

Ćwiczenie 8:

BADANIE WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA MASY W ZRASZANEJ KOLUMNIE WYPEŁNIONEJ

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie wartości współczynnika wnikania masy w fazie ciekłej podczas spływu grawitacyjnego cieczy w kolumnie wypełnionej.

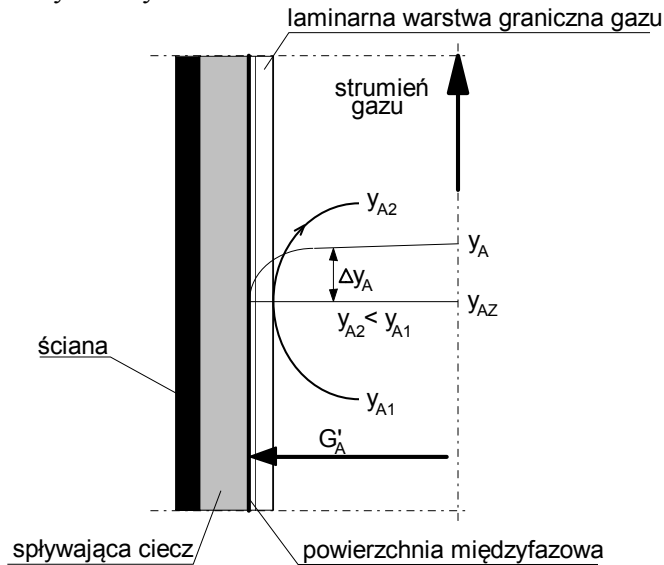
2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

W zagadnieniach absorpcji i desorpcji istotną rolę odgrywa znajomość współczynnika wnikania masy do i od powierzchni międzyfazowej rozdzielającej gaz od cieczy. Znajomość ta pozwala na wyznaczenie współczynnika przenikania masy, który to, przy danej powierzchni kontaktu faz i określonym module napędowym procesu, daje możliwość wyznaczenia masy danego składnika przenikającej z fazy do fazy.

Według teorii „dwóch warstw granicznych” Whitmana, wnikanie masy jest procesem kombinowanym, składającym się z transportu składnika od rdzenia danej fazy ku warstwie granicznej na drodze konwekcji i transportu masy przez tę warstwę (laminarną) na drodze dyfuzji. Dzieje się tak dlatego, że burzliwość fazy płynącej obok powierzchni międzyfazowej nie dochodzi do niej, tylko napotyka warstwę graniczną poruszającą się laminarnie, przez którą dany składnik musi przedyfundować. W obszarze przepływu burzliwego, ruch masy odbywa się za pośrednictwem prądów i wirów płynu.

Na rys. 1. przedstawiono schematycznie proces wnikania masy w fazie gazowej. Różnica stężenia składnika A w rdzeniu y_A i przy powierzchni międzyfazowej $y_{A,z}$ wynika z oporów wnikania masy, głównie oporów dyfuzji przez warstwę graniczną. Wartość współczynnika wnikania masy zależy od właściwości dyfuzyjnych układu: składnik dyfundujący - środowisko dyfuzji, oraz warunków hydrodynamicznych panujących w samym układzie. Do parametrów które bezpośrednio wpływają na wartość współczynnika wnikania

masy określonego składnika A do powierzchni międzyfazowej rozdzielającej gaz od cieczy, należy zaliczyć:



Rys. 1. Schemat wnikania masy w fazie gazowej

G'_A - strumień molowy składnika A,
 y_A - udział molowy składnika A.

- gęstość i lepkość mieszaniny,
- prędkość przepływu mieszaniny,
- współczynnik dyfuzji składnika A przez mieszaninę,
- masę molową dyfundującego składnika A,
- geometrię powierzchni międzyfazowej.

Wpływ temperatury i ciśnienia objawia się pośrednio poprzez zmianę wymienionych powyżej właściwości fizycznych.

Współczynnik wnikania masy podaje ile masy jakiegoś składnika A wnika w jednostce czasu do jednostki powierzchni międzyfazowej od rdzenia którejś z faz (lub odwrotnie) przy module napędowym równym, jedności, co można zapisać jako

$$\beta_A = \frac{G_A}{F \Delta \pi_A} \quad (1)$$

gdzie: β_A - współczynnik wnikania masy składnika A, $\text{kg A}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

G_A - strumień masy składnika A, kg/s ;

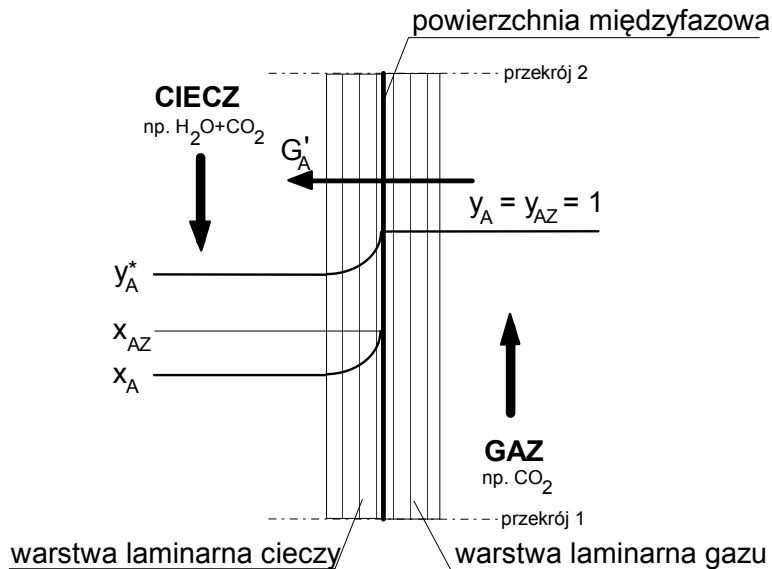
F - wielkość pola powierzchni międzyfazowej, m^2 ;

$\Delta\pi_A$ - moduł napędowy procesu wnikanía masy, -.

Współczynnik wnikanía masy może być też wyrażany w kmol A/(m²·s)

Eksperymentalne wyznaczenie współczynnika wnikanía masy na podstawie pomiaru występujących w równaniu (1) wielkości, napotyka jednak na pewną trudność związaną z określeniem $\Delta\pi_A$. Moduł napędowy procesu wnikanía zależy bowiem od różnicy stężenia danego składnika w rdzeniu określonej fazy i na powierzchni międzyfazowej. Pomiar stężenia na powierzchni rozdziału faz jest praktycznie niemożliwy do zrealizowania ze względów technicznych.

W celu ominięcia opisaney trudności, do praktycznego wyznaczania wartości współczynnika wnikanía masy wykorzystuje się zjawisko zanikania oporu wnikanía w jednej z faz, np. w fazie gazowej. Przypadek taki występuje wtedy, gdy z cieczą skontaktuje się gaz zawierający tylko absorbowany przez nią składnik A, dla którego chce się wyznaczyć współczynnik wnikanía masy w fazie ciekłej. Rozkład stężeń dla opisywanego przypadku przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przenikanie masy od gazu jednorodnego do ciekłego roztworu

W jednorodnej fazie gazowej nie ma różnic stężenia, a zatem stężenie składnika A na zwierciadle wynosi 100% i jest jednoznacznie określone dla potrzeb stosowania równania (1).

Ponieważ zdecydowana większość procesów absorpcji i desorpcji prowadzona jest w kolumnach wypełnionych, poniżej opisano zasady eksperymentalnego wyznaczania współczynnika wnikanía masy dla tego

przypadku. Zakłada się, że wyznaczany będzie współczynnik wnikania masy w fazie ciekłej, podczas kontaktu czystego gazu z ciekłym dwuskładnikowym roztworem zawierającym inert. Dla potrzeb opisywanego ćwiczenia przyjmuje się w szczególności, że gazem jest dwutlenek węgla (składnik A), a ciekłym składnikiem inertnym woda, jak na rys. 2. W celu eksperymentalnego wyznaczenia (w sposób pośredni) wartości współczynnika wnikania masy w fazie ciekłej, dysponować należy następującymi danymi:

- średnica aparatu;
- powierzchnia właściwa wypełnienia i wysokość jego warstwy;
- strumień masowy wody zraszającej;
- stosunek masowy CO₂ do H₂O w skrajnych przekrojach kolumny;
- temperatura i ciśnienie panujące w aparacie.

Oznaczając symbolem A wnikający dwutlenek węgla, na podstawie równania definicyjnego (1), można napisać

$$\beta_{A,c} = \frac{G_A}{F \Delta\pi_{A,c,m}}, \quad (2)$$

gdzie: $\beta_{A,c}$ - współczynnik wnikania masy CO₂ w cieczy, kg/(m²·s);

G_A - strumień wnikającej masy CO₂, kg/s;

F - powierzchnia wnikania masy, m²;

$\Delta\pi_{A,c,m}$ - średni moduł napędowy wnikania masy w fazie ciekłej, -.

Poszczególne składniki równania (2) określić można w sposób następujący.

Strumień wnikającej masy

Stosując zasady bilansowania wymienników masy

$$G_A = G_{ic}(U_{A1} - U_{A2}), \quad (3)$$

gdzie: G_{ic} - strumień masowy inerty ciekłego (wody), kg/s;

U_{A1}, U_{A2} - stosunki masowe w skrajnych przekrojach, kg A/kg inerty.

Ponieważ w rozważanym przypadku $G_{ic} = G_{H_2O}$ oraz $U_{A2} \approx 0$ (gdyż zakłada się zraszanie czystą wodą), to ostatecznie

$$G_A = G_{H_2O} U_{A1} \quad (4)$$

Powierzchnia kontaktu faz

Powierzchnię teoretyczną wypełnienia wyznacza się z zależności

$$F_T = V_w a = \frac{\pi D^2}{4} H a, \quad (5)$$

w której: D - średnica kolumny, m;
 H - wysokość warstwy wypełnienia, m;
 a - powierzchnia jednostkowa wypełnienia, m²/m³.

Średni moduł napędowy procesu w fazie ciekłej

Zakładając, że spełnione jest prawo Henrygo, można napisać dla rozpatrywanego przypadku wnikania masy

$$\Delta\pi_{A,c,m} = \frac{\Delta\pi_{A,c,1} - \Delta\pi_{A,c,2}}{\ln \frac{\Delta\pi_{A,c,1}}{\Delta\pi_{A,c,2}}}, \quad (6)$$

Ponieważ moduł napędowy w przekroju wlotowym i wylotowym zależy od stężenia składnika A w fazie ciekłej na powierzchni międzyfazowej, wielkość tę należy wyznaczyć następująco. Według prawa Henrygo ciśnienie cząstkowe składnika A na zwierciadle w stanie równowagi opisuje zależność

$$p_{A,z}^* = H' x_{A,z}, \quad (7)$$

skąd otrzymuje się udział molowy dwutlenku węgla w cieczy na zwierciadle

$$x_{A,z} = \frac{p_{A,z}^*}{H'}. \quad (8)$$

Wartość stałej Henrygo H' dla warunków panujących w aparacie można znaleźć w tablicach, np. [1]. Wartość ciśnienia cząstkowego składnika A na zwierciadle w stanie równowagi wyznaczy się z prawa Daltona wg którego

$$p_{A,z}^* = P - p_{H_2O}^*, \quad (9)$$

gdzie: $p_{A,z}^*$ - równowagowe ciśnienie cząstkowe CO₂ na zwierciadle, Pa;
 P - ciśnienie całkowite w aparacie, Pa;
 $p_{H_2O}^*$ - równowagowe ciśnienie cząstkowe pary wodnej, Pa.

Równowagowe ciśnienie cząstkowe pary wodnej w temperaturze procesu odczytuje się z tablic, np. [1], a wartość ciśnienia całkowitego w aparacie uzyskamy w trakcie pomiarów.

Stosunek masowy CO₂ do H₂O określa się na podstawie przelicznika stężeń

$$U_{A,z} = \frac{x_{AZ}}{1-x_{AZ}} \frac{M_A}{M_{H_2O}}$$

(10)

gdzie: M - masa molowa, kg /kmol.

Moduły napędowe w poszczególnych przekrojach wyznacza się z zależności

$$\Delta\pi_{A,c,1} = \frac{U_{A,z} - U_{A,1}}{(m^* + U_A)_m}, \quad (11)$$

$$\Delta\pi_{A,c,2} = \frac{U_{A,z} - U_{A,2}}{(m^* + U_A)_m}, \quad (12)$$

w których $m^* = \frac{M_A}{M_{H_2O}}$, a wyrażenia w mianownikach równań (11) i (12)

$$(m^* + U_A)_m = \frac{U_{A,z} - U_A}{\ln \frac{m^* + U_{A,z}}{m^* + U_A}}. \quad (13)$$

Wyznaczony w powyższy sposób masowy współczynnik wnikania masy, można przeliczyć na współczynnik molowy, wg prostego równania

$$\beta'_{Ac} = \frac{\beta_{A,c}}{M_A}. \quad (14)$$

W obliczeniach projektowych związanych z wymiennikami masy, do wyznaczania współczynnika wnikania masy wykorzystuje się równania empiryczne, dotyczące konkretnego procesu zachodzącego w określonych warunkach. Dla opisywanego sływu grawitacyjnego cieczy po wypełnieniu utworzonym z pierścieni Raschiga można stosować zależność

$$Sh = 0,015 Re^{0,66} Sc^{0,33}, \quad (15)$$

w której: $Sh = \frac{\beta_{A,c} \vartheta_z}{\delta_A}$ - liczba Sherwooda,

$Re = \frac{w_{c,0} \rho_c}{a \eta_c}$ - liczba Reynoldsa,

$Sc = \frac{M_A}{M_c} \frac{\eta_c}{\delta_A}$ - liczba Schmidta,

zaś poszczególne symbole oznaczają:

$\beta_{A,c}$ - masowy współczynnik wnikania masy w fazie ciekłej, $kg/(m^2 \cdot s)$;

$\vartheta_z = \left(\frac{\eta_c^2}{\rho_c g} \right)^{1/3}$ - liniowy wymiar zastępczy, m;

δ_A - współczynnik dyfuzji składnika A przez ciecz, $kg/(m \cdot s)$;

$w_{c,0}$ - prędkość pozorna cieczy liczona na pusty aparat, m/s;

ρ_c - gęstość cieczy, kg/m^3 ;

η_c - dynamiczny współczynnik lepkości cieczy, Pa·s;
 M - masa molowa, kg/kmol.

W odniesieniu do aparatów, których wypełnienie jest źle zraszane cieczą, rzeczywisty strumień wnikającego składnika może różnić się od wartości wyznaczonej na drodze analitycznej, co wynika z mniejszej niż powierzchnia wypełnienia rzeczywistej powierzchni wnikania masy. Zjawisko złego zraszania wypełnienia można uwzględnić w obliczeniach poprzez wprowadzenie tzw. współczynnika wykorzystania powierzchni. Wykorzystując ten parametr rzeczywista powierzchnia dla wnikania gazu do cieczy jest równa

$$F = F_T \varphi, \quad (16)$$

przy czym: F_T - powierzchnia teoretyczna, równa rzeczywistej powierzchni wypełnienia, m²;

φ - współczynnik wykorzystania powierzchni, -.

Jednym ze sposobów ustalenia wartości współczynnika φ może być stosowanie podawanego w literaturze równania

$$\varphi = \frac{\sqrt[3]{a}}{f(w_{c,o})}$$

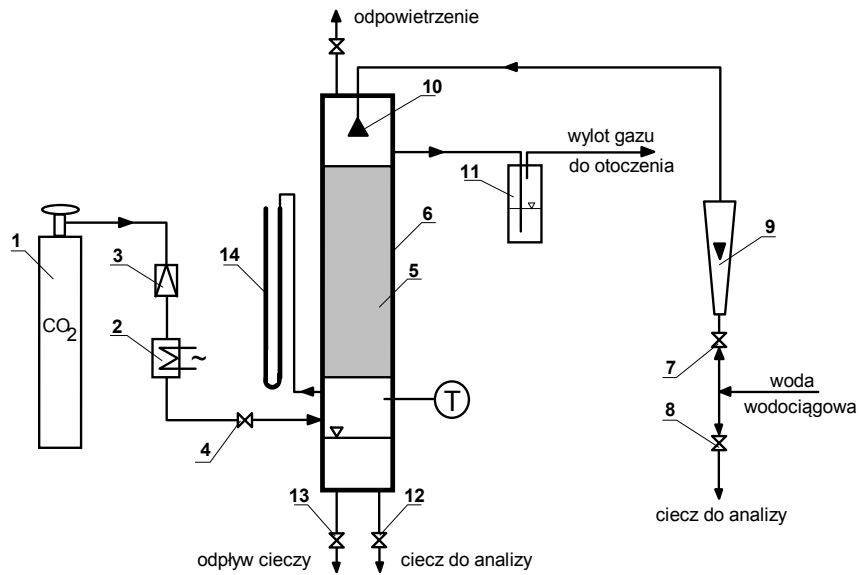
(17)

w którym : a - powierzchnia właściwa wypełnienia, m²/m³;
 $w_{c,o}$ - prędkość pozorna wody w kolumnie, m/s.

Wartość funkcji $f(w_{o,c})$ podają tablice, np. [1].

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

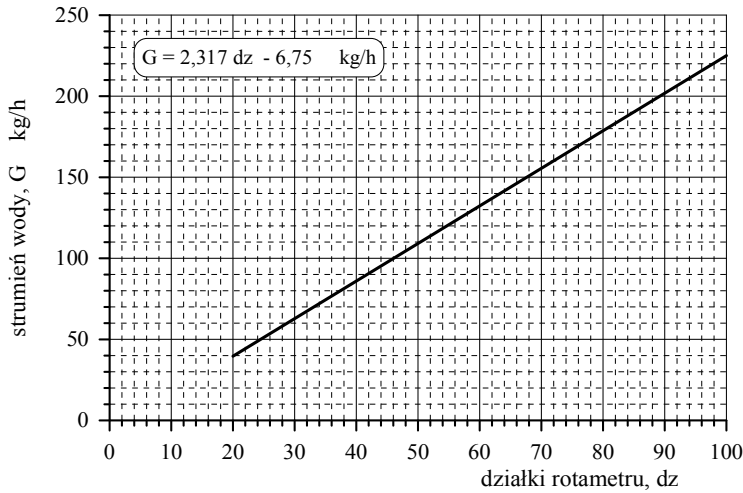
Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

1 - butla z CO₂, 2 - podgrzewacz gazu, 3 - reduktor ciśnienia, 4 - zawór regulacyjny gazu, 5 - wypełnienie kolumny, 6 - kolumna, 7 - zawór regulacyjny wody, 8, 12, 13 - zawory spustowe, 9 - rotametr, 10 - zraszacz, 11 - zbiornik kontroli przepływu gazu, 14 - manometr U-rurkowy, T - pomiar temperatury

Głównym jego elementem jest kolumna (6) o średnicy 0,09 m, wypełniona zwykłymi ceramicznymi pierścieniami Raschiga o wymiarze 1/2". Wysokość złoża wypełnienia (5) wynosi 0,5 m. Strumień dwutlenku węgla pobieranego z butli (1) jest regulowany zaworem (4), a kontrola przepływu gazu przez aparat realizowana jest za pomocą szklanego zbiornika z cieczą (11), zamontowanego na przewodzie wylotowym gazu z kolumny. Strumień wody pobieranej z wodociągu regulowany jest zaworem (7) i mierzony rotametrem (9). Wykres cechowania rotametru przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Wykres cechowania rotametrów wody.

Woda doprowadzana jest do kolumny poprzez zraszacz sitkowy (10) i tworzy u dołu aparatu zamknięcie hydrauliczne dla gazu. Wysokość warstwy cieczy w dolnej części kolumny regulować można zaworem (13). Zawory (8) i (12) służą do pobierania próbek wody przeznaczonych do miareczkowania. Manometr U-rurkowy (14) wypełniony wodą i termometr T pozwalają na określenie warunków prowadzenia procesu w kolumnie.

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W celu określenia wartości parametrów koniecznych do wyznaczenia współczynnika wnikania masy w fazie ciekłej, wg wskazówek podanych we wprowadzeniu do niniejszego ćwiczenia, należy wykonać następujące czynności związane z obsługą stanowiska pomiarowego, rys. 3:

- a) włączyć podgrzewacz gazu (2) i odczekać ok. 5 minut;
- b) odkręcić zawór butli (1) i reduktorem (3) ustawić wartość nadciśnienia gazu ok. 0,15 MPa;
- c) zaworem (4) ustalić przepływ CO_2 przez kolumnę w taki sposób, ażeby przez warstwę cieczy w naczyniu (11) przepływały pojedyncze pęcherzyki gazu;
- d) zaworem (7) ustalić, mierzony rotametrem (9), wymagany strumień wody zraszającej;
- e) zaworem (13) ustalić poziom cieczy w dolnej części kolumny. Dokonać korekty ustawienia strumienia gazu;

- f) po ustabilizowaniu się strumieni przepływu obu faz, odczytać ciśnienie i temperaturę panujące w aparacie oraz poprzez zawór (12) pobrać próbkę cieczy do miareczkowania;
- g) powtórzyć czynności wg pkt. d)-f) dla innych strumieni wody zraszającej warstwę wypełnienia. Zwrócić uwagę na jakość zraszania;
- h) po zakończeniu pomiarów zamknąć dopływ CO₂ i wody oraz spuścić ciecz z kolumny i wyłączyć podgrzewacz gazu;
- i) w celu określenia stężenia CO₂ w pobranych próbkach dokonać miareczkowania 100 ml każdej pobranej próbki 0,2 mol NaOH. Dla obliczenia stosunku masowego CO₂ do H₂O wykorzystać zależność

$$U_{A1} = \frac{0,2 V_{\text{NaOH}}}{500 V_p} \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} ; \quad \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg H}_2\text{O}}$$

gdzie: V_{NaOH} - objętość zużytej do miareczkowania zasady sodowej, ml,
 V_p - objętość próbki cieczy poddanej miareczkowaniu, ml.

- j) wyniki notować w tabeli.

Wyznaczanie współczynnika wnikania masy				
Faza gazowa: CO ₂		Wypełnienie: Pierścienie Raschiga 1/2 "		
Faza ciekła: H ₂ O		Wysokość warstwy wypełnienia: 0,5 m		
Średnica kolumny: 0,09 m		Ciśnienie barometryczne: mm Hg		
Objętość zużytej do miareczkowania zasady sodowej, V_{NaOH} = ml				
Objętość próbki cieczy poddanej miareczkowaniu, V_p = ml				
strumień wody		temperatura w kolumnie	nadciśnienie w kolumnie	stężenie CO ₂ w cieczy wylotowej
dz	$G_{\text{H}_2\text{O}}$	t	P	U_{A1}
-	kg/h	°C	mm H ₂ O	kg CO ₂ /kg H ₂ O
20				
30				
40				
...				

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Wyznaczyć na podstawie równania (2) współczynnik wnikania masy dla kolejnych punktów pomiarowych.
2. Sporządzić wykres zmian zmierzonego współczynnika wnikania masy w funkcji prędkości pozornej cieczy zraszającej.

3. Obliczyć współczynnik wnikania masy na podstawie równania (15) i porównać otrzymane wartości z wynikami badań własnych.
4. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 186, Opole 1996
- [2] TRONIEWSKI L.: Hoblerowskie ujęcie ruchu masy, Skrypt PO nr 184, Opole 1996
- [3] KOCH R., KOZIOŁ A.: Dyfuzyjno-ciepłny rozdział substancji, WNT W-wa 1994

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Ruch masy na drodze wnikania.
2. Sens fizyczny współczynnika wnikania masy i jego definicja.
3. Wpływ warunków procesowych na współczynnik wnikania masy.
4. Zjawisko zaniku oporów wnikania masy w jednej z faz.
5. Prawo Henryego i prawo Daltona.
6. Przebieg procesu miareczkowania.