

Wysokoefektywny hybrydowy panel fotowoltaiczny z minikanalowym kolektorem cieczowym

Streszczenie. W artykule zaprezentowano koncepcję wysokoefektywnego hybrydowego panelu fotowoltaicznego wykorzystującego chłodzenie cieczowe. W odróżnieniu od rozwiązań obecnie obecnych na rynku, posiada on część fotowoltaiczną i kolektorową zintegrowane z sobą oraz kolektor cieplny wykonany jako dedykowana płyta chłodząca wyposażona w wysokoefektywny mikrokanałowy wymiennik ciepła. Pozwala to na efektywne chłodzenie ogniw słonecznych i przeciwdziałanie spadkowi ich efektywności w wyniku przegrzania. Zostało to potwierdzone eksperymentalnie

Abstract. The article presents the concept of a high-efficient hybrid photovoltaic panel with liquid cooling system. In contrast to other products available on the market, its photovoltaic and thermal collector parts are integrated and the collector is manufactured as a dedicated cold plate covering a high-efficient microchannel heat converter. It allows effective cooling of solar cells and preventing against the decrease of their efficiency due to overheating. It has been proved experimentally. (**High-efficiency hybrid photovoltaic panel with a mini-channel liquid collector**)

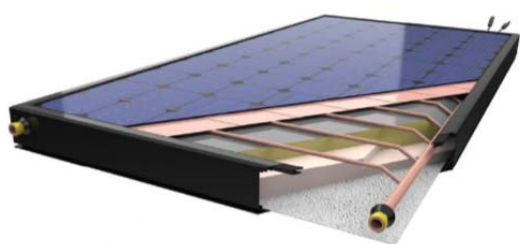
Słowa kluczowe: panel hybrydowy, pv/t, fotowoltaika, efektywność ogniw słonecznych.

Keywords: hybrid module, pv/t, photovoltaics, solar cell efficiency.

Wstęp

Odnawialne źródła energii odgrywają coraz większą rolę w świecie energetyki, a jednym z nich są ogniwa fotowoltaiczne przetwarzające energię promieniowania słonecznego bezpośrednio w energię elektryczną [1]. Proces ten dotyczy jednak jedynie części dostarczonej energii, a jego efektywność, np. w ogniwach krzemowych, wynosi około 20% [2]. Pozostała część energii promieniowania słonecznego jest przejmowana przez ogniwo w postaci ciepła zwiększającego temperaturę ogniw PV. Czynnikiem ten wpływa negatywnie na efektywność konwersji fotowoltaicznej w modułach fotowoltaicznych. Maleje ona wraz ze wzrostem temperatury elementów PV od 0,4% do 0,9% na każdy stopień powyżej temperatury znamionowej [3].

Energia słoneczna jest także wykorzystywana użytecznie w kolektorach cieplnych, określanych także jako panele solarne, w których pochłonięta energia promieniowania słonecznego jest wykorzystywana do ogrzania wody lub innego czynnika chłodzącego i wykorzystywana jako źródło ciepłej wody w instalacjach domowych lub przemysłowych. Tą drogą można wykorzystać dla celów użytkowych około 40% energii dostarczanej przez pochłonięte promieniowanie ciepłe.



Rys.1 Poglądowy widok typowej konstrukcji panelu PVT [5]

Rozwiązaniem łączącym oba procesy użytecznego wykorzystania energii słonecznej są panele hybrydowe PVT (photovoltaic/thermal), stanowiące połączenie klasycznego panelu PV z kolektorem cieczowym. Jego konstrukcja przedstawiona jest schematycznie na Rys.1. Można na nim wyróżnić część fotowoltaiczną, odpowiedzialną za konwersję energii słonecznej na elektryczną oraz część kolektorową, która pełni dwie role: przejmuje energię cieplną rozproszoną w panelu oraz schładza część

fotowoltaiczną zwiększając jej sprawność. Rozwiązanie to pozwala na sumaryczne zwiększenie wydajności całego urządzenia w granicach 50-60% [4].

Badania nad rozwiązaniami hybrydowymi paneli fotowoltaicznych sięgają końca XX wieku i zaowocowały one już pojawieniem się na rynku pierwszych rozwiązań komercyjnych. Jednak, poszukiwania optymalnych rozwiązań takich paneli są ciągle kontynuowane, co wynika z faktu, że hybrydowy panel solarny nie jest zazwyczaj konstrukcją tworzoną od zera, ale jest efektem zintegrowania dwóch dojrzałych i stale rozwijających się samodzielnych rozwiązań, panelu fotowoltaicznego i solarnego kolektora cieczowego. Z tego względu, samo złożenie w jednej obudowie obu elementów składowych, wybranych z aktualnej oferty rynkowej, nie daje optymalnej konstrukcji, uwzględniającej specyfikę ich wzajemnych oddziaływań i zapewniającej oczekiwaną efektywność całej konstrukcji przy akceptowalnych kosztach wykonania.

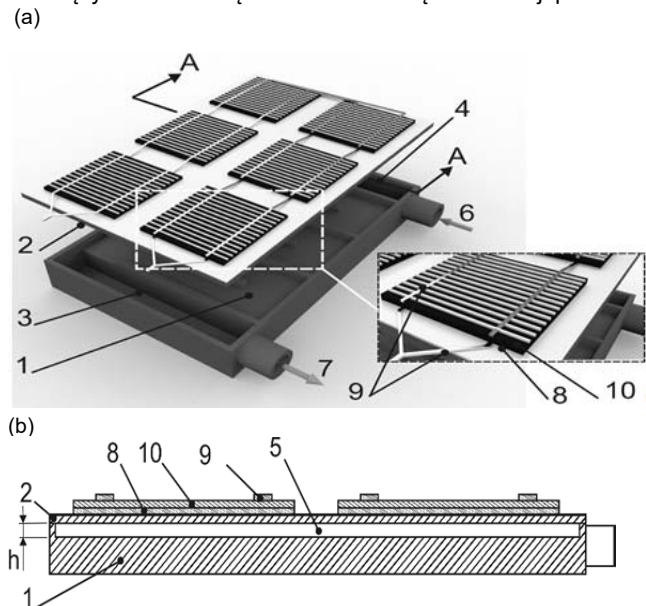
Dla efektywności całego systemu PV/T istotne znaczenie ma utrzymanie temperatury elementów fotowoltaicznych na jak najniższym poziomie, bliskim temperaturze wlotowej cieczy chłodzącej. Powinno to umożliwić utrzymanie wysokiej efektywności konwersji fotowoltaicznej przy wystawieniu panelu na ekspozycję promieniowania słonecznego. Uzyskanie takiego efektu poprzez odpowiednią modyfikację konstrukcji panelu PV/T było przedmiotem badań podjętych w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych PŁ. W rozwiązaniu będącym efektem tych prac osiągnięto to dzięki integracji części fotowoltaicznej i kolektora ciepła prowadzącej do zmniejszenia dystansu między elementami fotowoltaicznymi a cieczą chłodzącą, oraz wprowadzeniu, w miejsce stosowanych dotychczas rozwiązań typowych dla kolektorów solarnych, rozwiązania wykorzystującego efekt przepływu minikanalowego cieczy chłodzącej, gwarantujący zwiększoną efektywność wymiany ciepła pomiędzy cieczą a ściankami kolektora [8]. Wykorzystano tu koncepcję dedykowanej płyty chłodzącej („custom cold plate”), stosowanej do chłodzenia systemów zintegrowanych mocy o dużej powierzchni oddawania ciepła. Wyniki tych prac są przedstawione w dalszej części artykułu.

Koncepcja zintegrowanego panelu PV/T

Dla efektywności systemu PV/T istotne znaczenie ma utrzymanie temperatury elementów fotowoltaicznych na jak najniższym poziomie, bliskim temperaturze otoczenia, lub

temperaturze wlotowej cieczy chłodzącej. Efekt ten można uzyskać zwiększając efektywność odbioru ciepła przez ciecz. W prezentowanym rozwiązaniu hybrydowym zastrzeżonym w zgłoszeniu patentowym nr. PL238548B1 [6], jest to osiągnięte dzięki integracji części fotowoltaicznej i kolektorowej, prowadzącej do zmniejszenia dystansu między elementami fotowoltaicznymi a cieczą chłodzącą, oraz wprowadzeniu w miejsce stosowanych dotychczas rozwiązań typowych dla kolektorów solarnych, rozwiązania wykorzystującego efekt przepływu minikanalowego cieczy chłodzącej, gwarantujący zwiększoną efektywność wymiany ciepła pomiędzy cieczą a ściankami kolektora [7]. W rozwiązaniu tym wykorzystano koncepcję dedykowanej płyty chłodzącej („custom cold plate”), stosowanej do chłodzenia systemów zintegrowanych mocy o dużej powierzchni oddawania ciepła.

Budowa prezentowanego hybrydowego panelu solarnego jest przedstawiona na rys.2. Jego podstawowymi elementami są dedykowana płyta chłodząca (1) stanowiąca bazę części kolektorowej, płaska płyta (2) stanowiąca zarówno górne ograniczenie części kolektorowej jak i element konstrukcyjny części fotowoltaicznej oraz zabudowane na niej elementy fotowoltaiczne (10) stanowiące część fotowoltaiczną. Mała grubość obszaru przepływu cieczy (5) utworzonego pomiędzy płytą (1) i płytą (2) zapewnia warunki przepływu minikanalowego charakteryzujące się zwiększonym współczynnikiem wymiany ciepła na granicy ciecz chłodząca/ścianka kanału, a jednostronnie pokryta cienką warstwą izolującą, płyta (2), ograniczająca z góry część kolektorową, stanowi jednocześnie element nośny dla elementów fotowoltaicznych (10) oraz połączeń elektrycznych (8)-(9) tworzących razem część fotowoltaiczną konstrukcji panelu.



Rys. 2. Rysunek poglądowy przedstawiający rozłożony widok ogólny zintegrowanego panelu PV/T (a) oraz przekrój przez ten panel wzdłuż osi A-A (b).

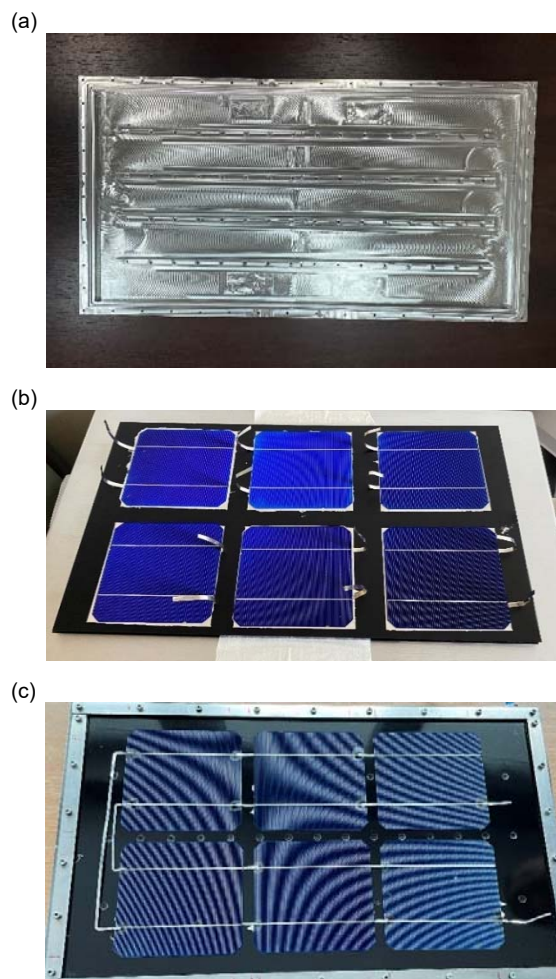
Wprowadzenie minikanalowego przepływu cieczy do części kolektorowej oraz jego integracja z bazą części fotowoltaicznej prowadzi do zmniejszenia rezystancji termicznej na drodze strumienia ciepła od elementów fotowoltaicznych do cieczy chłodzącej, zwiększając efektywność przejmowania ciepła przez ciecz chłodzącą. Polepszenie warunków chłodzenia elementów fotoelektrycznych prowadzi do istotnego obniżenia temperatury tych elementów przy jednoczesnym mniejszym wydatku cieczy chłodzącej, a co za tym idzie polepszenia parametrów

eksploatacyjnych hybrydowego panelu solarnego względem innych znanych rozwiązań PV/T.

Zapewnienie warunków przepływu minikanalowego w części kolektorowej wymaga zachowania małej grubości obszaru przepływu cieczy (5), co narzuca specyficzny kształt płyty chłodzącej. Aby zapewnić możliwie jednorodny przepływ chłodzącej cieczy przy stosunkowo małym spadku ciśnienia w części kolektorowej, obszar minikanalu o niewielkiej grubości h , rzędu 2 mm, jest dwustronnie ograniczony przez sekcje sprzęgające, które tworzą: komora wlotowa (4) z wlotem (6) oraz komora wylotowa (3) z wylotem (7). Ich przekroje dla dostarczanej i odbieranej strugi płynu chłodzącego są znacznie większe od grubości h i dobrane pod kątem zapewnienia laminarnego przepływu strugi w minikanale.

Model zintegrowanego panelu PV/T

Przedstawiona koncepcja zintegrowanego panelu PV/T została zweryfikowana w realizowanym przez Katerę projekcie badawczo rozwojowym POiR [8]. W oparciu o wstępne prace symulacyjne oraz materiałowe zaprojektowano w nim i wykonano model takiego panelu zawierającego 6 krzemowych struktur, zgodnie z poglądowym szkicem na Rys. 2.



Rys.3. Widok modelu panelu PV/T: (a) dedykowana płyta chłodząca, (b) zmontowana część fotowoltaiczna (c) zmontowany moduł

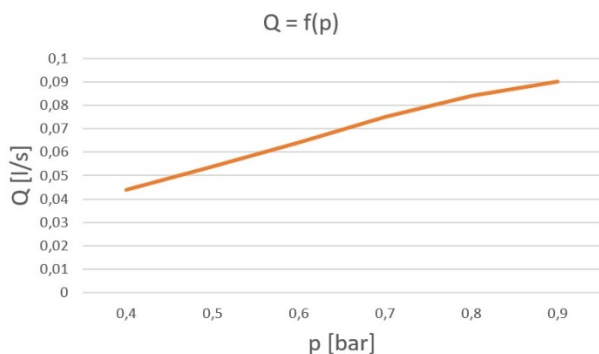
Zdjęcia jego podstawowych elementów, jak i całego modelu, prezentuje Rys.3. Model jest wykonany z aluminium i ma zewnętrzne wymiary 365 x 592 mm. Takie same wymiary ma widoczna na Rys.3a dedykowana płyta chłodząca. Jest ona wykonana jako prostokątna miska o

efektywnej powierzchni chłodzącej umieszczonej 2 mm poniżej jej krawędzi. Powierzchnia ta jest ograniczona z obu stron przez komory, wlotową i wylotową, o przekroju 2x2 cm. Ze względów niezawodnościowych, w obszarze przepływu cieczy wyodrębniono 5 kanałów poprzez wprowadzenie 4 elementów separujących o wysokości 2 mm. Po zamknięciu kolektora płytą górną stworzyło to 4 kanałowy system odbioru ciepła od płyty górnej utworzony przez równoległe połączenie kanałów o wysokości $h = 2$ mm.

Płyta górna stanowi bazę dla części fotowoltaicznej. Jak pokazano na Rys.3b zamontowano na niej 6 połączonych szeregowo monokrystalicznych krzemowych ogniw słonecznych o wymiarach 156 mm x 156 mm. Efektem zespolenia płyty chłodzącej i części fotowoltaicznej jest pokazany na Rys.3c gotowy model panelu PV, który został wykorzystany do oszacowania efektywności badanej koncepcji zintegrowanego panelu PV/T.

Eksperymentalna ocena efektywności modelu zintegrowanego panelu PV/T.

Wykonany model został poddany badaniom eksploatacyjnym w ramach prac prowadzonych w projekcie. Wyznaczono m.in. przedstawioną na Rys.4 charakterystykę przepływową jego części kolektorowej. Wiąże ona objętościową prędkość przepływu cieczy chłodzącej Q z ciśnieniem p na wlocie. Są to podstawowe parametry konstrukcyjne kolektorów solarnych informujące o ich warunkach pracy. Zbyt duże ciśnienie może prowadzić do uszkodzenia systemu, a zbyt mała prędkość może mieć wpływ na efektywność chłodzenia. Stąd dąży się w systemach solarnych do pracy przy niskim ciśnieniu i odpowiednio niskiej objętościowej prędkości przepływu, utrzymanymi na takim poziomie, aby utrzymać oczekiwaną temperaturę chłodzonej (ogrzewanej) powierzchni przy zadanej wartości przyjmowanej mocy.



Rys.4 Fragment charakterystyki przepływowej kolektora w modelu zintegrowanego panelu PV/T

W przypadku prowadzonych badań przyjęto, że przejmowana gęstość mocy ma sięgać typowej gęstości mocy dostarczanej do ogniwa przez promieniowanie słoneczne, zwykle rzędu 1000 W/m^2 , a przyrost temperatury płyty z ogniwami ma być mniejszy niż 5 C . W oparciu o symulacje termiczne stwierdzono, że te warunki powinny być spełnione przy parametrach przepływu odpowiadających fragmentowi krzywej przedstawionej na rys.4. Należy zwrócić uwagę, że zgodnie z tą krzywą wymagane warunki występują przy niewielkich wartościach obu parametrów w porównaniu z ich wartościami w typowych standardowych panelach PV/T. Jest to głównie efekt większej efektywności rozwiązania minikanalowego wymiennika ciepła, które pozwala na większy odbiór ciepła przy tej samej, a nawet mniejszej objętościowej prędkości przepływu płynu chłodzącego.

Aby ocenić rzeczywistą efektywność modelu hybrydowego panelu PV/T zbudowano dedykowany układ

pomiarowy nazwany „sztucznym słońcem”, przedstawiony w pracach [9,10]. Jak tam pokazano, pozwala on na przebadanie w warunkach laboratoryjnych efektywności modelu odpowiadającej jego pracy w warunkach rzeczywistych. Poniżej przedstawiono wyniki dwóch eksperymentów weryfikujących rozważania przedstawione w pierwszej części pracy.

Pierwszym z nich jest zbadanie na ile można zniwelować spadek efektywności modelu mikrokanałowego wywołany jego nagrzewaniem mocą świetlną 1000 A/m^2 , a następnie podłączeniem do niego strumienia cieczy chłodzącej poprzez ustawienie na jego wejściu ciśnienia 0,9 bar. Mechanizm chłodzenia uruchomiono po osiągnięciu przez ogniwa temperatury 80 C . Na rys. 5 przedstawiono diagram zmian aktualnej mocy elektrycznej P dostarczanej przez moduł względem mocy elektrycznej P_{max} dostarczanej przez moduł przy temperaturze pokojowej 25 C . Pokazany na rysunku stosunek mocy P/P_{max} jest wyznaczany dla zmian temperatury ogniw z krokiem 5 C . Jak widać na przedstawionym diagramie chłodzenie modułu fotowoltaicznego jest skuteczne i po uruchomieniu przepływu cieczy chłodzącej sprawność modelu powraca do stanu bliskiego początkowemu.

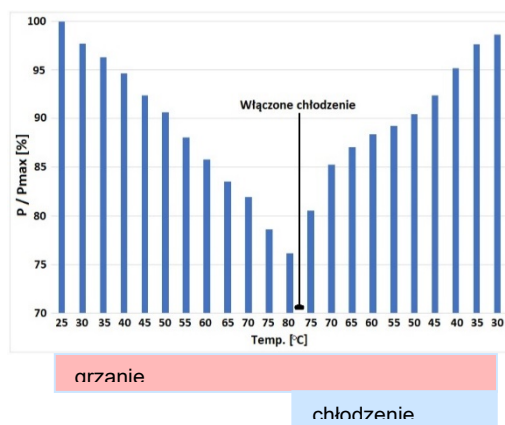
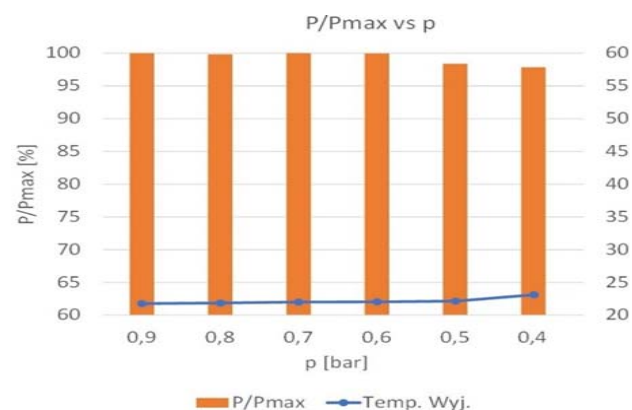


Fig. 5 Diagram zmian efektywności hybrydowego modelu PV/T oraz temperatury ogniw w eksperymencie



Rys. 6 Efektywność P/P_{max} hybrydowego modelu PV/T oraz temperatura ogniw słonecznych w zależności od wlotowego ciśnienia.

Drugi eksperyment dotyczył zbadania na ile zmiany ciśnienia (i objętościowej prędkości przepływu cieczy) uwzględnione na rys.4 gwarantują utrzymanie przyrostu temperatury ogniw na założonym niskim poziomie. W tym celu wykonano serię pomiarów dla ciśnień z przedziału 0,4 – 0,9 bara i stałej wartości gęstości absorbowanej mocy promieniowania. Uzyskane wyniki są zebrane na rys. 6, który pokazuje zmiany efektywności P/P_{max} oraz przyrostu temperatury ogniw wraz ze zmianami ciśnienia wlotowego.

Tak jak oczekiwano, przyrost temperatury jest znacznie poniżej 5°C i tylko nieznacznie zmienia się w badanym przedziale ciśnień. W przedziale tym występuje również prawie stała wartość aktualnej mocy elektrycznej P wytwarzanej w części fotowoltaicznej, równa mocy maksymalnej P_{max} dla przedziału ciśnień 0,9 – 0,6 bar oraz spadająca do $0,97P_{max}$ dla ciśnienia 0,4 bara. Oznacza to, że przedstawiona koncepcja mikkanałowego hybrydowego panelu PV/T gwarantuje utrzymanie wysokiej efektywności części fotoelektrycznej tego panelu niezależnie od wielkości ekspozycji na światło słoneczne.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule rozwiązanie hybrydowego panelu fotowoltaicznego z mikkanałowym kolektorem cieczowym stanowi nowatorskie rozwiązanie w obszarze solarnych paneli PV/T. W odróżnieniu od dotychczas oferowanych paneli, które są złożeniem dwóch autonomicznych części, odpowiednio, przetwornika fotowoltaicznego oraz kolektora ciepła, wprowadzono w nim strukturę zintegrowaną łączącą obie te części. Z jednej strony uprościło to konstrukcję panelu, a z drugiej, zmniejszyło rezystancję cieplną na drodze krzemowe ogniwo słoneczne/komora przepływu czynnika chłodzącego. Drugą innowacją było wprowadzenie jako kolektora ciepła dedykowanej płyty chłodzącej („custom cold plate”) wykorzystującej efekt przepływu mikkanałowego cieczy, istotnie zwiększający efektywność odbioru ciepła od ścian komory płyty chłodzącej. Obie te zmiany zaowocowały istotnym zmniejszeniem wzrostu temperatury ogniw słonecznych wynikającego z konwersji części energii słonecznej na ciepło.

Ma to istotne znaczenie dla efektywności fotowoltaicznych źródeł energii elektrycznej, gdyż maleje ona wraz ze wzrostem temperatury ogniw słonecznych o około 1% na każdy stopień wzrostu temperatury. Należy sądzić, że przedstawione wyżej zmiany konstrukcyjne w hybrydowych panelach PV/T powinny zaowocować polepszeniem ich parametrów eksploatacyjnych, w szczególności przy silnej ekspozycji promieniowania elektrycznego. Przeprowadzone

testy eksploatacyjne dla modelu takiego panelu potwierdziły te możliwości. Oceniono, że przy odpowiednim zaprojektowaniu i eksploatacji panelu wzrost temperatury krzemowych ogniw słonecznych nie przekroczy 3°C.

Badania finansowane z projektu SOLAR HYBRID Systemy hybrydowe do konwersji energii słonecznej, POIR.04.01.04-00-0019/19-00, w ramach Działania 4.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego



Fundusze Europejskie
Inteligentny Rozwój



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



LITERATURA

- [1] Urząd Regulacji Energetyki „Dane tabelaryczne dotyczące poszczególnych rodzajów instalacji odnawialnego źródła energii”, 31.12.2020
- [2] <https://www.edisonenergia.pl/blog/co-to-jest-sprawnosci-paneli-fotowoltaicznych>
- [3] <https://vosti.pl/aktualnosci/wysoka-temperatura-a-fotowoltaika-wplyw/>
- [4] Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne Budowa, technologia i zastosowania, Warszawa Wydawnictwo WKŁ, 2013, ISBN 978-83-206-1847-1
- [5] <https://solimpeks.com/en/product/volther-excell/>
- [6] Lisik Z., Znajdek K., Raj. E, Hybrid solar panel with a cooling plate, Patent no PL238548B1 2021.
- [7] Lisik Z., Raj E., Widerski T., Super-efektywne mikkanałowe cieczowe systemy chłodzenia dla energoelektroniki, Przegląd Elektrotechniczny, 2020, vol.96, ss.58.
- [8] Projekt POIR.04.01.04-00-0019/19-00, „Systemy hybrydowe do konwersji energii słonecznej”, 2019-2023.
- [9] Czarnecki P., Ruta Ł., Znajdek K., Raj E., Lisik Z., Prototyp hybrydowego panelu fotowoltaicznego z płytą chłodzącą, Przegląd Elektrotechniczny, 2022
- [10] Raj E., Znajdek K., Dionizy M., Czarnecki P., Niedzielski P., Ruta E., Lisik Z., Artificial Sun-A Stand to Test New PVT Minimodules, Energies, 2022, 3430