



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt „Plan rozwoju Politechniki Częstochowskiej”
współfinansowany ze środków UNII EUROPEJSKIEJ w ramach EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU SPOŁECZNEGO
Numer Projektu: POKL.04.01.01-00-59/08

KATEDRA FIZYKI
WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

**POLI
TECH
NIKA** Politechnika
Częstochowska

LABORATORIUM Z FIZYKI TECHNICZNEJ

ĆWICZENIE NR 7

WYZNACZANIE SPRAWNOŚCI POMPY CIEPŁA



Politechnika Częstochowska, Centrum Promocji i Zastosowań Nauk Ścisłych
ul. Dąbrowskiego 73 pok. 178, 42-200 Częstochowa
tel./ fax. +343250324, e-mail: imi@imi.pcz.pl, <http://www.cns.pcz.pl>

1. Zagadnienia do przystudiowania

Układ termodynamiczny, układ zamknięty, przemiana termodynamiczne odwracalne i nieodwracalne, przemiany gazowe: izotermiczna, izobaryczna, adiabatyczna, izentalpowa, zjawisko Joule'a-Thomsona, przemiany cykliczne, obieg sprężarkowej pompy ciepła, parowanie i skraplanie, entropia, pierwsza i druga zasada termodynamiki, zasada działania i zastosowanie pompy ciepła, współczynnik efektywności pompy ciepła.

2. Cel ćwiczenia

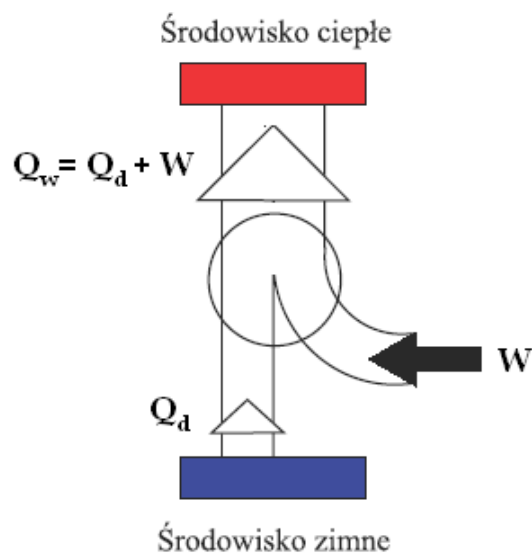
Celem ćwiczenia jest badanie pompy ciepła w następujących warunkach pracy:

— woda - woda, tj. parownik (dolne źródło ciepła) oraz skraplacz (górne źródło ciepła) zanurzone w wodzie;

— powietrze - woda, tj. parownik otoczony powietrzem atmosferycznym (strumień powietrza chłodnego, strumień powietrza ciepłego, bez strumienia), skraplacz zanurzony w wodzie. Na podstawie parametrów kąpieli w układzie woda - woda — obliczenie ilości pobranej i oddanej energii. Na podstawie pomiarów w układzie powietrze - woda — wyznaczenie współczynnika efektywności przy różnych temperaturach parownika.

3. Wprowadzenie teoretyczne

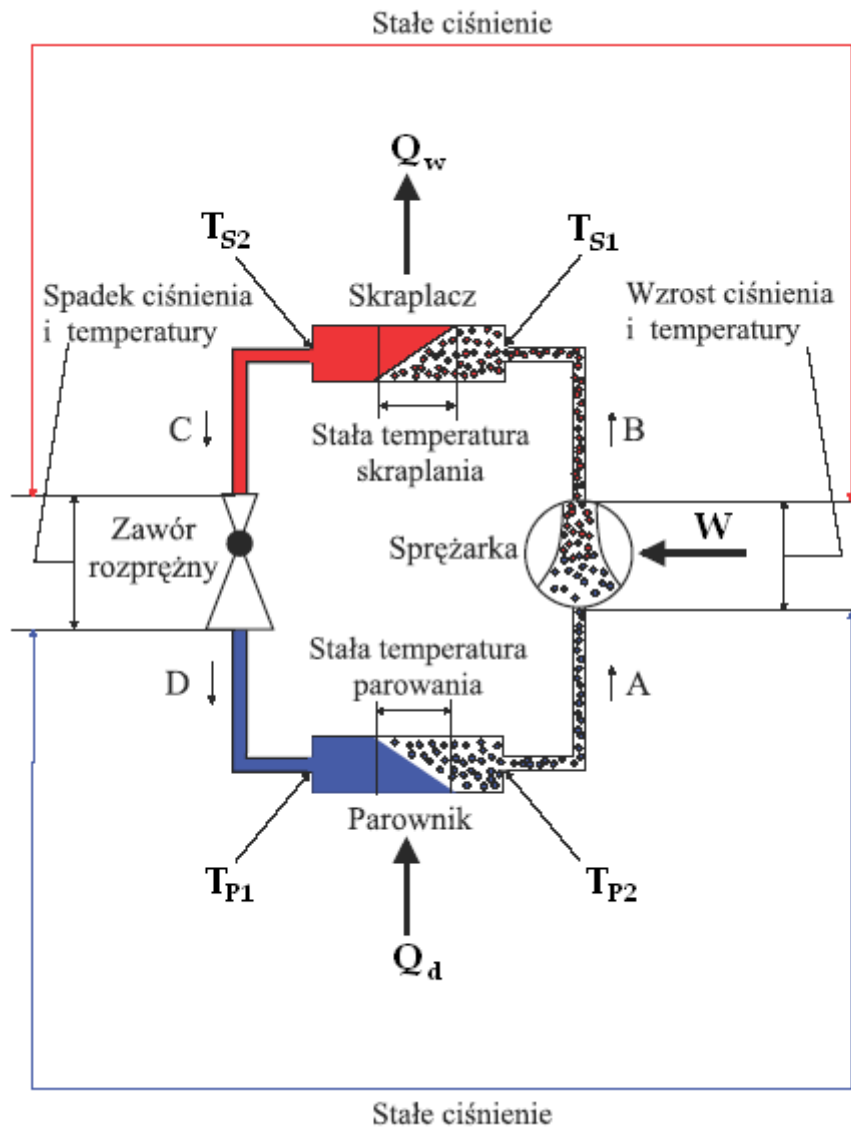
Zadaniem pompy ciepła jest pobieranie energii cieplnej ze środowiska o niskiej temperaturze i przekazywanie jej do środowiska o temperaturze wyższej. Dzięki dużej pojemności cieplnej środowiska niskotemperaturowego (np. otoczenia budynku: wody, gruntu, powietrza), praktycznie nie następuje jego wychłodzenie. Pojemność cieplna środowiska wysokotemperaturowego (np. budynku lub pomieszczenia) jest relatywnie mała, w związku z czym przekazana energia wystarcza do jego ogrzania. Jak wynika z II zasady termodynamiki, operacja ta wymaga wykonania pewnej pracy. W przypadku pompy użytej w ćwiczeniu, pracę tę wykonuje elektryczna sprężarka (rys. 1). Działanie sprężarkowej pompy ciepła ilustruje rysunek 2. Jednoskładnikowa para czynnika roboczego zostaje sprężona



Rysunek 1. Praca sprężarkowej pompy ciepła: Q_d — ciepło pobrane ze środowiska zimnego, Q_w — ciepło dostarczone do środowiska ciepłego, W — praca sprężarki

za pomocą sprężarki i w stanie (B) trafia do skraplacza, gdzie ulega skropleniu przy stałym ciśnieniu i temperaturze. W trakcie kondensacji w skraplaczu wydziela się ciepło, dostarczane

do tzw. górnego źródła ciepła. Po opuszczeniu skraplacza, czynnik w stanie (C) trafia do zaopatrzonego w termostat zawór rozprężny, w którym zostaje rozprężony od ciśnienia skraplania do ciśnienia parowania, osiągając stan (D). Znajdująca się w stanie (D) mieszanina para - ciecz trafia do parownika, gdzie następuje jej odparowanie. W trakcie odparowania, w warunkach izobaryczno - izotermicznych, czynnik pobiera ciepło ze źródła niskotemperaturowego (tzw. dolnego źródła ciepła). Po opuszczeniu parownika, w postaci pary o stanie (A), czynnik trafia ponownie do sprężarki.

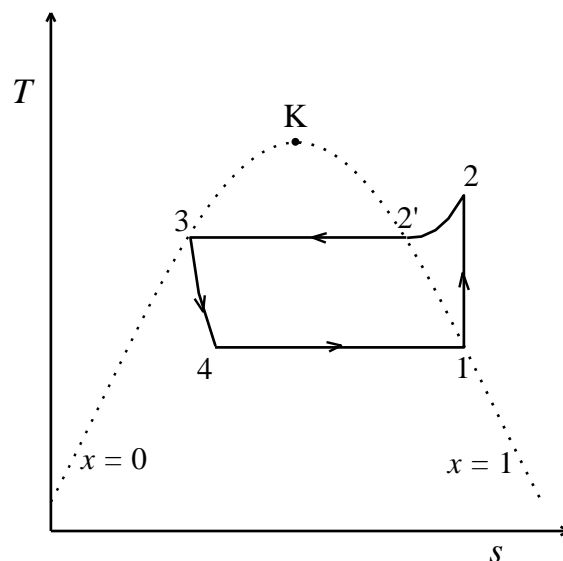


Rysunek 2. Schemat ideowy sprężarkowej pompy ciepła

Uproszczony przebieg przemian termodynamicznych czynnika roboczego zachodzących w jednym cyklu pracy sprężarkowej pompy ciepła przedstawiony został we współrzędnych $T-S$ (temperatura - entropia właściwa) 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.



Rysunek 3. Typowy uproszczony obieg sprężarkowej pompy ciepła we współrzędnych T-S (obieg Lindego). Linią 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. Pomiędzy krzywymi granicznymi zawarty jest obszar pary nasyconej mokrej (mieszanina dwufazowa ciecz + para). Punkty położone na prawo od krzywej $x = 1$ odpowiadają stanom pary przegrzanej, zaś obszar położony na lewo od krzywej $x = 0$ to obszar cieczy.

3. Efektywność pompy ciepła

Efektywność działania pompy ciepła określa współczynnik wydajności ε , zwany też wskaźnikiem efektywności energetycznej, lub sprawnością energetyczną, 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

$$\varepsilon = \frac{|Q_w|}{|W|} \quad (1)$$

Po uwzględnieniu równania bilansu energii (1) otrzymujemy

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

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:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 = -Q_d / T_I + |Q_w| / T_{II} = 0 \quad (3)$$

A więc dla obiegu idealnego spełniona jest równość:

$$Q_d / T_I = |Q_w| / T_{II},$$

stąd

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

Ze wzoru (3) wynika, że

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

Po podstawieniu równania (4) do równania (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:

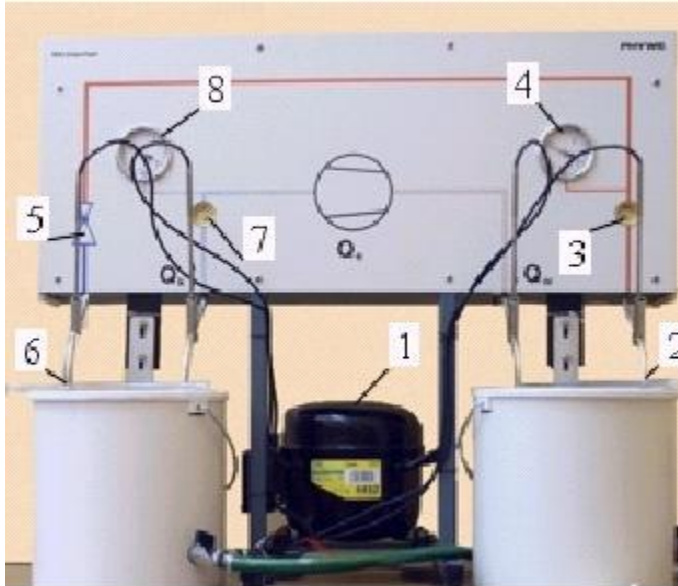
$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_{II}}{T_{II} - T_I} \quad (6)$$

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

4. Zestaw pomiarowy

Schemat ideowy aparatury pomiarowej odpowiada schematowi z rys. 2. W zależności od wariantu pomiarów, dolnym źródłem ciepła jest woda lub powietrze atmosferyczne. Źródłem górnym jest zawsze woda. Widok aparatury używanej w doświadczeniu przedstawia rys. 4. Pompa ciepła zasilana z sieci energii elektrycznej. Temperatury na wejściach i wyjściach parownika i skraplacza mierzone są za pomocą czterech termometrów. Parownik i skraplacz mają postać spiral, umieszczonych w pojemnikach o izolowanych termicznie bocznych ściankach, zaopatrzonych w krany spustowe. Temperatury wody w obu pojemnikach mierzone są za pomocą dodatkowych termometrów.

Badana pompa jest symetryczną pompą kompresorową. Zastosowano w niej czynnik roboczy typu R134a (czterofluoroetan CH_2FCF_3). Konstrukcja pompy umożliwia wygodną obserwację zachodzących w niej procesów. W tym celu niektóre podzespoły pompy umieszczono na przedniej ścianie obudowy, zaopatrzonej w schemat ideowy, którego fragmenty oznaczono różnymi kolorami. Na rysunku 4 przedstawiono widok pompy wraz z zaznaczonymi poszczególnymi podzespołami.



Rys. 4 Pompa ciepła wraz z zaznaczonymi elementami wyposażenia. 1-kompresor, 2-skraplacz, 3,7- wziernik (okienko kontrolne), 4,8 manometr, 5-zawór rozprężny, 6-parowacz

1. Jak wspomniano we wstępie, kompresor (1), sprężając czynnik roboczy kosztem energii elektrycznej W , powoduje — oprócz wzrostu ciśnienia — również wzrost jego temperatury. Z tego względu linia prowadząca do sprężarki oznaczona jest kropkami w kolorze niebieskim (chłodny gaz), podczas gdy linia wychodząca ze sprężarki — kropkami w kolorze czerwonym (ciepły gaz).
2. W skraplaczu (2) czynnik roboczy przekazuje energię cieplną Q_w do górnego źródła pompy. W czasie tego procesu dominująca część energii Q_w wydziela się poprzez skroplenie czynnika roboczego (jedynie niewielka jej część wydziela się poprzez chłodzenie czynnika). Z tego względu linia wychodząca ze skraplacza oznaczona jest jednolitym kolorem czerwonym (ciepła ciecz). Na wejściu i wyjściu skraplacza umieszczone są gniazda, umożliwiające wygodny pomiar temperatury czynnika.
3. Wziernik (3) umożliwia obserwację stanu czynnika roboczego po opuszczeniu skraplacza. W czasie pracy pompy widoczna jest ciecz z nielicznymi pęcherzykami gazu.
4. Manometr (4) mierzy nadciśnienie czynnika roboczego. **Uwaga:** W celu skorzystania z tabeli parametrów czynnika roboczego, do wskazań manometru należy dodać wartość ciśnienia atmosferycznego równą 1 barowi ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$).
5. Zawór rozprężny (5), poprzez obniżenie ciśnienia czynnika, powoduje również spadek jego temperatury. Linia opuszczająca zawór jest więc oznaczona jednolitym kolorem niebieskim (chłodna ciecz).
6. W parowniku (6) czynnik roboczy pobiera energię Q_d z dolnego źródła pompy. Dominująca część tej energii zostaje zużyta na odparowanie czynnika (jedynie niewielka część ciepła podgrzewa czynnik). Na wejściu parownika znajduje się czujnik temperatury

- sprężony z zaworem rozprężnym. Zadaniem czujnika jest takie sterowanie pracą zaworu, aby do sprężarki trafiały wyłącznie pary czynnika roboczego. Na wejściu i wyjściu parownika umieszczone są gniazda, umożliwiające wygodny pomiar temperatury czynnika.
7. Wziernik (7) umożliwia obserwację stanu czynnika roboczego po opuszczeniu parownika. W czasie pracy pompy widoczne są nieliczne pęcherzyki odparowującego czynnika (są zanurzone w dominującej objętości par czynnika).
8. Manometr (8) mierzy nadciśnienie czynnika roboczego po opuszczeniu parownika (patrz uwaga w punkcie 4). W skład zespołu pompy wchodzi również (niewidoczne z zewnątrz) następujące podzespoły:
- zbiorniczek wyrównawczy, zawierający zapas czynnika roboczego w celu uzupełniania ewentualnych strat;
 - osuszacz czynnika roboczego, eliminujący ewentualne resztki pary wodnej;
 - czujnik nadmiernego i niedostatecznego ciśnienia czynnika roboczego, zabezpieczający przed jego nadmiernym przegrzaniem bądź przechłodzeniem.
- Uwaga:** Czujnik ciśnienia może powodować okresowe wyłączenia sprężarki. Jego zadziałanie nie świadczy o nienormalnej pracy pompy.

5. Przebieg ćwiczenia

5.1 Pompa w układzie woda-woda

1. Przygotuj w domu 3 tabele do wpisywania wyników, zgodnie ze wzorem podanym na końcu instrukcji.
2. Przy pomocy konewki napełnić oba zbiorniki jednakową ilością wody wodociągowej do poziomu zaznaczonego na ściankach zbiorników.
Uwaga:
 - spirale wymienników ciepła muszą być całkowicie zanurzone w wodzie;
 - woda w zbiorniku skraplacza (zbiornik prawy) nie może być chłodniejsza niż woda w zbiorniku parownika.
3. Starannie wymieszać wodę w zbiornikach.
4. Zapisz ciśnienie atmosferyczne (odczytać na pracowni mechaniki i ciepła).
5. Umieść termometry (lub czujniki temperatury) w zbiornikach z wodą oraz w 4 punktach pomiarowych na spiralach wymienników ciepła (parownika i skraplacza). Przed umieszczeniem termometrów w punktach pomiarowych na spiralach należy na ich końce nałożyć niewielką ilość pasty przewodzącej ciepło.
6. Dokonać pomiaru następujących wielkości:
 - ciśnienia za skraplaczem p_1 (manometr (4)) oraz ciśnienia za parownikiem p_2 (manometr (8));
 - za pomocą termometrów — temperatury wody w zbiorniku skraplacza T_I oraz temperatury wody w zbiorniku parownika T_{II} ;
 - za pomocą 4 termometrów umieszczonych w uchwytach na spiralach wymienników ciepła — temperatury czynnika chłodzącego na wejściu parownika T_{P1} (termometr 1) oraz na wyjściu parownika T_{P2} (termometr 2), temperatury czynnika chłodzącego na wejściu skraplacza T_{S1} (termometr 3) oraz na wyjściu skraplacza T_{S2} (termometr 4).
7. Włącz zasilanie pompy ciepła (wyłącznik sieciowy znajduje się na lewej ściance urządzenia) oraz stoper.
8. Podczas działania pompy ciepła należy intensywnie mieszać wodę w zbiornikach posługując się prętami szklanymi.

9. Co 2 minuty zapisuj w tabeli wskazania wszystkich termometrów (T_1 , T_2 , T_{S1} , T_{S2} , T_{P1} , T_{P2}) i manometrów (p_1, p_2). Zakończ pomiary po ok. 20 minutach lub w momencie samoczynnego wyłączenia się pompy ciepła (w celu ochrony urządzenia przed przegrzaniem sterownik ciśnienia wyłącza sprężarkę, jeśli nadciśnienie czynnika osiąga wartość 16 bar). Wyłącz pompę ciepła.
10. Otwierając krany spustowe opróżnić zbiorniki wody do oddzielnych konewek. Wodę zimną należy następnie wlać do zbiornika skraplacza, wodę ciepłą — do rezerwuaru parownika. Mieszając wodę w obydwu zbiornikach schłodzić skraplacz i podgrzać parownik (temperatura obu części powinna osiągnąć ok. 20°C). Na zakończenie opróżnić zbiornik parownika. Uwaga: Zbiornik nie opróżnia się całkowicie. Pozostająca ilość wody (ok. 300 cm^3) nie ma jednak istotnego wpływu na wyniki pomiarów w układzie powietrze - woda (zanurzenie spirali parownika jest bardzo małe).

5.2 Pompa w układzie powietrze-woda

1. Umieść suszarkę w statywie. Odległość jej wylotu od spirali parownika powinna wynosić ok. 30 cm. Wylot powinien być skierowany tak, aby strumień powietrza trafiał w środek objętości zbiornika.
2. Sprawdzić ustawienie przełączników suszarki. Jej grzałka **musi być wyłączona** (przełącznik w pozycji oznaczonej niebieskim punktem), przełącznik obrotów silnika ustawiony w pozycji oznaczonej dwiema białymi kropkami.
3. Zmierzyć i zanotować temperaturę wody w zbiorniku.
4. Włączyć suszarkę i po chwili włączyć zasilanie pompy.
5. Co 1 - 2 minuty mierzyć temperaturę T_{P2} (termometr 2) na wyjściu parownika, temperaturę wody T_1 w zbiorniku skraplacza. Pomiar temperatury wody musi być poprzedzony jej dokładnym wymieszaniem. Wraz z upływem czasu powinna się ustabilizować temperatura T_{P2} .
6. Gdy temperatura wody przekroczy 30°C (przy $T_{P2} \approx \text{const.}$) — tj. po upływie ok. 20 minut — zakończyć pomiary wyłączając pompę. Wyłączyć suszarkę.
7. Wypuścić niewielką ilość wody ze zbiornika skraplacza i przy pomocy konewki lub zlewki dolać świeżej wody wodociągowej (**uwaga na właściwy poziom!**). Po wymieszaniu zmierzyć temperaturę wody. Czynność powtarzać do momentu uzyskania temperatury ok. 20°C .
8. **Włączyć grzałkę suszarki** (przełącznik w pozycji oznaczonej czerwoną gwiazdką) i nastawić ją na maksymalną moc — przełącznik ustawiony w pozycji oznaczonej dwiema czerwonymi kropkami); obroty silnika ustawione na maksimum (przełącznik w pozycji oznaczonej dwiema białymi kropkami).
9. Powtórz czynności z punktów 3-7 i zapisuj wyniki w tabeli.
10. Powtórz czynności z punktów 3-6 jednak bez obecności strumienia powietrza (wyłączona suszarka).
11. Wyjmij termometry ze zbiornika i punktów pomiarowych, osusz je i starannie oczyść z pasty przewodzącej ciepło, a następnie schowaj do pojemników.
12. Opróżnij zbiornik z wodą skraplacza.

6. Tabele pomiarowe

Zapis wyników pomiarów

$p_{ot} = \dots \pm 1 \text{ mmHg} = \dots \pm \dots \text{ Pa}$

Niepewności pomiarów bezpośrednich:

a) temperatury za pomocą termometru: $\Delta T = \dots$

c) ciśnienia $\Delta p = \dots$

d) czasu $\Delta t = \dots$

t [min]	P [W]	Parowacz				Skraplacz				\dot{Q}_w [W]	ε
		wlot T_{P1} [°C]	wylot T_{P2} [°C]	źr. dolne T_I [°C]	p_1 [bar]	wlot T_{S1} [°C]	wylot T_{S2} [°C]	woda T_{II} [°C]	p_2 [bar]		
0											
2											
4											
6											
8											
10											
12											
14											
16											
18											
20											

Tabela do wpisywania wyników jednej serii pomiarów

7. Opracowanie wyników

- Na podstawie danych z tabel 1, 2 i 3 sporządź wykresy zależności temperatury czynnika roboczego oraz temperatury obu źródeł ciepła od czasu dla każdej serii pomiarowej (sześć krzywych: $T_{P1}(t)$, $T_{P2}(t)$, $T_I(t)$, $T_{S1}(t)$, $T_{S2}(t)$, $T_{II}(t)$ na każdym z trzech rysunków). Przykładowy przebieg zmian temperatury przedstawiono na rys. 5. Na wykresach nanieś niepewności bezpośrednich pomiarów temperatury i czasu. Sprawdź czy urządzenie lub jego część np. parowacz pracowało w sposób stacjonarny (w stanie stacjonarnym temperatura i ciśnienie stabilizują się).
- Korzystając z przybliżonego wzoru

$$\dot{Q}_w = c_w m_w \frac{\Delta T_{II}}{\Delta t} \quad (7)$$

gdzie c_w [J/kg] - ciepło właściwe wody, m_w [kg] - masa wody w zbiorniku, zaś $\Delta T_{II} / \Delta t$ [K/s] - przyrost temperatury wody w zbiorniku w jednostce czasu, oblicz średnią moc \dot{Q}_w [W] pobieraną przez wodę w zbiorniku skraplacza w kolejnych przedziałach czasu.

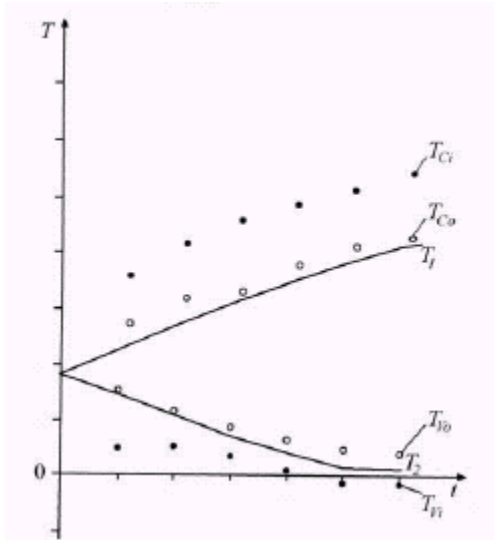
- Korzystając ze wzoru
$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_w}{P} \quad (8)$$

gdzie $P=120$ W – średnia moc napędowa sprężarki, oblicz efektywność pompy ciepła w kolejnych przedziałach czasu. Porównaj ją z maksymalną efektywnością pompy ciepła wynikającą ze wzoru (6). Oszacuj niepewność pomiaru pośredniego ε .

- Dla stanów stacjonarnych oblicz ciepło parowania czynnika roboczego.

- Oblicz bezwzględną wartość ciśnienia czynnika w stanie stacjonarnym p . W tym celu należy do wartości odczytanej z manometru dodać ciśnienie atmosferyczne p_{ot} odczytane z barometru wiszącego na ścianie.
- Odczytaj z tabeli dodatku 1 wartość entalpii właściwej czynnika w postaci cieczy h' i w postaci pary h'' . Jeśli w tabeli nie ma poszukiwanej wartości ciśnienia, należy posłużyć się metodą interpolacji liniowej.
- Oblicz ciepło parowania czynnika roboczego r [kJ/kg] przy danym ciśnieniu p , korzystając ze wzoru

$$r = h'' - h' \quad (9)$$



Rys. 5 Przykładowy przebieg zależności temperatur w układzie woda - woda w funkcji czasu

7. Podsumowanie i wnioski

We wnioskach odpowiedz na następujące pytania:

- Czy efektywność pompy ciepła zależy od temperatury górnego i dolnego źródła ciepła?
- Czy efektywność działania badanego urządzenia jest duża, czy mała w porównaniu z efektywnością maksymalną określoną przez II zasadę termodynamiki?
- W jaki sposób można zwiększyć efektywność działania pompy ciepła?
- Czy ciepło parowania czynnika roboczego zależy od jego ciśnienia i temperatury (jeśli tak, to dlaczego)?

Literatura

- W. Zalewski: Pompy ciepła. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań. Wyd. Politechniki Krakowskiej 1995.
- W. Zalewski: Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne. Podstawy teoretyczne. Przykłady obliczeniowe. IPPU MASTA 2001.
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: Podstawy fizyki t.2. PWN 2003.
- P. Grygiel i H. Sodolski, Laboratorium Konwersji Energii, Politechnika Gdańska 2006
- Materiały firmy PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, „Laboratory Experiments” 2005

9. Dodatek

Parametry określające stan czynnika roboczego R134a: t – temperatura, p - ciśnienie (bezwzględne) h' - entalpia właściwa czynnika w postaci cieczy, h'' - entalpia właściwa czynnika w postaci pary nasyconej suchej

t [°C]	p [MPa]	v [m ³ /kg]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]
2	0,31450	0,06470	202,68	399,84
4	0,33755	0,06042	205,37	401,00
6	0,36186	0,05648	208,08	402,14
8	0,38749	0,05238	210,80	403,27
10	0,41449	0,04948	213,53	404,40
12	0,44289	0,04636	216,27	405,51
14	0,47276	0,04348	219,03	406,61
16	0,50413	0,04081	221,80	407,70
18	0,53706	0,3833	224,59	408,78
20	0,57159	0,03603	227,40	409,84
22	0,60777	0,03388	230,21	410,89
24	0,64566	0,03189	233,05	411,93
26	0,68531	0,03003	235,90	412,95
28	0,72676	0,02829	238,77	413,95
30	0,77008	0,02667	241,65	414,94
32	0,81530	0,02516	244,55	415,90
34	0,86250	0,02374	247,47	416,85
36	0,91172	0,02241	250,41	417,78
38	0,96301	0,02116	253,37	418,69
40	1,0165	0,01999	256,35	419,58
42	1,0721	0,01890	259,35	420,44
44	1,1300	0,01786	262,38	421,28
46	1,1901	0,01689	265,42	422,09
48	1,2527	0,01598	268,49	422,88
50	1,3177	0,01511	271,59	423,63