



**POLITECHNIKA KRAKOWSKA**  
Instytut Inżynierii Ciepłej i Procesowej  
Zakład Termodynamiki i Pomiarów Maszyn Ciepłych

LABORATORIUM TERMODYNAMIKI I POMIARÓW MASZYN CIEPLNYCH

Podstawy teoretyczne do ćwiczeń laboratoryjnych

**PARA NASYCONA MOKRA I PRZEGRZANA**

opracował: dr inż. Jerzy Żelasko

**Stany skupienia – wprowadzenie definicji**

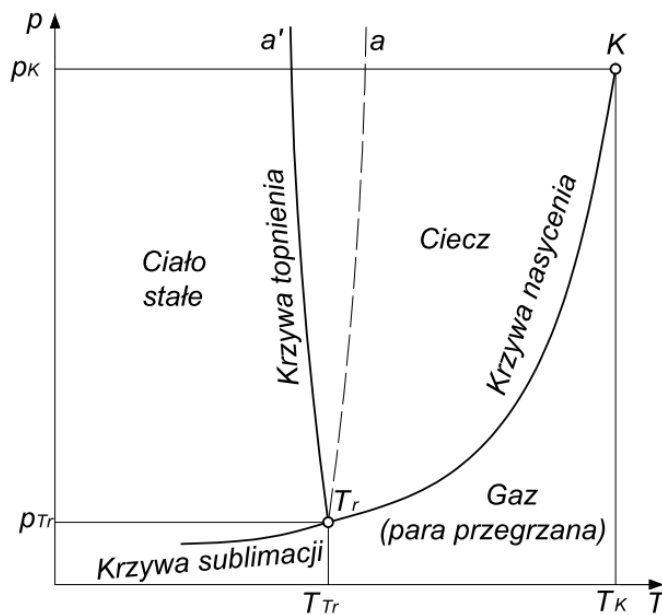
Każda substancja może występować w postaci stałej, ciekłej i gazowej. W gazach siły wzajemnego oddziaływania między cząsteczkami są na tyle małe, że umożliwiają samodzielny ruch postępowy cząsteczek. Duża odległość między cząsteczkami sprawia, że gaz ma zdolność rozprzestrzeniania się w całej dostępnej dla niego objętości. Zwiększanie objętości gazu prowadzące do jego skroplenia i powstawania cieczy odbywa się na drodze zwiększania ciśnienia lub obniżenia temperatury. Ciecz łatwo zmienia swój kształt, ale przeciwstawia się zmianom objętości. Dalsze zwiększanie ciśnienia lub obniżania temperatury prowadzi do powstawania silnych oddziaływań molekularnych między cząsteczkami. Efektem jest powstanie ciała stałego o uporządkowanej strukturze.

Dla ciał chemicznie jednorodnych zmiana stanu skupienia (przejście fazowe) odbywa się przy ustalonym ciśnieniu w ściśle określonej i stałej temperaturze. W układzie współrzędnych  $p, T$  można więc wyodrębnić trzy obszary: obszar stanu stałego, ciekłego i gazowego. Obszary te są rozgraniczone od siebie krzywymi przemian fazowych. W punktach położonych na krzywych mogą obok siebie współistnieć w równowadze termodynamicznej dwie sąsiednie fazy rozważanej substancji.

Zwiększając się wartościom ciśnienia odpowiadają na ogół rosnące wartości temperatury na krzywych przemian fazowych (krzywa  $a$ ). Nietypowy przebieg ma krzywa topnienia (krzepnięcia) dla wody (krzywa  $a'$ ), a wynika to ze zwiększania się jej objętości właściwej przy krzepnięciu.

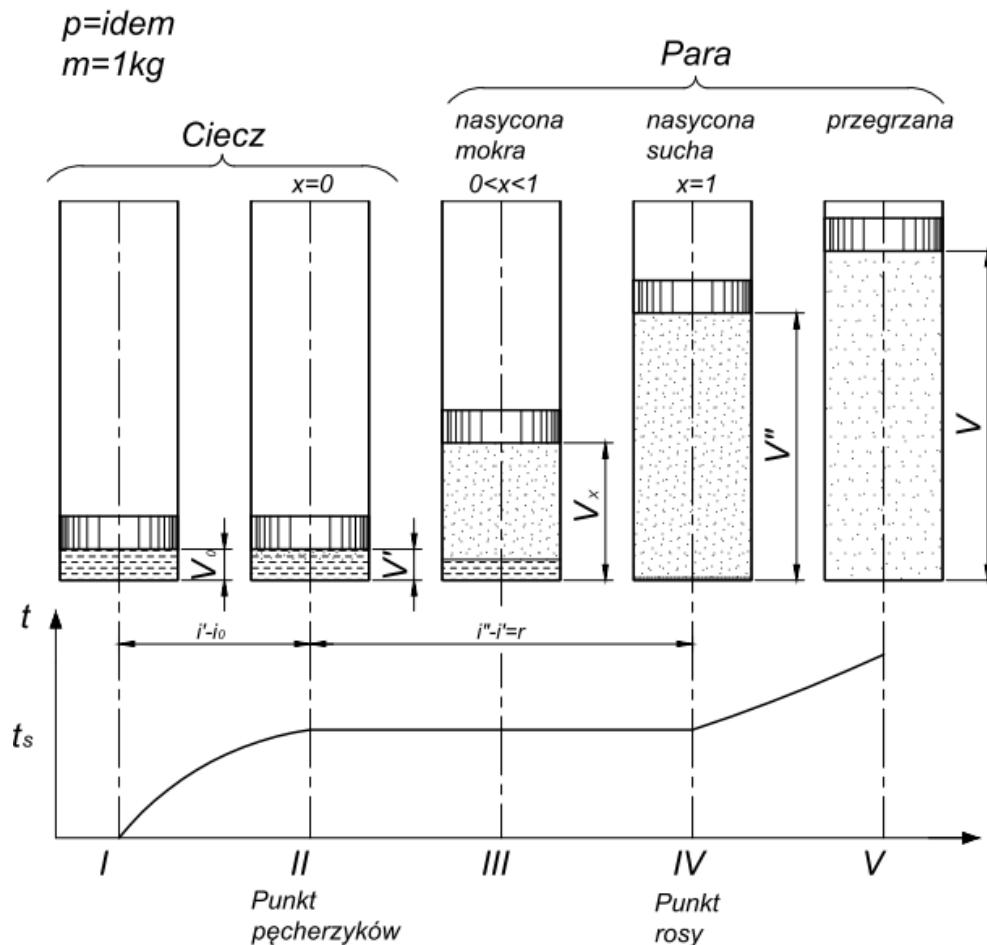
Krzywe przemian fazowych spotykają się w punkcie potrójnym  $T_r$ , w którym mogą obok siebie istnieć w równowadze termodynamicznej wszystkie trzy fazy.

Krzywa parowania (skraplania) kończy się w punkcie krytycznym  $K$ . Powyżej ciśnienia punktu krytycznego nie istnieje rozgraniczenie między fazą ciekłą i gazową (znika zmiennik rozdzielający fazy), a zmiana gęstości przy zmianie temperatury odbywa się w sposób ciągły.



Rys. 1. Wykres przemian fazowych w układzie współrzędnych  $p$ - $T$ :  $K$  – punkt krytyczny,  $T_r$  – punkt potrójny.

Najczęściej stosowanym nośnikiem w energetyce cieplnej jest woda i jej para, stąd na rys. 2 przypomniany jest proces izobaryczny odparowania wody. Dla innych substancji jednorodnych chemicznie proces zachodzi w ten sam sposób.



Rys. 2. Izobaryczny proces parowania.

Pomiędzy stanem I i II woda w stanie ciekłym nagrzewa się do temperatury wrzenia dzięki dostarczanemu ciepłu. Po osiągnięciu temperatury wrzenia w punkcie II (równy temperaturze wrzenia dla danego ciśnienia) w cieczy pojawiają się pęcherzyki pary. Wielkości właściwe w punktach pęcherzyków oznaczone są symbolami  $v'$ ,  $i'$ ,  $u'$ ,  $s'$ . Pomiędzy stanem II i IV dostarczane ciepło idzie w całości na ciepło przemiany fazowej (ciepło parowania), tak więc temperatura wody nie ulega zmianie. W cylindrze znajduje się mieszanka wrzącej wody i pary nasyconej o zmienionych proporcjach określana mianem pary mokrej. W punkcie IV, w zależności od kierunku procesu, znika ostatnia lub pojawia się pierwsza kropla wody. Para w tym stanie nazywana jest parą nasyconą suchą, a wielkości właściwe w tym punkcie oznaczają się symbolami  $v''$ ,  $i''$ ,  $u''$ ,  $s''$ . Dalsze dostarczanie ciepła powoduje wzrost temperatury pary, która z pary nasyconej suchej staje się parą przegrzaną.

Dla jednoznacznego określenia parametrów pary nasyconej mokrej używamy dwóch wielkości, najczęściej jest to ciśnienie  $p$  i stopień suchości pary nasyconej  $x$  definiowany jako iloraz masy pary nasyconej suchej  $m''$  do masy pary nasyconej mokrej:

$$x = \frac{m''}{m' + m''} \quad (1)$$

W przypadku pary przegrzanej temperatura i ciśnienie są parametrami wzajemnie niezależnymi i jest to para parametrów najczęściej wykorzystywanych do jednoznacznego określenia jej stanu.

Z definicji stopnia suchości łatwo wywnioskować, że jeden kilogram pary nasyconej mokrej zawiera  $x$  kg pary nasyconej suchej o parametrach  $v''$ ,  $i''$ ,  $s''$  i  $(1 - x)$  kg cieczy o parametrach  $v'$ ,  $i'$ ,  $s'$ . Stąd objętość właściwa, entalpia i entropia pary nasyconej mokrej wyrażone są wzorami:

$$\begin{aligned} v &= v' + x(v'' - v') \\ i &= i' + x(i'' - i') = i' + xr \\ s &= s' + x(s'' - s') \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie  $r$  – entalpia parowania.

Parametry pary nasyconej mokrej często odczytujemy z tablic, w przypadku pary przegrzanej wygodniejsze jest wyznaczenie wartości w oparciu o wykres  $i$ - $s$  pary przegrzanej lub za pomocą programów numerycznych.

Pozostałe podstawowe informacje dotyczące pary należy uzupełnić w oparciu o wykład lub materiały źródłowe.

### Pomiar parametrów pary mokrej

W przypadku pary nasyconej mokrej, oprócz parametrów prostych do zmierzenia tj. ciśnienia i temperatury często niezbędne jest wyznaczenie stopnia suchości pary mokrej  $x$ .

Stosuje się kilka metod wyznaczania stopnia suchości:

1. Za pomocą kalorymetru dławiącego. Ten sposób pomiaru wykorzystuje tę właściwość, że po zdławieniu pary mokrej o początkowym stopniu suchości można otrzymać parę przegrzaną. Kalorymetry dławiące wymagają dużych spadków ciśnienia i mogą być stosowane dla czynników, dla których gradient  $\frac{dp}{di}$  dla krzywej granicznej  $x = 1$  jest dodatni, gdyż tylko wówczas dla stopnia suchości  $x > 0,5$  para mokra osusza się. Zdławiona próbka czynnika często ma niskie ciśnienie, co utrudnia usunięcie jej z kalorymetru. Stopień suchości pary wyznaczony jest z równania dławienia izentalpowego  $i_1 = i_2$ :

$$x_1 i_1'' + (1 - x_1) i_1' = i_2 \quad (3)$$

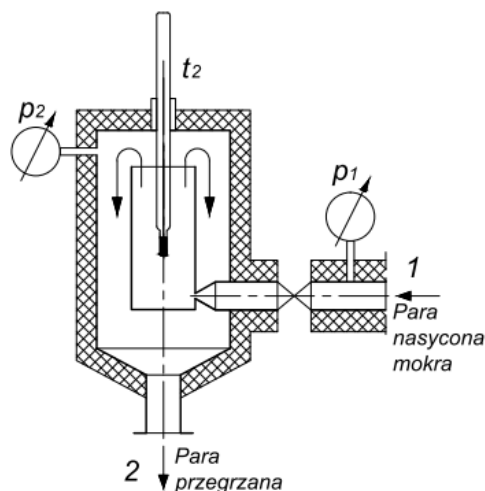
gdzie:

$i_1', i_1''$  - entalpia cieczy i pary suchej nasyconej przed zdławieniem,

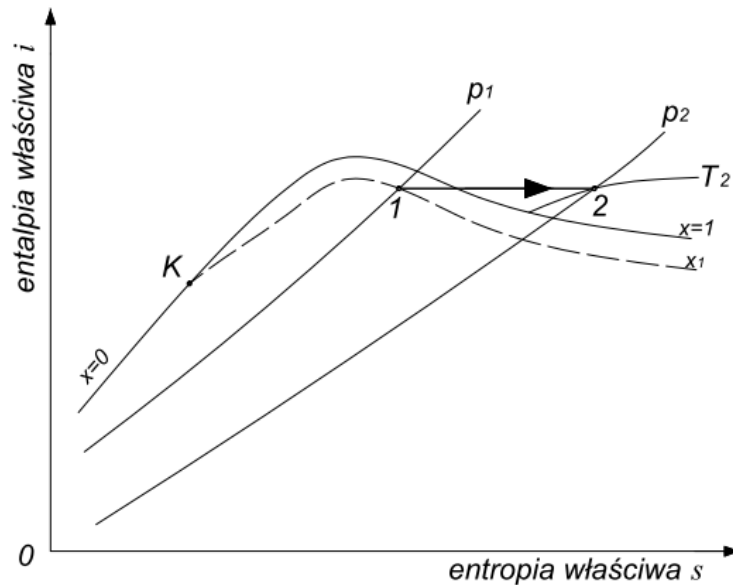
$i_2$  - entalpia pary po zdławieniu.

lub po przekształceniach

$$x_1 = \frac{i_2 - i_1'}{r_1} \quad \text{gdzie} \quad r_1 = i_1' - i_1'' \quad (4)$$

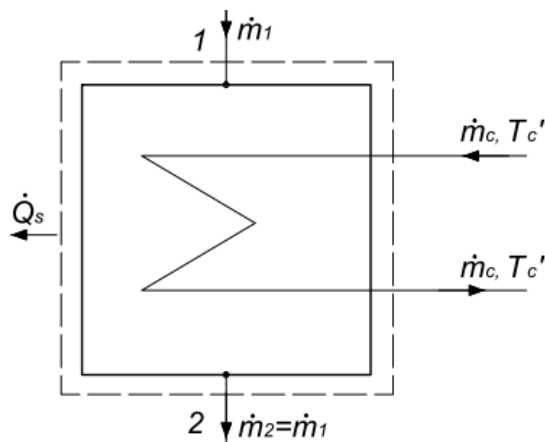


Rys. 3. Kalorymetr dławiący (Pibody)



Rys. 4. Graficzne przedstawienie dławienia izentalpowego pary mokrej

2. Doprowadzenie pary nasyconej mokrej do stanu jednofazowego poprzez przechłodzenie lub przegrzanie w wymienniku ciepła:
  - a) Za pomocą chłodnicy skraplamy parę i dochładzamy skropliny tak, aby możliwy był pomiar stanu cieczy. Na dolocie pary mierzymy ciśnienie, a na wylocie temperaturę skroplin.



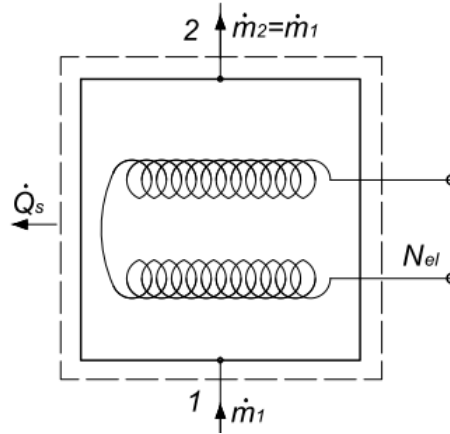
Rys. 5. Schemat działania skraplacza (chłodnicy):  $\dot{m}_1$  - strumień masy pary nasyconej mokrej,  $\dot{m}_c$  - strumień masy cieczy chłodzącej,  $i_1', i_1''$  - entalpie cieczy i pary nasyconej,  $x_1$  - stopień suchości pary,  $T_c', T_c'', i_c', i_c''$  - temperatura cieczy chłodzącej na wlocie i wylocie,  $T_2$  - temperatura skroplin po przechłodzeniu,  $\dot{Q}_s$  - straty ciepła do otoczenia

Z pierwszej zasady termodynamiki dla maszyn przepływowych:

$$\begin{aligned} \dot{E}_w &= \dot{E}_d \\ \dot{m}_1 i_1 + \dot{m}_c i_c' &= \dot{m}_1 i_2 + \dot{m}_c i_c'' + \dot{Q}_s \\ \dot{m}_c (i_c' - i_c'') + \dot{m}_1 (i_1 - i_2) + \dot{Q}_s &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie poszukiwane  $x_1$  zawarte jest w wyrażeniu  $i_1 = i_1' + x_1 r_1$ .

b) Za pomocą nagrzewnicy doprowadzamy parę do stanu przegrzanego na wyjściu z wymiennika. Najwygodniej realizujemy tę metodę za pomocą grzałki elektrycznej (można też wykorzystać wymiennik zasilany parą o wyższych parametrach). Na dolocie pary nasyconej mokrej mierzymy ciśnienie, a na wylocie ciśnienie i temperaturę pary przegrzanej.



Rys. 6. Schemat działania nagrzewnicy z grzałką elektryczną:  $\dot{m}_1$ ,  $i_1$  – strumień masy i entalpia pary nasyconej,  $N_{el}$  – moc elektryczna grzejnika,  $\dot{Q}_s$  – straty ciepła do otoczenia,  $i_2$  – entalpia pary przegrzanej

Równanie bilansu ma postać:

$$\dot{m}_1 i_1 + N_{el} = \dot{m}_1 i_2 + \dot{Q}_s \quad \text{gdzie} \quad i_1 = i'_1 + x_1 r_1 \quad (6)$$

- Zastosowanie rozdzielacza faz tak, aby możliwy był pomiar strumienia mas faz rozdzielonych w stanie nasycenia. Podstawą takiego układu jest osuszacz-rozdzielacz faz separujący ciecz od pary nasyconej suchej. Do pomiaru strumienia pary nasyconej suchej stosujemy np. zwężkę pomiarową, a do pomiaru strumienia cieczy dowolną metodę (rotometr, przepływomierze, itp.)

### Pomiar parametrów pary przegrzanej

Do jednoznacznego wyznaczenia parametrów pary przegrzanej najczęściej stosuje się pomiar pary parametrów: ciśnienia  $p$  i temperatury  $T$ . Pozostałe teoretycznie możliwe parametry pary ( $v, T$ ) i ( $v, p$ ) są bardzo rzadko stosowane. Pozostałe wielkości fizyczne opisujące stan pary przegrzanej ( $v, i, s, \text{itp.}$ ) odczytuje się z wykresu  $i-s$  dla tej pary lub w oparciu o programy numeryczne (dostępne w pakietach dla gazów technicznych, czynników chłodniczych, itp.).

### Pomiar ilości przepływającej pary

Pomiar strumienia masy pary przepływającej przez maszynę cieplną (turbinę, odpowiednie stopnie wyparki) można wyznaczyć przez:

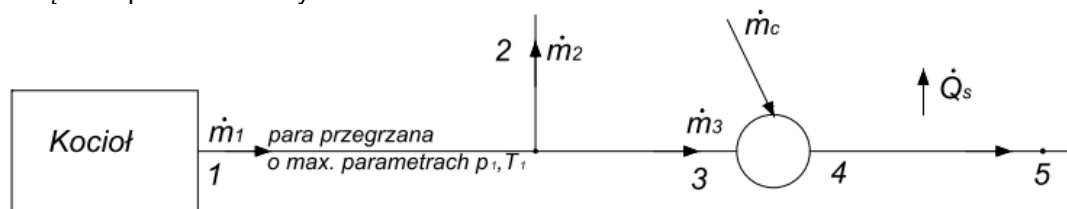
- Wyznaczenie różnicy ciśnień (spiętrzenia) na zwężce pomiarowej (dysze, kryzy) zabudowanej w przewodzie parowym. Do określenia przepływu konieczna jest również znajomość parametrów czynnika przed zwężką.
- Określenie ilości kropli uzyskanych w skraplaczu. Metoda ta daje dobre wyniki przy całkowitej szczelności skraplacza i uwzględnieniu ilości pary (turbina) i kropli (wyparka), które zostały zużyte na uszczelnienie łożnic i pomp próżniowych.

**Procesy ciepłne oparte o parę nasyconą mokrą i parę przegrzaną**

1. Wytwarzanie pary i jej transport do odbiorników

Para technologiczna nasycona mokra i przegrzana wytwarzana jest w różnego typu kotłach zasilanych praktycznie wszelkiego typu paliwem oraz powstaje czasami jako produkt odzysku energii w wymiennikach ciepła zasilanych np. spalinami. Jeśli chodzi o nakłady inwestycyjne wytwarzanie w kotłach pary nasyconej mokrej jest procesem tańszym niż uzyskanie pary przegrzanej. Wiąże się to z polem powierzchni wymiennika w kotle proces wymiany ciepła między spalinami a parą przegrzaną zachodzi znacznie wolniej niż między spalinami i wrzącą cieczą.

W przypadku rozbudowanych procesów technologicznych często stosuje się kotły wytwarzające parę przegrzaną o maksymalnych żądanych przez proces parametrach. Obniżenie parametrów pary w niższych punktach linii produkcyjnej, nie wymagających tak wysokich parametrów, odbywa się na zasadzie wstrzyknięcia do pary kondensatu po przetransportowaniu jej rurociągiem do miejsca odbioru. Schemat takiego rozwiązania pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Schemat transportu pary przegrzanej ze zmianą jej parametrów:  $\dot{m}_n$ ,  $n = 1 \div 5$  – strumienie mas pary w odpowiednich punktach,  $\dot{m}_c$  – strumień masy kondensatu,  $i_n$ ,  $n = 1 \div 5$  – entalpie pary przegrzanej w odpowiednich punktach,  $\dot{Q}_s$  – strata ciepła do otoczenia między punktami 4 i 5

Stąd z bilansu energii otrzymujemy:

$$\dot{m}_3 i_3 + \dot{m}_c i_c = \dot{m}_4 i_4 \quad (7)$$

Z bilansu ilości substancji:

$$\begin{aligned} \dot{m}_4 &= \dot{m}_3 + \dot{m}_c \\ \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \\ \dot{m}_4 &= \dot{m}_5 \end{aligned} \quad (8)$$

a ilość ciepła odprowadzanego do otoczenia między punktami 4 i 5

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_4 (i_5 - i_4) \quad (9)$$

Proces wstrzyknięcia kondensatu do rurociągu (przez dysze) wiąże się ze spadkiem temperatury i wzrostem ilości pary przegrzanej przy praktycznie zachowanym ciśnieniu. Spadki ciśnienia następują samoczynnie przy przepływie przez długie odcinki rurociągu i armaturę, zamierzone realizowane są w zaworach dławiących. W przypadku przesyłania pary nasyconej mokrej na rurociągach należy zainstalować odpowiednią ilość odwadniaczy odprowadzających wykraplające w ciecz, a w celu uniknięcia zapowietrzenia instalacji należy wyposażyć ją w odpowietrzniki.

Przesył pary realizowany jest najczęściej dla celów technologicznych (zasilanie turbin, wymienników, mieszalników, pras zgrzewalniczych, itp.), wykorzystywany też jest w ogrzewnictwie (nagrzewnice parowe, itp.).

## 2. Odparowanie

Jednym z podstawowych procesów w technologii chemicznej i spożywczej jest zagęszczenie roztworów. Stosuje się je także przy unieszkodliwianiu ścieków przepływowych i otrzymywaniu wody pitnej z morskiej wody.

Zagęszczanie roztworu realizowane jest przez odparowanie części rozpuszczalnika, najintensywniej przebiega w temperaturze wrzenia. W przemyśle spożywczym ze względu na jakość produktu proces prowadzi się często pod ciśnieniem niższym niż ciśnienie otoczenia – wówczas wrzenie roztworu odbywa się przy temperaturze niższej niż 100 °C (Tabela 1)

Tabela 1. Zależność temperatury wrzenia od ciśnienia dla wody

Ciśnienie p [MPa]	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01
Temperatura wrzenia t [°C]	151,84	120,23	99,64	81,35	45,84

Do realizacji procesu potrzebna jest specjalna aparatura (np. pompa próżniowa) do usuwania gazów nie skraplających się. Roztwory zagęszczanie w przemyśle spożywczym są wieloskładnikowe, czasami wielofazowe i zawierają zarówno składniki lotne, jak i nielotne. Wraz z parą do fazy grupowej wnikają związki aromatyczne, alkohole, itp. umożliwia to odzysk istotnych dla jakości wytwarzanego produktu związków lotnych.

Proces odparowania realizowany jest w urządzeniach zwanych wyparkami składającymi się z trzech podstawowych elementów: komory grzejnika, komory oparów (separator) i skraplacza. W skraplaczu, poprzez skroplenie oparów, wytwarza się obniżone ciśnienie w wyparce. Zapewnienie prawidłowego usuwania w sposób ciągły gazów nieskraplających (1 – 2 % w stosunku do pary) umożliwi ciągłą realizację procesu odparowania. Proces ten najekonomiczniej realizowany jest w nowoczesnych wyparkach wielodziałowych. Wrząca para mokra dosyłana z komory grzejnej do separatora jest w nim rozdzielana na ciecz i parę suchą. Para sucha zasila kolejny stopień wyparki, w którym do odparowania w procesie wrzenia cieczy w celu jej dalszego zagęszczenia. Jest to możliwe pod warunkiem istnienia niezbędnej dla prawidłowej wymiany ciepła różnicy temperatur. Jak pokazuje Tabela 1 całkowita użyteczna różnica temperatur wynosi dla przemysłu spożywczego kilkadziesiąt stopni, a dla pozostałych (przemysł chemiczny, itp.) nawet powyżej 100 [°C]. Oznacza to możliwość konstruowania wyparek składających się z kilku do kilkadziesiątu stopni odparowania czynnika. W tego typu konstrukcjach para z kotła (tzw. para świeża) zasila często tylko I stopień urządzenia, każdy kolejne „h”-ty stopień zasilany jest oparami powstającymi w stopniu „n-1”. Tak skonstruowane urządzenie decyduje o ekonomicznych parametrach procesu do odparowania  $\dot{m}$  strumienia czynnika potrzeba w przybliżeniu  $\dot{m}_p$  pary świeżej

$$\dot{m}_p \approx \frac{\dot{m}}{n} \quad (9)$$

gdzie:

$n$  - ilość stopni wyparki

a wzór nie uwzględnia ilości pary pokrywającej straty energii w procesie.





Rys. 8. Wyparka pięciostopniowa.

### 3. Instalacje chłodnicze

Zmiana fazy czynnika z ciekłej na parową i z powrotem jest podstawą działania obiegów chłodniczych. Odparowująca w wyniku gwałtownego spadku ciśnienia w parowniku ciecz, przechodzi w stan pary nasyconej mokrej, a następnie w stan pary nasyconej suchej. Aby uniknąć niebezpieczeństwa tzw. uderzenia hydraulicznego przed sprężarką para jest przegrzewana o kilka stopni i do sprężarki doprowadzona jest już jako para przegrzana. W obiegach chłodniczych najczęściej stosowanymi czynnikami są freony, ale spotyka się też urządzenia pracujące na propan-butanie, CO<sub>2</sub>, itp.

#### **Lista zagadnień do opanowania.**

1. Stany skupienia i przejścia fazowe (przemiany charakterystyczne) jednorodnych substancji. Wykres  $p-t$  dla wody i innych substancji.
2. Izobaryczny proces parowania cieczy – wielkości charakteryzujące parę wodną, wykresy  $T-s$  oraz  $i-s$ .
3. Para mokra, nasycona i przegrzana.
4. Stopień suchości pary mokrej – definicja i metody wyznaczania.
5. Pomiar parametrów pary przegrzanej.

#### **Literatura uzupełniająca:**

1. T.R. Fodemski – Pomiary cieplne cz.I i II
2. M. Mieszkowski - Pomiary cieplne i energetyczne
3. T. Bohdal i in. – Ćwiczenia laboratoryjne z termodynamiki
4. D. Foltańska-Werszko - Teoria systemów cieplnych. Termodynamika - podstawy. (dostępna [on-line](#))