

## Analiza numeryczna chłodzenia cieczowego elementarnych hybrydowych modułów solarnych

**Streszczenie.** Moduły PV/T, czyli hybrydowe moduły solarne, pozwalają na generowanie energii prądu elektrycznego oraz produkcję ciepła w jednym komponencie. Ważnym aspektem projektu takich modułów jest efektywność odbierania ciepła przez strukturę chłodzącą. Z pomocą symulacji CFD porównano zastosowanie rozwiązań mikro- oraz minikanalowych w części cieczowej modułów. Wyniki wskazują na przewagę rozwiązań minikanalowych w kontekście odprowadzania ciepła w hybrydowych modułach solarnych.

**Abstract.** PV/T modules, or hybrid solar modules, allow generating electricity and heat in one component. An important aspect of designing such modules is the cooling efficiency of the structure. Using CFD simulations, the application of micro- and minichannel liquid coolers in the collector part of the modules were compared. Results indicate advantage of the minichannel solutions within the context of cooling efficiency in hybrid solar modules. **(Numerical analysis of liquid cooling in hybrid basic solar modules)**

**Słowa kluczowe:** Moduł PV/T, mikrokanaly, minikanaly, chłodzenie cieczowe  
**Keywords:** PV/T module, microchannels, minichannels, liquid cooling

### Wstęp

Panele fotowoltaiczne stanowią jeden z ważniejszych elementów źródeł odnawialnych będących odpowiedzią na wciąż rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną na świecie. Ze względu na dynamiczny rozwój technologii fotowoltaicznych, obecnie ich sprawność osiąga od 15% do nierzadko ponad 20% [1] i zależy od wielu czynników zarówno związanych z parametrami konstrukcyjno-technologicznymi jak i lokalizacją, sposobem montażu oraz warunkami środowiskowymi.

Moduł PV/T (ang. photovoltaic thermal module) to panele fotowoltaiczne chłodzone cieczą, pozwalające na produkcję ciepła oraz prądu elektrycznego w jednym module [2]. Dodatkową zaletą tego połączenia jest podwyższenie sprawności konwersji energii w ogniwach słonecznych poprzez obniżenie temperatury ich pracy w porównaniu do rozwiązań PV. Spadek ilości wytwarzanej energii elektrycznej w strukturach fotowoltaicznych wraz ze wzrostem temperatury o każdy stopień względem temperatury znamionowej może przekroczyć wartość 0,4%/K [1, 2, 5], co przełoży się na spadek sprawności ogniw przy temperaturze pracy 70-80 °C nawet przekraczający 4 p.p..

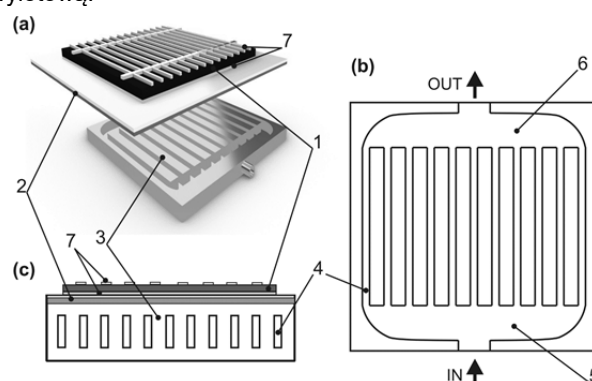
W artykule przedstawiono analizy numeryczne struktur kolektorów termicznych nowych modułowych hybrydowych paneli solarnych [3] przeznaczonych do odbioru ciepła z energii promieniowania słonecznego docierającego do panelu PV/T. W zaproponowanym rozwiązaniu ogniwo fotowoltaiczne zostało zintegrowane z mikro- lub minikanalową strukturą chłodzącą w celu zwiększenia/rozwinienia powierzchni chłodzonej cieczą i wykorzystania poprawy transferu ciepła w sieci kanałów o niewielkich wymiarach charakterystycznych [6].

W ramach podjętych prac wykonano szereg 3D symulacji numerycznych z wykorzystaniem pakietu oprogramowania ANSYS z użyciem modeli systemów odbioru ciepła w zintegrowanym panelu PV/T, utworzone dla określonego zakresu zmian ich parametrów (wymiar charakterystyczny kanału, strumień przepływu cieczy na wlocie). Pozwolą one na wytypowanie najbardziej obiecujących rozwiązań systemów odbioru ciepła.

### Model

Badane rozwiązanie ma budowę modułową, a jego podstawowy element przedstawiono na Rys. 1.

Elementarny hybrydowy moduł solarny zawiera fotowoltaiczną strukturę półprzewodnikową z kontaktami elektrycznymi zamontowaną na cienkiej płycie, której górna powierzchnia posiada właściwości izolacyjne. Płyta ta stanowi górną część modułu chłodzącego, który zawiera szereg równoległych kanałów o przekroju prostokątnym połączonych z dwóch stron odpowiednio komorą wlotową i wylotową.



Rys. 1. Elementarny hybrydowy moduł solarny: (a) rysunek 3D, (b) przekrój poziomy przez mikrokanalowy moduł chłodzący, (c) przekrój pionowy przez hybrydowy moduł solarny. Oznaczenia: 1 – fotowoltaiczna struktura półprzewodnikowa, 2 – płyta stanowiąca pokrywą zamykającą, 3 – mikrokanalowy moduł chłodzący, 4 – mikrokanaly, 5 – komora wlotowa, 6 – komora wylotowa, 7 – kontakty elektryczne od strony bazy i emitera ogniwa fotowoltaicznego [3]

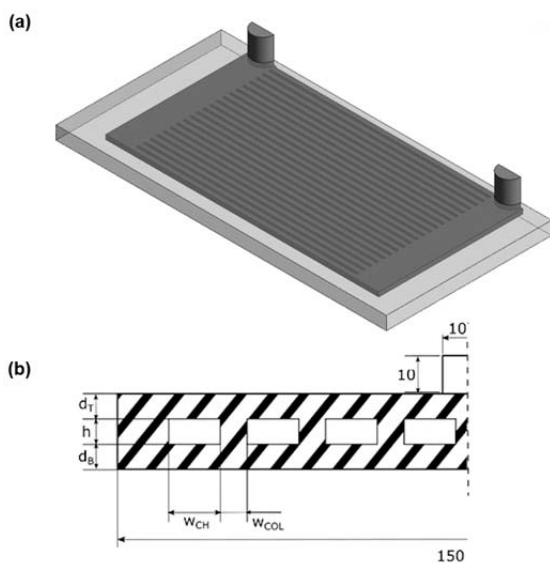
W artykule skupiono się na analizie części cieczowej, czyli strukturze chłodzącej z uwzględnieniem rozwiązań mikro- i minikanalowych, czyli z kanałami o wymiarze charakterystycznym od 0,5 do 2 mm. Schemat poglądowy modelowanej struktury testowej obejmujący połowę modułu chłodzącego o wymiarach 150 x 150 mm i grubości 6 mm przedstawiono na Rys. 2. W Tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów geometrycznych wybranych badanych modeli. Sposób oznaczenia kolejnych modelowanych struktur przyjęto jako MIKRO-n, gdzie n oznacza liczbę kanałów.

Model obejmuje cały tor przepływu płynu wraz z wlotami i wylotami oraz komorami wlotowymi i wylotowymi. Przy wlotach umieszczonych centralnie w komorze wlotowej, ze względu na symetrię (linia przerywana na Rys. 2b), symulacjom poddano jedynie połowę całej struktury.

Wykorzystanie pakietu ANSYS umożliwiło łatwe wprowadzenie danych o analizowanym problemie oraz przeprowadzenie analiz numerycznych dla zmiennych parametrów konstrukcyjnych i warunków przepływu medium chłodzącego.

Tabela 1. Podstawowe wartości parametrów geometrycznych dla badanych struktur

Parametr	MIKRO-88	MIKRO-44	MIKRO-9
$d_T$ – grubość górnej warstwy [mm]	2	2	2
$d_B$ – grubość dolnej warstwy [mm]	2	2	2
$w_{col}$ – szerokość ścianki rozdzielającej [mm]	1	1	5
$w_{ch}$ – szerokość kanału [mm]	0,5	2	10
$h$ – wysokość kanału [mm]	2	2	2
$L$ – długość kanału [mm]	100	100	100
$n$ – liczba kanałów	88	44	9



Rys. 2. Schemat ideowy struktury chłodzącej: (a) widok 3D połowy struktury MIKRO-44, (b) przekrój poprzeczny wraz z zaznaczonymi wymiarami

W symulacjach przyjęto, że źródłem ciepła dla elementarnego modułu hybrydowego jest gęstość strumienia energii promieniowania słonecznego docierającego do górnej powierzchni struktury chłodzącej, na której umieszczone jest ogniwo fotowoltaiczne pomniejszona o wartość związaną z konwersją energii w strukturze PV ( $800 \text{ W/m}^2$ ). Pozostałe założenia i warunki brzegowe zestawiono poniżej:

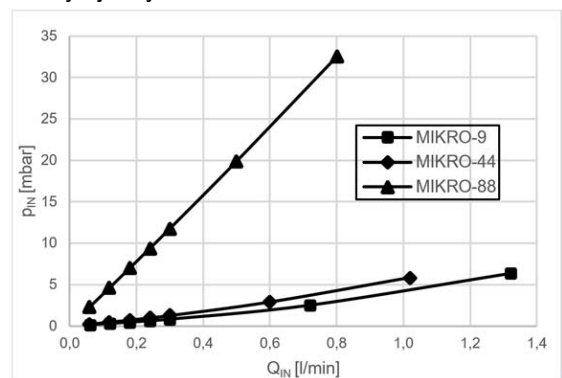
- powierzchnie boczne oraz dolna są izolowane termicznie (warunek adiabatyczny);
- jako płyn chłodzący zastosowano 50% roztwór wodny glikolu etylenowego (EGW);
- temperatura wlotowa cieczy wynosi  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- strumień objętości cieczy na wlocie  $Q_{IN}$  zmienia się w przedziale  $0,06 - 1,32 \text{ l/min}$ , co odpowiada prędkości wlotowej w przedziale  $0,01 - 0,28 \text{ m/s}$ ;
- wylot płynu swobodny (0 bar) przy ciśnieniu odniesienia odpowiadającym ciśnieniu atmosferycznemu;
- charakter przepływu jest laminarny ze względu na wartości liczb Reynoldsa nie przekraczających 950.

Jako kryterium końca symulacji dla stanu ustalonego przyjęto moment, w którym różnica pomiędzy mocą cieplną wynoszoną przez cieć chłodzącą względem mocy cieplnej dostarczonej od górnej powierzchni płyty osiągnęła wartość nie większą niż  $0,1\%$ .

Wynikiem symulacji są przestrzenne rozkłady temperatury w całej modelowanej strukturze oraz rozkłady strumienia cieczy chłodzącej w obszarach jej przepływu. Wykorzystano je do wyznaczenia najwyższej temperatury na powierzchni struktury chłodzącej ( $T_{MAX}$ ) oraz maksymalnej różnicy temperatur  $\Delta T$  na tej powierzchni. Ponadto, w zestawionych wynikach uwzględniono także średnie ciśnienie wlotowe  $p_{IN}$  oraz maksymalną prędkość przepływu cieczy w kanałach  $V_{kanal}$ .

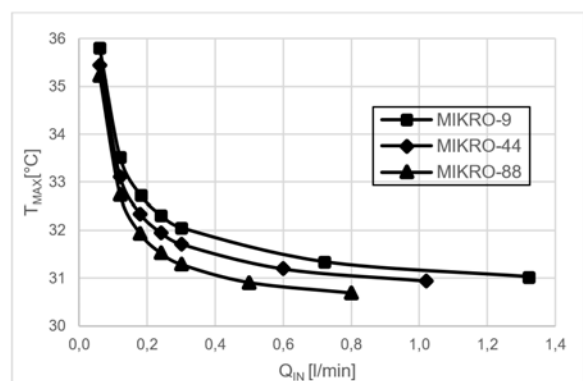
### Wyniki i dyskusja

Otrzymane charakterystyki przepływowe dla trzech wybranych struktur chłodzących przedstawiono na Rys. 3. Zgodnie z oczekiwaniami, struktura mikrokanalowa MIKRO-88 charakteryzuje się znacznie większym spadkiem ciśnienia niż rozwiązania z kanałami o wyższym wymiarze charakterystycznym.

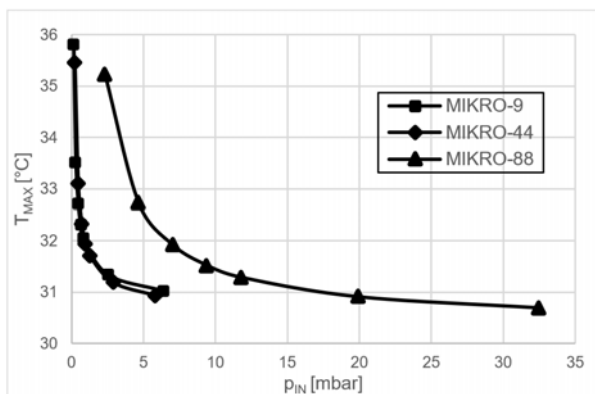


Rys. 3. Średnie ciśnienie wlotowe w funkcji strumienia objętości cieczy na wlocie

Na Rys. 4 i Rys. 5 przedstawiono maksymalną temperaturę na powierzchni do montażu ogniw fotowoltaicznych  $T_{MAX}$  w funkcji odpowiednio strumienia objętości cieczy  $Q_{IN}$  oraz średniego ciśnienia wlotowego  $p_{IN}$ . Zgodnie z oczekiwaniami, dla danej wartości  $Q_{IN}$  najniższą wartość  $T_{MAX}$  zapewnia struktura mikrokanalowa MIKRO-88. Jednakże, charakteryzuje się ona znacznie wyższymi spadkami ciśnienia, co przekłada się na niekorzyść tego rozwiązania porównywanego względem ciśnienia wlotowego. Warto podkreślić, że najniższa otrzymana wartość dla wszystkich trzech badanych rozwiązań nie przekracza  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  nad temperaturę wlotową cieczy chłodzącej.

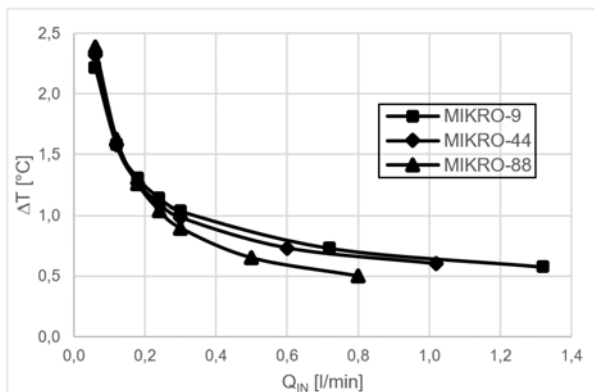


Rys. 4. Maksymalna temperatura na górnej powierzchni struktury chłodzącej w funkcji strumienia objętości cieczy na wlocie

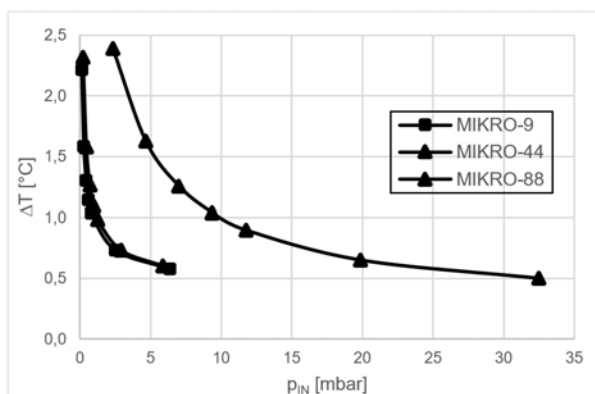


Rys. 5. Maksymalna temperatura na górnej powierzchni struktury chłodzącej w funkcji średniego ciśnienia wlotowego

Na Rys. 6 i Rys. 7 przedstawiono różnicę temperatury  $\Delta T$  na powierzchni montażu ogniw fotowoltaicznych w funkcji odpowiednio strumienia objętości cieczy  $Q_{IN}$  oraz ciśnienia wlotowego  $p_{IN}$ . W badanym zakresie, rozwiązania MIKRO-44 oraz MIKRO-9 charakteryzują się zbliżoną wartością  $\Delta T$ , natomiast struktura mikrokanalowa MIKRO-88 oferuje lepszą równomierność rozkładu temperatury na górnej powierzchni struktury chłodzącej dla wszystkich wartości strumieni przepływu cieczy oprócz najmniejszych ( $Q_{IN} < 0,12$  l/min). Uwzględniając jednak średnie ciśnienie wlotowe, ponownie obserwujemy wadę rozwiązania mikrokanalowego.

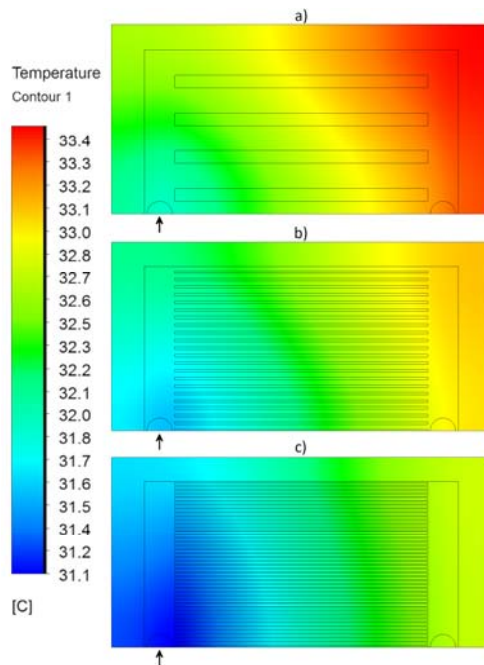


Rys. 6. Różnica maksymalnej oraz minimalnej temperatury na górnej powierzchni struktury chłodzącej w funkcji strumienia objętości cieczy na wlocie



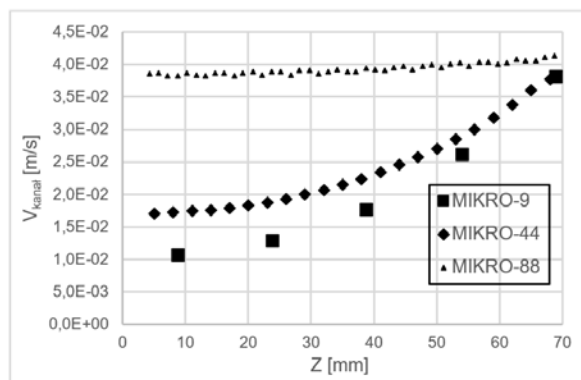
Rys. 7. Różnica maksymalnej oraz minimalnej temperatury na górnej powierzchni struktury chłodzącej w funkcji średniego ciśnienia wlotowego

Wnioski płynące z powyższej analizy temperatury maksymalnej  $T_{max}$  oraz różnicy temperatury na powierzchni montażu ogniw  $\Delta T$  potwierdzają rozkłady pola temperaturowego dla wybranego strumienia objętości cieczy 0,12 l/min przedstawione na Rys. 8. Rozwiązanie mikrokanalowe MIKRO-88 dla zadanej wartości strumienia objętości cieczy zapewnia niższe wartości temperatury przy nieco lepszej równomierności temperatury na powierzchni.



Rys. 8. Rozkłady temperatur na połowie górnej powierzchni struktury chłodzącej dla struktur (a) MIKRO-9, (b) MIKRO-44, (c) MIKRO-88 dla  $Q_{IN} = 0,12$  l/min. Strzałką oznaczono wlot cieczy chłodzącej

Duża równomierność odprowadzania ciepła przez strukturę chłodzącą związana jest z prędkością przepływu cieczy w poszczególnych kanałach. Na Rys. 9 zaprezentowano maksymalną prędkość cieczy dla każdego kanału  $V_{kanal}$  w badanych strukturach w połowie długości oraz wysokości kanałów. Widoczna jest bardzo dobra równomierność przepływu dla rozwiązania mikrokanalowego MIKRO-88, w przeciwieństwie do rozwiązań minikanalowych MIKRO-44 oraz MIKRO-9, gdzie maksymalna prędkość w środku kanału zwiększa się (aż do kilkukrotnego zwiększenia) wraz z umiejscowieniem kanału bliżej wlotu struktury.



Rys. 9. Maksymalna prędkość cieczy dla każdego kanału, mierzona w połowie długości i wysokości kanałów, dla  $Q_{IN} = 0,12$  l/min

## Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że lepsze parametry odbioru ciepła w stosunku do warunków przepływu osiągają struktury minikanalowe, czyli MIKRO-44 oraz MIKRO-9. Struktura mikrokanalowa MIKRO-88 zapewnia lepszą równomierność rozkładu temperatury na górnej powierzchni struktury chłodzącej, natomiast występują w niej znacznie wyższe opory przepływu charakterystyczne dla struktur mikrokanalowych. W kontekście projektowania modułów chłodzących do hybrydowych kolektorów słonecznych, gdzie występują stosunkowo niskie gęstości strumienia ciepła (przyjęte w symulacji  $800 \text{ W/m}^2$ ), zastosowanie struktur minikanalowych powinno zapewnić odpowiednie warunki termiczne pracy ogniw słonecznych.

*Praca finansowana z projektu POIR.04.01.04-00-0019/19 SolarHybrid: Systemy hybrydowe do konwersji energii słonecznej.*

## Literatura i autorzy

**Autorzy:** Mateusz Dionizy, mgr inż. Przemysław Niedzielski, dr hab. inż. Ewa Raj, prof. dr hab. inż. Zbigniew Lisik, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: [222169@edu.p.lodz.pl](mailto:222169@edu.p.lodz.pl); [przemyslaw.niedzielski@p.lodz.pl](mailto:przemyslaw.niedzielski@p.lodz.pl); [ewa.raj@p.lodz.pl](mailto:ewa.raj@p.lodz.pl); [zbigniew.lisik@p.lodz.pl](mailto:zbigniew.lisik@p.lodz.pl).

## LITERATURA

- [1] Svarc J. Most Efficient Solar Panels 2021, Clean Energy Reviews, 2021, [www.cleanenergyreviews.info/](http://www.cleanenergyreviews.info/), dostęp 05.2021
- [2] Lammle M., Oliva A., Hermann M., Kramer K., Kramer W., PVT collector technologies in solar thermal systems: A systematic assessment of electrical and thermal yields with the novel characteristic temperature approach, Solar Energy, vol. 155, 2017, str. 867-879
- [3] Lisik Z., Znajdek K. Raj E., Elementarny hybrydowy moduł solarny oraz hybrydowy cieczowy panel solarny, zgłoszenie patentowe P. 429419 z dn. 29.03.2019
- [4] Sawicka-Chudy P., Sibiński M., Cholewa M., Klein M., Znajdek K., Cenian A., Tests and theoretical analysis of a PVT hybrid collector operating under various insolation conditions, Acta Innovations, nr. 26, 2018, 62-74
- [5] Znajdek K., Sibiński M., Practical realization of a hybrid solution for photovoltaic and photothermal conversion, Journal of Energy and Power Engineering vol. 7, nr 2, 2013, 283-289
- [6] Raj E., Lisik Z., Gozdur R., Fiks W., New packages for disc type power diodes, Materials Science and Engineering B, vol. 177, nr 15, 2012, 1304-1309
- [7] Skoplaki E., Palyvos J.A., On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations, Solar Energy, 83 (2009), 614-624
- [8] Luque A., Hegedus S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2003.
- [9] Zondag H.A., Vries D.W., Steenhoven A.A., Helden W.G.J., R.J.C. Zolingen, Thermal and electrical yield of a combi-panel, Proceedings of ISES World Congress, Jerusalem (1999), nr. 3, 96-101