

Prototyp hybrydowego panelu fotowoltaicznego z płytą chłodzącą

Streszczenie. W artykule zaprezentowano prototyp hybrydowego panelu fotowoltaicznego wykorzystującego chłodzenie cieczowe. W odróżnieniu od innych produktów obecnych na rynku, w których łączone są odrębne części składowe (moduł fotowoltaiczny i kolektor solarny), przedstawione rozwiązanie stanowi całkowicie nowe podejście. Jest to idealnie dopasowana płyta z cieczą chłodzącą, na której bezpośrednio umieszczone są ogniwa fotowoltaiczne. Taki panel, charakteryzujący się niższą, niż w standardowych rozwiązaniach PV/T, rezystancją termiczną, zapewni bardziej efektywne chłodzenie elementów PV.

Abstract. The article presents a prototype of a hybrid photovoltaic panel with liquid cooling system. In contrast to other products available on the market, in which separate components are combined (photovoltaic module and solar thermal collector), the presented solution is a completely new approach. This is a perfectly tallied cooling liquid plate, on which photovoltaic cells are directly placed. Such a panel, characterized with lower thermal resistance than in standard PV/T solutions, will provide more effective cooling of PV elements. (**Prototype of a hybrid photovoltaic panel with a cooling plate**)

Słowa kluczowe: panel hybrydowy, pv/t, fotowoltaika, sztuczne słońce.

Keywords: hybrid module, pv/t, photovoltaics, artificial sun.

Wstęp

Odnawiane źródła energii odgrywają coraz większą rolę w świecie energetyki. Głównym i ogólnodostępnym odnawialnym źródłem energii jest energia słoneczna, która od wielu lat wykorzystywana jest zarówno do wytwarzania energii cieplnej jak i prądu elektrycznego [1]. Przedstawione warianty wykorzystania energii słonecznej posiadają wady, a główną z nich jest niska sprawność energetyczna. Za przykład mogą posłużyć panele fotowoltaiczne, których efektywność wynosi około 20% [2]. Pozostała część energii jest tracona w postaci ciepła zwiększając tym samym temperaturę użytych ogniw PV. Czynnikiem ten wpływa negatywnie na efektywność konwersji fotowoltaicznej modułu. Maleje ona wraz ze wzrostem temperatury elementów PV od 0,4% do 0,9% na każdy stopień powyżej temperatury znamionowej [3].

Rozwiązaniem przedstawionego problemu może być wykorzystanie panelu hybrydowego, który zostanie przedstawiony w niniejszym artykule. Panel hybrydowy składa się z części fotowoltaicznej, odpowiedzialnej za konwersję energii słonecznej na elektryczną oraz części kolektora energii cieplnej, który pełni dwie role: generację energii elektrycznej i cieplnej. Główną rolą kolektora w module hybrydowym jest odbieranie ciepła i schładzanie części fotowoltaicznej w celu zwiększenia sprawności. Rozwiązanie to pozwala na zwiększenie wydajności całego urządzenia w granicach 50-60%. Często moduły hybrydowe nazywane są panelami PV/T (photovoltaic/thermal) [4].

Badania nad rozwiązaniami hybrydowymi paneli fotowoltaicznych sięgają końca XX wieku, a ich obecny stan zaawansowania zaowocował już pojawieniem się na rynku pierwszych rozwiązań komercyjnych oferowanych przez kilka firm, np. panele MA-013 i MA-014 tureckiej firmy Solimpeks [5]. Zwiększone zapotrzebowanie na energię oraz wprowadzane innowacje zarówno w branży paneli fotowoltaicznych jak i kolektorów słonecznych powodują ciągłe poszukiwania optymalnych rozwiązań dla paneli PV/T. Ciągły rozwój tych modułów wynika z faktu, że konstrukcja hybrydowego panelu solarnego nie jest tworzona od zera, ale jest efektem połączenia dwóch odrębnych i ciągle rozwijających się technologii solarnych. Dlatego połączenie ze sobą panelu fotowoltaicznego i kolektora słonecznego nie daje gwarancji na uzyskanie urządzenia o wysokiej sprawności i optymalnej konstrukcji zachowując akceptowalne koszty produkcji.

Istniejące na rynku panele PV/T wykonane są z klasycznej konstrukcji panelu fotowoltaicznego położonego na powierzchni cieczowego kolektora słonecznego. Całość jest szczelnie izolowana i zamknięta w jednej obudowie. Zadaniem kolektora słonecznego jest przejmowanie nadmiaru energii cieplnej z panelu fotowoltaicznego. Zarówno konstrukcja kolektora słonecznego jak i panelu fotowoltaicznego zmieniają się w zależności od panujących trendów oraz producentów paneli PV/T [6]. Wbrew pozorom, głównym czynnikiem wpływającym na efektywną pracę całego modułu hybrydowego jest konstrukcja kolektora słonecznego, od której zależy równomierne chłodzenie części fotowoltaicznej oraz efektywne przejmowanie energii cieplnej. Ogólnodostępne moduły hybrydowe posiadają szereg wad. Główną z nich jest skomplikowana konstrukcja, co znacząco wpływa na cenę całego urządzenia. Drugą wadą jest wykorzystanie spiralnych, prostych lub nieregularnych rurowych wymienników ciepła, co nie zapewnia równomiernego chłodzenia części fotowoltaicznej, a efektywność działania wymaga utrzymania odpowiednio dużej różnicy temperatury pomiędzy modułem fotowoltaicznym a cieczą chłodzącą.

Rewolucyjnym rozwiązaniem może stać się przedstawiony w niniejszym artykule hybrydowy panel solarny, w którym kolektor ciepła tworzy dolną płytę uformowaną jako prostokątna misa, o wymiarach odpowiadających panelowi fotowoltaicznemu. Dodana płyta została umieszczona pod elementami fotowoltaicznymi a misę wymiennika ciepła wykonano jako wypraskę z wytłoczonymi wysepkami zakłócającymi laminarny przepływ cieczy oraz zapewniającymi dodatkowy kontakt pomiędzy tylną ścianką sekcji fotowoltaicznej a ściankami wymiennika.

Rozwiązanie to 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 fotowoltaicznych w konstrukcji według wynalazku prowadzi do istotnego obniżenia temperatury tych elementów przy jednoczesnym mniejszym wydatku cieczy chłodzącej, a co za tym idzie polepszenia parametrów eksploatacyjnych hybrydowego panelu solarnego.

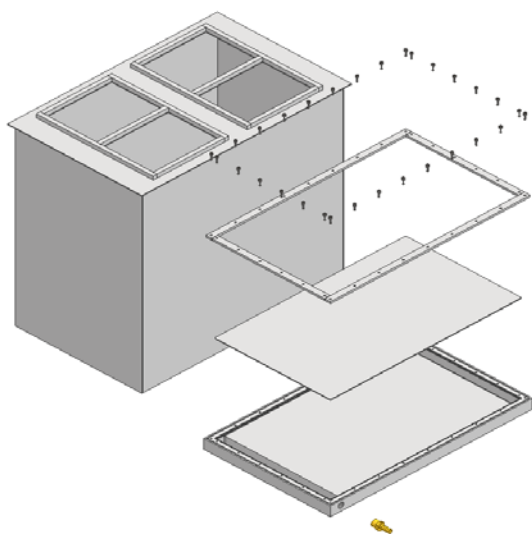
W zaprezentowanym artykule zostanie opisana budowa modułu hybrydowego wraz ze stanowiskiem pomiarowym oraz wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań.

Sztuczne słońce

Przedstawiony w artykule projekt hybrydowego panelu solarnego PV/T wymagał skonstruowania stanowiska pomiarowego, którego celem było symulacja promieniowania słonecznego padającego na moduł PV/T. Stanowisko to nazwano sztucznym słońcem, a jego konstrukcja została przedstawiona na Rys. 1.

Stanowisko pomiarowe wykonano w taki sposób, aby w części centralnej konstrukcji uzyskać powierzchnię o wymiarach odpowiadającej powierzchni modułu hybrydowego. Konstrukcja składa się z kilku elementów: zbiornika, płyty, listew krótkich, listew długich, pokrywy i króćców przyłączeniowych.

Zbiornik zaprojektowano tak, aby ciecz chłodząca wypełniała całe pole powierzchni płyty chłodzącej, na której umieszczono elementy fotowoltaiczne. Ciecz chłodząca dostarczana jest za pomocą króćców przyłączeniowych.



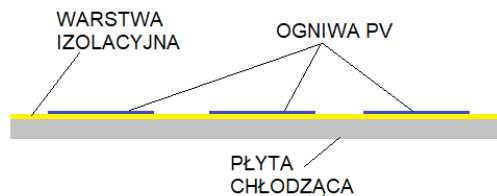
Rys. 1. Rysunek poglądowy stanowiska pomiarowego oraz płyty chłodzącej modułu PV/T.

Kanał doprowadzający odpowiedzialny jest za ciągłe dostarczanie cieczy chłodzącej (w tym przypadku wody) do zbiornika, natomiast kanał odprowadzający odpowiada za odprowadzenie nagrzanej cieczy dalej. Cała powierzchnia zbiornika została przykryta płytą chłodzącą, na której umieszczone zostały ogniwa fotowoltaiczne wraz z połączeniami elektrycznymi. Zastosowana płyta chłodząca posiada grubość 2 mm i została zamontowana w sposób tworzący 2 mm szczelinę pomiędzy płytą a środkową częścią zbiornika. Zabieg ten ma na celu stworzenie swobodnego przepływu cieczy w zbiorniku. Drugim aspektem szczeliny jest polepszenie równomiernego odbioru energii cieplnej z powierzchni płyty. Płytę zamontowano za pomocą listew zaciskowych. Całość konstrukcji przykryta została pokrywą z umieszczonymi na górnej części lampami halogenowymi, które imitują promieniowanie słoneczne. Wysokość pokrywy dobrano w taki sposób aby lampy halogenowe mogły na powierzchni płyty chłodzącej wytworzyć natężenie promieniowania w przedziale $800 \text{ W/m}^2 - 1000 \text{ W/m}^2$.

Panel fotowoltaiczny

Głównym elementem hybrydowego panelu PV/T jest część fotowoltaiczna, która w tym projekcie wymagała nowatorskiego podejścia do samej konstrukcji panelu

fotowoltaicznego. Głównym problem było umieszczenie ogniwa fotowoltaicznego na płycie chłodzącej wykonanej z aluminium. W celu zapewnienia wysokiej przenikalności energii cieplnej przy jednocześnie wysokiej rezystancji elektrycznej powierzchni płyty, aluminiowa powierzchnia płyty chłodzącej została pokryta specjalną tlenkową warstwą izolującą. Przekrój poprzeczny płyty przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny płyty chłodzącej z ogniwami.

W pierwszym podejściu, w części fotowoltaicznej zastosowano ogniwa monokrystaliczne o wymiarach $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$. Ogniwa monokrystaliczne zostały wybrane z uwzględnieniem wysokiej sprawności energetycznej w porównaniu do ogniwa wykonanych z innych materiałów. Nie mniej znacząca była ogólnodostępność tych elementów. Głównym problemem w zamontowaniu ogniwa fotowoltaicznych było opracowanie technologii montażu ogniwa do płyty chłodzącej. W trakcie trwania eksperymentów został opracowany proces montażu ogniwa do powierzchni płyty:

1. Oczyszczenie płyty z zanieczyszczeń, mycie izopropanolem.
2. Osadzenie maski w celu wyznaczenia powierzchni ogniwa.
3. Drukowanie pasty przewodzącej.
4. Umieszczenie kontaktów na paście.
5. Umieszczenie ogniwa na płycie.
6. Wyrzwanie $T=120^\circ\text{C}$ $t=30 \text{ min}$.
7. Lutowanie kontaktów

Na Rys. 3 przedstawiono zdjęcie gotowej płyty z zainstalowanymi ogniwami fotowoltaicznymi.



Rys. 3. Widok płyty anodowanej z nałożonymi ogniwami fotowoltaicznymi.

Przedstawiony proces posiadał jednak wady, a do głównych z nich należał bardzo długi czas przygotowania płyty oraz drukowania pasty przewodzącej. W dalszej części eksperymentów prowadzono prace zmierzające do zoptymalizowania procesu łączenia ogniwa, aby mieć pewność że przepływ prądu w szeregowym połączeniu sześciu ogniw nie jest w jakikolwiek sposób zakłócony. W kolejnych eksperymentach wykorzystano zestaw ogniwa PV o wymiarach $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ każde, tasiemki niklowane do połączeń elektrycznych, pastę termoprzewodzącą HTCP20s a także pastę lutowniczą ALPHA OM-520 42Sn/57,6Bi/0,4Ag.

Połączono szeregowo 6 ogniw fotowoltaicznych w konfiguracji 3x2. Wszystkie kontakty były lutowane za pomocą pasty lutowniczej. Po wykonaniu połączeń elektrycznych układ 6 ogniw był instalowany na płycie chłodzącej pokrytej pastą termoprzewodzącą.

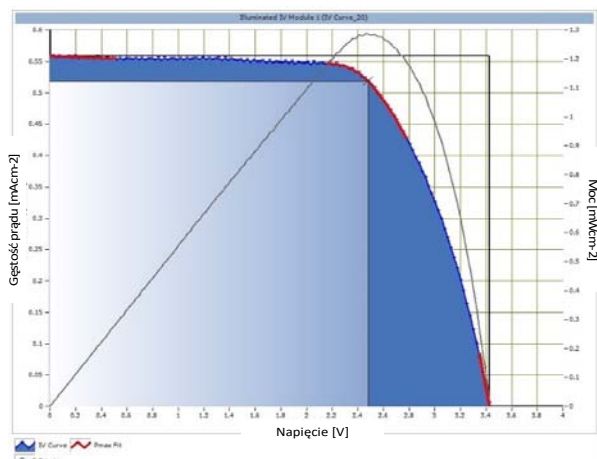
Po zamontowaniu i sprawdzeniu poprawności połączeń elektrycznych pomiędzy poszczególnymi ogniwami słonecznymi, kolejnym krokiem konstrukcyjnym był montaż zestawu ogniw PV na docelowej płycie chłodzącej. Fotografję gotowego modelu hybrydowego panelu fotowoltaicznego przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Prototyp modułu hybrydowego PV/T.

Wyniki

Po zamontowaniu ogniw na płycie chłodzącej wykonano pomiary podstawowych parametrów systemu. Do tego celu wykorzystano stanowisko pomiarowe wyposażone w urządzenie o nazwie „chiller”, umożliwiające kontrolę przepływu cieczy oraz dedykowane źródło prądowo-napięciowe sterowane komputerem, umożliwiające pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych oraz krzywych mocy modułu PV. Na Rys. 5 przedstawiono wyniki pomiaru oświetlonego zestawu ogniw w badanym module.



Rys. 5. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz krzywa mocy badanego zestawu ogniw PV pod zaprojektowanym oświetleniem.

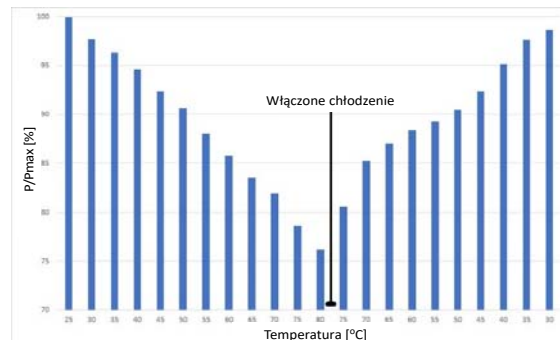
Przedstawione wyniki pomiarów pokazują całkowicie prawidłowe zachowanie zespołu ogniw. Zarówno przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej jak i kształt krzywej mocy są zgodne ze standardowymi dla tego typu konstrukcji.

Zmontowany układ poddano badaniom przepływowym oraz elektrycznym. Celem prowadzonych badań było zbadanie warunków pracy płyty chłodzącej podczas utrzymywania odpowiednio niskiej temperatury pracy zamontowanych na jej powierzchni ogniw i w efekcie przetestowanie sprawności modułu fotowoltaicznego.

Podczas pomiarów wykorzystano stanowisko wyposażone w sztuczne słońce ze źródłami światła o

mocach 120 W, 160 W oraz 230 W. Do pomiarów elektrycznych wykorzystano było programowalne źródło prądowo-napięciowe Keithley 2401.

W pierwszej kolejności przeprowadzono eksperyment polegający na podgrzaniu zespołu ogniw fotowoltaicznych do temperatury 80°C po czym uruchomiono przepływ cieczy chłodzącej przez płytę i obserwowano powrót sprawności modułu PV do wartości początkowej przed rozpoczęciem podgrzewania. Na Rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów sprawności modułu PV w zależności temperatury.



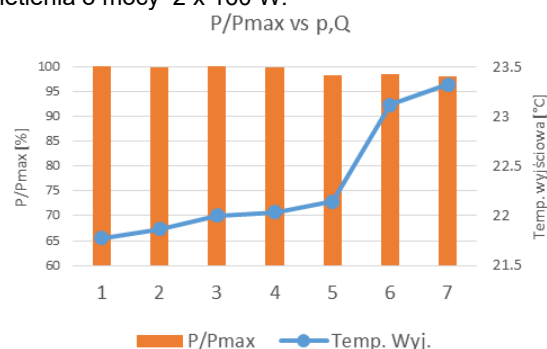
Rys. 6. Wyniki pomiarów sprawności modułu PV w zależności temperatury.

Jak widać na przedstawionym wykresie (Rys. 6), chłodzenie modułu fotowoltaicznego jest skuteczne i po uruchomieniu przepływu cieczy chłodzącej sprawność zestawu ogniw powraca do stanu bliskiego początkowemu. W trakcie przeprowadzonego eksperymentu, moduł był ogrzewany na stanowisku sztucznego słońca wyposażonym w 3 lampy o mocy 230 W każda.

W dalszej części eksperymentu prowadzono badania polegające na próbie utrzymania odpowiednio niskiej temperatury dla zapewnienia prawidłowych warunków pracy ogniw PV w module. Wykonano kilkadziesiąt serii pomiarowych, podczas których zmieniano moc źródła światła a także wartości ciśnienia i wartości natężenia przepływu cieczy chłodzącej. Wykonano pomiary dla 4 wartości mocy sztucznego słońca: 2 x 160 W, 3 x 120 W, 2 x 230 W oraz 3 x 230 W. Dla każdej z tych wartości wykonano badania dla różnych par parametrów p oraz Q. Były to następujące wartości:

1. $p=0,9\text{bar}$; $Q=0,09\text{l/s}$; 0,81bar,
2. $p=0,8\text{bar}$; $Q=0,084\text{l/s}$; 0,72bar,
3. $p=0,7\text{bar}$; $Q=0,074\text{l/s}$; 0,55bar,
4. $p=0,6\text{bar}$; $Q=0,064\text{l/s}$; 0,41bar,
5. $p=0,5\text{bar}$; $Q=0,056\text{l/s}$; 0,32bar,
6. $p=0,5\text{bar}$; $Q=0,025\text{l/s}$; 0,057bar,
7. $p=0,4\text{bar}$; $Q=0,022\text{l/s}$; 0,045bar.

Na Rys. 7 przedstawiono przykładowy wykres dla oświetlenia o mocy 2 x 160 W.



Rys. 7. Wydajność panelu hybrydowego w zależności od ciśnienia i przepływu, moc oświetlenia: 2x160W.

We wszystkich przypadkach wyznaczono zależność maksymalnych wartości napięcia i prądu modułu od temperatury oraz ciśnienia i przepływu. Sprawdzono możliwość utrzymania wydajności modułu hybrydowego PV/T, określanej tutaj jako P/Pmax, na poziomie 100%. W każdym przypadku pomiar prowadzono 10 minut, co wcześniej zapewniało osiągnięcie 80°C bez chłodzenia. Uzyskane wyniki pokazały, że utrzymanie wartości P/Pmax równej 100% gwarantuje jedynie ciśnienie $p = 0,9$ bar oraz przepływ $Q = 0,09$ l/s. Na uwagę zasługują również kolejne pary p i Q , tj.: 0,8 do 0,6 bar oraz 0,084 do 0,064 l/s gwarantujące utrzymanie wydajności na poziomie 98-99%.

Wnioski

Przedstawiony w artykule prototyp modułu przedstawia nowatorskie rozwiązanie połączenia panelu fotowoltaicznego i kolektora słonecznego w celu stworzenia nowego urządzenia jakim jest hybrydowy moduł solarny PV/T. Przeprowadzenie badań prototypu modułu PV/T wymagało skonstruowania nowego stanowiska pomiarowego o nazwie sztuczne słońce, które imitowało promieniowanie słoneczne.

Wytworzenie prototypu modułu wymagało rozwiązania szeregu problemów związanych z przygotowaniem płyty chłodzącej, opracowania procesu technologicznego do montażu ogniwa i wykonania pomiarów potwierdzających prawidłową konstrukcję modułu.

Zaprezentowane wyniki przedstawiają jednoznacznie, że chłodzenie modułu fotowoltaicznego jest skuteczne i po uruchomieniu przepływu cieczy chłodzącej sprawność ogniwa powraca do stanu bliskiemu początkowemu. Oznacza to, że prototyp spełnia założone cele projektowe.

W przyszłości planowane jest wytworzenie pełnowymiarowego panelu hybrydowego oraz przeprowadzenie pomiarów przepływowych a także temperaturowych.

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



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] <http://www.instsani.pl/482/kolektory-hybrydowe-2>
- [7] Yandri, E. Methods for the development and testing of polymeric hybrid photovoltaic thermal (PVT) collector for indoor experiments. *MethodsX* 2019, 6, 2620–2635, doi:10.1016/j.mex.2019.10.021.
- [8] Das, D.; Kalita, P.; Dewan, A.; Tanweer, S. Development of a novel thermal model for a PV/T collector and its experimental analysis. *Sol. Energy* 2019, 188, 631–643, doi:10.1016/j.solener.2019.06.005.
- [9] Obstawski, P.; Bakoń, T.; Czekalski, D. Comparison of solar collector testing methods—theory and practice. *Processes* 2020, 8, 1–29, doi:10.3390/pr8111340.
- [10] Lisik, Z.; Znajdek, K.; Raj, E. Hybrid solar panel with a cooling plate, Patent no PL238548B1 2021.
- [11] Niedzielski, P.; Dionizy, M.; Raj, E.; Lisik, Z. The influence of free convection on the efficiency of heat removal in PV / T modules. *Przegląd Elektrotechniczny* 2021, 1, 196–199, doi:10.15199/48.2022.01.43