

Fotowoltaika na dachach płaskich – architektoniczne możliwości i ograniczenia



dr inż. arch.
JANUSZ MARCHWIŃSKI, PROF. WSEiZ
Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie
Wydział Architektury
ORCID: 0000-0003-3897-3580

Niniejszy artykuł stanowi analizę możliwości i ograniczeń aplikacji systemów PV na dachach płaskich, przeprowadzoną z punktu widzenia architektonicznego.

Wprowadzenie

Według badań z 2017 roku zastosowania systemów PV w obrębie dachu sięgnęło prawie 80% wobec 20% w obrębie elewacji [1]. Jest to zatem najczęstszy sposób lokalizacji elementów PV w budynku. Lokalizacja dachowa jest uważana za „bezpieczniejsze” miejsce w kontekście ekspozycji na słońce, tj. mniejszą w stosunku do elewacji podatność na zacienienie. W przypadku dachów skośnych nie bez znaczenia jest nachylenie połaci, które w ekspozycji południowej stwarza najlepsze warunki do pozyskiwania i przetwarzania energii słonecznej. Odnosząc się do warunków klimatycznych oraz szerokości geograficznej zbliżonych do warunków polskich, w przypadku tej ekspozycji moduły PV nachylone pod kątem 35 stopni do podłoża poziomego generują rocznie o ok. 28% więcej energii w porównaniu z płaszczyzną pionową. W przypadku orientacji wschodniej i zachodniej różnica wynosi odpowiednio 44% oraz 43% [2]. Inną przesłanką, która często decyduje o lokalizacji elementów PV na dachach, jest na ogół większa dostępność wolnej powierzchni pod montaż tych elementów. W przypadku dachów płaskich poza wymienionymi czynnikami należy wskazać na stosunkowo znaczne uniezależnienie się od ekspozycji względem stron świata – płaszczyzna pozioma ulega tej samej insolacji bez względu na orientację geograficzną.

Istnieją również negatywne strony aplikacji dachowych. Z punktu widzenia architektonicznego płaszczyzny dachów są poddawane mniejszej percepcji wzrokowej, przez co ranga elementów PV jako narzędzia kreacji estetycznej ulega potencjalnemu zmniejszeniu. Osłabienie to jest wprost proporcjonalne do stopnia wypłaszczenia dachu. Większa wolna przestrzeń skutkuje też mniej wysublimowanymi formami integracji fotowoltaiki z architekturą – elementy PV są częściej montowane jako instalacja monofunkcyjna, która nie odgrywa innej roli niż jako generatora prądu elektrycznego. W przypadku dachów

skośnych skutkuje to często negatywnym wpływem na formę architektoniczną budynku, zwłaszcza wówczas, gdy zastosowanie modułów PV nie było przewidziane oryginalnie.

Bez względu na potencjalne zalety i wady wskazanych aplikacji dachy, w tym dachy płaskie, pozostają nieraz jedyną możliwą lokalizacją elementów PV. Dzieje się tak w warunkach gęstej zabudowy miejskiej, w której elewacje budynków ulegają permanentnemu zacienieniu. Niniejszy artykuł stanowi analizę możliwości i ograniczeń aplikacji systemów PV na dachach płaskich, przeprowadzoną z punktu widzenia architektonicznego. Bazując na przykładach budynków, w tym autorskich koncepcjach architektonicznych, obejmuje aplikacje zarówno z obszaru tzw. fotowoltaiki dodanej

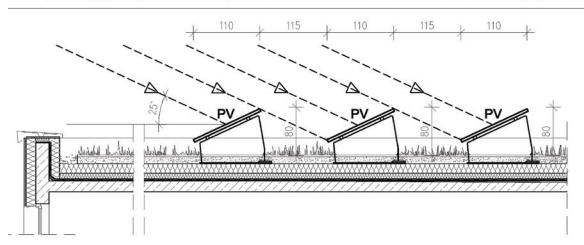
do budynku (BAPV), jak i fotowoltaiki zintegrowanej z budynkiem (BIPV).

Analiza badawcza – omówienie wybranych zastosowań elementów PV na dachach

Analizie poddano cztery grupy rozwiązań:

- wolnostojące moduły PV;
- moduły PV na niezależnej podkonstrukcji;
- moduły PV jako shadovoltaic system;
- ogniwa PV zintegrowane ze szklanym dachem.

W analizie skupiono się na zagadnieniach estetycznych, użytkowych i budowlanych, nie tracąc z pola widzenia przesłanek energetycznych, które stanowią podstawę stosowania systemów PV.

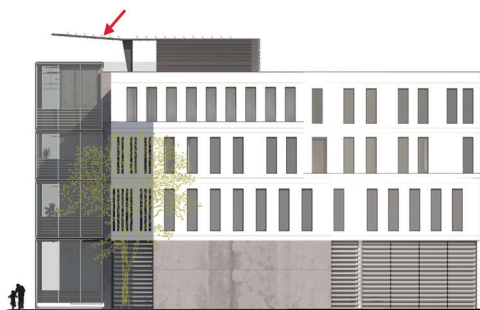


Fot. 1. Koncepcja konkursowa (III nagroda) budynku Środowiskowego Domu Opieki Społecznej (proj.: J. Marchwiński, A. Starzyk, współpraca M. Donderewicz) z zastosowaniem wolnostojących modułów PV; źródło: autor

W analizie skupiono się na zagadnieniach estetycznych, użytkowych i budowlanych, nie tracąc z pola widzenia przesłanek energetycznych, które stanowią podstawę stosowania systemów PV.

Wolnostojące moduły PV

Wolnostojące moduły PV są jednym z najpopularniejszych sposobów aplikacji systemów PV na dachach płaskich. Rzadko elementy te występują samodzielnie, gdyż wymagają odpowiedniego nachylenia. Nachylenie wynika z potrzeby dostosowania modułów PV do kąta zapewniającego najlepszą wydajność energetyczną. W krajach Europy Środkowej, w tym w Polsce, przyjmuje się kąt 30–40 stopni do podłoża przy orientacji południowej jako najlepiej dostosowany do energetycznych zysków słonecznych [3]. W tym celu stosuje się podkonstrukcję wsporczą, na której są mocowane moduły PV. Podkonstrukcja jest wykonywana ze stali cynkowanej, nierdzewnej lub aluminium. W aspekcie mocowania do podłoża dachowego istnieją dwie zasadnicze grupy rozwiązań: z balastem bez kotew mocujących i bez balastu, z mocowaniem szczelnym. Istnieją również systemy wsporcze, które wykorzystują pokrycie dachu jako balast (np. żwir) [4]. Wolnostojące moduły PV cechują się dużą swobodą lokalizacji. Zazwyczaj nie ma problemu z dopasowaniem najkorzystniejszego kąta nachylenia i orientacji względem stron świata. Istotne jest rozmieszczenie modułów PV, które na ogół lokalizuje się w rzędach. Rzędy od strony nasłonecznionej nie powinny powodować zacinienia modułów PV w rzędach kolejnych. Odległość wyznacza się dla promieniowania słonecznego w okresie zimowym, tj. przy niskim położeniu słońca nad horyzontem, a więc również relatywnie dużym zasięgu światłocienia. Ograniczenia związane z zacinieniem dotyczą też oddziaływania istniejących elementów dachowych, np. kominów – swoboda lokalizacyjna może być ograniczona. Z punktu widzenia artystycznego wolnostojące moduły stanowią zasadniczo dość prymitywny sposób aplikacji, niezintegrowany z architekturą budynku (BAPV). Ich rola estetyczna, z uwagi na słabą widoczność, jest relatywnie niewielka – maleje wraz ze wzrostem wysokości budynku. Budynki, których opisywana instalacja stanowi istotny składnik koncepcji estetycznej, należą do rzadkości – wymagają rozbudowanych stelaży konstrukcyjnych [5] – jednym z bardziej znanych przykładów jest tu pawilon brytyjski wybudowany na Expo 92 w Sewilli [6]. Poza



Fot. 2. Koncepcja konkursowa budynku Centrum Dydaktycznego Nauk Medycznych i Nauk o Zdrowiu Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego w Częstochowie (proj.: J. Marchwiński, J. Biernawski, J. Sobczyk, M. Dołbniak) z zastosowaniem modułów PV na niezależnej podkonstrukcji; źródło: autor

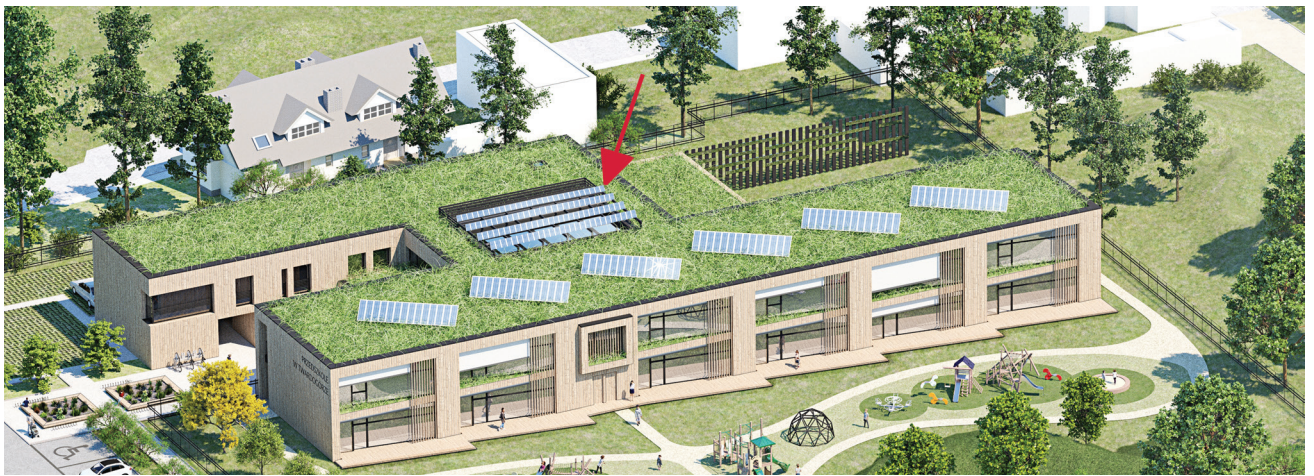
nielicznymi wyjątkami wolnostojące moduły PV to rozwiązania monofunkcyjne przeznaczone wyłącznie do generowania prądu elektrycznego. Z tego powodu zwraca się uwagę na efektywność pracy modułów PV, która ma wpływ, poza opisanymi czynnikami, na rodzaj podłoża dachowego.

W koncepcji konkursowej budynku Środowiskowego Domu Opieki Społecznej (arch. J. Marchwiński, A. Starzyk) wykorzystano rozległy dach jako płaszczyznę montażu krzemowych polikrystalicznych modułów PV o łącznej mocy ~30 kWp (fot. 1.).

Zapewniono zalecane warunki do pozyskiwania energii słonecznej, tj. wystawę południową (azymut 180°) i nachylenie 30° (kąt dostosowano do maksymalizacji zysków w okresie letnim). Wybrano miejsce niezajęte przez inne elementy dachowe, które ograniczałyby swobodę lokalizacji, a także powodowały zacinienie. Odległości między 9 rzędami modułów wynoszą 1,15 m przy wysokości 0,80 m, co zapewnia niezakłócony dopływ promieni słonecznych na całą powierzchnię modułu PV przez cały rok. Jednak to, co odróżnia koncepcję od typowych aplikacji, to system zielonego dachu ekstensywnego stanowiącego podłożę dla modułów PV. Warstwy zielonego dachu stanowią naturalny balast, eliminujący potrzebę kotwienia w konstrukcji (i przebijania hydroizolacji). Inna

zaleta rozwiązania łączy się z aspektem termicznym. Badania dotyczące efektywności pracy krzemowych krystalicznych modułów PV wskazują na spadek zdolności przetwórczej pracy modułów wraz ze wzrostem jego temperatury. Spadek ten wynosi ok. 0,5%/°C [7]. Emisja ciepła, która jest efektem ubocznym konwersji fotowoltaicznej, odgrywa tu paradoksalnie negatywną rolę, jako że jest ona wprost proporcjonalna do ilości promieniowania słonecznego, od którego zależy ilość wygenerowanego prądu. Jednym z rozwiązań jest naturalna wentylacja modułu PV, która zapewnia jego schładzanie [8]. Wprawdzie wolnostojące moduły PV cechują się na ogół korzystnymi warunkami odprowadzenia ciepła do otoczenia (m.in. z uwagi na ekspozycję obu płaszczyzn modułu na oddziaływanie wiatru jako czynnika chłodzącego), jednak podlegają wpływowi temperatury otoczenia, wynikającej z nagrzewania się podłoża dachowego. Ocenia się, że w popularnych dachach krytych papą latem temperatura przy ich powierzchni może dochodzić nawet do 80°C, podczas gdy dachy zielone nagrzewają się do ok. 25°C. Amplituda temperatury na przestrzeni całego roku w przypadku tych dachów wynosi 40–50°C, zaś bitumicznych (standardowych) aż 100°C [9]. Badania w tym zakresie potwierdzają pozytywny wpływ zielonych dachów na efektywność





Fot. 3. Koncepcja konkursowa (III nagroda) energoefektywnego przedszkola w Twardogórze (proj.: A. Starzyk, J. Marchwiński, współpraca: M. Donderewicz) z zastosowaniem modułów PV jako shadovoltaic system; źródło: autor

pracy modułów krzemowych, choć wzrost ten wynosi kilka procent [10]. W bardziej wyrafinowanych systemach zielonego dachu sugeruje się wykorzystanie systemu nawadniania do chłodzenia cieczowego modułów PV [11].

Moduły PV na niezależnej podkonstrukcji

Pochodną aplikacji opisywanych w poprzednim punkcie jest umieszczanie modułów PV na zbiorczej podkonstrukcji. Rozwiązania takie są spotykane na ogół w przypadku zastosowań elewacyjnych, tworząc niezależną ażurową ścianę wysuniętą przed lico elewacji (np. budynek WMO w Genewie) [6]. Jednakże analogiczne struktury spotykane są również w zastosowaniach dachowych.

W koncepcji budynku Centrum Dydaktycznego Nauk Medycznych i Nauk o Zdrowiu Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego w Częstochowie (arch. J. Marchwiński, J. Biernawski, J. Sobczyk, M. Dolbniak) zastosowano niezależną podkonstrukcję jako zwieńczenie dachu budynku (fot. 2).

Strukturę zaprojektowano ze stali ocynkowanej i osadzono na niej zespoły modułów PV o łącznej mocy ok. 6 kWp. Zostały one zaprojektowane w postaci wydłużonych listew poziomych o nachyleniu 40°. Listwy te osadzono w dziesięciu rzędach i odsunięto od siebie, by nie doszło do samozacienienia. Przerwy między rzędami modułów PV są puste. Cała struktura tworzy rodzaj ażurowego zadaszenia.

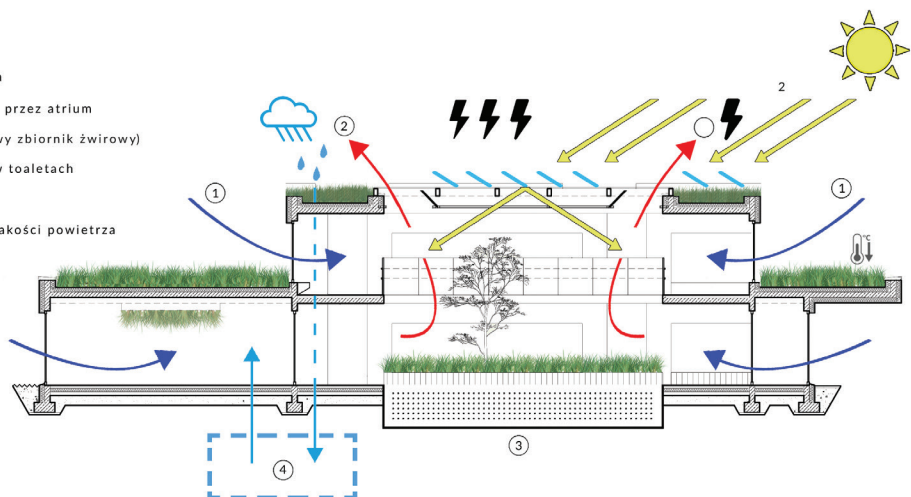
Podkonstrukcja została wyprofilowana w taki sposób, by nadać modułom PV ekspozycję południową.

Nachylenie modułów jest niezależne – są one przymocowane do bocznych ramion podkonstrukcji. Podkonstrukcja z osadzonymi modułami PV jest wyniesiona ponad poziom pokrycia dachu na wysokość ~ 2,5–3 m, co w praktyce uniezależnia moduły PV od wpływu nagrzewania się pokrycia dachowego (mimo tego w projekcie dach pokryty jasnym żwirem – materiałem o wysokiej refleksyjności i w związku z tym o niewielkiej podatności do nagrzewania się). Ażurowość oraz wyeks-

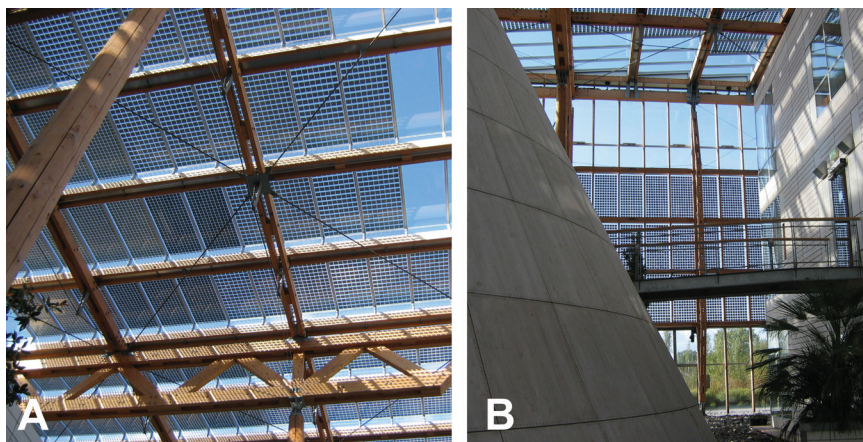
ponowanie konstrukcji ponad dach zapewnia skuteczne chłodzenie. Jednakże opisywane rozwiązanie zostało podyktowane przesłankami wykraczającymi poza aspekty energetyczne. Wyniesienie ażurowego zadaszenia z modułami PV znacząco ponad linię gzymsu sprawia, iż jest ono widoczne z poziomu przechodnia. Inspirowane zwieńczeniami zastosowanymi na dachu budynku Haas-Haus w Wiedniu oraz City Bank w Katowicach, tworzy kompozycyjne zamknięcie elewacji od strony północnej, a także zaakcentowanie dominującego narożnika budynku z wejściem głównym. Profil zadaszenia opadający w kierunku południowym jest nie tylko racjonalny z punktu widzenia energetycznego (ekspozycja pd.), ale wznosząc się w kierunku północnym, potęguje ekspresję architektoniczną narożnika, przyczyniając się do wzmocnienia poczucia jego roli jako dominanty formalnej i użytkowej budynku. Mimo iż moduły PV nie są fizycznie zintegrowane z jego kubaturą, odgrywają ważną rolę estetyczną jako BIPV.

KONCEPCJA PASYWNEGO OGRZEWANIA I CHŁODZENIA BUDYNKU + WYKORZYSTANIE FOTOWOLTAIKI

1. Napływ chłodnego i świeżego powietrza
 2. Wyrzut ogrzanego i zużytego powietrza przez atrium
 3. Pasywny magazyn ciepła (podposadzkowy zbiornik żwirowy)
 4. System wykorzystania wody opadowej w toaletach
- Fotowoltaika
 Zielen jako modyfikator temperatury i jakości powietrza



Fot. 4. Koncepcja energoefektywnego przedszkola w Twardogórze – schemat wykorzystania modułów PV w strategii ekologiczno-energetycznej; źródło: autor



Fot. 5. Ogniwa PV zintegrowane ze szklaną powłoką budynku Akademii Mont-Cenis w Herne (proj.: Jourda & Perraudin); źródło: autor

Należy również wspomnieć o użytkowej roli ażurowych zadaszeń. Choć opisywany projekt tego nie przewidywał, w przypadku dachów użytkowych (lub innych powierzchni użytkowych, np. otwartych atriów) takie zadaszenia nadają się do roli struktur zacieniających, tworząc rodzaj pergoli zintegrowanej z fotowoltaiką. Rozwiązanie takie zastosowano np. w budynku „Rohm Building” w Kyoto, w którym ruchomy dach PV tworzy rodzaj baldachimu przerzuconego nad półotwartym dziedzińcem między dwiema bryłami budynku [12].

Moduły PV jako shadovoltaic system

Termin shadovoltaic pochodzi od połączenia słów shadow (cień) i voltaic (generujący napięcie elektryczne). Mianem tym określa się zatem fotowoltaiczne systemy zacieniające. Ich istota sprowadza się do ochrony przeciwsłonecznej przeszklonych przegród w obudowie budynku. Ich zaletą jest fakt blokowania nadmiaru promieni słonecznych do wnętrza poprzez ich pochłanianie i generowanie prądu elektrycznego. Działanie systemów shadovoltaic jako ochrony przed przegrzewaniem pomieszczeń i generadora prądu elektrycznego są ze sobą zbieżne – wraz ze wzrostem pozyskiwania promieni słonecznych rośnie skuteczność ochrony przeciwsłonecznej. W aplikacjach dachowych rozwiązania te mogą być stosowane jako zewnętrzny system zacieniający zintegrowany ze świetlikami dachowymi [6].

Takie rozwiązanie zaproponowano w projekcie konkursowym energoefektywnego przedszkola w Twardogórze (arch. A. Starzyk, J. Marchwiński) (fot. 3.).

Budynek cechuje się przeszklonym atrium centralnym, tworzącym serce budynku i jego strefę reprezentacyjną. Atrium jest elementem strategii energetycznej. W założeniu stanowi pasywny kolektor ciepła oraz przestrzeń doświetlającą światłem naturalnym głębokie trakty użytkowe budynku. W okresie letnim rozwiązanie to wymaga szczególnej ochrony przed przegrzewaniem. W celu wyeliminowa-

nia konieczności stosowania energochłonnych systemów klimatyzacyjnych koncepcję oparto w głównej mierze na rozwiązaniach pasywnych. Obok zapewnienia naturalnej wentylacji poprzeczno-wyporowej oraz wprowadzenia do wnętrza atrium masywnych nieizolowanych stropów monolitycznych jako tzw. masy termicznej wraz z zielenią ważnym elementem strategii letniej w klimatyzowaniu (a także oświetleniu) atrium jest dachowy shadovoltaic system (fot. 4.).

Rozwiązano go na stelażu stalowym mocowanym do podkonstrukcji szklanego świetlika. Zaproponowano krzemowe moduły PV w postaci półek przeciwsłonecznych (10 kWp). Zorientowano je w stronę południową z odchyleniem $\sim 10^\circ$ – odchylenie to wynikało z ustawienia budynku i świetlika dachowego względem stron świata. Moduły PV w założeniu pochłaniają bezpośrednio promieniowanie letnie, pozwalając na dopływ światła rozproszonego do wnętrza. W koncepcji, kierując się względami ekonomicznymi, zaproponowano system tradycyjny o stałym nachyleniu modułów PV wynoszącym 30° . Skuteczniejsze w omawianym aspekcie są systemy regulowane. Możliwość regulacji kąta położenia fotowoltaicznych półek przeciwsłonecznych pozwala na optymalne pozyskiwanie energii promieniowania słonecznego przez cały rok, a zatem i kontrolę dopływu światła naturalnego. W okresie zimowym, przy bardziej wertykalnym położeniu modułów PV dostosowanym do niższej padających promieni słonecznych, następuje większe odświeżenie świetlika w jego płaszczyźnie poziomej, przez co i większa przepuszczalność światła. W okresie letnim półki silniej zamykają płaszczyznę dachową, stanowiąc szczelniejszą ochronę przeciwsłoneczną.

Ważnym aspektem, poza omówionymi zagadnieniami użytkowymi, jest estetyka. Shadovoltaic system, jakkolwiek mocniej eksponowany na elewacjach, może być elementem oddziałującym na funkcję estetyczną budynku, kształtując jego partię dachową.

Zazwyczaj nie ma problemu z dopasowaniem najkorzystniejszego kąta nachylenia i orientacji względem stron świata. Istotne jest rozmieszczenie modułów PV, które na ogół lokalizuje się w rzędach.

Rozbudowany system jako rozwiązanie z wyeksponowaną konstrukcją i elementami PV przywodzi skojarzenia z architekturą high tech. Wpływ na funkcję estetyczną nie zawęża się ponadto do kształtowania dachu budynku jako piątej elewacji (wpływ ten może być znaczny lub ograniczony w zależności od cech przestrzennych budynku i lokalizacji systemu shadovoltaic). Aspektem, na który należy zwrócić uwagę, jest rola omawianego systemu PV w kształtowaniu estetyki wnętrza.

Ogniwa PV zintegrowane ze szklanym dachem

W ramach fotowoltaiki zintegrowanej z budynkiem (BIPV) jedną z form tej integracji jest wykorzystanie elementów PV jako zewnętrznych przeszkleń budynku. Przeszklenia są na ogół realizowane jako zestawy szybowe, z których szyba zewnętrzna stanowi laminat wyposażony w warstwę fotowoltaiczną. Rozwiązania te są stosowane zarówno na dachach, jak i elewacjach jako alternatywa dla szklenia przeciwsłonecznego [2].

Najbardziej popularne przeszklone elementy PV bazują na ogniwach grubowarstwowych (I generacji). Ogniwa te są nieprzeziernie. Z tego powodu, w celu nadania elementowi PV cech tradycyjnego szklenia, czyli przepuszczalności światła, ogniwa PV zostają rozsunięte w obrębie powierzchni szybowej. Rozsunięcie ogniw PV daje standardowo przepierność na poziomie 30–50% i zależy od stopnia rozsunienia ogniw (powstałe szczeliny między ogniwami PV są elementem przepuszczającym światło). Kontakt wzrokowy z otoczeniem nie jest możliwy, co jednak ma większe znaczenie w aplikacjach elewacyjnych [13]. W aspekcie energetycznym im większe rozsunienie ogniw PV, tym potencjalnie mniejsza moc szczytowa modułu PV.

Opisywane rozwiązanie zastosowano na dachu i fragmencie elewacji pd. budynku Akademii Mont-Cenis w niemieckim mieście Herne (arch. Jourda & Perraudin) (fot. 5.).

Jest to jedna z największych instalacji PV w obrębie pojedynczego budynku (~ 1 MWp). Tak dużą moc uzyskano głównie dzięki dachowym elementom PV, które tworzą całkowicie przeszklony dach o długości 168 m [14]. Nie tylko dach, ale cały budynek został przeszklony, tworząc tzw.

osłonę bioklimatyczną. Jest to obiekt eksperymentalny, zawierający szereg rozwiązań proekologicznych i energooszczędnych zwróconych w stronę niezależności energetycznej oraz kreowania wysokiej jakości przestrzeni wewnętrznej opartej na naturalnym mikroklimacie. Cała wewnętrzna przestrzeń szklarna jest formą wieloprzestrzennego ogrodu zimowego, przeznaczanego na pracę, naukę, rekreację i nawiązywanie kontaktów interpersonalnych. Obiekt stanowi wynik holistycznej koncepcji wykorzystania czystych oraz odnawialnych źródeł energii, głównie energii słonecznej. Elementy PV, w tym dominujące elementy dachowe, są odpowiedzialne za generowanie energii elektrycznej, której nadmiar zasila pobliskie osiedle mieszkaniowe, jednocześnie pełniąc funkcję ochrony przed przegrzaniem i doświetlenia naturalnego wnętrza. Ogniwa PV rozsunięto w obrębie poszczególnych paneli nierównomiernie oraz wymieszano je z tradycyjnymi panelami szklanymi, uzyskując ciekawy efekt wizualny – dopływ światła do wnętrza jest zmienny, imitując naturalne warunki oświetleniowe występujące

podczas częściowego zachmurzenia nieba i zmiennego położenia Słońca nad horyzontem (fot. 5a). Elementy te wywierają wpływ na estetykę wnętrza. W słoneczne dni generują silne efekty światłocieniowe – z tego powodu, zwłaszcza w aplikacjach elewacyjnych, nie są rozwiązaniem korzystnym w pomieszczeniach wymagających wysokiej jakości środowiska wizualnego (np. w biurach). Jednakże w przypadku zastosowań dachowych, jak w omawianym budynku, „gra” światła i cienia nie jest na ogół zjawiskiem dokuczliwym, a w aspekcie estetycznym – korzystnym.

Przeszklony dach pokryty ogniwami PV, mimo iż przy swych gabarytach tworzy wrażenie płaskiego, w rzeczywistości jest dachem pilastym (fot. 5b). Nachylenie elementów PV jest wymuszone potrzebą odprowadzania wody opadowej, a przede wszystkim eliminacją ryzyka zalegania pokrywy śnieżnej, która przysłoniłaby powierzchnię ogniw PV, redukując tym samym zyski elektryczne. Nachylenie w kierunku pd. jest też podyktowane chęcią zwiększenia efektywności pracy elementów PV, analogicznie do wcześniej opisanych aplikacji.

Podsumowanie – architektoniczne możliwości i ograniczenia zastosowań elementów PV na dachach

Architektoniczne możliwości i ograniczenia zanalizowanych zastosowań dachowych elementów PV scharakteryzowano w czterech podstawowych aspektach: estetycznym, użytkowym, budowlanym oraz energetycznym (tab. 1.).

Wnioski

Omówiona problematyka prowadzi do ogólnego wniosku, iż zastosowanie technologii PV w obrębie dachów płaskich nie musi sprowadzać się do podstawowej roli jako generatora prądu elektrycznego. Znaczne możliwości leżą w zakresie rozwiązań estetycznych i użytkowych, ukierunkowanych w stronę integracji elementów PV jako tworzywa budowlanego oraz architektonicznego. Ważnym aspektem jest możliwość włączania technologii PV w holistyczną strategię energooszczędną i proekologiczną, nadając jej dodatkową rolę jako rozwiązanie pasywne w kształtowaniu środowiska termicznego oraz

Tab. 1. Zestawienie zbiorcze architektonicznych możliwości i ograniczeń dotyczących różnych zastosowań elementów PV na dachach płaskich; źródło: autor

	Wolnostojące moduły PV	Moduły PV na niezależnej konstrukcji	Moduły PV jako shadovoltaic system	Ogniwa PV zintegrowane ze szklanym dachem
Aspekt estetyczny	Ograniczony wpływ na kształtowanie formy architektonicznej. Czytelna odrębność estetyczna instalacji PV i architektury budynku (BAPV). Wpływ estetyczny ogranicza się zasadniczo do dachu jako piątej elewacji.	Możliwość tworzenia kompozycyjnego zwieńczenia dachu, ekspresyjnych nawiązań, podkreślenia miejsc formalnie i funkcjonalnie ważnych. Ograniczenie wpływu na funkcję estetyczną przy mało rozbudowanej podkonstrukcji.	Jak moduły PV na niezależnej konstrukcji. Ponadto: wpływ na estetykę wnętrza, choć ograniczony z uwagi na przesłonięcie przez elementy konstrukcji szklanego dachu.	Możliwość kształtowania funkcji estetycznej wnętrza poprzez tworzenie efektów plastyczno-malarskich szklanego dachu, a także efekty światłocieniowe we wnętrzu. Wpływ na zewnętrzny sylwetkę budynku mocno ograniczony.
Aspekt użytkowy	Brak wpływu na cechy użytkowe budynku.	Możliwość tworzenia zewnętrznych struktur zacieniających. Zasadniczo wpływ na cechy użytkowe budynku ograniczony.	Rola zacieniająca i sterująca (w przypadku półek ruchomych) dopływem promieni słonecznych – możliwość wpływu na środowisko termiczne i wizualne przestrzeni wewnętrznej. Skuteczność w tym zakresie uważana za wyższą w porównaniu do ogniw PV zintegrowanych ze szkleniem z uwagi na większą swobodę ustawienia, możliwości mobilne i fakt usytuowania po zewnętrznej stronie szklenia.	Rola zacieniająca – ochrona przed dopływem promieni słonecznych – wpływ na środowisko termiczne i wizualne przestrzeni wewnętrznej. Ograniczenia w przestrzeni wymagającej wysokiej jakości oświetlenia (np. w pomieszczeniach biurowych). W porównaniu do shadovoltaic system większe ryzyko przegrzewania pomieszczeń z uwagi na emisję ciepła z powierzchni szklenia do wnętrza.
Aspekt budowlany	Niezależna podkonstrukcja aluminiowa lub stalowa, na ogół systemowa – rodzaj mocowania zależy od budowy warstw dachowych – w dachach odwróconych możliwość wykorzystania warstw wierzchnich jako balastu bez potrzeby ingerencji w strukturę i hydroizolację.	Niezależna podkonstrukcja stalowa, na ogół rozwiązanie dostosowane indywidualnie do projektu. Potencjalne ograniczenia w zabudowie wysokiej z uwagi na wzmożone oddziaływanie wiatru.	Jak moduły PV na niezależnej konstrukcji, przy czym mocowanie może odbywać się do konstrukcji lub podkonstrukcji szklanego dachu. Potencjalne ograniczenia w zabudowie wysokiej z uwagi na wzmożone oddziaływanie wiatru.	Wykorzystanie konstrukcji/podkonstrukcji szklanego przekrycia dachowego (jak panele szklane tradycyjne). Z uwagi jednak na zalecenie nachylenia szklanych połaci dachowych z elementami PV celem eliminacji zalegania warstw opadowych na powierzchni ogniw PV może wystąpić konieczność dostosowania konstrukcji dachu do wymaganego nachylenia szklenia z ogniwami PV.
Aspekt energetyczny	Duża swoboda dostosowania optymalnej ekspozycji i kąta nachylenia modułów PV. Korzystne warunki chłodzenia – ekspozycji na wiatr. Nieznaczne uzależnienie od rodzaju podłoża w aspekcie oddziaływania temperatury powietrza przy jego powierzchni. Podatność na zacienienie i samozaćienienie wymagająca uwzględnienia istniejących elementów dachowych i dopasowania odległości między rzędami modułów PV.	Duża swoboda dostosowania optymalnej ekspozycji i kąta nachylenia modułów PV, choć ograniczona elastyczność rozmieszczenia (z uwagi na podkonstrukcję zbiorczą) – cechy przestrzenne i lokalizacja podkonstrukcji podlega regułom estetycznym, które mogą tę elastyczność ograniczać. Uniezależnienie się od istniejących elementów dachowych oraz oddziaływania temperatury pokrycia dachowego. Bardzo dobre warunki ekspozycji na wiatr jako czynnik chłodzący.	Swoboda optymalnej ekspozycji i kąta nachylenia modułów PV, ekspozycja na wiatr jako czynnik chłodzący: podobnie jak w przypadku modułów na niezależnej podkonstrukcji. Rozmieszczenie uzależnione od lokalizacji i cech przestrzennych szklanego dachu. Możliwość wykorzystania w pasywnych systemach słonecznych (np. strukturach szklarniowych) jako element koncepcji naturalnego klimatyzowania i oświetlenia wnętrza.	Możliwość wykorzystania w pasywnych systemach słonecznych (np. strukturach szklarniowych) jako element koncepcji naturalnego klimatyzowania i oświetlenia wnętrza. Ograniczona swoboda nachylenia i orientacji względem stron świata uzależniona od koncepcji przekrycia dachu. Utrudnione warunki chłodzenia wiatrem, jako że powierzchnia wewnętrzna szklanych osłon PV przylega do przestrzeni wewnętrznej.

oświetleniowego [15]. Szczególnie korzystne mogą być tu mobilne elementy PV. Wymagania energetyczne, jak orientacja względem stron świata, całkowita ekspozycja na słońce, kąt nachylenia, zasadniczo nie wpływają negatywnie na możliwości integracji elementów PV z architekturą budynku. Duży potencjał estetyczny i użytkowy leży w kształtowaniu podkonstrukcji wsporczych – te elementy, służąc efektywnej pracy elementów PV, mogą stać się cennym składnikiem funkcji estetycznej oraz użytkowej. Ważnym aspektem jest możliwość wpływu na estetykę wnętrza, zwłaszcza w przypadku ogniw PV zintegrowanych ze szklanym dachem.

Istnieją oczywiste ograniczenia związane z wyeksponowaniem elementów PV w sylwecie budynku. Dachowe elementy PV nie są w stanie konkurować na tym polu z aplikacjami fasadowymi. Zastosowania tradycyjne w postaci wolnostojących modułów PV cechują się największymi ograniczeniami estetycznymi i użytkowymi, choć są najbardziej racjonalne z punktu widzenia energetycznego. Tworzenie rozbudowanych podkonstrukcji wsporczych może podlegać ograniczeniom w warunkach silnego oddziaływania wiatru (np. budynkach wysokich), choć są one korzystne z uwagi na możliwości chłodzenia elementów PV. Aplikacje w postaci ogniw PV zintegrowanych ze szklanym dachem podlegają najsilniejszym ograniczeniom związanym z zapewnieniem optymalnych warunków dla generowania energii elektrycznej, a ich częściowa przezierność odbywa się kosztem mocy jednostkowej panelu PV.

Bibliografia

- [1] Shukla A.K., Sudhakar K., Baredar P., Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings* 140, 2017, s. 188–195.
- [2] Roberts S., Guariento N., *Building Integrated Photovoltaics – a Handbook*. Wyd. Birkhäuser 2009.
- [3] Chwieduk D., *Energetyka słoneczna budynku*. Wyd. Arkady, Warszawa 2011.
- [4] ATB Becker – materiały szkoleniowe z warsztatów „Train the Trainer”. Wiedeń 2006.
- [5] Marchwiński J., Zielonko-Jung K., *Architectural Concept of Sustainable Building in Warsaw*. *International Journal of Human and Social Sciences* 5:2 2010, s. 91–96.
- [6] Humm O., Toggweiler P., *Photovoltaics in Architecture*. Wyd. Birkhäuser 1993.
- [7] Sarniak M.T., *Podstawy fotowoltaiki*. Wyd. OWPW, Warszawa 2008.
- [8] Marchwiński J., *Aspekt termiczny wykorzystania modułów fotowoltaicznych w architekturze*. „Materiały Budowlane” 6/2013, s. 68–71.
- [9] Marchwiński J., Zielonko-Jung K., *Ochrona przeciwsłoneczna w budynkach wielorodzinnych. Pasywne rozwiązania architektoniczno-materiałowe*. Wyd. WSEiZ, Warszawa 2013.
- [10] Lee E.J., *A Study on Correlation between Improvement in Efficiency of PV and Green roof of Public Building*. „KIEAE Journal” 13 (5) 2013.
- [11] Baumann T., Shär D., Carigiet F., Dreisiebner A., Baumgartner F., *Performance Analysis of PV Green Roofs Systems*. 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2016), Munich, June 2016.
- [12] Marchwiński J., *Technologia fotowoltaiczna na dachach budynków – spojrzenie architektoniczne*. „Świat Sztka” 06/2006, s. 18–24.
- [13] Marchwiński J., *Fasady fotowoltaiczne*. Technologia PV w architekturze. Wyd. WSEiZ, Warszawa 2012.
- [14] Kugel C., *Green Academy*. *Architectural Review* 10, 1999, s. 51–55.
- [15] Marchwiński J., Zielonko-Jung K., *Architectural Problems of Integration of Passive Solar Elements with Photovoltaic (PV) Technology*. ISES Solar World Congress. *Solar Energy for a Sustainable Future*, Goteborg 14–19.06.2003, Proceedings no. P2 57.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8258

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
Marchwiński Janusz, 2022, Fotowoltaika na dachach płaskich – architektoniczne możliwości i ograniczenia, „Builder” 5 (298). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8258

Streszczenie: W artykule zanalizowano sposoby zastosowania technologii fotowoltaicznej (PV) na dachach płaskich budynków. Celem pracy jest ukazanie architektonicznych możliwości i ograniczeń aplikacji dachowych w postaci: wolnostojących modułów PV, modułów PV na niezależnej podkonstrukcji, modułów PV jako shadowvoltaic system oraz ogniw PV zintegrowanych ze szklanym dachem. Analiz dokonano w oparciu o przykłady budynków, z wykorzystaniem autorskich projektów koncepcyjnych. Wykorzystano metodę konstrukcyjną, obserwacyjną i porównawczą. Badania ograniczono do szeroko rozumianych aspektów architektonicznych. Skupiono się na zagadnieniach estetycznych, użytkowych oraz budowlanych, nie tracąc z pola widzenia przesłanek energetycznych, które stanowią podstawę stosowania systemów PV. Wyniki badań prowadzą do ogólnego wniosku, iż zastosowanie technologii PV w obrębie dachów płaskich nie musi sprowadzać się do podstawowej roli jako generatora prądu elektrycznego. Znaczne możliwości leżą w zakresie rozwiązań estetycznych i użytkowych, choć na tym polu istnieją również ograniczenia.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, BAPV, BIPV, systemy PV

Abstract: PHOTOVOLTAICS ON FLAT ROOFS – ARCHITECTURAL POSSIBILITIES AND LIMITATIONS. In the article, the methods of using photovoltaic (PV) technology on the flat roofs of buildings have been analysed. The article aims to present the architectural possibilities and limitations related to roof applications in the following forms: free-standing PV modules, PV modules on an independent substructure, PV modules as a shadowvoltaic system, and PV cells integrated with the glass roof. The analysis was conducted based on examples of buildings, whereas original conceptual designs were used. Construction, observational and comparative methods were applied. The research was limited to broadly understood architectural aspects. The focus was placed on aesthetic, utility, and construction issues. However, energy targets were taken into account, as they provide the basis for the use of PV systems. The research results prompted the general conclusion that the application of PV technology within flat roofs needs not to be limited to its fundamental role as an electric current generator. Significant opportunities in the field of aesthetic and functional solutions were observed, although certain limitations may be noted in this field as well.

BUILDER SCIENCE

Builder
OPEN ACCESS

BUILDER SCIENCE - dział miesięcznika **BUILDER** dostępny w ramach open access journals, w którym publikowane są artykuły naukowe w następujących dyscyplinach naukowych: architektura i urbanistyka oraz inżynieria lądowa i transport. Artykuły naukowe indeksowane są w bazach danych: Index Copernicus, BazTech i EBSCO.

40 punktów MEiN

WWW.BUILDERSCIENCE.PL