

Wpływ konwekcji swobodnej na efektywność odprowadzania ciepła w modułach PV/T

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ konwekcji swobodnej na efektywność odprowadzania ciepła w modułach fotowoltaiczno-termicznych (PV/T). Omówiono wpływ ustawienia kąta nachylenia paneli (od -90° do 90°) na pole temperaturowe na powierzchni ich części kolektorowej. Przeprowadzona analiza pozwoliła stwierdzić, przy jakiej wartości przepływu objętościowego i ciśnienia w układzie cieczowym wpływ będzie miała konwekcja swobodna, a kiedy jest ona zjawiskiem pomijalnym.

Abstract. The paper presents influence of the free convection of heat transfer efficiency in PV/T modules. The impact of setting the tilt angle of the module (in the range from -90° to 90°) on the temperature field on the surface of the collector part is discussed. The conducted analysis allowed to determine at which values of the flow rate and the pressure drop in the liquid system, the free convection must be considered and when it is a negligible effect. *The influence of free convection on the efficiency of heat removal in PV/T modules*

Słowa kluczowe: fotowoltaika; moduły PV/T; analiza numeryczna; konwekcja swobodna;

Keywords: photovoltaics; PV/T modules; numerical analysis; free convection;

Wstęp

Kolektory fotowoltaiczno-termiczne (PV/T) to konstrukcja dostarczająca tzw. czystą energię w wyniku konwersji energii słonecznej na energię elektryczną i ciepłą. Są one połączeniem klasycznych paneli fotowoltaicznych (PV) z modulem cieczowych kolektorów termicznych, który ma za zadanie odprowadzić nadmiarowe ciepło z systemu i udostępnić je jako użyteczną energię ciepłą [1]. Kolejną funkcjonalnością części cieczowej w rozwiązaniach PV/T jest chłodzenie i zmniejszenie temperatury pracy ogniw słonecznych, co zwiększa efektywność oraz wydłuża ich żywotność [1–4].

Prawidłowe umiejscowienie pod względem azymutu oraz kąta nachylenia paneli jest kluczowe do pozyskiwania jak największej ilości energii słonecznej. Właściwa konfiguracja systemu PV/T zależy od wielu czynników: wysokości i szerokości geograficznej, azymutu oraz pory roku [5–7]. Ze względu na fakt, że panele PV/T wyposażone są w zamknięty system chłodzenia cieczą, modyfikacja kąta nachylenia może wpłynąć na ich działanie. W zależności od ciśnienia panującego w układzie i strumienia gęstości cieczy doprowadzonej do pojedynczego modułu oraz warunków środowiskowych obserwujemy różne zależności pomiędzy przepływem konwekcyjnym a wymuszonym. Poniższe badania wykorzystujące symulacje numeryczne skupione są na analizie wpływu konwekcji swobodnej na efektywność chłodzenia układu kolektora cieczowego dla modułu PV/T.

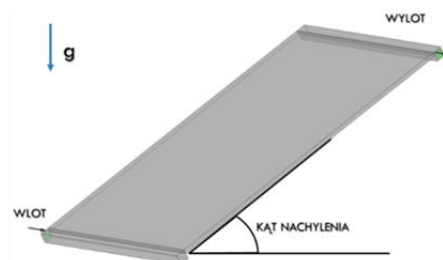
Model płyty chłodzącej minimodułu PV/T

Z uwagi na duże gabaryty pełnowymiarowego panelu (1500 x 1000 mm) postanowiono, że podstawowe badania symulacyjne oraz późniejsze badania eksperymentalne zostaną przeprowadzone dla modelu minimodułu obejmującego strukturę o zewnętrznych wymiarach ograniczonych do 500 x 300 mm.

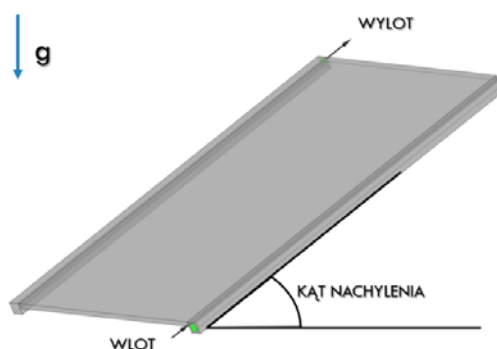
W ramach analizy przeprowadzono badania dwóch modeli oznaczonych jako MAKRO-R oraz MAKRO-P i schematycznie przedstawionych na rysunkach 1 oraz 2.

Składają się one z komór wlotowych i wylotowych o przekroju poprzecznym 10 x 10 mm oraz kanału głównego o wysokości 2 mm. Grubość wierzchniej płyty aluminiowej wynosi 2 mm. W module MAKRO-R komory wlotowa i wylotowa umieszczone są wzdłuż krótszej krawędzi modułu, natomiast w rozwiązaniu MAKRO-P komory te ulokowano wzdłuż dłuższych krawędzi minimodułu. Na

rysunkach 1 i 2 zaznaczono dodatkowo wektor przyspieszenia grawitacyjnego oraz kąt nachylenia montażu paneli.



Rys. 1. Schemat minimodułu MAKRO-R oraz sposób jego montażu



Rys. 2. Schemat minimodułu MAKRO-P oraz sposób jego montażu

Dla potrzeb wstępnej analizy teoretycznej przyjęto, że moduły ustawione są pionowo z wlotami zlokalizowanymi na dole, cieczą roboczą jest 50% roztwór wodny glikolu etylenowego (EGW50%), a zakres prędkości wlotowych zmienia się od 0,01 do 1 m/s (co odpowiada wartościom strumienia objętości cieczy w zakresie 0,06–6,0 l/min). W celu określenia wpływu konwekcji swobodnej na transport masy i ciepła w badanej strukturze wykonano obliczenia, pozwalające na ocenę sił wyporu względem sił lepkości, wykorzystujące liczbę kryterialna Richardsona (Ri) dla modelu MAKRO-R wg wzoru:

$$(1) \quad Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g \cdot L \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

a dla MAKRO-P wg wzoru:

$$(2) \quad Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g \cdot W_{CH}^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{V^2 \cdot L^2}$$

gdzie: Re – liczba kryterialna Reynoldsa, Gr – liczba kryterialna Grashofa, g – przyspieszenie ziemskie [m/s²], W_{CH}, L – wymiary charakterystyczne (tutaj szerokość i długość kanału) [m], β – współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/K], ΔT – różnica temperatur [K], V – prędkość liniowa cieczy [m/s].

Należy zwrócić uwagę, iż w przypadku rozwiązań MAKRO-P inny wymiar charakterystyczny jest dla konwekcji swobodnej (długość płyty, czyli szerokość kanału) oraz inny dla przepływu wymuszonego (długość kanału), podczas gdy dla rozwiązania MAKRO-R wymiarem charakterystycznym dla obydwu liczb kryterialnych będzie długość kanału L.

Jako umowną granicę przejścia z dominacji przepływu swobodnego na dominację przepływu wymuszonego przyjmuję się $Ri = 1$. Jednakże, uwzględniając zakres przejściowy, można wyróżnić następujące obszary:

- $Ri \leq 0,1$ dominuje przepływ wymuszony,
- $0,1 < Ri < 10$ transport ciepła i masy związany jest z przepływem swobodnym jak i wymuszonym,
- $Ri \geq 10$ dominuje konwekcja naturalna.

Tabela 1: Liczby kryterialne w zależności od strumienia objętości cieczy

		MAKRO-R	MAKRO-P
Q _{in} [l/min]	V _{in} [m/s]	R _i	R _i
0,06	0,010	27 549	272367
0,30	0,050	269	1237
0,45	0,075	79	550
0,60	0,10	34	309
0,90	0,15	10	92
1,5	0,25	2,2	20
3,0	0,50	1,5	2,5
4,5	0,75	0,3	0,7
6,0	1,00	0,2	0,3

Wyniki otrzymane dla modeli MAKRO-R i MAKRO-P zestawiono w Tabeli 1. Wynika z nich, iż dominujący udział konwekcji swobodnej w analizowanym przepływie zanika przy wartościach strumieniach objętości wlotowych cieczy Q_{IN} około 0,9 l/min dla MAKRO-R i 2,0 l/min dla MAKRO-P. W celu dokładniejszego poznania wpływu konwekcji na zjawiska zachodzące w modelowanych strukturach, przeprowadzono dla modeli MAKRO-R i MAKRO-P symulacje numeryczne.

Badania numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS CFX opartego na metodzie objętości skończonych, uzupełniając wcześniej przyjęte założenia o dodatkowe warunki brzegowe:

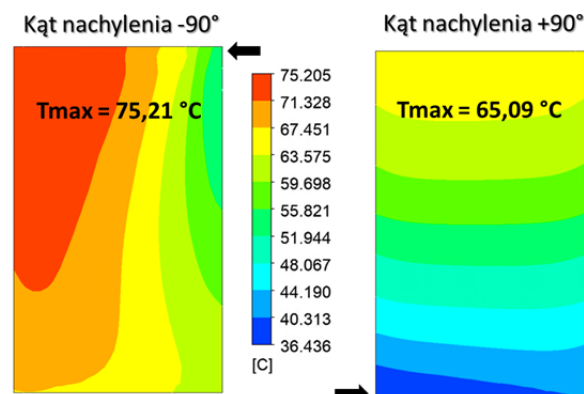
- gęstość strumienia ciepła wnikającego przez górną powierzchnię płyty wynosi 800 W/m² (odpowiada standardowej wartości natężenia padającego promieniowania słonecznego zmniejszonej o wartość energii, która uległa konwersji w strukturach PV),
- temperatura wlotowa cieczy wynosi 30°C,
- pozostałe powierzchnie są izolowane (warunek brzegowy adiabatyczny),
- wylot płynu swobodny (0 bar) przy ciśnieniu odniesienia odpowiadającym ciśnieniu atmosferycznemu,
- przepływ wymuszony z uwzględnioną konwekcją swobodną,
- charakter przepływu laminarny lub turbulentny (modele turbulencji SST)
- kąt nachylenia montażu panelu zmienia się od -90° (panel umieszczony pionowo z wlotem na górze struktury) do +90° (panel umieszczony pionowo z wlotem na dole struktury).

Jako kryterium końca symulacji dla stanu ustalonego przyjęto moment, w którym różnica pomiędzy mocą cieplną wynoszoną przez ciecz chłodzącą względem mocy cieplnej dostarczonej do górnej powierzchni płyty osiągnęła wartość nie większą niż 0,02% (co odpowiada różnicy na poziomie 0,03 W). Prezentowane rozkłady 2D temperatury i prędkości przepływu cieczy chłodzącej odpowiadają odpowiednio górnej powierzchni płyty (w przypadku temperatury) oraz płaszczyźnie równoległej do dolnej powierzchni płyty i znajdującej się w kanale dokładnie w połowie jego wysokości (w przypadku przepływów). Na podstawie tych danych oszacować można T_{max}, maksymalną temperaturę na powierzchni płyty PVT, równomierność rozkładu temperatury na powierzchni dla montażu ogniw PV oraz równomierność przepływu cieczy w kanale płyty chłodzącej modułu PV/T.

Wyniki

W pierwszym kroku przeprowadzono serię symulacji dla rozwiązania MAKRO-R dla kątów nachylenia -90°, -45°, -35°, 0°, 35°, 45° oraz 90° dla najniższej badanej prędkości wlotowej 0,01 m/s, dla której oczekiwano, iż konwekcja swobodna będzie dominującym mechanizmem transportu cieczy i w przypadku której wpływ montażu modułu będzie miał największe znaczenie. Przykładowe wyniki w postaci map przedstawiających rozkład temperatury na powierzchni przeznaczony dla części fotowoltaicznej oraz prędkości przepływu płynu w strukturze ilustrują kolejno rysunek 3 oraz rysunek 4. Na rysunkach czarnymi strzałkami zaznaczono wloty w poszczególnych strukturach.

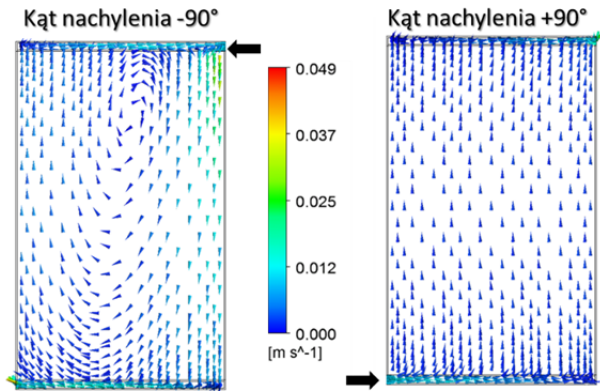
Zaprezentowane rozkłady potwierdzają, że przy niskich wartościach strumienia objętości cieczy wpływ przepływu konwekcyjnego jest istotny dla formy przepływu i rozkładu temperatury. W przypadku kątów dodatnich, gdy kierunek przepływu wymuszonego i swobodnego są współbieżne, przepływ i rozkład gradientu temperatury są bardziej równomierne, a maksymalna temperatura płyty niższa. W przypadku kątów ujemnych, gdy kierunki przepływu wymuszonego i swobodnego są rozbieżne, pojawiają się zawirowania w przepływie cieczy oraz obszary o wyraźnie wyższej temperaturze.



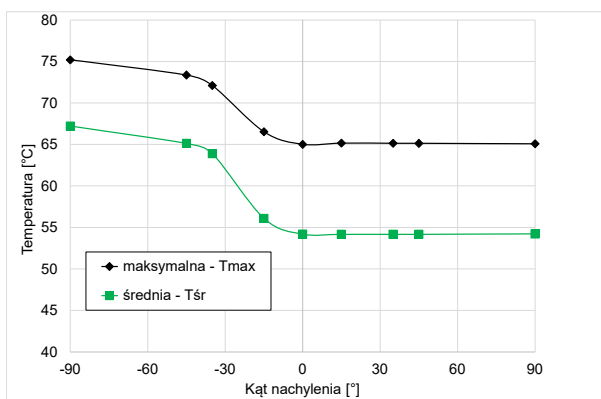
Rys. 3. Rozkład temperatury dla dwóch wybranych kątów nachylenia, dla modelu MAKRO-R oraz strumienia objętości 0,06 l/min

Na rysunku 5 pokazano wpływ kąta nachylenia na temperaturę maksymalną oraz temperaturę średnią na powierzchni płyty modułu MAKRO-R przy najniższej badanej wartości strumienia objętości cieczy. Przejmowanie ciepła przez ciecz maleje przy ujemnych kątach nachylenia, czego efektem jest wzrost temperatury maksymalnej T_{max} o 17% (czyli o około 10°C). Ponadto, różnica pomiędzy maksymalną wartością temperatury dla kąta 35° i 90° nie przekracza 1,5°C. Charakterystyki otrzymane dla

temperatury maksymalnej oraz średniej są przesunięte względem siebie odpowiednio o około 8-10°C.

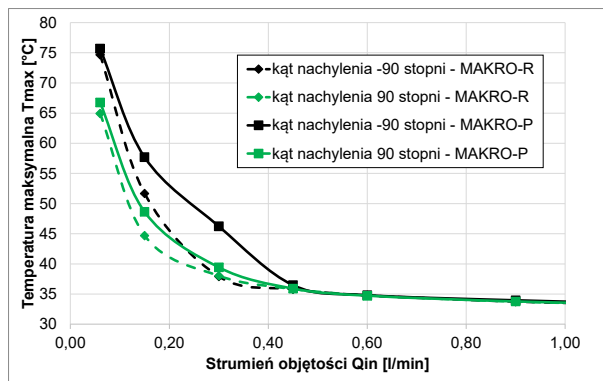


Rys. 4. Rozkład strumieni cieczy dla dwóch wybranych kątów nachylenia, dla modelu MIKRO-R oraz strumienia objętości 0,06 l/min



Rys. 5. Wpływ kąta nachylenia na maksymalną i średnią temperaturę na powierzchni płyty oraz na przyrost temperatury cieczy dla najniższej badanej strumienia objętości 0,06 l/min

W kolejnym kroku, aby zilustrować wpływ prędkości przepływu cieczy chłodzącej, przeprowadzono serię symulacji numerycznych dla rozwiązań MAKRO-R oraz MAKRO-P dla założonego zakresu strumieni objętości wlotowych cieczy od 0,06 do 6 l/min. Otrzymane wyniki w postaci temperatury maksymalnej na powierzchni do montażu ogniw fotowoltaicznych dla dwóch skrajnych położenia modułu odpowiednio: -90° i 90° zestawiono na rysunku 6. Aby lepiej zilustrować wartości, dla których zanikają różnice pomiędzy różnymi kątami nachylenia, oszczędzanych ograniczono do wartości 1 l/min.

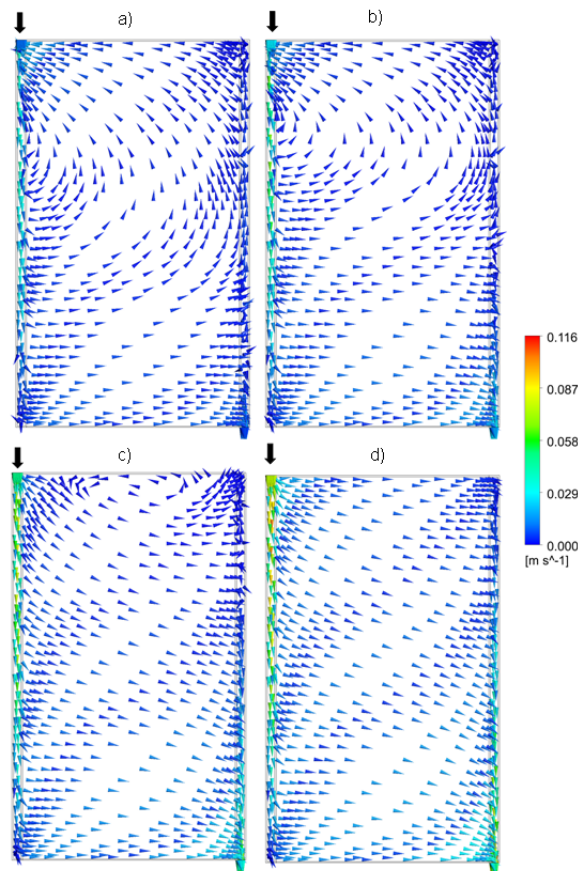


Rys. 6. Maksymalna temperatura na powierzchni płyty w funkcji strumienia objętości cieczy dla modelu MAKRO-R (linia przerywana) oraz MAKRO-P (linia ciągła) przy różnych kątach nachylenia dla EGW 50% jako czynnika chłodzącego

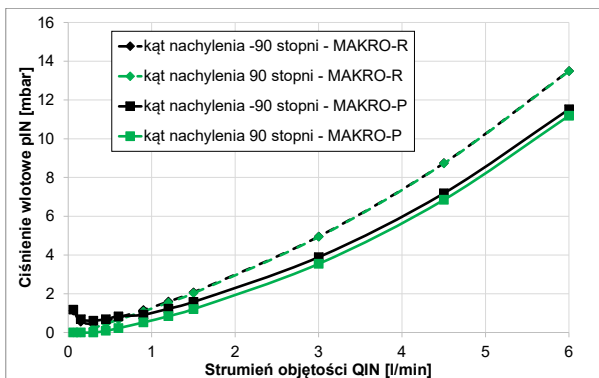
W przypadku obu modeli, MAKRO-R oraz MAKRO-P, po przekroczeniu granicznej wartości strumienia objętości cieczy, kąt nachylenia systemu nie ma wpływu na temperaturę maksymalną. Dla rozwiązania MAKRO-R oraz MAKRO-P wartość ta wynosi odpowiednio 0,3 l/min oraz 0,45 l/min. Ustawienie systemu pod kątem -90°, dla małych wartości strumienia objętości może spowodować zmianę temperatury o prawie 10°C. Zjawisko to szczególnie dobrze widoczne jest dla rozwiązania MAKRO-P, gdzie tworzą się wiry konwekcyjne, zanikające wraz ze wzrostem prędkości i zmianą dominacji przepływu wymuszonego nad swobodnym. Ilustruje to rysunek 7, na którym dla czterech wybranych wartości strumienia objętości wlotowych cieczy pokazano rozkład wektorów prędkości w strukturze. Lokalne obszary zawirowań w przepływie cieczy generują obszary wysokiej temperatury, które zostały opisane wyżej.

Analizując wpływ prędkości oraz kąta montażu minimodułów MAKRO-R oraz MAKRO-P warto przyjrzeć się także bliżej charakterystykom przepływowym otrzymanym dla tych dwóch rozwiązań przedstawionym na rysunku 8.

Mimo zaniku wpływu kąta nachylenia na efektywność odprowadzania ciepła, w przypadku obu modeli, MAKRO-R oraz MAKRO-P, po przekroczeniu wartości strumienia objętości cieczy odpowiednio 0,3 l/min i 0,45 l/min, obserwujemy odmienne zachowanie parametrów przepływowych. Dla modelu MAKRO-R zanik wpływu kąta nachylenia obserwujemy dla strumienia objętości cieczy 1,5 l/min (różnica spadku ciśnienia dla kąta -90° i +90° nie przekracza 2%), natomiast dla minimodułu MAKRO-P różnica spadku ciśnienia na strukturze dla obydwu badanych kątów spada do wartości 3% dopiero dla najwyższego badanego strumienia objętości cieczy 6 l/min.



Rys. 7. Rozkład prędkości przepływu cieczy dla kąta nachylenia -90°, dla modelu MAKRO-P oraz strumienia objętości cieczy: (a) 0,06 l/min, (b) 0,15 l/min, (c) 0,30 l/min oraz (d) 0,45 l/min



Rys. 8. Ciśnienie wlotowe systemu w funkcji strumienia objętości cieczy dla modelu MAKRO-R (linia przerywana) oraz MAKRO-P (linia ciągła) przy dwóch różnych kątach nachylenia.

Jako próg braku wpływu sił wyporu na charakterystyki przepływowe przyjęto różnicę spadku ciśnienia dla dwóch skrajnych kątów nachylenia o 10%. Dla MAKRO-R jest to wartość 0,9 l/min. Z kolei dla MAKRO-P, poziom ten jest osiągnięty dopiero dla przepływów, dla których strumień objętości przekracza 3 l/min.

Wnioski

W pracy przedstawiono analizę wpływu sposobu montażu oraz prędkości przepływu cieczy wlotowej na rozkład temperatury, a w szczególności na temperaturę maksymalną na powierzchni płyty chłodzącej modułu PV/T, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska konwekcji swobodnej. Przedstawione wyniki symulacji pokazują, że kąt nachylenia panelu wpływa na jego działanie w sposób znaczący przy niskich przepływach cieczy. W przypadku badanych rozwiązań wartość graniczna przepływu jest różna w zależności od konstrukcji z komorami wlotowymi umieszczonymi wzdłuż długich bądź krótkich krawędzi modułu. Szczególnie w zakresie ujemnych kątów nachylenia paneli niekorzystne ustawienie systemu powoduje występowanie niepożądanych zawirowań przepływu. Wynikiem tego zjawiska są obszary wysokiej

temperatury, które znacznie zmniejszają równomierność chłodzenia, podnosząc temperaturę paneli fotowoltaicznych. Zanik wpływu sposobu montażu na przebieg procesu chłodzenia występuje już przy niższej wartości prędkości przepływu niż na to wskazywała wstępna analiza z wykorzystaniem liczb kryterialnych.

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

Autorzy:

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

LITERATURA

- [1] Al-Waeli, A.H.A., Kazem, H.A., Chaichan, M.T., Sopian, K. Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems: Principles, Design, and Applications, Springer Nature, 2019
- [2] Svarc J., Most Efficient Solar Panels 2021, Clean Energy Reviews, 2021, www.cleanenergyreviews.info, dostęp 05.2021
- [3] 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, 26 (2018), 62-74
- [4] Odeh S., Behnia M., Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling, Heat Transfer Engineering, 30 (2009), no. 6, 499-505
- [5] Cai J., Quan Z., Lia T., Hou L., Zhao Y., Yao M., Performance study of a novel hybrid solar PV/T ground-source heat pump system, Procedia Engineering, 205 (2017), 1642–1649
- [6] X. Liu, Calculation and Analysis of Optimal Tilt Angle for PV/T Hybrid Collector, 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2012, pp. 791-795
- [7] Shu N., Kameda N., Kishida Y, Sonoda H., Experimental and Theoretical Study on the Optimal Tilt Angle of Photovoltaic Panels, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 5 (2006), no. 2, 1347-2852