

EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA EKSPERYMENTALNYCH FASAD PV BUDYNKU BIUROWO-PRZEMYSŁOWEGO W WARSZAWIE

Dominika KNERA*, Dariusz HEIM*

* Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska
ul. Wólczajska 213, 90-924 Łódź, e-mail: dominika.knera@p.lodz.pl, dariusz.heim@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono całoroczną analizę numeryczną efektywności energetycznej dwóch eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych, południowej i północnej, budynku biurowo-przemysłowego w Warszawie. Do obliczeń wykorzystano program symulacyjny ESP-r. Zastosowano dwa różne rozwiązania konstrukcyjne fasad eksperymentalnych. Energia wyprodukowana przez panele fotowoltaiczne została przeznaczona na zapewnienie zapotrzebowania energetycznego na potrzeby oświetlenia i wentylacji pomieszczeń biurowych. Analiza wykazała, że latem zastosowane systemy fotowoltaiczne generują nadwyżkę energii elektrycznej, natomiast zimą, zwłaszcza w listopadzie i grudniu, zapotrzebowanie energetyczne na wentylację i oświetlenie przewyższa wydajność eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych.

Słowa kluczowe: fasada PV, symulacja, energia elektryczna, konwersja fotowoltaiczna,

1. WPROWADZENIE

Poprawa efektywności energetycznej budynków wiąże się nie tylko z poprawą izolacyjności termicznej przegród, ale również z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań i integracją odnawialnych źródeł energii z obudową budynku. Największy potencjał posiada energia promieniowania słonecznego, która może być wykorzystana zarówno w pasywnych, jak i aktywnych systemach fasadowych [1,2]. W ostatnich czasach najszybciej rozwijającą się technologią wykorzystującą energię promieniowania słonecznego jest fotowoltaika. Panele fotowoltaiczne, na skutek procesu konwersji fotoelektrycznej, generują energię elektryczną, która może być wykorzystywana do zasilania różnych systemów zapewniających w budynku odpowiednie warunki środowiska wewnętrznego.

Panele fotowoltaiczne mogą być mocowane zarówno na dachach budynków, jak również na elewacjach czy elementach zacieniających. Ponadto, systemy fotowoltaiczne mogą być instalowane w postaci dodatkowej konstrukcji nakładanej na istniejącą obudowę budynku (BAPV – ang. *Building Applied Photovoltaic*) lub zastępować ją aktywnymi elementami obudowy budynku zawierającymi ogniwa fotowoltaiczne (BIPV – ang. *Building Integrated Photovoltaic*) [3]. Efektywność systemu fotowoltaicznego jest bardzo wrażliwa na temperaturę ogniw, dla których decydująca jest temperatura otoczenia i natężenie promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię paneli [4,5]. Wraz ze wzrostem temperatury ogniwa, zmienia się ich charakterystyka elektryczna i w rezultacie zmniejsza się moc panelu. Dlatego też niezwykle istotne jest utrzymywanie temperatury paneli PV na poziomie zbliżonym do temperatury Standardowych Warunków Testowych (STC – Standard Test Conditions), dla których wyznacza się efektywność paneli, czyli około 25°C. Prawidłowe zaprojektowanie instalacji fotowoltaicznej powinno, zatem uwzględnić możliwość chłodzenia paneli poprzez wentylację naturalną, mechaniczną bądź inny sposób odprowadzania ciepła.

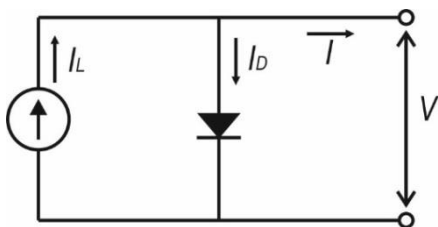
W pracy przedstawiono szczegółową analizę efektywności energetycznej fasad fotowoltaicznych istniejącego budynku. Przeanalizowano możliwość wykorzystania energii elektrycznej wygenerowanej przez panele fotowoltaiczne na potrzeby oświetlenia sztucznego i wentylacji pomieszczeń biurowych. Analizy zostały przeprowadzone za pomocą programu symulacyjnego ESP-r. Celem pracy było określenie możliwości poprawy bilansu energetycznego budynku na przestrzeni całego roku. W pracy przeanalizowano jedynie wydajność samych paneli bez uwzględnienia wpływu elementów instalacji tj.

regulatory ładowania, akumulatory, falowniki. Rzeczywista ilość uzyskanej energii może być mniejsza niż wyznaczona z obliczeń również ze względu na wartość wymaganej szczytowej mocy elektrycznej.

2. MODEL FASADY PV W PROGRAMIE ESP-R

ESP-r jest złożonym programem komputerowym, do modelowania procesów przepływu energii i masy w budynku z uwzględnieniem profili użytkowania oraz oddziaływania wybranych instalacji i systemów. Do obliczeń wykorzystywana jest metoda objętości skończonych i metoda węzłowa [6].

Materiał fotowoltaiczny modelowany jest, jako zbiór połączonych szeregowo i równolegle ogniw fotowoltaicznych o określonych, zadanych parametrach. Charakterystyka prądowo-napięciowa opisująca podstawowe parametry elektryczne ogniwa jest wyznaczana na podstawie prostego schematu zastępczego ogniwa fotowoltaicznego [7].



Rys. 1. Schemat obwodu typu „one-diode” [7].

Fig. 1. Simple equivalent one-diode model [7].

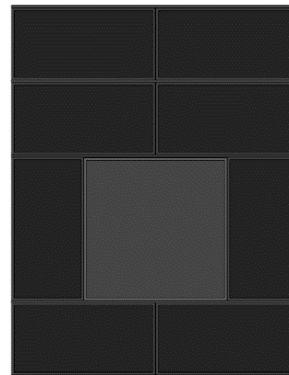
Panel fotowoltaiczny jest definiowany, jako przegroda warstwowa zbudowana z zewnętrznego przeszklenia, aktywnego materiału reprezentującego zestaw ogniw fotowoltaicznych, warstwy łączącej i tylnej warstwy przeszklenia. Poszczególne warstwy opisane są za pomocą trzech węzłów: wewnętrznego – definiującego właściwości danego materiału, i dwóch granicznych węzłów łączących kolejne warstwy. Warstwa zawierająca ogniwa fotowoltaiczne jest definiowana w postaci hybrydowego materiału o nietypowych właściwościach. Energia promieniowania docierającego do węzła wewnętrznego warstwy fotowoltaicznej ulega równocześnie konwersji na energię cieplną i elektryczną z uwzględnieniem zjawisk optycznych na granicy ośrodków, w szczególności odbicia promieniowania słonecznego. Ilość energii elektrycznej uzyskanej w takim materiale jest wyznaczana za pomocą modeli elektrycznych wprowadzonych do programu ESP-r. W pracy wykorzystano WATSUN PV model, który uwzględnia zależność napięcia rozwarcia (V_{oc}) i prądu zwarcia (I_{sc}) zarówno od natężenia promieniowania i temperatury ogniwa [8,9].

3. OPIS ANALIZOWANYCH PRZYPADKÓW

3.1. Budowa fasad PV

Obie fasady fotowoltaiczne analizowane w pracy są zbudowane z paneli cienkowarstwowych CIS (ang. *Copper Indium Diselenide* – selenek indowo-miedziowy) o sprawności podanej przez producenta na poziomie 12%. Przy maksymalnej wydajności moc pojedynczego panelu wynosi 80 Wp, napięcie 35 V, a natężenie prądu 2,3 A.

Analizowane modele fasad odwzorowują fasady rzeczywiste budynku biurowo-przemysłowego w Warszawie. Ze względu na istniejący kształt i profil użytkowania budynku projekt fasad eksperymentalnych musiał być dostosowany do istniejącej konstrukcji i architektury obiektu. Obie fasady PV zostały zbudowane, jako fasady wentylowane. Panele PV umieszczono na podkonstrukcji aluminiowej zakotwiczonej do istniejącej ściany dwuwarstwowej.



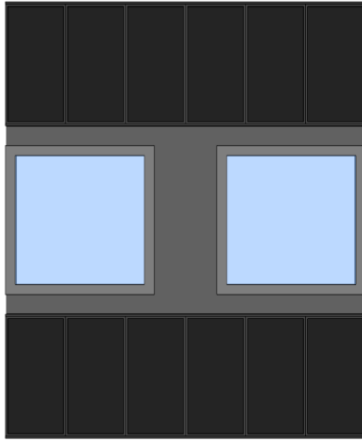
Rys. 2. Schemat południowej fasady PV.

Fig. 2. View of the south oriented PV façade.

Eksperymentalna fasada południowa stanowi fragment ściany hali produkcyjno-magazynowej. Instalacja fotowoltaiczna składa się z 8 paneli, a centralnie położona powierzchnia jest imitacją otworu okiennego (rys. 2). Projekt fasady południowej jest propozycją modułowego rozwiązania fasady budynku biurowego, gdzie każda taka powierzchnia przykrywa pole o wymiarach 2,4×3,0 m. Łączna powierzchnia paneli wynosi 5,76 m², zaś okna 1,44 m².

Eksperymentalna fasada północna została wmontowana w ścianę części biurowej budynku. Fasada północna jest najslabiej nasłonecznioną elewacją budynku. Dlatego też liczbę paneli fotowoltaicznych dla fasady północnej zwiększono, aby efektywność obu analizowanych fasad była porównywalna. Ze względu na układ i wielkość istniejących okien na ścianie północnej zaproponowano rozwiązanie w postaci dwóch poziomych pasów składających się z 6 paneli umieszczonych nad i pod

oknami (rys. 3). Łączna powierzchnia paneli wynosi 8,64 m², okien 2,54 m² zaś muru 3,92 m². W rezultacie liczbę paneli fotowoltaicznych na fasadzie północnej zwiększono o 50% w stosunku do fasady południowej.

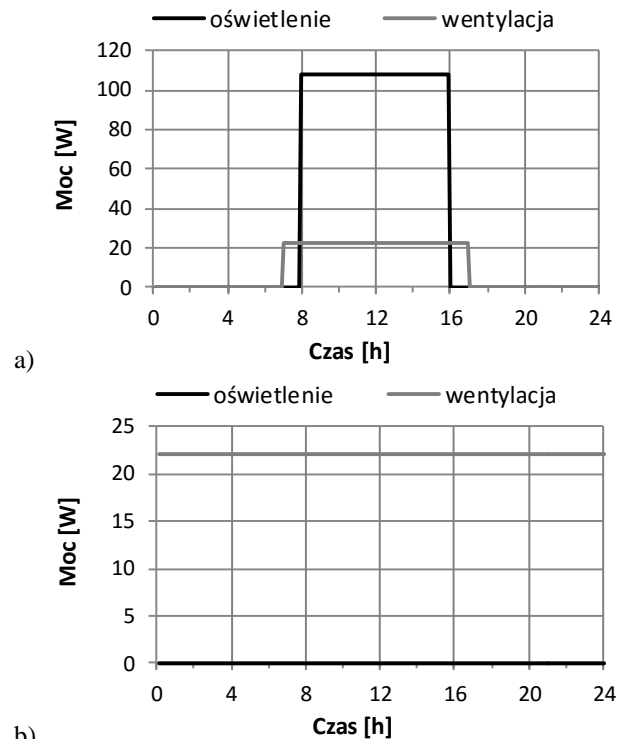


Rys. 3. Schemat północnej fasady PV.
Fig. 3. View of the north oriented PV façade.

3.2. Opis założeń

Dane klimatyczne wykorzystane w obliczeniach przyjęto zgodnie z Typowym Rokiem Meteorologicznym wyznaczonym dla miasta Warszawy. Analiza efektywności energetycznej fasad została przeprowadzona dla całego roku. Ze względu na różne profile wykorzystania energii elektrycznej z fasad eksperymentalnych rok kalendarzowy podzielono na okres zimowy, trwający od października do marca, i letni – od kwietnia do września. Podział ten uwarunkowany był nie tylko względami ogrzewczymi, ale również dostępnością światła dziennego, długością dnia itp. Zaproponowano, że energia elektryczna wygenerowana przez panele PV będzie przeznaczona na potrzeby oświetlenia sztucznego i wentylacji dwóch pomieszczeń biurowych. Przyjęto, że w każdym pomieszczeniu będą znajdować się trzy oprawy typu LED o łącznej mocy 108 W i indywidualna centrala wentylacyjna z rekuperacją o mocy na poziomie 22 W. W okresie zimowym oświetlenie sztuczne będzie włączone przez cały czas przebywania pracowników w biurze, czyli w godzinach 8-16. Natomiast w okresie letnim, założono, że oświetlenie sztuczne nie będzie włączane. Wentylacja, zgodnie z założeniami będzie działała od 7 do 17 w okresie zimowym, czyli w czasie pracy i dodatkowo godzinę przed i po obecności pracowników, w celu przewietrzenia pomieszczenia. W okresie letnim dodatkowo zastosowano nocne przewietrzanie i przyjęto, że centrala wentylacyjna będzie działała całą dobę. Na rys. 4 pokazano profile

działania oświetlenia i wentylacji w okresie zimowym i letnim.



Rys. 4. Dzienny profil działania oświetlenia sztucznego i wentylacji w okresie a) zimowym, b) letnim.
Fig. 4. Daily operation profile of artificial lighting and ventilation during a) winter, b) summer season.

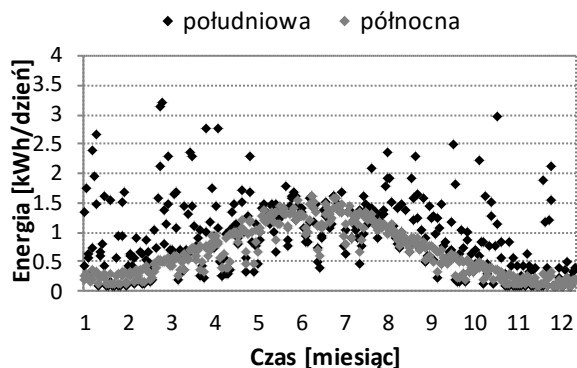
Energia wygenerowana przez panele fotowoltaiczne musi zostać odpowiednio przetworzona, aby mogła być wykorzystana do zasilania przyjętych odbiorników. Zaproponowano system sieciowy składający się z regulatora ładowania, akumulatorów i falownika do odbioru i przetworzenia prądu stałego otrzymywanego z paneli PV na prąd zmienny wykorzystywany przez oświetlenie i wentylację. Uwzględniono łączną sprawność działania poszczególnych urządzeń na poziomie 86%.

4. WYNIKI I ICH ANALIZA

Analizy efektywności energetycznej eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych przeprowadzono w dwóch etapach. Najpierw przeanalizowano wydajność energetyczną na potrzeby zasilania odbiorników w pomieszczeniu biurowym dla każdej fasady indywidualnie. Następnie połączono odbiór energii z obu fasad PV i zaproponowano wspólne zasilanie dwóch pomieszczeń biurowych jednocześnie.

Symulacje zostały wykonane z 15 minutowym krokiem czasowym, aby uzyskać szczegółowe wyniki. Wartości danych klimatycznych dla poszczególnych godzin zostały interpolowane liniowo pomiędzy początkową i końcową wartością danej zmiennej, np. promieniowania słonecznego, temperatury powietrza zewnętrznego. Następnie, otrzymane rezultaty i planowane zapotrzebowanie energetyczne odbiorników zbilansowano w okresie dziennym i miesięcznym.

Poniższy rysunek (rys. 5), przedstawia dzienną ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez panele PV poszczególnych fasad. Można zaobserwować, że w okresie letnim, wydajność fasady południowej i północnej jest podobna. Jest to spowodowane przede wszystkim większą liczbą paneli PV w fasadzie północnej oraz kątem padania promieniowania na pionowe płaszczyzny fasady. W miesiącach letnich, kiedy słońce jest wysoko, a kąt padania na powierzchnię zorientowaną na południe duży, większość promieniowania jest odbijana i tylko część absorbowana i zamieniana na energię elektryczną. Natomiast w okresie zimowym, fasada południowa produkuje znacznie więcej energii elektrycznej w porównaniu do fasady północnej, do której dociera tylko promieniowanie rozproszone. Ponadto w powyższym okresie dla fasady zorientowanej na południe maleje wpływ współczynnika odbicia i większa część promieniowania dociera bezpośrednio do fotoogniwa.

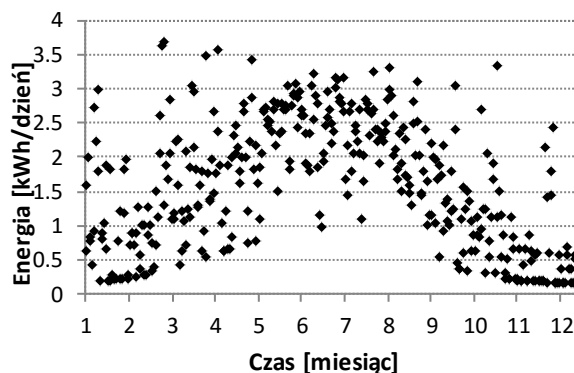


Rys. 5. Energia elektryczna wygenerowana przez panele poszczególnych fasad PV w ciągu dnia.

Fig. 5. Daily electrical energy generated by the panels of individual PV façades.

Na rys. 6 pokazano dzienną wartość energii elektrycznej wyprodukowanej przez panele fotowoltaiczne obu fasad w ciągu roku. Maksymalne wartości dziennej produkcji energii przez wszystkie panele (ponad 3,5 kWh/dzień) można zaobserwować w miesiącach przejściowych, marcu, kwietniu i maju, jest to spowodowane wysoką wydajnością fasady południowej w słoneczne dni. Wysoka efektywność paneli wynika z korzystnego położenia słońca w trakcie oświetlania elewacji południowej w okresie przejściowym. Kąt padania promieniowania słonecznego na powierzchnię

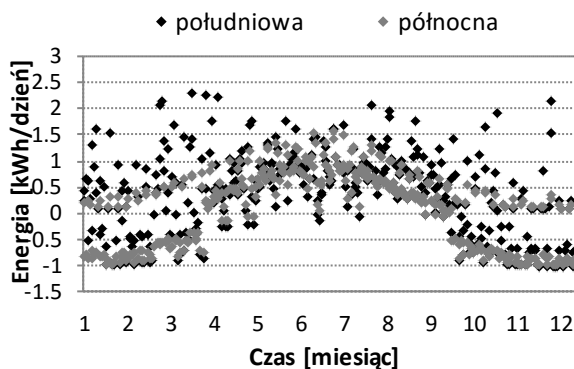
fasady jest na tyle niski, że większość promieniowania jest absorbowana przez panele i tylko niewielka ich część ulega odbiciu. Jednakże są to jedynie pojedyncze dni, zaś ogólnie najwięcej energii wygenerowanej przez panele PV przypada na okres letni.



Rys. 6. Łączna energia elektryczna wygenerowana przez panele obu fasad PV w ciągu dnia.

Fig. 6. Total daily electrical energy generated by panels of both PV façades.

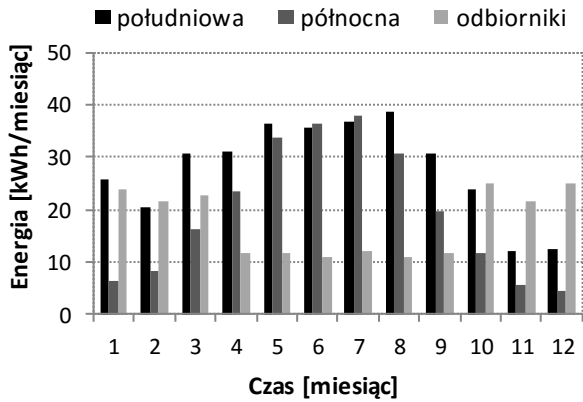
Następnym etapem przedstawionej analizy było uwzględnienie odbiorników, czyli strumienia energii potrzebnej do zasilenia oświetlenia sztucznego i wentylacji. Po dobowym zbilansowaniu energii wyprodukowanej przez panele poszczególnych fasady oraz niezbędnej do zasilenia odbiorników otrzymano wykres przedstawiony na rys. 7. Można zauważyć, że w okresie letnim, czyli od kwietnia do września, kiedy energia generowana przez panele jest zużywana tylko na potrzeby wentylacji, występuje jej znaczna nadprodukcja. Natomiast w okresie zimowym nie ma jednoznaczności w wynikach zarówno dla fasady południowej jak i północnej. Dla części dni energia wyprodukowana przez panele fotowoltaiczne jest wyższa niż zapotrzebowanie odbiorników, ale w większości jest niewystarczająca.



Rys. 7. Różnica między energią wygenerowaną przez panele PV a zapotrzebowaniem energetycznym odbiorników w ciągu dnia.

Fig. 7. The difference between the energy generated by the PV panels and energy demand of receivers during the day.

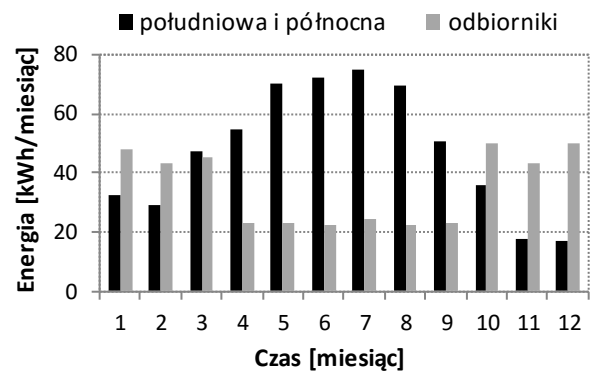
Kolejne wykresy przedstawiają łączne, miesięczne zestawienia energii wyprodukowanej przez wszystkie panele fotowoltaiczne i wymaganej przez zaproponowane odbiorniki.



Rys. 8. Miesięczna suma energii wygenerowanej przez panele poszczególnych fasad PV i zapotrzebowanie energetyczne odbiorników w pomieszczeniu biurowym.
Fig. 8. Monthly energy generated by panels of each PV façade and energy demand of receivers in the office room.

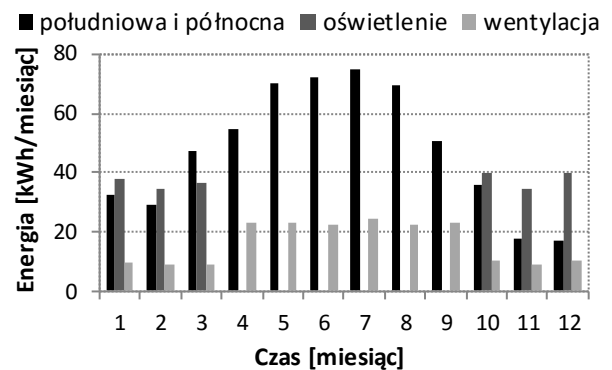
Na rys. 8 pokazano porównanie energii wygenerowanej przez panele poszczególnej fasady oraz zapotrzebowanie energetyczne na oświetlenie i wentylację, z uwzględnieniem weekendów, w jednym pomieszczeniu biurowym. Można zaobserwować, że w miesiącach letnich produkcja energii przez panele fasady północnej jest zbliżona, a w czerwcu i lipcu nawet większa, w porównaniu do paneli fasady południowej. Jednakże zimą fasada północna jest znacznie mniej efektywna. Natomiast wydajność fasady południowej jest bardziej równomierna i jedynie w listopadzie oraz grudniu następuje istotny spadek produkcji energii. Ponadto tylko w tych miesiącach fasada południowa nie jest w stanie pokryć całego zapotrzebowania energetycznego na oświetlenie i wentylację. Energia wyprodukowana przez panele fasady północnej jest wystarczająca tylko w okresie letnim.

Następny wykres, rys. 9, przedstawia zestawienie energii wyprodukowanej łącznie przez panele fasady północnej i południowej z zapotrzebowaniem energetycznym na oświetlenie i wentylację w dwóch pomieszczeniach biurowych. Przy połączeniu zasilania z paneli dwóch analizowanych fasad możemy zapewnić energię na oświetlenie i wentylację w obu pomieszczeniach tylko w okresie letnim i dodatkowo w marcu. Natomiast w pozostałych miesiącach ilość produkowanej energii elektrycznej jest niewystarczająca.



Rys. 9. Miesięczna energia wygenerowana przez panele obu fasad PV i zapotrzebowanie energetyczne odbiorników w dwóch pomieszczeniach biurowych.
Fig. 9. Monthly energy generated by the panels of both PV façades and energy demand of receivers from the two offices.

Na ostatnim wykresie, rys. 10, rozdzielono energię potrzebną na zasilanie oświetlenia sztucznego i wentylacji. Można zaobserwować, że w okresie zimowym energia wyprodukowana przez panele PV może jedynie pokryć zapotrzebowanie na wentylację i jest niewystarczająca dla oświetlenia sztucznego. Natomiast latem można odnotować znaczny nadmiar energii elektrycznej, która przy założeniu układu autonomicznego jest trudna do zakumulowania. Natomiast cały system charakteryzowałby się dużo większą efektywnością, przy założeniu pełnej integracji z siecią elektroenergetyczną. W tym przypadku łączny, roczny bilans energii elektrycznej jest dodatni i wynosi 152,37 kWh/rok.



Rys. 10. Miesięczna energia wygenerowana przez panele obu fasad PV i zapotrzebowanie energetyczne na potrzeby oświetlenia i wentylacji w dwóch pomieszczeniach biurowych.
Fig. 10. Monthly energy generated by the panels of both PV façades and energy demand for lighting and ventilation in two offices rooms.

5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono obliczenia wydajności energetycznej dwóch eksperymentalnych fasad fotowoltaicznych oraz analizę możliwości ich zastosowania, jako źródła zasilania na potrzeby oświetlenia sztucznego i wentylacji dwóch pomieszczeń biurowych.

Zaobserwowano, że w miesiącach letnich energia wygenerowana przez panele PV fasad eksperymentalnych jest wystarczająca, aby pokryć zapotrzebowanie na potrzeby indywidualnej wentylacji z odzyskiem ciepła. Dodatkowo w okresie od kwietnia do września występuje znaczna nadprodukcja energii elektrycznej, która może zostać efektywnie wykorzystana jedynie poza tym okresem. Natomiast w okresie zimowym wydajność fasad eksperymentalnych jest za niska, aby równocześnie zapewnić wymagania energetyczne na potrzeby oświetlenia i wentylacji. Tym samym, w analizowanym systemie nie jest możliwe efektywne wykorzystanie energii odnawialnej na przestrzeni całego roku bez konieczności podłączenia systemu do zewnętrznej sieci elektroenergetycznej.

Jak należało się spodziewać istotne zwiększenie powierzchni pokrytej panelami PV na elewacji północnej zwiększyło roczny uzysk energii elektrycznej. Przy zastosowaniu o 50% większej liczby paneli, fasada północna może być porównywalna z fasadą południową pod względem efektywności energetycznej w okresie letnim. Jednak w okresie zimowym, w którym do elewacji północnej dociera jedynie promieniowanie rozproszone uzyskany efekt energetyczny jest nadal nieznaczny.

ENERGY EFFICIENCY OF EXPERIMENTAL PV FAÇADES INSTALLED AT OFFICE-INDUSTRIAL BUILDING IN WARSAW

Summary: The paper presents the whole year numerical analysis of the energy efficiency of the two experimental south and north oriented photovoltaic facades of the office and industrial building in Warsaw. Calculations were done using simulation program ESP-r. Two different constructions of the experimental facades were applied. The energy produced by the photovoltaic panels was intended to provide the energy demand for artificial lighting and ventilation in office rooms. The analysis showed that in the summer the photovoltaic systems generate surplus of electricity, while in winter, especially in November and December, the energy demand for ventilation and lighting exceeds the production capacity of photovoltaic facades.

Literatura

[1] Quesada G., Rouse D., Dutil Y., Badache M., Hallé S., *A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 2820-2832

[2] Quesada G., Rouse D., Dutil Y., Badache M., Hallé S., *A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 2643-2651

[3] Ceron I., Caamano-Martin E., Neila F. J. *'State-of-the-art' of building integrated photovoltaic products*. Renewable Energy 58 (2013) 127-133

[4] Heim D., *The simultaneous effect of the operating temperature and solar radiation of the efficiency of photovoltaic panels* Archives of civil engineering LVII 3 (2011) 261-274

[5] Knera D., Heim D. *Heat transfer model of PV panel integrated with "Rainscreen Cladding System"* proceedings of Heat Transfer XIII Conference (2014)

[6] Clarke J.A., *Energy Simulation in building design*, 2001.

[7] Kelly N., *Towards a design environment for building-integrated energy systems: the intergration of electrical power flow modelling with building simulation*, PhD thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 1998.

[8] Thevenard D., *Review and recommendations for improving the modelling of building integrated photovoltaic systems*. Proc. of the 9th International IBPSA Conference, Montreal, Canada, August 15-18, 2005.

[9] Mottillo M., Beausoleil-Morrison I., Couture L., Poissant Y., *A comparison and validation of two photovoltaic models*. Canadian Solar Buildings Conference. Montreal, 2006.

Niniejsza praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt.: „Promowanie zrównoważonego podejścia do efektywności energetycznej w budownictwie, jako narzędzia ochrony klimatu w miastach Niemiec i Polski: opracowanie technologii fasady dla potrzeb budynków o zerowej emisji” (GPEE).