

Arkadiusz DOBRZYCKI*
Dariusz KURZ*
Dorota LASKA*

ANALIZA WPLYWU UKSZTAŁTOWANIA ELASTYCZNEJ DACHÓWKI FOTOWOLTAICZNEJ NA UZYSK ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Niniejsza praca dotyczy fotowoltaiki zintegrowanej z budynkiem (BIPV), a w szczególności potencjalnych zalet wynikających z wykorzystania tej technologii. Zaprezentowano możliwości wkomponowania elementów BIPV w strukturę budynku, ze szczególnym uwzględnieniem fotowoltaicznych pokryć dachowych. W celu wykazania zasadności stosowania tego typu rozwiązań, w warunkach rzeczywistych, analizie poddano cienkowarstwowy moduł fotowoltaiczny stanowiący integralną część dachówki fotowoltaicznej. Podczas badań szczególną uwagę zwrócono na zmiany parametrów badanego obiektu, w zależności od sposobu ukształtowania go względem źródła promieniowania słonecznego, wykazując w ten sposób konieczność dążenia do optymalnej ekspozycji elementów BIPV względem Słońca.

SŁOWA KLUCZOWE: dachówka fotowoltaiczna, BIPV, ogniwa amorficzne, uzysk energii, charakterystyka prądowo-napięciowa, ekspozycja modułu fotowoltaicznego

1. WPROWADZENIE

Priorytetowe działania w dziedzinie energetyki i ochrony środowiska, mające na celu ograniczenie eksploatacji złóż naturalnych oraz minimalizację emisji szkodliwych gazów do atmosfery, sprzyjają poszukiwaniu alternatywnych i innowacyjnych rozwiązań w zakresie energetyki odnawialnej. Na szczególną uwagę zasługuje fotowoltaika, dziedzina zajmująca się bezpośrednim przetwarzaniem energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną [4].

Obecnie jednym z głównych zastosowań fotowoltaiki jest produkcja energii elektrycznej w koncepcji BAPV (Building Applied Photovoltaics), tj. wykorzystanie tradycyjnych modułów fotowoltaicznych doinstalowanych do istniejących obiektów budowlanych. Aby rozwiązanie to było efektywne wymagane jest wygospodarowanie znacznej przestrzeni [1].

* Politechnika Poznańska.

W odpowiedzi na ten problem oraz w związku z coraz częstszym dążeniem przez architektów i projektantów do tworzenia energooszczędnych obiektów budowlanych, przy zachowaniu ich atrakcyjnej i innowacyjnej formy, na rynku pojawiła się koncepcja wkomponowania fotowoltaiki w strukturę budynku.

Koncepcja ta określana jest jako Building Integrated Photovoltaics (BIPV) i zakłada zastosowanie modułów fotowoltaicznych jako elementów alternatywnych dla tradycyjnych materiałów budowlanych [1, 3]. Moduły produkowane w technologii BIPV wyróżniają się, w porównaniu do tradycyjnych rozwiązań, większą funkcjonalnością. Jako integralne komponenty budynku, oprócz wytwarzania energii elektrycznej, mogą pełnić funkcje: zacielenia, izolacji termicznej czy akustycznej. Zaletą modułów BIPV, zarówno pod względem konstrukcyjnym jak i materiałowym, jest możliwość stosowania ich na fasadach, dachach, oknach, czy w formie markiz [2]. Każde z tych rozwiązań skutkuje generowaniem energii elektrycznej w różnej ilości.

Obecnie jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań jest integracja fotowoltaiki z budynkiem przy użyciu dachówek fotowoltaicznych [3]. Zastosowanie komponentów wysokiej jakości czyni instalację niewyróżniającą się, przy jednoczesnym zachowaniu wszystkich właściwości hydroizolacyjnych zwykłych dachówek. Na rynku dostępne są zarówno solarne pokrycia dachowe zachowujące kształt tradycyjnych dachówek ceramicznych, jak i składające się z ciągu kilkunastu ogniw połączonych szeregowo – dachówki bitumiczne (rys. 1).



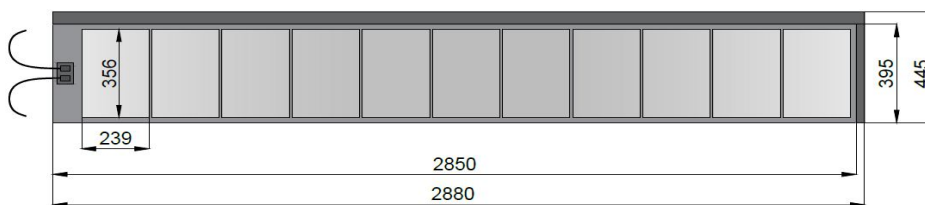
Rys. 1. Przykład zastosowania bitumicznej dachówki fotowoltaicznej [7]

Ze względu na fakt, iż solarna dachówka bitumiczna, dzięki zastosowaniu ogniw amorficznych cechuje się dużą elastycznością, a zatem posiada znacznie więcej możliwości montażu, postanowiono dokonać analizy wpływu ukształtowania jej powierzchni na uzysk energii elektrycznej [8]. W tym celu, dachówkę poddano gięciu w sposób umożliwiający uzyskanie różnych kątów pochylenia, a zatem innego rozkładu natężenia promieniowania padającego na jej powierzchnię.

2. METODA BADAWCZA

2.1. Przedmiot badań

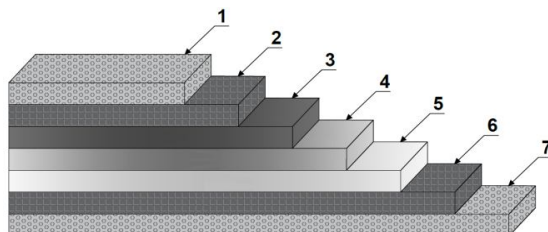
Na podstawie przeglądu obecnych na polskim rynku firm oferujących elastyczne dachówki fotowoltaiczne takich jak: Fotton, Tegola czy Prefa zdecydowano, iż do badań wykorzystano dachówkę bitumiczną TEGOSOLAR PVL-68 firmy Tegola (rys. 2). Dachówka o wadze około 4 kg zbudowana jest z dwóch elementów: podłoża bitumicznego oraz elastycznego modułu fotowoltaicznego Uni-Solar. Moduł o mocy maksymalnej 68 W składa się z jedenastu, zbudowanych na bazie krzemu amorficznego, komórek solarnych połączonych szeregowo. Każda z komórek posiada włutowaną równoległą diodę bocznikującą, umożliwiającą przepływ prądu w przypadku zacinienia części modułu [8].



Rys. 2. Dachówka TEGOSOLAR PVL-68 [8]

Chociaż ogniwa na bazie krzemu amorficznego cechują się stosunkowo niską sprawnością (6-10%), to są znacznie tańsze w produkcji od ogniw z krzemu krystalicznego i mogą być wytwarzane w dowolnych kształtach oraz rozmiarach [5]. Budowę omawianej dachówki fotowoltaicznej, wykonaną w oparciu o konstrukcję z potrójnym złączeniem (triple-junction), przedstawiono na rys. 3. Struktura generująca energię elektryczną złożona jest z folii ze stali nierdzewnej, na którą nakłada się trzy warstwy krzemu amorficznego oraz przezroczystej elektrody i gniazda sieci przyłączeniowej [6]. Struktura ta pokryta jest powłoką polimerową zawierającą polimer EVA oraz dodatkowo na górnej powierzchni polimer ETFE, które chronią moduł przed wodą i utrudniają osadzanie się brudu [8]. Ze względu na fakt, iż głównym powodem niskiej sprawności ogniw amorficznych jest słabe pochłanianie niskoenergetycznego promieniowania podczerwonego, każda z trzech warstw krzemu amorficznego ma za zadanie absorbować fale promieniowania słonecznego o innej długości.

Ważniejsze parametry badanej dachówki fotowoltaicznej przedstawione zostały w tabeli 2.1. Zamieszczone dane techniczne wyznaczono w ustandaryzowanych warunkach testowania STC (Standard Test Conditions), czyli dla natężenia promieniowania równego 1000 W/m^2 , temperatury pracy modułu $25 \text{ }^\circ\text{C}$ oraz masy powietrza 1,5 [5].



Rys. 3. Budowa ogniwa UNI-SOLAR (1 – polimerowa warstwa zewnętrzna, 2 – siatka podłączeniowa (+), 3 – ogniwo krzemowe (a-Si), 4 – ogniwo krzemowe (a-SiGe), 5 – ogniwo krzemowe (a-SiGe), 6 – folia ze stali nierdzewnej (-), 7 – polimerowa warstwa wewnętrzna) [6]

Tabela 2.1. Parametry dachówki TEGOSOLAR PVL-68 [8]

Parametr	Wartość
Wymiary	(2849 x 394 x 2,5) mm
Powierzchnia czynna	0,936 m ²
Waga	3,9 kg
Moc znamionowa	68 W
Tolerancja mocy	5%
Napięcie obwodu otwartego	23,1 V
Prąd zwarcia	5,1 A
Napięcie w MPP	16,5 V
Prąd w MPP	4,13 A
Sprawność	7,26 %
Temperaturowy współczynnik mocy	-0,21 %/°C
Temperatura działania	10°C – 40°C

2.2. Stanowisko pomiarowe

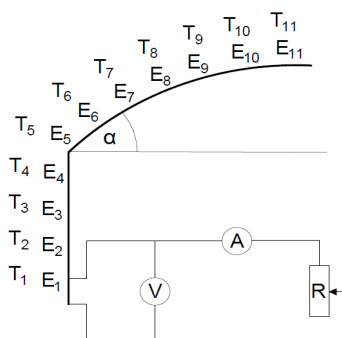
Badania, których zakres obejmował wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej modułu oraz pomiar warunków atmosferycznych wykonano w listopadzie 2015 roku, w warunkach klimatu lokalnego miasta Poznania, na terenie Politechniki Poznańskiej (52°23'N 16°55'E). Obszar, na którym przeprowadzono badania pozbawiony był elementów, mogących powodować zacielenie modułu podczas prowadzonych badań.

Do pomiarów parametrów elektrycznych modułu oraz warunków atmosferycznych wykorzystane zostały wymienione poniżej urządzenia:

- dachówka fotowoltaiczna TEGOSOLAR PVL-68,
- opornik suwakowy CONTREX PRN3/322 3x10 Ω,
- opornik suwakowy CONTREX PRN3/322 3x1000 Ω,
- woltomierz cyfrowy INSTEK GDM-394, (rozdzielczość 0,01 V, +/- 0,8%),

- amperomierz cyfrowy BRYMEN BM806, (rozdzielczość 0,001 A, +/- 2,0%),
- luksomierz HT INSTRUMENTS HT204 (rozdzielczość 1 W/m², +/- 5,0%),
- anemometr KAINDL WINDMASTER 2 (rozdzielczość 0,1 m/s, +/- 4,0%),
- pirometr CEM DT-8865 (rozdzielczość 0,1°C, +/- 1,0%),
- termometr rtęciowy,
- przewody pomiarowe.

Podczas badań rozważono cztery przypadki ukształtowania dachówki fotowoltaicznej. Obiekt każdorazowo ustawiano prostopadle do podłoża w kierunku południowym, a następnie na wysokości piątej komórki solarnej zaginano pod kątem 90°, 60°, 45° oraz 30° względem powierzchni. Wykonano pomiary parametrów elektrycznych modułu tj. napięcia obwodu otwartego i prądu zwarcia oraz poszczególnych wartości napięcia i prądu odpowiadających przebiegowi charakterystyki prądowo-napięciowej. Ponadto zbadano temperaturę powierzchni poszczególnych komórek solarnych modułu oraz natężenie promieniowania słonecznego padającego prostopadle na jego powierzchnię. Schemat zbudowanego na potrzeby badań stanowiska pomiarowego zaprezentowany został na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego

(α - kąt zgięcia dachówki, V- woltomierz, A – amperomierz, R – rezystor, T_i – pomiar temperatury powierzchni dachówki, E_i – pomiar natężenia promieniowania słonecznego)

3. WYNIKI POMIARÓW

Kluczowymi parametrami, związanymi z poziomem generowanej przez moduł fotowoltaiczny mocy są: ilość docierającego do niego promieniowania słonecznego oraz temperatura jego powierzchni [5]. W przypadku badanego obiektu, wzrost temperatury modułu o 1°C powyżej poziomu 25°C powodował spadek generowanej mocy o 0,21% [8].

W tabeli 3.1 przedstawiono rzeczywisty rozkład natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię modułu. Zauważyć można, iż wraz ze zwiększaniem kąta nachylenia dachówki następował wzrost dysproporcji

w intensywności promieniowania docierającego do poszczególnych komórek modułu. Największa różnica w odnotowanych wartościach natężenia promieniowania wystąpiła w chwili zagięcia dachówki pod kątem 30° i wyniosła prawie 550 W/m^2 .

Tabela 3.1. Rozkład natężenia promieniowania słonecznego na powierzchni modułu fotowoltaicznego

Kąt zagięcia dachówki	Natężenie promieniowania słonecznego [W/m^2]										
	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
90°	778	783	795	802	822	815	811	806	799	821	817
60°	750	767	780	796	754	741	620	586	453	431	410
45°	775	781	795	805	828	812	603	452	358	253	248
30°	776	785	792	791	821	833	536	415	363	290	229

Rozkład temperatury na powierzchni badanego obiektu przedstawiono w tabeli 3.2. Doskonale widać, iż jej wartość ściśle zależy od ilości docierającego promieniowania, jednakże pod wpływem chłodzenia, wskutek wiejącego wiatru, może ulegać znacznemu obniżeniu [5].

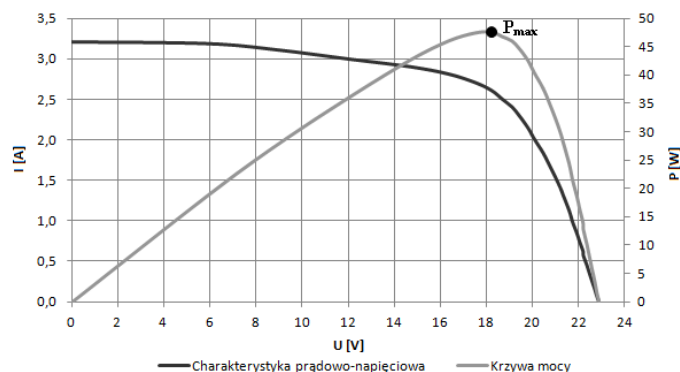
Tabela 3.2. Rozkład temperatury na powierzchni modułu fotowoltaicznego

Kąt zagięcia dachówki	Temperatura powierzchni modułu [$^\circ\text{C}$]										
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁
90°	27,9	27,2	27,6	27,7	29,3	29,0	28,1	27,9	26,8	27,2	27,1
60°	25,0	25,5	26,0	26,2	25,1	23,2	16,6	14,8	11,9	10,4	9,7
45°	24,5	24,5	25,8	25,9	26,0	23,6	20,0	15,1	14,4	14,2	13,0
30°	23,2	23,5	23,1	22,7	23,5	23,6	22,0	20,8	14,5	13,9	13,8

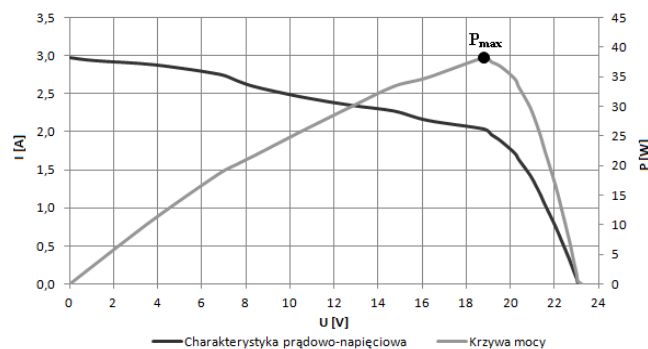
Ustawienie dachówki pionowo (90°) sprawiło, iż badany moduł pozbawiony był zagięć czy wypukłości, a jego powierzchnia oświetlana była równomiernie. Na podstawie otrzymanej charakterystyki prądowo-napięciowej oraz krzywej mocy (rys. 5), których wygląd zbliżony jest do teoretycznych, można stwierdzić, iż podczas badania moduł pracował bez zakłóceń. Maksymalna moc uzyskana podczas pracy przy docierającej średniej gęstości mocy promieniowania słonecznego równej $804,45 \text{ W/m}^2$ oraz średniej temperaturze ogniwi $27,8^\circ\text{C}$, wyniosła $47,61 \text{ W}$, co stanowi 70% wartości znamionowej.

Zagięcie dachówki pod kątem 60° spowodowało nierównomierny rozkład natężenia promieniowania padającego na jej powierzchnię. Do zagiętej części dachówki docierało o około 40% mniej energii promieniowania słonecznego. Skutki tego zjawiska znalazły swoje odzwierciedlenie na charakterystyce prądowo-napięciowej modułu zamieszczonej na rysunku 6, której kształt uległ

widocznemu pogorszeniu. Odnotowano niską wartość prądu w punkcie mocy maksymalnej i spadek prądu zwarcia poniżej 3 A, co w konsekwencji przyczyniło się do spadku mocy do poziomu 55% wartości znamionowej, tj. 38,16 W.

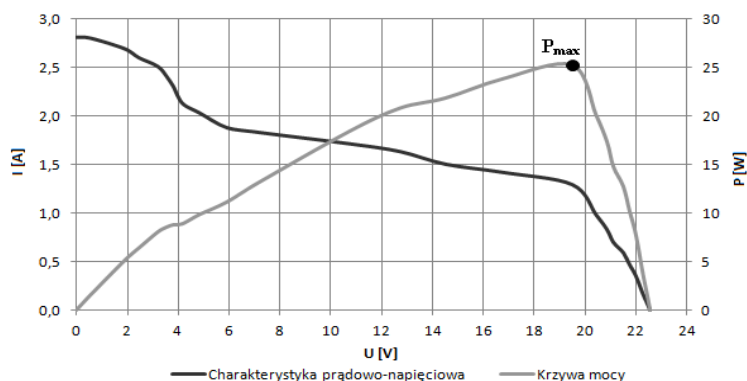


Rys. 5. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz krzywa mocy modułu zagiętego pod kątem 90°



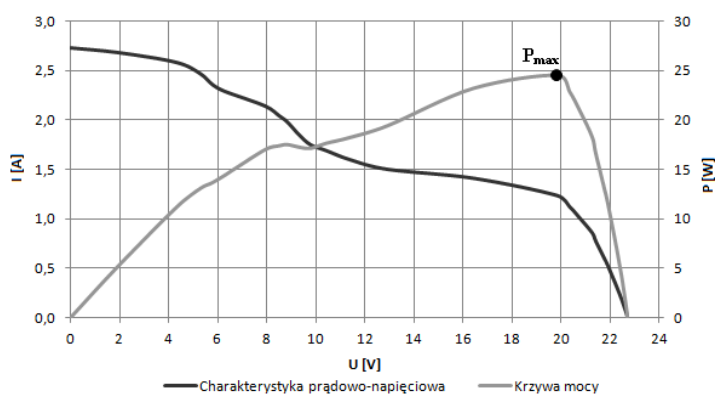
Rys. 6. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz krzywa mocy modułu zagiętego pod kątem 60°

Ugięcie dachówki pod kątem 45 stopni, podobnie jak w przypadku poprzednim spowodowało, iż poziom intensywności promieniowania słonecznego nie był równomierny na całej jej powierzchni. W konsekwencji moduł fotowoltaiczny pracował w sposób zbliżony do sytuacji, w której dochodzi do lokalnego zacinienia jego powierzchni. Obecność diod bocznikujących spowodowała odłączenie komórek, do których docierało najmniej promieniowania słonecznego, umożliwiając w ten sposób przepływ prądu z komórek solarnych pracujących prawidłowo. Pozwoliło to na ochronę modułu przed spadkiem mocy do wartości generowanej przez najsłabszą komórkę [4]. Skutki różnic w intensywności promieniowania oraz efekty zadziałania diod bocznikujących widoczne są zarówno na krzywej mocy jak i na charakterystyce prądowo-napięciowej w formie „schodków” (rys. 7).



Rys. 7. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz krzywa mocy modułu zagiętego pod kątem 45°

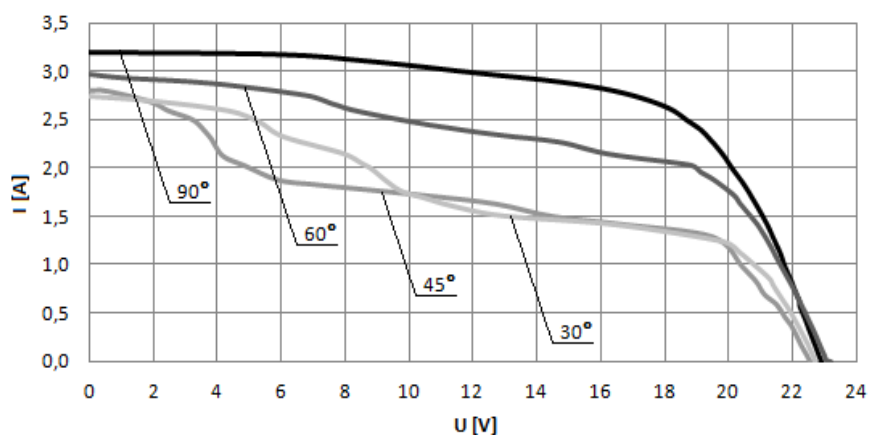
Ostatni etap badań, zakładający zagięcie dachówki względem podłoża pod kątem 30 stopni, spowodował największe spośród dotychczas zbadanych przypadków dysproporcje w rozkładzie natężenia promieniowania padającego na płaszczyznę modułu. Podobnie jak w przypadku zagięcia obiektu pod kątem 45 stopni otrzymana na podstawie pomiarów charakterystyka prądowo-napięciowa (rys. 8) posiada cechy krzywej modułu częściowo zacienionego. Widoczny jest znaczny spadek wartości prądu w punkcie mocy maksymalnej skutkujący wygenerowaniem zaledwie 36% mocy znamionowej modułu. Ponadto, ze względu na najmniejszą ilość promieniowania docierającego do modułu odnotowano najniższą spośród zmierzonych wartości prądu zwarcia równą 2,73 A.



Rys. 8. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz krzywa mocy modułu zagiętego pod kątem 30°

W celu podsumowania wykonanych badań, na rysunku 9 zaprezentowano charakterystyki prądowo-napięciowe wszystkich przebadanych wariantów. Ze-stawienie ich pozwoliło na wykazanie istnienia wpływu sposobu ukształtowania

dachówki na uzysk energii elektrycznej. Gięcie dachówki fotowoltaicznej, powodujące różnice w intensywności promieniowania docierającego do każdej z komórek modułu, przyczyniło się do znacznego obniżenia jego wydajności i konieczności zadziałania diod bocznikujących. Pomimo uzyskania w każdym z przypadków wartości prądu zwarcia na poziomie około 3 A, spadek prądu w punkcie mocy maksymalnej w chwili największego zagięcia dachówki spowodował obniżenie poziomu generowanej mocy o około 50%.



Rys. 9. Zestawienie charakterystyk prądowo-napięciowych

Informacje o podstawowych parametrach badanej dachówki fotowoltaicznej uzyskanych na podstawie badań zestawiono w tabeli 3.2 z danymi zamieszczonymi w karcie katalogowej przez producenta. Na ich podstawie można potwierdzić istnienie zależności między zmianą podstawowych parametrów pracy modułu, a sposobem jego usytuowania względem źródła promieniowania słonecznego.

Największy uzysk mocy odnotowano w przypadku usytuowania dachówki pionowo czyli, gdy do każdej komórki modułu docierało równomiernie promieniowanie słoneczne rzędu 800 W/m^2 . W prezentowanych przypadkach temperatura powierzchni modułu była najczęściej niższa od temperatury zakładanej przez standardowe warunki testowania tj. 25°C , a zatem nie wpływała negatywnie na wartość uzyskiwanej mocy [4].

Najmniejszą efektywność konwersji promieniowania słonecznego w energię elektryczną odnotowano w przypadkach ukształtowania dachówki pod kątem 45° oraz 30° . Sprawność wyniosła wtedy zaledwie 4,5% stanowiąc wartość znacznie niższą od zakładanej dla ogniów z krzemu amorficznego.

Tabela 3.3. Zestawienie wyników badań

Parametr	Dane producenta	Kąt gięcia dachówki			
		90°	60°	45°	30°
Napięcie obwodu otwartego U_{oc} [V]	23,10	22,91	22,68	22,57	22,68
Prąd zwarcia I_{sc} [A]	5,10	3,20	2,97	2,81	2,73
Napięcie w punkcie mocy maksymalnej U_{mpp} [V]	16,50	18,24	18,80	19,51	19,83
Prąd w punkcie mocy maksymalnej I_{mpp} [A]	4,13	2,61	2,03	1,29	1,24
Moc maksymalna P_{max} [W]	68,00	47,61	38,16	25,23	24,51
Współczynnik wypełnienia FF [-]	0,58	0,65	0,57	0,40	0,40
Sprawność η [%]	7,26	6,33	6,33	4,42	4,34
Temperatura powierzchni modułu $T_{modułu}$ [°C]	25	27,8	19,5	20,6	20,4
Natężenie promieniowania E [W/m ²]	1000	804	644	610	603

4. PODSUMOWANIE

Koncepcja fotowoltaiki zintegrowanej z budynkiem wpisuje się w trend poszukiwania innowacyjnych rozwiązań dla budownictwa niskoenergetycznego oraz dążenia do maksymalnego ograniczania energochłonności budynków już istniejących. Zastosowanie elementów BIPV może nieść za sobą wiele korzyści, począwszy od produkcji energii elektrycznej, poprzez pełnienie funkcji tradycyjnych materiałów budowlanych, a kończąc na wzbogacaniu estetyki projektowanych czy modernizowanych budynków.

Wytwarzanie zintegrowanych z budynkiem komponentów, przy użyciu cienkowarstwowych ogniw z krzemu amorficznego, pozwala na tworzenie struktur o niemalże nieograniczonych kształtach oraz rozmiarach. Ogniwa te, cechują się dużą elastycznością i w formie dachówki fotowoltaicznej doskonale nadają się do pokrywania powierzchni dachowych o nietypowych, również zaokrąglonych kształtach.

Analiza uzysków mocy, w zależności od sposobu ukształtowania wspomnianej dachówki fotowoltaicznej względem źródła promieniowania słonecznego wykazała, iż pomimo korzyści płynących z możliwości gięcia dachówki, a co za tym idzie łatwiejszego wkomponowania w architekturę budynku, nie każdy sposób jej montażu wpływa korzystnie na proces wytwarzania energii elektrycznej.

Wkomponowując elementy BIPV w strukturę budynku, oprócz uwzględnienia czynników estetycznych, należy dążyć do zapewnienia ich optymalnej ekspozycji względem słońca. Badania wykazały bowiem, że w przypadku występowania dużych dysproporcji w intensywności promieniowania docierającego do poszczególnych ogniw, moduł pracuje w sposób porównywalny do występowania lokalnego zacienienia instalacji generując znacznie mniej energii elektrycznej.

Reasumując, aby zastosowanie technologii BIPV w formie pokrycia dachowego było efektywne i uzasadnione, wymagana jest współpraca specjalistów z wielu dziedzin. Na etapie projektowania konieczne jest uwzględnienie czynników wpływających na efektywność instalacji takich jak technologia fotowoltaiczna, konstrukcja i estetyka budynku, koszty instalacji oraz lokalizacja, gdyż tylko odpowiednie ich zbilansowanie pozwoli na uzyskanie oczekiwanych efektów.

LITERATURA

- [1] Karaś A., Fotowoltaika zintegrowana z budynkiem, *Czysta Energia* 2014, nr 4, str. 30-32.
- [2] Moyra T., Panua R., *Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system*. Solar energy., Lambert Academic Publishing GmbH &Co., Saarbrücken 2012.
- [3] Pietruszko S., Fotowoltaika zintegrowana z budownictwem (BIPV). Materiał z konferencji: VI Forum Operatorów Systemów i Odbiorców Energii i Paliw „Bezpieczeństwo energetyczne a nowe kierunki wytwarzania i wykorzystania energii w Warszawie”, Warszawa 2009.
- [4] Sarniak M. T., *Podstawy fotowoltaiki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [5] Szymański B., *Instalacje fotowoltaiczne*, Wydanie IV, GEOSYSTEM, Redakcja GLOBEnergia, Kraków 2015.
- [6] Broszura informacyjna solarnej membrany dachowej EVALON Solar, http://www.cythelia.fr/images/file/membranes/Brochure_evalon-solar_en.pdf, dostęp 02.12.2015r.
- [7] Fotografia – przykład zastosowania dachówki fotowoltaicznej, http://dachyb2b.pl/images/stories/22791:1_TEGOSOLAR.JPG, dostęp 22.11.2015r.
- [8] Karta katalogowa dachówki fotowoltaicznej TEGOSOLAR, <http://www.tegola.cz/download.php?idx=1004>, dostęp 20.11.2015r.

ANALYSIS OF THE IMPACT THE SHAPE OF FLEXIBLE PHOTOVOLTAIC ROOF TILE ON THE ELECTRICAL ENERGY YIELD

This paper is concerned with building integrated photovoltaics (BIPV), and in particular the potential benefits arising from the use of this technology. Furthermore, presented possibilities of incorporating BIPV elements in the structure of the building, with particular emphasis on photovoltaic roof coverings. In order to determine the legitimacy

of using this kind of technology, in real conditions were analyzed the thin-film photovoltaic module which is an integral part of a photovoltaic roof tiles. During the study, particular attention was paid to changes in the parameters of the object, depending on shaping it relative to the radiation source, thus demonstrating the need of endeavor to optimal exposure of BIPV elements relative to the sun.

(Received: 30. 01. 2016, revised: 4. 03. 2016)