

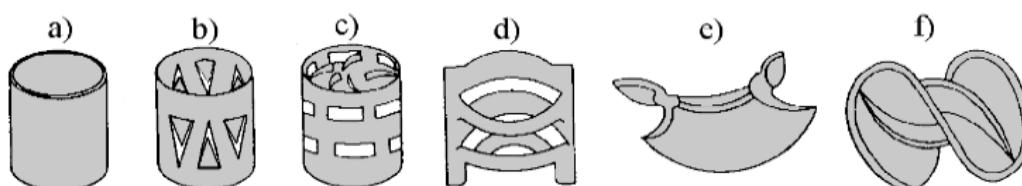
## PRZEPIY DWUFAZOWY GAZ-CIECZ W KOLUMNIE Z WYPELNIENIEM

### 1. Wprowadzenie

Przepływy w układach dwufazowych należą do najczęstszych przypadków przepływu i występują we wszystkich operacjach jednostkowych. Spotykamy się z nimi w pewnych typach wymienników ciepła i aparatach suszarniczych, głównie jednak w wymiennikach masy za jakie należy uważać kolumny destylacyjne, absorpcyjne, adsorpcyjne i ekstrakcyjne. Również zaliczyć tu należy przepływy przez reaktory chemiczne, szczególnie z katalizatorem.

Wiele aparatów służących w procesach technologicznych do wymiany masy, zawiera w swoim wnętrzu elementy rozwijające powierzchnię kontaktu pomiędzy fazami. Elementy te potocznie nazywane są wypełnieniem. Wypełnienie umieszczone jest najczęściej w rurze pionowej zwanej kolumną, przez którą przepływają dwie fazy: ciekła i gazowa lub dwie ciekłe. Średnica kolumny w aparatach laboratoryjnych wynosić może 10 - 50 mm, w półtechnicznych do 500 mm, w aparatach przemysłowych służących do wymiany ciepła lub masy nie przekracza na ogół 3 - 6 m.

Elementy wypełnień najczęściej są wykonane z materiałów ceramicznych, stalowych lub z tworzyw sztucznych. Najbardziej rozpowszechnione rodzaje wypełnień zostały przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Popularne wypełnienia stosowane w kolumnach:

- a) pierścień Raschiga, b) pierścień Białeckiego, c) pierścień Palla,  
d) Interpack, e) siodełko Intalox, f) siodełko Berla

Na hydraulikę przepływu, tak gazu jak i cieczy, przez warstwę wypełnienia, bezpośredni wpływ mają dwie wielkości związane z kształtem i wymiarami elementów stanowiących warstwę. Są to:

- wolna objętość (tzw. porowatość) wypełnienia, definiowana jako stosunek objętości wolnych przestrzeni w warstwie do objętości całej warstwy. Wielkość ta oznaczana jest symbolem  $\epsilon$  [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ].
- powierzchnia jednostkowa wypełnienia, definiowana jako wielkość rozwiniętej powierzchni reprezentowanej przez  $1\text{m}^3$  danego wypełnienia. Oznaczana jest symbolem  $a$  [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ].

Wartość krytyczna liczby Reynoldsa dla sływu cieczy po wypełnieniu jest trudna do jednoznacznego określenia ze względu na ciągłe mieszanie się cieczy podczas sływu z jednego pierścienia na drugi.

Zastępcza liczba Reynoldsa dla fazy gazowej przepływającej przez wypełnienie jest określona zależnością:

$$Re_g = \frac{w_{gm}}{a \cdot \eta_g} \quad (1)$$

Zastępcza liczba Reynoldsa dla fazy ciekłej spływającej po wypełnieniu:

$$Re_c = \frac{w_{cm}}{a \cdot \eta_c} \quad (2)$$

gdzie:  $w_{gm}$  – prędkość masowa gazu odniesiona do pełnego przekroju kolumny [kg/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $w_{cm}$  – prędkość masowa cieczy odniesiona do pełnego przekroju kolumny [kg/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $a$  – powierzchnia jednostkowa wypełnienia [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>]  
 $\eta_g$  – lepkość dynamiczna gazu [Pa·s]  
 $\eta_c$  – lepkość dynamiczna cieczy [Pa·s]

Krytyczna wartość liczby  $Re_g$  wynosi 40. W zakresie  $40 < Re < 150$  występuje ruch przejściowy. Przepływ burzliwy zachodzi dla  $Re_g > 150$ . Krytyczna wartość  $Re_c \sim 1600$ .

Jednym z istotnych parametrów, charakteryzujących przepływ dwufazowy przez kolumnę z wypełnieniem, jest spadek ciśnienia fazy gazowej. Znajomość tej wielkości umożliwia obliczenie zapotrzebowania mocy wentylatora przetłaczającego gaz przez warstwę wypełnienia. W kolumnach rektyfikacyjnych spadek ciśnienia decyduje o temperaturze cieczy w wyparce, a zatem określa warunki zachowawczości procesu rektyfikacji.

Spadek ciśnienia fazy gazowej na wypełnieniu zraszonym  $\Delta p_m$ , poniżej punktu przeciążenia, może być opisany między innymi równaniem:

$$\Delta p_m = \Delta p_s \cdot f(\pi) = \Delta p_s \cdot \tau \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta p_s$  – spadek ciśnienia na wypełnieniu suchym [Pa]  
 $\tau = f(\pi)$  – funkcja zależna od intensywności zraszania wypełnienia.

Dla wypełnienia suchego stosuje się zmodyfikowane równanie Darcy-Weisbacha:

$$\Delta p_s = \frac{\lambda H \cdot a \cdot w_{og}^2}{8 \varepsilon^3} \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

gdzie:  $\lambda$  - współczynnik oporu przepływu  
 $H$  – wysokość warstwy wypełnienia [m]  
 $w_{og}$  - objętościowa prędkość przepływu gazu odniesiona do pełnego przekroju aparatu [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $\varepsilon$  - wolna przestrzeń (porowatość) wypełnienia [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].

Jeżeli wypełnienie stanowią usypane pierścienie Raschiga, to współczynnik oporu ( $\lambda$ ) można wyznaczyć z zależności:

$$\text{dla } Re_g < 40 \quad \lambda = 140 \cdot Re_g^{-1} \quad (5)$$

$$\text{dla } Re_g > 40 \quad \lambda = 16 \cdot Re_g^{-0,2} \quad (6)$$

Wielkość  $\tau$  w równaniu (3), określającą stopień zwiększenia oporu wypełnienia zraszane go w porównaniu z suchym, określamy w zależności od parametru zraszania  $\pi$ . Dla ceramicznych pierścieni Raschiga w zależności od ich średnicy  $d$  obowiązują wzory:

$$\text{dla } d < 30 \text{ mm} \quad \tau = \left(1 - 1,65 \cdot 10^{-10} \frac{a^3}{\varepsilon} - \pi\right)^{-1} \quad (7)$$

$$\text{dla } d > 30 \text{ mm i } \pi < 0,3 \quad \tau = \frac{1}{(1-\pi)^3} \quad (8)$$

$$\text{dla } d > 30 \text{ mm i } \pi > 0,3 \quad \tau = \frac{1}{(1,13-1,43\pi)^3} \quad (9)$$

Parametr zraszania oblicza się ze wzoru:

$$\pi = \sqrt[3]{\left(\frac{L}{\rho_c}\right)^2 \frac{a \cdot b}{\varepsilon^3 \cdot 2g}} \quad (10)$$

gdzie:  $L$  – gęstość zraszania wypełnienia [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$\rho_c$  – gęstość cieczy [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$b$  – współczynnik bezwymiarowy będący funkcją  $Re_c$ ,  $b = \frac{1,74}{Re_c^{0,3}}$

Jeżeli prędkość gazu przepływającego przez wypełnienie zraszone cieczą przekroczy pewną granicę to oddziaływanie gazu na ciecz staje się tak duże, że gaz zaczyna ją porywać. Zjawisko to nosi nazwę zachłystywania lub zalewania kolumny.

Krytyczna prędkość fazy gazowej w punkcie zachłystywania wyznaczana jest ze pomocą odpowiednich korelacji.

## 2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie spadku ciśnienia na wypełnieniu suchym i zraszonym oraz określenie prędkości krytycznej fazy gazowej w kolumnie przy różnych natężeniach zraszania. Wyniki doświadczeń należy następnie porównać z odpowiednimi wartościami wyliczonymi na podstawie równań przytoczonych w instrukcji.

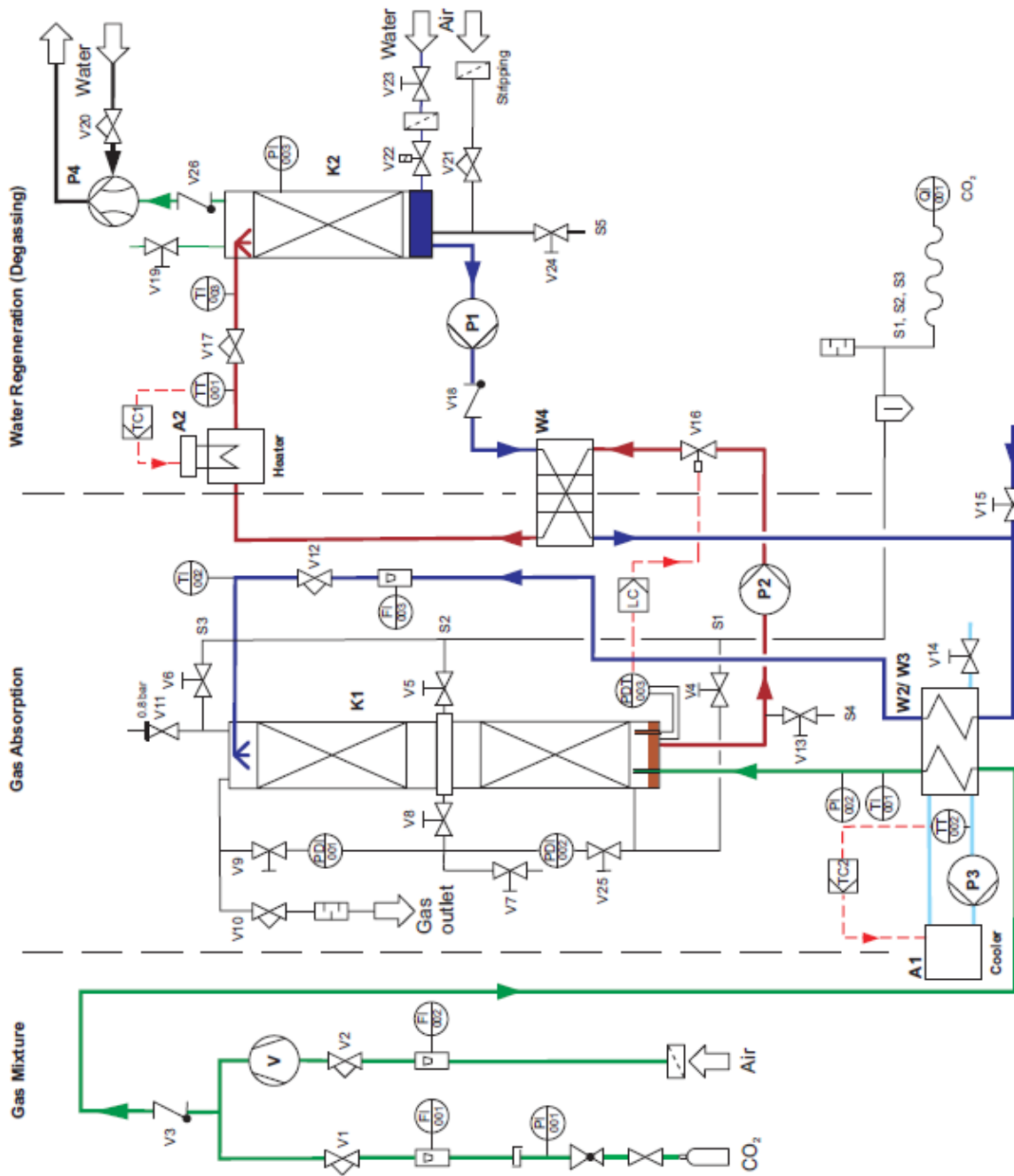
## 4. Metodyka pomiarów

W pierwszej kolejności określa się zależność spadku ciśnienia gazu od jego prędkości na wypełnieniu suchym. W tym celu należy wykonać 7–10 pomiarów przy zmiennym natężeniu fazy gazowej określonym rotametrem. Dla każdej wartości natężenia przepływu odczytuje się spadek ciśnienia na U-rurce. Analogiczne pomiary wykonuje się przy równoczesnym zraszaniu wypełnienia fazą ciekłą, wykonując 3 serie pomiarów dla trzech różnych natężeń przepływu cieczy. W każdej

serii należy wykonać 8–10 pomiarów spadków ciśnienia, zaczynając od małych natężeń przepływu powietrza, aż do momentu zalania kolumny.

### 3. Aparatura pomiarowa

Schemat aparatury pomiarowej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat aparatury pomiarowej

A1	Jednostka chłodząca
A2	Podgrzewacz przed wlotem desorbera
K1	Kolumna absorpcyjna (absorber)
K2	Kolumna Regeneracyjna (Desorber)
P1	Pompa cyrkulacyjna do dostarczania do kolumny absorpcyjnej
P2	Pompa cyrkulacyjna do dostarczania do kolumny regeneracyjnej
P3	Pompa cyrkulacyjna w obiegu chłodzenia
P4	Próżniowa pompa wodna
V	Kompresor do powietrza
W2/ W3	Wymiennik ciepła
W4	Wymiennik ciepła (rekuperator)
V1	Zawór sterujący CO <sub>2</sub>
V2	Zawór sterujący powietrzem
V3	Zawór zwrotny
V4	Zawór kulowy do próbkowania gazu w podstawie kolumny
V5	Zawór kulowy do próbkowania gazu w środku kolumny
V6	Zawór kulowy do próbkowania gazu na czele kolumny
V7	Zawór kulowy
V8	Zawór kulowy do zwalniania punktu pomiaru ciśnienia pośrodku kolumny
V9	Zawór kulowy do zwalniania punktu pomiaru ciśnienia na czele kolumny
V10	Zawór regulacyjny do regulacji ciśnienia w kolumnie
V11	Zawór bezpieczeństwa na kolumnie absorpcyjnej
V12	Zawór regulacyjny do regulacji natężenia przepływu wody
V13	Zawór kulowy do pobierania próbek cieczy z kolumny absorpcyjnej
V14	Zawór kulowy do opróżniania obiegu chłodzenia wodnego
V15	Zawór kulowy do pobierania zregenerowanego absorbentu
V16	Zawór elektromagnetyczny do regulacji poziomu w kolumnie absorpcyjnej K1
V17	Zawór regulacyjny do absorpcji przed regeneracją kolumny K2
V18	Zawór zwrotny
V19	Zawór kulowy do wyrównania próżni w kolumnie K2 po eksperymencie
V20	Zawór regulacyjny do regulacji ilości wody dla próżniowej pompy strumieniowej
V21	Zawór regulacyjny do regulacji ilości usuwanego powietrza
V22	Zawór elektromagnetyczny do napełniania kolumn (K1 i K2) wodą
V23	Zawór kulowy do ręcznego blokowania przyłącza wody
V24	Zawór kulowy do opróżniania kolumny regeneracyjnej
V25	Zawór kulowy do zwalniania punktu pomiaru ciśnienia u podstawy kolumny
V26	Zawór zwrotny