

dr inż. arch. Janusz Marchwiński*



Aspekt termiczny wykorzystania modułów fotowoltaicznych w architekturze

Thermal aspect of photovoltaic modules application in architecture

Moduły fotowoltaiczne (PV) umożliwiają przemianę energii słonecznej w energię elektryczną. Mniej znaną stroną wykorzystania modułów PV stanowi ich aspekt termiczny. Ze względu na istotę działania modułów PV często jest on pomijany lub niedoceniany, tymczasem energia termiczna powstaje przy konwersji fotowoltaicznej jako jej efekt uboczny.

W artykule opisano sposoby wykorzystania energii cieplnej w budynkach z systemami fotowoltaicznymi. W aspekt termiczny wpisuje się również zastosowanie modułów PV jako elementów ochrony przeciwsłonecznej, zapobiegających przegrzewaniu pomieszczeń.

Moduły hybrydowe

Aspekt termiczny wykorzystania modułów PV jest ściśle związany i najpowszechniej kojarzony z tzw. modułami hybrydowymi nazywanymi modułami PV/T (photovoltaic-thermal). Ich działanie polega na konwersji fotowoltaicznej i fototermicznej, tzn. poza wytwarzaniem energii elektrycznej, urządzenia umożliwiają generowanie energii cieplnej. Moc cieplna uzyskiwana przez moduły PV/T jest średnio ok. 5-krotnie większa od mocy elektrycznej. Ze względu na czynnik grzewczy wyróżnia się, podobnie jak w przypadku tradycyjnych kolektorów termicznych, moduły powietrzne i cieczowe. W modułach racjonalne jest stosowanie ogniw PV z krzemu amorficznego ze względu na dodatni współczynnik zmiany sprawności ogniwa PV wraz z przyrostem temperatury (jest to wyjątkowa cecha tych ogniw, gdyż sprawność pozostających, w tym najliczniej produkowanych

i stosowanych w budownictwie ogniw z krzemu krystalicznego, maleje wraz ze wzrostem ich temperatury). Ogniwa z krzemu amorficznego charakteryzują się jednak relatywnie małą sprawnością i niestabilnością parametrów elektrycznych w czasie, co prowadzi do zmniejszenia sprawności całego systemu PV [1].

Moduły hybrydowe ze względu na swoją budowę cechują się małą adaptacyjnością w przypadku możliwości integracji z architekturą budynku. W związku z tym zazwyczaj są montowane na dachu ze względu na korzystne warunki insolacyjne. Nie wpływają bezpośrednio na środowisko termiczne przestrzeni wewnętrznej. Ze względów architektonicznych ciekawsza wydaje się aplikacja modułów PV jako komponentu budowlanego, zintegrowanego z obudową budynku. Ich rolę, w aspekcie termicznym, należy rozpatrywać jako:

- elementów pasywnego ogrzewania i chłodzenia konwekcyjnego;
- elementów ochrony przeciwsłonecznej.

Moduły PV jako elementy pasywnego ogrzewania i chłodzenia konwekcyjnego

Sprawność najbardziej popularnych modułów, tj. zbudowanych z ogniw PV z krzemu krystalicznego, zmniejsza się o 0,5% na 1°C przyrostu temperatury. W związku z tym zasadne jest chłodzenie ich powierzchni. W przypadku modułów PV wolno stojących lub niezintegrowanych z przegrodami budynku, naturalnym czynnikiem chłodzącym może być wiatr. Sposoby aplikacji modułów PV przedstawiono w tabeli. Zaprezentowane sposoby nie pozwalają jednak na wykorzystanie ciepła emitowanego przez moduły PV do celów użytkowych, tj. bezpośredniego

Zależność pomiędzy sprawnością pracy modułów PV a temperaturą modułów PV [2]

Sposób zamontowania modułów PV	Temperatura [°C]	Spadek wydajności energetycznej [%]
Zintegrowane z fasadą bez wentylacji	55	8,9
Zintegrowane z dachem (bez wentylacji)	43	5,4
Zintegrowane z fasadą ze słabą wentylacją	39	4,8
Zintegrowane z dachem ze słabą wentylacją	35	3,9
Zintegrowane z fasadą z silną wentylacją	32	2,6
Zintegrowane z dachem z silną wentylacją	29	2,1
Na dachu, niezintegrowane z budynkiem	28	1,8
Wolno stojące	22	0,0

kształtowania środowiska termicznego budynku. Takie możliwości daje integracja modułów PV ze strukturami, których cechy predestynują je do roli pasywnych kolektorów ciepła lub tzw. płuc budynku. Należą do nich **ściany kolektorowe, podwójne elewacje szklane** (stanowiące specyficzną odmianę tych pierwszych) oraz różnorodne **wieloprzestrzenne struktury szklane**. W związku z tym, że moduły PV emitują energię termiczną, możliwe jest pozyskiwanie ciepła, które może być wykorzystywane do ogrzewania pomieszczeń oraz chłodzenia przez wzmaganie naturalnej wentylacji wyporowej.

W zależności od potrzeb, podgrzane powietrze wykorzystywane jest do ogrzewania pomieszczeń albo wyprowadzane na zewnątrz, wzmagając wentylację wyporową. Stymulacja wentylacji wyporowej przez moduły PV po-

* Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie, Wydział Architektury

lega na potęgowaniu efektu kominowego, który powstaje wskutek unoszenia się podgrzanych mas powietrza. Pozwala to na zasysanie świeżego powietrza schłodzonego, które za sprawą emisji ciepła z powierzchni modułów ulega ogrzaniu, dzięki czemu proces powtarza się cyklicznie.

Przykładem zastosowania modułów PV jako elementu ściany kolektorowej jest **budynek biurowy INETI's Renewable Energy Department w Lizbonie** (arch. Pedro Carbito, Isabel Diniz, 2005). Okładzinowe moduły PV przylegające do pionowej ściany elewacyjnej zajmują pionowe pasy międzyokienne. Moduły PV wprężnięto w koncepcję bezpośredniego ogrzewania przyległych pomieszczeń. Zasada działania jest bardzo prosta i analogiczna do działania ściennych kolektorów powietrznych. Zimą ciepło gromadzone na tylnej powierzchni modułów jest odzyskiwane i za pomocą kanałów, znajdujących się pomiędzy modułem PV a pomieszczeniem, przesyłane do wnętrza budynku. Kanały wentylacyjne znajdują się w dolnej i górnej partii pomieszczenia. Przez odpowiednie zamykanie i otwieranie kanałów możliwe jest pasywne ogrzewanie pomieszczeń, jak również chłodzenie, dzięki wyprowadzaniu zużytego ciepłego powietrza na zewnątrz (rysunek).

Pokrewna koncepcja wykorzystania modułów PV do ogrzewania powietrza wiąże się z ich stosowaniem w obrębie szklanych ścian dwupowłokowych (podwójnych elewacji szklanych). Moduły PV umieszczane są w zewnętrznej płaszczyźnie szklanej ściany. Ciepło z wewnętrznej płaszczyzny modułu jest

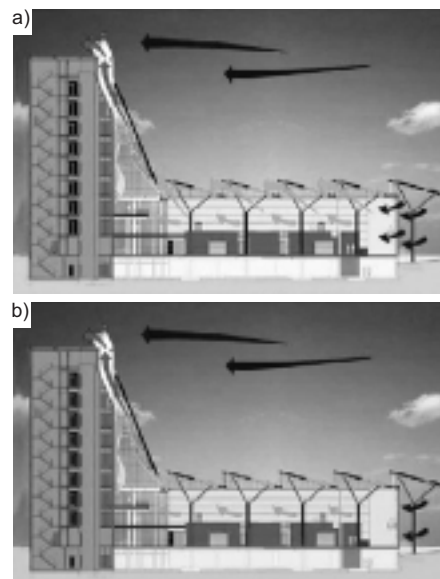
przekazywane do przestrzeni międzypowłokowej, w której cyркуluje powietrze i je podgrzewa. W wyniku tego cyrkulacja powietrza ulega zwiększeniu, co przyczynia się do wzrostu efektywności działania podwójnej ściany, jako przestrzeni wentylacyjnej. Podczas naturalnego chłodzenia pomieszczeń ma to znaczenie w przypadku tzw. elewacji wywiewnych, gdzie silnie cyркуlujące powietrze sprzyja wyprowadzaniu (zasysaniu) zużytego powietrza z przestrzeni użytkowych znajdujących się przy elewacji.

W okresie grzewczym podgrzane powietrze może zasilać system ogrzewania budynku. W przypadku korzystnych warunków zewnętrznych (odpowiednia temperatura i wiatr) powietrze unosi się samoczynnie – wykorzystuje się naturalną wentylację wyporową opartą na efekcie kominowym. W innych przypadkach przepływ powietrza odbywa się w sposób wymuszony, głównie przy użyciu wentylatorów stymulujących jego ruch.

Nieco inna jest strategia wykorzystania energii termicznej powietrza w pustce międzypowłokowej w okresie letnim. Przy naturalnej wentylacji powietrze wyprowadzane jest na zewnątrz, przyczyniając się jedynie do wzmagania efektu kominowego. Wentylacja mechaniczna z kolei umożliwia skierowanie ciepłego strumienia powietrza do urządzeń grzewczo-klimatyzacyjnych (HVAC) i odzysk ciepła w rekupektorach. Zimą, bez względu na rodzaj wentylacji, ciepło jest odzyskiwane. W okresie tym górne otwory cyrkulacyjne pozostają zamknięte, a przestrzeń międzypowłokowa z ogrzonym powietrzem stanowi rodzaj kurtyny powietrz-

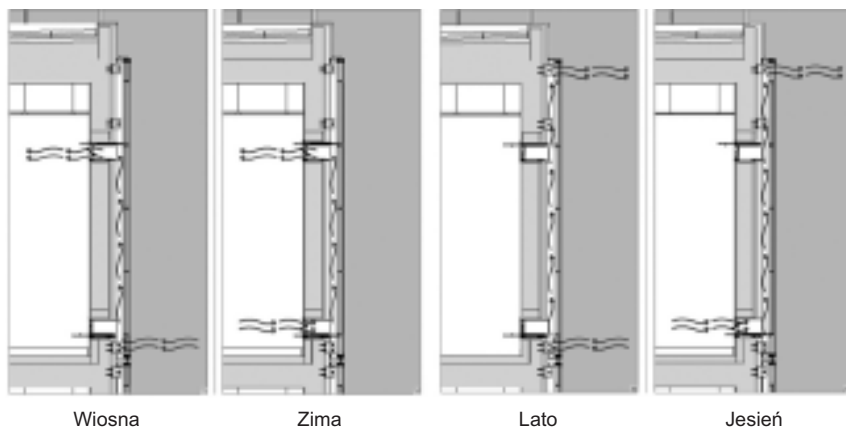
nej zmniejszającej straty ciepła budynku [4]. Rozwiązanie takie wprowadzono w **budynku biblioteki publicznej w Mataro** (arch. Miguel Brullet i Tenas, 1997), wyposażając go od strony południowej w elewacyjną ścianę dwupowłokową, której zewnętrzną warstwę tworzą nieprzeierne i półprzeierne moduły PV z ogniw z krzemu polikrystalicznego [5].

W inny sposób opisywany efekt wykorzystano w **budynku Centrum Sportu w Wageningen** (arch. BEAR Architecten, 2004). Moduły PV zintegrowano ze ścianą komina słonecznego – wertykalnej struktury szklarniowej, która została przestrzennie powiązana z przeszklonym atrium, stanowiącym centralną część kompleksu. Komin słoneczny pełni rolę elementu stymulującego wentylację wyporową



Fot. 1. Budynek Centrum Sportu w Wageningen – schemat przepływu powietrza – zasada funkcjonowania komina słonecznego z modułami PV: a) pogoda letnia; b) warunki wietrzne [6]

w atrium (fotografia 1). Rola modułów PV sprowadza się do potęgowania tego efektu, dzięki emisji ciepła do przestrzeni wewnętrznej komina. Ciepłe powietrze unosi się, zasysając jednocześnie chłodniejsze powietrze z dolnych partii atrium. Ciepło emitowane z modułów PV przyczynia się pośrednio do chłodzenia przestrzeni atrium, dzięki wzmaganiu wentylacji poprzeczno-wyporowej w analogiczny sposób jak w podwójnych elewacjach szklanych. Umieszczenie modułów



Zasada wykorzystania elewacyjnych modułów PV w ogrzewaniu i chłodzeniu pomieszczeń w poszczególnych porach roku [3]

PV w eksponowanej na działanie czynników klimatycznych wysokiej ścianie struktury szklarniowej jest korzystne również z uwagi na dogodne warunki chłodzenia ich powierzchni zewnętrznej. Moduły wystawione są na działanie wiatru, który jest kolejnym elementem wentylacji naturalnej. Komin słoneczny wyposażony jest w specjalne końcówki, które zapobiegają odwrócenia przepływu mas powietrza na skutek parcia wiatru, a stymulują wyprowadzanie powietrza wewnętrznego na zewnątrz.

Jak podają autorzy projektu, obliczeniowa wartość konsumpcji energii jest o ok. 60% mniejsza niż w przypadku tradycyjnych tego typu obiektów [6].

Moduły PV jako elementy ochrony przeciwsłonecznej

Wraz ze wzrostem przepuszczalności promieni słonecznych do wnętrza budynku zwiększają się zyski ciepłe, co z kolei wpływa na wzrost wartości temperatury powietrza wewnętrznego i zagraża przegrzewaniem pomieszczeń. O dostępie promieni słonecznych do wnętrza budynku decydują moduły PV zintegrowane z elewacyjnymi i dachowymi przegrodami szklanymi oraz moduły w postaci przestrzennych elementów zacieniających. Pierwsze z wymienionych stanowią odmianę szklenia półprzeziernego realizowanego na dwa sposoby – przez laminację ogniw PV półprzeziernych bądź rozsunięcie nieprzeziernych ogniw PV w zestawie szklenia elewacyjnego i dachowego.

Duży potencjał tkwi w modułach PV kształtowanych na wzór tradycyjnych elementów zacieniających, takich jak półki przeciwsłoneczne i żaluzje zewnętrzne lub ich systemy. Badania modułów PV w postaci półek przeciwsłonecznych wskazują, że ochrona budynku przed przegrzewaniem zależy od wielkości modułu PV, jego kąta nachylenia oraz wysokości względnej. Skuteczność ochrony przeciwsłonecznej zwiększa się wraz ze zmniejszeniem nachylenia modułu PV oraz wzrostem wielkości modułu, zarówno w osi równoległej, jak i prostopadłej do okna [7]. Z kolei w przypadku, gdy rozmiar i kąt nachylenia modułu PV w formie półki przeciwsłonecznej przyjmuje się jako wielkości stałe, omawiany wpływ determinowany jest przez wysięg pół-

ki, wielkość okna zacienianego i odległość nadwieszenia od okna. Na podstawie nomogramów opracowanych dla Wrocławia można stwierdzić, że całoroczne zyski słoneczne mogą ulec zmniejszeniu do ok. 58%, zaś zyski letnie do ok. 65%, w zależności od wartości zmiennych [8].

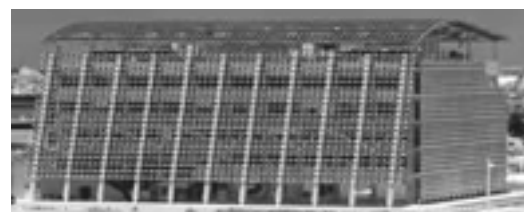
Nietypowe, acz niezmiernie interesujące rozwiązanie modułów PV jako półek przeciwsłonecznych wprowadzono w **budynku biurowym „ENERGYbase” w Wiedniu** (arch. POS Architekten, 2008). Moduły zintegrowano z elewacją szklaną, którą przełamano w taki sposób, że w każdej kondygnacji uzyskano dwie różnie nachylone płaszczyzny. W górnych płaszczyznach przełamania umieszczono moduły PV oraz kolektory termiczne. Dolne płaszczyzny powtarzalnych przełamania nachylone zostały w przeciwną stronę i stanowią pas szklenia. Budynek zyskał interesującą geometrię elewacji. Przełamanie pozwoliło na wytworzenie płaszczyzny dla aktywnego (m.in. moduły PV) oraz pasywnego (okna słoneczne) wykorzystania energii słonecznej. Moduły PV, umieszczone w górnym, wyeksponowanym ku słońcu pasie elewacji, mają wysoką efektywność pracy. Jednocześnie pozwala im to pełnić rolę elementów ochrony przeciwsłonecznej (fotografia 2). Pas dolny jest odpowiedzialny za zimowe zyski ciepłe oraz oświetlenie światłem naturalnym i kontakt wzrokowy z otoczeniem. Główną porcję energii słonecznej przejmuje górna półka, co oznacza największy udział w ochronie przed nadmiarem ciepła, a jednocześnie zwiększenie efektywności pracy modułów PV. Latem, południowa elewacja zachowuje się jak elewacja północna – zapobiega przegrzewaniu i nadmiernemu oświetleniu wnętrza. Wykazano 38% wzrost generowania prądu w stosunku do tradycyjnej pionowej elewacji z modułami PV [9].

Z punktu widzenia architektonicznego, ciekawszymi rozwiązaniami wydają się aplikacje modułów PV w formie rozbudowanych systemów żaluzyjnych. Takie rozwiązanie ma **budynek administracyjno-biurowy Itoman City Hall na Okinawie** (arch. Nikken Sekkei, 2002). System modułów PV pokrywa całą elewację budynku, dzięki czemu zyskuje on oryginalny wygląd (fotografia 3). Moduły, poza swą pier-



Fot. 2. Elewacja z modułami PV – budynek biurowy ENERGYbase w Wiedniu

[fot. POS Architekten]



Fot. 3. Elewacja z modułami PV – budynek administracyjno-biurowy Itoman City Hall na Okinawie/Japonia

[fot. Itoman City Hall]

wotną funkcją generatora prądu, w ciepłe słoneczne dni przyczyniają się do skutecznego chłodzenia przestrzeni wewnętrznej, co potwierdziły badania wpływu rozwiązań elewacyjnych na potrzeby klimatyzowania pomieszczeń, charakteryzowanego przez tzw. parametr PAL (ang. *perimeter zone annual air conditioning load*). Do badań wykorzystano trzy hipotetyczne rozwiązania elewacji budynku. Poza rozwiązaniem finalnym, tj. wysunięciem przed lico elewacji gęsto ułożonych i specjalnie dostosowanych kształtem modułów PV w roli elementów zacieniających, rozważono dwa inne rozwiązania: bez elementów zacieniających oraz ze standardowymi żaluzjami fasadowymi. Zmierzono parametr PAL w tych samych warunkach pogodowo-klimatycznych. W przypadku rozwiązania finalnego parametr PAL wyniósł 1390 GJ/a, co daje wartość o 1474 GJ/a mniejszą w stosunku do rozwiązania pozbawio-

nego ochrony przeciwsłonecznej oraz o 1069 GJ/a mniejszą do rozwiązania z tradycyjnymi żaluzjami [10].

Podobne korzyści uzyskano w **budynku biurowo-laboratoryjnym ECN 31 w Petten w Holandii** (arch. BEAR Architecten, 2000). W ramach modernizacji budynku z 1963 r., elewację południową wyposażono w system modułów PV w postaci półek, które pełnią rolę ochrony przeciwsłonecznej. Na każde okno przypadają cztery moduły, osadzone w rzędach jeden pod drugim, przy czym rząd modułów usytuowany na poziomie wzroku pracowników biurowych jest ruchomy i podłączony do centralnego systemu sterowania. Badania pomiarowe wykazały skuteczność zacienienia na poziomie 85%, przy czym system modułów mobilnych jest ok. 10% efektywniejszy. W rezultacie system klimatyzacji mechanicznej okazał się niepotrzebny, a zużycie energii elektrycznej zredukowano o 75% [11]. Podobne rozwiązanie rozważano przy modernizacji budynku Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej na wczesnym etapie procesu inwestycyjnego. Ostatecznie zdecydowano się na wprowadzenie modułów PV okładzinowych wypełniających m.in. pasy międzyokienne. Nie wpływają one w zauważalnym stopniu na środowisko termiczne budynku.

Podsumowanie

Omówione sposoby zastosowania modułów PV dowodzą, że zasadne jest ich wykorzystanie nie tylko jako generatora prądu elektrycznego, ale również energii cieplnej. Należy zwracać z utartym schematem postrzegania tych elementów jako instalacji elektrycznej dodanej do budynku. Jak dowodzą przedstawione przykłady, duży potencjał tkwi w integracji modułów ze strukturą budynku (Building Integrated Photovoltaics – BIPV). Dzięki emisji ciepła ze swojej powierzchni, elementy te umożliwiają pasywne ogrzewanie, a także przyczyniają się do chłodzenia przestrzeni budynku przez stymulację wentylacji wyporowej. Bardzo pozytywna jest ich rola jako elementu ochrony przeciwsłonecznej. Skuteczność wykorzystania modułów PV wymaga uwzględnienia złożoności uwarunkowań strukturalno-użytkowych i estetycznych budyn-

ku, a także kontekstu lokalizacyjnego. Szczególnie istotna jest świadomość, że umiejętna integracja modułów PV ze strukturą budynku w aspekcie termicznym nie musi wykluczać, a wręcz przeciwnie – może przynosić korzyści wykraczające poza te związane ściśle z gospodarką ciepłą budynku. Należą do nich m.in. korzyści energetyczne, polegające na utrzymywaniu wysokiej sprawności modułów przez stworzenie warunków do schładzania ich powierzchni, możliwości dogodnego eksponowania powierzchni modułów na oddziaływanie promieni słonecznych (dotyczy to głównie modułów PV jako elementów ochrony przeciwsłonecznej), a także, w skali całego budynku – odciążenie pracy systemów HVAC i wynikająca z tego redukcja zużycia energii operacyjnej. Z punktu widzenia architektonicznego nie do przecenienia są korzyści estetyczne związane z tworzeniem oryginalnych form przestrzennych budynków, wzbogacaniem kompozycji przestrzennej, linearnej i kolorystycznej elewacji. Ze stosowaniem modułów PV w roli ochrony przeciwsłonecznej wiąże się też (pominięty w artykule), ich pozytywny wpływ na jakość środowiska wewnętrznego (m.in. w zakresie oświetlenia naturalnego).

Aspekt termiczny wykorzystania modułów PV wraz z korzyściami, które się z nim wiążą, może zajmować ważne miejsce nie tylko w realizacji budownictwa energooszczędnego, ale w znacznie szerszym kontekście – w tworzeniu architektury proekologicznej zgodnej z filozofią zrównoważonego rozwoju.

Abstract

Photovoltaic (PV) modules are devices that transform solar energy into electric energy. This is their primary purpose. With the aid of the other photovoltaic system elements, the PV modules or different configurations of PV cells enable to provide the building with electric current. Thermal aspect is a less known side of the PV modules use. Because of their basic function, it is being avoided or unappreciated, while thermal energy accompanies photovoltaic conversion every time, as its side effect. The article discusses the ways the thermal energy may be used in buildings with photovoltaic systems. Also, PV modules, application as solar protection

elements preventing buildings overheating is included in the thermal aspect. It has been proved that architecturally integrated PV modules may positively contribute to the creation of thermal environment of the building, both in terms of their passive heating and cooling. At the same time, they may exert a positive effect on architectural features and energetic behaviour of the building as well as the PV modules efficiency.

Literatura

- [1] Sarniak M.T., Podstawy fotowoltaiki, OWPW, Warszawa 2008.
- [2] ATB-Becker – materiały szkoleniowe z kursu Train the Trainer – Photovoltaic installer and planner, Arsenal Research, Wiedeń 2006.
- [3] Gonçalves H., Silva A., Ramalho A., Rodrigues C., Thermal Performance of a Passive Solar Office Building in Portugal, materiały konferencyjne Eurosun 2008 – 1st International Congress on Heating, Cooling and Buildings, Lizbon 7-10 October 2008 (w: Proceedings-Sustainable Building, no. 382).
- [4] Roberts S., Guariento N., Building Integrated Photovoltaics. A Handbook, Birkhauser, Basel-Boston-Berlin 2009.
- [5] Marchwiński J., Fasady fotowoltaiczne – technologia PV w architekturze, Wyd. WSEiZ, Warszawa 2012.
- [6] Reijenga T., 282kWp BIPV, Bioclimatic Sports Centre, Wageningen (NL), materiały konferencyjne The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo 27 – 29 September 2005 (w: Proceedings no. 01 – 026).
- [7] Sun L.L., Yang H.X., Impacts of the shading-type building integrated photovoltaics claddings on electricity generation and cooling load component through shaded windows, w: Energy and Buildings, vol. 42, issue 4, s. 455 – 460, wyd. Elsevier, April 2010.
- [8] Nowak H., Włodarczyk D., Nowak Ł., Śliwińska E., Staniec M., Efektywność aktywnych i pasywnych systemów słonecznych w energooszczędnych budynkach użyteczności publicznej w Polsce, w: Czasopismo Techniczne 2-B/2010.
- [9] Selke T., Preisler A., Schneider U., ENERGYbase-Sunny Office Future, materiały konferencyjne Eurosun2008 – 1st International Congress on Heating, Cooling and Buildings, Lizbon 7 – 10 October 2008 (w: Proceedings-Sustainable Buildings, no. 357).
- [10] Tochigi M., Tsukamoto K., Itoman City Hall, materiały konferencyjne The 2005 World Sustainable Building Conference (SB05 Tokyo), Tokyo 27-29 September 2005 (w: Proceedings no. 01 – 080).
- [11] Reijenga T., Kaan H., Roof and Facade Integration of PV Systems in a Laboratory Building. Renovation of the ECN Building 31 with PV, materiały z międzynarodowej konferencji Sustainable Building 2000 (w: Proceedings), Maastricht 2000.