



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki
i Budowy Maszyn

Kierunek studiów:
Mechanika i Budowa Maszyn

Robert Pastuszko, Norbert Dadas

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Termodynamika II
pt. „Badanie chłodziarki sprężarkowej”

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

*Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23*



Spis treści

1. Wprowadzenie	3
1.1 Chłodziarki i pompy ciepła.....	4
1.2 Obieg lewobieżny Carnota	7
1.3 Obieg Lindego	7
2. Stanowisko pomiarowe	13
3. Metodyka pomiarów	17
3.1. Procedura pomiarów	17
4. Opracowanie wyników	19
4.1. Obliczanie współczynnika użytecznej wydajności chłodniczej	19
4.2. Obliczenie teoretycznego współczynnika wydajności chłodniczej	20
4.3. Obliczenie współczynnika wydajności chłodniczej dla obiegu Carnota	21
4.4. Zestawienie wyników obliczeń współczynnika wydajności chłodniczej	21



Utwór objęty licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Wprowadzenie

Chłodzeniem nazywamy proces fizyczny, podczas którego na skutek odprowadzania ciepła z układu następuje spadek bądź utrzymanie jego temperatury na stałym poziomie, niższym od temperatury otoczenia.

Można wyróżnić dwa sposoby chłodzenia:

- Naturalny – z użyciem czynnika o temperaturze niższej niż temperatura substancji, którą chcemy ochłodzić
- Sztuczny – z użyciem czynnika, który podlega przemianom termodynamicznym, zazwyczaj w obiegu zamkniętym, co umożliwia uzyskanie niskich temperatur.

Przykładem takiego obiegu jest układ klimatyzacji.

Działanie urządzeń chłodniczych i klimatyzacji polega na pobraniu energii z jednego miejsca i oddaniu jej w innym. Jest również formą uzdatniania powietrza, która utrzymuje na odpowiednim poziomie temperaturę, wilgotność, wymianę powietrza i jego czystość. W części chłodzącej (parowniku) następuje odparowanie czynnika chłodniczego podczas wrzenia i ochłodzenie powietrza opływającego parownik. Następnie czynnik chłodniczy w postaci pary przepływa do sprężarki, gdzie w wyniku sprężania wzrasta jego ciśnienie oraz temperatura. Gorąca para jest kierowana do skraplacza, w którym ochładza się i skrapla, a następnie już jako ciecz przepływa do zaworu rozprężnego, w którym następuje obniżenie temperatury i ciśnienia cieczy. Ciekły czynnik trafia do parownika i cały cykl powtarza się.

Wyróżnia się następujące rodzaje płynów roboczych:

- Płyny jednorodne (jednoskładnikowe): (1) naturalne, np. woda (R718*, amoniak (R717), propan (R290), izobutan (R600a), CO₂ (R744); (2) syntetyczne, np. R32, R125, R134a,.
- Cynniki wieloskładnikowe:
 - Azeotropowe – mieszaniny kilku składników zachowujące się jak płyn jednorodny. Oznacza to, że w procesach tych nie ulega zmianie skład fazy parowej oraz ciekłej (np. R502, R507);
 - Zeotropowe - mieszaniny składników o różnych temperaturach wrzenia, procesy parowania i skraplania odbywają się w pewnym zakresie temperatur (poślizg temperaturowy), np. R407C, R409A;





- Bliskoazeotropowe – mieszaniny zeotropowe z niewielkim poślizgiem temperaturowym (R407A, R410A).

Czynniki chłodnicze posiadają znormalizowany system oznaczeń, które zawiera norma ISO 817.

1.1 Chłodziarki i pompy ciepła

Chłodziarki są urządzeniami pracującymi cyklicznie, a płyny robocze stosowane w chłodnictwie nazywane są czynnikami chłodniczymi.

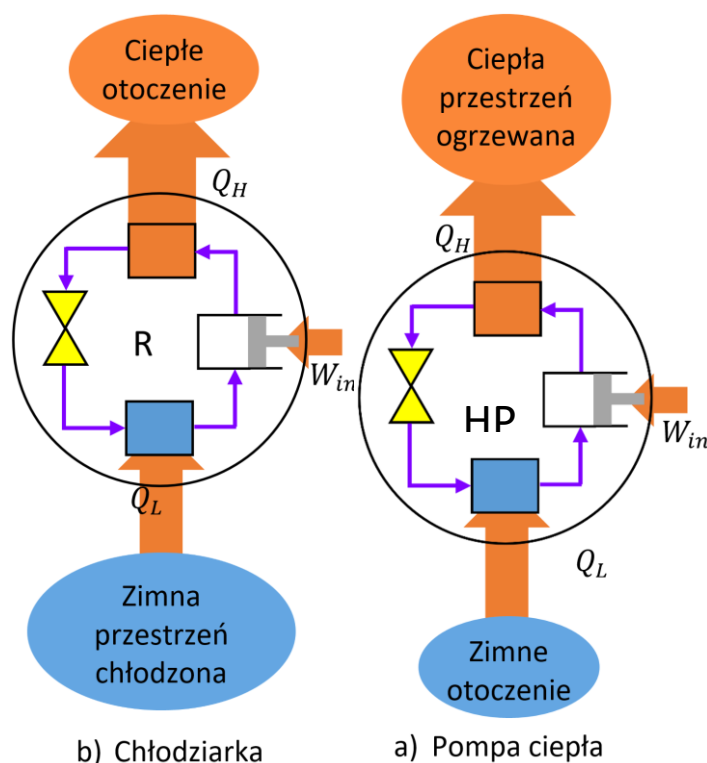
Urządzeniem, które przenosi ciepło z niskotemperaturowego medium do obszaru o wyższej temperaturze to pompa ciepła. Chłodziarki i pompy ciepła są zasadniczo tymi samymi urządzeniami; różnią się jedynie celami wykorzystania.

Chłodziarka ma za zadanie utrzymanie niskiej temperatury w chłodzonej przestrzeni, usuwając z niej ciepło. Zadaniem pompy ciepła jest utrzymywanie ogrzewanego obszaru w wyższej temperaturze.

[Tekst alternatywny: Schemat przedstawiony na Rysunku 1 porównuje działanie chłodziarki (po lewej) i pompy ciepła (po prawej). W obu przypadkach w centrum znajduje się okrąg symbolizujący obieg czynnika chłodniczego. Wewnątrz każdego okręgu narysowane są elementy układu: zawór rozprężny (żółty symbol), wymienniki ciepła (prostokąty) oraz sprężarka (szary kształt przypominający tłok). Fioletowe strzałki pokazują kierunek przepływu czynnika.

W chłodziarce (po lewej) ciepło Q_H jest oddawane do „ciepłego otoczenia” nad układem, natomiast ciepło Q_L jest pobierane z „zimnej przestrzeni chłodzonej” pod układem. Do sprężarki doprowadzona jest praca zewnętrzna (W_{in}).

W pompie ciepła (po prawej) ciepło Q_L jest pobierane z „zimnego otoczenia” pod układem, natomiast ciepło Q_H jest dostarczane do „ciepłej przestrzeni ogrzewanej” nad układem. Podobnie jak w chłodziarce do sprężarki jest doprowadzona praca (W_{in})



Rys. 1. Układy z chłodziarką i pompą ciepła.

Na Rys. 1 zastosowano następujące oznaczenia:

Q_L – jest ilością ciepła usuwanego z przestrzeni chłodzonej o temperaturze T_L (wydajność chłodnicza),

Q_H – to ilość ciepła przekazywanego do ogrzewanej przestrzeni o temperaturze T_H ,

W_{in} – to wielkość doprowadzonej pracy.

Współczynnik wydajności chłodniczej dla chłodziarki/klimatyzatora oraz współczynnik wydajności energetycznej dla pompy ciepła można wyznaczyć z następujących zależności:

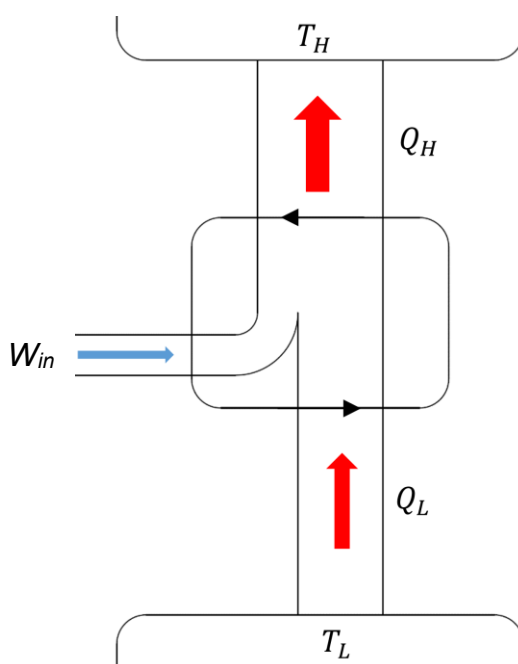
$$\varepsilon_{ch} = COP_R = EER = \frac{\text{wydajność chłodnicza}}{\text{włożona praca}} = \frac{Q_L}{W_{in}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{pc} = COP_{HP} = \frac{\text{wydajność grzewcza}}{\text{włożona praca}} = \frac{Q_H}{W_{in}} \quad (2)$$

Współczynnik ten bywa również oznaczany skrótem COP (ang. coefficient of performance) lub EER (energy efficiency rating) w odniesieniu do chłodziarki/klimatyzatora.

Chłodziarka pobiera ciepło Q_L ze źródła o niższej temperaturze przekazując je do źródła o wyższej temperaturze ciepło Q_H . Wykonanie pełnego obiegu termodynamicznego wymaga doprowadzenia pracy zewnętrznej W_{in} (Rys. 2).

[Tekst alternatywny: Rysunek 2 przedstawia wykres Sankeya, czyli przepływ energii dla chłodziarki lub pompy ciepła. Oznaczenia T_L i T_H znajdujące się na dole i górze Rysunku odpowiadają kolejno temperaturze parowania i skraplania. Pomiędzy nimi znajduje się obrys obiegu chłodniczego. Z dolnego źródła (T_L) ku górze skierowana jest czerwona strzałka oznaczona Q_L , przedstawiająca ciepło pobierane z obszaru chłodniejszego. Następnie w kierunku skierowanym w stronę obiegu chłodniczego narysowana jest niebieska strzałka, która oznacza doprowadzanie pracy (W_{in}) do układu. Nad obiegiem narysowana jest czerwona, szersza niż dla Q_L strzałka, oznaczona jako Q_H , skierowana do górnego źródła (T_H)]



Rys. 2. Wykres Sankeya dla chłodziarki/pompy ciepła.



1.2 Obieg lewobieźny Carnota

Obiegi termodynamiczne można podzielić na prawobieźne oraz lewobieźne (wsteczne). Obieg prawobieźny jest obiegiem silnikowym, wykorzystywanym do wytwarzania pracy, natomiast do obiegu lewobieźnego wymagane jest doprowadzenie pracy, co w przypadku chłodziarki lub klimatyzatora zostaje wykorzystane do wymuszenia przepływu ciepła z układu o niższej temperaturze (np. wewnątrz komory chłodniczej) do otoczenia o wyższej temperaturze.

Wsteczny **obieg Carnota** jest traktowany jako teoretyczny odwracalny obieg sprężarkowej chłodziarki parowej, umożliwiający uzyskanie maksymalnego współczynnika wydajności chłodniczej. Obieg ten realizowany jest całkowicie w obszarze pary nasyconej i wilgotnej (Rys. 3). Para wilgotna jest sprężana izentropowo, następnie skrapla się izobarycznie (również izotermicznie) oddając ciepło. Skroplona ciecz wpływa do turbiny (rozprężarki) i trafia do parownika, pobierając ciepło z chłodzonej przestrzeni. Obieg Carnota w układzie współrzędnych temperatura–entropia właściwa (***T–s***) jest przedstawiony na Rys. 3.

Współczynnik wydajności chłodniczej ε_{oc} dla obiegu Carnota można obliczyć na podstawie zależności (1), przyjmując jednakowe zmiany entropii właściwej podczas parowania i skraplania czynnika chłodniczego dla jednostkowej wydajności chłodniczej i jednostkowej pracy:

$$\varepsilon_{oc} = \frac{q_L}{w} = \frac{q_L}{q_H - q_L} = \frac{T_L \Delta s}{T_H \Delta s - T_L \Delta s} \quad (3)$$

stąd:

$$\varepsilon_{oc} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (4)$$

gdzie: T_L oznacza temperaturę dolnego źródła (temperaturę parowania),
 T_H – temperaturę górnego źródła (temperaturę skraplania).

1.3 Obieg Lindego

Teoretyczny obieg suchy Lindego jest obiegiem wzorcowym dla parowych sprężarkowych urządzeń chłodniczych (w literaturze angielskojęzycznej: *ideal vapor-compression refrigeration cycle*). W porównaniu z obiegiem Carnota, sprężanie zachodzi w obszarze pary przegrzanej, co w praktyce jest realizowane poprzez umieszczenie osuszacza między parownikiem a sprężarką. Obieg Lindego w



układzie współrzędnych temperatura–entropia właściwa ($T-s$) jest przedstawiony na Rys. 4.

Wiele niedogodności związanych z odwracalnym obiegiem Carnota może zostać wyeliminowane przez całkowite odparowanie czynnika chłodniczego przed jego sprężeniem oraz przez zastąpienie turbiny urządzeniem dławiącym, takim jak zawór rozprężny lub rurka kapilarna.

Obieg Lindego jest najczęściej stosowanym obiegiem dla chłodziarek, układów klimatyzacyjnych i pomp ciepła. Składa się z czterech przemian (Rys. 4):

- 1-2: Sprężanie izentropowe (adiabatyczne) w sprężarce,
- 2-3: Odprowadzenie ciepła przy stałym ciśnieniu w skraplaczu,
- 3-4: Dławienie izentalpowe w urządzeniu rozprężającym,
- 4-1: Absorpcja ciepła przy stałym ciśnieniu w parowniku.

Wykresy obiegów dla sprężarkowych urządzeń chłodniczych przedstawiane są najczęściej we współrzędnych $p-h$ (ciśnienie-entalpia), Rys. 5,6.

Rysunek 5 przedstawia standardowy obieg Lindego, w którym czynnik chłodniczy doprowadzony jest do sprężarki początkowo w postaci pary nasyconej. Sprężanie izentropowe powoduje wzrost ciśnienia i temperatury tego czynnika, co odpowiada parametrom w obszarze pary przegrzanej. W przypadku rzeczywistych urządzeń chłodniczych na wejściu do sprężarki czynnik roboczy jest w postaci pary przegrzanej, ze względu na dopływ ciepła z otoczenia. W celu zwiększenia wydajności chłodniczej stosuje się dochładzanie czynnika wychodzącego ze skraplacza w wymienniku ciepła, przez który przepływa czynnik opuszczający parownik. Rysunek 6 uwzględnia dwa omówione przypadki.

Teoretyczny współczynnik wydajności chłodniczej, zdefiniowany zależnością (1), można przedstawić w funkcji zmian entalpii czynnika podczas jego przemian zachodzących przy przepływie przez parownik i sprężaniu w sprężarce:

$$\varepsilon_{tch} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

gdzie:

$h_1 - h_4 = Q_L/m$ - jednostkowa wydajność chłodnicza, kJ/kg,

$h_2 - h_1 = w = W_{in}/m$ - praca jednostkowa sprężania, kJ/kg

Użyteczny współczynnik wydajności chłodniczej jest możliwy do obliczenia na podstawie przybliżonej zależności:

$$\varepsilon_{uch} = \frac{\dot{Q}_{par} + \dot{Q}_{ot}}{P_{spr}} \quad (6)$$

gdzie:

$\dot{Q}_{par}$ – strumień ciepła pobierany przez parownik, W,

P_{spr} – moc elektryczna doprowadzona do sprężarki, W

$\dot{Q}_{ot}$ – strumień ciepła dopływający z otoczenia, W

[Tekst alternatywny Rysunek 3 przedstawia obieg lewobieżny (wsteczny) Carnota.

Po lewej stronie znajduje się wykres zależności temperatury (T) od entropii (s), z zaznaczonym obiegiem składającym się z czterech przemian. Punkty 1–4 wyznaczają kolejne przemiany w obiegu:

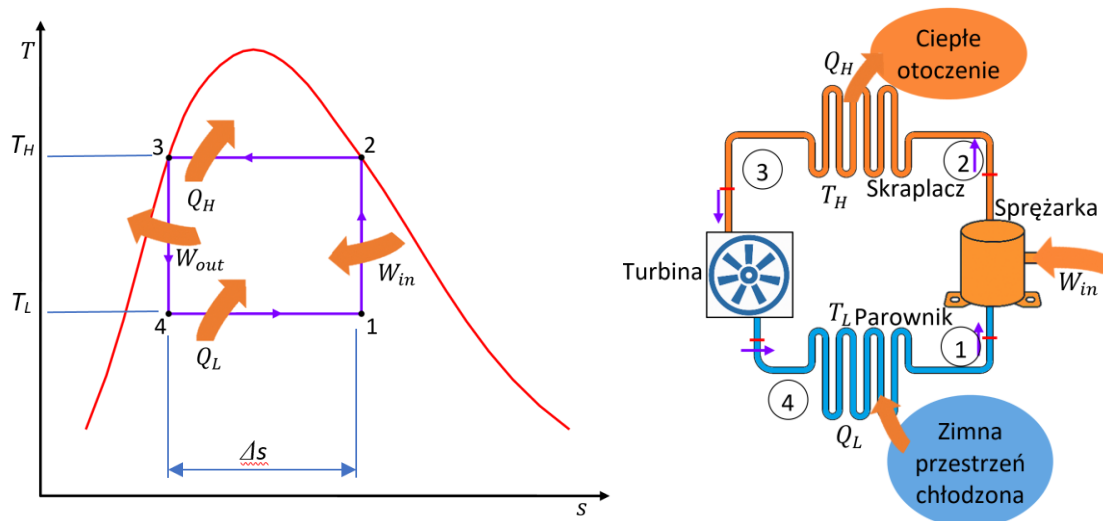
1 → 2: sprężanie z doprowadzeniem pracy do sprężarki (W_{in}),

2 → 3: oddawanie ciepła (Q_H) do ciepłego otoczenia,

3 → 4: proces rozprężania z wykonaniem pracy (W_{out}),

4 → 1: pobieranie ciepła (Q_L) z zimnej przestrzeni chłodzonej.

Po prawej stronie umieszczono schemat urządzenia chłodniczego realizującego ten obieg: zimna przestrzeń chłodzona znajdująca się na dole zawiera parownik, który pobiera ciepło (Q_L). Czynnik roboczy płynie przez turbinę i skraplacz, w którym ciepło jest oddawane (Q_H) do otoczenia. Między punktami 1 i 2 znajduje się sprężarka, do której doprowadzana jest praca (W_{in})]

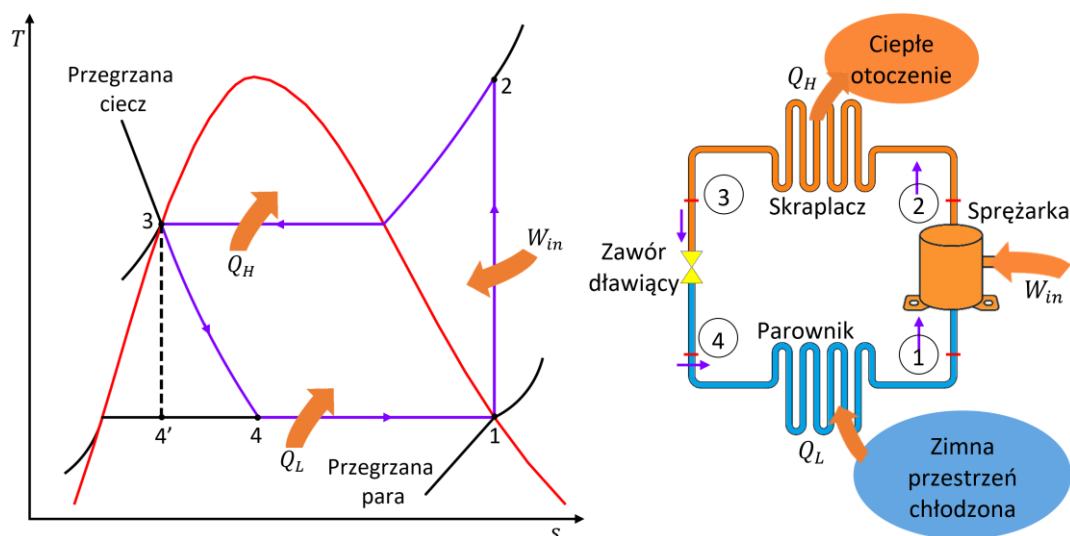


Rys. 3. Obieg lewobieżny (wsteczny) Carnota oraz schemat teoretycznego urządzenia chłodniczego realizującego ten obieg.

[Tekst alternatywny: Rysunek 4 przedstawia standardowy obieg Lindego oraz schemat urządzenia jednostopniowego, które realizuje ten obieg. Po lewej stronie znajduje się wykres zależności temperatury (T) od entropii właściwej (s), z zaznaczonym wykresem nasycenia cieczy i pary. Zaznaczono cztery główne przemiany:

- 1 $\rightarrow$ 2: sprężanie czynnika, z doprowadzeniem pracy (W_{in});
- 2 $\rightarrow$ 3: ciepło (Q_H) jest oddawane do ciepłego otoczenia podczas skraplania;
- 3 $\rightarrow$ 4': czynnik przechodzi przez zawór dławiący bez wymiany ciepła, powodując spadek temperatury lub 3 $\rightarrow$ 4: czynnik przechodzi przez zawór dławiący zwiększając entropię;
- 4' $\rightarrow$ 1 ciepło (Q_L) jest pobierane w parowniku z zimnej przestrzeni chłodzonej podczas wrzenia czynnika roboczego.

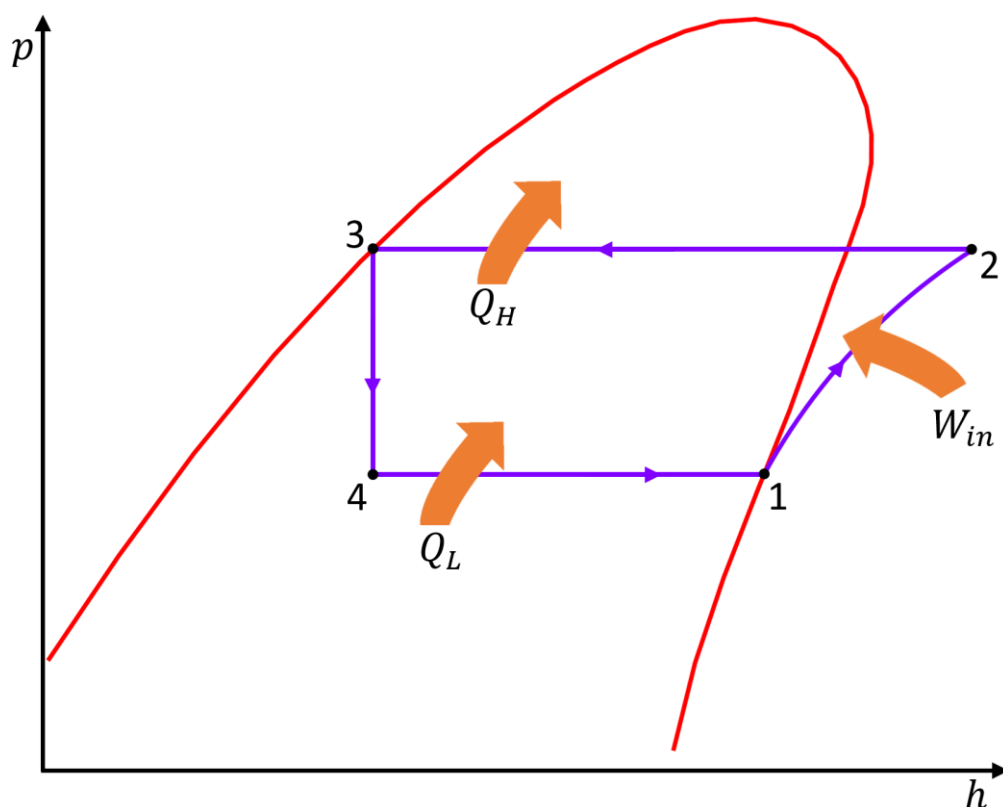
Po prawej stronie znajduje się schemat urządzenia chłodniczego realizującego ten obieg. Parownik (na dole) pobiera ciepło (Q_L) z zimnej przestrzeni chłodzonej. Sprężarka, do której doprowadza się pracę W_{in} , zwiększa ciśnienie i temperaturę czynnika. Skraplacz (na górze) oddaje ciepło (Q_H) do otoczenia. Zawór dławiący obniża ciśnienie czynnika przed wejściem do parownika, umożliwiając ponowne odparowanie czynnika w fazie ciekłej.]



Rys. 4. Standardowy obieg Lindego i schemat urządzenia jednostopniowego realizującego ten obieg.



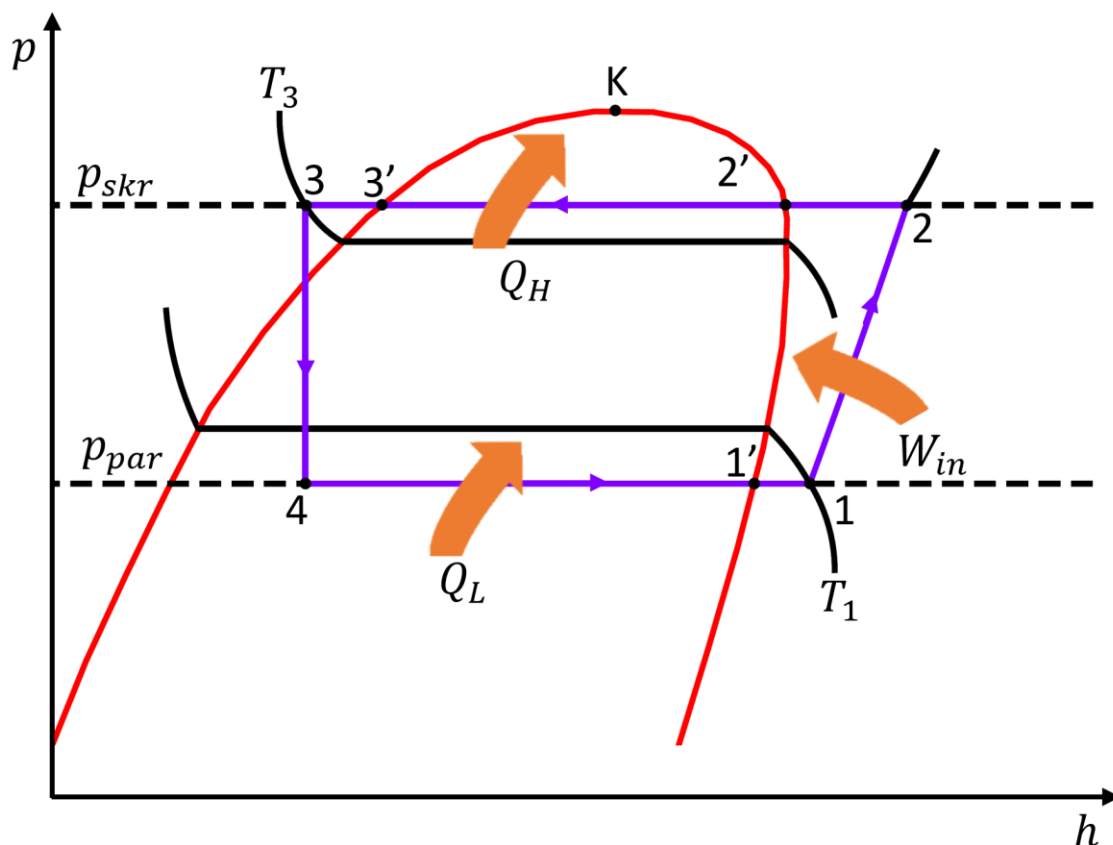
[Tekst alternatywny: Rysunek 5 przedstawia standardowy obieg Lindego dla urządzenia jednostopniowego w układzie współrzędnych ciśnienie–entalpia (p - h). Na wykresie znajdują się krzywa równowagi fazowej (granica faz cieczeniowa i parowa) oraz cztery przemiany zachodzące w układzie chłodniczym: Przejście od stanu 1 do stanu 2 obrazuje proces sprężania czynnika, któremu odpowiada doprowadzenie pracy (W_{in}). Od stanu 2 do 3 przebiega przemiana skraplania z oddawaniem ciepła (Q_H) do otoczenia. W przemianie od stanu 3 do 4 czynnik jest dławiony, co powoduje obniżenie ciśnienia, natomiast poziomy odcinek zaznaczony od stanu 4 do 1 informuje o procesie parowania, podczas którego pobierane jest ciepło (Q_L) z chłodzonego układu.]



Rys. 5. Standardowy obieg Lindego dla urządzenia jednostopniowego we współrzędnych p - h .



[Tekst alternatywny: Rysunek 6 przedstawia obieg Lindego z dochłodzeniem (3–3') oraz przegrzaniem (1'–1) w układzie współrzędnych ciśnienie–entalpia (p – h). Na wykresie widoczna jest krzywa równowagi fazowej (granica faz ciec–para) oraz przemiany zachodzące w układzie chłodniczym. Przemiana od stanu 1 do 2 przedstawia sprężanie czynnika w obszarze pary przegrzanej, któremu odpowiada doprowadzenie pracy (W_{in}). Następnie podczas przemiany 2–3 zachodzi skraplanie z oddawaniem ciepła (Q_H) do otoczenia. Dochłodzenie cieczy ukazane jest jako odcinek 3–3'. Proces dławienia, w którym następuje spadek ciśnienia, przedstawiono między stanami 3 a 4. Odcinek 4–1 oznacza parowanie z pobieraniem ciepła (Q_L) z chłodzonego obszaru, natomiast przegrzanie pary zobrazowano między punktami 1–1'.]



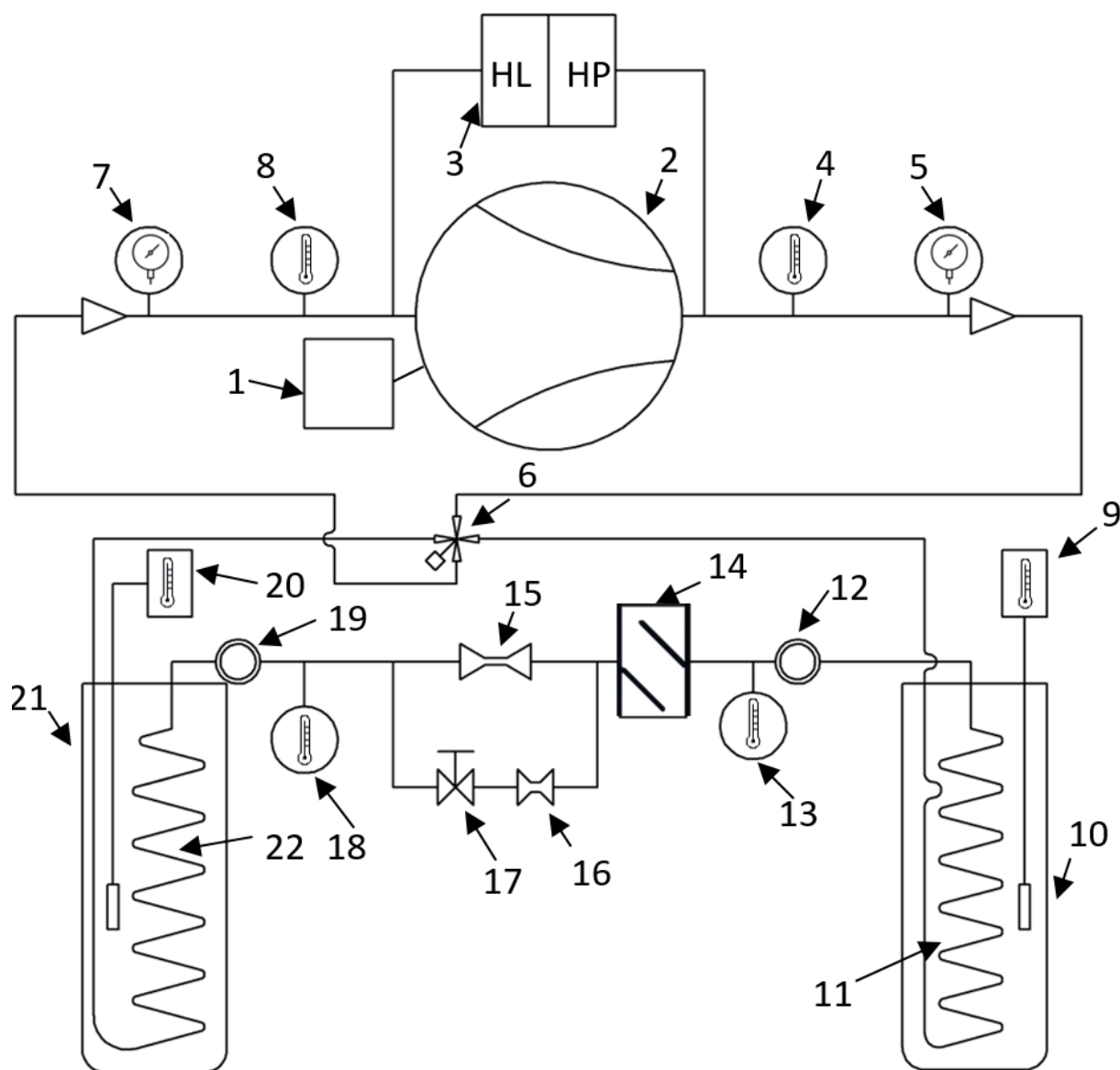
Rys. 6. Obieg Lindego z dochłodzeniem (3 – 3') oraz przegrzaniem (1' – 1).



2. Stanowisko pomiarowe

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na Rys. 7, a w Tabeli 1 zestawiono jego elementy.

[Tekst alternatywny: Rysunek 7 przedstawia schemat stanowiska laboratoryjnego do badania obiegu chłodniczego z zastosowaniem czynnika roboczego R134a. Układ zawiera główne elementy typowe dla instalacji chłodniczej oraz aparaturę pomiarową umożliwiającą pracę urządzenia w trybie chłodzenia i grzania. Czynnik roboczy przepływa przez sprężarkę (2), w której następuje jego sprężanie, a następnie przez zawór rewersyjny (6), umożliwiający zmianę kierunku przepływu w zależności od pozycji przełącznika (tryb 1 – chłodzenie, tryb 2 – grzanie). Presostat (3) zabezpiecza układ przed przekroczeniem dopuszczalnych wartości ciśnienia. Manometry (5 i 8) oraz mierniki temperatury (4, 7, 9, 13, 18, 20) pozwalają określać ciśnienie i temperaturę pracy w różnych punktach urządzenia chłodniczego/pompy ciepła. Czynnik roboczy przepływa przez skraplacz/parownik (22/11), umieszczony w pojemnikach z wodą, wymieniając ciepło. Zależnie od trybu chłodzić jeden zasobnik, a drugi ogrzewając. Między termometrami, a helisą (wężownicą) skraplacza/parownika zamocowane są wzierniki (12 i 19), które umożliwiają obserwację przepływającego w miedzianych rurkach czynnika. Dwukierunkowy filtr (14) jest zamocowany między elementami dławiącymi a wziernikiem. Dławienie czynnika realizowane jest poprzez kapilary: główną (15) i dodatkową (16), które znajdują się między skraplaczem i parownikiem. Przepływ przez dodatkową kapilarę (16) może być regulowany zaworem (17). Programator temperatury (20) pozwala zadawać temperaturę pracy w zasobnikach, w których następuje proces ogrzewania lub chłodzenia płynu.]



Rys. 7. Schemat stanowiska laboratoryjnego (oznaczenia wg Tabeli 1).



Tabela 1. Opis zaznaczonych elementów na Rys. 7.

Nr Element

- 1 – Watomierz
- 2 – Sprężarka
- 3 – Presostat zabezpieczający (HP/LP)
- 4 – Miernik wskazujący temperaturę tłoczenia
- 5 – Manometr do obwodu wysokiego ciśnienia
- 6 – Zawór rewersyjny
- 7 – Manometr do obwodu wysokiego ciśnienia
- 8 – Miernik wskazujący temperaturę przegrzanej pary
- 9 – Miernik wskazujący temperaturę płynu w zasobniku prawym
- 10 – Zasobnik prawy
- 11 – Skraplacz/parownik
- 12 – Wziernik czynnika roboczego
- 13 – Miernik wskazujący temperaturę skroplin (tryb 1) lub rozprężonego płynu (tryb 2)
- 14 – Dwukierunkowy filtr czynnika roboczego
- 15 – Kapilara – główny element dławiący
- 16 – Kapilara – dodatkowy element dławiący
- 17 – Zawór regulujący dodatkową kapilarę
- 18 – Miernik wskazujący temperaturę rozprężonego płynu (tryb 1) lub skroplin (tryb 2)
- 19 – Wziernik czynnika roboczego
- 20 – Programator temperatury w zasobnikach pozwalający zadać temperaturę, do której układ będzie schładzał/ogrzewał płyn w danym zasobniku
- 21 – Zasobnik lewy
- 22 – Skraplacz/parownik

W stanowisku jako płyn roboczy wykorzystywany jest czynnik chłodniczy R134a.

Rysunek 8 przedstawia zdjęcie stanowiska laboratoryjnego wraz z oznaczeniami opisanymi w Tabeli 2.



Tabela 2. Opis oznaczeń elementów zaznaczonych na Rys. 8.

Nr Element

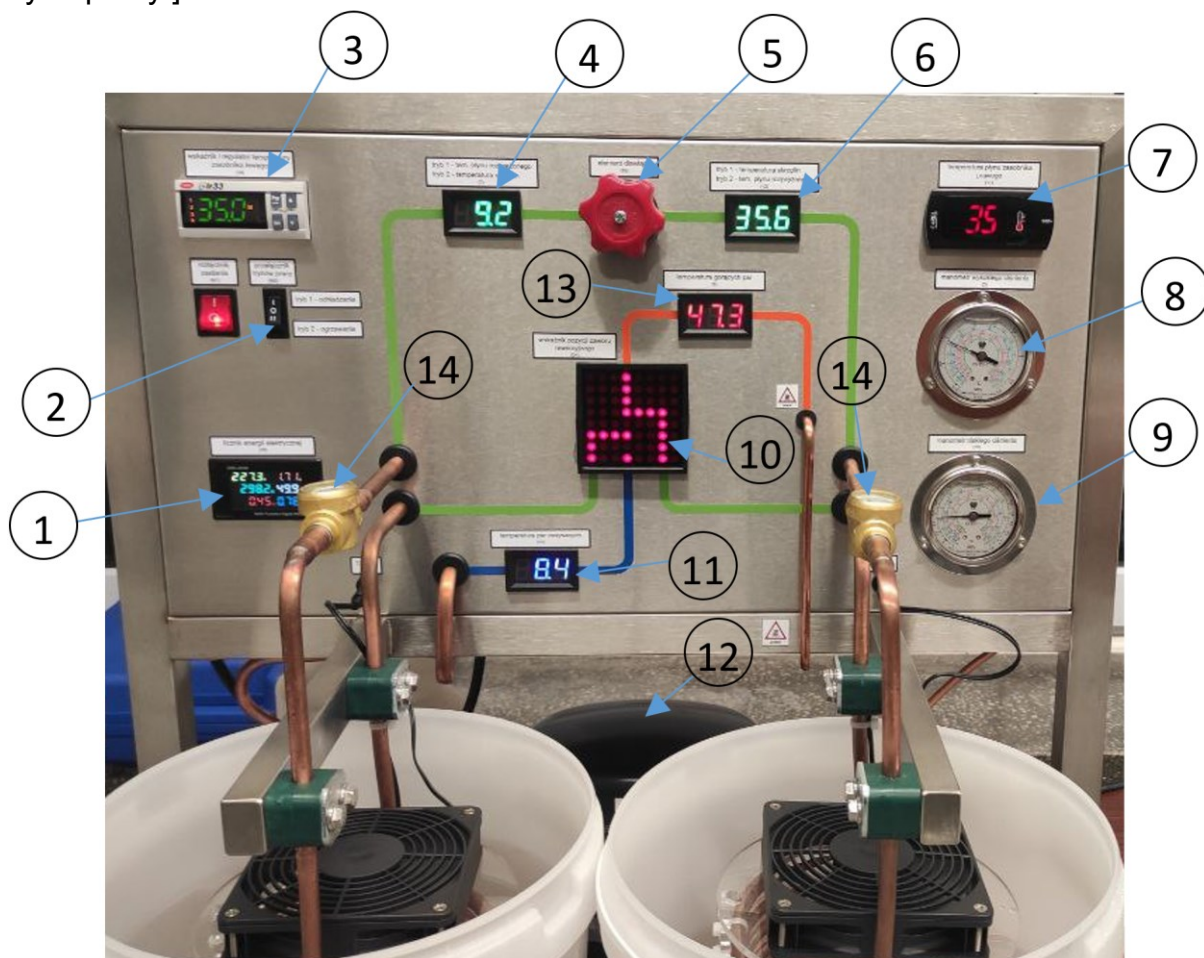
- 1 – Watomierz i licznik energii
- 2 – Przełącznik trybów pracy (tryb 1 – chłodzenie, tryb 2 – grzanie)
- 3 – Programator temperatury w zasobnikach pozwalający zadać temperaturę do której układ będzie schładzał/grzał płyn w danym zasobniku
- 4 – Miernik wskazujący temperaturę płynu po rozprężeniu (tryb 1) lub skroplin (tryb 2), °C
- 5 – Zawór dławiący
- 6 – Miernik wskazujący temperaturę skroplin (tryb 1) lub płynu po rozprężeniu (tryb 2), °C
- 7 – Miernik wskazujący temperaturę płynu w zasobniku prawym, °C
- 8 – Manometr do obwodu wysokiego ciśnienia, bar
- 9 – Manometr do obwodu niskiego ciśnienia, bar
- 10 – Wyświetlacz wizualizujący pozycję zaworu rewersyjnego.
- 11 – Miernik wskazujący temperaturę przegrzanej pary po stronie ssawnej sprężarki, T_s , °C
- 12 – Sprężarka
- 13 – Miernik wskazujący temperaturę tłoczenia (wyjście sprężarki), T_t , °C
- 14 – Wzierniki

[Tekst alternatywny: Rysunek 8 przedstawia zdjęcie układu pomiarowego służącego do badania obiegu chłodniczego z czynnikiem roboczym R134a.

Po lewej stronie patrząc od dołu umieszczono: watomierz z licznikiem energii (1), przełącznik trybów pracy (2) oraz programator temperatury (3), umożliwiające zadanie temperatury w zasobnikach. Na środku stanowiska jest narysowany schemat przedstawiający ułożenie przewodów z czynnikiem chłodniczym. W miejscach gdzie pod obudową zostały zamocowane czujniki temperatury przymocowano mierniki (4, 5, 6).

Z prawej strony znajdują się manometry dla obwodu wysokiego (8) i niskiego (9) ciśnienia. W centralnej części panelu, od góry znajduje się zawór dławiący (5) oraz wyświetlacz (10) obrazujący aktualną pozycję zaworu rewersyjnego, który ukryty jest za obudową. Niżej widoczny jest miernik temperatury par przegrzanych po stronie ssawnej sprężarki (11) oraz sama sprężarka (12), umieszczona w dolnej części układu. Dodatkowo zamontowano miernik temperatury tłoczenia (13) oraz dwa wzierniki (14), umożliwiające obserwację stanu czynnika roboczego w miedzianych rurkach. Dolna część zdjęcia przedstawia dwa zasobniki ciecży

stanowiące wymienniki ciepła współpracujące z układem w zależności od wybranego trybu pracy.]



Rys. 8. Zdjęcie opomiarowanego urządzenia chłodniczego z czynnikiem roboczym R134a (oznaczenia wg Tabeli 2).

3. Metodyka pomiarów

3.1. Procedura pomiarów

Badanie należy wykonać dla trybu chłodzenia. Wężownica (helisa) w lewym naczyniu jest zanurzona w wodzie – pełni funkcję parownika. Prawa wężownica (skraplacz) może być chłodzona powietrzem przy włączonym wentylatorze lub umieszczona w naczyniu wypełnionym wodą. Po włączeniu sprężarki należy odczekać kilka minut do ustabilizowania się parametrów czynnika po stronie ssawnej i tłocznej sprężarki,



następnie wykonać pięć pomiarów odczytując wartości co 5 minut i zestawiając je w Tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Pomiary temperatury i ciśnienia podczas chłodzenia (tryb 1).

Lp.	T_s	T_t	T_{dc}	p_{skr}	p_{par}	T_{skr}	T_{par}	P_{spr}
	°C			bar		°C		W
1								
2								
3								
4								
5								
$\bar{X}$								

Tabela 4. Pomiary podczas chłodzenia – dodatkowe wielkości do wyznaczenia użytecznej wydajności chłodniczej.

Lp.	m_w	t	k	A	ΔT	T_{pow}	T_w	P_{spr}
	kg	s	W/(m ² K)	m ²	K	°C	°C	W
1								
2								
3								
4								
5								
$\bar{X}$								

Gdzie:

- T_s – temperatura po stronie ssawnej (dopływ do sprężarki), °C;
 T_t – temperatura po stronie tłocznej (wypływ ze sprężarki), °C;
 T_{dc} – temperatura na wejściu zaworu rozprężnego, °C;
 p_{skr} – ciśnienie skraplania (manometr do obwodu wysokiego ciśnienia), bar;
 p_{par} – ciśnienie parowania (manometr do obwodu niskiego ciśnienia), bar;
 T_{skr} – temperatura odpowiadająca ciśnieniu skraplania, °C;
 T_{par} – temperatura odpowiadająca ciśnieniu parowania, °C;
 P_{spr} – moc pobierana z sieci, W;
 m_w – masa wody w kontakcie z parownikiem, kg;
 t – czas chłodzenia, s;
 k – współczynnik przenikania ciepła, W/(m²K);
 A – całkowita powierzchnia wymiany ciepła naczynia z parownikiem, m²;



ΔT – zmiana temperatury wody podczas chłodzenia w czasie t , K;
 T_{pow} – temperatura powietrza (otoczenia), °C;
 T_w – temperatura wody w naczyniu, °C.

4. Opracowanie wyników

4.1. Obliczanie współczynnika użytecznej wydajności chłodniczej

Należy zastosować równanie (6) oraz uzupełniające zależności:

$$\dot{Q}_{par} = \frac{c_w m_w \Delta T_w}{t} \quad (5)$$

$c_w = 4,2$ – ciepło właściwe wody, kJ/(kgK);

$$\dot{Q}_{ot} = qA \quad (6)$$

Gęstość strumienia ciepła można określić następująco:

$$q = \frac{T_{pow} - T_w}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_p}} \quad (7)$$

α_w – współczynnik przejmowania ciepła przez wodę od ścianki naczynia, W/(m²K);

α_{pow} – współczynnik przejmowania ciepła od powietrza do ścianki naczynia, W/(m²K);

δ_n – grubość ścianki naczynia, m;

λ_n – przewodność cieplna ścianki naczynia, W/(m K);

Przyjąć następujące wartości: $\alpha_w=50$ kW/(m² K); $\alpha_{pow}=5$ kW/(m² K);

$\lambda_n= 0,3 - 0,5$ W/(m K).



4.2. Obliczenie teoretycznego współczynnika wydajności chłodniczej

Na wykres p - h dla czynnika R134a należy nanieść punkty przedstawione na Rys. 9, kreśląc rzeczywisty obieg chłodniczy i odczytać następujące parametry:

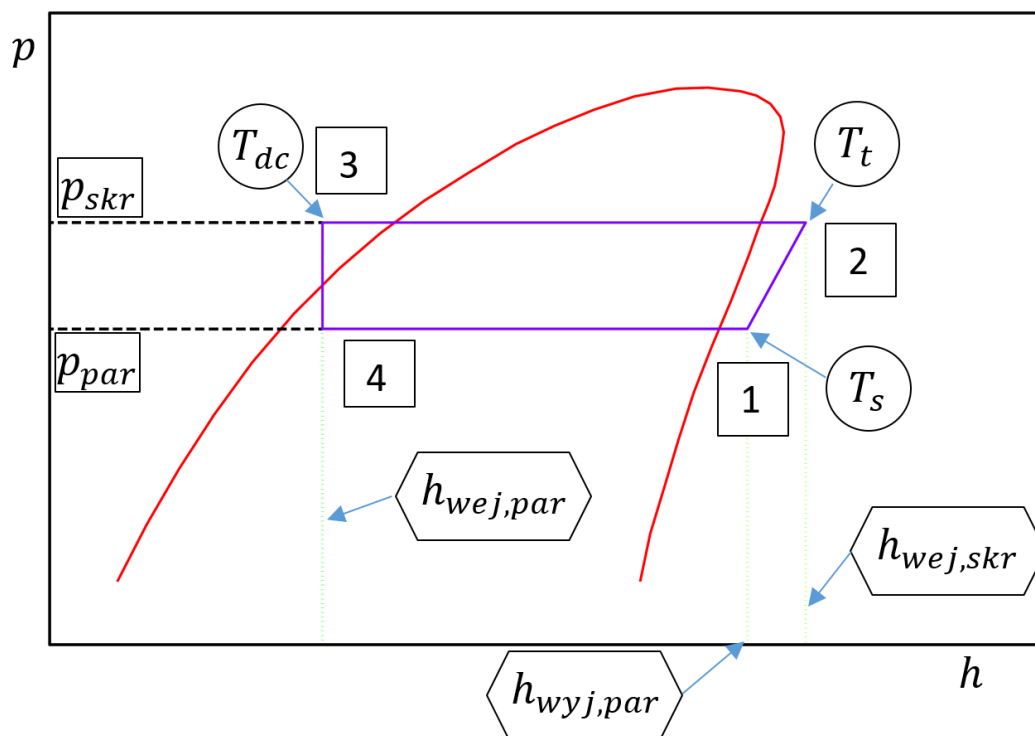
$h_{wej,skr} = h_2$ – entalpia na wejściu do skraplacza, kJ/kg;

$h_{wyj,par} = h_1$ – entalpia na wyjściu z parownika, kJ/kg;

$h_{wej,par} = h_4$ – entalpia na wejściu do parownika, kJ/kg;

Do obliczenia ε_{tch} należy wykorzystać zależność (5).

[Tekst alternatywny: Rysunek 9 przedstawia schemat sposobu kreślenia obiegu chłodniczego na wykresie ciśnienie–entalpia (p - h) dla czynnika R134a. Zaznaczono na nim krzywą nasycenia rozdzielającą obszary cieczy i pary oraz cztery charakterystyczne punkty związane z procesami w obiegu. Odcinek 1–2 odpowiada sprężaniu czynnika chłodniczego do ciśnienia skraplania (p_{skr}), 2–3 przedstawia proces skraplania przy stałym ciśnieniu, 3–4 oznacza dławienie do ciśnienia parowania (p_{par}), a 4–1 odpowiada parowaniu przy stałym ciśnieniu. Na wykresie pokazano także miejsca odczytu entalpii: $h_{wej,skr}$ – na wejściu do skraplacza, $h_{wyj,par}$ – na wyjściu z parownika, $h_{wej,par}$ – na wejściu do parownika oraz $h_{wej,skr}$ – na wejściu do skraplacza.]



Rys. 9. Schemat sposobu kreślenia obiegu chłodniczego wraz z odczytywaniem poszczególnych entalpii.



4.3. Obliczenie współczynnika wydajności chłodniczej dla obiegu Carnota

Do obliczeń należy wykorzystać zależność (4) oraz przyjąć następujące temperatury:

$$T_H = T_t,$$

$$T_L = T_s,$$

4.4. Zestawienie wyników obliczeń współczynnika wydajności chłodniczej

Lp.	ε_{uch}	ε_{tch}	ε_{oc}
1			
2			
3			
4			
5			
$\bar{X}$			

Literatura

1. Cengel Y. A, Boles M. A., Thermodynamics. An engineering approach, McGraw-Hill Publishing Company, 2014.
2. Gutkowski K. M., Butrymowicz D. J., Chłodnictwo i klimatyzacja, PWN, Warszawa, 2016.
3. Jones W.P., Klimatyzacja, Arkady, Warszawa 2001.
4. Królicki Z., Termodynamiczne podstawy obniżania temperatury, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
5. Staniszewski B., Termodynamika, PWN, Warszawa 1986
6. Instrukcja użytkowania „Zestaw dydaktyczny pompy ciepła POCP-05 ver. 1.1”, IGLOTECH-KRAKÓW.
7. Zestaw pompy ciepła – POCP-05 „Instrukcja wykonywania eksperymentów”, MGS-Nauka, www.mgs-nauka.com.

