



ĆWICZENIE

18a

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Ogniwo Peltiera jako pompa ciepła

## 1. Cel ćwiczenia

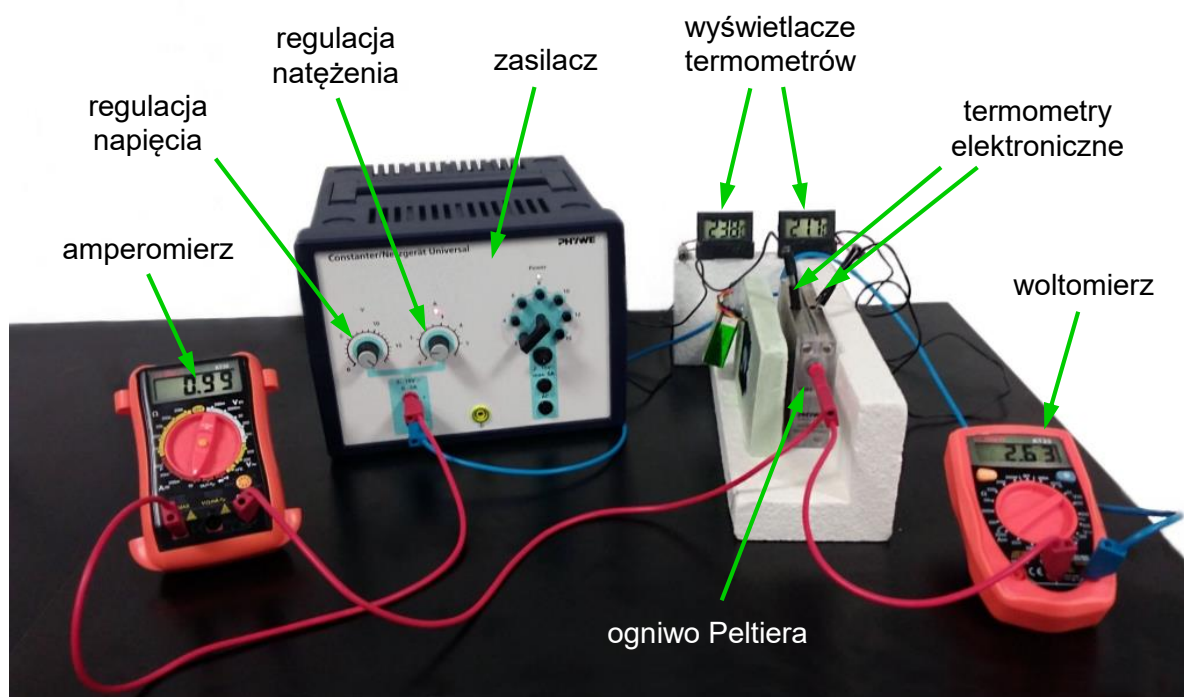
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania ogniwa Peltiera i zbadanie możliwości zastosowania go jako pompy ciepła, a w szczególności zmierzenie sprawności procesu transportu ciepła przy jego pomocy.

## 2. Układ doświadczalny

W skład zestawu pomiarowego wchodzi:

- ogniwo Peltiera ze ściankami miedzianymi w izolującej obudowie,
- regulowany wysokoprądowy zasilacz niskiego napięcia,
- dwa termometry do pomiaru temperatury miedzianych ścianek ogniwa,
- woltomierz,
- amperomierz.

Wygląd układu pomiarowego przedstawia rys. 1, zaś schemat ideowy połączenia elementów jest przedstawiony na rys. 2.



Rys. 1. Wygląd układu pomiarowego.

### 3. Wstęp teoretyczny

#### 1. Pompy ciepła

*Pompami ciepła* nazywa się urządzenia, które potrafią transportować ciepło z jednego miejsca do innego, nawet wbrew jego naturalnemu przepływowi z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej. Pompowanie ciepła może odbywać się za pomocą wielu różnych procesów fizycznych, stąd istnieje cały szereg różnych pomp ciepła charakteryzujących się różnymi właściwościami. Do ich porównywania przyjęło się jednak określać pewne parametry. W technice jest to *współczynnik wydajności* (oznaczany często skrótem COP od ang. „coefficient of performance”), a zgodnie z zasadami fizyki można obliczyć ich *sprawność*  $\eta$ , tak jak każdego innego urządzenia.

Ponieważ pompy ciepła mogą pracować zarówno jako chłodziarki, jak i urządzenia grzewcze, współczynnik wydajności może dotyczyć zarówno chłodzenia, jak i ogrzewania. Definiuje się go jako ilość użytecznego ciepła odebranego z otoczenia  $Q_{we}$  lub dostarczonego do niego  $Q_{wy}$  podzielonego przez pracę  $W$ , jaką włożono w proces pompowania tego ciepła:

$$COP_{chłodzenia} = \frac{Q_{we}}{W} \quad (1)$$

$$COP_{ogrzewania} = \frac{Q_{wy}}{W} \quad (2)$$

Sprawność jest wielkością fizyczną, w której porównuje się ilość użytecznej energii uzyskanej w danym układzie fizycznym do całkowitej ilości energii włożonej do rozważanego układu. W wielu urządzeniach użyteczną energią jest praca, jaką one wykonują wymieniając ciepło z otoczeniem. W przypadku pomp ciepła jest inaczej, bowiem użyteczne jest ciepło oddane do otoczenia, a praca oraz ciepło pobrane są energią włożoną. Sprawność pompy ciepła wyraża zatem wzór:

$$\eta = \frac{Q_{wy}}{W + Q_{we}} \quad (3)$$

#### 2. Efekt Peltiera

W 1834 r. Jean Peltier odkrył, że podczas przepływu prądu elektrycznego na niektórych złączach obwodów elektrycznych może być wydzielane lub pochłaniane ciepło. Efekt ten został nazwany jego nazwiskiem i dotyczy miejsc, w których stykają się dwa różne materiały przewodzące prąd elektryczny (przewodniki lub półprzewodniki). Na ich styku pojawiają się tzw. *bariery potencjału*, czyli miejsca, gdzie normalne rozłożenie elektronów i jonów powoduje powstawanie różnicy potencjału elektrycznego. Ta różnica potencjału wpływa na ruch elektronów w zamkniętym obwodzie elektrycznym, co można opisać na różne sposoby.

W jednym ze sposobów opisu można porównać różnice potencjału elektrycznego do różnic potencjału grawitacyjnego na kolejce górskiej (ang. „rollercoaster”) poruszającej się po zapętlonym torze. Jeśli po takim torze krążą wagoniki i nie chcemy, by zderzały się one ze sobą, to te zjeżdżające z górki muszą być hamowane, by nie wpadły na jadące przed nimi, natomiast te jadące pod górkę muszą być popychane, by nie straciły swej prędkości. Podobnie elektrony pokonujące barierę potencjału „pod górkę” muszą czerpać energię z otoczenia, a „z górki” – oddawać ją do otoczenia. Jeśli robią to kosztem energii drgań atomów i elektronów pozostających w materiale, przez który przepływają, to oznacza, że zwiększają lub obniżają jego temperaturę, bo temperatura jest związana ze średnią energią tych drgań.

Powyższy opis jest uproszczony i nie uwzględnia faktu, że w rzeczywistości elektrony przewodnictwa nie mają równych prędkości, mogą się nawzajem wyprzedzać i zderzać. Bliższe prawdzie jest opisanie wszystkich elektronów jako gazu cząstek o różnych energiach kinetycznych, których średnia energia odpowiada temperaturze. Podobnie jak cząsteczki gazu, taki i elektrony

oddziałują ze sobą i przekazują sobie nawzajem energię, ale średnia energia pozostaje stała. Część z tych elektronów jest związana z atomami, zaś część przepływa jako prąd elektryczny, jeśli znajdują się w polu elektrycznym wytworzonym przez przyłożone z zewnątrz napięcie. Bariery potencjału mogą ten przepływ zablokować, jeśli energia elektronów jest zbyt mała. Na drugą stronę bariery potencjału przedostają się tylko te elektrony, które mają największą energię kinetyczną. Efekt jest taki, że po jednej stronie bariery pozostają elektrony, których średnia energia jest niższa, zaś średnia energia elektronów po drugiej stronie bariery wzrasta. W oczywisty sposób oznacza to spadek temperatury po jednej stronie bariery i wzrost po drugiej.

Ilość ciepła, jakie jest przepompowywane w efekcie Peltiera jest proporcjonalne do natężenia prądu płynącego przez obwód i można wyrazić je wzorem:

$$Q_P = \Pi \cdot I \cdot t \quad (4)$$

gdzie  $\Pi$  (duża litera „pi”) to współczynnik Peltiera (zależny od użytych materiałów i aktualnej różnicy temperatur), a  $t$  to czas płynięcia prądu o natężeniu  $I$ .

### 3. Praca prądu elektrycznego i ciepło Joule’a

Jeśli po przyłożeniu napięcia  $U$  w obwodzie elektrycznym płynie prąd  $I$ , to jego moc wynosi:

$$P = U \cdot I \quad (5)$$

zaś jego pracę można obliczyć znając średnią moc i czas płynięcia prądu  $t$ :

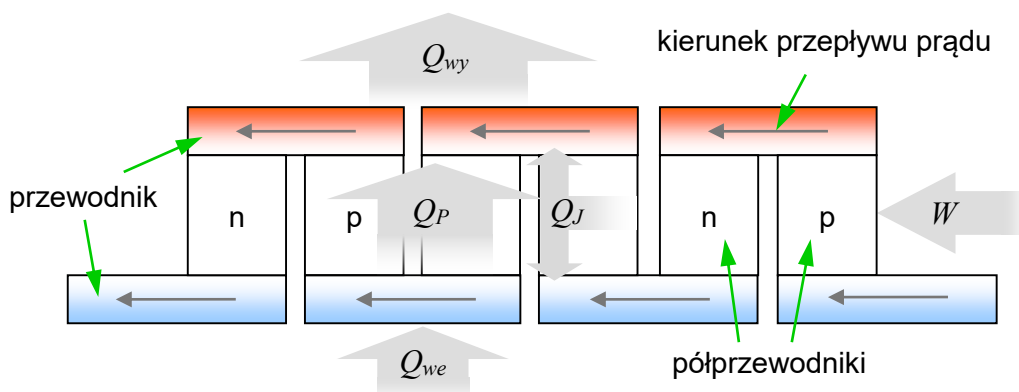
$$W = P \cdot t \quad (6)$$

W każdym przewodniku o niezerowym oporze, w którym płynie prąd elektryczny, część wykonanej pracy wydziela się jako ciepło. Jest to związane ze stratami energii kinetycznej elektronów podczas ich oddziaływania z atomami materiału, przez który przelatują. Ilość tego ciepła związana jest z oporem elektrycznym  $R$  oraz z natężeniem  $I$  prądu płynącego przez ten przewodnik:

$$Q_J = R \cdot I^2 \cdot t \quad (7)$$

### 4. Ogniwo Peltiera

*Ogniwo Peltiera* to zestaw naprzemiennie ustawionych elementów półprzewodnikowych typu n i typu p, połączonych szeregowo elementami z przewodnika (metal). Zastosowanie wielokrotnych złącz tych materiałów pozwala zintensyfikować zjawisko pochłaniania ciepła po jednej stronie i wydzielania po drugiej. Całość zwykle zamknięta jest pomiędzy ceramicznymi płytkami i zaizolowana silikonem. Brak części ruchomych powoduje stosunkowo dużą żywotność tego typu urządzeń, a symetria budowy powoduje, że zmieniając kierunek przepływu prądu można wybrać, w którą stronę pompowane jest ciepło.



Rys. 2. Schemat budowy ogniwa Peltiera

Opór elektryczny ogniwa Peltiera jest mały, rzędu kilku omów, jednak przy natężeniach prądu rzędu kilku amperów oznacza to całkiem spore ilości wydzielanego ciepła Joule'a. To ciepło rozchodzi się na obie strony ogniwa, zarówno tę ogrzewaną, jak i tę chłodzoną. Oznacza to, że strona ogrzewana zwiększa swoją temperaturę szybciej, niż obniża się temperatura strony chłodzonej. W skrajnym przypadku może dojść nawet do sytuacji, w której ciepło Joule'a dostarczane do strony chłodzonej jest większe niż ciepło odprowadzane w efekcie Peltiera i wtedy temperatura strony chłodzonej będzie wzrastać zamiast spadać.

## 5. Ciepło właściwe

Różne substancje wymagają różnych ilości ciepła, by ich temperatura zmieniła się o daną wartość. Różnica ta wynika m.in. z ich wewnętrznej budowy i może być opisana wielkością, którą nazywa się *ciepłem właściwym* danej substancji i wyraża wzorem:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (8)$$

gdzie  $c$  to ciepło właściwe,  $m$  to masa substancji, a  $\Delta T$  to różnica temperatur uzyskana w trakcie dostarczania lub odbierania ciepła  $Q$ . Wzór ten jest prawdziwy pod warunkiem, że w danej substancji w trakcie wymiany ciepła nie zachodzą *przemiany fazowe* (np. krzepnięcie lub wrzenie). Zdarza się także, że wartość  $c$  zmienia się wraz z temperaturą i ciśnieniem, jednak w większości obliczeń można przyjąć, że jest ono stałą materiałową. Przykładowe wartości ciepła właściwego wynoszą:

- dla wody w postaci ciekłej  $c \approx 4185 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- dla wody w postaci stałej (czyli lodu)  $c \approx 2100 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- dla wody w postaci gazowej (czyli pary wodnej)  $c \approx 1850 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- dla miedzi w postaci stałej  $c \approx 383 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- dla mosiądzu w postaci stałej  $c \approx 381 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- dla glinu (aluminium) w postaci stałej  $c \approx 900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Dla porównania ciepło oddawane przez wodę podczas krzepnięcia (i pobierane podczas topnienia lodu) wynosi ok.  $334\,000 \text{ J/kg}$ , a ciepło parowania wody to aż ok.  $2\,260\,000 \text{ J/kg}$ . Oznacza to, że jeśli zamrażarka doprowadza ochłodzoną wodę do stanu krzepnięcia, to będzie pobierać z niej ciepło bez zmiany temperatury, póki woda nie zmieni się w lód. Podobnie aby doprowadzić wodę do całkowitego odparowania, trzeba dostarczyć jej dużo więcej energii niż potrzeba do jej ogrzania do  $100^\circ\text{C}$ .

## 6. Hipoteza

Małe natężenie prądu oznacza małą ilość ciepła przepompowywanego w efekcie Peltiera, skutkiem czego spadek temperatury strony chłodzonej jest powolny i wymiana ciepła z otoczeniem jest nie do pominięcia. Spowoduje ogrzewanie się strony chłodzonej i chłodzenie ogrzewanej, więc można spodziewać się, że sprawność ogniwa Peltiera jako pompy ciepła będzie wtedy mała.

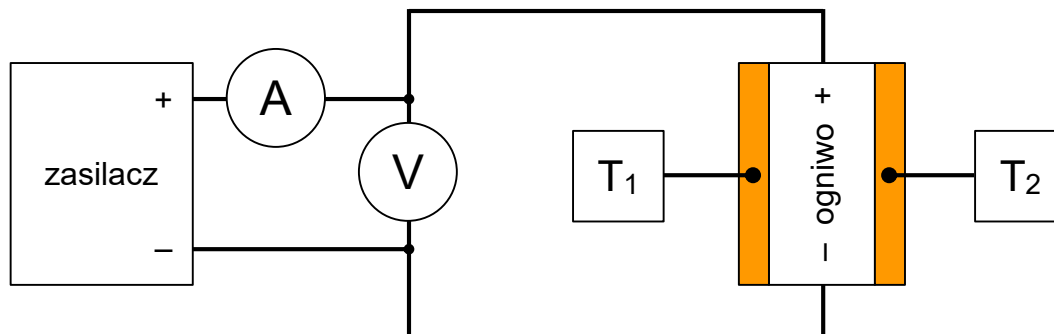
Duże natężenie prądu oznacza dużą ilość ciepła Joule'a, które będzie dominującym składnikiem pracy wkładanej do obwodu elektrycznego. Tylko niewielka część pracy będzie związana z faktycznym przenoszeniem ciepła, więc można spodziewać się, że w takiej sytuacji sprawność ogniwa Peltiera jako pompy ciepła również będzie mała.

Skoro zarówno zmniejszanie, jak i zwiększanie natężenia prądu prowadzi do zmniejszania się sprawności ogniwa, to można podejrzewać, że istnieje jakaś wartość pośrednia natężenia prądu, dla której sprawność osiąga maksimum. Robiąc pomiary pracy  $W$ , ciepła pobranego  $Q_{we}$  i ciepła oddanego  $Q_{wy}$  dla różnych natężeń prądu można przekonać się, czy tak jest w rzeczywistości.

Aby zmierzyć pracę  $W$  niezbędna będzie znajomość natężenia prądu  $I$ , napięcia  $U$  oraz czasu trwania zasilania ogniwa  $t$ . Ponieważ napięcie i natężenie prądu mogą zmieniać się pod wpływem zmian temperatur po obu stronach ogniwa, dobrze jest znać ich wartość w każdej chwili pomiaru. Obserwując te zmiany łatwo się jednak przekonać, że zmiany mocy  $P$  są w przybliżeniu jednostajne

w czasie, więc w praktyce konieczne będzie jedynie zanotowanie wartości  $U$  i  $I$  na początku i na końcu pomiaru. To wystarczy, by obliczyć średnią moc  $P$  ogniwa.

Aby zmierzyć ciepło pobrane z jednej z miedzianych blach i ciepło oddane do drugiej, potrzebna będzie znajomość ciepła właściwego miedzi  $c$ , masy każdej z blach  $m$  oraz temperatury  $T$  każdej z blach przed rozpoczęciem pracy ogniwa i po jej zakończeniu.



Rys. 3. Schemat ideowy układu pomiarowego.

#### 4. Przebieg doświadczenia

A) Sprawdzić poprawność połączenia i ustawienia elementów układu pomiarowego. W razie wątpliwości skonsultować się z obsługą laboratorium.

B) Uruchomić poszczególne urządzenia wchodzące w skład układu pomiarowego zgodnie z dołączonym opisem.

C) Przed rozpoczęciem pomiaru zapisać początkowe temperatury  $T$  miedzianych blach dołączonych do obu stron ogniwa.

D) Przetawić zasilacz w tryb ograniczenia natężenia prądu, a następnie rozpocząć pomiar. W tym celu należy jednocześnie uruchomić przepływ prądu o natężeniu  $I$  i pomiar czasu  $t$ . Od razu po uruchomieniu przepływu prądu należy odczytać wartość napięcia  $U$ . Wartości  $I$  i  $U$  zapisać jako początkowe dla danego pomiaru.

**Uwaga:** przed rozpoczęciem pomiaru skonsultować z obsługą laboratorium dozwolony zakres natężeń prądu i napięć, dla jakich może pracować ogniwo wykorzystywane w ćwiczeniu.

**Uwaga:** włączenie przepływu prądu powinno nastąpić jak najszybciej, bez dodatkowej regulacji napięcia i natężenia po jego uruchomieniu, bo takie zmiany powodują trudny do uwzględnienia wpływ na ilość wykonanej pracy  $W$ .

**Uwaga:** jeśli zasilacz pracuje w trybie ograniczenia natężenia prądu, to wartości  $I$  powinny być stałe, ale wartości napięcia  $U$  będą zmieniać się dość szybko. Należy zwrócić szczególną uwagę, by nie przeoczyć chwili odczytu napięcia początkowego i końcowego.

E) W chwili, gdy wskazania termometrów mierzących temperatury każdej z blach zmieniają się o przynajmniej 5 stopni Celsjusza, zakończyć pomiar. W tym celu należy najpierw odczytać wartość natężenia prądu  $I$ , potem napięcia  $U$  i szybko obniżyć natężenie prądu do zera jednocześnie zatrzymując pomiar czasu  $t$ . Wartości  $I$  i  $U$  zapisać jako końcowe dla danego pomiaru, a  $t$  jako czas pracy pompy.

F) Ze względu na opóźnienie w rozchodzeniu się ciepła po miedzianych blachach ich temperatury przez chwilę jeszcze będą się zmieniać. Obserwować wartości temperatur tych blach i zapisać ich skrajne wartości: najmniejszą w przypadku blachy chłodzonej i największą w przypadku blachy ogrzewanej. Odczytane wartości zapisać jako końcowe temperatury  $T_1$  i  $T_2$  każdej z blach.

- G)** Poczekać, aż cały układ pomiarowy wystygnie, po czym w taki sam sposób wykonać pomiary dla innych wartości natężenia prądu. Zakres natężeń oraz liczbę pomiarów ustalić z obsługą laboratorium.
- H)** Po wykonaniu pomiarów wyłączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym opisem.
- I)** Obliczyć chwilową moc ogniwa  $P$  na początku i na końcu każdego pomiaru zgodnie ze wzorem (5).
- J)** Obliczyć średnią moc ogniwa w czasie każdego z pomiarów, a na jej podstawie obliczyć pracę  $W$  wykonaną w czasie danego pomiaru.
- K)** Na podstawie równania (8) i znajomości parametrów blach po obu stronach ogniwa obliczyć ilość ciepła odebranego z jednej z nich  $Q_{we}$  oraz ilość ciepła oddanego do drugiej  $Q_{wy}$  w każdym z pomiarów.
- L)** Znając wszystkie potrzebne wartości dla każdego pomiaru obliczyć na podstawie wzorów (1), (2) i (3) sprawność i wydajności pompy ciepła.
- M)** Porównać sprawności i wydajności ogniwa przy różnych natężeniach prądu  $I$ . Czy zgodnie z hipotezą istnieje natężenie, dla którego sprawność jest największa? Jak zmieniają się wydajności przy zmianie natężenia?
- N)** Oszacować niepewności pomiarowe zmierzonych i obliczonych wielkości. Czy znajomość tych niepewności wpływa na wnioski?