictwa_3jt.html)
- Dane meteorologiczne lata 1971–2000. [Dostęp 01.2011] [http://www.mi.gov.pl/2-48203f1e24e2f-1787735-p\\_1.htm](http://www.mi.gov.pl/2-48203f1e24e2f-1787735-p_1.htm).
- Komisja Europejska. 2008. Działania UE przeciw zmianom klimatu. Unia Europejska na czele działań międzynarodowych do roku 2020 i później. Luksemburg: Urząd Oficjalnych Publikacji Wspólnot Europejskich. Maszynopis.
- Solar generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the world. 2011. The European Photovoltaic Industry Association and Greenpeace International. 6th edition of the report “Solar Generation: Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World”. EPIA. [www.epia.org](http://www.epia.org). Dostępny w Internecie. 02.2011.

## **THEORETICAL ANALYSIS OF ENERGY YIELD FOR SILICON PHOTOVOLTAIC CELLS IN SOLAR CONDITIONS IN MAŁOPOLSKA REGION**

**Abstract.** The work contains an analysis of the theoretical potential of the electric energy yield for a photovoltaic panel made of polycrystalline silicon. Calculations were based on monthly multiannual average values of solar radiation intensity available in solar conditions of Małopolska Region. For their purposes, the researchers have chosen a source with a power reaching 235 Wp, which is available in the market and may be used in farms located in this region.

**Key words:** photovoltaic cells, silicone cells, power engineering

**Adres do korespondencji:**

Hubert Latała; e-mail: [Hubert.Latala@ur.krakow.pl](mailto:Hubert.Latala@ur.krakow.pl)  
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 116B  
30-149 Kraków