

Wpłynęło 22.11.2012 r.  
Zrecenzowano 02.01.2013 r.  
Zaakceptowano 10.01.2013 r.

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

## **Wyniki sezonowych badań wydajności energetycznej instalacji fotowoltaicznej o mocy szczytowej 668 W**

**Jakub LENARCZYK**<sup>ABCDEF</sup>

*Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział w Poznaniu*

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań sezonowych instalacji fotowoltaicznej, opartej na ogniwach krzemowych polikrystalicznych, o mocy szczytowej 668 W. Pomiary prowadzono w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym w Falentach, Oddział w Poznaniu przez 12 miesięcy, rejestrując wartości chwilowego napięcia i natężenia prądu na ogniwach. Wydajność instalacji osiągnęła 562,74 kWh energii elektrycznej, średnio 46,90 kWh miesięcznie. Największa różnica w miesięcznej ilości wytworzonej energii wystąpiła między grudniem a majem i wyniosła 90%. Okresu zwrotu inwestycji ze środków własnych oszacowano na 27 lat.

**Słowa kluczowe:** energia słoneczna, fotowoltaika, energia elektryczna, energia odnawialna

### **Wstęp**

Promieniowanie słoneczne docierające do Ziemi dostarcza w ciągu godziny więcej energii niż w ciągu roku zużywa cała ludzkość [LEWIS 2007]. Spośród wszystkich metod konwersji pierwotnej energii Słońca dwie umożliwiają bezpośrednią zamianę energii promieniowania słonecznego na ciepło i energię elektryczną – są to konwersja fototermiczna i fotowoltaiczna. Ponieważ nie wiążą się one ze stratami energii podczas kolejnych etapów przemiany, procesy te charakteryzują się względnie największą efektywnością.

O ile technologie fototermiczne, oparte na kolektorach cieczowych lub systemach pasywnego ogrzewania, charakteryzują się zadowalającą sprawnością i są powszechnie stosowane [LEWANDOWSKI 2006], to technologie fotowoltaiczne są jeszcze dalece niedoskonałe. Ich niska (powtarzalna) sprawność, wynosząca



15% (maksymalnie ok. 18,7% [CHIRILĂ i in. 2011]), oraz wysoki koszt sprawiają, że wciąż nie stanowią one alternatywy dla konwencjonalnych źródeł energii elektrycznej.

Analizy i modele ekonomiczne, szacujące opłacalność fotowoltaiki, opierają się jednak często na stosunkowo szybko dezaktualizujących się informacjach, dotyczących dynamicznie zmieniających się cen energii sieciowej, lokalnych warunków pogodowych, czy też długookresowych zmian klimatu, związanych z trudną do przewidzenia aktywnością Słońca, działalnością człowieka (emisje) itd. Dodatkowo, w przypadku technologii fotowoltaicznej, notowany jest najszybszy spadek cen produkcji ogniw krzemowych (o 20% w ciągu 20 lat) [JANKOWSKA 2008]. Istnieje zatem zapotrzebowanie na prace badawcze w zakresie wytwarzania i eksploatacji fotoogniw [TROJANOWSKA, KNAGA 2004], a także na aktualne i możliwie precyzyjne dane, dotyczące wydajności systemów fotowoltaicznych, które są niezbędne do oceny opłacalności stosowania tej technologii.

Celem badań było oszacowanie wydajności energetycznej oraz efektywności ekonomicznej instalacji fotowoltaicznej, opartej na ogniwach krzemowych polikrystalicznych, o mocy szczytowej 668 W.

### Metody badań

Badania przeprowadzono w modelowej instalacji zlokalizowanej w Zakładzie Odnawialnych Źródeł Energii poznańskiego Oddziału Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach w okresie od 1.09.2011 r. do 31.08.2012 r. W trakcie badań mierzono napięcie (V) oraz natężenie (A) prądu elektrycznego, wytworzonego w czterech modułach fotowoltaicznych krzemowych, polikrystalicznych typ NE-Q7E3E firmy Sharp, o następujących parametrach technicznych: pole powierzchni czynnej – 1,18 m<sup>2</sup>, maksymalna moc znamionowa – 167 W, napięcie robocze – 34,6 V, maksymalne natężenie robocze – 4,83 A. Moduły fotowoltaiczne ustawiono w kierunku południowym pod kątem nachylenia do płaszczyzny gruntu ok. 40° (sierpień – październik 2011 r.), następnie 65° (październik 2011 r. – marzec 2012 r.), po czym ponownie 40° (fot. 1). Zgodnie z literaturą [KLUGMANN-RADZIEMSKA, KLUGMANN 2002], takie ustawienia modułów PV dla równoleżnika 52°N są zbliżone do najbardziej efektywnych.

Pomiary napięcia i natężenia energii elektrycznej rejestrowano co 1 min za pomocą ośmiokanałowego programowalnego modułu wejść analogowych M-800 wraz z oprogramowaniem komputerowym (fot. 2). Moduły połączono w dwie pary. Parametry prądu elektrycznego z każdej pary były mierzone osobno. Celem było umożliwienie wczesnego wykrycia ewentualnej usterki modułu w wypadku, gdyby wydajność jednej z par znacząco zmalała.

Wytworzoną energią elektryczną ładowano, za pomocą dwóch regulatorów ładowania Steca, typ SolSum 10.10F, zestaw baterii trakcyjnych Trojan, o znamionowej pojemności 20-godzinnej 1200 Ah.



Fot. 1. Zespół modułów fotowoltaicznych na mobilnej konstrukcji nośnej z możliwością zmiany ustawienia płaszczyzny ogniw w osi pionowej i poziomej

Photo 1. Set of the photovoltaic moduli on a mobile supporting structure, with possible changes of cell position plain in vertical and horizontal axes

Źródło: fot. J. Lenarczyk. Source: photo J. Lenarczyk.



Fot.2. Moduł rejestrujący dane

Photo 2. Modulus recording the data

Źródło: fot. J. Lenarczyk. Source: photo J. Lenarczyk.

## Wyniki badań

Obliczono, że w 12-miesięcznym okresie pomiarów instalacja wygenerowała łącznie 562,74 kWh energii elektrycznej. Wartości dziennej produkcji energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach zebrano w tabeli 1.

W związku z cyklicznymi zmianami nasłonecznienia uzysk energii elektrycznej zmienia się w czasie. Ze względu na ilość wytworzonej energii, okres pracy instalacji można podzielić na okres letni, w którym ilość wyprodukowanej w ciągu miesiąca energii elektrycznej przekracza 50 kWh, oraz okres zimowy, w którym ilość

Tabela 1. Ilość energii elektrycznej wygenerowanej miesięcznie [kWh] przez instalację fotowoltaiczną o łącznej mocy szczytowej 668 W wraz z wybranymi obliczeniami statystycznymi

Table 1. Amount of electric energy [kWh] generated monthly by photovoltaic installation of total peak power 668 W, with selected statistical calculations

Wyszczególnienie Specification	Rok Year 2011				Rok Year 2012							
	wrzesień September	październik October	listopad November	grudzień December	styczeń January	luty February	marzec March	kwiecień April	maj May	czerwiec June	lipiec July	sierpień September
Suma Total	58,84	32,75	22,24	7,85	13,08	26,50	57,95	60,13	78,71	62,62	72,58	69,47
Średni dzienny uzysk energii Average daily gain of energy	1,96	1,06	0,74	0,25	0,42	0,91	1,87	2,00	2,54	2,09	2,34	2,24
Mediana Median	1,96	1,08	0,79	0,23	0,12	0,57	2,18	2,17	2,76	2,34	2,35	2,41
Odchylenie standardowe Standard deviation	0,65	0,65	0,41	0,21	0,52	0,74	1,12	0,98	0,63	0,86	0,35	0,65

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

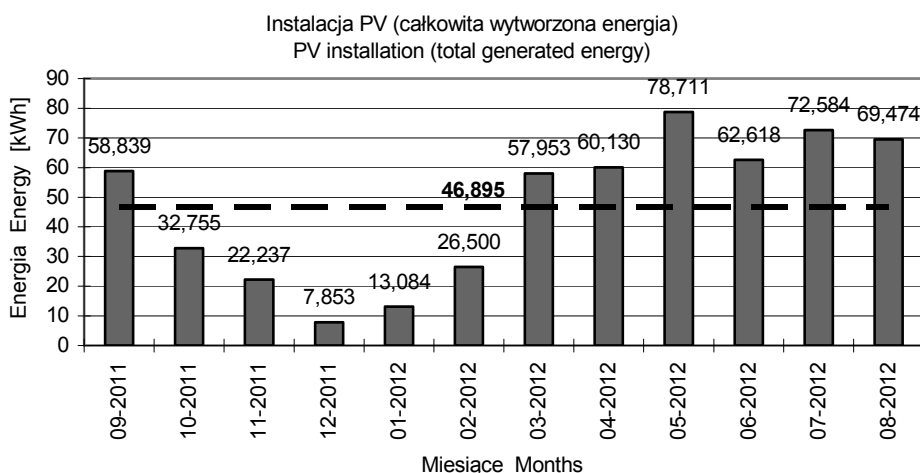
wytworzonej energii jest mniejsza, ale też bardziej wyrównana w skali miesięcznej (wartość odchylenia standardowego dla dziennych uzysków energii mieści się w granicach  $\sigma = 0,21-0,74$ , podczas gdy w okresie letnim dochodzi ona do  $\sigma = 1,12$ ). W przypadku badanej instalacji okres letni trwał 7 miesięcy (III 2012 – VIII 2012 oraz IX 2011), natomiast okres zimowy 5 miesięcy (X 2011 – II 2012).

Sumy wygenerowanej miesięcznie energii elektrycznej przedstawiono w postaci graficznej (rys. 1).

Wyniki te są porównywalne z danymi, uzyskanymi w modelowaniu za pomocą narzędzia JRC PVGIS PV Estimation Utility (tab. 2).

Średnia dzienna ilość wytworzonej energii elektrycznej zmieniała się proporcjonalnie do miesięcznej ilości energii wygenerowanej (rys. 2), co potwierdza wartość współczynnika korelacji  $r = 0,98$ .

Różnice między średnią dzienną ilością wytworzonej energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach są istotne statystycznie. Największa różnica wystąpiła między grudniem a majem i wyniosła 90%.



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 1. Ilość energii elektrycznej uzyskanej przez panele fotowoltaiczne o łącznej mocy szczytowej 668 W w okresie pomiarowym; wartość pogrubiona – średnia arytmetyczna

Fig. 1. Amount of electric energy gained by photovoltaic panels of total peak power 668 W, within the measurement's period; underlined value – arithmetic mean

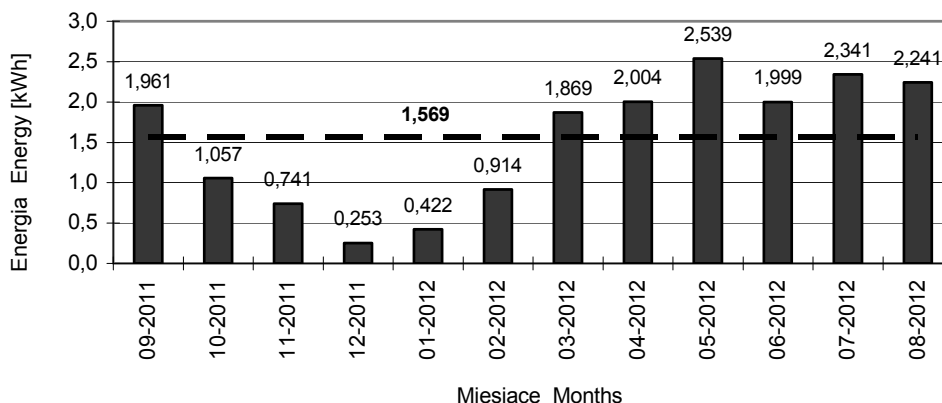
Tabela 2. Wyniki modelowania dla instalacji PV o mocy szczytowej 700 W zlokalizowanej 52°24'59" szer. geogr. N, 16°57'59" dł. geogr. E, 61 m n.p.m. (Poznań)

Table 2. Modelling results for the PV installation of peak power 700 W, localized at 52° 24'59" N latitude, 16°57'59" E longitude, 61 m above sea level (Poznań)

Miesiąc Month	Wytwarzana energia w instalacji PV [kWh]: Energy generated in PV installation [kWh]: Moc nominalna: 0,7 kW Rated power: 0.7 kW Szacowane straty: 14% Estimated losses: 14%	
	produkcja miesięczna monthly production	produkcja dzienna daily production
Wrzesień September	54,2	1,81
Październik October	44,8	1,45
Listopad November	22,1	0,74
Grudzień December	14,8	0,48
Styczeń January	19,4	0,63
Luty February	32,9	1,18
Marzec March	52,4	1,69
Kwiecień April	65,5	2,18
Maj May	79,0	2,55
Czerwiec Juny	68,6	2,29
Lipiec July	75,5	2,44
Sierpień August	71,0	2,29
<b>Średnia roczna Annual mean</b>	<b>50,0</b>	<b>1,64</b>
<b>Łącznie energia rocznie Total energy annually</b>	<b>600</b>	

Źródło: European Commission [2012]. Source: European Commission [2012].

Instalacja PV - średnia dzienna energia wytworzona  
PV installation - average daily generated energy



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 2. Średni dzienny uzysk energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej o łącznej mocy szczytowej 668 W w poszczególnych miesiącach okresu pomiarowego; wartość pogrubiona – średnia arytmetyczna

Fig. 2. Mean daily gain of electric energy from the photovoltaic installation of total peak power 668 W, in particular months of measurement's period; value underlined – arithmetic mean

Widoczne różnice występują również w skali dobowej. Liczbę godzin, podczas których instalacja produkuje energię elektryczną – w miesiącach zimowym oraz letnim – przedstawiono na rysunkach 3, 4. (wybrano dni o największym uzysku energii elektrycznej w danych miesiącach).

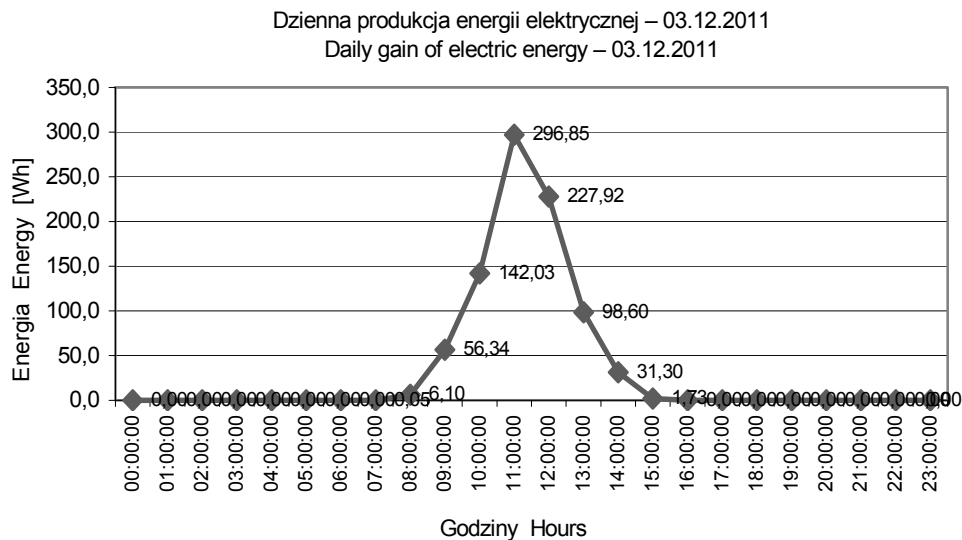
W miesiącu zimowym czas pracy fotoogniw w pogodny dzień ogranicza się za ledwie do ok. 7 godzin, a średnia godzinna produkcja energii wynosi 17,9 Wh, natomiast w miesiącu letnim czas ten dochodzi do 13 godzin, a średnia godzinna produkcja energii wynosi 68,6 Wh. Spadek wydajności ogniw fotowoltaicznych po godzinie 9.00, związany prawdopodobnie z ich przegrzaniem, przedstawia rysunek 4.

Nakłady inwestycyjne poniesione w związku z budową przykładowej instalacji przedstawiono w tabeli 3.

### Oszczędności roczne

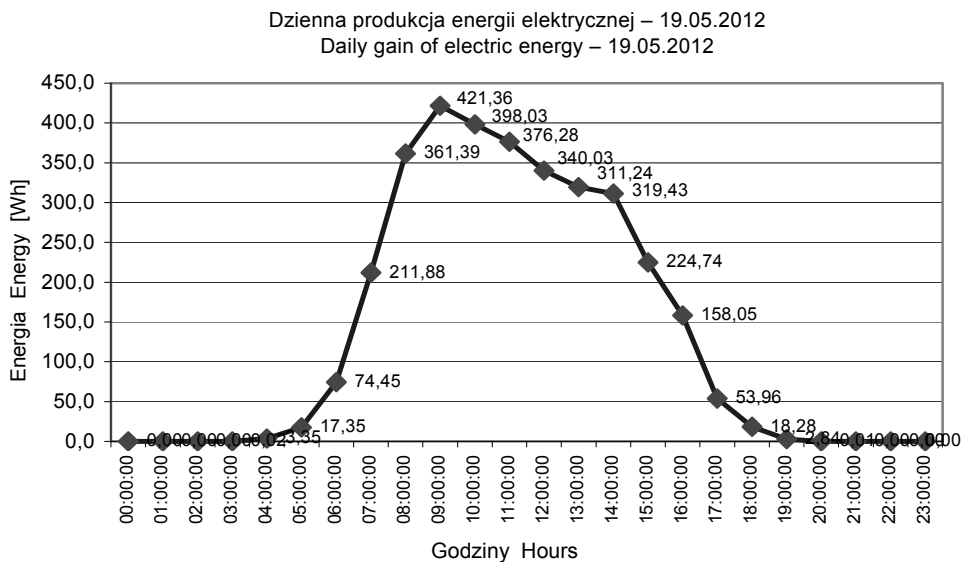
Zgodnie z obowiązującą na dzień 29.06.2012 r. taryfą kosztów energii elektrycznej dystrybutor dostarcza energię elektryczną w cenie 0,56 zł za 1 kWh („Enea”, obszar Wielkopolski, taryfa G11).

Instalacja fotowoltaiczna wyprodukowała w ciągu roku 562,74 kWh energii elektrycznej, co odpowiada:  $562,74 \text{ kWh} \cdot 0,56 \text{ zł} \cdot \text{kWh}^{-1} = 312,48 \text{ zł}$ .



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 3. Czas pracy i uzysk energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej o łącznej mocy szczytowej 668 W w miesiącu zimowym  
Fig. 3. Work time and gain of electric energy from photovoltaic installation of total peak power 668 W in a "winter" month



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 4. Czas pracy i uzysk energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej o łącznej mocy szczytowej 668 W w miesiącu letnim  
Fig. 4. Work time and gain of electric energy from photovoltaic installation of total peak power 668 W in a "summer" month

Tabela 3. Nakłady inwestycyjne związane z budową instalacji solarnej w ITP Oddział w Poznaniu – rok 2007 r.

Table 3. Investment inputs connected with building of solar installation in ITP, Branch in Poznań, 2007 year

Wyszczególnienie Specification	Koszt jednostkowy [zł] Cost per unit [PLN]	Liczba [szt.] Number [pcs.]	Koszt całkowity [zł] Total cost [PLN]
Panel fotowoltaiczny Sharp 167W Photovoltaic panel Sharp 167 W	3 023,58	4	12 094,32
Regulator Steca Stec controller	199,00	2	398,00
Akumulator Trojan Trojan accumulator	609,00	6	3 654,00
Oprządowanie elektryczne Electric instrumentation	150,00	1	150,00
Razem Total		16 296,32 zł	

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

### Okres zwrotu inwestycji

Zakładając, że instalacja nie wymaga obsługi, to aby pokryć koszty związane z zainstalowaniem fotoogniw (16 296,32 zł) ze środków zaoszczędzonych na energii elektrycznej (312,48 zł·rok<sup>-1</sup>) potrzeba: 16 296,32 zł : 312,48 zł·rok<sup>-1</sup> = 52,2 roku.

Tak długi okres zwrotu inwestycji danej instalacji oznacza, że jest ona nieopłacalna w sytuacji, kiedy ceny energii elektrycznej nie ulegną zmianie. Natomiast, jeśli założymy realny wzrost tych cen o 6% w skali roku oraz sugerowany w literaturze spadek wydajności fotoogniw o 1% rocznie [KLUGMANN-RADZIEMSKA; KLUGMANN 2002], okres zwrotu inwestycji zmieni się, zgodnie z tabelą 4.

Z obliczeń wynika, że okres zwrotu inwestycji, w warunkach przyjętych założeń, skraca się do 27 lat, co wciąż jest okresem zbyt długim, żywotność tego typu instalacji szacuje się na 20–30 lat.

Nakłady inwestycyjne zależą przede wszystkim od kosztu paneli fotowoltaicznych, który stanowi ok. 75% kosztów całkowitych. Jeśli planuje się rozbudowę systemu, koszty zakupu kolejnych akumulatorów oraz regulatorów ładowania są znacznie niższe. Tym samym wielkość instalacji jest odwrotnie proporcjonalna do kosztów wyprodukowania 1 kWh oraz długości okresu zwrotu inwestycji.

Szansą na przekroczenie granicy opłacalności solarnych systemów zasilania jest obecnie wspierająca je polityka państw UE. Inwestorzy mogą ubiegać się o dotacje w ramach takich programów, jak: Program operacyjny „Infrastruktura i Środowisko – Priorytet IX” (Infrastruktura energetyczna przyjazna środowisku i efektywność energetyczna), Regionalne programy operacyjne – priorytety dotyczące ochrony środowiska, Mechanizm Finansowy Europejskiego Obszaru Gospodarczego. Istnieje również możliwość otrzymania częściowo umarzalnej pożyczki w ramach wojewódzkich funduszy ochrony środowiska. Dobrym przykładem wykorzystania istniejących możliwości dofinansowania jest instalacja fotowoltaiczna



Tabela 4. Okres zwrotu inwestycji dla badanej instalacji fotowoltaicznej; założenia: wzrost cen energii o 6% rocznie, spadek wydajności fotoogniw o 1% rocznie  
 Table 4. Period of investment return for photovoltaic installation tested, at assumptions: increase of energy price by 6% annually, drop of photo-cells efficiency by 1% per year

Lata Years	Cena energii [zł] Price of energy [PLN]	Ilość energii [kWh] Amount of energy	Wartość wyprodukowanej energii [zł] Value of generated energy [PLN]
1	0,56	562,74	315,13
2	0,59	557,16	330,73
3	0,63	551,58	347,06
4	0,67	546,00	364,17
5	0,71	540,42	382,07
...	...	...	...
23	2,02	439,98	887,87
24	2,14	434,40	929,21
25	2,27	428,82	972,31
26	2,40	423,24	1 017,24
<b>27</b>	<b>2,55</b>	<b>417,66</b>	<b>1 064,05</b>
Suma przychodów [zł] Sum of incomes [PLN]			16 811,75

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

o mocy 50 kW zbudowana na hali jednej z wytwórni mrożonek w Bydgoszczy. Koszt inwestycji w wysokości 400 tys. euro został aż w 80% dofinansowany w ramach Sektorowego programu operacyjnego „Rybołówstwo i przetwórstwo ryb 2004–2006”.

Mniejsze projekty mogą liczyć na kredyty preferencyjne Banku Ochrony Środowiska S.A. z dopłatami Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz specjalne kredyty z niższym oprocentowaniem dla przedsięwzięć związanych z zakupem i instalacją ekologicznych urządzeń, w tym paneli fotowoltaicznych. NFOŚiGW udziela też pożyczek z możliwością warunkowego, częściowego umorzenia oraz dotacji rozpatrywanych w trybie konkursowym.

Dzięki dofinansowaniu okres zwrotu inwestycji w instalacje fotowoltaiczne może skrócić się nawet do 8–9 lat.

## Wnioski

1. W ciągu 12 miesięcy badań instalacja fotowoltaiczna wygenerowała 562,74 kWh energii elektrycznej, średnio 46,90 kWh miesięcznie.
2. Małą podaż energii w okresie zimowym można częściowo zrekompensować, używając dodatkowego źródła energii, np. generatora wiatrowego. Wydajność elektrowni wiatrowych zwiększa się w miesiącach zimowych oraz w dni pochmurne – komplementarnie do ogniw fotowoltaicznych [BOCZAR 2010]. Zastosowanie takiego rozwiązania zwiększy jednak koszt instalacji oraz czas konieczny na obsługę i konserwację urządzeń.

3. Zwrot kosztów inwestycji w przypadku badanej instalacji fotowoltaicznej wynosi ok. 27 lat i może skrócić się przede wszystkim w zależności od: wzrostu cen energii sieciowej, rozmiaru instalacji (powierzchni czynnej zainstalowanych modułów), pojawienia się na rynku tańszych modułów o lepszej sprawności.

## Bibliografia

- BOCZAR T. 2010. Wykorzystanie energii wiatru. Gliwice. Wydaw. PAK. ISBN 978-83-926319-6-5 ss. 366.
- CHIRILĂ A., BUECHELER S., PIANEZZI F., BLOESCH P., GRETENER C., UHL R.A., FELLA C., KRANZ L., PERRENOUD J., SEYRLING S., VERMA R., NISHIWAKI S., ROMANYUK Y.E., BILGER G., TIWARI A.N. 2011. Highly efficient Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells grown on flexible polymer films. *Nature Materials*. Vol. 10 s. 857–861.
- European Commission, Joint Research Centre, Institute of Energy and Transport. 2012. Photovoltaic Geographical Information System. Narzędzie do symulacji [online]. European Union. [Dostęp: 17.09.2012]. Dostępny w Internecie: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>
- JANKOWSKA K. 2008. Fotowoltaika w Polsce a w Niemczech. *Czysta Energia*. Nr 12(86) s. 28–29
- KLUGMANN-RADZIEMSKA E., KLUGMANN E. 2002. Systemy słonecznego ogrzewania i zasilania elektrycznego budynków. Białystok. Wydaw. Ekonomia i Środowisko. ISBN 83-88771-22-1 ss. 125.
- LEWANDOWSKI W.M. 2006. Proekologiczne odnawialne źródła energii. Warszawa. WNT. ISBN 978-83-204-3660-0 ss. 432.
- LEWIS S.N. 2007. Towards cost-effective solar energy use. *Science*. Vol. 315 s. 798–801.
- TROJANOWSKA M., KNAGA J. 2004. Optymalizacja obciążenia modułu fotowoltaicznego SF 50. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 2 s. 301–305.

**Jakub Lenarczyk**

## RESULTS OF THE SEASONAL STUDY ON ENERGETIC OUTPUT OF PHOTOVOLTAIC INSTALLATION WITH 668 W PEAK POWER

### Summary

Paper presents the seasonal investigation results of photovoltaic installation based on polycrystalline siliceous elements of the peak power 668 W. The measurements were conducted at the Institute of Technology and Life Sciences, Branch in Poznań, during 12-month period; values of instantaneous voltage and current intensity in the elements were recorded. The output of installation reached 562.74 kWh electric energy, on an average 46.90 kWh per month. Greatest difference in the monthly efficiency occurred between December and May, and amounted to 90%. The period of investment return was estimated for 27 years.

**Key words:** solar energy, photovoltaics, electric energy, renewable energy

Adres do korespondencji:

mgr inż. Jakub Lenarczyk  
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy  
Oddział w Poznaniu  
ul. Biskupińska 67, 60-463 Poznań  
tel: 61 820-33-31 wew. 240; e-mail: [j.lenarczyk@itep.edu.pl](mailto:j.lenarczyk@itep.edu.pl)