



ĆWICZENIE

20a

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Sprężarkowa pompa ciepła

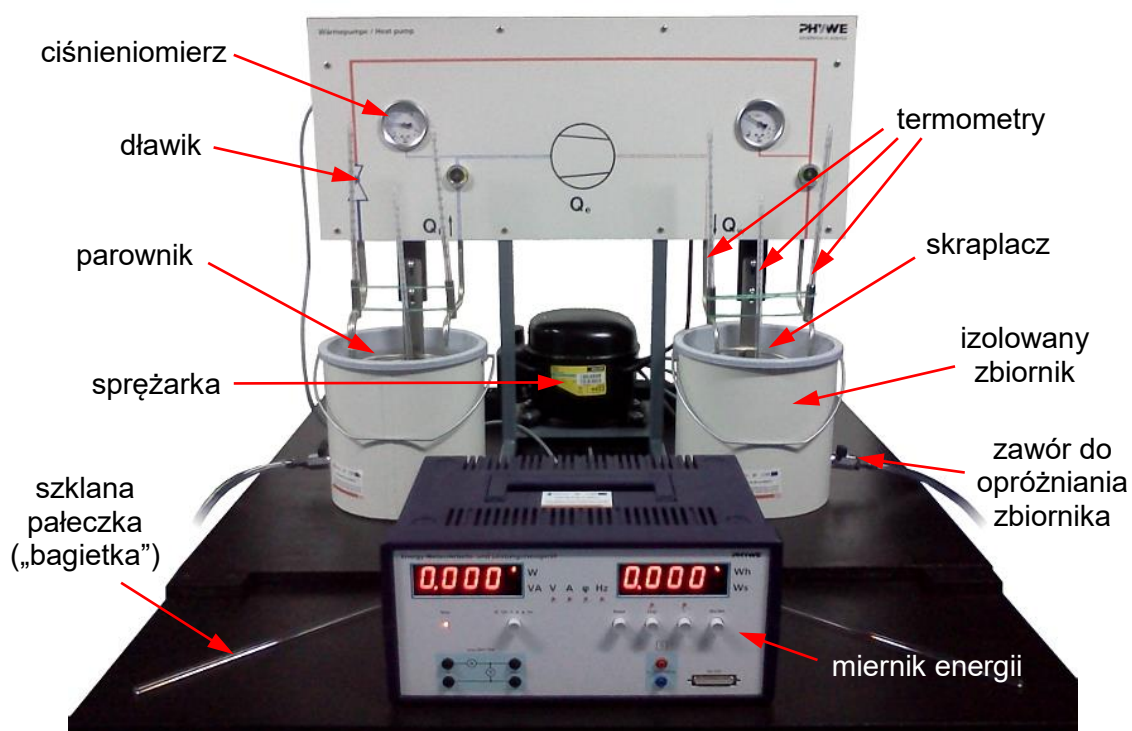
1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania sprężarkowej pompy ciepła oraz zmierzenie faktycznych możliwości transportu ciepła przy jej pomocy, a w szczególności oszacowanie sprawności tego procesu.

2. Układ doświadczalny

W skład zestawu doświadczalnego wchodzi:

- sprężarkowa pompa ciepła z wbudowanymi miernikami ciśnienia czynnika roboczego,
- dwa izolowane zbiorniki na wodę,
- zestaw termometrów do pomiaru temperatury różnych części układu,
- miernik energii elektrycznej.



Rys. 1. Wygląd zestawu doświadczalnego.

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* ρ , 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:

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

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

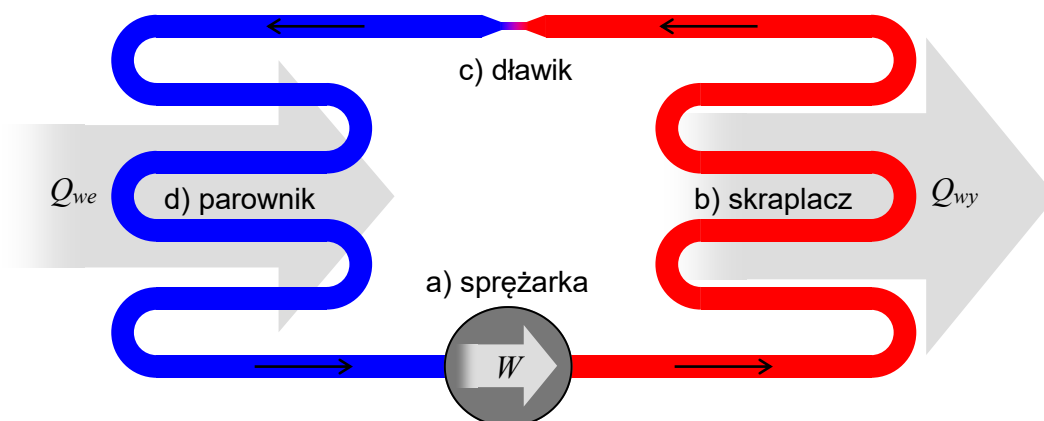
Sprawność jest wielkością fizyczną, w której porównuje się ilość użytecznej energii uzyskanej w danym układzie fizycznym do całkowitej ilości energii włożonej do rozważanego układu. W wielu urządzeniach użyteczną energią jest praca, jaką one wykonują wymieniając ciepło z otoczeniem. W przypadku pomp 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. Sprężarkowa pompa ciepła

W lodówkach, zamrażarkach i klimatyzatorach stosuje się zwykle pompy ciepła, w których odpowiednia substancja (np. freon lub amoniak) sprężana jest w jednym miejscu, a rozprężana w innym. Przed sprężeniem substancja ta (zwana czynnikiem roboczym) ma postać gazu. Sprężanie (rys. 2a) powoduje, że wzrasta ciśnienie, a wraz z nim temperatura tego gazu. Przepływa on wtedy przez pierwszy wymiennik ciepła (w lodówkach zamontowany zwykle za tylną ścianką) i oddaje energię do otoczenia, które jest zimniejsze niż on sam. Wymiana ciepła jest szczególnie duża, jeśli w tym wymienniku zachodzi zjawisko skraplania, stąd ten pierwszy wymiennik ciepła nazywa się często skraplaczem (rys. 2b), a parametry pracy pompy dobiera się tak, by to skraplanie następowało. Wynika to z tego, że wszystkie *przemiany fazowe* (takie jak np. skraplanie, krzepnięcie, topnienie i parowanie) związane są z większą zmianą energii wewnętrznej większości substancji niż zwykła zmiana temperatury.

Po przejściu przez skraplacz czynnik roboczy przepuszczany jest przez odpowiedni dławik (lub jego odpowiednik), który powoduje rozprężanie (rys. 2c). Następuje spadek ciśnienia, czyli także spadek temperatury i substancja kierowana jest do drugiego wymiennika ciepła, w którym ogrzewa się od otoczenia (w lodówce następuje to w jej wnętrzu). Ten drugi wymiennik ciepła jest nazywany często parownikiem (rys. 2d), ponieważ zwykle następuje w nim proces parowania czynnika roboczego (o ile poprzednio był on skroplony). Podobnie jak w przypadku skraplania, parowanie powoduje odebranie od otoczenia większej ilości ciepła niż zwykła zmiana temperatury. Odparowany czynnik roboczy trafia z powrotem do sprężarki i obieg się zamyka.



Rys. 2. Schemat działania sprężarkowej pompy ciepła.

3. Ciepło właściwe

Różne substancje wymagają różnych ilości ciepła, by ich temperatura zmieniła się o tę samą 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:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (4)$$

gdzie c to ciepło właściwe, m to masa substancji, a ΔT 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. 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°C .

4. Hipoteza

Zgodnie z I zasadą termodynamiki żadna maszyna nie może wytwarzać więcej energii, niż pobiera z otoczenia. Byłoby to także sprzeczne z zasadą zachowania energii. Innymi słowy nie istnieją maszyny, których sprawność jest większa niż 1. Ponadto zasady termodynamiki odnoszą się do maszyn idealnych, a w praktyce w maszynach rzeczywistych trudno uniknąć strat energii. Te straty energii najczęściej oznaczają ucieczkę ciepła do otoczenia. Jeśli zasada zachowania energii jest spełniona, to oznacza, że sprawność żadnej maszyny nie może być równa 1.

Robiąc pomiary pracy W , ciepła pobranego Q_{we} i ciepła oddanego Q_{wy} przez sprężarkową pompę ciepła można obliczyć jej sprawność i zweryfikować, czy zgadza się ona z powyższymi założeniami. Można także obliczyć współczynniki wydajności chłodzenia oraz ogrzewania, sprawdzić,

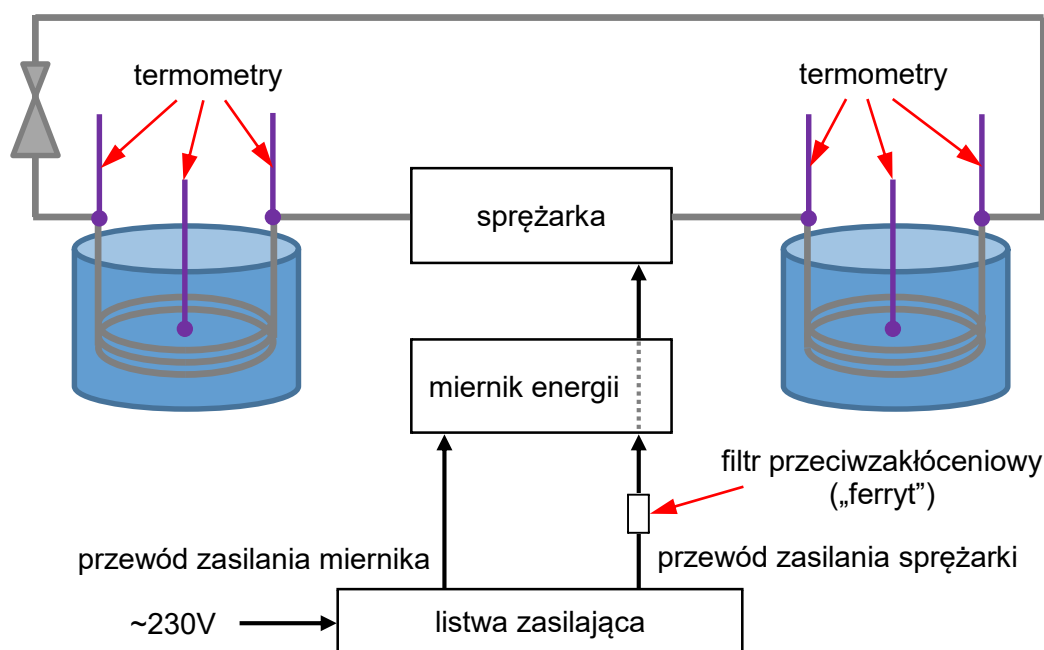
jak sprężarkowa pompa ciepła sprawuje się jako chłodziarka lub grzejnik i porównać ją z innymi chłodziarkami i grzejnikami.

Do pomiaru pracy W w układzie doświadczalnym służy specjalny miernik energii, który mierzy chwilową moc P przepływającego przez niego prądu elektrycznego, a następnie na jej podstawie oblicza przyrost zużytej energii w danej chwili pomiaru.

$$\Delta W = P \cdot \Delta t \quad (5)$$

Zgodnie z powyższym wzorem można zdefiniować także jednostkę pracy, którą może być połączenie jednostki mocy, jaką jest wat, z jednostką czasu, jaką może być np. sekunda czy godzina. Jedna *watosekunda* (Ws) jest równa jednemu dżulowi (J), czyli podstawowej jednostce energii, więc nie jest powszechnie używana. Natomiast w wielu zastosowaniach (w tym do pomiaru energii elektrycznej) wygodne są *watogodzina* (1 Wh = 3600 J) i *kilowatogodzina* (1 kWh = 3600000 J).

Aby obliczyć ciepło odebrane przez pompę ciepła Q_{we} albo ciepło oddane przez nią Q_{wy} , należy tak otoczyć parownik i skraplacz pompy substancjami o znanych ciepłach właściwych c , by pompa wymieniała całe ciepło właśnie z nimi. Znając masę każdej z tych substancji oraz mierząc, jak zmieniła się ich temperatura, można obliczyć ilość ciepła odebranego i oddanego odpowiednio przekształcając równanie (4). W układzie pomiarowym używanym w tym ćwiczeniu wygodnie jest w tym celu użyć wody, którą wypełnia się dwa izolowane pojemniki otaczające parownik i skraplacz. Ciepło właściwe wody jest znane, a masa wody może być obliczona na podstawie jej objętości, albowiem gęstość wody jest również dobrze znana.



Rys. 1. Schemat połączeń w układzie doświadczalnym.

4. Przebieg doświadczenia

A) Przy pomocy dołączonego naczynia wypełnić zimną wodą z kranu oba izolowane zbiorniki tak, aby poziom wody zakrywał wymienniki ciepła. Zanotować, jaka masa wody m znalazła się w każdym ze zbiorników.

Uwaga: przed nalaniem wody upewnić się, że zawory do opróżniania zbiorników są zamknięte!

Uwaga: nalewając wodę należy uważać, by nie uszkodzić żadnego z termometrów! W razie potrzeby odłożyć je w bezpieczne miejsce, a po nalaniu wody włożyć z powrotem. Końcówki niektórych z termometrów posmarowane są termoprzewodzącą pastą silikonową.

B) Przed rozpoczęciem pomiaru sprawdzić poprawność ustawienia i połączenia poszczególnych elementów układu pomiarowego. W razie wątpliwości skonsultować się z obsługą laboratorium.

C) Poczekać, aż wskazania termometrów się ustabilizują i spisać temperatury odczytane z nich wszystkich: zarówno temperatury wody w obu zbiornikach, jak i temperatury czynnika roboczego na wlocie i wylocie z parownika i skraplacza.

D) Ustawić miernik energii w tryb pomiaru energii w watogodzinach i włączyć sprężarkową pompę ciepła.

E) W równych odstępach czasu zapisywać aktualne wskazania miernika energii oraz wszystkich termometrów. Liczbę pomiarów oraz długość odstępu czasowego ustalić z obsługą laboratorium.

Uwaga: wodę w obu zbiornikach warto co jakiś czas przemieszać szklaną pałeczką („bagietką”) w celu wyrównania temperatur w różnych częściach każdego ze zbiorników.

F) Po zakończeniu pomiarów wyłączyć pompę ciepła i miernik energii.

Uwaga: wyłączenie pompy może również nastąpić samoczynnie, gdyż posiada ona system automatycznego wyłączania w momencie przekroczenia maksymalnego ciśnienia czynnika roboczego. Po automatycznym wyłączeniu nie włączać pompy ponownie!

G) Wykonać wykres zmian w czasie wszystkich zmierzonych temperatur. Czy mają one kształt linii prostej? O czym może świadczyć kształt wykresów?

H) Czy temperatura wody chłodzonej spada do zera stopni Celsjusza? Czy temperatura czynnika roboczego zmienia się zgodnie z przewidywaniami? O czym mogą świadczyć ewentualne nieoczekiwane zmiany temperatury czynnika roboczego?

I) Na podstawie wykresów wybrać chwilę końcową, dla której należy obliczyć zmiany temperatur wody chłodzonej i wody ogrzewanej od początku pomiaru. Następnie na podstawie tych zmian oraz znanych mas wody chłodzonej i ogrzewanej oraz ciepła właściwego wody obliczyć ilość ciepła odebranego Q_{we} i oddanego Q_{wy} przez pompę ciepła.

J) Uwzględniając odpowiednie jednostki obliczyć na podstawie wzorów (1), (2) i (3) sprawność i wydajności pompy ciepła. Czy ich wartości są zgodne z oczekiwaniami?

K) Oszacować niepewności pomiarowe zmierzonych i obliczonych wielkości. Czy znajomość tych niepewności wpływa na wnioski?

L) Po zakończonym ćwiczeniu w porozumieniu z obsługą laboratorium opróżnić zbiorniki na wodę.