

## Numeryczna analiza poprawy wydajności hybryd PV/TEG chłodzonych pasywnym przepływem powietrza

**Streszczenie.** W artykule opracowano trójwymiarowy model numeryczny hybrydy PV/TEG składającego się z generatora termoelektrycznego (TEG) podłączonego do tylnej części modułu fotowoltaicznego (PV). Temperatura pracy stanowi parametr określający efektywność i sprawność konwersji elektrycznej panelu fotowoltaicznego. Modelowanie numeryczne przedstawia podejście do obniżania temperatury pracy paneli fotowoltaicznych za pomocą ogniwa TEG chłodzonym pasywnym radiatorem powietrza. Model numeryczny został zrealizowany za pomocą oprogramowania ANSYS i obejmuje uwzględnienie zjawisk Thomsona, Seebecka oraz przewodzenia ciepła Joule'a. Powierzchnia wymiany pasywnego radiatora wpływa na całkowity transfer ciepła przy wyższych prędkościach powietrza zwiększając całkowitą sprawność elektryczną panelu.

**Summary.** The article developed a three-dimensional numerical model of a PV/TEG hybrid consisting of a thermoelectric generator (TEG) connected to the back of a photovoltaic (PV) module. The operating temperature is a parameter that determines the efficiency of electrical conversion of a photovoltaic panel (PV). Numerical modelling presents the approach to lowering the temperature of photovoltaic panels using a TEG cell cooled by a passive air radiator. The numerical model was implemented using ANSYS software and includes taking into account the phenomena of Thomson, Seebeck and Joule's heat conduction. The exchange surface of the passive radiator affects the total heat transfer at higher air speeds increasing the total electrical efficiency of the panel. **(Numerical analysis of improvement of efficiency of hybrid PV/TE cooled by a passive air radiator)**

**Słowa kluczowe:** panel fotowoltaiczny, generator termoelektryczny, hybrydowy PV-TEG, ogólna sprawność  
**Keywords:** photovoltaic panel, thermoelectric generator, Hybrid PV-TEG, overall efficiency

### Wstęp

Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz obawy dotyczące szkodliwej emisji ze spalania paliw kopalnych obecne działania są kierowane na ekonomiczne, odnawialne źródła energii (OZE). Energia słoneczna jest najbogatszym i najczystszy odnawialnym źródłem energii [1]. Ogniwa fotowoltaiczne przekształcają część padającego promieniowania słonecznego w energię elektryczną, a znaczna jej część jest emitowana w postaci ciepła. Tak więc termalizacja oraz straty absorpcyjne, które wynoszą ponad 50 % padającego promieniowanie stanowią ograniczenie wykorzystania ogniwa PV [2].

Z tego powodu wydajność konwersji elektrycznej wynosi tylko 14–22% rozpraszane ciepła [3], które powoduje wzrost temperatury ogniwa PV obniżając ich wydajność. Ponadto, aby uzyskać wyższą moc wyjściową oraz wydajność ogniwa PV stosuje się ich chłodzenie, w celu obniżenia temperatury. Ostatnie badania w dziedzinie generatorów termoelektrycznych (TEG) wykazały znaczący wpływ na wydajność paneli fotowoltaicznych (PV)[4]. Wraz ze wzrostem mocy wyjściowej panelu PV rośnie temperatura ogniwa fotowoltaicznego, co skutkuje spadkiem wydajności panelu, dlatego stosuje się różne metody chłodzenia paneli. Royne [5] przedstawił kompleksowy przegląd różnych metod chłodzenia paneli PV. W większość z tych metod, ciepło rozproszone w systemach PV jest wyprowadzane na zewnątrz. Innowacyjny pomysł zamiany energii cieplnej na energię elektryczną bezpośrednio przy użyciu generatora termoelektrycznego (TEG) został zaproponowany przez Van Sarka [6]. Zaproponowana koncepcja hybrydowego systemu PV/TEG w którym odpadowa energia cieplna ogniwa fotowoltaicznego jest wykorzystywana przez ogniwo TEG do generowania prądu elektrycznego. Wykazał on, że sprawność elektryczna układu PV/TEG wzrasta do 23% dla materiałów termoelektrycznych o współczynniku dobroci na poziomie I. Chavez-Urbiola [7] zbadał słoneczny hybrydowy układ z TEG dla czterech różnych konfiguracji. W swych badaniach przeprowadzonych dla TEG opartych na  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  z różnicą temperatur 50–200°C wykazał, że wydajność ogniwa TEG, prąd i napięcie mają liniową zależność od różnicy temperatur między ciepłymi i zimnymi końcami ogniwa TEG. Zhang i Chau [8] zaproponowali i wdrożyli hybrydowy system PV-TEG do samochodów, w

których zastosowano TEG w celu wykorzystania ciepła odpadowego spalin z silnika benzynowego i zoptymalizowano moc wyjściową przy śledzeniu punktu mocy maksymalnej (MPPT- z ang. „maximum power point tracking”). Wyniki pokazały, że sprawność elektryczna i termiczna panelu PV/TEG wzrosła z 16,7% do 23,5%. Yang i Yin [9] przeanalizowali układ hybrydowy PV/TEG z zastosowaniem rurociągów wodnych jako radiatora. Efektywność konwersji zależy od temperatury przepływu wody, promieniowania słonecznego i temperatury otoczenia dla zadanych właściwości materiałowych każdej warstwy. Zhang i in. [10] ocenili skuteczność układu hybrydowego PV/TEG zbudowanych z różnych materiałów, gdzie wykazali wpływ temperatury na efektywną wydajność ogniwa PV na podstawie równań półprzewodnikowych dla polimerowych ogniwa fotowoltaicznych. W niniejszej pracy podjęto tematykę symulacji modułu hybrydowego PV/TEG z chłodzeniem pasywnym radiatorem z uwzględnieniem efektów termoelektrycznych towarzyszących wymianie ciepła. Wyniki symulacji posłużą zarówno optymalizacji termicznej urządzenia jak i poprawy niezawodności jego działania.

### Metodologia

Rozkład temperaturowy warstwy w modelu liczony jest ze wzoru:

$$(1) \quad \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \dot{q} - \dot{P}$$

gdzie:  $c_p$  - specyficzna pojemność cieplna, [J/K];  $\lambda$  - przewodność cieplna każdej warstwy, [W/m·K];  $T$  - temperatura, [K];  $\dot{q}$  - objętościowy współczynnik absorpcji energii słonecznej, [W/m<sup>3</sup>];  $\dot{P}$  - ilość wytworzonej mocy elektrycznej przypadającej na objętość [W/m<sup>3</sup>].

Wytworzona moc ogniwa fotowoltaicznych liczona jest z równania (Evans 1991)[11]:

$$(2) \quad P_{gen} = \dot{q} \times \eta$$

$$(3) \quad \eta = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r)]$$

gdzie:  $\eta_r$  - sprawność ogniw fotowoltanicznych w  $T_r=298K$ ,  
 $T_r$  - temperatura ogniw fotowoltanicznych [K]

Równanie opisujące sprawność ogniwa TEG dane jest ze wzoru:

$$(4) \quad P_{TEG} = \eta \times Q_H$$

$$(5) \quad \eta = \frac{I^2 \cdot R_L}{Q_H} = \frac{I^2 \cdot R_L}{n \cdot s \cdot T_H \cdot I + \lambda \cdot \Delta T - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R}$$

gdzie:  $Q_H$  - ciepło dostarczane do ogniwa TEG, [W];  $T_H$  - temperatura ciepłego końca, [K];  $s$  - średni współczynnik Seebecka [V/K];  $R_L$  - opór elektryczny [ $\Omega$ ]

Współczynnik oporu kanałów do utrzymania temperatury zimnych końców poprzez radiator ogniwa TEG liczony jest ze wzoru:

$$(6) \quad f = \frac{\Delta P}{(L / D_H) \cdot \rho \cdot U_m^2 / 2}$$

gdzie:  $U_m^2$  - średnia prędkość powietrza na wlocie, [m/s];  $\rho$  - gęstość powietrza, [kg/m<sup>3</sup>];  $D_H$  - średnica zastępcza kanału, [m],  $L$  - długość kanału [m].

Związek między liczbą Nu a Pr został otrzymany zgodnie z korelacją Colburna [9]:

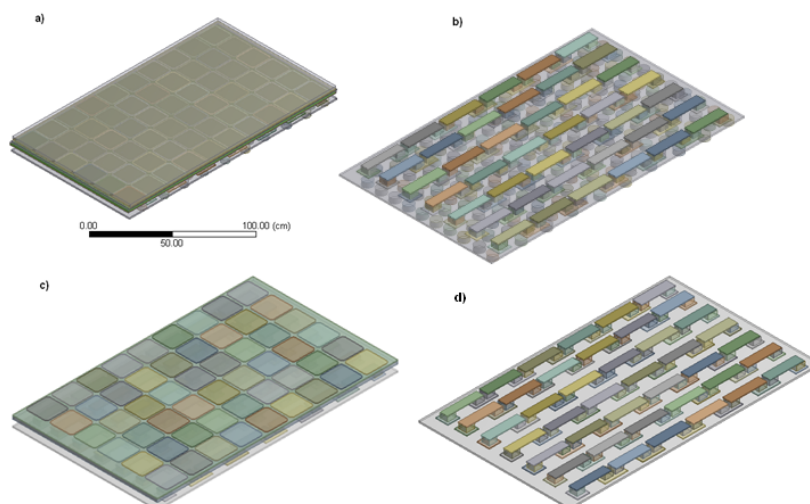
$$(7) \quad Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}}$$

gdzie:  $Nu$  - liczba Nusselta,  $Re$  - liczba Reynoldsa,  $Pr$  - liczba Prandla

Wykonany trójwymiarowy model panelu fotowoltanicznego 250W firmy Sunlink zbudowany z polikrystalicznego krzemu składa się z 5 warstw: szkła, poli(etyleń-co-octan winylu)(EVA), silikonowych ogniw fotowoltanicznych i Tedlaru. Ogniwo TEG wykonane jest z Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> z właściwościami materiałowymi określonymi w zależności od temperatury przez Zhang i Xuan [10]. Radiator części zimnej ogniwa TEG wykonany został z miedzi, charakteryzuje się dużą przewodnością cieplną. Poszczególne ogniwa fotowoltaniczne mają wymiary 156 mm × 156 mm. Geometrię modelu zaprezentowano na rys.1. Poszczególne własności materiałowe zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości materiałowe modelu panelu fotowoltanicznego

Warstwa	Grubość, mm	Przewodność cieplna, (W/m·K)	Gęstość, (kg/m <sup>3</sup> )	Pojemność cieplna, J/kg·K
Szkło	3.2	1.8	3000	500
EVC	0.5	0.35	960	2090
Komórki PV	0.4	148	2330	677
Tedlar	0.2	0.2	1200	1250



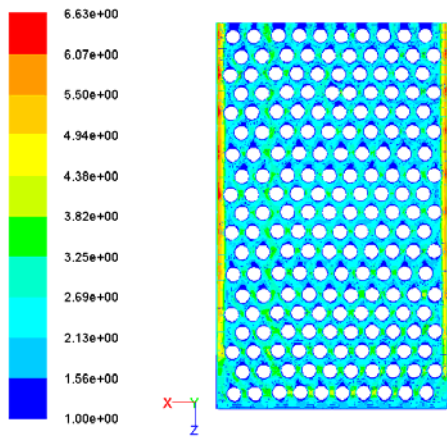
Rys.1. Budowa modelu hybrydy PV/TEG z pasywnym radiatorem a) widok całości, b) widok ogniw TEG z radiatorem c) widok panelu PV d) widok ogniwa TEG bez radiatora

Geometria modelu została zrealizowana przy użyciu Ansys Design Modeler. Radiator pasywny modułu TEG chłodzony wiatrem składał się z 190 cylindrów o średnicy 0.5 cm i długości 1 cm. Ułożenie ich miało na celu zapewnienie jak najniższej temperatury zimnych końców ogniwa TEG. Zastosowano siatkę heksagonalną. Minimalny rozmiar komórek to 0.001 m dla radiatora i 0.003 m dla modułu PV/TEG. Do symulacji promieniowania słonecznego wykorzystano specjalistyczne narzędzie „Solar Ray Tracing” z oprogramowania Fluent. Parametry optyczny panelu fotowoltanicznego został określony jako globalny współczynnik absorpcji promieniowania słonecznego  $\alpha = 0,7$  [8]. Przeprowadzono symulacje dla temperatury zewnętrznej w granicach 15-30°C przy natężeniu promieniowania słonecznego 200-1000 W/m<sup>2</sup>. Konwekcyjny współczynnik transportu ciepła został określony na poziomie  $\alpha_{con} = 8$  W/m<sup>2</sup>K. Równania ciągłości,

prądu i energii rozwiązano za pomocą metody objętości skończonej ze schmatem „upwind” I rzędu. Stosowany w pełni niejawnym schemat numeryczny, gdzie gradienty „upwind” są używane do członów konwekcyjnych i dyfuzyjnych.

#### Omówienie wyników symulacji

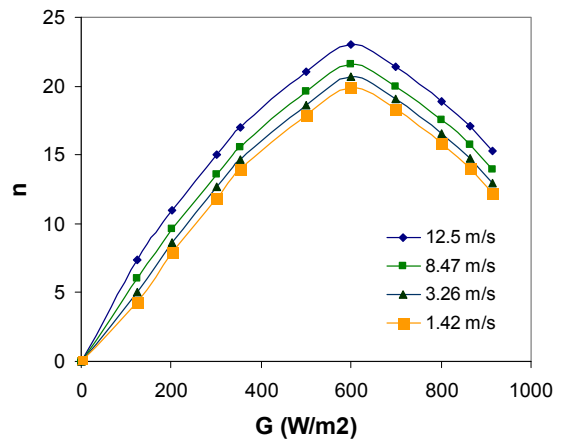
Na rys.2 przedstawiono przykładowe kontury prędkości powietrza w radiatorze TEG dla  $V_{wi}=1$  m/s. Wartość współczynnika konwekcji powietrza wynosi 8 W/m<sup>2</sup>·K. Przy wzroście prędkości powietrza szybkość odprowadzonego ciepła z zimnych końców TEG rośnie. Ilość energii wytwarzanej przez układ jest bezpośrednio związana z promieniowaniem słonecznym. Całkowita moc wytworzona przez system PV-TEG w porównaniu z pojedynczym systemem fotowoltanicznym i generowanej mocy wzrosła o 14,3% przy warunkach STC dla prędkości wiatru 6 m/s.



Rys.2. Kontury prędkości powietrza w radiatorze ( $V_{wi}=1$  m/s)

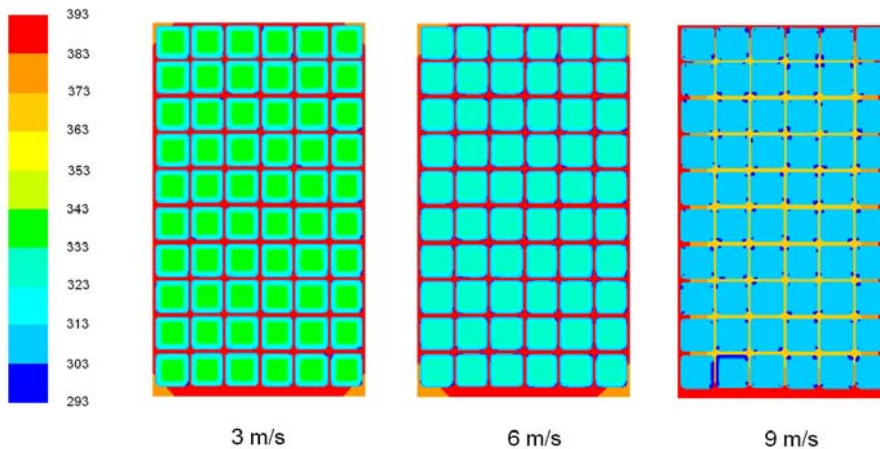
W obliczeniach uwzględniono wartość padającego promieniowania słonecznego w wartościach od 100 do  $1000 \text{ W/m}^2$ , co obejmuje wartość emisji zarówno latem jak i zimą. Obliczenia numeryczne oparte na parametrach wejściowych: prędkości wiatru i mocy promieniowania słonecznego wpływają na parametry wydajnościowe układu PV/TEG. Zmianę wartości współczynnika sprawności panelu PV w funkcji natężenia promieniowania słonecznego  $G(\text{W/m}^2)$  przedstawiono na rys.3. Powyżej natężenia promieniowania słonecznego  $600 \text{ W/m}^2$ , sprawność panelu PV spada w związku ze wzrostem temperatury.

Na rys.4. przedstawiono temperaturę paneli fotowoltaicznych w zależności od prędkości wiatru oddziaływującego na radiator TEG. Ze wzrostem prędkości wiatru ilość odbieranego ciepła z TEG jest większa, co znacznie zwiększa sprawność panelu PV.

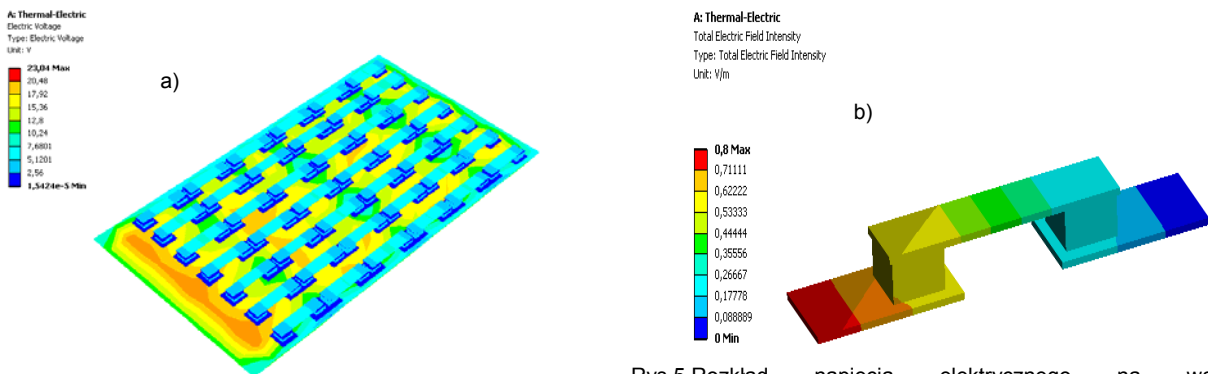


Rys.3. Zmiana wartości współczynnika sprawności  $\eta$  panelu PV w funkcji natężenia promieniowania słonecznego  $G(\text{W/m}^2)$

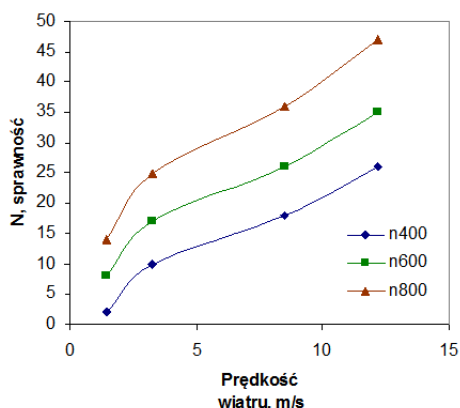
W symulacji pod panelem PV zastosowano 42 ogniwa TEG. Liczba ogniw ma znaczny wpływ na gradient temperatury panelu. Umożliwia to określenie gradientu termicznego w zmianie konfiguracji projektu z systemami magazynowania energii cieplnej. Sprawność elektryczna panelu fotowoltaicznego zwiększa się o moc wytwarzaną dla tej samej ilości promieniowania energii świetlnej. Na rys.5a) przedstawiono rozkład napięcia elektrycznego w warstwie termogeneratorów, na rys.5b) przedstawiono rozkład intensywności pola elektrycznego na pojedynczym termogeneratorze. Profil temperaturowy wykazuje zachowanie nieliniowe przy wyższych gradientach temperaturowych. To zachowanie spowodowane jest wewnętrznym generowaniem ciepła Joule'a u podstawy ogniwa TEG.



Rys.4. Temperatura ogniw fotowoltaicznych (K) w zależności od prędkości wiatru w radiatorze (3-9 m/s)



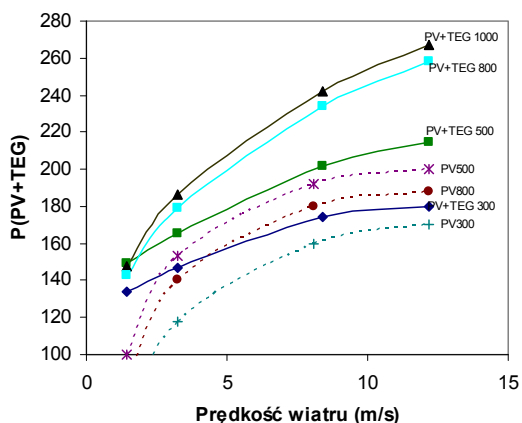
Rys.5. Rozkład napięcia elektrycznego na warstwie termogeneratorów (V) a) Rozkład intensywności pola elektrycznego na pojedynczym termogeneratorze (V/m) b)



Rys.5. Zmiana wartości sprawności TEG w zależności od prędkości wiatru dla wybranych wartości natężenia promieniowania słonecznego ( $n=400, 600, 800 \text{ W/m}^2$ )

Zmianę sprawności ogniw TEG w zależności prędkości wiatru wpływającego do radiatora przedstawiono na rys.6. Wraz ze wzrostem prędkości wiatru i natężenia promieniowania słonecznego z  $400$  do  $800 \text{ W/m}^2$  sprawność ogniw TEG rośnie, jednak połączenie szeregowo dużej ilości ogniw wiąże się z większymi kosztami instalacji. Niskie wykorzystanie ciepła przy niskiej prędkości wiatru ( $1\text{--}2 \text{ m/s}$ ) przyczynia się do uzysku energii na poziomie  $5\text{--}7\%$ , co znacznie zwiększa okres zwrotu kosztów inwestycyjnych.

Całkowita moc wyjściowa układu PV/TEG przy odpowiednich warunkach atmosferycznych jest znacznie wyższa niż dla samego panelu PV. Biorąc pod uwagę efekty Thomsona to moc wyjściowa TEG rośnie wraz ze wzrostem promieniowania słonecznego, jak i prędkości wiatru. Na rys.6. przedstawiono zmiany wartości mocy maksymalnej układu PV/TEG. Dzięki uzyskiwaniu większej sprawności ogniwa TEG uzysk mocy jest znacznie większy przy mocy promieniowania słonecznego  $1000 \text{ W/m}^2$ , pomimo, że sprawność ogniwa PV powyżej  $600 \text{ W/m}^2$  maleje.



Rys.6. Zmiana wartości mocy maksymalnej (PV+TEG) dla wybranych wartości prędkości wiatru na radiatorze

Zmiana temperatury modułu fotowoltaicznego i zimnej strony modułu TEG z promieniowaniem słonecznym dla różnych prędkości wiatru, uwzględniając straty ciepła spowodowane przewodzeniem, konwekcją i promieniowaniem w połączeniu z efektami Seebecka powoduje zmianę wartości mocy wyjściowej PV, spowodowany innym współczynnikiem przewodzenia ciepła i wpływa na ogólną sprawność układu PV/TEG.

## Podsumowanie

Opracowany model numeryczny układu hybrydowego PV/TEG chłodzony radiatorem pasywnym z wypełnieniem cylindrycznym pozwala w efektywny sposób obliczyć wydajność i sprawność hybrydy PV/TEG w zależności od mocy padającego promieniowania słonecznego i prędkości wiatru. Wpływ efektu Thomsona jest bardziej dominujący przy wyższym gradiencie temperatury. Sprawność układu hybrydowego może być zoptymalizowana pod kątem uzyskania maksymalnej mocy w zależności od skuteczności chłodzenia panelu PV. Chłodzenie pasywne podwyższa sprawność elektryczną całego układu nawet do  $18.4\%$  przy najbardziej sprzyjających warunkach atmosferycznych. Schłodzenie panelu o  $65^\circ\text{C}$  wprowadza uzysk energetyczny na poziomie  $12.06\%$ . Ponadto, omija niebezpieczeństwa związane z „hot spotami”, które mogą nawet doprowadzić w skrajnych przypadkach do samozapłonu. Wymuszona konwekcyjna strefa wymiany ciepła powstająca w objętości kontrolnej z tyłu panelu fotowoltaicznego zwiększa współczynnik przenikania ciepła od strony cylindrycznego wypełnienia. Sposób ustawienia cylindrów jest również ważnym parametrem w szybkości wymiany ciepła. Przedstawione ogniwo TEG z radiatorem pasywnym, może stanowić tanie i energooszczędne rozwiązanie do chłodzenia paneli fotowoltaicznych.

Praca realizowana ze środków na działalność statutową (11161020/324) finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

**Autorzy:** Mgr inż. Artur Wodolazski, Główny Instytut Górnictwa, Zakład Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza, Plac Gwarków 1, 40-166, Katowice, E-mail: [awodolazski@giq.katowice.eu](mailto:awodolazski@giq.katowice.eu)

## LITERATURA

- [1] Huen P., Daoud WA.: Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 72(2017), 1295–302.
- [2] Tabish S., Ashraf I.: Performance evaluation of PV module under various parametric conditions, *Int. J. Ambient Energy*, 39(2018), 317–22.
- [3] Alami A.H.: Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules, *Energy Convers., Manage.*, 77(2014), 668–79.
- [4] Lin J., Liao T., Lin B.: Performance analysis and load matching of a photovoltaic thermoelectric hybrid system, *Energy Convers., Manage.*, 105(2015), 891–899.
- [5] Royne A., Dey C.J., Mills D.R.: Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review, *Solar Energy Mater. Sol. Cells.*, 86(2005), 451–483.
- [6] Van Sark.: Feasibility of photovoltaic–thermoelectric hybrid modules, *Applied Energy*, 88(2011), 2785–2790.
- [7] Chávez-Urbiola EA, Vorobiev YV, Bulat LP.: Solar hybrid systems with thermoelectric generators. *Solar Energy*, 86(2012), 369–378.
- [8] Zhang X, Chau KT.: An automotive thermoelectric–photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking. *Energy Convers. Manage.*, 52(2011), 641–647.
- [9] Yang DJ, Yin HM.: Energy conversion efficiency of a novel hybrid solar system for photovoltaic, thermoelectric, and heat utilization. *IEEE Trans Energy Convers*, 26(2011), 662–670.
- [10] Zhang J., Xuan Y.M., Yang L.L.: Performance estimation of photovoltaic–thermoelectric hybrid systems, *Energy*, 78(2014), 895–903.
- [11] Evans DL. Simplified method for predicting photovoltaic array output, *Solar Energy* 27(1981), 555–560.