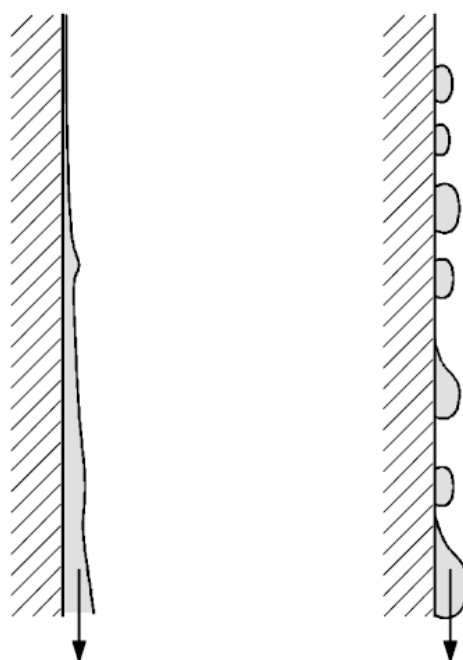


## WNIKANIE CIEPŁA PRZY KONDENSACJI PAR

### 1. Wprowadzenie

Kondensacja występuje, gdy para skontaktuje się z powierzchnią ściany, która ma temperaturę niższą od temperatury nasycenia pary. Wówczas na powierzchni ściany zachodzi przemiana fazowa i powstają krople bądź warstwa cieczy. W zależności od tego mamy do czynienia z kondensacją kropelkową lub filmową. Kondensacja kropelkowa występuje tylko na bardzo gładkich powierzchniach, które nie są zwilżane przez ciecz. Wymiana ciepła jest znacznie większa w przypadku kondensacji kropelkowej, ponieważ nie ma na powierzchni grzejnej ciągłej warstwy cieczy izolującej parę od powierzchni ściany. W praktyce trudno jest wytworzyć bardzo gładkie, nie zwilżalne powierzchnie dlatego zazwyczaj zakłada się istnienie kondensacji filmowej.



Kondensacja filmowa

Kondensacja kropelkowa

Rys. 1. Kondensacja na pionowej powierzchni

W przypadku badań jakie będą prowadzone, powierzchnia jednego z kondensatorów została wypolerowana i pokryta warstwą złota dla uzyskania trwałej, niezwilżalnej powierzchni. Dodatkowo powierzchnia powinna być zupełnie czysta, dlatego w badaniach używa się wody destylowanej.

#### 1.1. Zależność prężności pary nasyconej wody od temperatury.

Zależność pomiędzy temperaturą i ciśnieniem w obszarze granicznym, gaz-ciecz jest wyrażona za pomocą równania Clapeyron-Clausius:

$$r = h'' - h' = T \cdot (s'' - s') = T \cdot (v'' - v') \cdot \frac{dp}{dt} \quad (1.1)$$

Jeśli gaz można uważać za idealny, wówczas objętość fazy ciekłej  $v''$  może być pominięta o objętość gazu wyraża się równaniem:

$$v'' = \frac{R \cdot T}{p} \quad 1.2$$

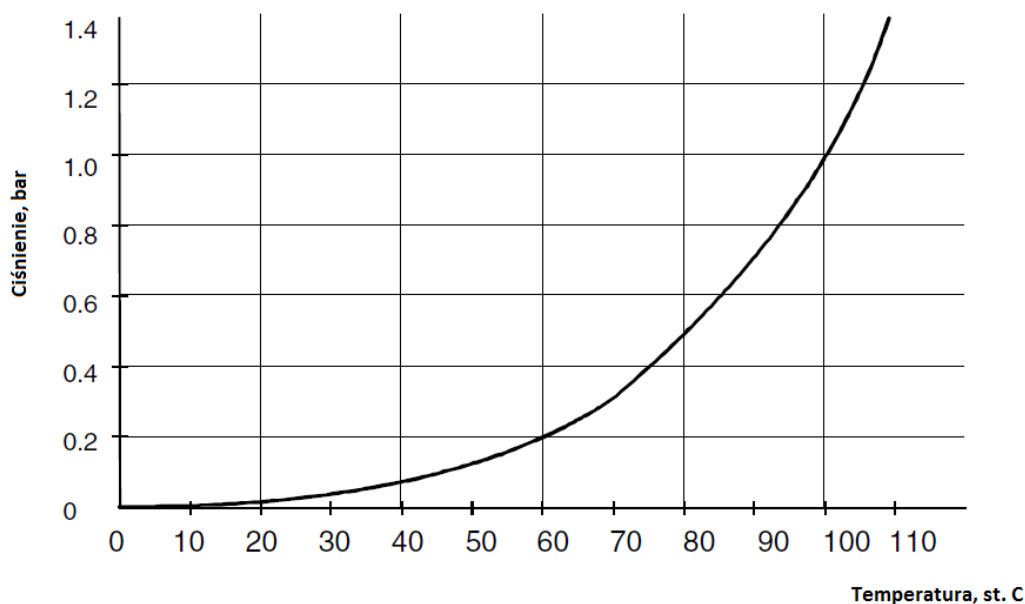
Skąd

$$r = h'' - h' = \frac{R \cdot T^2}{dT} \cdot \frac{dp}{p} \quad 1.3$$

Rozwiązanie powyższego równania różniczkowego daje zależność pomiędzy ciśnieniem  $p$ , temperaturą  $T$  i entalpią parowania  $r$ .

$$p = e^{-\frac{r}{R \cdot T}} \quad 1.4$$

Na rysunku 2 przedstawiono zależność prężności pary wodnej od temperatury.



Rys. 2. Zależność ciśnienia pary wodnej od temperatury

## 1.2. Wyznaczanie współczynnika wnikania ciepła.

Obliczenia teoretyczne dla kondensacji filmowej wykonują się dla kondensacji laminarnej i burzliwej. W przypadku małych rozmiarów kondensatora, występują kondensacja laminarna. Przedstawione poniżej równanie do obliczania współczynnika wnikania ciepła, stosują się dla

przypadku, kiedy  $\rho_C \gg \rho_G$  i gdy zachodzi kondensacja pary na pionowej powierzchni przy niskim ciśnieniu.

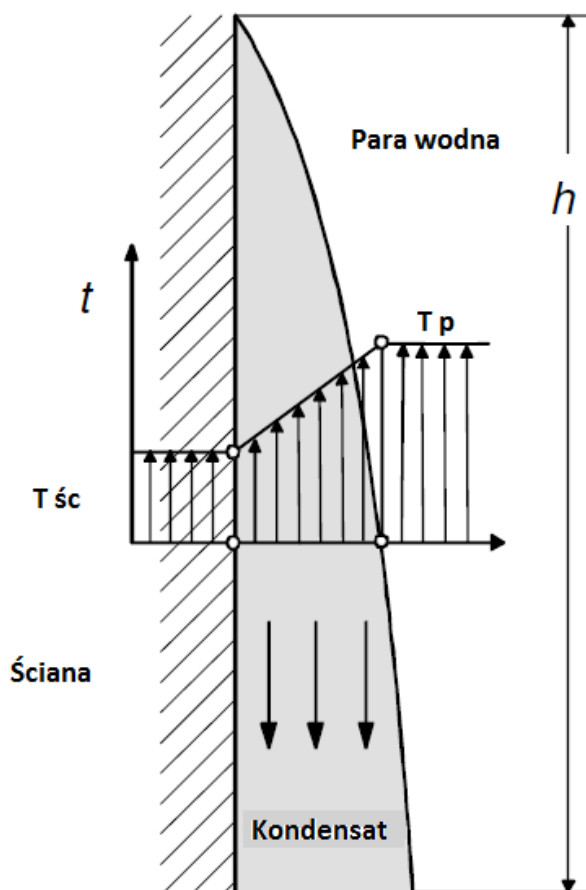
$$\alpha_{\dot{s}r} = 0,943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho g r}{\eta h (T_p - T_{\dot{s}c})}} \quad 1.5$$

W równaniu powyższym  $\lambda$  oznacza przewodnictwo cieplne,  $\rho$  gęstość i  $\eta$  lepkość dynamiczną ciekłego filmu.

$T_p - T_{\dot{s}c}$  To różnica temperatur pomiędzy parą nasyconą a powierzchnią ścianki.

$r$  oznacza entalpię parowania cieczy. W przypadku wody w temperaturze 81 °C i przy ciśnieniu 0,5 bar,  $r = 2305 \frac{kJ}{kg}$ . Przewodnictwo cieplne, gęstość i lepkość ustalane są w średniej temperaturze

$$T_{\dot{s}r} = \frac{T_p + T_{\dot{s}c}}{2} \quad 1.6$$



Rys. 3. Rozkład temperatury w filmie kondensatu

W przypadku kondensacji filmowej wartości współczynników wnikania ciepła mieszczą się zazwyczaj pomiędzy  $4-12 \frac{kW}{m^2 K}$ . W przypadku kondensacji kropelkowej, wartość współczynnika wnikania ciepła może wzrosnąć do  $45 \frac{kW}{m^2 K}$ . Aby wyznaczyć doświadczalnie współczynnik wnikania

ciepła, należy ustalić ilość wymienianego ciepła  $\dot{Q}$  i uzyskaną wartość wprowadzić do równania zamieszczonego poniżej. łącznie z powierzchnią wymiany ciepła  $A$  i różnicą temperatur  $T_p + T_{sc}$

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A(T_p + T_{sc})} \quad 1.7$$

Ilość wymienionego ciepła ustala się znając natężenie przepływu wody chłodzącej kondensator oraz jej temperaturę wlotową i wylotową.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{wyl} + T_{wl}) = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_p \cdot (T_{wyl} + T_{wl}) \quad 1.8$$

W powyższym równaniu  $\dot{m}$  i  $\dot{V}$  oznaczają odpowiednio: masowe natężenie przepływu  $\left[\frac{kg}{s}\right]$  oraz objętościowe natężenie przepływu  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$  wody chłodzącej,  $T_{wyl}$  i  $T_{wl}$  temperatury na wlocie i wylocie wody chłodzącej,  $C_p$  ciepło właściwe,  $\rho$  gęstość wody chłodzącej. Ciepło właściwe ustalane są w średniej temperaturze wody chłodzącej.

$$T_{woda\ \acute{s}r} = \frac{T_{wyl} + T_{wl}}{2} \quad 1.9$$

### 1.3. Gęstość strumienia ciepła oraz współczynnik przenikania ciepła.

Ważnym parametrem pracy kondensatora są wartości gęstości strumienia ciepła i współczynnika przenikania ciepła. Gęstość strumienia ciepła określa tzw. obciążenie cieplne powierzchni kondensatora.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad 1.10$$

Współczynnik przenikania ciepła  $k$  charakteryzuje ruch ciepła na skutek różnicy temperatur kondensującej pary i wody chłodzącej.

$$k = \frac{\dot{Q}}{A(T_p - T_{wody\ \acute{s}r})} \quad 1.11$$

## 2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynników wnikania ciepła podczas kondensacji par.

## 3. Metodyka pomiarów

Poniżej przedstawiono procedurę wykonania badań eksperymentalnych ruchu ciepła podczas kondensacji pary.

### 3.1. Przygotowanie eksperymentu.

Przed przeprowadzaniem badań eksperymentalnych należy usunąć powietrze ze szklanego cylindra. W stanie schłodzonym zbiornik zawiera ciecz i powietrze. Powietrze w znaczący sposób będzie utrudniało przepływ ciepła do kondensatora.

- Obniżyć ciśnienie w zbiorniku do wartości 0,3 bar używając próżniowej pompki wodnej.
- Włączyć podgrzewacz. Podgrzać wodę do około  $80^{\circ}\text{C}$  (T7), przy użyciu połowy mocy grzania (50%). Ciśnienie wzrośnie powtórnie.
- Uruchom powtórnie próżniową pompkę wodną. Podczas spadku ciśnienia, woda zaczyna gwałtownie wrzeć.
- Ustaw pompkę wodną używając zaworu V3 tak, aby woda nie wrzała zbyt intensywnie i nie przedostawała się do próżniowej pompki wodnej. System chłodzenia powinien być gorący tzn. para wodna powinna być usuwana z naczynia. Pozostające w zbiorniku powietrze powinno być usunięte z niego po około 3 minutach i wówczas próżniową pompkę wodną należy wyłączyć.

### 3.2. Określenie współczynników wnikania ciepła.

W przypadku użycia komputera dla zbierania danych z instalacji, współczynnik wnikania ciepła jest obliczany przez komputer a jego wartość wyświetlana na ekranie dla obu przypadków stosowanych kondensatorów.

Poniżej przedstawiono procedurę zbierania danych dla przypadku pracy bez użycia komputera.

- Poprawne rezultaty uzyskuje się dla zakresu temperatur  $90\text{-}100^{\circ}\text{C}$
- Należy nagrzać naczynie do temperatury w granicach  $90\text{-}100^{\circ}\text{C}$
- Ustalić natężenie przepływu wody chłodzącej dla obu kondensatorów tak aby uzyskać wymaganą różnicę temperatur pomiędzy powierzchniami ( T3, T6 ) i temperaturą pary ( T7).
- Ustalić moc grzania tak aby temperatura pary była stała.
- Jeśli to konieczne, ponownie należy ustalić natężenie przepływu wody chłodzącej kondensatory, tak aby utrzymać stałe różnice temperatur T7-T3 i T7-T6.
- Proces kondensacji na powierzchniach rurek kondensatorów powinien być łatwo obserwowany.
- Należy odczytać i zanotować wszystkie temperatury i natężenia przepływu.

Na przykład, następujące wyniki uzyskano dla kondensacji filmowej:

Temperatura wody chłodzącej wlot.  $T1=15,6^{\circ}\text{C}$

Temperatura wody chłodzącej wylot.  $T2=39,3^{\circ}\text{C}$

Temperatura powierzchni kondensatora  $T3=62,9^{\circ}\text{C}$

Temperatura pary wodnej  $T7=72,4^{\circ}\text{C}$

Natężenie przepływu wody chłodzącej  $F_2 = 12,0$  l/h

Średnia temperatura wody chłodzącej wynosi

$$T_{woda\ \acute{s}r} = \frac{T_{wyl} + T_{wl}}{2} = \frac{15,6 + 39,3}{2} = 27,5\ ^\circ\text{C} \quad 3.1$$

Gęstość i ciepło właściwe wody w temperaturze średniej wynoszą

$$\rho = 996,3\ \text{kg/m}^3, \quad C_p = 4,179\ \text{kJ/kg K}$$

Objętościowe natężenie przepływu wody chłodzącej wynosi

$$\dot{V} = 12,0 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$$

Ilość wymienionego ciepła w skraplaczu wyniesie

$$\dot{Q} = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_p \cdot (T_{wyl} - T_{wl}) = 996,3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 4,179 \cdot (39,3 - 15,6) = 0,325\ \text{kJ/s} \quad 3.2$$

Uwzględniając wielkość powierzchni wymiany ciepła skraplacza  $A = 0,003618\ \text{m}^2$  obliczamy gęstość strumienia cieplnego.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{0,325}{0,003618} = 89,82\ \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad 3.3$$

Współczynnik wnikania ciepła możemy obliczyć z poniższej zależności

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A (T_7 - T_3)} = \frac{0,325}{0,003618 \cdot (72,4 - 62,9)} = 9,45\ \frac{\text{kW}}{\text{K m}^2} \quad 3.4$$

Zgodnie z teorią, w podobnych warunkach operacyjnych wartość gęstości strumienia ciepła wynosi około  $10\ \text{kW/Km}^2$ . Wynik uzyskany doświadczalnie jest zatem bliski wartości teoretycznej.

### 3.3. Inne eksperymenty

#### 3.3.1. Wpływ obecności gazów na warunki wymiany ciepła w kondensatorze.

Jeśli w przestrzeni parowej występują gazy, które nie podlegają kondensacji wówczas uzyskiwane wartości współczynników wnikania ciepła są zdecydowanie mniejsze w porównaniu z wartościami uzyskanymi dla przypadku braku gazu w przestrzeni parowej. Efekt ten może być obserwowany przez dodatek powietrza do przestrzeni parowej skraplacza.

- Wytworzyć obniżone ciśnienie przy pomocy próżniowej pompki wodnej (około 0,5 bar)
- Otworzyć zawór odpływowy V4 i wprowadzić powietrze do zbiornika.
- Zamknąć zawór odpływowy gdy ciśnienie osiągnie wartość 0,9 bar.

Określić współczynniki wnikania ciepła tak jak było to mówione w paragrafie 5.2. uzyskane wartości współczynników wnikania ciepła powinny być zdecydowanie mniejsze niż w przypadku kondensacji par bez obecności gazów w przestrzeni parowej.

### 3.3.2 Wpływ ciśnienia na uzyskiwane wartości współczynników wnikania ciepła.

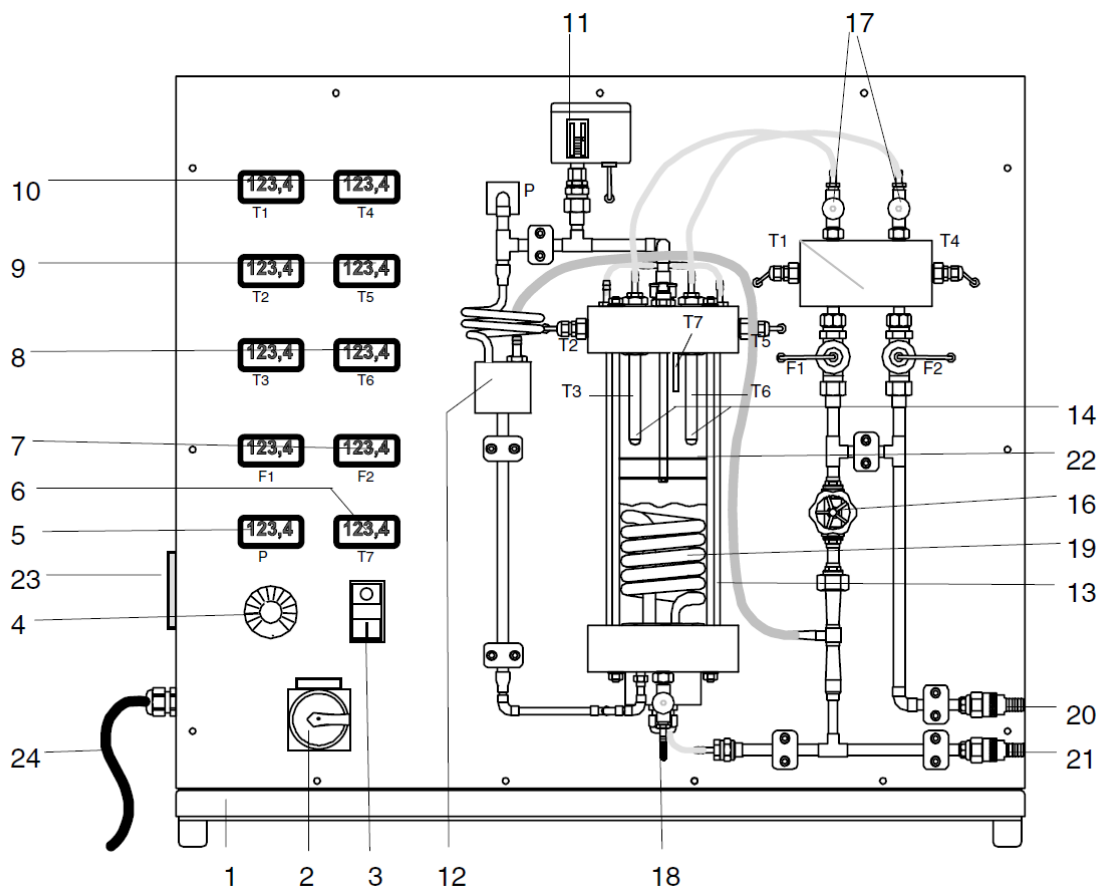
Należy przeprowadzić szereg pomiarów przy obniżonym ciśnieniu. Na przykład, przy ciśnieniu 0,5 bar temperatura powinna wynieść 81°C. W tych warunkach wartości współczynników wnikania ciepła powinny być mniejsze niż przy ciśnieniu atmosferycznym.

### 3.3.3 Wpływ różnicy temperatur pary wodnej i powierzchni kondensatora na uzyskiwane wartości współczynników wnikania ciepła.

W przypadku małych różnic temperatur pomiędzy parą grzejną i powierzchnią kondensatora, współczynnik wnikania ciepła powinien być większy niż dla przypadku dużych wartości różnic temperatur. Jest to spowodowane efektem zmniejszonej grubości ciekłego filmu oddzielającego parę od powierzchni skraplacza.

## 4. Aparatura pomiarowa

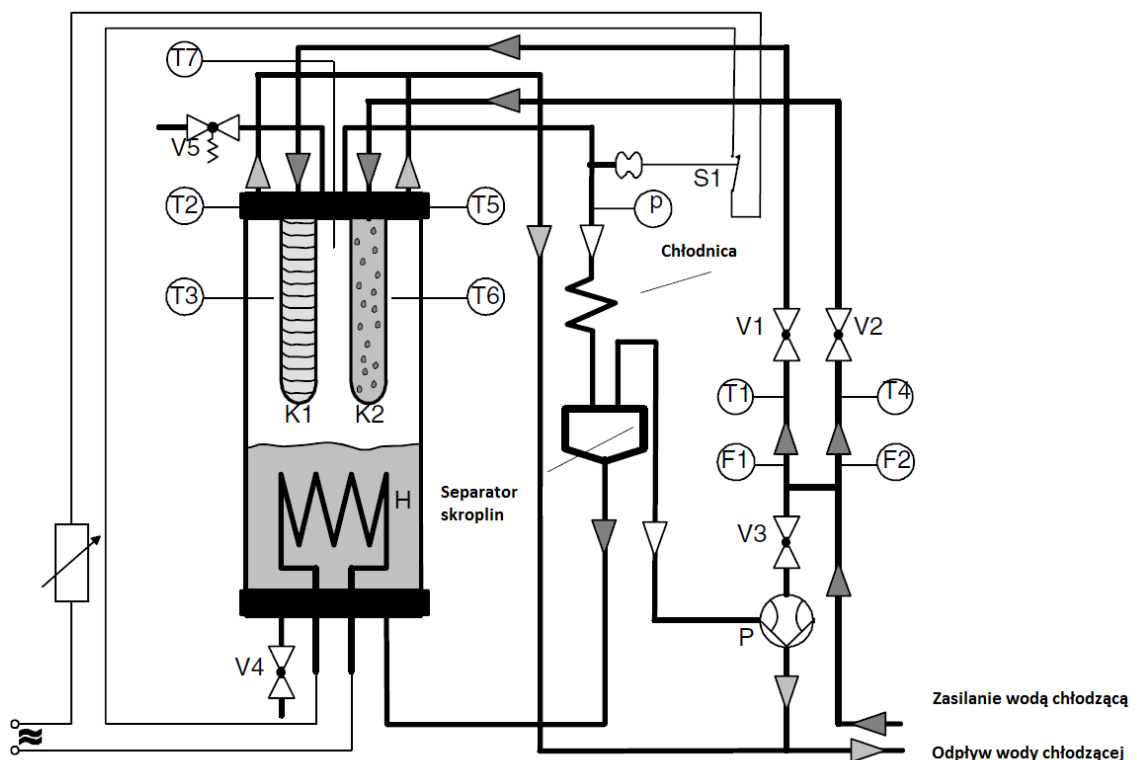
Konstrukcje instalacji badawczej przedstawiono na rysunku rys.4, a jej schemat na rysunku rys.5.



Rys. 4. Konstrukcja instalacji badawczej

1. Tablica do której przymocowana jest instalacja
2. Włącznik główny
3. Włącznik grzałki

4. Pokrętło regulacji mocy grzania
5. Ekran wskazania ciśnienia
6. Ekran wskazania temperatury T7
7. Ekran wskazan natężenia przepływu wody chłodzącej F1, F2
8. Wskazania temperatury powierzchni kondensatorów T3, T6
9. Wskazania temperatur wody chłodzącej na wylotach T2, T5
10. Wskazania temperatur wody chłodzącej na wlotach T1, T4
11. Przełącznik ciśnienia
12. Separator kondensatu
13. Zbiornik
14. Rury kondensatorów
15. Pompa próżniowa
16. Zawór nastawy pompy próżniowej
17. Zawór nastawy wody chłodzącej
18. Zawór umożliwiający napełnienie i opróżnienie zbiornika
19. Podgrzewacz
20. Zasilanie wodą chłodzącą
21. Odpływ wody chłodzącej
22. Łapacz kropl
23. Gniazdo podłączenia komputera
24. Przewód głównego zasilania



Rys. 5. Schemat instalacji badawczej

Woda chłodząca przepływa wewnątrz tych rur. Ilość ciepła wymieniana w rurach kondensatora jest określana przez pomiar natężenia przepływu wody chłodzącej ( F1 i F2 ) i temperatur na wlocie



i wylocie wody chłodzącej ( T1, T2, T4, T5 ). Natężenia przepływu wody chłodzącej do rur kondensatorów ustalane są za pomocą zaworów V1 i V2. Podgrzewacz wody znajduje się w dolnej części zbiornika z wodą. Moc grzania jest ustawiana na autotransformatorze. Temperatura par jest mierzona za pomocą termopary T7 a ciśnienie manometrem p. Zawór bezpieczeństwa V5 zabezpiecza instalację przed nadmiernym wzrostem ciśnienia. W przypadku wzrostu ciśnienia do zadanej wartości następuje wyłączenie grzałek za pomocą wyłącznika S1. Istnieje możliwość obniżania ciśnienia w zbiorniku przy użyciu wodnej pompki próżniowej P. W tym celu woda doprowadzana jest do pompki przy użyciu zaworu V3. Wbudowany w instalację zawór zwrotny na linii z wodną pompką próżniową zapobiega zawracaniu wody do zbiornika, w którym zachodzi wrzenie cieczy. W celu zabezpieczenia instalacji przed ucieczką pary i tym samym stratami wrzącej cieczy, rura ssawna próżniowej pompki wodnej połączona jest z separatorem kropel i systemem chłodzenia oparów po wyjściu ze zbiornika w którym zachodzi wrzenie cieczy. Skroplone pary po wyjściu z separatora kropel odprowadzane są do zbiornika z wrzącą cieczą. Zawór V4 służy do opróżniania zbiornika z cieczy.

#### DANE TECHNICZNE.

##### **Zbiornik roboczy:**

Objętość zbiornika: 3,8 dm<sup>3</sup>

Ilość cieczy w zbiorniku: ok. 1,1 dm<sup>3</sup>

Zakres ciśnienia pracy urządzenia: 0,1-1,0 bar, abs

##### **Próżniowa pompka wodna:**

Natężenie przepływu wody: 240-720 dm<sup>3</sup>/h

Końcowe ciśnienie: 16 mbar ( dla wody o ciśnieniu 0,5 bar i temperaturze 14°C )

##### **Skraplacz:**

Średnica: 12 mm

Długość: 96 mm

Powierzchnia wymiany ciepła: 36,18 cm<sup>2</sup>

Wykończenie powierzchni:

-Dla kondensacji kropelkowej polerowane złoto.

- Dla kondensacji filmowej, zmatowana miedź.

Natężenie przepływu wody chłodzącej: 0-200 dm<sup>3</sup>/h dla każdego z kondensatorów.

##### **Podgrzewacz:**

Nastawiana moc grzania w zakresie 0-3000 W.

##### **Parametry mierzone:**

Temperatura wody chłodzącej: PT100, zakres pomiaru temperatury 0-100°C

Temperatura pary: PT100, zakres pomiaru temperatury 0-200°C

Temperatura powierzchni skraplacza: Termopara typu K, zakres pomiaru temperatury 0-200°C

Natężenie przepływu wody: Wirnik z łopatkami, zakres pomiaru natężenia przepływu 0-200 dm<sup>3</sup>/h

Ciśnienie: Czujnik ciśnienia, zakres pomiaru ciśnienia 0-4 bar, abs

**Gromadzenie danych z instalacji:**

Urządzenie podłączane do komputera za pomocą przyłączenia USB.

Oprogramowanie: LAB-VIEW Runtime

Wymagania systemowe: PC z procesorem Pentium IV, 1 GHz.

Minimum 1024 MB RAM.

Minimum 1 GB dostępnej pamięci na twardym dysku.

1 port USB

Karta graficzna z rozdzielczością min. 1024x768 pixel, True Color

Windows XP/ Vista.