

Efektywność zastosowania modułu Peltiera do odzysku energii z procesów emitujących ciepło odpadowe

Krzysztof Szetela¹⁾, Łukasz Szwancyber²⁾

¹⁾ KGHM Cuprum sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław,

²⁾ KGHM Polska Miedź S.A., Lubin, lukasz.szwancyber@kgbm.com

Streszczenie

W Polsce efektywność energetyczna jest blisko trzy razy niższa niż w krajach Europy Zachodniej. Znaczna ilość energii jest tracona w procesach, w których nie ma prowadzonego odzysku ciepła odpadowego, co w znaczący sposób przekłada się na efektywność. Niniejszy artykuł prezentuje jedną z możliwości zastosowania układu przetwarzającego ciepło odpadowe w energię elektryczną – ogniwo Peltiera – co bezpośrednio mogłoby wpłynąć na poprawę bilansu energetycznego procesów technologicznych. Autorzy, poprzez analizę zaproponowanego rozwiązania, podejmują próbę rozpoczęcia dyskusji nad intensyfikacją wykorzystania zasobów naturalnych, minimalizując oddziaływanie człowieka na środowisko.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, ogniwo Peltiera, odzysk energii

The effectiveness of the Peltier module to the recovery of energy from processes that emit waste heat

Abstract

In Poland, energy efficiency is almost three times lower than in Western European countries. A significant amount of energy is wasted in the process where there is no waste heat recovery carried out, which translates to significant energy efficiency of the process. This article presents one of the possible use of converter waste heat into electricity – Peltier element – which could directly impact on the balance of the energy efficiency of technological processes. The authors, through the analysis of the proposed solutions attempt to start the discussion on the intensification of the use of natural resources by minimizing human impact on the environment.

Key words: energy efficiency, Peltier element, energy recovery

Wstęp

W Polsce efektywność energetyczna jest blisko trzy razy niższa niż w krajach Europy Zachodniej [1]. Znaczna ilość energii jest tracona w procesach, w których nie ma prowadzonego odzysku ciepła odpadowego, co w znaczący sposób przekłada się na zmniejszanie efektywności. Niniejszy artykuł prezentuje jedną z możliwości za-

stosowania układu przetwarzającego ciepło odpadowe w energię elektryczną – ogniwo Peltiera – co bezpośrednio mogłoby wpłynąć na poprawę bilansu efektywności energetycznej procesów technologicznych. Głównymi celami efektywności energetycznej jest zmniejszenie zużycia energii oraz redukcja strat. Zgodnie z art. 2 pkt 3 Ustawy o efektywności energetycznej, przez efektywność energetyczną rozumie się „stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużycia energii przez ten obiekt, urządzenie techniczne lub instalację, albo w wyniku wykonanej usługi niezbędnej do uzyskania tego efektu”. Jednym z kluczowych obszarów możliwości poprawy efektywności energetycznej jest gospodarka ciepłem, wykorzystywanym do celów technologicznych oraz grzewczych. Po zdefiniowaniu kluczowych potencjałów w zakresie występowania strat ciepła autorzy niniejszej publikacji postanowili poddać analizie możliwość zastosowania jednego z potencjalnie możliwych rozwiązań. Temu to celowi służą poniższe dane, przybliżające koncepcję zabudowy ogniwa Peltiera, możliwą do zaimplementowania w miejscach obecnie zdiagnozowanych strat ciepła.

1. Gospodarka energią

Zagadnienie poprawy efektywności energetycznej i zagospodarowania energii odpadowej w przemyśle nie traci na aktualności. Poniżej przedstawiono przykładową klasyfikację temperaturową źródeł ciepła odpadowego wraz z określeniem przedziału temperatur dla każdego źródła oraz zaletami oraz wadami/barierami ich wykorzystania. Znacząca większość przedstawionych przykładów źródeł ciepła odpadowego występuje w energochłonnych procesach metalurgicznych, gdzie należy poszukiwać możliwości poprawy efektywności energetycznej.

Mówiąc o oszczędnościach energii, należy rozważyć obszar analizy zarówno poprzez zwiększenie efektywności pracy układów zużywających paliwo, jak i zabudowanie urządzeń lub instalacji minimalizujących straty. Zgodnie z [5] straty wynoszą prawie 59% łącznej energii wykorzystywanej na rynku polskim. Zauważone zostało to przez legislatora unijnego, czego efektem jest między innymi Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej, w myśl której każde państwo członkowskie UE powinno ustanowić systemy krajowe. Dyrektywa zobowiązuje do osiągnięcia oszczędności energii równej 1,5% wielkości rocznej sprzedaży do odbiorców końcowych. W ślad za nią pojawiła się krajowa Ustawa o efektywności energetycznej z 20 maja 2016 r., która określa zasady opracowywania krajowego planu działań efektywności energetycznej i audytów. Audyty energetyczne w myśl ustawy stanowią opracowanie, zawierające analizę zużycia energii oraz stan techniczny obiektu, urządzeń technicznych lub instalacji wraz z planem działań oraz ocenę ich opłacalności ekonomicznej i możliwej do uzyskania oszczędności energii [10].

Tabela 1. Przykładowa klasyfikacja temperaturowa źródeł ciepła odpadowego

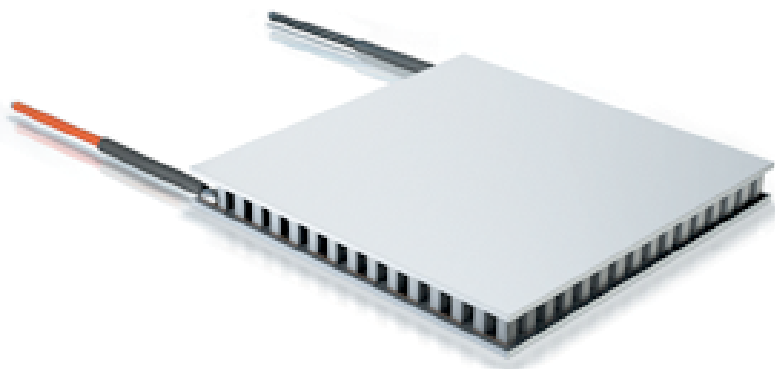
Zakres temperatur	Przykład źródła	Temperatura °C	Zalety	Wady/bariery
Średni 230-650 °C	Spaliny kotła parowego	230-480	Bardziej odpowiednie dla materiałów wymienników ciepła Praktyczne do generacji energii	
	Spaliny z turbiny gazowej	370-540		
	Spaliny silników tłokowych	320-590		
	Piece do obróbki cieplnej	430-650		
	Piece suszarnicze i prażaki	230-590		
	Piece cementowe	450-620		
	Spaliny wylotowe z układów odzysknicowych kotłów ogrzewanych gazem, piece ethylenowe etc.	70-230		
		50-90		
	Kondensat pary technologicznej			Niewielka użyteczność niskotemperaturowego ciepła
	Woda chłodząca z chłodzenia okien piecowych	30-50		
	chłodzenia pieców do obróbki cieplnej	70-230	Duże ilości niskotemperaturowego ciepła	Niska sprawność generacji energii
Niski <250 °C	sprężarki powietrza	30-50	zawartego w licznych strumieniach produktów	Dla niskotemperaturowych spalin odzysk ciepłą jest niepraktyczny z powodu kondensacji kwasów i korozji wymienników ciepła
	chłodzenia silników wewnętrznego spalania	70-120		
	chłodzenia kondensatorów chłodziarek i klimatyzatorów	30-40		
	Piece dla przemysłu spożywczego, suszarki, piekarnicze, wędzarnicze	90-230		
	Gorąca obróbka cieczy i ciał stałych	30-230		

Źródło: Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry, marzec 2008, US Department of Energy

Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom legislatorów ww. ustawy, autorzy niniejszego opracowania przedstawiają analizę jednego z potencjalnie możliwych rozwiązań, które umożliwi ograniczenie strat energii i użyteczne jej wykorzystanie. Mowa tutaj o module (ogniwie) Peltiera przedstawionego na rys. 1, który jest elementem termoelektrycznym, wykorzystującym zjawisko zachodzące w ciałach stałych, polegające na produkcji lub wykorzystaniu ciepła pod wpływem przepływu prądu elek-

trycznego zaobserwowanego przez Jeana Peltiera w 1834 r. Jest ono półprzewodnikowym urządzeniem, w którym następuje konwersja energii cieplnej w energię elektryczną. Ponadto moduł Peltiera może być wykorzystywany jako źródło ciepła lub chłodu.

Największymi zaletami zastosowania modułów Peltiera jest brak części ruchomych oraz cieczy cyrkulujących, co w sposób oczywisty przekłada się na wysoką niezawodność i długą żywotność urządzenia.



Rys. 1. Moduł Peltiera (źródło: materiały reklamowe firmy Ferrotec)

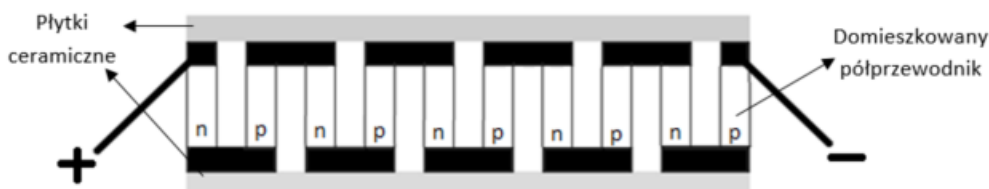
Moduł Peltiera może zarówno być wykorzystywany jako generator termiczny, jak i elektryczny. Aby jego praca w wariancie termicznym była możliwa, pomiędzy dwiema stronami modułu musi wystąpić różnica temperatur. Przy pracy jako generator termoelektryczny jedna strona modułu musi znajdować się pod wpływem wyższej temperatury niż druga, co skutkuje wystąpieniem różnicy potencjałów i napięcia pomiędzy przewodami podłączonymi do ogniwa.

2. Budowa i zasada działania modułu Peltiera

Moduł Peltiera składa się z dwóch zasadniczych elementów. Najważniejszymi składowymi modułu są dwie zewnętrzne płytki ceramiczne oraz łączące je domieszkowane półprzewodniki. Półprzewodnikami nazywamy materiały, których przewodnictwo właściwe może być zmieniane w szerokim zakresie, poprzez ich ogrzewanie, oświetlenie bądź domieszkowanie. W zależności od czynników zewnętrznych półprzewodnik może zachowywać się jako izolator lub przewodnik. Podstawą działania pracy ogniwa Peltiera jest złącze półprzewodników typu p-n, czyli obszar na miejscu połączenia półprzewodników, z którego jeden – typu n – przewodzi elektrony i wykazuje przewodnictwo donorowe, natomiast drugi – typu p – przewodzi dziury i wykazuje przewodnictwo akceptorowe. Przewodnictwo donorowe wykazują półprzewodniki domieszkowane atomami pierwiastków znajdującymi się w piątej grupie układu okresowego. Przez wprowadzenie do półprzewodnika tych pierwiastków, w jego przerwie energetycznej pojawiają się pasma przewodnictwa poziomów donorowych. Wówczas elektrony znajdujące się w poziomach donorowych mogą niedużym wydatkiem energetycznym przenosić się do pasma przewodnictwa. Przewodnictwo akceptorowe wykazują półprzewodniki domieszkowane pierwiastkami z trzeciej grupy układu okresowego. Wprowadzenie tych pierwiastków powoduje niedobór elektronów w paśmie nazywanym akceptorowym. Ten niedobór elektronów nazywa się

dziurą elektronową, która jest zdolna do przewodzenia prądu. Ten sposób przewodzenia nazywany jest dziurowym.

W sposób schematyczny budowa modułu została przedstawiona na rys. 2 zamieszczonym poniżej:



Rys. 2. Budowa modułu Peltiera. Źródło: Opracowanie własne

Między płytkami znajdują się umieszczone szeregowo półprzewodniki typu p i n wykonane z domieszkowanego tellurku bizmutu (Bi_2Te_3). Tellurek bizmutu charakteryzuje się dużą masą atomową 800,761 g/mol [8], a jego gęstość wynosi 7,7 g/cm³ [9]. Tellurek bizmutu jest półprzewodnikiem, który w celu wykorzystywania go jako materiał termoelektryczny jest domieszkowany selenem lub antymonem [7].

Zewnętrzne płytki ogniwa Peltiera pełnią funkcję zarówno ochraniającą – cechującą się wysoką odpornością na działanie czynników chemicznych, wytrzymałością mechaniczną, twardością, oraz wytrzymałością na ścieranie, oraz co najważniejsze z punktu widzenia funkcjonalności pracy ogniwa – dobrym przewodnictwem cieplnym oraz bardzo dobrymi właściwościami dielektrycznymi.

Jak to zostało opisane wcześniej, w półprzewodniku typu p nośnikami są dziury, które są praktycznym określeniem brakujących elektronów w zewnętrznym pasie walencyjnym, natomiast w półprzewodniku typu n jest obserwowany nadmiar elektronów, które znajdują się w paśmie przewodzenia. W związku z tym, aby elektrony z półprzewodnika typu n przeszły do półprzewodnika typu p, muszą mieć dostarczoną energię, którą pobierają w postaci ciepła. Na tej podstawie można wysnuć wniosek, że każde ze złączy typu p-n znajdujących się w module Peltiera pobiera ciepło z otoczenia. Na złączu n-p wydziela się pewna ilość ciepła i ta strona modułu ma zwiększoną temperaturę, natomiast na złączu p-n płytka ceramiczna ma temperaturę niższą – z tej strony ciepło jest pobierane z otoczenia. W przypadku odwrócenia kierunku płynącego prądu złącza n-p staną się złączami p-n i wówczas płytka wcześniej podgrzewana – stanie się chłodzoną, a chłodzona – podgrzewaną.

3. Zjawiska wykorzystywane przez moduł Peltiera

Aby lepiej zrozumieć prawa i reguły, którym podlega moduł Peltiera, należy znać wszystkie zjawiska, którym on podlega. Najważniejszy jest efekt Peltiera, który polega na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła podczas przepływu prądu elektrycznego przez złącze półprzewodników bądź przewodników. Na skutek przepływu prądu ciepło pochłaniane przez jedno złącze jest emitowane przez drugie. W efekcie jedno złącze jest ogrzewane, natomiast drugie ochładzane, w rezultacie pomiędzy dwiema stronami jednego złącza powstaje różnica temperatur. Ilość transportowanego w ten

sposób ciepła jest uzależniona od natężenia prądu oraz czasu jego przepływu. Im wyższe natężenie i im dłuższy czas pracy, tym różnica pomiędzy dwiema stronami jest wyższa. Kolejnym ważnym zjawiskiem jest efekt Joule'a-Lenza, który polega na wydzieleniu się ciepła z przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny. Ta ilość ciepła wydzielana podczas przepływu prądu przez przewodnik jest wprost proporcjonalna do iloczynu oporu elektrycznego przewodnika, kwadratu natężenia prądu oraz czasu przepływu. Powyższą zależność można wyrazić wzorem:

$$Q = RI^2t$$

gdzie:

Q – ilość wydzielonego ciepła,

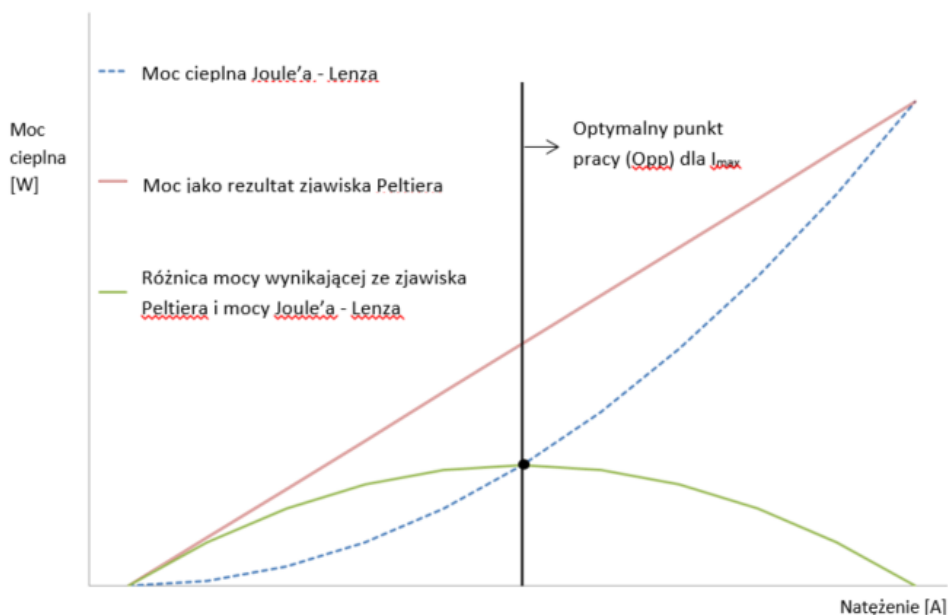
I – natężenie prądu elektrycznego płynącego w przewodniku,

R – opór elektryczny przewodnika,

t – czas przepływu prądu przez przewodnik.

W rozważaniach należy również pamiętać o zjawisku Seebecka, nazywanym również zjawiskiem termowoltaicznym. Polega na generowaniu siły elektromotorycznej w obwodzie zamkniętym zawierającym dwa różne przewodniki lub półprzewodniki, których końce znajdują się w różnych temperaturach. Im różnica temperatur jest wyższa, tym różnica potencjałów jest większa i w efekcie powstająca napięcie jest wyższe. W praktyce jest ono często wykorzystywane w aparaturach termoelektrycznych do pomiarów temperatury. Ostatnim ze zjawisk termoelektrycznych wykorzystywanym przez moduł Peltiera jest zjawisko Thomsona, które polega na pochłanianiu lub wydzieleniu ciepła przy przepływie prądu przez przewód, jeśli pomiędzy jego końcami występuje gradient temperatur. Ilość wydzielanego ciepła lub pochłanianego jest uzależniona od natężenia prądu, czasu jego przepływu, gradientu temperatury oraz rodzaju przewodnika. Ponadto przy analizie działania modułów Peltiera należy uwzględnić zjawisko przewodzenia ciepła, polegające na przekazywaniu energii kinetycznej cząsteczek pomiędzy ciałami pozostającymi w kontakcie. W efekcie zderzeń tych cząsteczek ustala się ta sama temperatura w obu ciałach.

Zjawisko Peltiera informuje nas, że zdolność transportowa ciepła przez moduł jest wprost proporcjonalna do natężenia przepływającego prądu. Zjawisko Joule'a-Lenza informuje o generowaniu dodatkowego ciepła w module przez przepływający prąd, co wywołuje przyrost temperatury w module. Tym samym ciepło wydzielane przez jedną ze stron modułu będzie wynikało nie tylko ze zjawiska Peltiera, lecz będzie ono powiększone o ciepło Joule'a. Ponadto w związku z tym, że płytki ceramiczne będą miały różne temperatury, będzie występował transport ciepła ze strony cieplej do zimnej. W rozważaniach należy również uwzględnić przewodność cieplną tellurku bizmutu, która wynosi $1,20 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [9]. Te zjawiska mają istotny wpływ na funkcjonalność modułu Peltiera. Zwiększając natężenie prądu, transport ciepła, wynikający ze zjawiska Peltiera, rośnie w sposób liniowy, lecz proporcjonalnie do drugiej potęgi natężenia prądu. Zostało to zobrazowane na wykresie (rys. 3):



Rys. 3. Wykres możliwości transportu ciepła. Źródło: Opracowanie własne

Wykres przedstawia możliwości transportu ciepła przez moduł Peltiera. Widać, że moc jako rezultat zjawiska Peltiera jest wprost proporcjonalna do rosnącego natężenia prądu i jest to zależność, która rośnie w sposób liniowy. Wraz ze wzrostem natężenia rośnie również moc cieplna Joule'a-Lenza. Różnica pomiędzy możliwościami transportowymi, wynikającymi ze zjawiska Peltiera, a wielkością mocy, wynikająca ze zjawiska Joule'a-Lenza, jest krzywą, której najwyższy punkt jest nazwany optymalnym punktem pracy (dalej O_{pp}). Przedstawiony na powyższym wykresie O_{pp} prezentuje wartość natężenia prądu – I_{max} , dla którego wydajność chłodzenia modułu Peltiera jest najwyższa. Dla wartości poniżej i powyżej natężenia dla O_{pp} wydajność ta jest mniejsza. Moc chłodzenia strony zimnej jest największa przy różnicy temperatur obu stron modułu równej zero. Dlatego przy wykorzystywaniu modułu Peltiera do chłodzenia należy również zapewnić odpowiednie chłodzenie gorącej strony z użyciem np. cieczy chłodzącej czy wydajnego wentylatora.

Kolejnym zastosowaniem modułu Peltiera jest również wykorzystywanie go jako źródła wytwarzającego energię elektryczną. Jest to praktyczne wykorzystanie zjawiska Seebecka. W celu generacji energii elektrycznej musi występować pomiędzy ceramicznymi płytkami modułu Peltiera znaczna różnica temperatur.

4. Charakterystyka dostępnych rozwiązań

Na rynku występuje wiele rodzajów modułów Peltiera, różniących się wartościami parametrów wymienionymi wcześniej, tj. I_{max} [A] – maksymalne natężenie, którego nie należy przekraczać, V_{max} [V] – maksymalne napięcie modułu oraz Q_{max} [W] – maksymalna moc chłodzenia strony zimnej. Moduły dostępne na rynku mają tę

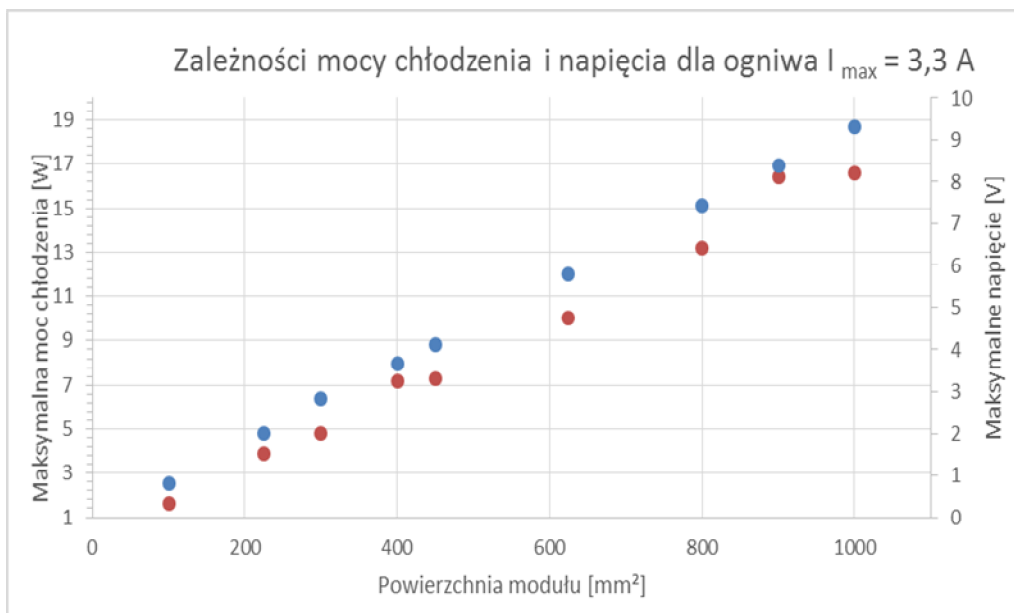
samą zasadę działania oraz są wykonane z tych samych materiałów, więc analizując produkty dostępne na rynku, należy zwracać uwagę wyłącznie na parametry omówione powyżej.

Produkty dostępne na rynku można podzielić na dwie grupy:

- Pojedyncze moduły wykorzystywane jako składowe do budowy większych urządzeń przez użytkownika według indywidualnych potrzeb.
- Gotowe zestawy modułów, składające się ze złożonych w różnych wariantach modułów Peltiera, dedykowanych do konkretnego przeznaczenia gotowe do wykorzystania zaraz po zakupie.

Autorzy opracowania przeprowadzili analizę produktów zarówno z pierwszej, jak i drugiej grupy, a wnioski z przeprowadzonych analiz, są omówione poniżej.

Parametry pojedynczych modułów oferowanych przez producentów mają zwykle zbliżone do siebie parametry, przy czym rozbieżność dla wartości I_{\max} wynosi pomiędzy 3,3 A, a 100 A, wartości V_{\max} pomiędzy 0,82 V, a 100 V, przy czym maksymalna wydajność chłodzenia sięga między 1,6 W a 30 W. Powierzchnie pojedynczych modułów wynoszą pomiędzy 100 a 9600 mm² [4]. Duża rozbieżność pomiędzy poszczególnymi parametrami wskazuje na różnorodność dostępnych na rynku modułów. Użytkownicy w zależności od zapotrzebowania i potrzeb mogą dobrać takie parametry ogniwa, aby były one maksymalnie efektywne i wydajne dla dedykowanego celu funkcjonowania. Niemniej jednak najistotniejszymi parametrami, charakteryzującymi ogniwa Peltiera, jest maksymalna moc chłodzenia oraz maksymalne napięcie. Dla modułów dostępnych na rynku zaobserwowano zależność zaprezentowaną na poniższym wykresie:



Rys. 4. Wykres zależności mocy chłodzenia i napięcia dla ogniwa $I_{\max} = 3,3 \text{ A}$.

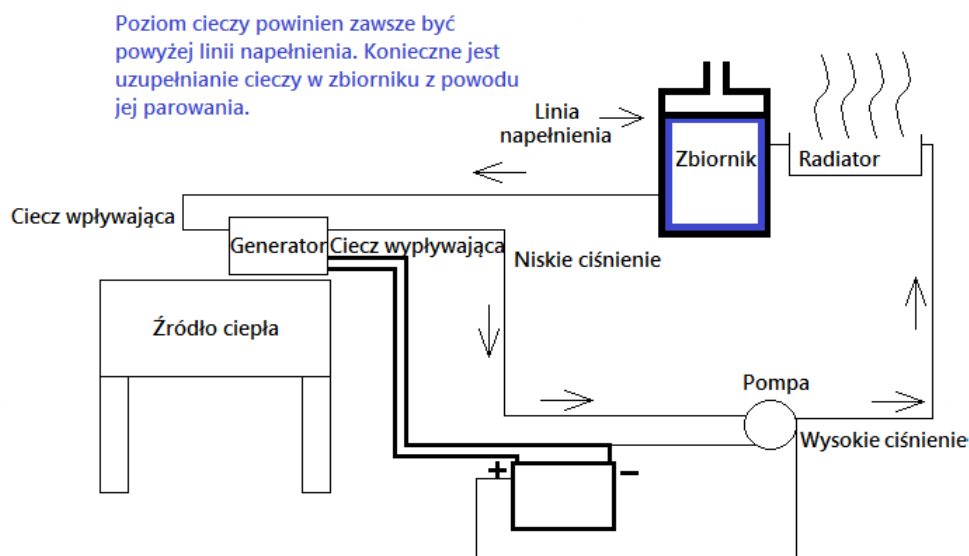
Źródło: Opracowanie własne

Na wykresie (rys. 4) jest przedstawiona zależność maksymalnej mocy chłodzenia i maksymalnego napięcia dla modułów, których I_{\max} wynosi 3,3 A. Widoczny jest liniowy wzrost maksymalnej mocy chłodzenia i maksymalnego napięcia dla modułów o coraz większej powierzchni. W związku z tym można stwierdzić, że te parametry są szczególnie uzależnione od wielkości modułu, ponieważ rosną wprost proporcjonalnie wraz ze zwiększaniem się powierzchni modułu.

Natomiast do drugiej grupy należą gotowe produkty, składające się z odpowiednio zabudowanych i dobranych pod względem funkcjonalności modułów Peltiera, których działanie można podzielić na dwa zasadnicze cele:

- chłodzenie,
- wytwarzanie energii elektrycznej z ciepła.

Ze względu na tematykę pracy zostanie omówiony wyłącznie drugi typ urządzeń. Na rynku dostępne są termoelektryczne, wykorzystujące moduły Peltiera, których zadaniem jest wytwarzanie energii elektrycznej przy znacznej różnicy temperatur. Najpopularniejsze, wykorzystujące moduły Peltiera, jest dostępne na rynku urządzenie TEG12VDC- 24VLIQUID COOLED TEG Generator, produkowane przez firmę GENCELL™, którego schemat działania zaprezentowany został na rys. 5.



Rys. 5. Schemat działania modułu termoelektrycznego TEG12VDC- 24VLIQUID COOLED TEG Generator [3]

Generator może działać, wykorzystując ciepło pochodzące ze źródła o temperaturze nawet 400 °C i taka temperatura jest rekomendowana przez producenta do pracy urządzenia. Nominalna moc wyjściowa generatora wynosi 50 W, natomiast napięcie jest dostosowywane przez użytkownika i maksymalnie może wynosić 14,2 V. Jego wymiary to 33 cm × 12,7 cm × 6,5 cm, natomiast waga – 4,5 kg. Tak jak zostało to wcześniej omówione, aby moduły Peltiera pracowały wydajnie i nie ulegały uszkodzeniom, muszą być chłodzone. W związku z tym pro-

ducent dodaje do urządzenia pompę połączoną z radiatorem, która pobiera od 5 do 15 W. Na schemacie oznaczono cyrkulację cieczy chłodzącej generatora. Jedna pompa może chłodzić w tym samym czasie od 3 do 4 termoelektrycznych generatorów. Cena za pojedyncze urządzenie wraz z pompą chłodzącą wynosi aż 629 \$ [4].

Podsumowanie

Wytwarzanie energii elektrycznej z urządzeń, których działanie opiera się na modułach Peltiera, jest rozwiązaniem ekologicznym, innowacyjnym, pomagającym w odpowiedni sposób zagospodarować ciepło generowane w procesach produkcyjnych. Zważywszy na koszty zakupu i potencjalne korzyści, wynikające z jego zastosowania, mimo licznych zalet jest wciąż zbyt drogim rozwiązaniem. W przypadku omawianego urządzenia cena za wat mocy wynosi aż 12,58 \$. W raporcie z 2006 r. Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych określono, że aby generatory oparte na modułach Peltiera były konkurencyjnym źródłem wytwarzania energii cena wata mocy musi oscylować w granicach 5 \$, natomiast sprawność powinna wzrosnąć do 15-20% [2]. Niemniej jednak, w generatorach opartych na modułach termoelektrycznych tkwi bardzo duży potencjał do rozwoju. W 2012 r. inżynierowie z Michigan State and Northwestern University wydali raport, informujący o odkryciu nowego materiału podnoszącego sprawność generatorów termoelektrycznych do 15-20%. W 2014 r. artykuł opublikowany w „Advanced Energy Materials” opisuje proces, w którym termoelektryczne powłoki zostały przystosowane do pracy przy sprawności sięgającej nawet 30% [6]. Te osiągnięcia jasno pokazują bardzo dynamiczny rozwój generatorów, opartych na zjawiskach termoelektrycznych. To wskazuje na duże perspektywy rozwoju, komercjalizacji i popularyzacji takich rozwiązań. Przy obecnych cenach za urządzenia i sprawnościach oferowanych przez producentów taki sposób produkcji energii elektrycznej jest ekonomicznie nieuzasadniony, jednakże utrzymując obecne tempo rozwoju tej gałęzi przemysłu, wkrótce będzie możliwe w ten sposób zagospodarowanie ciepła, które na dzień dzisiejszy jest bezpowrotnie tracone.

Bibliografia

- [1] Departament Koordynacji Polityki Strukturalnej, 2005: Wstępny projekt Narodowego Planu Rozwoju 2007-2013, Ministerstwo Gospodarki i Pracy, Warszawa.
- [2] Hendricks T., Choate W., 2006: Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery, U.S. Department of Energy/Pacific, William T. Choate.
- [3] <http://thermoelectric-generator.com> z dnia 17.06.2014.
- [4] <http://www.everredtronics.com/> z dnia 05.06.2016.
- [5] <https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy> dnia 09.08.2017.
- [6] Lu. X., Morelli D.T., 2013: High Performance Thermoelectricity in Earth-Abundant Compounds Based on Natural Mineral Tetrahedrites, *Advanced Energy Materials*, vol. 3. iss. 3. s. 342-348.
- [7] Rosenthal T., Urban P., Nimmrich K., Schenk L., de Boor J., Stiewe C., Oeckler O., 2014: Enhancing the Thermoelectric Properties of Germanium Antimony Tellurides by Substitution with Selenium in Compounds, Cologne.
- [8] Satterthwaite C.B., Ure R., 1957: Electrical and Thermal Properties of Bi₂Te₃. *Phys. Rev.*

- [9] Takeishi M., 2006: Thermal conductivity measurements of Bismuth Telluride thin films by using the 3 Omega method. The 27th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Kyoto.
- [10] Ustawa o efektywności energetycznej z dnia 20 maja 2016 r.

