

Ćwiczenie G2: Wyznaczanie sprawności cieplnej grzałki elektrycznej i pompy ciepła

Grzałka elektryczna

1. Wprowadzenie teoretyczne

Podtrzymywanie stałego natężenia prądu i stałego napięcia na końcach przewodnika, przez który płynie prąd, wymaga stałego dopływu energii. Energia ta zużywana jest na ciągłe odnawianie pola elektrycznego. Jeżeli weźmiemy pod uwagę przewodnik, pomiędzy którego końcami panuje napięcie U , a przez przewodnik w ciągu pewnego czasu t przepływnie ładunek q , to pole elektryczne przesuwał ten ładunek wykona pracę:

$$W = q \cdot U \quad (1)$$

Praca ta jest dostarczana z zewnątrz (ze źródła prądu) i zostaje zamieniona na ciepło lub wykorzystana jako praca mechaniczna.

Ilość ciepła Q wydzielającego się w czasie w tej przemianie określa prawo Joulea:

$$Q = U \cdot I \cdot t \quad (2)$$

gdzie: $q = I \cdot t$,

I – natężenie prądu,

t – czas jego przepływu.

Uformowaną w postaci spirali grzewczej grzałkę wprowadzamy do naczynia z wodą. Ciepło otrzymane w wyniku zamiany energii elektrycznej, grzałka oddaje wodzie. Część ciepła pobierana jest przez naczynię, która z kolei oddaje pewną ilość tej energii do otoczenia. Ilość ciepła pobrana przez wodę Q , jest więc mniejsza od ciepła Q_p wydzielanego przez prąd. Stosunek:

$$\eta = \frac{Q}{Q_p} \quad (3)$$

nazywamy sprawnością grzałki (często nazywana wydajnością).

Sprawność można łatwo wyznaczyć poprzez ogrzewanie wody w naczyniu od temperatury pokojowej do temperatury wrzenia. Jeżeli ogrzejemy masę m_w wody o temperaturze pokojowej t_0 do temperatury końcowej t , to woda pobierze ciepło Q opisane równaniem:

$$Q = m_w c_w (t - t_0) \quad (4)$$

gdzie: c_w – ciepło właściwe wody.

Z równania (2) znajdujemy ilość ciepła Joulea Q_p , wydzielonego w grzejniku, a następnie mając zmierzoną ilość ciepła Q pobranego przez wodę, można na podstawie równania (3) wyliczyć sprawność cieplną η grzejnika:

$$\eta = \frac{Q}{Q_p} = \frac{m_w c_w (t - t_0)}{UIt} \quad (5)$$

Jeżeli sprawność chcemy wyrazić w procentach, wówczas:

$$\eta = \frac{m_w c_w (t - t_0)}{UIt} \cdot 100\% \quad (6)$$

II. Zasada pomiaru

Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

Licznik energii elektrycznej (wydzielanego ciepła w układzie grzałki zanurzonej w zbiorniku z wodą) mierzy wartość energii E_w dostarczonej do układu. Energia elektryczna zamieniana jest na ciepło w grzejniku elektrycznym, który ogrzewa wodę o znanej masie m_w w naczyniu. Pomiaru temperatury wody dokonujemy za pomocą termopary umieszczonej w naczyniu z wodą. Znając temperaturę końcową t_k ogrzanej wody, temperaturę początkową t_p oraz masę wody m_w w naczyniu, to ciepło Q pobrane przez wodę liczymy ze wzoru:

$$Q = m_w c_w (t_k - t_p)$$

gdzie: $c_w = 4190 \text{ J/kg K}$, jest to ciepło właściwe wody.

Aby otrzymać sprawność grzałki w postaci bezwymiarowej, należy energię dostarczoną do układu pomiarowego wyrazić w dżulach (licznik energii podaje energię w kWh).

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ W} \cdot 3,6 \cdot 10^3 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

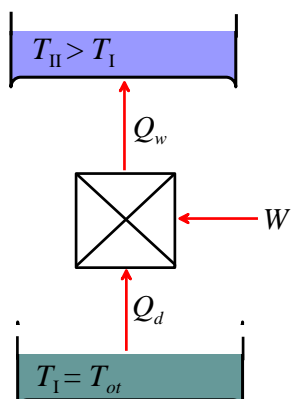
Wyrażenie na sprawność grzałki przyjmie postać:

$$\eta_{\%} = \frac{m_w c_w (t_k - t_p)}{(W_k - W_p)} \cdot 100$$

Pompa ciepła

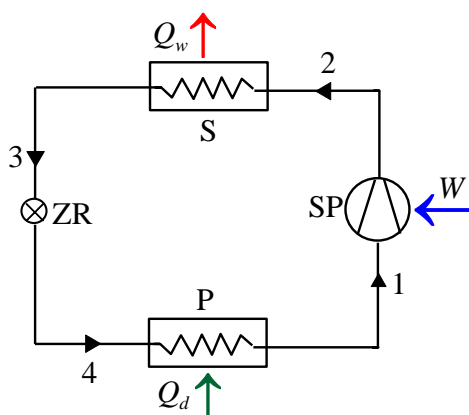
1. Cel ćwiczenia

- Poznanie zasady działania pompy ciepła
- Pomiar efektywności pompy ciepła i zbadanie jej zależności od temperatury dolnego źródła ciepła. Dolnym źródłem ciepła (czyli źródłem o niższej temperaturze) będą kolejno: zbiornik wody, strumień chłodnego powietrza, strumień ciepłego powietrza.
- Wyznaczenie wartości entalpii parowania czynnika roboczego R134a



Rys. 1

Zasada działania pompy ciepła



Rys. 2

Schemat budowy sprężarkowej pompy ciepła (P – parowacz, SP – sprężarka, S – skraplacz, ZR – zawór rozprężny)

pompy ciepła przedstawiona jest schematycznie na rysunkach 1 i 2. Jak widać na rysunkach, równanie bilansu energii dla pompy ciepła można zapisać w postaci

$$Q_d + W = |Q_w| \quad (1)$$

2. Zakres wymaganych wiadomości

Układ termodynamiczny, układ zamknięty, przemiana termodynamiczna, przemiany odwracalne i nieodwracalne, przemiana izotermiczna, przemiana izobaryczna, przemiana adiabatyczna, przemiana izentalpowa, zjawisko Joule’a-Thomsona, przemiana cykliczna, obieg prawo- i lewobieżny, obieg sprężarkowej pompy ciepła, parowanie i skraplanie, entropia, pierwsza i druga zasada termodynamiki, zasada działania i zastosowanie pompy ciepła, współczynnik efektywności pompy ciepła.

3. Wprowadzenie

3.1. Wiadomości wstępne

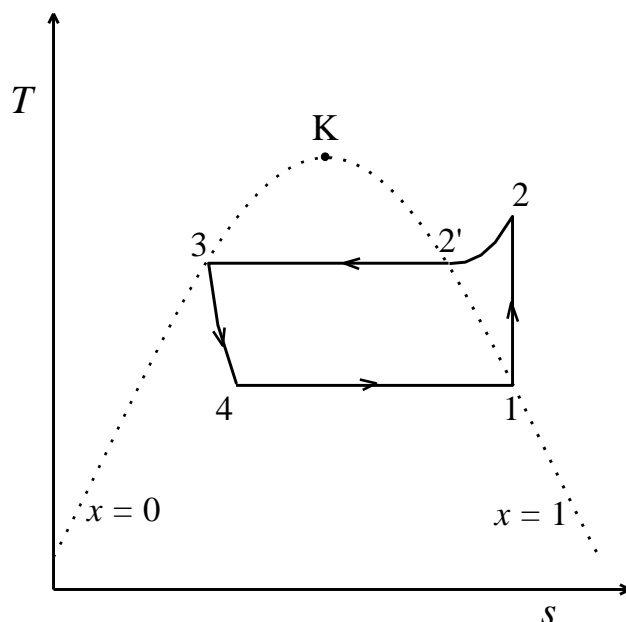
W otoczeniu, np. w powietrzu, wodzie, gruncie czy ściekach, zawarte są ogromne ilości energii, która najczęściej jest bezużyteczna. Jednym z niewielu urządzeń umożliwiających wykorzystanie tego rodzaju niskotemperaturowych źródeł energii jest **pompa ciepła**. Pompa ciepła pobiera ciepło Q_d ze źródła dolnego o temperaturze T_l , a następnie oddaje ciepło Q_w do źródła górnego o temperaturze wyższej $T_{II} > T_I$. Proces ten wymaga doprowadzenia energii z zewnątrz. Idea działania

Podstawowym zadaniem pomp ciepła jest dostarczanie ciepła Q_w do ogrzewania pomieszczeń oraz przygotowywania ciepłej wody użytkowej. Jak widać z równania (1) ilość uzyskiwanego użytecznego ciepła jest zawsze większa od energii napędzającej urządzenie W .

Na podobnej zasadzie co pompy ciepła, lecz w innym zakresie temperatur, działają także urządzenia chłodzące, używane np. w chłodnictwie i klimatyzacji, w tym wypadku efektem użytecznym jest odbieranie ciepła Q_d ze źródła dolnego. Pompa ciepła może skojarzyć obydwa te zadania, wykorzystując zarówno moc chłodzenia, jak i moc grzania. Ciekawym przykładem takiego zastosowania pompy ciepła jest mleczarnia, w której to samo urządzenie jest wykorzystywane równocześnie do chłodzenia mleka oraz ogrzewania pomieszczeń i wody użytkowej.

3.2. Zasada działania sprężarkowej pompy ciepła

Obecnie najczęściej stosowanymi pompami ciepła są sprężarkowe pompy ciepła napędzane energią elektryczną. Sprężarkowa pompa ciepła działa podobnie jak klasyczna chłodziarka. Jej podstawowymi elementami są: sprężarka (SP), skraplacz (S), zawór rozprężny (ZR) oraz parowacz (P) (rys. 2). Pompa ciepła jest urządzeniem, w którym krąży czynnik roboczy podlegający cyklowi przemian tworzących zamknięty obieg lewobieżny. Czynnik roboczy to substancja, która krążąc w obiegu urządzenia pośredniczy w przekazywaniu ciepła. Obecnie w pompach ciepła małej i średniej mocy jako czynników roboczych używa się zwykle nowych związków typu HFC, zbliżonych do freonów, ale niezawierających chloru i bromu.



Rys. 3 Typowy uproszczony obieg sprężarkowej pompy ciepła we współrzędnych T - s (obieg Lindego).

Linia przerywaną zaznaczono krzywe graniczne ($x = 0$ i $x = 1$, gdzie x jest stopniem suchości pary nasyconej mokrej) dla czynnika roboczego. Spotykają się one w punkcie krytycznym K . Pomiedzy krzywymi granicznymi zawarty jest obszar pary nasyconej mokrej (mieszanka dwufazowa). Punkty położone na prawo od krzywej $x = 1$ odpowiadają stanom pary przegrzanej, zaś obszar położony na lewo od krzywej $x = 0$ to obszar cieczy.

Uproszczony przebieg przemian termodynamicznych czynnika roboczego zachodzących w jednym cyklu pracy sprężarkowej pompy ciepła przedstawiony został we współrzędnych T - s (temperatura – entropia) na rysunku 3. Na realizację pełnego cyklu składają się następujące przemiany:

- 1-2 sprężanie izentropowe pary (przemiana adiabatyczna odwracalna)

- 2-2' chłodzenie izobaryczne pary
- 2'-3 skraplanie izotermiczno-izobaryczne
- 3-4 rozprężanie izentalpowe
- 4-1 parowanie izotermiczno-izobaryczne

Przemiana 1-2 realizowana jest w sprężarce, przemiany 2-2'-3 zachodzą w skraplaczu, przemiana 3-4 przebiega w zaworze rozprężnym, zaś przemiany 4-1 w parowaczu.

W obiegu uproszczonym pominięte zostały m.in. straty ciepła do otoczenia oraz spadki ciśnienia związane z oporami przepływu czynnika.

3.3. Efektywność pompy ciepła

Efektywność działania pompy ciepła określa **współczynnik wydajności**, zwany też **wskaźnikiem efektywności energetycznej**, zdefiniowany jako stosunek użytecznych efektów energetycznych do energii napędowej urządzenia. W przypadku, gdy efektem użytecznym jest wyłącznie ciepło oddane do środowiska ogrzewanego wskaźnik efektywności obliczamy ze wzoru

$$\varepsilon = \frac{|Q_w|}{W} \quad (2)$$

Po uwzględnieniu równania bilansu energii (1) otrzymujemy

$$\varepsilon = \frac{|Q_w|}{|Q_w| - Q_d} \quad (3)$$

Jak widać z powyższego wzoru, współczynnik wydajności pompy ciepła jest zawsze większy od 1, co świadczy o tym, że jest to urządzenie znacznie bardziej efektywne od jakiegokolwiek grzejnika elektrycznego, w którym następuje zamiana zużywanej energii elektrycznej na ciepło.

Doskonałość obiegu urządzenia rzeczywistego oceniamy przez porównanie jego współczynnika wydajności z maksymalną wydajnością określoną przez II zasadę termodynamiki. Obliczymy teraz maksymalną sprawność pompy ciepła działającej pomiędzy źródłami ciepła o temperaturach T_I i T_{II} . Jest to sprawność lewobieżnego obiegu Carnota składającego się z dwóch odwracalnych przemian izotermicznych i dwóch adiabatycznych.

Zgodnie z II zasadą termodynamiki, **suma przyrostów entropii wszystkich ciał uczestniczących w dowolnym procesie musi być nieujemna. Suma przyrostów entropii wszystkich ciał uczestniczących w przemianie odwracalnej (idealnej) jest równa 0, natomiast w każdej rzeczywistej przemianie nieodwracalnej jest zawsze dodatnia.** Obliczymy przyrosty entropii dla jednego pełnego cyklu pracy **idealnej** pompy ciepła, działającej zgodnie z obiegiem **odwracalnym**.

- Przyrost entropii czynnika roboczego: $\Delta S_1=0$ (bo po wykonaniu pełnego cyklu przemian czynnik wraca do stanu początkowego, a więc entropia w stanie końcowym jest taka sama jak w stanie początkowym)
- Przyrost entropii dolnego źródła ciepła o temperaturze T_I : $\Delta S_2 = -Q_d / T_I$
- Przyrost entropii górnego źródła ciepła o temperaturze T_{II} : $\Delta S_3 = |Q_w| / T_{II}$

Suma przyrostów entropii wszystkich ciał uczestniczących w procesie:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 = -Q_d / T_I + |Q_w| / T_{II} = 0$$

A więc dla obiegu idealnego spełniona jest równość:

$$\begin{aligned} Q_d / T_I &= |Q_w| / T_{II} \\ Q_d / |Q_w| &= T_I / T_{II} \end{aligned} \quad (4)$$

Ze wzoru (3) wynika

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{|Q_w| - Q_d}{Q_w} = 1 - \frac{Q_d}{|Q_w|} \quad (5)$$

Po podstawieniu równania (4) do (5) otrzymujemy

$$\frac{1}{\varepsilon_{\max}} = 1 - \frac{T_I}{T_{II}} = \frac{T_{II} - T_I}{T_{II}}$$

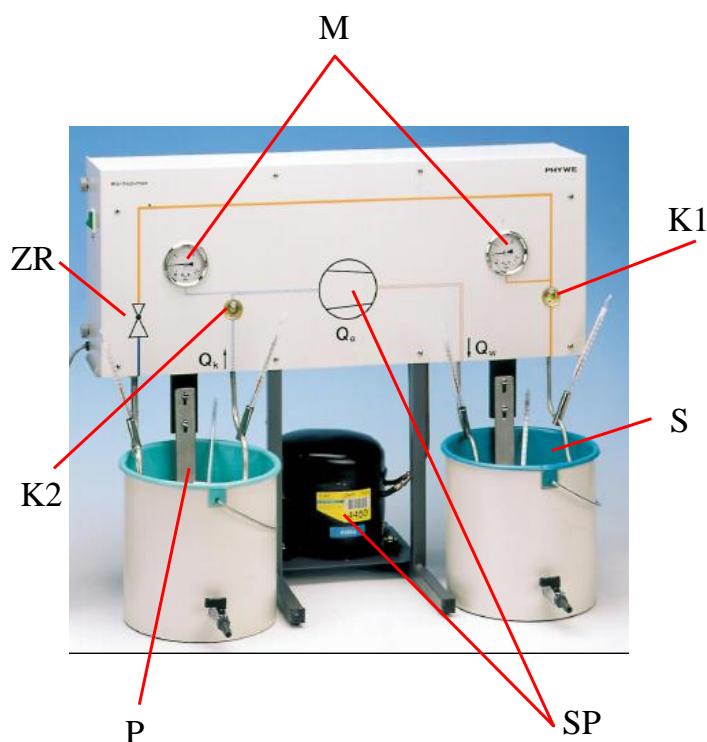
Zatem sprawność idealnej pompy ciepła, działającej w sposób odwracalny, wynosi:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_{II}}{T_{II} - T_I} \quad (6)$$

Oczywiście sprawność rzeczywistej pompy ciepła nie może przekraczać wartości wynikającej ze wzoru (6).

3.4. Opis działania badanego urządzenia

Elementy badanego układu przedstawione zostały na rysunku 4. W badanym urządzeniu czynnikiem roboczym jest Solkane (R134a), którego właściwości termofizyczne zestawione są w Tabeli 1 na końcu instrukcji.



Rys. 4 Elementy badanej pompy ciepła (P – parowacz, SP – sprężarka, S – skraplacz, K1, K2 – okienka kontrolne, M – manometry, ZR – zawór rozprężny)

Czynnik roboczy w stanie pary nasyconej suchej (stan 1) wpływa do sprężarki SP, gdzie ulega sprężeniu (wzrasta jego ciśnienie i temperatura). Dlatego przewód prowadzący do sprężarki przedstawiony jest w formie niebieskich punktów (zimna para), podczas gdy przewód wychodzący ze sprężarki oznaczony jest punktami czerwonymi (ciepła para). Sprężona para (stan 2) ulega ochłodzeniu i skropleniu w skraplaczu S. Procesowi temu towarzyszy oddawanie ciepła Q_w do przestrzeni grzanej. Przeważająca część tej energii uwalniana jest podczas skraplania czynnika, a tylko niewielka jej część

podczas chłodzenia czynnika. W okienku kontrolnym K1 umieszczonym za skraplaczem można zaobserwować czynnik roboczy w postaci płynu, który może zawierać pęcherzyki pary. Przewód wychodzący ze skraplacza oznaczony jest ciągłą czerwoną linią (ciepła ciecz). Skropliny w stanie (3) zostają rozprężone w zaworze rozprężnym ZR do stanu (4), w wyniku czego następuje spadek ciśnienia i temperatury czynnika. Następnie czynnik roboczy w postaci mieszaniny dwufazowej para-ciecz (para nasycona mokra) odparowuje w parowaczu P, pobierając przy tym ciepło Q_d , które zostaje zużyte w procesie parowania czynnika. W okienku kontrolnym K2 umieszczonym za parowaczem można zobaczyć przepływający gaz lub parującą ciecz. Para w stanie (1) wpływa ponownie do sprężarki SP, zamykając w ten sposób obieg czynnika.

Manometry M wskazują nadciśnienie czynnika roboczego:

- wychodzącego z parowacza (stan 1)
- wychodzącego ze skraplacza (stan 3)

wyrażone w barach (1 bar = 10^5 Pa).

Temperatura czynnika roboczego może być kontrolowana w 4 punktach pomiarowych:

- przy wejściu do parowacza (stan 4)
- przy wyjściu z parowacza (stan 1)

- przy wejściu do skraplacza (stan 2)
- przy wyjściu ze skraplacza (stan 3)

Pompa ciepła działa w sposób prawidłowy, jeśli temperatura czynnika roboczego w parowaczu jest niższa od temperatury źródła dolnego ($T_4 \leq T_1 < T_1$), zaś temperatura czynnika roboczego w skraplaczu jest wyższa od temperatury źródła górnego ($T_{II} < T_3 \leq T_2$). Jeśli, którykolwiek z powyższych warunków nie jest spełniony, wówczas w części spirali wymiennika ciepła następuje przepływ ciepła w kierunku przeciwnym do zamierzonego. Taki efekt może wystąpić w badanym urządzeniu, ponieważ, w porównaniu z komercyjnymi pompami ciepła, jest ono bardzo proste i nie posiada praktycznie żadnych systemów regulacji, zaś wymiana ciepła w zbiornikach z wodą nie jest dostatecznie intensywna.