

TERMOELEKTRYCZNA GENERACJA MOCY ELEKTRYCZNEJ WYKORZYSTUJĄCA PROMIENIOWANIE SŁONECZNE – PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

A. Ruciński

Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

STRESZCZENIE

Praca przedstawia teoretyczne podstawy termogeneracji prądu elektrycznego kosztem różnicy temperatury pomiędzy źródłem ciepła a otoczeniem. W zastosowaniach praktycznych jest to odpadowe źródło ciepła pozwalające zwiększać energooszczędność układów ciepłno-mechanicznych korzystających ze spalania paliw kopalnych lub promieniowania słonecznego. W artykule przypomniano zalety i wady materiałów termoelektrycznych, jednocześnie wskazując intensywny postęp w poszukiwaniu doskonalszych materiałów wykorzystywanych do budowy modułów termoelektrycznych np. półprzewodników pochodzenia organicznego. W artykule pokazano przykłady prototypowych urządzeń, w których do generacji prądu elektrycznego wykorzystuje się energię promieniowania słonecznego. Sprawność tego typu urządzeń już w tej chwili sięga kilkunastu procent.

ABSTRACT

The work indicates the theoretical basis of thermoelectric power generation thanks to temperature difference between the heat source and the environment. In practical applications it is a waste heat source what allows to increase energy efficiency of thermo-mechanical systems driven by fossil fuels. The article shows the advantages and disadvantages of thermoelectric materials, while pointing to intense progress in the search for better materials used for the construction of thermoelectric modules i.e. organic semiconductors. In the paper there are examples of prototype devices in which the electrical power generation goes through conversion of solar energy. Nowadays, efficiency of this type of equipment reaches several percent.

WSTĘP

Urządzenia termoelektryczne są w chłodnictwie stosowane od wielu lat. Specjalistom znane jest zastosowanie tzw. efektu Peltiera, który pozwala w układzie zbudowanym z dwóch rodzajów półprzewodników stworzyć za pomocą prądu stałego różnicę temperatury na odpowiednio połączonych spoinach. Wytwarza się wtedy możliwość odbioru strumienia ciepła przez spoinę, której temperatura jest niższa od temperatury otoczenia. Strumień ciepła odebrany jest następnie rozpraszany za pomocą spoiny o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia.

Warto w tym miejscu przypomnieć właściwości tradycyjnie stosowanych urządzeń termoelektrycznych w chłodnictwie. Do podstawowych zalet zaliczamy (Filin, Owsicki 2010; Rusowicz et al 2011):

- brak czynnika chłodniczego oraz olejów smarnych, co stawia urządzenia termoelektryczne w szeregu rozwiązań przyszłościowych ze względu na ochronę środowiska naturalnego;
- brak części ruchomych przyczynia się do oszczędności kosztów eksploatacyjnych i kosztów związanych czasem potrzebnym na naprawy i konserwacje (uszkodzony termoelement wymienia się na nowy w ciągu krótkiego czasu);
- jest możliwa regulacja zakresu mocy chłodniczej w zakresie od 0 do 100%;
- prosta, bezobsługowa konstrukcja, kształty elementów mogą przybierać formy potrzebne w danym zastosowaniu;

- w przypadku zastosowań chłodniczych termoelementy pozwalają schładzać jedynie wybrany fragment danego podzespołu lub urządzenia, bez potrzeby umieszczania go w całości w objętości chłodzonej.

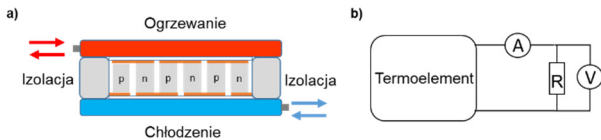
Tradycyjnie stosowane materiały termoelektryczne wprowadzają też pewne ograniczenia stosowania, do których należą:

- toksyczność stopów zawierających bizmut i tellur;
- straty ciepłne związane z efektem ciepła Joule'a (ogrzewanie się półprzewodnika związane z oporami przewodzenia prądu elektrycznego);

Opisane cechy pokazują duży potencjał użytkowy urządzeń termoelektrycznych w zastosowaniach chłodniczych, gdzie wykorzystywany jest efekt Peltiera. Uzyskiwane temperatury to -50 do -90°C , a w układzie kaskadowym daje się uzyskać nawet temperaturę -120°C .

Dość niedawno poszukiwania metod najoszczędniejszego gospodarowania energią nieodnawialną (w szczególności) kierują zainteresowanie naukowców w stronę wykorzystania efektu Seebecka (generacja prądu elektrycznego pomiędzy dwoma spoinami półprzewodników umieszczonymi w różnych temperaturach – efekt „odwrotny” do efektu Peltiera). Materiały termoelektryczne zatem mogą znaleźć zastosowanie jako alternatywne źródła wytwarzania energii elektrycznej (Rys. 1) wykorzystując odpadową energię

cieplną spalin powstających w skali przemysłowej (elektrociepłownie, huty, źródła ciepła w różnych branżach produkcyjnych) i skali komercyjnej (spaliny samochodowe, piece gazowe do ogrzewania domów jednorodzinnych). Tworzone z nich urządzenia nazywane są obecnie termoelektrycznymi generatorami prądu elektrycznego.



Rys. 1 Schemat pracy generatora termoelektrycznego:
 a) widok przekroju z dwoma wymiennikami ciepła – dostarczającym i rozpraszającym strumień ciepła;
 b) widok ideowy obwodu elektrycznego.
 (p, n – półprzewodniki typu p i n; R- opór;
 A – amperomierz; V – woltomierz)

W zastosowaniach do generacji prądu elektrycznego powstają materiały od dużej wytrzymałości temperaturowej i dużym zakresie możliwych temperatur pracy (do 800°C).

WSPÓLCZYNNIK DOBROCI I MATERIAŁY TERMOELEKTRYCZNE

Miara dobroci materiałów, z których zbudowane są termoelektryczne generatory prądu elektrycznego jest współczynnik efektywności znany z literatury (Li 2011) jako ZT. Jest on zdefiniowany jak pokazano w wyrażeniu (1):

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho\lambda} T \quad (1)$$

Dobry materiał termoelektryczny powinien charakteryzować się dużym współczynnikiem Seebeck'a by wytwarzać, jak największe napięcie, w tym wysoką przewodnością elektryczną oraz niską przewodnością cieplną, aby ograniczać straty ciepłone na złączu (Królicka et al. 2012).

Materiały tradycyjne używane do budowy termoelementów (Goldsmid 2014), czyli tellurek bizmutu Bi_2Te_3 w temperaturze otoczenia (ok. 300 K) posiada współczynnik dobroci na poziomie 1. Badania materiałowe są nakierowane na budowanie materiałów nowych o lepszych współczynnikach dobroci. Pozwala to zwiększać obszar stosowania i polepszać sprawności generowania prądu elektrycznego.

Wyróżnić należy materiały na bazie pierwiastków grupy IV układu okresowego Mendelejewa. Są to głównie stopy oparte w składzie o german i krzem ($\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ typ p i n). Materiały tego typu pracują optymalnie w zakresie od 870K do 1300K. Współczynniki dobroci ZT jest definiowany na poziomie około 1,3. Dodatkowo są wykorzystywane związki typu: krzemek magnezu Mg_2Si , germanek magnezu Mg_2Ge i cynian magnezu Mg_2Sn (Sano et al 2003, Sales 2007), których współczynnik dobroci

kształtuje się na poziomie 0,8. Oprócz tego rozwija się obecnie stosowanie materiałów wykorzystujących tellurek ołowiu wraz z domieszkami chromu i lantanu (Paul et al. 2011). Pierwiastki te pozwalają osiągnąć znaczne zwiększenie wartości generowanej siły elektromotorycznej. Dla temperatury 550K współczynnik ZT wynosi 2,2 a dla temperatury 850K wynosi on 1,8.

Do materiałów najnowocześniejszych zaliczają się tzw. polikrystaliczne szkła fononowe (z ang. Phonon-Glass-Electron-Crystal) o strukturze krystalicznej tworzącej sieć, w którą wbudowuje się domieszkowane atomy metalu nadające im pożądane właściwości. Przykładami są półprzewodniki $\text{Sr}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ o ZT równym 1,35 (900K), ale również tzw. skutterudyty charakteryzujące się dużą przewodnością elektryczną. Należą do nich związki o wzorach sumarycznych $\text{Ba}_{0,08}\text{Yb}_{0,09}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ i $\text{Ba}_{0,3}\text{Ni}_{0,05}\text{Co}_{3,95}\text{Sb}_{12}$ o dużych wartościach współczynnika ZT równych około 1,7 przy temperaturze rzędu 850K.

Natomiast najnowsze materiały tworzone za pomocą nowoczesnych technik inżynierii materiałowej (Hsu et al. 2004), takie jak związki strukturalne $\text{AgPb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ (LAST) i $(\text{GeTe})_{75}(\text{AgSbTe}_2)_{25}$ (TAGS-75) charakteryzują się wartością współczynnika ZT na poziomie 1,7 w zakresie temperatury od 700 do 800K. Szacuje się, że współczynnik efektywności, który zapewniłby możliwość generacji prądu elektrycznego w ilości opłacalnej ekonomicznie, powinien być na poziomie od 2 do 3. Obecnie prace naukowców i inżynierów skupiają się na możliwości wykorzystania bardzo dużych ilości energii cieplnej traconej ze względu na 30% – 40% sprawność wytwarzania energii elektrycznej np. w tradycyjnych elektrociepłowniach opalanych paliwami kopalnymi. Niektórzy naukowcy stawiają tezę, że termogeneracja ma w przyszłości stanowić bardzo poważne źródło energii elektrycznej (Date et al. 2014).

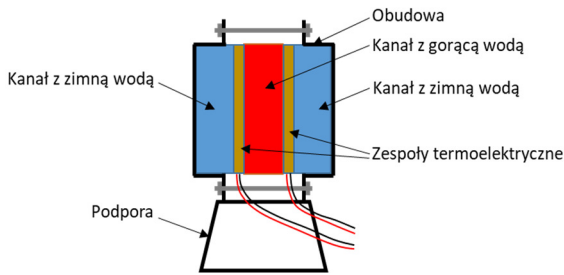
ZASTOSOWANIA

Spośród wielu nowatorskich zastosowań generatorów termoelektrycznych mających związek z energetyką słoneczną można wyróżnić dwa.

W pierwszym rozwiązaniu do generacji prądu elektrycznego wykorzystano ciepłą wodę ogrzewaną w próżniowych kolektorach słonecznych o łącznej powierzchni około 25 m² (Faraji et al. 2014). Zastosowano 8 kolektorów próżniowych, 16-to rurowych o rozmiarach 1,9 x 2,1 x 0,15 m. Maksymalna moc cieplna każdego z nich to 2350 W. Stanowisko badawcze zawiera zbiornik izolowany służący do gromadzenia wody ogrzanej w dzień, tak aby w nocy była możliwa generacja prądu elektrycznego. Odbywa się ona za pomocą 24 modułów termoelektrycznych zamontowanych pomiędzy kanałami wodnymi (Rys. 2).

Parametry pracy instalacji w trakcie słonecznego dnia na uniwersytecie w Melbourne (Australia) pozwoliły na generację maksymalnej mocy elektrycznej na poziomie 16 W przy uzyskanym napięciu stałym

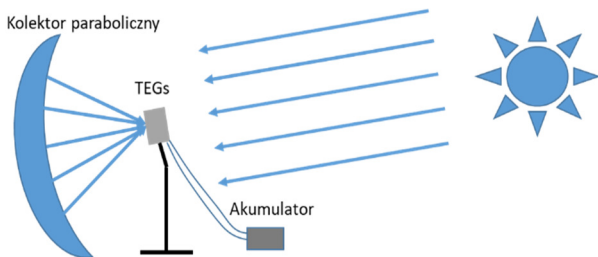
o wartości 57 V. Eksperyment prowadzono w ciągu dnia od około 8.30 rano do zachodu Słońca.



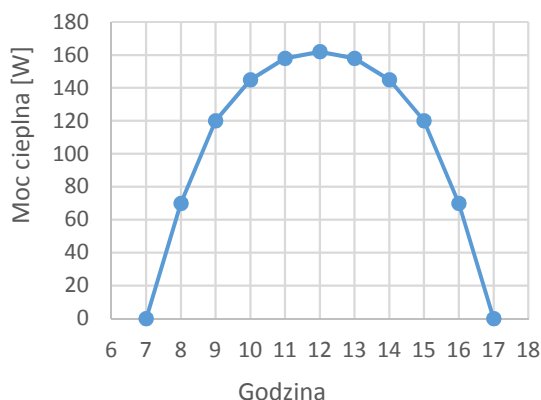
Rys. 2 Sposób montażu modułów termoelektrycznych. (na podstawie (Faraji et al. 2014))

Rano zmierzona moc promieniowania słonecznego była na poziomie 270 W/m², a maksymalna wartość promieniowania osiągnęła około południa wartość 1050 W/m². W czasie największej aktywności słonecznej temperatura wody wykorzystywana do generacji mocy elektrycznej wynosiła 90°C.

Drugim przykładem zastosowania generatora termoelektrycznego jest proste urządzenie zaproponowane przez naukowców z Fukuroi w Japonii (Zhua et al. 2014). Lustro – kolektor paraboliczny (widoczny na Rys. 3) zbiera i ogniskuje promieniowanie słoneczne na 4 zespołach termoelement (101 x 110 mm) + radiator.



Rys. 3 Widok poglądowy prostego układu do generacji prądu elektrycznego kosztem promieniowania słonecznego. (na podstawie (Zhua et al. 2014))



Rys. 4 Rozkład godzinowy mocy cieplnej na zespole termoelementów generujących prąd elektryczny. (na podstawie (Zhua et al. 2014))

Badania prowadzono w ciągu dnia, który był słoneczny, a maksymalne natężenie promieniowania

przypadało na południe i wynosiło około 820 W/m². Określono też moc cieplną dostarczaną przez kolektor słoneczny w ciągu dnia. Stwierdzono, że wartość maksymalna to 162 W (Rys. 4).

Prowadzony eksperyment pozwolił na wygenerowanie na modułach termoelektrycznych dla określonej różnicy temperatury danego napięcia stałego prądu elektrycznego, co uwidoczniło w Tabeli 1. Należy dodać, że na powierzchni termoelementów w warunkach największego nasłonecznienia stwierdzono temperaturę bliską około 100°C.

Tabela 1 Zależność generowanego napięcia w obwodzie elektrycznym z termoelementami od uzyskanej różnicy temperatury (na podstawie (Zhua et al 2014))

Różnica temperatury [K]	30	40	50	60	70	80
Napięcie [V]	2,10	2,50	3,20	3,50	3,70	3,75

PODSUMOWANIE

Termogeneracja prądu elektrycznego wykorzystująca materiały półprzewodnikowe wcześniej wykorzystywane w technologii chłodniczej jest zagadnieniem cały czas nowym i dostrzeganym w świecie naukowym. W trakcie analiz teoretycznych i później doświadczalnych dotyczących termogeneracji, można dostrzec wiele możliwych kierunków badań i możliwych zastosowań (Anatychuk et al 2012, Yang et al. 2009) związanych z właściwościami materiałów, możliwymi do osiągnięcia sprawnościami termodynamicznymi, uzyskiwaniem odpowiednich mocy elektrycznych, a przez to natężeń i napięć prądu stałego. Interesujące jest określenie optymalnych zakresów temperatury źródeł oraz związanej z tym możliwości do wykorzystania wydajności cieplnej w pojedynczych lub multiplikowanych (kaskadowych) układach termoelektrycznych (Lee 2010). W pracy wybrano do rozważań tylko niektóre aspekty poznawanej technologii oraz podano przykłady generowania prądu elektrycznego za pomocą energii słonecznej.

SPIS SYMBOLI

α	współczynnik Seebecka	VK ⁻¹
ρ	oporność właściwa	Ω m
λ	przewodność cieplna	Wm ⁻¹ K ⁻¹
T	temperatura bezwzględna	K

LITERATURA CYTOWANA

Anatychuk L.I., Kuz R.V., 2012, *Materials for Vehicular Thermoelectric Generators*, Vol. 41, No 6, Journal of Electronic Materials, pp. 1778 – 1784

- Date A., Dixon C., Akbarzadeh A., 2014, *Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation*, No 33, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 371-381
- Faraji A. Y. et al., 2014, *Base-load thermoelectric power generation using evacuated tube solar collector and water storage tank*, No 57, Energy Procedia, pp. 2112 – 2120
- Filin S., Owsicki A., 2010, *Zasady projektowania i eksploatacji chłodziarek termoelektrycznych*, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej
- Goldsmid H. J., 2014, *Bismuth Telluride and Its Alloys as Materials for Thermoelectric Generation*. No 7, Materials, pp. 2577-2592
- Hsu K. F. et al., 2004, *Cubic Ag₃Sb: bulk thermoelectric materials with high figure of merit*, Science, pp. 818-821
- Królicka A., Hruban A., Mirowska A., 2012, *Nowoczesne materiały termoelektryczne – przegląd literaturowy*, Vol. 40, No 4, Electronic Materials,
- Li L., Chen Z., Zhou M., Huang R., 2011, *Developments in semiconductor thermoelectric materials*, Vol. 5, No 2, Front. Energy, pp. 125-136
- Lee H., 2010, *Thermal Design. Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*, Wiley, USA
- Paul B., Rawat K., Banerji P., 2011, *Dramatic enhancement of thermoelectric power factor in PbTe: Cr co-doped with iodine*. No. 98, Appl.Phys. Lett., pp. 262101
- Rusowicz A., Ruciński A., Grzebielec A., 2011, *Ćwiczenia w Laboratorium Chłodziarstwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- Sano S., Mizukami H., Kaibe H., 2003, *Development of High-Efficiency Thermoelectric Power Generation System*, Vol. 49, No. 152, Komatsu Technical Report, pp. 1-7
- Sales B. C., 2007, *Critical overview of recent approaches to improved thermoelectric materials*, No. 4, Int. J. Appl. Ceram. Technol., pp. 291-296
- Yang J., Stabler F.R., 2009, *Automotive Applications of Thermoelectric Materials*, Vol. 38, No. 7, Journal of Electronic Materials, pp. 1245 - 1251
- Zhua N., Matsuura T., Suzukib R., Tsuchiyaa T., 2014, *Development of a Small Solar Power Generation System based on Thermoelectric Generator*, No 52, Energy Procedia, pp. 651 – 658