

C15

Badanie modelu sprężarkowej pompy ciepła. Wyznaczanie współczynnika wydajności cieplnej

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi pojęciami i prawami termodynamiki, prześledzenie zamkniętego procesu kołowego (cyklu) - na przykładzie modelu sprężarkowej pompy ciepła - i wyznaczenie zależności czasowych temperatur czynnika roboczego na wejściu/wyjściu z parownika i skraplacza oraz wyznaczenie współczynnika wydajności cieplnej (COP- *Coefficient of Performance*) pompy ciepła woda-powietrze pracującej w trybie grzania i/lub pompy ciepła powietrze-powietrze pracującej w trybie chłodzenia.

Zagadnienia do przygotowania:

- zerowa zasada termodynamiki, temperatura
- makroskopowy opis układów fizycznych (elementy teorii kinetyczno-molekularnej)
- gaz doskonały, układ termodynamiczny i otoczenie
- ciepło, praca, energia wewnętrzna, I zasada termodynamiki
- silniki cieplne, II zasada termodynamiki
- sprawność silnika Carnota i silników rzeczywistych
- ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne
- przemiany fazowe, parowanie, wrzenie, skraplanie
- gęstość, ciśnienie, ciśnienie hydrostatyczne - definicje i jednostki, prawo Pascala

W/w zagadnienia należy opracować na podstawie dołączonych materiałów (rozdziały 5 i 6 z podręcznika A. Czerwińska, B. Sagnowska i/lub rozdziały 12-14 z podręcznika J. Orear). Mile widziane, ale nie obowiązkowe, jest korzystanie z podręcznika: D. Haliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, tom 2, §15, 19-21 Wydawnictwo Naukowe PWN W-wa 2003.

1. Omówienie wybranych zagadnień

Makroskopowy opis układów fizycznych

Atom jako całość jest elektrycznie obojętny. Rozmiary liniowe atomów są rzędu $10^{-10} m$, a rozmiary jąder atomowych są 100 000 razy mniejsze. Z tego powodu atomy, których odległości wzajemne są duże (w porównaniu z ich rozmiarami) praktycznie ze sobą nie oddziałują. Przy odległościach wzajemnych rzędu $10^{-9} m$ wypadkowe oddziaływanie między ładunkami atomów prowadzi do występowania wypadkowych sił przyciągających (siły Van der Waalsa) proporcjonalnych do siódmej potęgi odwrotności odległości międzyatomowych. Przy odległościach międzyatomowych rzędu $10^{-10} m$ (tj. tego samego rzędu co rozmiary atomu) chmury elektronowe atomów zaczynają się przekrywać, oddziaływanie zaczyna silnie zależeć od tego z jakimi atomami mamy do czynienia, mogą tworzyć się (lub nie) wiązania chemiczne.

Tutaj interesować się będziemy tylko oddziaływaniami między takimi atomami i cząsteczkami, między którymi nie zachodzą dalsze reakcje chemiczne, a terminu cząsteczka będziemy używać również w odniesieniu do atomu (jako cząsteczki jednoatomowej). Przy tych założeniach cechą wspólną wszystkich oddziaływań międzycząsteczkowych jest przewaga sił przyciągania przy większych odległościach międzycząsteczkowych i sił odpychania przy bardzo małych odległościach międzycząsteczkowych.

Stan fizyczny dużego układu cząsteczek jaki stanowi np. porcja gazu lub cieczy w naczyniu opisujemy będącym podając tzw. parametry stanu tj. wielkości charakteryzujące makroskopowe własności układu (objętość, gęstość, temperatura, energia wewnętrzna, ciśnienie). Stan układu, w którym wszystkie parametry stanu mają wartości stałe, niezależne od czasu, nazywamy stanem równowagi. Interesować się będziemy układami w stanie równowagi lub układami bardzo bliskimi stanowi równowagi.

Silnik Carnota

Silnik Carnota pracuje między dwoma zbiornikami ciepła o temperaturach T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$). W normalnym cyklu Carnota silnik pobiera ciepło Q_1 ze zbiornika o temperaturze wyższej i oddaje ciepło Q_2 do zbiornika o temperaturze niższej. W każdym cyklu silnik ten wykonuje pracę $W = Q_1 - Q_2$. Jego sprawność wynosi:

$$\eta = W/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1. \quad (1)$$

Jest to największa teoretycznie możliwa sprawność silnika cieplnego.

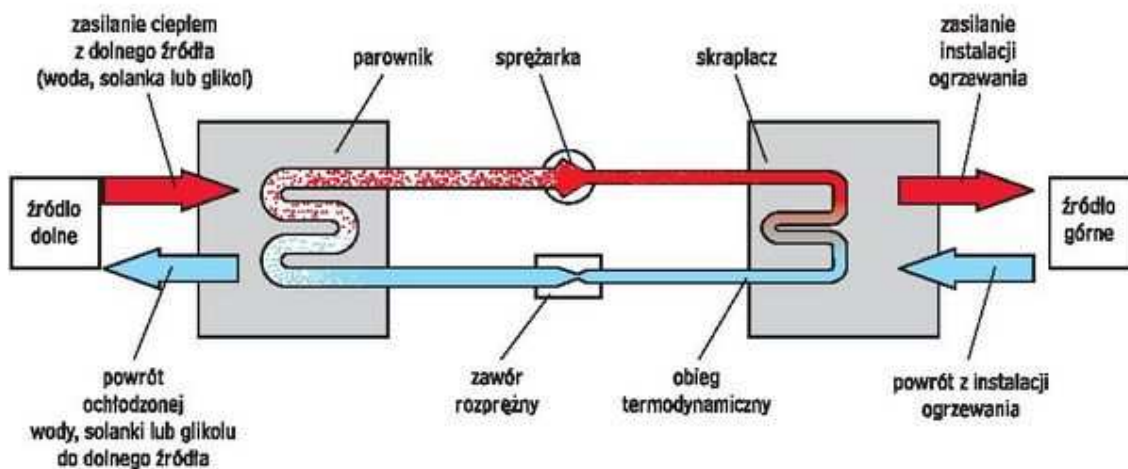
Cykl Carnota może również przebiegać w odwrotnym kierunku. Wtedy ciepło Q_2 pobierane jest ze zbiornika o niższej temperaturze, a do zbiornika o wyższej temperaturze oddawane jest ciepło Q_1 . Stosunek

$$\varepsilon = Q_2/W = T_2/(T_1 - T_2) \quad (2)$$

nazywany skutecznością chłodzenia. Jest ona tym większa im mniejsza jest różnica temperatur obu zbiorników.

Pompa ciepła

Pompa ciepła jest urządzeniem, w którym krąży czynnik roboczy, podlegający cyklowi przemian termodynamicznych. Czynnik roboczy jest to substancja, która krążąc w obiegu zamkniętym pośredniczy w przekazywaniu ciepła. Pompa ciepła pozwala na wykorzystanie energii cieplnej ze źródeł niskotemperaturowych (grunt, ścieki, woda, powietrze). Ciepło Q_d pobierane jest ze źródła dolnego o temperaturze T_d , natomiast do źródła górnego o temperaturze T_g ($T_g > T_d$) oddawane jest ciepło Q_u (ciepło użytkowe), co wymaga doprowadzenia z zewnątrz energii W (np. napędzającej sprężarkę). Źródłem dolnym (zbiornikiem o niższej temperaturze) może być np. powietrze na zewnątrz domu, a źródłem górnym (zbiornikiem o wyższej temperaturze) np. zbiornik ogrzewający wodę dla instalacji centralnego ogrzewania.



Rys. 1. Schemat działania sprężarkowej pompy ciepła
 [pompy-ciepla.org/jak_dziala_pompa_ciepla.php; dostęp X 2013].

Podstawowymi elementami sprężarkowej pompy ciepła są: parownik, skraplacz, sprężarka i zawór rozprężny (zawór regulujący). Czynnik roboczy w stanie pary nasyconej suchej sprężany w sprężarce (rośnie jego ciśnienie i temperatura), zostaje ochłodzony i skroplony w skraplaczu (oddaje tu ciepło Q_u ; za skraplaczem czynnik roboczy ma postać płynu, który może zawierać pęcherzyki pary), a następnie rozprężony w zaworze rozprężnym (maleje ciśnienie i temperatura; za zaworem rozprężnym czynnik roboczy jest mieszaniną dwufazową cieczy i pary nasyconej mokrej) i skierowany do parowacza gdzie odparowuje, pobierając ciepło Q_d (za parowaczem można zobaczyć parującą ciecz lub przepływający gaz). Para wychodząca z parowacza kierowana jest do sprężarki- w ten sposób zamyka się obieg czynnika roboczego w sprężarkowej pompie ciepła (Rys. 1).

Pompy ciepła stosowane są obecnie jako urządzenia grzewcze w układach centralnego ogrzewania i ogrzewania podłogowego oraz do przygotowania ciepłej wody użytkowej w domach jednorodzinnych i obiektach użyteczności publicznej (jak np. boiska sportowe, baseny) a także jako urządzenia do klimatyzowania pomieszczeń. Pompy ciepła mogą również wykorzystywać tzw. ciepło odpadowe, znajdując zastosowanie w takich zakładach produkcyjnych, w których zachodzi potrzeba jednoczesnego obsługiwanie procesów chłodniczych i dostarczenia ciepła do ogrzewania (np. młeczarnie, przetwórstwo mięsa, zakłady wydobywcze, oczyszczalnie ścieków).

Efektywność pompy ciepła

Efektywność pompy ciepła określa współczynnik wydajności cieplnej (COP- *Coefficient of Performance*) definiowany jako stosunek wydajności cieplnej pompy ciepła do zużycia energii elektrycznej potrzebnej do jej pracy. W praktyce COP wyznacza się jako stosunek ciepła przekazanego w czasie pomiaru laboratoryjnego (Q) do zużycia energii elektrycznej (W) przez urządzenie w tym pomiarze:

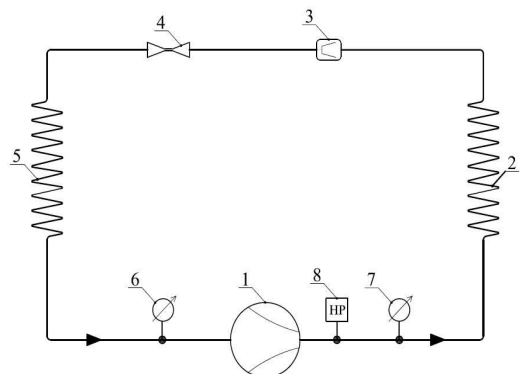
$$COP = \frac{Q}{W}. \quad (3)$$

2. Przebieg pomiarów

Przyrządy i materiały

Model dydaktyczny sprężarkowej pompy ciepła, którego schemat ideowy przedstawiony jest na Rys. 2 (zdjęcie dołączone jest w osobnym pliku: C15_ModelPompyCiepła.pdf). Medium chłodzącym jest tu czynnik żiębiczny R134a, który jest gazem niepalnym, nietoksycznym i nie tworzącym mieszanin wybuchowych. Manometry wskazują ciśnienie czynnika roboczego wychodzącego z parowacza i skraplacza, wyrażone w barach (1 bar= 10^5 Pa). Termometry wskazują temperatury wyrażone w stopniach Celsjusza.

1. Sprężarka
2. Skraplacz
3. Filtr czynnika chłodzącego
4. Element dławiący (kapilara)
5. Parowacz
6. Manometr niskiego ciśnienia
7. Manometr wysokiego ciśnienia
8. Presostat zabezpieczający wysokiego ciśnienia



Rys. 2. Schemat ideowy sprężarkowej pompy ciepła [www.mgs-nauka.com; dostęp X 2013].

W skład zestawu eksperymentalnego wchodzi ponadto: stoper, dodatkowy termometr, pojemnik na wodę ogrzewaną ($V > 8 \text{ l}$).

2.1. Badanie pracy pompy ciepła w trybie grzania

Przygotować pompę do pracy w trybie grzania, jako pompę ogrzewającą wodę w zbiorniku użytkowym (*uwagi: zdjąć wentylator umieszczony nad wymiennikiem ciepła (5), wyznaczyć masę wody (7 kg) przed waniem jej do naczynia, wymiennik całkowicie zanurzyć w naczyniu z wodą (tj. zanurzone powinny być wszystkie zwoje), dodatkowy termometr przygotować do pomiaru temperatury w tym naczyniu.*). Zgodnie z instrukcją znajdującą się przy ćwiczeniu włączyć model pompy ciepła, ustawić temperaturę maksymalną i minimalną zbiornika użytkowego, wyzerować licznik energii elektrycznej, odczytać wartość początkową temperatury wody w zbiorniku użytkowym oraz wartości temperatur czynnika roboczego na wejściu/wyjściu z parownika i skraplacza oraz wskazania obu manometrów. Sprawdzić czy temperatury obu wymienników są zbliżone i czy przełącznik trybów pracy jest w położeniu *grzanie*. Uruchomić pompę ciepła.

Gdy pompa ciepła pracuje w trybie grzania czynnik chłodniczy zostaje sprężony w sprężarce (1) a następnie pod wysokim ciśnieniem, przez zawór rewersyjny, kierowany do wymiennika (5), gdzie zostaje skroplony w temperaturze otoczenia. Podczas skraplania do otoczenia wydzielane jest ciepło. Ciecz (skropliny) z wymiennika (5) przechodzi przez element rozprężny, gdzie jej ciśnienie zostaje obniżone do ciśnienia parowania, i trafia do wymiennika (2), w którym wrze i paruje pobierając ciepło z otoczenia. Powstała para jest zasysana i sprężana przez sprężarkę, zamykając cykl.

W czasie pracy pompy ciepła należy co $(60 \pm 10) \text{ s}$ notować wskazania licznika energii elektrycznej, wszystkich termometrów i manometrów, mieszając ciągle wodę w zbiorniku użytkowym aż do osiągnięcia temperatury końcowej. W ciągu następnych 3-5 min należy kontynuować zapisywanie odczytów, a następnie wyłączyć pompę.

2.2. Badanie pracy pompy ciepła w trybie chłodzenia

Przygotować pompę do pracy w trybie chłodzenia jako pompę typu powietrze-powietrze (usunąć zbiornik/zbiorniki z wodą, osuszyć wymienniki i założyć na nie wentylatorki), na zbiornik, którego temperaturę będziemy obniżać nałożyć styropianową osłonę. Zgodnie z instrukcją znajdującą się przy ćwiczeniu włączyć model pompy ciepła, ustawić temperaturę maksymalną i minimalną wymiennika, wyzerować licznik energii elektrycznej, odczytać wskazania wszystkich mierników. Sprawdzić czy temperatury obu wymienników są zbliżone i czy przełącznik trybów pracy jest w położeniu *chłodzenie*. Uruchomić pompę ciepła.

Gdy pompa ciepła pracuje w trybie chłodzenia czynnik chłodniczy zostaje sprężony w sprężarce (1) a następnie pod wysokim ciśnieniem, przez zawór rewersyjny, kierowany do wymiennika (2), gdzie zostaje skroplony w temperaturze otoczenia. Podczas skraplania do otoczenia wydzielane jest ciepło. Ciecz (skropliny) z wymiennika (2) przechodzi przez element rozprężny (tu jej ciśnienie zostaje obniżone do ciśnienia parowania) i trafia do wymiennika (5), gdzie wrze i paruje pobierając ciepło z otoczenia. Powstająca para jest zasysana i sprężana przez sprężarkę zamykając cykl.

W czasie pracy pompy ciepła (aż do osiągnięcia temperatury końcowej) należy co $(60 \pm 10) \text{ s}$ notować wskazania licznika energii elektrycznej, wszystkich termometrów i manometrów. W ciągu następnych 3-5 min należy kontynuować zapisywanie odczytów, a następnie wyłączyć pompę.

3. Wskazówki do opracowania wyników

W jednym układzie współrzędnych należy sporządzić wykresy zależności temperatury obu źródeł ciepła oraz czynnika roboczego na wejściu/wyjściu z parownika i skraplacza od czasu. Na kolejnym wykresie przedstawić zależność czasową ciśnienia czynnika roboczego w obu punktach pomiarowych. Wykresy warto sporządzić jeden pod drugim, tak żeby można było śledzić zmiany w/w parametrów pracy pompy w funkcji czasu. Przedyskutować uzyskane wyniki, zwracając uwagę na to czy efektywność działania badanego modelu pompy ciepła zależy od temperatur górnego i dolnego źródła ciepła (jeżeli tak to jak; jeżeli nie to jakie mogą być tego powody) i czy jest mała czy duża w porównaniu do efektywności silnika Carnota.