

Danuta Hilse<sup>1</sup>, Jan Kapała<sup>2</sup>

## BADANIA WYDAJNOŚCI MODUŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH W WARUNKACH BESKIDU ŻYWIECKIEGO

**Streszczenie.** Badania wydajności modułów fotowoltaicznych w terenie górskim, na przykładzie Beskidu Żywieckiego, przeprowadzone były w 2009 roku w miejscowości Stryżawa na pograniczu województw: małopolskiego i śląskiego. Obejmowały one pomiary ilości wyprodukowanej energii elektrycznej w trzech instalacjach o różnej mocy (570 Wp, 360 Wp oraz 200 Wp) i odmiennych rozwiązaniach technicznych (moduły obrotowe śledzące ruch Słońca oraz moduły stacjonarne). Wydajność modułów fotowoltaicznych porównano z natężeniem promieniowania słonecznego w Żywcu. Ustalono w ten sposób efektywność przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną. Z przeprowadzonych badań wynika, że przy natężeniu promieniowania słonecznego rzędu 890 kWh/m<sup>2</sup>·rok można wyprodukować energię elektryczną w ilości ponad 150 kWh/m<sup>2</sup>·rok (moduły obrotowe) lub około 110 kWh/m<sup>2</sup>·rok (moduły stacjonarne). Najwyższą efektywność przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną notuje się w okresie zimowym (ok. 26%).

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, moduły fotowoltaiczne, promieniowanie słoneczne, efektywność przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną.

### WSTĘP

Stopień wykorzystania potencjału energii słonecznej (PES) jest w Polsce bardzo niski. Nasz kraj nie należy wprawdzie do potentatów w tym zakresie, gdyż PES waha się w granicach 870–1100 kWh/m<sup>2</sup>·rok, ale i tak wystarcza na pokrycie 1/3 całkowitego krajowego zapotrzebowania na energię [Hilse D. i Kapała J. 2011 a]. Przeszkodą w procesie wdrażania instalacji fotowoltaicznych jest pasywna postawa Rady Ministrów, która w dokumencie „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku”, przyjętym 10 listopada 2009 r. przewiduje moc wytwórczą fotowoltaiki do 2020 r. na poziomie 2,0 MW [Hilse D. i Kapała J. 2011 b]. W wyniku tego właściwe ministerstwa nie podejmują żadnych działań wspierających fotowoltaikę, a przygotowywana obecnie ustawa o odnawialnych źródłach energii nie rozwiąże istniejących barier administracyjnych [Hilse D. i Kapała J. 2012].

---

<sup>1</sup> Biuro Handlowo-Usługowe Hilkap, Zabrze.

<sup>2</sup> Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2, e-mail: jkapala@ath.bielsko.pl

Znikoma jest również w naszym kraju wiedza na temat szerokiej możliwości wykorzystania modułów fotowoltaicznych w różnych dziedzinach życia i możliwości produkcji energii elektrycznej bezpośrednio u użytkownika, szczególnie w miejscach trudno dostępnych. Dowodem na niedostatek informacji o efektywności fotowoltaiki jest fakt, że pierwszy artykuł poświęcony wydajności modułów fotowoltaicznych w zależności od natężenia promieniowania słonecznego ukazał się w krajowych czasopiśmie naukowo – technicznych dopiero w 2011 r. przy czym opublikowane dane pochodziły z instalacji działającej w okolicach Drezna [Hilse D. i Kapała J. 2011 b].

Projektowanie i budowa instalacji fotowoltaicznych, zwłaszcza instalacji wyispowych, musi być oparte na dokładnym rozpoznaniu rozkładu promieniowania słonecznego na danym terenie, z równoczesną oceną wydajności instalowanych modułów fotowoltaicznych. Dotyczy to w szczególności terenów górskich, gdzie natężenie promieniowania słonecznego zmienia się często nawet w ciągu jednego dnia, w zależności od topografii terenu.

W pracy przedstawiono wyniki badań wydajności trzech instalacji fotowoltaicznych, o odmiennych rozwiązaniach technicznych oraz różnych powierzchniach modułów zamontowanych w stacji doświadczalnej na terenie Beskidu Żywieckiego.

## LOKALIZACJA INSTALACJI ORAZ METODY BADAŃ

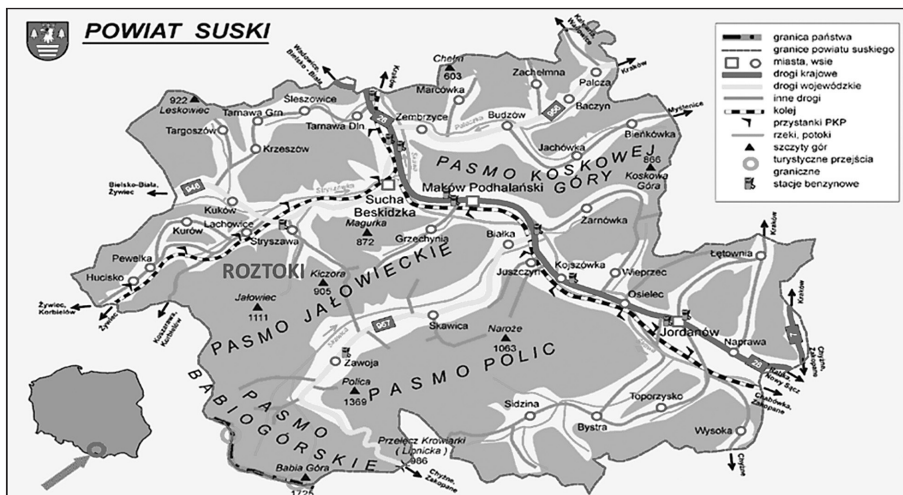
Instalacje do badań wydajności modułów fotowoltaicznych, w zależności od natężenia promieniowania słonecznego, zamontowane zostały w miejscowości Stryszawa (osiedle Roztoki), na granicy województw: małopolskiego i śląskiego.

Stacja położona jest u podnóża góry Jałowiec (1111 m n.p.m.), na dobrze nasłonecznionym stoku południowym. Znajduje się w zasięgu klimatu podgórskiego i górskiego o znacznych różnicach poszczególnych czynników klimatycznych. Cechą charakterystyczną klimatu tego terenu jest jego zmienność, przy czym wyróżnia się cztery piętra klimatyczne [Hess M. 1999]:

- umiarkowanie ciepłe piętro klimatyczne do wysokości około 700 m n.p.m. (tutaj zlokalizowana jest stacja doświadczalna na wysokości około 600 m n.p.m.),
- umiarkowanie chłodne piętro klimatyczne (do wysokości około 1080 m n.p.m.),
- piętro klimatu chłodnego (do wysokości około 1400 m n.p.m.), obejmujące szczyt Jałowca (1111 m n.p.m.),
- piętro klimatu bardzo chłodnego o cechach wysokogórskich, obejmujące szczytowe partie Babiej Góry.

W stacji doświadczalnej zamontowane są 3 instalacje fotowoltaiczne, a mianowicie:

- instalacja wyposażona w 3 moduły fotowoltaiczne o mocy  $3 \cdot 190 \text{ Wp} = 570 \text{ Wp}$  i łącznej powierzchni  $5,2 \text{ m}^2$ ; moduły zamontowane są na ramie obrotowej (śledzącej ruch Słońca), na otwartej przestrzeni,



Rys. 1. Lokalizacja fotowoltaicznej stacji doświadczalnej w Stryszawie  
 Fig. 1. Location photovoltaic research station in Stryszawa

- instalacja wyposażona w 2 moduły fotowoltaiczne o mocy  $2 \cdot 180 \text{ Wp} = 360 \text{ Wp}$  i łącznej powierzchni  $3,4 \text{ m}^2$ ; moduły zamontowane są na ramie stacjonarnej, na otwartej przestrzeni,
- instalacja wyposażona w 1 moduł fotowoltaiczny o mocy  $200 \text{ Wp}$  i powierzchni  $1,9 \text{ m}^2$ ; moduł zamontowany jest na południowej ścianie budynku mieszkalnego.

Instalacje zawierają następujące (w kolejności montażu) elementy:

- moduły fotowoltaiczne,
- regulatory naładowania akumulatorów,
- akumulatory (akumulujące prąd stały 12 lub 24 V),
- przetworniki prądu – falowniki, przetwarzające prąd stały na prąd zmienny 230 V,
- liczniki prądu wytworzonego i przekazanego do wykorzystania.

Stacja doświadczalna pracuje jako instalacja wyspowa, z wykorzystaniem prądu na miejscu bezpośrednio przez producenta. Prąd nadmiarowy zużywany był przez silnik pracujący na biegu jałowym (bezużytecznie).

Trzecia instalacja może pracować jako instalacja prądu stałego (z wyłączonym falownikiem), z przeznaczeniem wyprodukowanego prądu dla celów oświetleniowych, a także zasilania buforów centralnego ogrzewania.

Ilość prądu wytworzonego w opisanych wyżej instalacjach mierzono za pomocą typowych liczników prądu, z odczytem na koniec miesiąca, przez cały rok 2009. Uzyskane wyniki porównano z wartościami natężenia promieniowania słonecznego w Żywcu w 2009 r., zaczerpniętymi z bazy Śląskiego Monitoringu Powietrza [<http://stacje.katowice.pios.gov.pl/iseo/>]

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Wyniki badań wydajności modułów fotowoltaicznych (ilości wyprodukowanej energii elektrycznej przez poszczególne moduły) w kolejnych miesiącach 2009 roku zestawiono w tabeli 1. Największe ilości energii elektrycznej można wyprodukować w miesiącach letnich (IV – IX). Stanowią one około 75% produkcji rocznej.

Dla oceny wydajności poszczególnych instalacji fotowoltaicznych nie wystarczy znajomość ilości wyprodukowanej energii. Do tego celu niezbędna jest także znajomość natężenia całkowitego promieniowania słonecznego w miejscu pracy instalacji fotowoltaicznych. W stacji doświadczalnej w Stryzawie urządzenia do pomiaru promieniowania słonecznego (pyranometry) nie były zainstalowane. Z tego względu skorzystano z wyników pomiarów prowadzonych w 2009 roku w Żywcu (tabela 2). Umożliwiły one określenie wydajności modułów fotowoltaicznych w funkcji całkowitego natężenia promieniowania słonecznego podanej w tabeli 3. Na jej podstawie można wysnuć szereg konkretnych wniosków praktycznych.

Po pierwsze – najwyższą wydajność posiadają moduły obrotowe, wykorzystujące promieniowanie słoneczne w pełnym cyklu. W Beskidzie Żywieckim mogą one wyprodukować ponad 150 kWh/m<sup>2</sup>·rok. Moduły stacjonarne zamontowane na otwartej przestrzeni (lub na dachu budynku) posiadają wydajność o około 25% niższą, natomiast te same moduły zamontowane na ścianie budynku posiadają wydajność o około 35% niższą.

Po drugie – dla pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną w domku jednorodzinny, wynoszące około 340 kWh/miesiąc, należy dla okresu IV – IX zamontować moduły fotowoltaiczne o łącznej powierzchni około 30 m<sup>2</sup>. W okresie

**Tabela 1.** Wydajność modułów fotowoltaicznych w stacji doświadczalnej w Stryzawie  
**Table 1.** Efficiency of photovoltaic modules at the research station in Stryzawa

Miesiące / Months	Produkcja energii elektrycznej, kWh/miesiąc Electric energy production, kWh/month		
	Instalacja 1/System 1	Instalacja 2/System 2	Instalacja 3/System 3
I	24,4	12,6	5,9
II	27,6	14,3	6,8
III	49,9	26,2	12,4
IV	114,4	56,1	28,3
V	102,4	48,6	25,1
VI	82,2	40,5	20,7
VII	99,3	45,6	23,4
VIII	111,3	51,0	25,7
IX	80,6	39,4	19,8
X	41,6	20,4	9,9
XI	37,4	19,7	9,3
XII	12,5	6,1	2,8
Rok 2009	783,6	380,5	190,1

**Tabela 2.** Dobowe natężenie całkowitego promieniowania słonecznego w Żywcu w 2009 roku (W/m<sup>2</sup>)

**Table 2.** Daily intensity of the total solar radiation in the city of Żywiec in 2009 (W/m<sup>2</sup>)

Dni	Miesiące											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	41	36	52	176	226	143	155	214	206	89	82	22
2	7	21	73	201	106	147	194	246	179	95	86	28
3	14	53	37	192	227	81	239	229	140	107	39	38
4	12	18	93	186	230	126	276	86	50	122	63	27
5	16	58	44	181	81	172	202	50	129	81	36	12
6	23	52	64	156	75	102	240	58		51	76	23
7	23	61	20	164	217	194	216	223	155	105	24	10
8	35	20	22	166	263	239	139	255	186	59	33	10
9	56	15	29	148	190	193		234	149	52	14	6
10	30	42	65	152	195	164	180	157	166	14	9	17
11	47	18	36	176	189	201	125	44	82	24	11	13
12	55	34	50	161	109	141	183	134	65	25	16	11
13	54	12	35	193	164	170	230	122	87	27	47	16
14	14	7	139	181	164	299	257	215	108	6	68	17
15	15	9	56	222	142	182	228	224	123	9	27	21
16	5	13	13	225	65	69	239	233	136	53	25	19
17	9	12	44	103	256	247	276	181	67	22	17	14
18	41	10	53	198	218	253	220	164	98	29	50	13
19	44	11	57	175	57	63	81	230	174	59	20	16
20	23	13	19	225	249	46	183	229	165	34	61	9
21	21	11	102	222	269	55		216	154	98	53	42
22	15	25	42	200	94	33		87	143	67	55	30
23	33	67	48	60	173	53		120	138	43	33	12
24	24	43	63	181	166	95		163	99	17	18	28
25	32	52	63	193	231	97		221	154	61	39	11
26	56	39	89	245	280	183		174	142	69	44	43
27	39	36	85	227	48	106		143	149	26	53	28
28	13	62	149	233	146	110		177	137	29	24	10
29	13		46	230	126	112		32	34	17	50	42
30	26		25	176	166	184		201		21	26	11
31	15		77		78			196		73		30

zimowym konieczne jest wsparcie sieci energetycznej lub innych źródeł wytwarzania energii (np. energii wiatrowej).

Po trzecie – ustawa o odnawialnych źródłach energii powinna zapewnić odbiór nadmiarowej energii elektrycznej, wyprodukowanej przez indywidualnych właścicieli instalacji fotowoltaicznych w okresie letnim, z możliwością jej zwrotu bez dodatkowych opłat w okresie zimowym. Przy liczbie 5 mln budynków w Polsce istnieje możliwość zainstalowania na ich dachach modułów fotowoltaicznych o sumarycznej mocy około 20 000 MW.

Obliczoną efektywność przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną podano w tabeli 4. Najwyższą efektywnością, przekraczającą 17% w skali rocznej, odznaczają się moduły obrotowe. Jest ona uzależniona między innymi od temperatury otoczenia, uzyskując najwyższe wartości (do 26%) w okresie zimowym.

W celu oceny wiarygodności wyników uzyskanych w stacji doświadczalnej w Stryżawie, porównano je z uśrednionymi wynikami uzyskanymi w latach 2007 – 2009 w miejscowości Glashütte k. Drezna (tabela 5). W skład instalacji drezdeńskiej wchodzi 20 modułów fotowoltaicznych firmy Schueco, zamontowanych na dachu budynku (instalacja stacjonarna na otwartej przestrzeni) [Hilse D. i Kapała J. 2011 b]. Z tabeli 5 wynika, że produkcja energii elektrycznej (wyrażona w kWh/m<sup>2</sup> na miesiąc) w stacjonarnej instalacji fotowoltaicznej w Stryżawie jest zbliżona do wartości uzyskiwanych w Dreźnie (różnica w skali rocznej wynosi około 15% na korzyść Drezna).

**Tabela 3.** Wydajność modułów fotowoltaicznych w Stryżawie na tle natężenia promieniowania słonecznego w Żywcu

**Table 3.** Efficiency of photovoltaic modules in Stryżawa in view of the solar radiation in Żywiec

Miesiące Months	Natężenie promieniowania słonecznego, kWh/ m <sup>2</sup> . m-c / Solar radiation intensity kWh/ m <sup>2</sup> . month	Produkcja energii elektrycznej, kWh/ m <sup>2</sup> . m-c / Electric energy production kWh/ m <sup>2</sup> . month		
		Instalacja 1 System 1	Instalacja 2 System 2	Instalacja 3/ System 3
I	20,42	4,7	3,7	3,1
II	20,40	5,3	4,2	3,6
III	42,96	9,6	7,7	6,5
IV	133,15	22,0	16,5	14,9
V	124,80	19,7	14,3	13,2
VI	102,24	15,8	11,9	10,9
VII	151,27	19,1	13,4	12,3
VIII	126,19	21,4	15,0	13,5
IX	86,76	15,5	11,6	10,4
X	38,02	8,0	6,0	5,2
XI	28,77	7,2	5,8	4,9
XII	15,10	2,4	1,8	1,5
Rok/Year 2009	890,08	153,4	111,9	100,0

**Tabela 4.** Efektywność przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną w stacji doświadczalnej w Stryszawie

**Table 4.** Efficiency of the solar energy processing into the electric energy processing at the research station in Stryszawa

Miesiące Months	Efektywność przetwarzania energii, % / Energy processing efficiency, %			Średnia temperatura powietrza, C° (w latach 1971 – 2000) <sup>1)</sup> / Average temperature of the air, C° (in the years 1971 – 2000) <sup>1)</sup>
	Instalacja 1 System 1	Instalacja 2 System 2	Instalacja 3 System 3	
I	23,02	18,12	15,18	- 1,7
II	26,00	20,59	17,65	- 2,3
III	22,35	17,92	15,13	4,9
IV	16,52	12,39	11,19	8,0
V	15,80	11,46	10,58	12,4
VI	15,45	11,64	10,66	16,2
VII	12,65	8,86	8,13	19,2
VIII	16,96	11,89	10,70	17,1
IX	17,87	13,37	12,00	15,1
X	21,04	15,78	13,68	8,9
XI	25,03	20,16	17,03	4,4
XII	15,89	11,92	9,93	0,1
Rok/Year 2009	17,23	12,57	11,23	

<sup>1)</sup> średnia temperatura powietrza w latach 1971 – 2000 dotyczy Bielska – Białej. / average temperature of the air in the years 1971 – 2000 concerning Bielsko-Biała.

**Tabela 5.** Porównanie wydajności modułów fotowoltaicznych w Stryszawie i Dreźnie

**Table 5.** Comparison of photovoltaic modules efficiency in Stryszawa and Dresden

Miesiące/Months	Produkcja energii elektrycznej, kWh/ m <sup>2</sup> . m-c / Electric energy production, kWh/ m <sup>2</sup> . month		
	Instalacja 1/System 1	Instalacja 2/System 2	Drezno (lata 2007 – 2009)/ Dresden (the years 2007 – 2009)
I	4,7	3,7	3,8
II	5,3	4,2	6,0
III	9,6	7,7	9,7
IV	22,0	16,5	16,2
V	19,7	14,3	17,7
VI	15,8	11,9	15,5
VII	19,1	13,4	16,3
VIII	21,4	15,0	16,4
IX	15,5	11,6	11,4
X	8,0	6,0	8,0
XI	7,2	5,8	4,3
XII	2,4	1,8	3,0
Rok/Year 2009	153,4	111,9	128,3

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w warunkach Beskidu Żywieckiego istnieją w miarę korzystne warunki do produkcji energii elektrycznej w instalacjach fotowoltaicznych. Najwyższą wydajnością odznaczają się instalacje wyposażone w moduły obrotowe, a instalacje z modułami stacjonarnymi posiadają wydajność o około 25% niższą. Najwyższa efektywność przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną notowana jest w okresie zimowym, kiedy dochodzi do 26%.

Wyniki uzyskane w stacji doświadczalnej w Stryżawie są zbliżone do wyników pochodzących z rejonu Drezna.

## BIBLIOGRAFIA

1. Hilse D., Kapała J. 2011 a. Fotowoltaika – elektryfikacja bezdrutowa. Fotowoltaika 1, 18–19.
2. Hilse D., Kapała J. 2011 b. Fotowoltaika – katalizator przedsiębiorczości i innowacyjności gospodarki. Fotowoltaika 2, 12–14.
3. Hilse D., Kapała J. 2012. Prawne ograniczenia rozwoju fotowoltaiki w warunkach krajowych. Fotowoltaika 1, 19–21.
4. Hess M. 1999. Klimat w Polsce. PWN, Warszawa.
5. Śląski Monitoring Powietrza. /<http://stacje.katowice.pios.gov.pl/iseo/>

## RESEARCH INTO PHOTOVOLTAIC MODULES EFFICIENCY IN THE ŻYWIEC BESKIDS ENVIRONMENT

### Summary

Research into photovoltaic modules in the highlands, based on the example of the Żywiec Beskids, was conducted in 2009 in the town of Stryżawa on the border between the regions of Lesser Poland and Silesia. It involved measurements of the quantity of the produced electric power in three different systems of diverse power (570 W<sub>p</sub>, 360 W<sub>p</sub> oraz 200 W<sub>p</sub>) and different technical solutions (rotary modules tracing the Sun rotation and stationary modules). Efficiency of the photovoltaic modules was compared to the intensity of the solar radiation in the city of Żywiec. This way the efficiency of the solar energy processing was determined. The conducted research indicates that with the intensity of the solar radiation amounting to 890 kWh/m<sup>2</sup>·year it is possible to produce electric power in the quantity of over 150 kWh/m<sup>2</sup>·year (rotary modules) or about 110 kWh/m<sup>2</sup>·year (stationary modules). The highest efficiency of the solar energy processing into the electric energy has been observed in the winter season (ca. 26%).

**Key words:** photovoltaics, photovoltaic modules, solar radiation, efficiency of the solar energy processing into the electric energy.