

Jacek FAL, Wiesław STĘPIEŃ, Marian CHOLEWA
POLITECHNIKA RZESZOWSKA, WYDZIAŁ MATEMATYKI I FIZYKI STOSOWANEJ,
Aleja Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

Instalacja fotowoltaiczna z wykorzystaniem najnowszej technologii PV

Mgr inż. Jacek FAL

Absolwent Wydziału Matematyki i Fizyki Stosowanej Politechniki Rzeszowskiej. Od marca 2012 roku zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Fizyki Politechniki Rzeszowskiej. Zainteresowania: odnawialne źródła energii ze szczególnym uwzględnieniem fotowoltaiki.



e-mail: jacekfal@prz.edu.pl

Dr Wiesław STĘPIEŃ

Wieloletni pracownik Katedry Fizyki Politechniki Rzeszowskiej, obecnie zatrudniony na stanowisku adiunkta. Główne zainteresowania to odnawialne źródła energii ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji systemów fotowoltaicznych i hybrydowych oraz zagadnienia termogeneracji.



e-mail: step@prz.edu.pl

Dr hab. Marian CHOLEWA

Absolwent Uniwersytetu Jagiellońskiego, pracownik wielu instytucji naukowych w kraju i zagranicą, od 2011 zatrudniony w Katedrze Fizyki Politechniki Rzeszowskiej na stanowisku profesora. Zainteresowania: badania nanomateriałów odnawialne źródła energii z szczególnym uwzględnieniem fotowoltaiki, transfer nauki do przemysłu.



e-mail: mcholewa@prz.edu.pl

1. Wstęp

Promieniowanie słoneczne jest czystym i nieograniczonym źródłem energii. Jego zasoby i potencjalne możliwości wykorzystania są szeroko badane w wielu sektorach gospodarki i nauki [1-7]. Zasoby energii słonecznej w Europie są bardzo zróżnicowane i zmieniają się w zależności od szerokości geograficznej i pory roku. Całkowita energia promieniowania na powierzchnię płaską dla krajów Europejskich waha się od 200 do 2000 [kWh/m²]. Najlepsze pod tym względem warunki mają kraje położone w południowej Europie, co czyni te rejony najbardziej korzystnymi pod względem potencjalnych zysków z instalacji fotowoltaicznych [3].

Do niedawna energię promieniowania słonecznego wykorzystywano głównie do ogrzewania budynków i przygotowania ciepłej wody użytkowej, ale wraz z rozwojem już istniejących technologii fotowoltaicznych jak i pojawiającymi się nowymi rozwiązaniami w tej dziedzinie, ceny podzespołów do budowy systemów fotowoltaicznych systematycznie spadają, czyniąc tym samym konwersję promieniowania słonecznego na energię elektryczną coraz bardziej opłacalną i ekonomicznie uzasadnioną. Wydaje się to również dobry krok w kierunku zastąpienia konwencjonalnych źródeł energii i poprawy efektywności energetycznej budynków.

Pierwszym zastosowaniem dla paneli słonecznych był ich montaż na dachach lub elewacjach już istniejących budynków, co często w znacznym stopniu pogarszało walory estetyczne budowli. Z czasem stwierdzono, że bardziej opłacalna będzie integracja fotowoltaiki ze strukturą budynku już na etapie jego budowy [8]. Rozwiązanie to jest oparte na prefabrykacji elementów fotowoltaicznych w taki sposób by mogły one zastąpić tradycyjne materiały budowlane i wykończeniowe takie jak pokrycia dachowe, systemy elewacji czy nawet okna [8]. Koncepcja ta została nazwana Budownictwem Zintegrowanym z Fotowoltaiką (Building Integrated Photovoltaics – BIPV).

Technologie BIPV dają szerokie możliwości w projektowaniu nowych i ciekawych rozwiązań architektonicznych czy nawet modernizacji już istniejących obiektów, przy zachowaniu ich funkcjonalności czy atrakcyjnego architektonicznie wyglądu. Pierwszy budynek wykonany w technologii BIPV został zbudowany w 1991 roku w Aachen w Niemczech [9]. Od tego czasu rozwiązania BIPV stają się coraz popularniejsze i chętniej stosowane przez architektów.

W pracy przedstawiono projekt instalacji PV, który ma na celu poprawę efektywności energetycznej istniejącego już budynku, przy jednoczesnym zachowaniu jego funkcjonalności i estetycznego wyglądu wykorzystując w tym celu technologie budownictwa zintegrowanego z fotowoltaiką BIPV.

2. Zasoby energii słonecznej w Rzeszowie

Rzeszów jest stolicą Podkarpacia, które znajduje się w południowej części Polski. Lokalizację Rzeszowa pokazano na rysunku 1. Rysunek ten przedstawia również rozkład rocznej sumy

Streszczenie

Praca przedstawia projekt instalacji fotowoltaicznej, w skład której wchodzi technologie barwnikowych ogniw organicznych DSSC oraz krzemowe, wysokowydajne ogniwa typu back-contact. Oba rozwiązania opisano i scharakteryzowano ich zalety oraz wady. Projekt swym zasięgiem obejmuje południowo-wschodnią część budynku „K” Politechniki Rzeszowskiej. W pracy przedstawiono również krótką charakterystykę warunków solarnych Rzeszowa na podstawie danych meteorologicznych ze stacji Rzeszów-Jasionka. Korzystając z oprogramowania PVSOL przeprowadzono symulację systemu pod kątem potencjalnych zysków energii, które porównano z aktualnymi potrzebami energetycznymi budynku.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, fotowoltaika zintegrowana z budownictwem (BIPV), barwnikowe ogniwa słoneczne (DSSC), tylny kontakt.

Photovoltaic installation based on most modern PV technology

Abstract

The paper presents the design of photovoltaic installation, which covers the south-eastern part of the building "K" of Rzeszów University of Technology. In this building there are rooms of the Department of Physics, being the initiator of the project. This work describes the Polish solar conditions, in particular Subcarpathian (Fig. 1) [3, 4, 11]. In the following characterizes key assumptions the design. There is described the principle of operation of photovoltaic technologies used with the advantages and disadvantages of each of them [15]. The basic parameters of the cells used in the project, together with the Energy Management System are characterized [13]. The paper presents design solutions fixing installations and drawings showing the appearance of the facade covered by installing a PV system (Figs. 4-9). Using the software PVSOL Valentin, the authors performed a simulation of the designed system for potential energy yields and estimated the theoretical efficiency of the installation for the parameters assumed in the project. The results are presented in the form of graphs and compared with the current energy needs of the building (Figs.10-11). Based on the obtained results, it was found that the designed system would only cover about 10% of the building electricity.

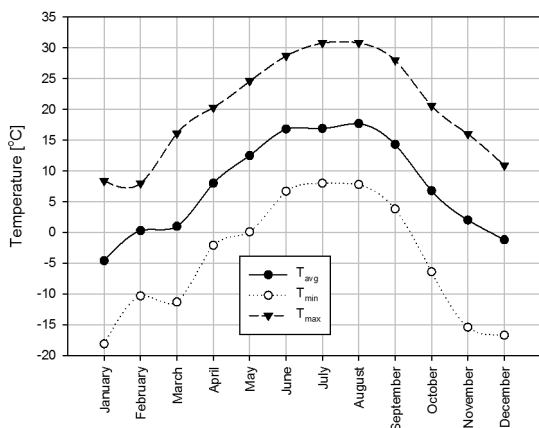
Keywords: photovoltaics, BIPV, solar energy, dye-sensitized solar cell, back-contact.

całkowitego promieniowania dla Polski. Na nasłonecznienie poszczególnych regionów wpływają zmiany pór roku i położenie geograficzne. Dla obszaru Polski wartości te zmieniają się w zakresie od 1000 o 1150kWh/m² w zależności od powyższych warunków. I tak dla terenów południowych mamy największe sumy promieniowania w okresie lata [4].



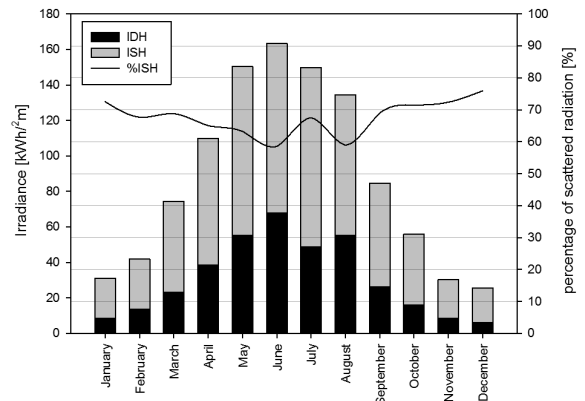
Rys. 1. Roczna suma promieniowania całkowitego dla Polski [4]
 Fig. 1. Yearly sum of global irradiation for Poland [4]

Terem Podkarpacia charakteryzuje się zmiennymi warunkami atmosferycznymi. Średnie miesięczne temperatury powietrza zmieniają się w zakresie od -5°C w zimie do 18°C w lecie. Natomiast minimalne i maksymalne temperatury bywają jeszcze bardziej rozbieżne. Na podstawie typowych lat meteorologicznych [10] minimalna temperatura w Rzeszowie wynosiła -18°C w zimie i 32°C w lecie. Zmiany temperatur zostały pokazane na rysunku 2.



Rys. 2. Zmiany temperatury w ciągu roku w Rzeszowie
 Fig. 2. Temperature changes during the year in Rzeszów

Z powodu położenia geograficznego Podkarpacia, zmiany intensywności promieniowania słonecznego dla Rzeszowa w ciągu roku również są duże, co przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zmiany intensywności promieniowania słonecznego w ciągu roku w Rzeszowie
 Fig. 3. Changes in the intensity of solar radiation in Rzeszów

Rysunek ten przedstawia również podział promieniowania słonecznego na bezpośrednie i rozproszone. Z powodu częstego zachmurzenia południowej Polski znaczną część promieniowania całkowitego stanowi promieniowanie rozproszone, którego udział w zależności od pory roku zmienia się od ok 58% w lecie do nawet 76% w zimie [10, 11]. Linia ciągła na wykresie przedstawia zmiany udział promieniowania rozproszonego w całkowitym. Średnie roczne nasłonecznienie na powierzchnię płaską dla Rzeszowa wynosi około 1051 kWh/m², co jest dobrym wynikiem na tle innych rejonów Polski.

3. Charakterystyka systemu PV

Instalacja fotowoltaiczna o mocy około 20kW_p zaprojektowana dla budynku K Politechniki Rzeszowskiej będzie pierwszym system w Polsce i Europie wykorzystujący ogniwa DSSC. Instalacja została zaprojektowana na południowej i wschodniej stronie budynku K, który jest siedzibą Wydziału Matematyki i Fizyki Stosowanej Politechniki Rzeszowskiej. Budynek ten wybrano z powodu jego korzystnej geometrii i najkorzystniejszej lokalizacji geograficznej. Jedną z największych elewacji budynku jest skierowana w stronę południową i nie jest ona zacieniana przez inne obiekty, co mogłoby być kłopotem w przypadku innych budynków kampus Politechniki Rzeszowskiej. Panele zainstalowane na południowej elewacji zamontowane będą pod kątem 32°, co pozwoli na uzyskanie maksymalnych uzysków energii w ciągu roku. Z powodu już istniejącego wyposażenia innego laboratorium, zamontowanego na południowej ścianie, część paneli zaprojektowano na ścianie wschodniej, która również przez długi okres dnia nie jest zacieniona.

Celem projektu nie jest tylko uzyskanie wysokiej wydajności systemu, ale również uzyskanie estetycznego połączenia instalacji PV z obecną bryłą budynku. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono obecny wygląd południowej i wschodniej elewacji budynku [12].

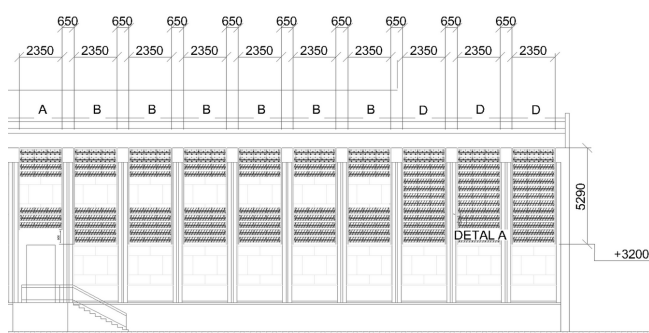


Rys. 4. Południowa strona budynku K
 Fig. 4. South side of building K

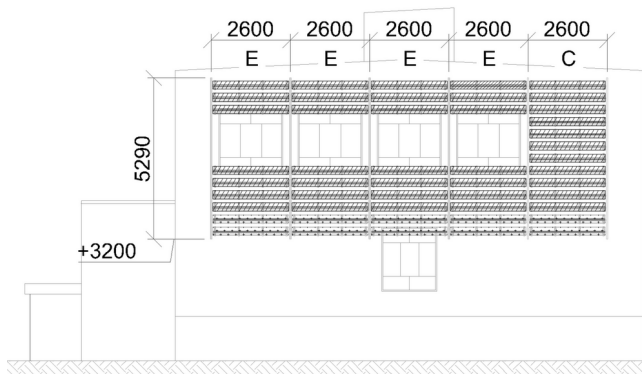


Rys. 5. Wschodnia strona budynku K
Fig. 5. East side of building K

Projektowana instalacja fotowoltaiczna składa się z dwóch różnych technologii. Pierwszą z nich są wysoko wydajne ogniwa krzemowe typu back-contact. Sprawność tych ogniw jest znacznie wyższa w porównaniu do standardowych ogniw. Podwyższoną wydajność uzyskano poprzez zwiększenie powierzchni aktywnej ogniwa. Efekt ten uzyskano przez przeniesienie wszystkich kontaktów na tylną stronę ogniwa. Wydajność ogniw bac-contact zależy od użytej technologii i przekracza 18%. Technologia back-contact pozwoli osiągnąć $180\text{W}_p/\text{m}^2$ powierzchni aktywnej. Całkowita powierzchnia paneli krzemowych w instalacji wynosi około 106m^2 , co dostarczy około 19kW_p mocy zainstalowanej. Drugą zastosowaną technologią są barwnikowe ogniwa organiczne nazywane w skrócie DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell). Technologia ta obecnie jest jedną z intensywniej badanych i rozwijanych zarówno przez ośrodki akademickie jak i przemysłowe, jako obiecujące źródło energii elektrycznej, przy stosunkowo niskich kosztach i wysokiej sprawności [13]. Głównym składnikiem ogniwa DSSC jest dwutlenek tytanu (TiO_2). Zasada działania ogniwa DSSC została opisana po raz pierwszy przez Michaela Grätzela [14]. Dodatkową zaletą ogniw barwnikowych jest ich wysoka absorpcja promieniowania rozproszonego, co oznacza, że w odróżnieniu od innych technologii PV wydajność ogniw DSSC nie zależy od kąta padania promieniowania słonecznego. W warunkach polskich jest to bardzo pożądana cecha. Całkowita powierzchnia ogniw organicznych zastosowanych w projekcie wyniesie około 23m^2 , co przy mocy $60\text{W}_p/\text{m}^2$ pozwoli osiągnąć około $1,4\text{kW}_p$ mocy zainstalowanej. Oba typy ogniw zostały zaprojektowane w formie żaluzji zbudowanych z szklanych lamel. Lamle te zawierają kombinację połączonych szeregowo-równoległe ogniw. Wierzchnią warstwę każdej z lamel stanowi szkło TCO. Konstrukcja żaluzji jest wykonana z aluminium i przymocowana do ściany nośnej budynku w sposób zapewniający stabilne mocowanie przy minimalnej ingerencji w osłonę termiczną obiektu. Od strony południowej szerokość żaluzji została dopasowana do rozstawu wystających słupów żelbetowych. Dzięki temu całość konstrukcji zgrabnie komponuje się z bryłą budynku. Koncepcję fasady południowej i wschodniej budynku przedstawiono odpowiednio na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Rozkład modułów PV na południowej ścianie
Fig. 6. Distribution on PV modules on the south wall

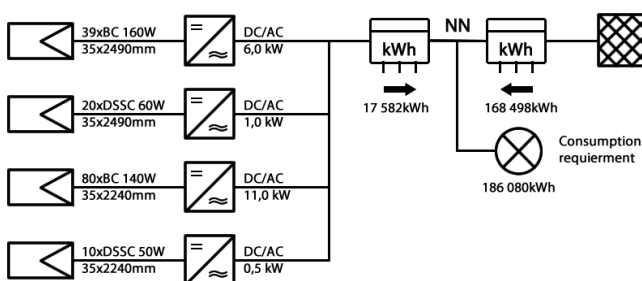


Rys. 7. Rozkład modułów PV na wschodniej ścianie
Fig. 7. Distribution on PV modules on the east wall

Konstrukcja żaluzji zapewnia możliwość zmiany kąta pochylenia lamel co 9° . Pozwoli to na odpowiednie dostosowanie położenia paneli fotowoltaicznych do pory roku, co z kolei korzystnie wpłynie na zyski energii w ciągu roku.

Cała instalacja wyposażona jest w automatyczny system odładczenia, który został opatentowany przez firmę ML System [19]. Rozwiązanie to polega na wprowadzeniu w strukturę panelu PV dodatkowej warstwy o odpowiedniej rezystancji, by przy niewielkim zużyciu energii podnieść temperaturę modułu do kilkunastu stopni powyżej zera. Wykorzystanie automatycznego systemu odładczenia pozwoli zredukować koszty eksploatacji systemu PV ponoszone na zimowe czynności konserwacyjne. Dodatkowo korzystnie wpłynie to na uzyski energii w okresie zimowym.

Projekt zakłada cztery podsystemy, po dwa na każdą elewację. Podział ten jest konieczny ze względu na zastosowanie dwóch różnych technologii i montaż na dwóch różnych stronach budynku. I tak od strony południowej panele DSSC będą podłączone poprzez skrzynki połączeniowe do jednego inwertera a panele typu back-contact tym samym sposobem do drugiego inwertera. Analogiczna sytuacja jest dla elewacji wschodniej. Projektowana instalacja podłączona będzie do sieci niskiego napięcia budynku. Ideowy schemat połączeń instalacji wraz z wymiarami i ilością modułów przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat blokowy systemu PV
Fig. 8. Block diagram of the PV system

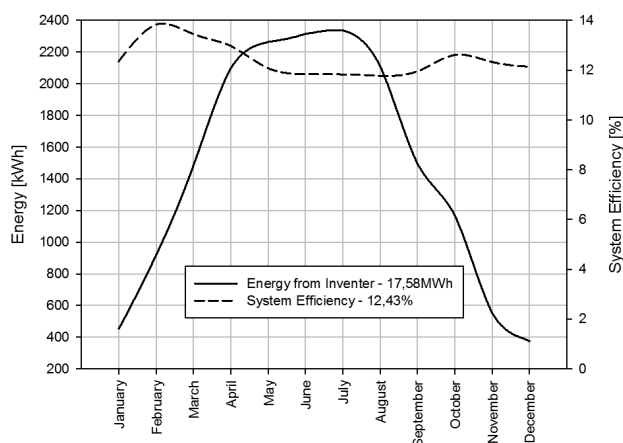
Sercem całego systemu będzie Zintegrowany System Zarządzania Energią (ZSZE), obsługiwany przez stację operatorską pozwalającą na sterowanie pracą całego systemu jak i na podgląd aktualnego stanu pracy instalacji, włączając w to zarówno osiągi jak i alerty o błędach.

4. Symulacja zysków energii

Uzyski energii dla projektowanego systemu PV oszacowano przy pomocy oprogramowania PV SOL firmy Valentine Energy Software, które jest jednym z popularniejszych narzędzi do projektowania instalacji PV. Oprogramowanie to zawiera szerokie bazy danych klimatycznych całego świata jak i obszerne bazy paneli fotowoltaicznych oraz inwerterów, które są na bieżąco aktualizowane. PV SOL jest specjalistycznym narzędziem do

szczegółowego modelowania instalacji PV. Program pozwala na sprawdzenie wielu wariantów instalacji w krótkim czasie. Dodatkowo daje możliwość przeprowadzenia analizy ekonomicznej projektowanego systemu. W celu przeprowadzenia symulacji, użytkownik musi wprowadzić szereg szczegółowych danych dotyczących zarówno lokalizacji systemu jak i komponentów wykorzystanych do jego budowy.

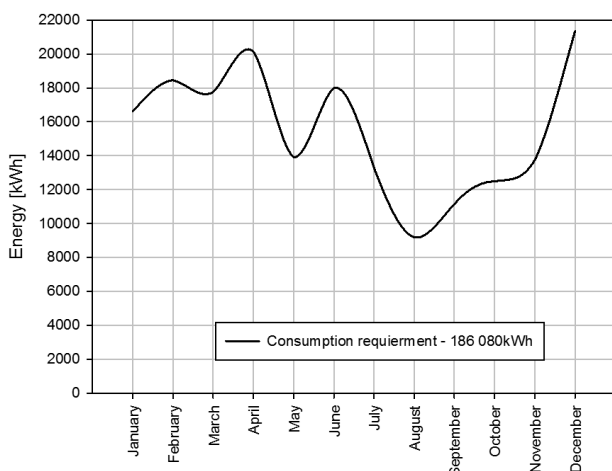
Wykorzystując oprogramowanie PV SOL oszacowano roczną produkcję energii na poziomie 17,6MWh. Zyski energii dla poszczególnych miesięcy przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Miesięczna produkcja energii i sprawność systemu
Fig. 9. Monthly electricity production and the system efficiency

Jak się można było spodziewać największa produkcja energii występuje w okresie lata, co pokrywa się z rozkładem natężenia promieniowania w ciągu roku przedstawionym na rysunku 3. Średnią roczną sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną oszacowano na 12,43%.

W 2012 roku zapotrzebowanie na energię elektryczną dla budynku K na podstawie rachunków wyniosło 186080 kWh. Rozkład zużycia energii w ciągu roku przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Miesięczne zużycie energii elektrycznej w budynku K
Fig. 10. Monthly electricity consumption of building K

Porównując profil zużycia energii elektrycznej w budynku i szacowane zyski energii (rysunki 9 i 10) z łatwością można stwierdzić, iż zapotrzebowanie na energię elektryczną znacznie przewyższa ilość energii dostarczanej przez instalację fotowoltaiczną, więc całość energii produkowanej przez generator PV będzie wykorzystywana na bieżące potrzeby.

5. Podsumowanie

Projekt systemu fotowoltaicznego dla budynku K Politechniki Rzeszowskiej zakłada wykorzystanie dwóch nowoczesnych technologii fotowoltaicznych, których łączna moc wynosi około 20kWp. Pomimo zastosowania wysokowydajnych ogniw krzemowych system ten pokryje jedynie około 10% aktualnego zapotrzebowania na energię elektryczną budynku, co nieznacznie obniży koszty jego eksploatacji. By w znaczącym stopniu zwiększyć efektywność energetyczną obiektu, okazuje się że konieczne byłoby rozbudowanie instalacji na pozostałą część elewacji południowej, co jest możliwe dzięki przyjętemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu, które może bez przeszkód zostać nazwane modułowym. Pomimo stosunkowo niewielkiej poprawy sprawności energetycznej budynku, projekt ten jest dobrym krokiem w kierunku zwiększenia efektywności energetycznej siedziby Wydziału Matematyki i Fizyki Stosowanej Politechniki Rzeszowskiej.

6. Literatura

- [1] Li Z.S., Zang G.Q., Li D.M., Zhou J., Li L.J., Li L.X.: Application and development of solar energy in building industry and its prospects in China. *Energy Policy*, vol. 35, s. 4121-4127, 2007.
- [2] Šuri M., Huld T. A., Dunlop E. D., Ossenbrink H. A.: Potential of solar electricity generation in the european union member states and candidate countries. *Solar Energy*, vol. 81, s. 1295-1305, 2007.
- [3] Pietruszko S. M.: The status and prospects of photovoltaics in Poland. *Renewable Energy*, vol. 16, s. 1210-1215, 1999.
- [4] Thirugnanasambandam M., Iniyar S., Goic R.: A review of solar thermal technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, s. 312-322, 2010.
- [5] Garcia-Rodriguez L., Gómez-Camacho C.: Conditions for economical benefits of the use of solar energy in multi-stage flash distillation. *Desalination*, vol. 125, s. 133-138, 1999.
- [6] Ridao Á. R., García E. H., Escobar B. M., Toro M. Z.: Solar energy in andalusia (spain): present state and prospects for the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, s. 148-161, 2007.
- [7] García J. O., Gago E. J., Bayo J. A., Montes G. M.: The use of solar energy in the buildings construction sector in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, s. 2166-2178, 2007.
- [8] Jelle B. P., Breivik C.: State-of-the-art building integrated photovoltaics. *Energy Procedia*, vol. 20, s. 68-77, 2012.
- [9] Benemann J., Chehab O., Schaar-Gabriel E.: Building-integrated pv modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, s. 345-354, 2001.
- [10] Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, <http://www.transport.gov.pl/2-48203f1e24e2f-1787735.html>, dostęp: maj 2013.
- [11] Podogrocki J.: Warunki klimatyczne i meteorologiczne do wykorzystania energii promieniowania słonecznego w warunkach polski. Materiały konferencyjne: Netmark Dom Ekologiczny, Warszawa, 1998.
- [12] Fal J., Łabaj A., Okarmus P., Innuls Sp z o.o.: Studium wykonalności dla projektu: Instalacja Systemu wykorzystującego odnawialne źródła energii w budynku "K" Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów, 2012.
- [13] Flores I. C., de Freitas J. N., Longo C., De Paoli M. A., Winnischofer H., Nogueira A. F.: Dye-sensitized solar cells based on TiO₂ nanotubes and a solid-state electrolyte. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 189, s. 153-160, 2007.
- [14] Grätzel M.: Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 4, s. 145-153, 2003.
- [15] Patent: System paneli grzewczo-fotowoltaicznych, ML System, Rzeszów, 2012.

otrzymano / received: 23.07.2013

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2013

artykuł recenzowany / revised paper