



Szkoła z przyszłością

szkolenie współfinansowane przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

ĆWICZENIE	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ
20b	Ogniwo Peltiera jako pompa ciepła
Data pomiaru:	
Imię i nazwisko:	
Imię i nazwisko:	

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania ogniwa Peltiera i zbadanie możliwości zastosowania go jako pompy ciepła, a także zmierzenie sprawności procesu transportu ciepła przy jego pomocy. Dodatkowo mierzony jest efekt odwrotny, czyli tzw. zjawisko Seebecka.

2. UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Zestaw doświadczalny stanowią:

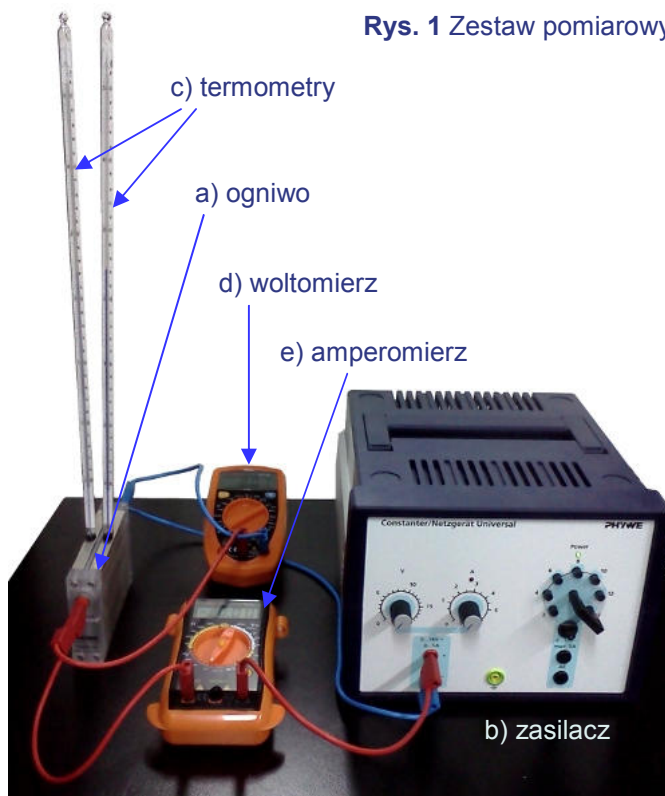
- ogniwo Peltiera ze ściankami miedzianymi (rys. 1a),
- regulowany zasilacz niskiego napięcia (rys. 1b),
- dwa termometry alkoholowe (rys. 1c) o końcach posmarowanych pastą termoprzewodzącą, umieszczone we wnękach miedzianych ścianek ogniwa,
- woltomierz (rys. 1d),
- amperomierz (rys. 1e).

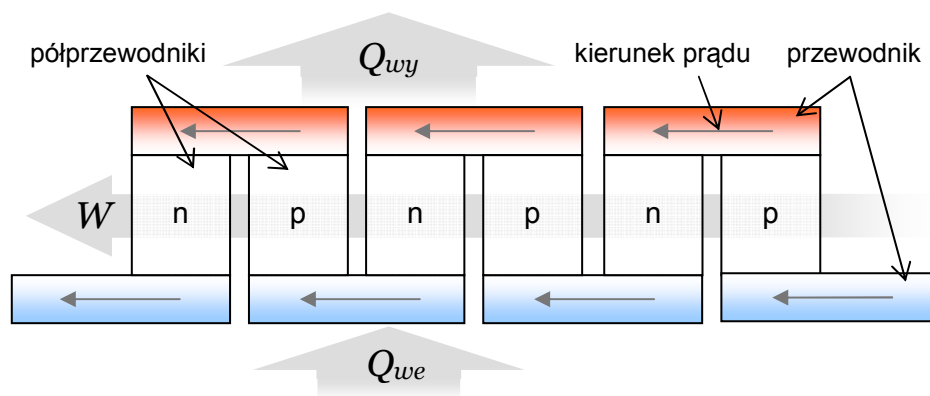
3. WSTĘP TEORETYCZNY

Pompami ciepła nazywa się urządzenia, które potrafią transportować ciepło z jednego miejsca do innego, nawet wbrew jego naturalnemu przepływowi. Zgodnie z prawami fizyki (i zdrowym rozsądkiem) ciepło przepływa od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej, podobnie jak woda spływa z góry do dołu. Pompa ciepła potrafi natomiast przetransportować ciepło z ciała zimniejszego do ciała cieplejszego, podobnie jak pompa wody potrafi przetransportować tę ciecz pod górę.

Jednym z rodzajów pomp ciepła jest *ogniwo Peltiera*, czyli zestaw naprzemienienia ustawionych elementów półprzewodnikowych typu n i typu p, połączonych szeregowo elementami z przewodnika (metal). Sytuację tę ilustruje rys. 2. Na styku różnych materiałów pojawiają się tzw. bariery potencjału, czyli miejsca, gdzie normalne rozłożenie elektronów i jonów powoduje powstawanie różnicy potencjału elektrycz-

Rys. 1 Zestaw pomiarowy





Rys. 2 Schemat działania ogniwa Peltiera jako pompy ciepła

nego. Można rozważać przepływ prądu w takich obwodach jako ruch gazu elektronowego i jest to opis pozwalający na dość dokładne obliczenia, jednak do zrozumienia idei działania ogniwa nie jest on potrzebny. Można zilustrować działanie ogniwa Peltiera w sposób bardziej intuicyjny. Różnica potencjału jest po prostu napięciem pola elektrycznego, które może powodować przyspieszanie lub hamowanie elektronów. W sytuacji, gdy wymusimy przepływ elektronów przez takie ogniwo (czyli po prostu przepuścimy prąd elektryczny), w niektórych miejscach będą one hamowane, a w innych przyspieszane. Można posłużyć się analogią (nie do końca trafną) do ruchu sanek po zapętlonym torze, na którym jest górką. Jeśli chcemy, by po takim torze krążył ze stałą prędkością szereg równo oddalonych sanek, to te, które zjeżdżają z góry, muszą być hamowane, by nie wpadły na te 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 góry” – oddawać ją do otoczenia. Jeśli robią to kosztem energii drgań atomów w materiale, przez który przepływają, to oznacza, że zwiększają lub obniżają jego temperaturę (która jest przecież związana z tymi drganiami). Zjawisko takiego pochłaniania lub wydzielania się ciepła na złączach różnych materiałów nazywa się *zjawiskiem Peltiera* i dotyczy on nie tylko półprzewodników, ale w nich jest najbardziej wydajny.

W rzeczywistości rolę „górek” i „dołków” pełnią poziomy przewodnictwa, akceptorowe i donorowe w różnych materiałach, ale elektrony nie poruszają się z równą prędkością ani ruchem jednostajnym. Gaz elektronowy obejmuje szerokie spektrum dozwolonych energii, przy czym rozkład ten nie jest jednorodny – niewielka liczba elektronów ma energie dużo większe niż inne. Sprawa dodatkowo komplikuje się, gdy pojawi się już różnica temperatur. Związana z nią zmiana energii i ruchliwości nośników prądu po obu stronach ogniwa prowadzi do kolejnych zmian w strukturze „górek” i „dołków”, zaburzających opisany mechanizm transportu ciepła. Zjawisko transportu ciepła w obecności gradientu temperatury nazywa się *zjawiskiem Thomsona*. Całe szczęście ten efekt nie jest dominujący – znacznie bardziej dalsze przepompowywanie ciepła utrudnia zwykle przewodnictwo cieplne materiałów, z których zrobione jest ogniwo Peltiera.

Warto w tym miejscu wspomnieć o trzecim zjawisku, a mianowicie *zjawisku Seebecka*, które jest odwrotnością zjawiska Peltiera. Polega ono na tym, że w obecności różnicy temperatur w ogniwie Peltiera pojawia się siła elektromotoryczna. Dzięki temu ogniwo to może być używane nie tylko jako pompa ciepła, ale jako źródło energii. Siła elektromotoryczna takiego ogniwa wyraża się wzorem:

$$(1) \quad U_0 = \alpha \cdot \Delta T$$

gdzie ΔT to różnica temperatur po obu stronach ogniwa, a α to współczynnik charakteryzujący dane ogniwo Peltiera.

Urządzenie to posiada też cały szereg innych zalet. Po pierwsze można łatwo zmienić kierunek przepływu ciepła na przeciwny – wystarczy odwrócić kierunek przepływu prądu. Po drugie nie ma w nim (w przeciwieństwie do większości innych pomp ciepła) żadnego czynnika roboczego, którego mogłoby zabraknąć, ani elementów ruchomych, które mogłyby ulec uszkodzeniu mechanicznemu, co przekłada się na dużą żywotność ogniwa Peltiera. Dodatkowo ich budowa umożliwia uzyskanie kształtu ogniwa dopasowanego do potrzeb maszyny, w którym ma być użyte, choć z reguły zarówno

strona chłodzona, jak i grzana, mają podobne pola powierzchni oraz nie mogą być od siebie bardzo oddalone.

Oprócz całego szeregu zalet istnieje jednak jedna zasadnicza wada: ogniwo Peltiera, jak każdy układ elektryczny, nagrzewa się w wyniku przepływu przez nie prądu elektrycznego – jest to tzw. *ciepło Joule’a*. Ten nieunikniony proces znacznie utrudnia uzyskanie niskich temperatur i dużej wydajności ogniwa jako chłodziarki, choć z drugiej strony przyczynia się do większego grzania strony ciepłej. Z tego powodu ważny jest odpowiedni dobór parametrów pracy ogniwa tak, by wykorzystywać je najbardziej optymalnie, w zależności od potrzeb.

Najważniejszym parametrem pracy ogniwa Peltiera jest natężenie płynącego przez nie prądu elektrycznego, z nim bowiem związane są zarówno wydajność transportu ciepła ze strony chłodzonej na grzaną, jak i wydzielające się w samym ogniwie ciepło Joule’a. Ilość przepompowanego ciepła wyraża wzór:

$$Q_P = \Pi \cdot I \cdot t \quad (2)$$

gdzie Π (duża litera „pi”) to współczynnik Peltiera dla danego układu i danej różnicy temperatur, I to natężenie prądu, zaś t to czas pracy ogniwa. Z kolei ilość ciepła Joule’a wyraża wzór:

$$Q_J = R \cdot I^2 \cdot t \quad (3)$$

gdzie R to opór elektryczny ogniwa. Zwykle jest on bardzo mały, rzędu pojedynczych omów, więc do zasilania ogniw Peltiera potrzebne są zasilacze o niskim napięciu, ale o dużej wydajności prądowej.

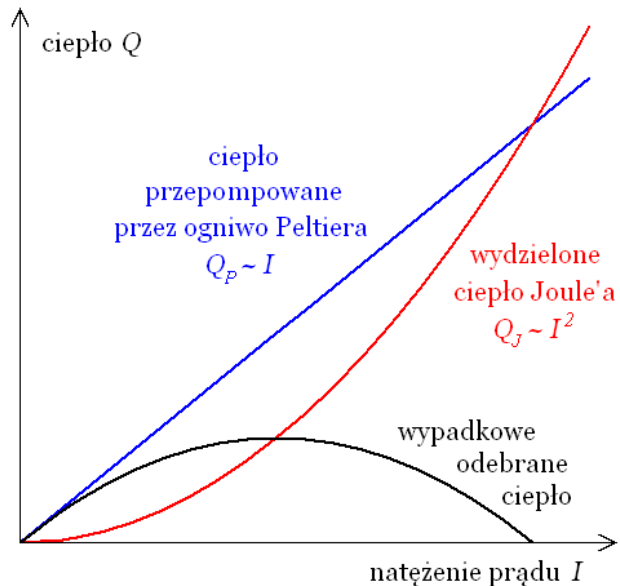
Jak widać ilość przepompowywanego ciepła rośnie liniowo z natężeniem prądu, zaś ilość ciepła Joule’a – z kwadratem natężenia. Oznacza to, że choć dla małych I efekt wypompowywania ciepła może dominować, to jest on ogólnie mało wydajny, natomiast dla bardzo dużych I cała zdolność chłodzenia może być niweczona przez ciepło generowane przez samo ogniwo. Gdzieś pomiędzy tymi skrajnymi przypadkami leżą wartości natężenia prądu, dla których możliwe jest uzyskanie najbardziej wydajnego transportu ciepła lub najniższej temperatury (przy czym nie muszą to być te same wartości).

W całym układzie musi być spełniona zasada zachowania energii i nie jest możliwe odprowadzenie większej ilości ciepła (Q_{we}) niż ta, która jest wydzielana na drugim biegunie pompy (Q_{wy}). Wynika to z tego, że pompa potrzebuje energii innej niż ciepło, by móc wymusić jego przepływ – jest to praca W wprowadzona do układu. W wypadku idealnym suma pracy i ciepła odebranego byłaby równa ciepłu wydzielonemu ($W + Q_{we} = Q_{wy}$), ale wszystkie maszyny rzeczywiste cechuje pewna strata energii, stąd wydzielone ciepło jest nieco mniejsze od tej sumy ($W + Q_{we} > Q_{wy}$). Za miarę sprawności pompy ciepła powinno się zatem przyjmować stosunek wyrażony następującym wzorem:

$$\eta = \frac{Q_{wy}}{W + Q_{we}} \quad (4)$$

Mówiąc o sprawności ciekawe jest to, że niektóre parametry pomp ciepła mylnie wskazują na ich sprawność większą od 100%. Na przykład nawet rzeczywiste maszyny mogą oddać ciepło ponad 2 razy większe niż włożona praca i odebrać ciepło nieco większe niż ta praca. Oczywiście nie przeczy to zasadzie zachowania energii, bo powyższe zależności pozostają spełnione, ale pokazuje unikatowe możliwości układów takich jak pompy ciepła. Stąd coraz powszechniej stosuje się je nie tylko w sprzęcie chłodzącym, ale także do ogrzewania budynków mieszkalnych.

Ciepło dostarczone lub odebrane materii, w której nie zachodzą przemiany fazowe, oznacza zmianę temperatury proporcjonalną do jego ilości i wyraża się wzorem:



Rys. 3 Ciepło przepompowywane a ciepło Joule’a

(5)

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

gdzie Q oznacza ciepło, m – masę ogrzanej lub oziębionej substancji, ΔT – różnicę temperatur uzyskaną w wyniku dostarczenia lub odebrania ciepła, zaś c to ciepło właściwe danej substancji. Różne substancje charakteryzują się różnymi wartościami ciepła właściwego, które dodatkowo zależy też od ich stanu skupienia, a w wielu przypadkach także od innych czynników (np. dla gazów od sposobu ogrzewania). W większości obliczeń można jednak przyjąć, że ciepło właściwe jest 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 $c \approx 900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

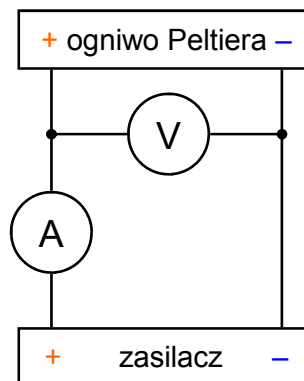
Dla porównania ciepło oddawane przez wodę podczas krzepnięcia (i pobierane podczas topnienia lodu) wynosi ok. $334\,000 \text{ J/kg}$, a ciepło parowania wody to aż ok. $2\,260\,000 \text{ J/kg}$! Oznacza to, że jeśli pompa ciepła doprowadzi ochładzaną wodę do stanu krzepnięcia, to będzie od niej pobierać ciepło bez zmiany temperatury, póki woda nie zmieni się w lód. Podobnie aby doprowadzić wodę do całkowitego odparowania, trzeba dostarczyć jej energię dużo większą niż ta potrzebna do jej ogrzania do 100°C .

4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

A) Sprawdzić połączenia przewodów układu pomiarowego wedle rys. 4. W razie wątpliwości skonsultować się z obsługą laboratorium.

B) Sprawdzić ustawienie aparatury:

- zasilacz powinien mieć oba pokrętki po lewej stronie (podpisane „V” i „A”) skrócone na zero, czyli do oporu w lewo,
- woltomierz powinien być ustawiony na zakres pomiaru napięcia do 20 V prądu stałego,
- amperomierz powinien być ustawiony na zakres pomiaru natężenia do 10 A prądu stałego.



Rys. 4 Połączenie przewodów elektrycznych

W razie wątpliwości skonsultować się z obsługą laboratorium. Po akceptacji prowadzącego ćwiczenie włączyć zasilacz przy pomocy przełącznika na tylnej ścianie.

C) Zanotować wartości temperatur odczytane z obu termometrów w odpowiednim miejscu tabeli 1 jako początkowe dla danego pomiaru.

D) Przekręcić pokrętkę regulacji napięcia (oznaczone „V”) w zasilaczu na maksimum (do oporu w prawo).

E) O pełnej minucie wskazywanej przez zegar przekręcić pokrętkę regulacji natężenia w zasilaczu tak, aby na amperomierzu pojawiła się wartość ok. 0,5 A i jednocześnie odczytać wartość napięcia na woltomierzu. Zapisać obie wartości, a także godzinę początku pomiaru w odpowiednich miejscach tabeli 1. **UWAGA: wartości wskazywane przez amperomierz pokazują natężenie z opóźnieniem, a wartości wskazywane przez woltomierz potrafią zmieniać się gwałtownie!**

F) Jeśli po upływie pełnej minuty różnica temperatur wskazywanych przez oba termometry jest mniejsza niż 5°C , to kontynuować pomiar do następnej pełnej minuty. W przeciwnym razie odczytać wskazania woltomierza i amperomierza oraz wyłączyć zasilanie układu (tj. przekręcić pokrętkę „A” do oporu w lewo). Zanotować godzinę zakończenia pracy ogniwa Peltiera oraz odczytane wartości napięcia i natężenia.

G) Przekręcić pokrętkę „V” na zero (do oporu w lewo), a następnie obserwować wskazania obu termometrów aż do ustabilizowania się wartości w maksimum (od strony grzanej) lub minimum (od strony chłodzonej). Odczytane wartości maksymalną i minimalną zanotować w tabeli 1 jako końcowe w danym pomiarze.

H) Włączyć wentylator dołączony do zestawu pomiarowego i skierować strumień powietrza tak, by chłodził ogrzaną ściankę ogniwa Peltiera.

I) Przy wyłączonym zasilaniu (amperomierz powinien wskazywać zero) co jakiś czas odczytywać wartość napięcia na woltomierzu oraz temperatur wskazywanych przez oba termometry. Odczytane wartości zapisywać w tabeli 4.

J) Po wyrównaniu się temperatur na obu termometrach (z dokładnością do ich skali) wyłączyć lub usunąć wentylator tak, by żadna ze ścianek ogniwa nie była chłodzona.

K) Pomiary z punktów C-J powtórzyć dla kilku różnych wartości natężenia prądu z zakresu od 0 do 6 A. **UWAGA: nie stosować natężenia prądu większego niż 6 A, gdyż może to spowodować uszkodzenie układu pomiarowego, a także porażenie elektryczne wykonujących ćwiczenie!**

L) Po zakończeniu wszystkich pomiarów skrócić oba pokrętki zasilacza na zero (do oporu w lewo) i wyłączyć go przełącznikiem na tylnej ścianie. Wyłączyć także woltomierz i amperomierz przy pomocy ich pokręteł.

M) Uzupełnić tabelę 1 o dane o niepewnościach pomiarowych (zgodnie z instrukcjami obsługi woltomierza i amperomierza, a także na podstawie oszacowań własnych dla temperatur i czasu). Obliczyć także moc chwilową ogniwa na początku i na końcu pompowania ciepła.

N) Korzystając z wyników zgromadzonych w tabeli 1 obliczyć także ilość ciepła odprowadzoną z chłodzonej miedzianej ścianki ogniwa (Q_{we}) i doprowadzoną do ogrzewanej ścianki miedzianej (Q_{wy}). Wyniki należy wpisać w tabeli 2. Za pojemność cieplną miedzi przyjąć wartość $c = 383 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, natomiast masa m każdej z tych ścianek wynosi $670 \pm 30 \text{ g}$. Założyć, że pojemność cieplna termometrów i innych części ogniwa jest zaniedbywalnie mała.

O) Na podstawie wartości napięcia i natężenia prądu w każdym z pomiarów obliczyć średnią moc wydzieloną na ogniwie, a mnożąc ją przez czas zasilania ogniwa – zużyta energię, równą pracy włożonej W . Otrzymane wartości wpisać w tabeli 2.

P) Uzupełnić tabelę 3 wpisując obliczone stosunki $Q_{wy}/(Q_{we}+W)$, Q_{wy}/W , Q_{we}/W i ich niepewności dla wszystkich pomiarów. Pierwszy z nich odpowiada sprawności ogniwa Peltiera, zaś drugi i trzeci opisują wydajność grzania i chłodzenia. Zrobić wspólny wykres zależności tych trzech wielkości od natężenia prądu. Jakie wnioski można wysnuć z tego wykresu?

Q) Na podstawie danych z tabeli 4 wykonać wykres zależności siły elektromotorycznej (napięcia) ogniwa Peltiera od różnicy temperatur na jego ściankach. Czy do tak otrzymanego wykresu można dopasować linię prostą? Jeśli tak, to jaki jest współczynnik nachylenia tej prostej?

ĆWICZENIE 20b	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ Ogniwo Peltiera jako pompa ciepła
Data pomiaru:.....	
Imię i nazwisko:.....	
Imię i nazwisko:.....	
Szkola, klasa:.....	

Pojemność cieplna miedzi: $c = 383 \pm 3 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Masa ścianek miedzianych ogniwa Peltiera: $m = 670 \pm 30 \text{ g}$

TABELA 1

godzina [hh:mm]	natężenie I [A]	napięcie U [V]	moc chwilowa P [W]	temperatura T_1 [°C]	temperatura T_2 [°C]
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±
	±	±	±	±	±

TABELA 2

natężenie I [A]	czas pracy pompy t [s]	moc średnia P [W]	praca włożona W [J]	ciepło pobrane Q_{we} [J]	ciepło oddane Q_{wy} [J]
±	±	±	±	±	±
±	±	±	±	±	±
±	±	±	±	±	±
±	±	±	±	±	±
±	±	±	±	±	±
±	±	±	±	±	±

TABELA 3

[illegible]**TABELA 4**[illegible]