

Ćwiczenie 133

Element Peltiera

Cel ćwiczenia

Zapoznanie z Peltiera i zachodzącymi w nim zjawiskami fizycznymi. Zastosowanie elementu Peltiera do chłodzenia i zamiany energii cieplnej na elektryczną.

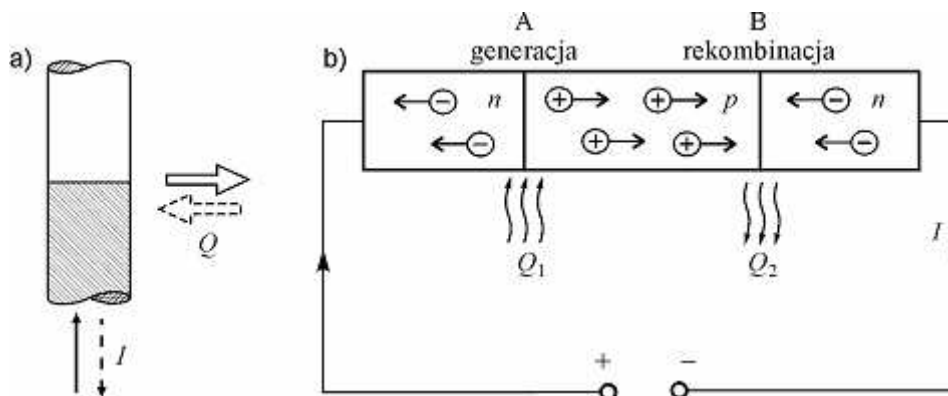
Wprowadzenie

Zjawisko Peltiera i element Peltiera

Działanie i zastosowania elementu Peltiera warunkuje kilka zachodzących w nim zjawisk. Samo *zjawisko Peltiera* polega na tym, że przy przepływie prądu elektrycznego przez złącze dwu materiałów zachodzi wytwarzanie względnie pochłanianie ciepła, zwanego ciepłem Peltiera (rys. 1a). Moc ciepła Peltiera (stosunek ciepła Q do czasu t) jest proporcjonalna do przepływającego prądu I ,

$$\frac{Q}{t} = p I. \quad (1)$$

Współczynnik Peltiera p zależy od rodzaju materiałów złącza i temperatury.



Rys. 1. Zjawisko Peltiera: a) obraz makroskopowy. Kierunki przepływu ciepła Q i prądu I oznaczone liniami ciągłymi i przerywanymi ilustrują odwracalność zjawiska. b) mikroskopowa interpretacja zjawiska Peltiera w półprzewodnikach

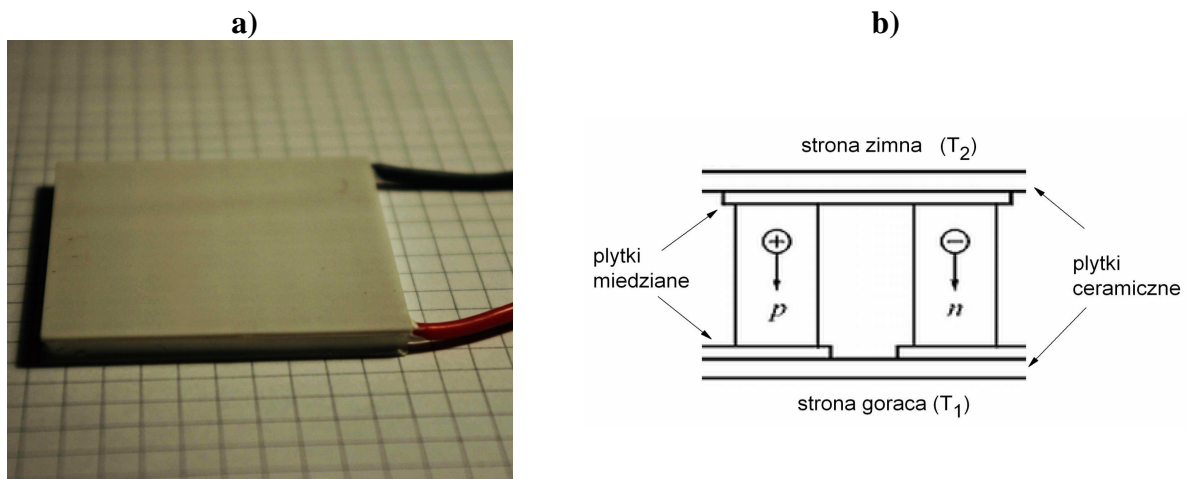
Zjawisko Peltiera zostało najpierw wykryte dla metali, ale efekt jest najsilniejszy dla półprzewodników. Dla półprzewodników łatwiej też podać jego mikroskopową interpretację.

Rysunek 1b przedstawia dwa złącza wykonane z materiału półprzewodnikowego o przewodnictwie elektronowym (typu n) i dziurowym (typu p). Kierunek przepływu dodatnich dziur jest przeciwny niż ujemnych elektronów. Dlatego w złączu A, w którym spotykają się strumienie elektronów i dziur, następuje ich rekombinacja. Elektrony wskakują na puste poziomy dziurowe, a uwolniona energia wydzielana się w postaci ciepła.

Odwrotny proces zachodzi w drugim złączu (B). Aby podtrzymać prąd elektronów i dziur następuje tam generacja par elektron–dziura, która zachodzi kosztem dopływającego do złącza ciepła.

Uważny czytelnik zaniepokoić się może, że pokazany na rysunku 1b układ ma własności prostujące: przynajmniej jedno ze złącz (konkretnie złącze B) spolaryzowane jest w kierunku zaporowym, zatem przez obwód popłynie co najwyżej znikomo mały prąd wsteczny! Prąd wsteczny jest rzeczywiście bardzo mały w półprzewodniku takim jak krzem, w którym szerokość przerwy energetycznej ($E_g = 1,1$ eV) jest znacznie większa energii termicznej ($k_B T$ dla temp. pokojowej wynosi 0,026 eV). Do budowy elementu Peltiera użyć trzeba półprzewodnika o wąskiej przerwie energetycznej, dla którego prąd wsteczny jest duży. Stosuje się np. tellurek bizmutu Bi_2Te_3 ($E_g = 0,16$ eV) z odpowiednimi domieszkami w celu uzyskania materiałów typu p i n .

Rzeczywista budowa elementu wykorzystującego ten efekt jest inna. Wytwarzane współcześnie elementy Peltiera mają najczęściej kształt białej kwadratowej płytki o grubości kilku mm (rys. 2a).



Rys. 2. Element Peltiera: a) fotografia elementu 50×50 mm używanego w ćwiczeniu, b) budowa wewnętrzna elementu

Górną i dolną powierzchnię elementu stanowią cienkie płytki, wykonane z dobrze przewodzącej ciepło ceramiki Al_2O_3 . Pomiędzy nimi znajdują się elementy czynne – słupki półprzewodnika typu p i n , połączone metodą lutowania do miedzianych płytek (rys. 2b). W ten sposób elementy czynne są połączone szeregowo pod względem elektrycznym i równolegle pod względem termicznym. Pokazany kierunek ruchu elektronów i dziur odpowiada ich generacji na powierzchni górnej (zimnej T_2) i rekombinacji na powierzchni dolnej (gorącej T_1).

W zjawisku Peltiera przepływ prądu wytwarza różnicę temperatur. Istnieje zjawisko odwrotne - jeśli temperatury złącz A i B są różne, może być generowany prąd. Aby prąd mógł popłynąć, w układzie złączy powstać musi *napięcie termoelektryczne*. W pierwszym przybliżeniu jest ono proporcjonalne do różnicy temperatur ΔT ,

$$U = a \Delta T . \quad (2)$$

Powstawanie napięcia termoelektrycznego nazywane bywa, od nazwiska odkrywcy, *zjawiskiem Seebecka*¹, zaś współczynnik proporcjonalności a – współczynnikiem Seebecka.

Napięcie termoelektryczne w metalach wykorzystywane jest do pomiaru temperatury. (Zob. Ćwiczenie 121 „Termometr oporowy i termopara”). Napięcie termoelektryczne i wytworzony przez to napięcie prąd elektryczny dają możliwość wykorzystanie elementu Peltiera do zamiany energii cieplnej na elektryczną (generator termoelektryczny).

Element Peltiera jako chłodziarka

Zjawisko Peltiera jest zjawiskiem odwracalnym. Co to znaczy? Zjawisko jest odwracalne, gdy w myślowym eksperymencie odwrócenia „strzałki czasu” dane zjawisko nadal zachodzi, ze zmianą znaku wszelkich wielkości kierunkowych na przeciwny. W przypadku efektu Peltiera (rys. 1b) oznacza to zmianę kierunku prądu i zmianę kierunku strumienia ciepła, w wyniku czego złącze A będzie się teraz grzało, a złącze B – ochładzało.

Zjawisku Peltiera towarzyszą nieuchronnie dwa zjawiska nieodwracalne. Pierwszym jest *przewodzenie ciepła* od złącza o temperaturze wyższej do niższej. Strumień płynącego ciepła jest proporcjonalny do różnicy temperatur $\Delta T = T_1 - T_2$, przekroju poprzecznego S słupka i współczynnika przewodnictwa cieplnego K , zaś odwrotnie proporcjonalny do jego długości l ,

$$\frac{Q_{\text{przew}}}{t} = K \frac{S}{l} \Delta T . \quad (3)$$

Dlaczego zjawisko przewodzenia ciepła jest nieodwracalne? W eksperymencie myślowym” w którym odwrócimy kierunek czasu, temperatura nie ulegnie zmianie, natomiast zmieni się kierunek przepływu ciepła, które teraz powinno płynąć samorzutnie od temperatury niższej do wyższej. Jest to oczywiście niemożliwe, ze względu na drugą zasadę termodynamiki.

Drugim niekorzystnym zjawiskiem jest wydzielanie się *ciepła Joule’a* w objętości przewodnika przy przepływie prądu. Wydzielone ciepło wynosi

$$\frac{Q_{\text{Joule}}}{t} = I^2 R = I^2 \frac{\rho l}{S} , \quad (4)$$

gdzie ρ oznacza oporność właściwą materiału. Nieodwracalność zjawiska łatwo zrozumieć – niemożliwe jest, by przy zmianie kierunku prądu ciepło zaczęło wpływać z otoczenia do wnętrza materiału przewodzącego prąd.

Najważniejszym zastosowaniem elementów Peltiera jest wytworzenie temperatury niższej od temperatury otoczenia. Jak niskiej? Rozpatrzmy bilans cieplny pojedynczego złącza oraz dwu przyległych słupków (rys. 2b) wykonanych z materiałów typu n i p , o tej samej długości l i przekroju poprzecznym S . Przyjmijmy dla uproszczenia, że wartości współczynnika przewodzenia ciepła K i oporności właściwej ρ są takie same. Ze złącza zimnego usuwane jest

¹ Powstawanie prądu termoelektrycznego zostało odkryte w 1821 r. przez fizyka niemieckiego Thomasa J. Seebecka. Do detekcji prądu w obwodzie używał igły magnetycznej i początkowo błędnie interpretował swoje obserwacje jako bezpośrednie wytwarzanie pola magnetycznego pod wpływem różnicy temperatur. Zjawisko Peltiera odkrył francuski uczyony Jean C. Peltier w roku 1834.

ciepło Peltiera pI , natomiast dopływa ciepło przewodnictwa i połowa (w przybliżeniu) wytworzonego ciepła Joule'a. Dla stanu ustalonego te strumienie ciepła muszą się równoważyć, co wyraża równanie

$$pI = K \frac{S}{l} \Delta T + \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho l}{S}. \quad (5)$$

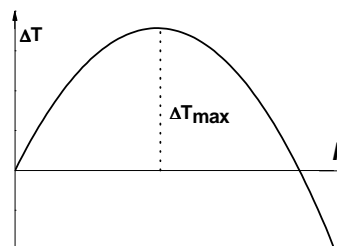
Z równania (5) obliczamy wartość różnicy temperatur w funkcji prądu

$$\Delta T = \frac{p l}{K S} I - \frac{\rho l^2}{2 K S^2} I^2. \quad (6)$$

Obrazem funkcji $\Delta T = f(I)$ jest odwrócona parabola (rys. 3). Pionowa współrzędna jej wierzchołka oznacza maksymalną różnicę temperatur, jaką może wytworzyć element Peltiera,

$$\Delta T_{\max} = \frac{p^2}{K \rho}. \quad (7)$$

Rys. 3. Zależność różnicy temperatur wytwarzanej przez element Peltiera od prądu.

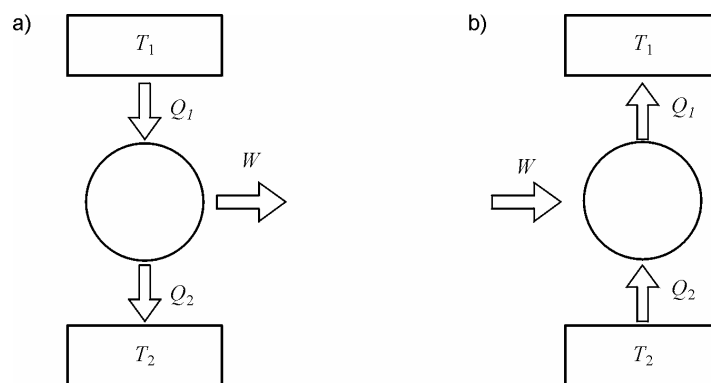


Wzór (7) wskazuje, że wartość ΔT_{\max} nie zależy od wymiarów geometrycznych, lecz wyłącznie od parametrów materiałowych. Dla typowych metali ΔT_{\max} jest mniejsze niż jeden stopień, natomiast dla półprzewodników osiągnąć może kilkudziesiąt stopni. Przykładowo, element Peltiera wykorzystywany w ćwiczeniu wytwarza różnicę temperatur około 30° , umożliwiającą wytworzeniu lodu.

Elementy Peltiera znajdują zastosowanie tam, gdzie potrzebna jest miniaturowa i pozbawiona części ruchomych chłodziarka. Najbardziej znane zastosowania to małe lodówki samochodowe oraz odprowadzanie ciepła z procesorów komputerów. Są też stosowane do obniżenia temperatury półprzewodnikowych detektorów promieniowania podczerwonego, X oraz γ (zamiast ciekłego azotu). W różnych urządzeniach laboratoryjnych umożliwia regulację temperatury zarówno poniżej jak i powyżej temperatury otoczenia.

Element Peltiera jako maszyna cieplna

W elemencie Peltiera zachodzi przemiana pracy (prądu elektrycznego) na ciepło, lub odwrotnie. Niezależnie od mikroskopowego obrazu tych zjawisk podlegają one ogólnym prawom termodynamiki. Dla teoretycznego zbadania tego zagadnienia analizuje się wymyśloną *maszynę Carnota*, w której zachodzą tylko procesy odwracalne. Zatem może pracować zarówno jako silnik cieplny (rys. 4a) jak i chłodziarka (rys. 4b):



Rys. 4. Schemat przepływu ciepła i pracy w maszynie Carnota pracującej jako:
a) silnik cieplny; b) chłodziarka

W przypadku silnika cieplnego, ze zbiornika o wyższej temperaturze T_1 pobierane jest ciepło Q_1 . Część tego ciepła zamienia się na pracę W , a pozostałe ciepło równe $Q_2 = Q_1 - W$ jest przekazywane do chłodnicy o temperaturze T_2 . Sprawność silnika η definiujemy jako stosunek uzyskanej pracy W do włożonego ciepła Q_1

$$\eta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{W}{Q_1}. \quad (8)$$

Niezależnie od sposobu realizacji maszyny Carnota, sprawność przemiany ciepła na pracę zależy tylko od temperatur źródła ciepła oraz chłodnicy i wynosi

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (9)$$

Kierunek działania maszyny Carnota można odwrócić (rys. 4b). Maszyna pobiera ciepło Q_2 o temperaturze niższej, i dzięki dostarczonej z zewnątrz pracy W , uzyskuje się przepływ ciepła Q_1 do zbiornika o temperaturze wyższej. Jeżeli celem działania maszyny cieplnej jest uzyskiwanie temperatury niższej od temperatury otoczenia, wtedy mówimy o *chłodziarce*. Wydajność chłodzenia definiujemy jako stosunek uzyskanego odpływu ciepła o niższej temperaturze do włożonej pracy

$$\eta_c \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Q_2}{W}. \quad (10)$$

Użycie słowa *wydajność* wynika z faktu, że wielkość $\eta_c = Q_2/W$, w przeciwieństwie do „prawdziwej” sprawności η , może być większa od jedności. Teoria idealnej maszyny cieplnej (Carnota), pozwala obliczyć idealną wydajność chłodzenia jako

$$\eta_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (11)$$

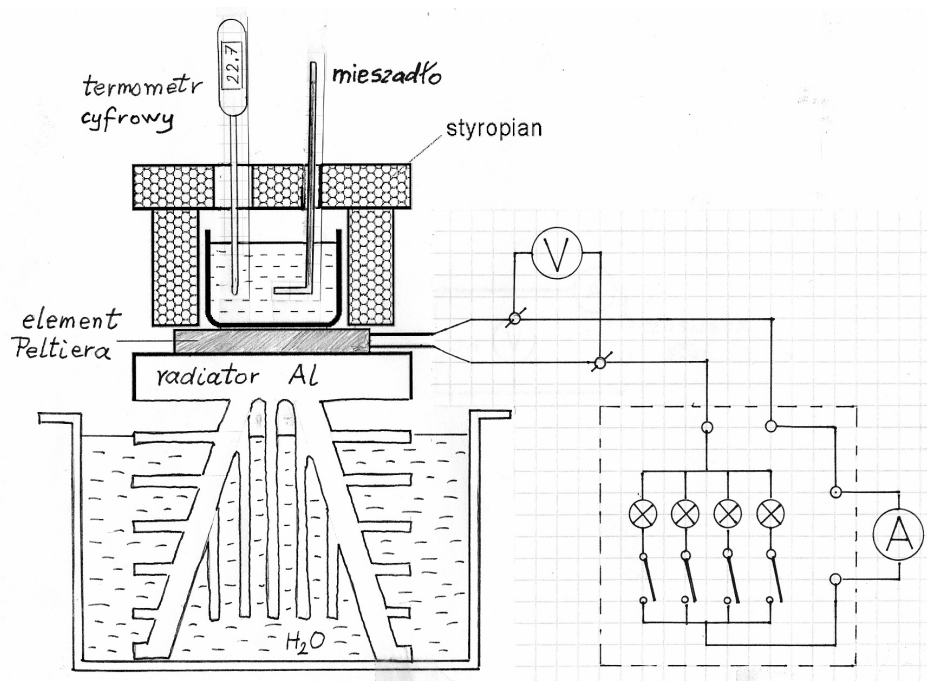
Przepływy ciepła i pracy pokazane na rysunku 4b ilustrują też przypadek *pompy ciepła*, w której interesuje nas ciepło o wyższej temperaturze Q_1 , wykorzystane np. do ogrzewania budynku.

W podręcznikach rozważa się silnik Carnota z gazem doskonałym, w którym zachodzą odwracalne przemiany izotermiczne i adiabatyczne. Mogą to być jednak dowolne procesy odwracalne, w tym efekt Peltiera. Praca W jest w tym przypadku pracą elektryczną, będącą iloczynem napięcia U , natężenia prądu I oraz czasu t , $W = U I t$.

Sprawność lub wydajność rzeczywistych maszyn cieplnych może być tylko mniejsza niż maszyny Carnota. Przyczyną są występujące w nich zjawiska nieodwracalne. W przypadku elementu Peltiera są to, omawiane poprzednio, zjawiska przewodzenia ciepła i wydzielania ciepła Joule'a. Powodują one, że sprawność elementu Peltiera wykorzystywanego jako generator termoelektryczny, czy wydajność chłodziarki Peltiera są dużo niższe od danych wzorami (9) i (11) (dla elementów wykorzystujących Bi_2Te_3 uzyskuje się η_c około $0,3 \div 0,6$). Dlatego prowadzone są prace badawcze mające na celu podniesienie ich sprawności. Jak sugeruje wzór (7), kluczowe jest znalezienie materiałów posiadających jak najwyższą wartość iloczynu $p^2/(\rho K)$.

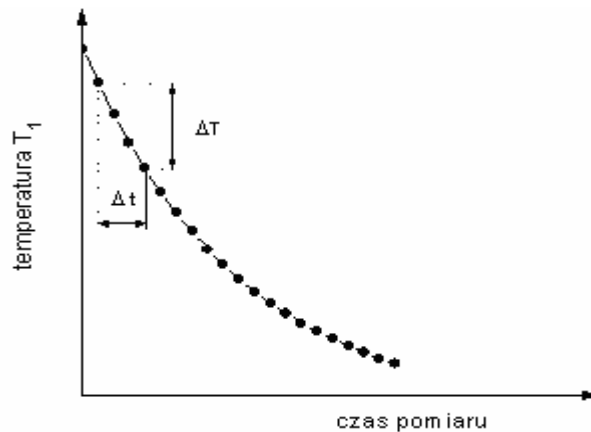
Pomiar sprawności generatora termoelektrycznego i wydajności chłodziarki Peltiera

Działanie elementu jako generatora termoelektrycznego (będącego rodzajem silnika cieplnego) badamy przy pomocy układu pokazanego na rysunku 5.



Rys. 5. Szczegółowy rysunek układu pomiarowego, z elementem Peltiera pracującym jako generator termoelektryczny.

Element Peltiera przyklejony jest do radiatora Al, który pozostaje w kontakcie cieplnym z wodą w naczyniu (temperatura T_2). Na elemencie przymocowany jest zbiorniczek z gorącą wodą o temperaturze T_1 . Gdy temperatura wody jest bliska 100°C , generowana energia elektryczna wystarcza do zaświecenia małej żaróweczki. Pomiar polega na pomiarze temperatury w zbiorniczku (rys. 6) oraz wartości napięcia i natężenia prądu w funkcji czasu.



Rys. 6. Zależność temperatury wody w zbiorniczku od czasu

Dla wyznaczenia sprawności zgodnie z wzorem (8) wyznaczyć trzeba dostarczone ciepło Q_1 i uzyskaną pracę W . Wartość ciepła, które wypłynęło ze zlewki w skończonym przedziale temperatur ΔT_1 (rys. 6), wynosi

$$Q_1 = (m_w c_w + m_n c_n) \Delta T_1. \quad (12)$$

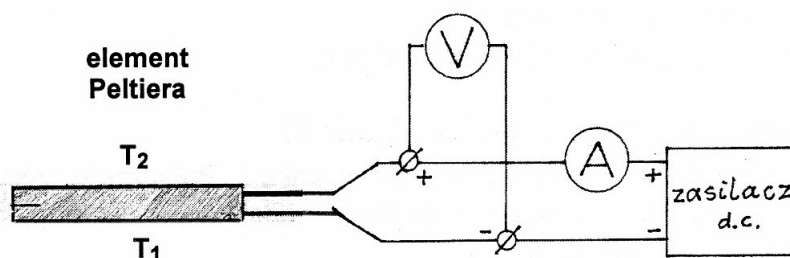
Symbole m_w i m_n oznaczają masę wody i naczynia, natomiast c_w i c_n – odpowiednie wartości ciepła właściwego.

Pracę prądu elektrycznego W określa całka po czasie z iloczynu natężenia I i napięcia U . Całkę tę obliczyć trzeba numerycznie, najprościej jako średnia wartość mocy elektrycznej (iloczyn prądu I i napięcia U) i przedziału czasu Δt , w którym nastąpił rozpatrywany spadek temperatury,

$$W = \langle UI \rangle \Delta t. \quad (13)$$

Sprawność oraz wydajność maszyn cieplnych, zarówno idealna (wzory (9) i (11)) jak i rzeczywista, silnie zależy od temperatury. Dla zbadania tej zależności, obliczenia sprawności (lub wydajności) wykonujemy dla dwóch przedziałów temperatur.

Aby element Peltiera zadziałał jako chłodziarka, odbiornik energii elektrycznej należy zastąpić zasilaczem (rys. 7). Uwaga: zgodnie z przyjętą w termodynamice konwencją, symbole T_1 i T_2 oznaczają temperatury wyższą i niższą, niezależnie od kierunku przepływu ciepła. Dlatego teraz T_1 dotyczy wody, w której zanurzony jest radiator, a T_2 – wody w zbiorniczku.)



Rys. 7. Układ elektryczny dla elementu Peltiera pracującego jako chłodziarka.

Aparatura

Zestaw ćwiczeniowy pokazany na rys. 5 zawiera:

- a) element Peltiera 50×50 mm, $I_{\max} = 10$ A. Przewody elektryczne z elementu wyprowadzone są na dwa zaciski,
 - b) radiator (zanurzony w naczyniu z wodą),
 - c) aluminiowy zbiorniczek na wodę. **Uwaga:** w każdym z dwu zestawów masa zbiorniczka jest inna, $m_n = 30,7$ g oraz $m_n = 58,3$ g dla naczyń oznaczonych jako 1 oraz 2. Ciepło właściwe naczynia (Al) $c_n = 900$ J/(kg·K), wody $c_w = 4190$ J/(kg·K).
 - d) osłona styropianowa (zdejmowana), przez którą przechodzą:
 - e) termometr cyfrowy, oraz
 - f) mieszadełko.
- Ponadto, nie pokazane na rysunku:
- g) dzbanek elektryczny do podgrzewania wody
 - h) strzykawka . do usuwania wody ze zbiorniczka
 - i) menzurka z podziałką.

Potrzebne przyrządy elektryczne to: amperomierz, woltomierz, płytki montażowa z zestawem żaróweczek, zasilacz prądu stałego.

Wykonanie ćwiczenia

A. Element Peltiera jako generator termoelektryczny

1. Zestawić układ elektryczny wg rys. 5.
2. **Pomiar wstępny.**
 - a) Ustawić zakres amperomierza na 750 mA. Następnie, do zbiorniczka nalać wrzącej wody DESTYLOWANEJ do około 2/3 jego wysokości i założyć osłony styropianowe.
 - b) Włączając kolejne żarówki na płytce, znaleźć kombinację dla której moc obliczona z odczytanych napięcia i natężenia jest największa.
3. **Pomiar właściwy (płytki z żarówkami jest ciągle elementem układu):**
 - a) Usunąć ochłodzoną już wodę przy pomocy strzykawki.
 - b) Nalać nowej wrzącej wody DESTYLOWANEJ do około 2/3 objętości.
 - c) Tuż po nalaniu wody odczytywać i zapisywać co 30 s wskazania woltomierza i amperomierza (użyj przycisk HOLD aby zatrzymać i wznowić aktualne wskazania tych mierników) oraz termometru, mieszając mieszadełkiem wodę w górnym zbiorniczku (jeśli termometr się wyłączy, to można go włączyć przyciskiem obok wyświetlacza).
 - d) Prowadzić pomiary do osiągnięcia temperatury wody w górnym zbiorniczku ok. 30°C.
4. Po wykonaniu pomiarów usunąć wodę ze zbiorniczka do menzurki przy użyciu strzykawki i zapisać jej objętość.
5. Zmierzyć temperaturę wody chłodzącej radiator.

B. Element Peltiera jako chłodziarka

1. Wypiąć z poprzedniego układu płytkę z żarówkami i zestawić układ elektryczny wg schematu z rysunku 7.
- Uwagi:**
- Amperomierz na zakresie 7500 mA musi być połączony szeregowo z zasilaczem.
 - Połączenie czerwonych zacisków (+) elementu Peltiera i zasilacza zapewnia kierunek

- prądu skutkujący chłodzeniem (a nie grzaniem) górnego naczynia.
- Zmierzyć temperaturę T_1 wody chłodzącej radiator.
 - Do górnego naczynia wlać wodę DESTYLOWANĄ o temperaturze pokojowej. Jej ilość odmierzamy przy pomocy menzurki.
 - Po włączeniu zasilacza **nastawić natężenie prądu na 5 A** i prowadzić pomiar zależności od czasu: temperatury, napięcia i natężenia prądu. Odczyty wykonywać co 30s. Przed pomiarami mieszać wodę.
 - Pomiary prowadzić aż do ustabilizowania się temperatury bliskiej 0°C .
 - W miarę wolnego czasu prowadzić nadal proces chłodzenia przy. Następnie zbadać, czy na dnie naczynia wytworzył się lód.
 - Po zakończeniu pomiarów wyłączyć mierniki prądu i napięcia, zasilacz oraz listwę zasilającą.

Opracowanie wyników

A. Generator termoelektryczny.

- Wykonać wykresy zależności od czasu: temperatury (w stopniach Celsjusza) oraz mocy elektrycznej $P = UI$.
- Obliczyć sprawność przetwarzania ciepła na pracę elektryczną dla dwóch przedziałów temperatury: na początku i na końcu doświadczenia. Przedziały czasu mają być na tyle krótkie, aby można było w nich wykresy $P(t)$ przybliżyć odcinkami. Wyniki zestawień w tabeli 1.
- Porównać otrzymane sprawności ze sprawnościami cyklu Carnota, które obliczamy dla temperatury zbiorniczka ze środka rozpatrywanego przedziału.

B. Chłodziarka Peltiera

- Wykonać wykresy zależności od czasu: temperatury (w stopniach Celsjusza) oraz mocy elektrycznej $P = UI$.
- Obliczyć eksperymentalną wydajność chłodzenia dla dwóch przedziałów czasu (tak jak powyżej), blisko początku procesu chłodzenia oraz blisko temperatury 0°C .
- Porównać otrzymane wydajności z wydajnościami odwróconych cykli Carnota, które obliczamy dla temperatur zbiorniczka ze środków rozpatrywanych przedziałów czasu.

Tabela 1. Zestawienie wyników badania elementu Peltiera pracującego jako generator termoelektryczny oraz chłodziarka

Rodzaj pracy elementu Peltiera	Zakres zmian temperatury zbiorniczka	Ciepło odprowadzone ze zbiorniczka [J]	Praca prądu elektrycznego. [J]	η lub η_c zmierzone	η lub η_c idealne
Generator termoelekt. $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $^{\circ}\text{C}$				
 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $^{\circ}\text{C}$				
Chłodziarka $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $^{\circ}\text{C}$				
 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $^{\circ}\text{C}$				