

Procesy dyfuzyjne

INSTRUKCJE DO LABORATORIUM

PRACA ZBIOROWA - STUDENCI KN „GAMBRINUS” - POD REDAKCJĄ
WOJCIECHA SAWIŃSKIEGO



Politechnika
Wroclawska

KN GAMBRINUS
ul. C.K. Norwida 4/6
50-373 Wrocław budynek C-6, pok. 117



Spis treści:

Spis oznaczeń	2
Wpływ energii mieszania na współczynnik wnikania masy w układzie ciało stałe – ciecz	4
Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I i II.	10
Stopień wyekstrahowania w układzie ciecz – ciecz I i II	14
Sprawność półki sitowej przy wymianie masy w układzie gaz – ciecz	26
Wymiana masy od ciała stałego do cieczy w warunkach konwekcji naturalnej.....	35
Pomiar przemieszczenia wzdłużnego metodą impulsową	43
Pomiar współczynnika wnikania masy od powierzchni ciała stałego przy konwekcji wymuszonej	49
Protokoły do sprawozdań	57
Przykładowe sprawozdanie	68

Spis oznaczeń

Oznaczenie	Znaczenie	Jednostka
A	Powierzchnia	m ²
	Współczynnik absorpcji	-
	Absorbancja	-
C	Stężenie molowe	mol/m ³
	Liczba składników	-
D	Średnica	m
	Kinematyczny współczynnik dyfuzji	m ² /s
E ₀	Sprawność półek	-
F	Strumień molowy surowca	mol/s
	Strumień masy surowca	kg/s
	Liczba stopni swobody	-
G'	Strumień fazy lżejszej	mol/s
H	Wysokość	m
HTU	Wysokość przenikania	m
I	Gęstość strumienia dyfuzji	mol/(m ² ·s)
J	Strumień dyfuzji	mol/s
K	Równowagowy współczynnik podziału	-
L	Strumień molowy cieczy	mol/s
M	Masa molowa	kg/mol
N	Liczba półek teoretycznych	-
NTU	Liczba jednostek przenikania	-
P	Ciśnienie	Pa
	Liczba faz	-
Q	Ciężar	N
R	Strumień molowy rafinatu	mol/s
S	Strumień masy rozpuszczalnika	kg/s
T	Temperatura	K
V	Strumień gazu	mol/s
	Objętość	m ³
W	średnia kwadratową prędkości względnej między dwoma punktami	m/s
	Powierzchnia wypełnienia	m ² /m ³
a	Promień kuli	m
d _k	Średnica kształtki	m
d _z	Średnica zastępcza	m
g	Przyspieszenie ziemskie	m/s ²
h	Wysokość kształtki	m
h _{OR}	Wysokość jednostkowa przenikania	m
h _T	Wysokość kolumny wypełnionej	m
k	Współczynnik przenikania masy	mol/(m ² ·s)
l	Wymiar liniowy	m
m	Masa	kg
	Ułamek masowy	-
	Współczynnik podziału	-
n	Liczba obrotów	1/s
	Liczba moli	mol
noG	Liczba jednostek przenikania	-

p	Prężność parcjalna	Pa
r	Promień wektor punktu	m
s	Droga (wymiar liniowy)	m
t	Czas	s
w	Prędkość	m/s
x	Ułamek molowy fazy ciekłej	-
y	Stężenie równowagowe składnika ekstrahowanego na 1 mol inertnego składnika	mol/mol
	Ułamek molowy fazy gazowej	-
y _i	Stężenie rzeczywiste składnika ekstrahowanego na 1 mol inertnego składnika	mol/mol
β	Współczynnik wnikania masy	m/s
Δ	Zmiana	-
Φ	Stopień zanieczyszczenia	-
Ψ	stopień wyekstrahowania	-
δ	Dynamiczny współczynnik dyfuzji	m ² /s
ε	Współczynnik ekstrakcji	-
ρ	Gęstość	kg/m ³
φ	Współczynnik kształtu	-
σ	Napięcie powierzchniowe	N/m
	Wariancja sygnału wejściowego	-
v	Lepkość kinematyczna	m ² /s
μ	Lepkość dynamiczna	Pa·s
ξ _k	współczynnik oporu cząsteczki	-
χ	współczynnik masy pozornej	-

Wpływ energii mieszania na współczynnik wnikania masy w układzie ciało stałe – ciecz

Opracowała:
Wiktoria Kaczorowska

1. Wprowadzenie

Transport masy jest procesem zachodzącym na drodze dyfuzji lub konwekcji. Jeżeli w układzie dwuskładnikowym występują różnice stężeń w różnych miejscach tego układu, to następuje ruch cząstek z miejsc o stężeniu wyższym do miejsc o stężeniu niższym, aż do momentu ustalenia się równowagi. Mamy wtedy do czynienia z procesem dyfuzji. Proces konwekcji może zachodzić podczas przepływu wywołanego działaniem sił zewnętrznych – konwekcja wymuszona, albo przepływu spowodowanego różnicami gęstości płynu – konwekcja naturalna. Podczas rzeczywistej wymiany masy w układzie mamy zazwyczaj do czynienia z konwekcją i dyfuzją.

Rozpuszczanie ciała stałego w mieszalnikach jest przykładem procesu wymiany masy od ciała stałego do cieczy. Szybkość wymiany masy w takim układzie jest zależna od warunków panujących w bliskim otoczeniu cząstki ciała stałego.

Aby przeanalizować ruch pojedynczej cząstki ciała stałego w burzliwym strumieniu przepływu płynu musimy rozpatrzyć siły działające na taką cząstkę. Bilans sił działających na pojedynczą kulistą cząstkę ciała umieszczoną w strumieniu płynu został sformułowany przez Tчена. Bilans ten został przedstawiony w postaci równania.

$$\frac{\pi d^3}{6} (\rho_s + \chi \rho_c) \frac{dw_s}{d\tau} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_c - \rho_s) g + \frac{\pi d^3}{6} (1 + \chi) \rho_c \frac{dw_c}{d\tau} - \frac{1}{2} \frac{\pi d^2}{4} \xi_k (w_s - w_c)^2 \quad (1)$$

gdzie: χ – współczynnik masy pozornej, dla cieczy nielepkich wynosi 0,5; ξ_k – współczynnik oporu cząsteczki podczas ruchu w cieczy.

Równanie to składa się z czterech członów, z których każdy opisuje działanie innej siły. Pierwszy człon, występujący po lewej stronie równania, opisuje siłę związaną z nadaniem przyspieszenia cząstce oraz masie cieczy bezpośrednio przylegającej do powierzchni międzyfazowej. Drugi człon odpowiada sile wyporu działającej na cząstkę, pomniejszonej o jej ciężar własny. Trzeci człon to siła nadająca przyspieszenie objętości cząstki i przylegającej do niej cieczy. Ostatni człon opisuje siłę oporu działającą na poruszającą się cząstkę.

Do opisu procesów wymiany masy od ciała stałego do cieczy możemy zastosować korelacje wyprowadzone dla konwekcji wymuszonej.

$$Sh = 0,998(Re \cdot Sc)^{1/3} \quad \text{dla } Re \ll 1, \quad (2)$$

$$Sh = 2 + 0,6 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{1/3} \quad \text{dla } Re \gg 1, \quad (3)$$

Ze względu na trudności w wyznaczeniu prędkości poślizgowych, które wpływają na wartość liczby Reynoldsa, matematyczny opis procesu wymiany masy opiera się na teorii izotropii lokalnych burzliwości Kołmogorowa. Teoria ta bazuje na dwóch założeniach: gdy lepkość płynu ν jest mała to średni współczynnik dyssypacji lepkiej jest niezależny od lepkości oraz drobnoskalowa turbulencja dla wystarczająco dużych liczb Reynoldsa jest homogeniczna, izotropowa i ustalona, tzn. jest statystycznie niezależna od przemieszczeń, obrotów i odbić układu współrzędnych.

Zakładając, że właściwości przepływu w małych skalach zależą jedynie od współczynnika dyssypacji lepkiej i lepkości płynu, Kołmogorow znalazł charakterystyczne skale dla struktur pola prędkości turbulencji: skalę długości (λ), czasu (τ) i prędkości (v).

$$\lambda = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (4)$$

$$\tau = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$v = (\nu \cdot \varepsilon)^{1/4} \quad (6)$$

gdzie ε – szybkość dyssypacji energii w jednostce masy płynu, ν – lepkość płynu

Liczba Reynoldsa, określona poniższym równaniem dla tych skal jest równa jedności, co można udowodnić za pomocą analizy wymiarowej.

$$Re_\lambda = \frac{v\lambda}{\nu} = 1 \quad (7)$$

Dla opisanych wyżej skal istnieje pewna uniwersalna funkcja

$$\beta = \frac{W}{v} \quad (8)$$

gdzie: W - średnia kwadratową prędkości względnej między dwoma punktami w płynie o odległości d .

Zgodnie z teorią Kołmogorowa dla dostatecznie wysokiej liczby Reynoldsa głównego strumienia, lepkościowe rozpraszanie energii i zmiana tej energii na ciepło są do pominięcia. Wtedy:

$$W \sim (\varepsilon d)^{1/3} \quad \text{dla } \lambda \ll d \ll L \quad (9)$$

Po podstawieniu równania do funkcji (8) otrzymujemy zależność

$$\beta' \sim \left(\frac{d}{\lambda}\right)^{1/3} \quad (10)$$

Dla bardzo małych odległości d siły lepkości nie mogą zostać pominięte. W takich warunkach obowiązują zależności

$$W \sim \left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{1/2} \quad \text{dla } d \ll \lambda \quad (11)$$

$$\beta' \sim \frac{d}{\lambda} \quad (12)$$

Współczynniki wnikania masy mogą być obliczone bez rozwiązania równania Tcheny, ale z zastosowaniem zależności opisujących warunki występujące w otoczeniu cząstki. Rozwiązanie to jednak wiąże się z pewnymi nieścisłościami, ponieważ zależności opisujące proces wymiany masy zostały wyprowadzone dla przepływu ustalonego, a teoria Kołmogorowa opisuje stan, w którym zachodzą fluktuacje burzliwości. Metoda ta wymaga także określenia odpowiedniej odległości d , gdzie najprostszym rozwiązaniem jest przyjęcie rozmiaru cząstki.

Podstawiając odpowiednią zależność (9) lub (11) do równania (3) otrzymujemy korelacje, według których szybkość wymiany masy zależy od rozmiaru cząstek oraz od energii dostarczonej do układu.

$$Sh = 2 + 0,6 \left(\frac{d^{4/3} \cdot \varepsilon^{1/3}}{\nu}\right)^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad \text{dla } \lambda \ll d \quad (13)$$

$$Sh = 2 + 0,6 \left(\frac{d^2 \cdot \varepsilon^{1/2}}{\nu^{3/2}}\right)^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad \text{dla } \lambda \gg d \quad (14)$$

Energia ε występująca w powyższych równaniach dla mieszalników opisana jest równaniem:

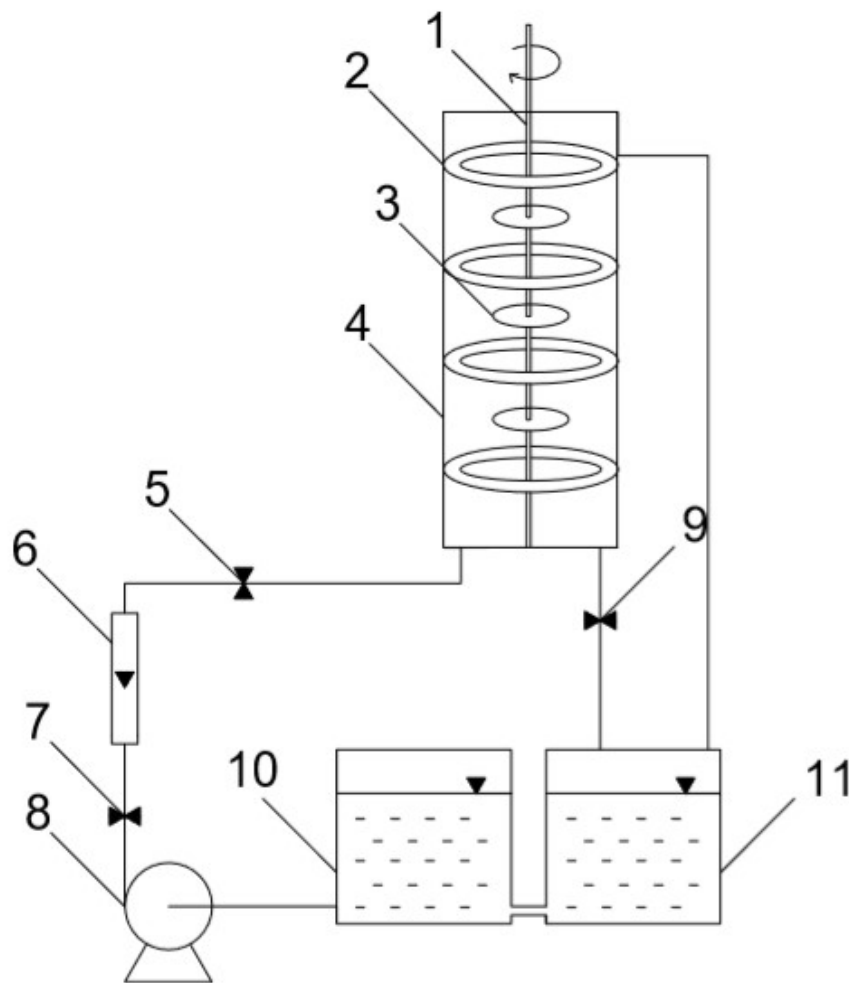
$$\varepsilon = \frac{n^3 \cdot D^5}{D_k^2 \cdot H} \quad (15)$$

gdzie: n – liczba obrotów mieszadła, D – średnica mieszadła, D_k – średnica mieszalnika, H – wysokość słupa cieczy

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynników wnikania masy od walców kwasu salicylowego do wody na podstawie danych doświadczalnych otrzymanych w procesie rozpuszczania walców z kwasu salicylowego w kolumnie z wirującymi dyskami, przez którą przepływa strumień wody. Doświadczalne wartości współczynników należy porównać z wartościami obliczonymi teoretycznie.

3. Schemat aparatury



Rys.1. Schemat aparatury doświadczalnej.

1. Wał obrotowy, 2. Stator dzielący kolumnę na sekcje mieszania, 3. Dysk o średnicy równej 0,08 m, 4. Kolumna przepływowa o średnicy wewnętrznej równej 0,2 m i wysokości 0,55 m, 5. Zawór, 6. Rotametr, 7. Zawór, 8. Pompa, 9. Zawór spustowy, 10. Zbiornik obiegowy, 11. Zbiornik pośredni

4. Metodyka pomiarów

- 1) Kształtki kwasu salicylowego należy zważyć i zmierzyć, w celu obliczenia powierzchni wymiany masy
- 2) Kształtki zawiesić na dyskach w kolumnie
- 3) Zamknąć zawór spustowy kolumny (11), włączyć pompę i napełnić kolumnę wodą
- 4) Ustalić określony przez prowadzącego strumień objętości wody (za pomocą zaworu 8)
- 5) Włączyć silnik i ustalić zadaną przez prowadzącego częstość obrotową dysków
- 6) Doświadczenie należy zakończyć po około 45 minutach od momentu zanurzenia wszystkich kształtek w wodzie

- 7) Doświadczenie należy powtórzyć dla różnych częstości obrotowych silnika
- 8) Po zakończeniu doświadczenia należy opróżnić kolumnę i wyjąć kształtki
- 9) Kształtki suszyć do stałej masy (około 1 doby), następnie zważyć i zmierzyć

5. Opracowanie wyników

Wyniki pomiarów należy zestawić w tabeli zamieszczonej w protokole.

Średnicę zastępczą kształtki należy obliczyć ze wzoru na średnicę kuli o powierzchni walca:

$$d_z = \left(d_k \cdot h + \frac{d_k^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

gdzie: d_k – średnica kształtki, h – wysokość kształtki

Pole powierzchni wymiany masy należy obliczyć za pomocą wzoru na pole walca, używając obliczonej wcześniej średnicy zastępczej.

$$A = 2 \frac{\pi d_z^2}{4} + 2\pi \frac{d_z}{2} h \quad (17)$$

Współczynnik wnikania masy od powierzchni kształtki do wody należy obliczyć ze wzoru (dla każdej kształtki osobno):

$$\beta = \frac{-\Delta m}{\Delta \tau} \cdot \frac{1}{A(C^* - C)} \quad (18)$$

gdzie: C^* - stężenie nasycenia kwasu salicylowego w wodzie, C - stężenie w rdzeniu cieczy

Dane potrzebne do obliczeń:

- współczynnik dyfuzji kwasu salicylowego w wodzie: $9,08 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
- stężenie nasycenia kwasu salicylowego: $2,2 \text{ kg/m}^3$
- stężenie w rdzeniu cieczy należy przyjąć jako 0 kg/m^3

Wartości teoretyczne współczynników należy obliczyć korzystając ze wzorów umieszczonych we wstępie teoretycznym.

W sprawozdaniu należy umieścić wykres zależności $\log[(Sh-2)/Sc^{1/3}]$ od $\log(Re)$ z naniesionymi punktami doświadczalnymi oraz linią opisaną równaniem (13) lub (14).

Wyniki obliczeń należy zestawić w tabeli:

kształtka	d_z [mm]	β_d [m/s]	Re	$\log(\text{Re})$	Sc	Sh	$\log[(\text{Sh}-2)/\text{Sc}^{1/3}]$	β_t [m/s]
1								
2								

6. Bibliografia

- [1] Binay K. Dutta, Principles of Mass Transfer and Separation Processes-PHI (2009)
- [2] Praca zbiorcza pod redakcją Danuty Beliny-Freundlich, Laboratorium inżynierii procesowej, cz.2, Wrocław 1981

Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I i II.

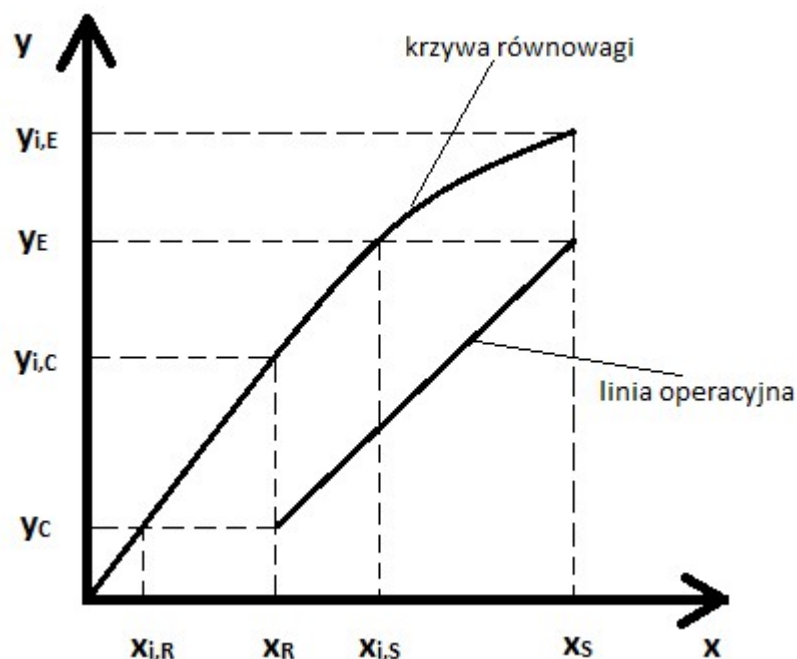
Opracowali:
Łukasz Madej
Lucyna Olczewska

1. Wprowadzenie

Najczęściej w przemyśle ekstrakcję prowadzi się w kolumnach przeciwprądowych z wypełnieniem (strukturalnym lub usypowym takim jak pierścienie czy siodełka). Strumień wymienianej masy można określić za pomocą równania :

$$\dot{m} = k_R \cdot A \cdot \Delta^* x_{sr} = k_E \cdot A \cdot \Delta^* y_{sr} \quad (1)$$

Wartości $\Delta^* x_{sr}$ lub $\Delta^* y_{sr}$ można odczytać z wykresu krzywej równowagi i linii operacyjnej.



Rysunek 1. Wykres krzywej równowagi i linii operacyjnej

Bardzo ważnym parametrem każdej kolumny wypełnionej jest wysokości i rodzaj użytego wypełnienia, których określenie jest niezbędne do osiągnięcia założonego rozdziału mieszaniny. Jedną z metod wyznaczania wysokości wypełnienia jest metoda bazująca na wysokości przenikania masy HTU i liczbie jednostek przenikania masy NTU zaproponowana przez Chiltona i Colburna. HTU zależy od rodzaju wypełnienia oraz natężeń przepływu gazu i cieczy. Wartości HTU dla typowych układów są najczęściej udostępniane przez

producentów wypełnienia, parametr ten określa łatwość z jaką zachodzi rozdział danego układu na danym wypełnieniu, natomiast NTU określa trudność separacji układu na danym wypełnieniu.

$$h_T = \frac{G'}{k_y a (1-y)_{iM}} \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{iM} dy}{(1-y)(y-y_i)} = HTU \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{iM} dy}{(1-y)(y-y_i)} \quad (2)$$

$$HTU = \frac{G'}{k_y a (1-y)_{iM}} = \frac{G'}{k'_y \bar{a}} \quad (3)$$

$$NTU = \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{iM} dy}{(1-y)(y-y_i)} \quad (4)$$

$$(1-y)_{iM} = \frac{(1-y_i) - (1-y)}{\ln \frac{(1-y_i)}{(1-y)}} \quad (5)$$

Co można zapisać w sposób uproszczony:

$$h_T = HTU \cdot NTU \quad (6)$$

Gdzie: G' – strumień molowy fazy lżejszej na jednostkę powierzchni [$\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$], a – powierzchnia wypełnienia (powierzchnia styku faz na jednostkę objętości kolumny) [m^2/m^3], k – współczynnik przenikania masy odniesiony do powierzchni warstewki granicznej rafinatu i ekstraktu [$\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$], h_T – wysokość kolumny wypełnionej [m], y – stężenie równowagowe składnika ekstrahowanego w fazie ekstrahowanej na 1 mol nieekstrahowanego (inertnego) składnika [mol/mol], y_i - stężenie rzeczywiste składnika ekstrahowanego w fazie ekstrahowanej na 1 mol nieekstrahowanego (inertnego) składnika [mol/mol];

Całkę (4) wyznacza się najczęściej metodą graficzną stosując metodę trapezów. Należy w tym celu przygotować wykres $f(y) = \frac{(1-y)_{iM}}{(1-y)(y-y_i)}$

$$NTU = \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{iM} dy}{(1-y)(y-y_i)} = \int_{y_2}^{y_1} f(y) dy \quad (7)$$

,następnie należy obliczyć pola otrzymanych trapezów, a następnie zsumować w celu obliczenia wartości całki, a tym samym liczbę jednostek przenikania masy. Natomiast wartość HTU wyznacza się na podstawie pomiarów natężenie przepływu fazy wodnej/organicznej w zależności od tego, która faza jest podawana od góry kolumny. Obliczenia HTU i NTU mogą być wykonane zarówno w odniesieniu do fazy gazowej jak i ciekłej.

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie jednostkowej wysokości przenikania masy h_{OR} , liczby jednostek przenikania masy N_{OR} oraz obliczenie objętościowego współczynnika k_{RV} w kolumnie ekstrakcyjnej z wypełnieniem.

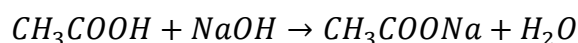
3. Metodyka pomiarów

- Pomiary należy rozpocząć od wycechowania rotametrów a następnie należy ustawić natężenia przepływu zadane przez prowadzącego
- Należy obliczyć czasy niezbędne do jedno, dwu i trzykrotnego wymienienia fazy organicznej lub nieorganicznej w kolumnie.
- Należy pobrać próbki fazy wodnej i organicznej po czasach obliczonych w punkcie 2 i zmiareczkować NaOH w obecności fenoloftaleiny, w celu wyznaczenia stężenia.
- Po ukończeniu stężenia należy uporządkować stanowisko

4. Opracowanie wyników

- Obliczenie stężenia kwasu w surowcu, ekstrakcie i rafinacie

Do miareczkowania kwasu octowego używa się roztworu NaOH o stężeniu 0,1 mol/dm³. Stężenie kwasu należy wyliczyć bazując na stosunku liczby moli kwasu do NaOH 1:1, co wynika z reakcji:



$$n_{CH_3COOH} = n_{NaOH} = C_{NaOH} \cdot V_{NaOH}$$

$$C_{CH_3COOH} = \frac{n_{CH_3COOH}}{V_{CH_3COOH}} = \frac{C_{NaOH} \cdot V_{NaOH}}{V_{CH_3COOH}}$$

- Ułamek równowagowy x^*

Do policzenia \bar{x}^* używa się wzoru funkcji opisującego linię równowagową, a następnie za pomocą znanej wartości parametru y oblicza się wartość ułamka równowagowego x^* , zakładając, że funkcja będzie miała postać eksponentialną:

$$y = Ax^B$$

$$x^* = \sqrt[B]{\frac{y}{A}}$$

Tabela 1. Dane linii równowagi

x^* [kg/m ³]	y^* [kg/m ³]
0,00113	0,00297
0,00124	0,00584
0,00285	0,01127
0,00683	0,02069
0,00774	0,02280
0,01173	0,02946
0,01709	0,03735
0,01809	0,04053

c. Liczba jednostek przenikania masy

$$N_{oR} = \int \frac{d\bar{x}}{x - x^*}$$

Wartość powyższej całki wyznacza się metodą trapezów rysując wykres funkcji $f(y) = \frac{(1-y)_{iM}}{(1-y)(y-y_i)}$ a następnie oblicza się pole pod poszczególnymi fragmentami wykresu (im większa ilość trapezów tym dokładniejsze wyznaczenie wartości całki).

d. Wysokość jednostkowa przenikania

$$H = N_{oR} \cdot h_{oR}$$

$$h_{oR} = \frac{H}{N_{oR}}$$

e. Współczynnik przenikania masy

$$k_{RV} = \frac{R}{h_{oR} \cdot A_k}$$

Gdzie: A_k – powierzchnia poprzecznego przekroju kolumny [m²], R – strumień rafinatu [mol/h], h_{oR} – wysokość jednostkowa przenikania [m]

5. Bibliografia

- [1] Binay K. Dutta, Principles of Mass Transfer and Separation Processes-PHI (2009)
 [2] Praca zbiorcza pod redakcją Danuty Beliny-Freundlich, Laboratorium inżynierii procesowej, cz.2, Wrocław 1981

Stopień wyekstrahowania w układzie ciecz – ciecz I i II

Opracowali:
Kacper Jagiełło
Katarzyna Kuźmin

1. Wprowadzenie

a) Ekstrakcja

Ekstrakcja w układzie ciecz-ciecz to operacja polegająca na wydzieleniu jednego lub kilku składników z mieszaniny za pomocą selektywnych rozpuszczalników na drodze transportu masy, do cieczy, w której wyodrębniane składniki są lepiej rozpuszczalne.

Proces ekstrakcji składa się z 4 głównych etapów:

- I. Kontakt surowca z ekstrahentem i zmieszanie ich w mieszalniku.
- II. Rozdzielenie ekstraktu i rafinatu od siebie, dzięki różnicy ich gęstości w odstojniku.
- III. Oddzielenie ekstrahowanego składnika od ekstrahenta z ekstraktu (np. na drodze destylacji lub krystalizacji)
- IV. Wydzielenie ekstrahentu z rafinatu, najczęściej na drodze destylacji.

Ekstrakcja wykorzystywana jest w wielu procesach przemysłowych, do tych bardziej popularnych należą:

- Ekstrakcja węglowodorów aromatycznych z frakcji benzynowych
- Jest jednym z etapów wytwarzania kaprolaktamu
- Otrzymywanie antybiotyków na bazie penicyliny.

Dodatkowo ekstrakcja wykorzystywana jest w przemyśle:

- Spożywczym
- Farmaceutycznym
- Metalurgicznym
- Chemicznym organicznym, jak i nieorganicznym
- Środowiskowym

b) Trójkąt Gibbsa

Zgodnie z regułą faz Gibbsa:

$$F = C - P + 2 \quad (1)$$

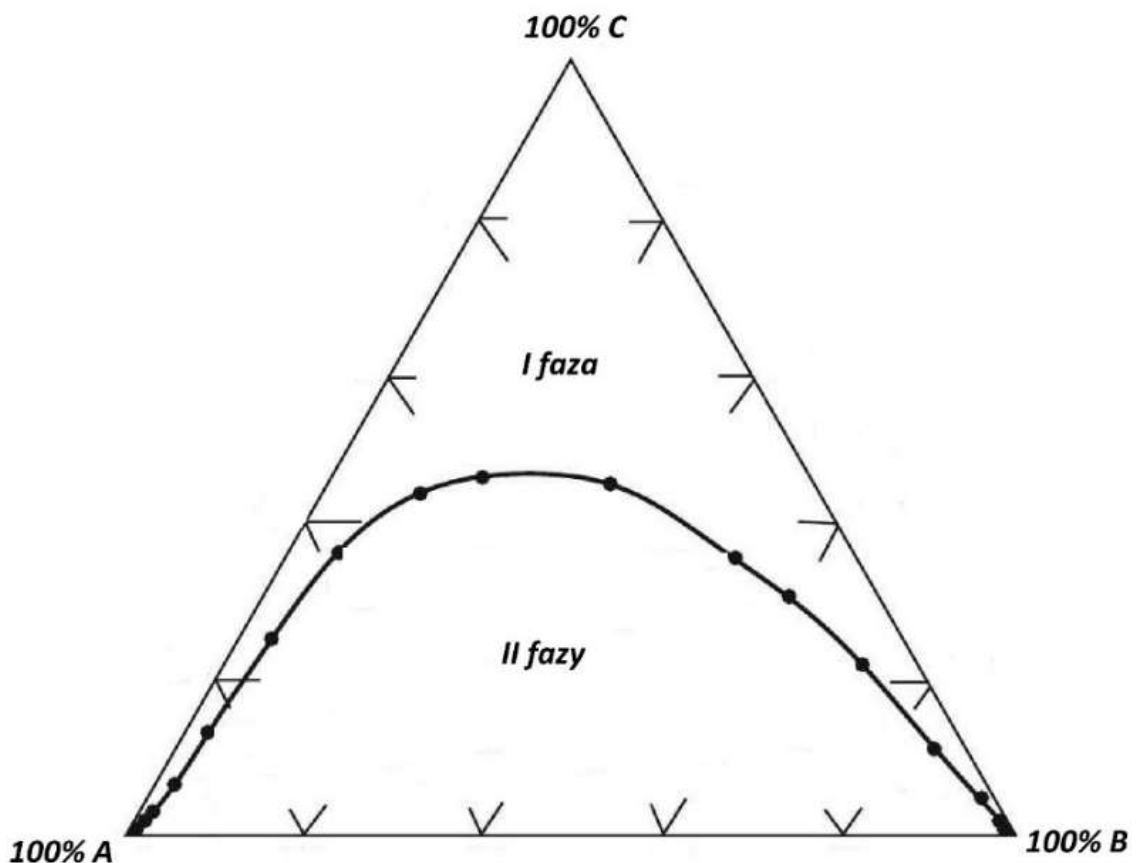
gdzie: F – liczba stopni swobody; C – liczba składników; P – liczba faz;
można stwierdzić, że maksymalna liczba faz dla układu trójskładnikowego ($C = 3$) wynosi 5 ($P = 5$). Dany układ posiada jednak 0 tzw. stopni swobody – oznacza to, że istnieje

w określonych warunkach ciśnienia, temperatury oraz stosunku stężeń składników. Zmiana któregokolwiek z podanych parametrów skutkować będzie zaburzeniem równowagi układu oraz zanikiem co najmniej jednej z faz. Znacznie częściej spotykane są układy o mniejszej liczbie faz: jedno- lub dwufazowe. Liczba faz jest ściśle związana ze wzajemną rozpuszczalnością się składników.

Składy równowagowe przyjęło się oznaczać na wykresie w formie trójkąta równobocznego – zwiększa to czytelność i łatwość oznaczania składów poszczególnych komponentów.

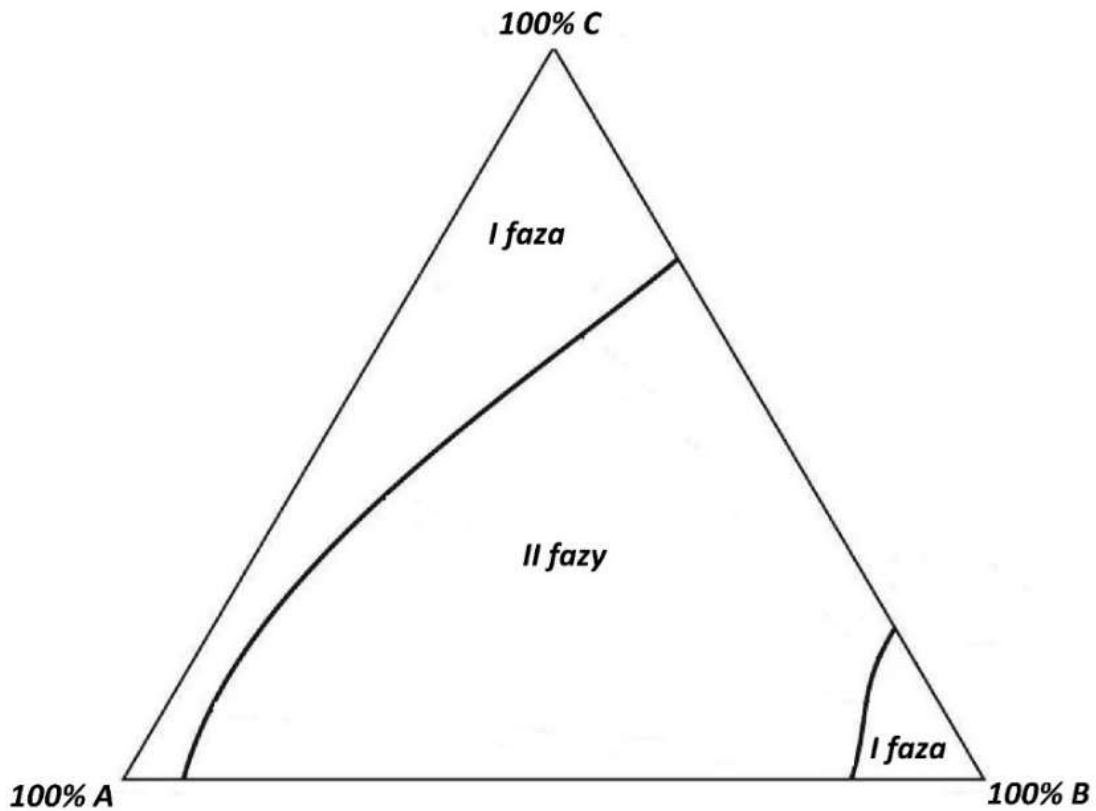
Układy trójskładnikowe składające się z 3 cieczy lub 2 cieczy i substancji rozpuszczającej się w obu (A-rozpuszczalnik pierwotny, B-ekstrahent, C- substancja ekstrahowana). możemy podzielić na dwa główne typy:

Typ I. C miesza się w nieograniczonych proporcjach z A i B, natomiast A i B mieszają się ze sobą w ograniczonych proporcjach lub wcale. Jest to najczęściej spotykany typ układów trójskładnikowych.



Rys. 1 Wykres trójkątny dla mieszanin trójskładnikowych typu I. [1]

Typ II. C miesza się z A w nieograniczonym stosunku, natomiast A i C mieszają się z B w ograniczonym stosunku.



Rys. 2 Wykres trójkątny dla mieszanin trójskładnikowych typu II. [1]

c) Ekstrakcja wielostopniowa

Założmy, że surowiec (F) zawierający rozpuszczalnik pierwotny A oraz substancję rozpuszczoną C jest poddawany ekstrakcji w rozpuszczalniku wtórnym B (S_B). W tym procesie substancja C przechodzi z surowca do rozpuszczalnika B. W zależności od doboru substancji przechodzi ona w różnym stopniu – równowagę pomiędzy rafinatem (zubożalym surowcem o składnik C), a ekstraktem (wzbogaconym rozpuszczalnikiem wtórnym o składnik C) opisuje tzw. współczynnik podziału K . Zakładając równowagę termodynamiczną między rafinatem, a ekstraktem,

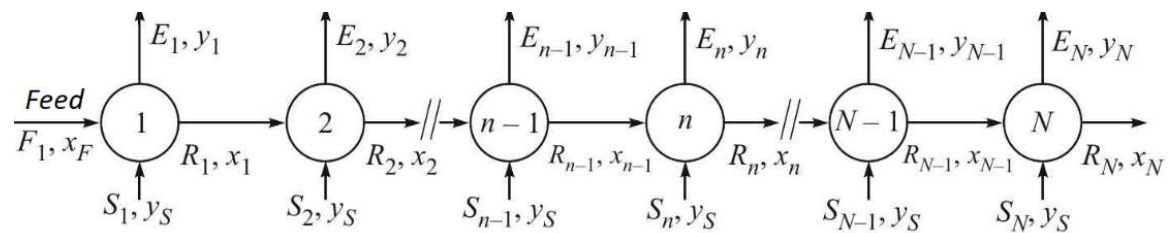
$$x_C(\gamma_C)_R = y_C(\gamma_C)_E \quad (2)$$

współczynnik podziału jest równy:

$$K = \frac{y_C}{x_C} = \frac{(\gamma_C)_R}{(\gamma_C)_E} \quad (3)$$

gdzie: $(\gamma_C)_R$ - współczynnik aktywności rozpuszczalnika w rafinacie; $(\gamma_C)_E$ - współczynnik aktywności rozpuszczalnika w ekstrakcie, x_C - ułamek molowy w rafinacie; y_C - ułamek molowy w ekstrakcie.

Często okazuje się, że jednokrotne przeprowadzenie ekstrakcji nie spowoduje przejścia substancji C z surowca do rozpuszczalnika w wystarczającym stopniu. W takiej sytuacji przeprowadza się kilkakrotnie proces ekstrakcji. Jeżeli za każdym razem zostanie użyta nowa porcja rozpuszczalnika proces ten będzie nosił nazwę **ekstrakcji wielostopniowej krzyżowej**.



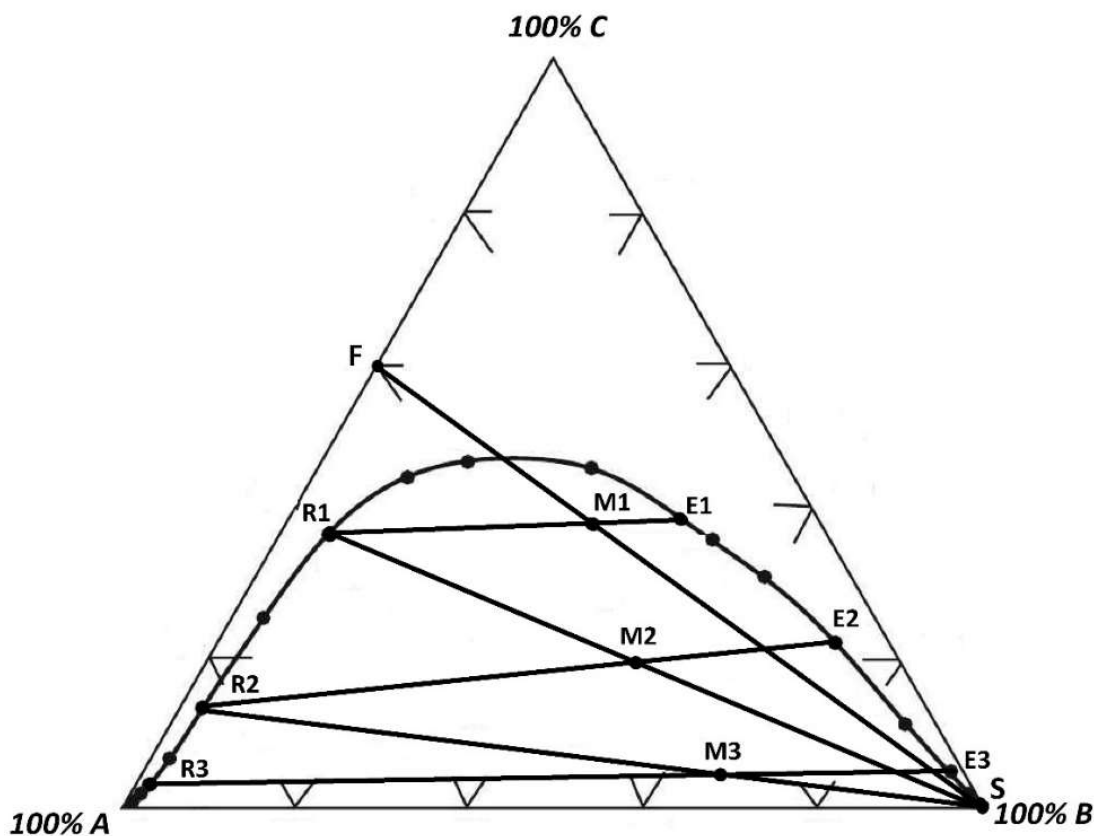
Rys. 3 Schemat technologiczny ekstrakcji współprądowej [1]

Podstawą do obliczeń wydajności ekstrakcji jest bilans masowy ekstrahowanego składnika. Bilans ten można wyrazić za pomocą następującego układu równań:

$$\begin{cases} F + S = M = R + E \\ F \cdot m_F = R \cdot m_R + E \cdot m_R \end{cases} \quad (4)$$

Gdzie: F – strumień masy surowca [kg/s]; S – strumień masy rozpuszczalnika [kg/s]; M – strumień masy mieszaniny surowiec- rozpuszczalnik wtórny [kg/s]; R – strumień masy rafinatu [kg/s]; E – strumień masy ekstraktu [kg/s]; m_F – ułamek masowy substancji ekstrahowanej w surowcu [kg/kg]; m_R – ułamek masowy substancji ekstrahowanej w rafinacie [kg/kg]; m_R – ułamek masowy substancji ekstrahowanej w ekstrakcie [kg/kg];

W procesie ekstrakcji wielostopniowej krzyżowej rafinat powstający przy $n-1$ stopniu (R_{n-1}) staje się surowcem w następnym stopniu (F_n).



Rys. 4 Ekstrakcja wielostopniowa krzyżowa przedstawiona na wykresie trójkątnym

Do oceny efektywności procesu ekstrakcji możemy wykorzystać stopień wyekstrahowania ψ , który jest stosunkiem masy składnika wyekstrahowanego na drodze ekstrakcji do masy tego składnika będącego w surowcu:

$$\psi = \frac{Sx_{BS} - Rx_{BR}}{Sx_{BS}} \quad (5)$$

gdzie :

S – masa substratu [kg]; x_{BS} - ułamek masowy składnika ekstrahowanego w substracie;
 R - masa rafinatu [kg]; x_{BR} - ułamek masowy składnika ekstrahowanego w rafinacie

Stopień wyekstrahowania dla całej baterii ekstrakcyjnej możemy policzyć korzystając ze wzoru:

$$\psi = \frac{Sx_{BS} - Rx_{BRi}}{Sx_{BS}} = \frac{(\varepsilon + 1)^i - 1}{(\varepsilon + 1)^i} \quad (6)$$

gdzie:

x_{BRi} - ułamek masowy składnika ekstrahowanego w rafinacie w ostatnim stopniu ekstrakcji, i – ilość stopni ekstrakcji, ε - współczynnik ekstrakcji.

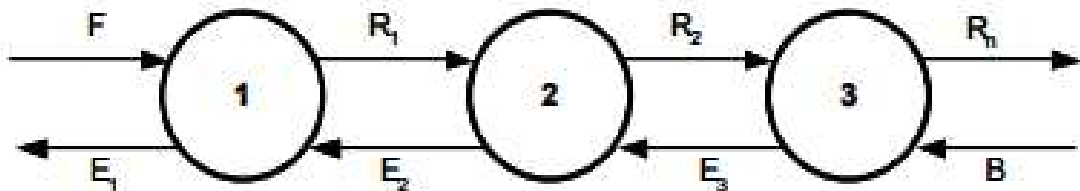
Natomiast dla poszczególnego stopnia w baterii:

$$\psi = \frac{R_{i-1}x_{BR(i-1)} - R_i x_{BRi}}{R_{i-1}x_{BR(i-1)}} \quad (7)$$

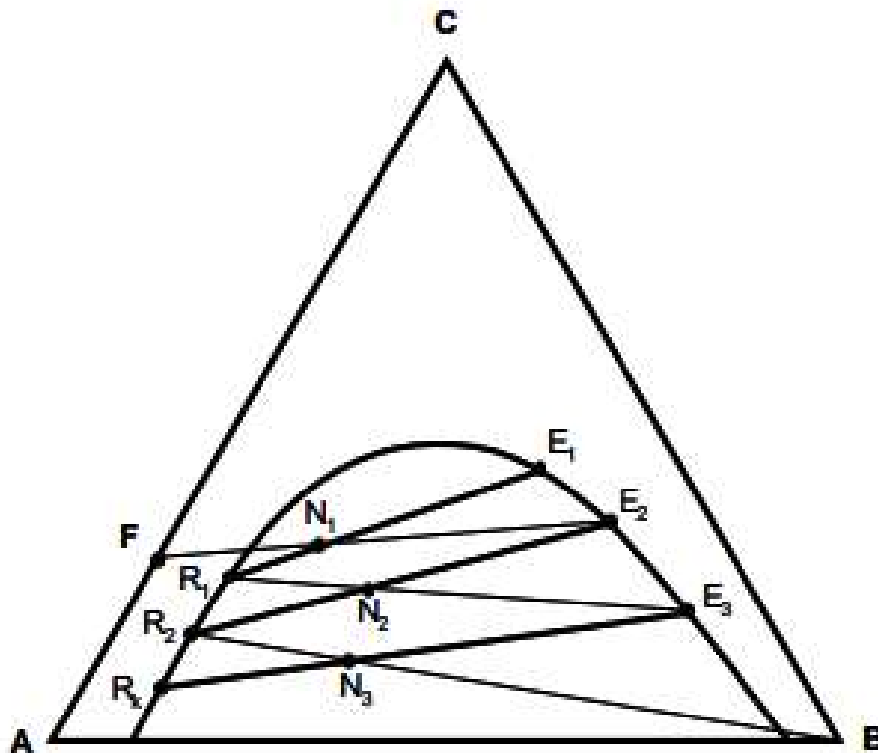
gdzie:

R_i - masa rafinatu uzyskanego na stopniu, dla którego liczymy współczynnik wyekstrahowania [kg]; x_{BRi} - ułamek masowy składnika ekstrahowanego w rafinacie na stopniu, dla którego liczymy współczynnik wyekstrahowania; R_{i-1} - masa rafinatu powstałego w poprzednim stopniu ekstrakcji [kg]; $x_{BR(i-1)}$ - ułamek masowy składnika ekstrahowanego w rafinacie powstałym na poprzednim stopniu baterii

Ekstrakcja wielostopniowa może występować także w prądzie skrzyżowanym, jest to tzw. **ekstrakcja wielostopniowa przeciwna**. Polega ona na przeciwnym skierowaniu strumieni surówki i rozpuszczalnika, najczęściej jest prowadzona jako proces ciągły.



Rys. 5 Schemat procesu ekstrakcji przeciwna dla ekstrakcji trójstopniowej



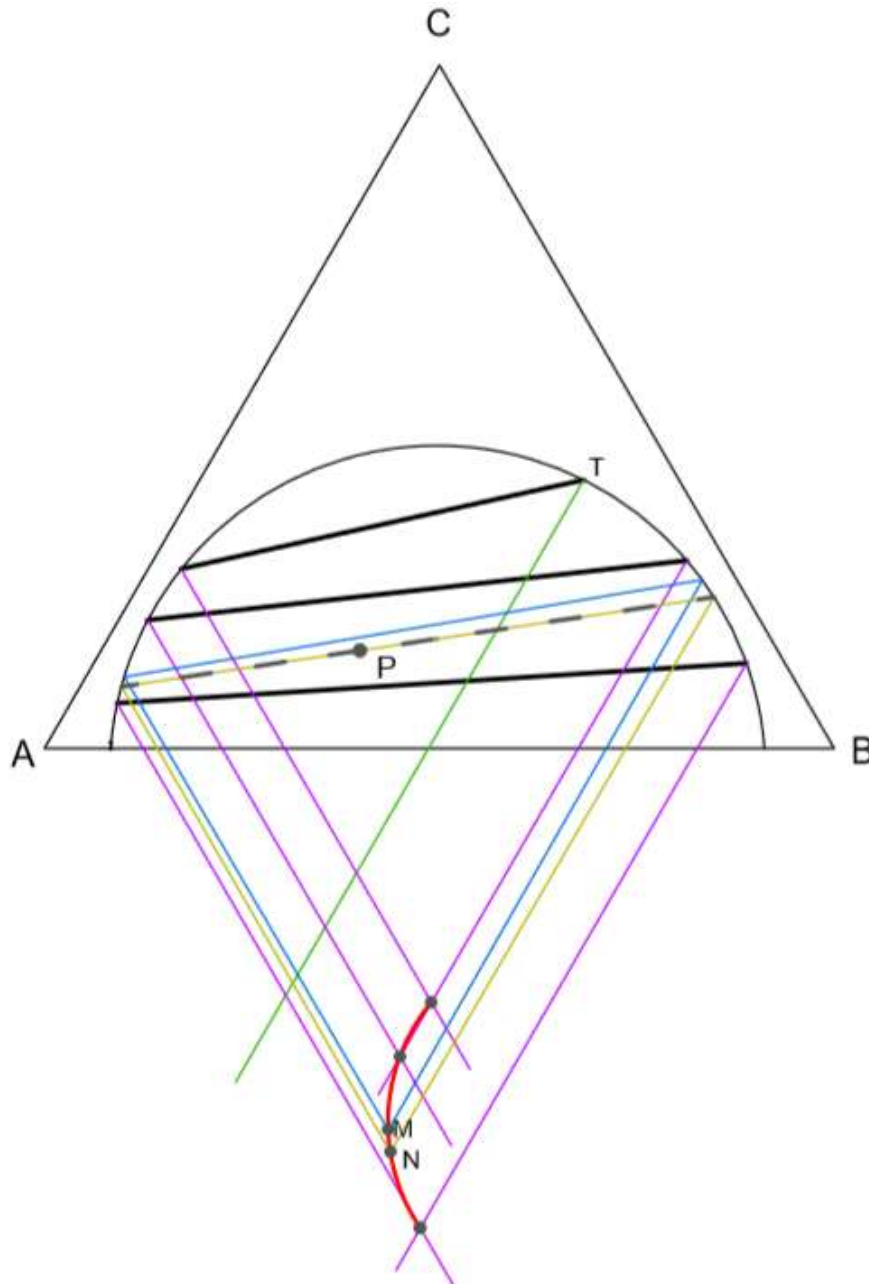
Rys. 6 Ekstrakcja wielostopniowa przeciwna przedstawiona na wykresie trójkątnym.

W ekstrakcji przeciwprądowej stopień wyekstrahowania ψ lub stopień zanieczyszczenia rafinatu ϕ można wyznaczyć na podstawie poniższego wzoru:

$$\psi = 1 - \phi = \frac{\varepsilon^{i+1} - \varepsilon}{\varepsilon^{i+1} - 1} = \frac{Sx_{BS} - Rx_{BRi}}{Sx_{BS}} \quad (8)$$

d) Wyznaczanie cięciw równowagowych w trójkącie Gibbsa

Założmy, że wyznaczamy cięciwę równowagową przechodzącą przez punkt P na poniższym trójkącie Gibbsa:



- 1) Z krańca cięciwy równowagowej z punktu T poprowadzić prostą równoległą do boku trójkąta AC.
- 2) Postąpić tak ze wszystkimi krańcami cięciw równowagowych na wykresie.
- 3) Punkty przecięć narysowanych prostych połączyć ze sobą.

- 4) Na powstałym łuku wyznaczyć punkt (M), następnie poprowadzić z niego prostą równoległą do boku AC i do boku BC (niebieskie linie), następnie połączyć ze sobą punkty, tworząc kolejną cięciwę równowagową.
- 5) Sprawdzić, czy powstała cięciwa przechodzi przez punkt P, jeśli nie powtórzyć postępowanie z punktu 4, aż do uzyskania takiej prostej, która przechodzi przez punkt P.
- 6) Gdy prosta przejdzie przez punkt P, jest ona poszukiwaną cięciwą równowagową, w wypadku ukazanego przykładu jest to cięciwa narysowana przerywaną linią i wyznaczona z punktu N na łuku.

2. Cel ćwiczenia

- a) Celem ćwiczenia I jest przeprowadzenie ekstrakcji wielostopniowej oraz wyznaczenie stopnia wyekstrahowania dla poszczególnych stopni i całego układu.
- b) Celem ćwiczenia II jest porównanie procesu ekstrakcji jedno i dwustopniowej dla założonego składu surowca oraz końcowego składu rafinatu.

3. Metodyka pomiarów

a) Ćwiczenie I

- 1) Zadane przez prowadzącego objętości toluenu, acetonu i wody wprowadzić do zbiornika z mieszadłem (UWAGA – najpierw należy wprowadzić toluen i aceton, a dopiero później wodę);
- 2) Ustawić zadaną przez prowadzącego szybkość obrotów mieszadła i przez 10 min mieszać układ;
- 3) Po upływie czasu należy wyłączyć mieszadło i opróżnić zbiornik;
- 4) Otrzymany układ wprowadzić do rozdzielacza. Po widocznym rozwarstwieniu się faz należy oddzielić fazę wodną od fazy organicznej do dwóch osobnych cylindrów;
- 5) Spisać objętości fazy wodnej i fazy organicznej
- 6) Fazę organiczną przelać ponownie do zbiornika z mieszadłem oraz wlać ponownie tą samą objętość wody, a fazę wodną wylać.
- 7) Po wykonaniu trzeciego stopnia ekstrakcji należy fazę organiczną wlać do odpowiedniego naczynia oraz przemyć wodą używany sprzęt oraz aparaturę.

b) Ćwiczenie II

Ćwiczenie polega na przeprowadzeniu ekstrakcji wielostopniowej. Stopień ekstrakcji jest podawany przez prowadzącego, a także dane wejściowe i żądane dane wyjściowe.

- 1) Przygotować surowiec o podanym przez prowadzącego składzie (aceton i toluen)
- 2) Dodać odpowiednią ilość wody, mieszać roztwór wytrząsając go przez 10 minut.
- 3) Przelać go do rozdzielacza, po rozwarstwieniu się faz oddzielić je od siebie do dwóch osobnych cylindrów.
- 4) Spisać objętość faz, oraz zmierzyć i spisać ich gęstość.

- 5) Następnie do fazy organicznej ponownie dolać wodę w takiej samej ilości jak wyżej i wykonywać po kolej kroki 3 i 4 tyle razy, ile stopni będzie miała ekstrakcja.
- 6) Po wykonaniu fazę organiczną wlać do odpowiedniego naczynia, umyć używany sprzęt i aparaturę.

4. Opracowanie wyników

a) Ćwiczenie I

Wyniki należy zawrzeć w tabeli znajdującej się w protokole do danego ćwiczenia. Obliczone stopnie wyekstrahowania dla całości i poszczególnych stopni należy wprowadzić do poniższej tabeli:

Stopień	V_{rf} [cm ³]	V_{ekst} [cm ³]	ρ_{raf} [g/cm ³]	ρ_{eks} [g/cm ³]	$x_{ace/raf}$	$x_{ace/ekst}$	Ψ	Ψ''	Ψ'''	Starty [g]	Starty [g]	Starty [g]
1.								X	X		X	X
2.								X	X		X	X
3.								X				

Sprawozdanie powinno zawierać: spis oznaczeń, schemat aparatury, wyniki i obserwacje, przykład obliczeniowy, wnioski oraz wykres ekstrakcji współprądowej na wykresie trójkątnym załączony do instrukcji. Gęstość dla toluenu, acetonu i wody należy znaleźć w odpowiedniej literaturze.

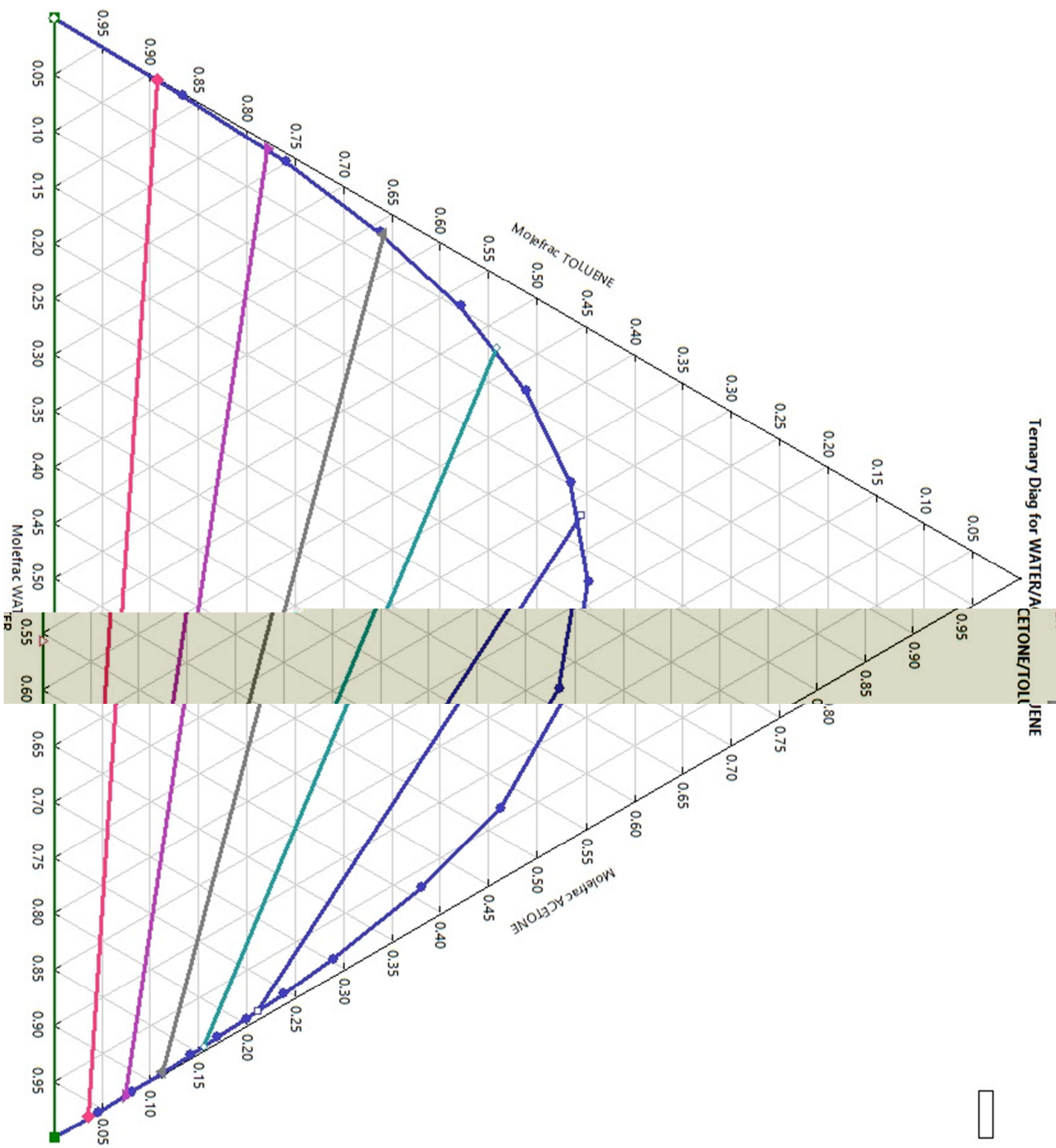
b) Ćwiczenie II

Wyniki należy zawrzeć w tabelach znajdujących się w protokole do danego ćwiczenia. Obliczone ułamki wagowe i stopnie wyekstrahowania należy, po obliczeniu wprowadzić do odpowiednich tabel:

Substancja:	Objętość substancji [cm ³]			
	Jednostopniowa	Dwustopniowa	...	i-stopniowa
Toluen			...	
Aceton			
Woda			
Rafinat I			
Ekstrakt I			
Rafinat II	X		
Ekstrakt II	X		

5. Bibliografia

- [1] *Principles of Mass Transfer and Separation Process* – B. Dutta
- [2] *Skrypt Laboratorium inżynierii procesowej część 2* – autor zbiorowy
- [3] *Atkins' Physical Chemistry eight edition* – P. Atkins, J. de Paula
- [4] *Chemia fizyczna* – K. Pigoń, Z. Ruziewicz
- [5] *Podstawy Inżynierii Chemicznej i Procesowej* – autor zbiorowy



Sprawność półki sitowej przy wymianie masy w układzie gaz – ciecz

Opracował:
Mateusz Zator

1. Wprowadzenie

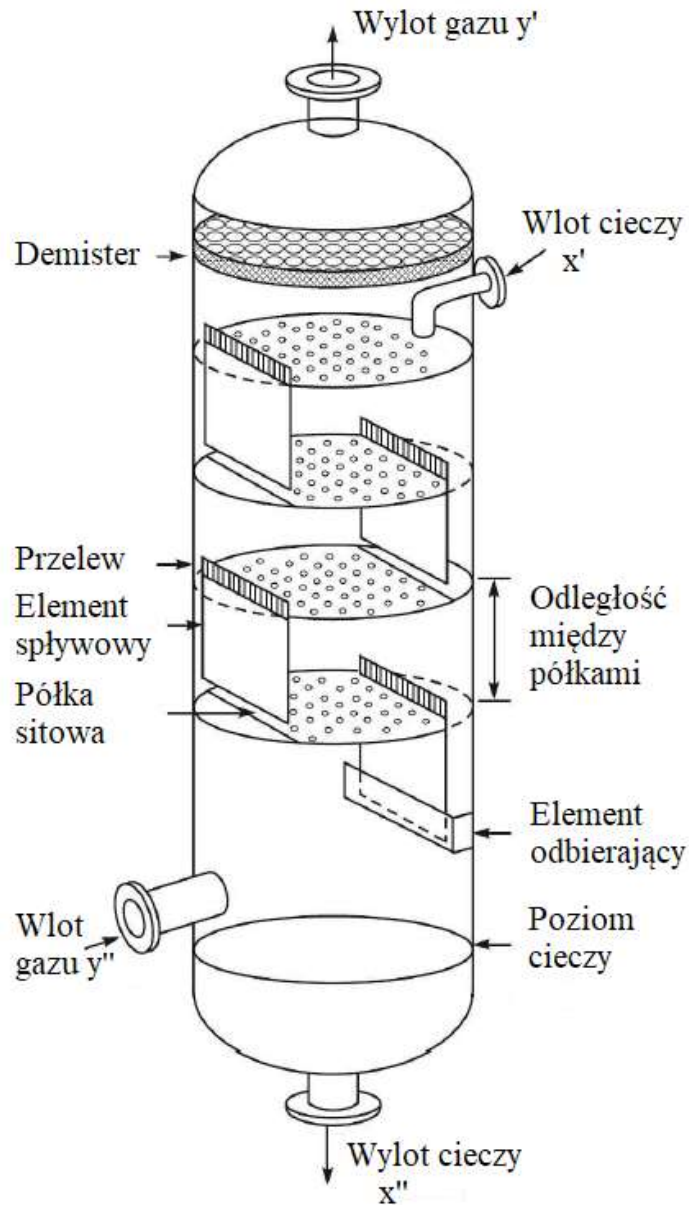
Celem procesu jest stworzenie warunków do jak największego kontaktu międzyfazowego, tak, aby wymiana masy była największa, a fazy opuszczające półkę miały inną zawartość składnika wymienianego w procesie. Warunkami, które znacznie wpływają na zwiększenie wydajności procesu, jest burzliwość procesu. Pomaga on rozproszyć jedną fazę w drugiej, co z kolei zwiększa powierzchnię, w której zachodzi wymiana masy, co przekłada się na duży współczynnik wymiany masy. Jednym z urządzeń, które nam to umożliwiają przy kontaktowaniu fazy ciekłej z gazową jest kolumna z półkami sitowymi. Powierzchnia wymiany masy jest tworzona przez bańki powstające w wyniku przepływu gazu podawanego od dołu kolumny przez półkę sitową, a następnie przez fazę ciekłą podawaną od góry kolumny. Kolumna z półkami sitowymi stosowana jest najczęściej do procesów takich jak absorpcja, desorpcja oraz destylacja. Parametrami charakteryzującymi kolumnę z półkami sitowymi są współczynnik wymiany masy K_L oraz powierzchnia międzyfazowa \bar{a} .

Rodzaj kolumny	Prędkość gazu (m/s w warunkach normalnych)	Parametry przepływu gazu		
		$k_L \times 10^4$ (m/s)	$k_y \times 10^3$ (kmol/s.m ² .Δy)	\bar{a} (m ² /m ³)
Kolumna z półkami sitowymi	0.02-0.5	1-20	0.5-6.0	100-200

a) Budowa.

Kolumna z półkami sitowymi składa się z cylindrycznego płaszcza, w którym zawierają się części kolumny takie jak:

- i) Półki sitowe, na których zachodzi dyfuzja
- ii) Przelewy wraz z elementem spływowym, przez które ciecz spływa na niższe półki
- iii) Króćce, do których przymocowane są dysze, przez które podawane są surowce
- iv) Króćce, z których odbierane są produkty
- v) Demister, na którym zatrzymywane są krople cieczy porwane przez gaz



Rys. 1. Schemat kolumny z półkami sitowymi [1]

b) Półki.

Półka w kolumnie ma dwie podstawowe funkcje. Pierwsza to umożliwienie kontaktu gazu z cieczą. Druga to podzielenie kolumny na etapy, na których zachodzi dyfuzja - ilość etapów zależy od efektywności półek oraz od procesu zachodzącego w kolumnie.

W kolumnach najczęściej stosujemy następujące rodzaje półek:

- Półka dzwonekowa
- Półka zaworkowa
- Półka sitowa

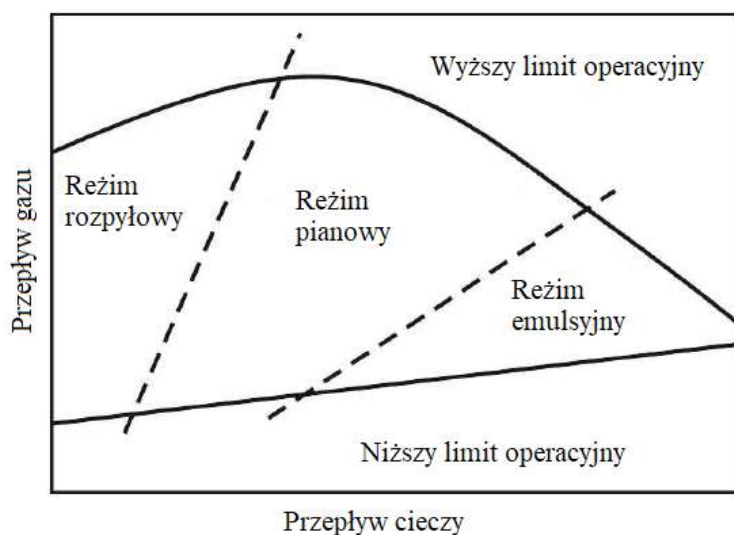
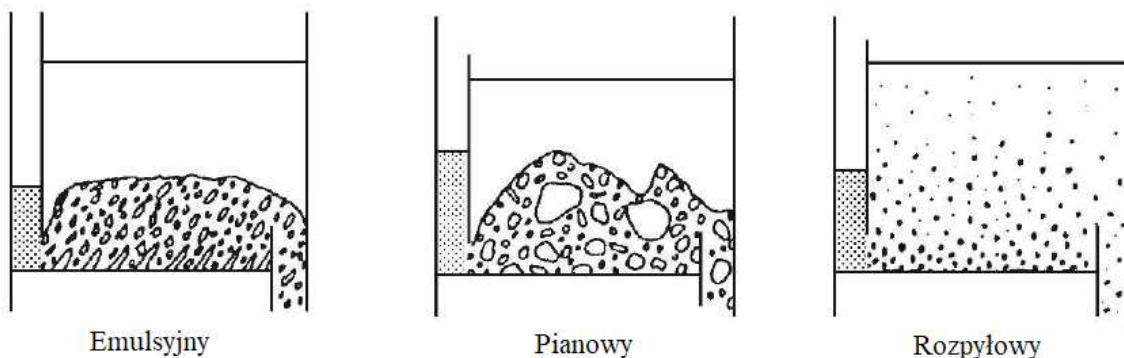
Półka sitowa jest najprostszym typem półki. Jej efektywność wynosi 60-70%.

c) Otwory.

Półki posiadają stosunkowo małe otwory, których średnica waha się w zakresie od 1/8 do 1/2 cala. Średnice ich dobiera się w taki sposób, aby uniknąć zjawiska porywania cieczy oraz tworzenia się emulsji na półce sitowej. Duże szczeliny sprzyjają rozpyłowemu reżimowi kolumny, natomiast małe emulsyjnemu. Otwory oraz parametry przepływu mediów dobiera się tak, aby doprowadzić do powstania piany na półce, wówczas zachodzi optymalna wymiana masy.

Przy procesach, w których stosowane są czyste media, stosuje się otwory o średnicy 3/16 cala, jednakże w procesach, w których faza ciekła jest zanieczyszczona lub tworzy zbyt gęste złoże, stosuje się otwory o średnicy 1/2 cala. W przypadku zastosowania zbyt dużych otworów, w półce może występować kapanie, czyli przedostawanie się cieczy na niższe półki przez jej otwory. Można temu zaradzić zwiększając natężenie przepływu gazu, lecz trzeba mieć na uwadze opłacalność takiej operacji.

Odległości między półkami w kolumnach to od 8 do 36 cali. Wyróżniamy wcześniej wspomniane trzy reżimy pracy kolumny:



Rys. 2. Schemat kolumny z półkami sitowymi [2]

Omówimy po krótko wyżej zobrazowane reżimy pracy kolumny.

- Reżim emulsyjny

Zachodzi w momencie zbyt małego strumienia gazu. Pęcherzyki utworzone w momencie przejścia przez półkę porywane są przez zbyt szybki strumień cieczy, w wyniku czego rozmiar pęcherzyków pozostaje mały, a porwane pęcherzyki nie opuszczają cieczy wystarczająco szybko, żeby efektywnie kierować się na następną półkę w kolumnie. Wpływa to negatywnie na jej wydajność.

- Reżim pianowy

Jest pośrednim typem reżimu, w którym strumień cieczy jest na tyle mały, by zapobiec rozpyleniu cieczy, ale wystarczająco duży, by umożliwić kształtowanie się dużych pęcherzyków bez ryzyka ich rozerwania. Pozwala to na największą powierzchnię wymiany masy z wymienionych reżimów pracy kolumny.

- Reżim rozpyłowy

Zachodzi w momencie występowania zbyt dużego strumienia gazu i zbyt małego przepływu cieczy. Gaz przepływający z dużą szybkością przepływa przez półkę, porywając ciecz i formując krople, które tworzą małą powierzchnię wymiany masy oraz zagrożenie niejednorodnego ciśnienia w kolumnie przez blokowanie otworów półki powyżej, oraz w momencie nagłego drastycznego zwiększenia strumienia cieczy. Powoduje on nagły spadek ciśnienia na wylocie gazu z kolumny, co oznacza, że ciśnienie jest akumulowane na jednej z części kolumny, stwarzając zagrożenie uszkodzenia aparatury.

Półka teoretyczna Murphree'go

Określa globalną sprawność procesu w aparacie lub na półce. Jest to też teoretyczny stopień, który charakteryzuje się określonym stanem równowagi termodynamicznej.

Prawidłowym założeniem jest fakt, że gaz opuszczający półkę z różnych miejsc o różnym współczynniku dyfuzji miesza się przed przejściem do kolejnej półki. Stężenie przepływającej cieczy zmienia się w trakcie wędrówki przez półkę. Oznaczmy stężenia zgodnie z rysunkiem kolumny. Niech x'' będzie stężeniem fazy ciekłej opuszczającą półkę, x' stężeniem wprowadzanym na półkę, oraz y'' stężeniem fazy gazowej wprowadzanej na półkę, a y' stężeniem opuszczającą. Stężeniem równowagowym teoretycznym będziemy określać następująco $y^*(x')$ oraz $x^*(y'')$ w przepływie krzyżowym. Stosując powyższe założenia oraz oznaczenia Murphree zdefiniował sprawność półki Murphree'go następującymi równaniami, które możemy zapisać w następujący sposób:

Dla gazu:

$$E_{MG} = \frac{y' - y''}{y' - y^*(x')} \quad (1)$$

Dla cieczy

$$E_{MC} = \frac{x'' - x'}{y^*(y'') - x'} \quad (2)$$

Równania te prawdziwe są dla absorpcji.

Sprawność lokalna półki może być różna w różnych miejscach kolumny, jednak zakładając idealne wymieszanie w kolumnie można przyjąć, że sprawności te są sobie równe.

$$E_{OG} = \frac{y'_{loc} - y''_{loc}}{y'_{loc} - y^*(x')_{loc}} \quad (3)$$

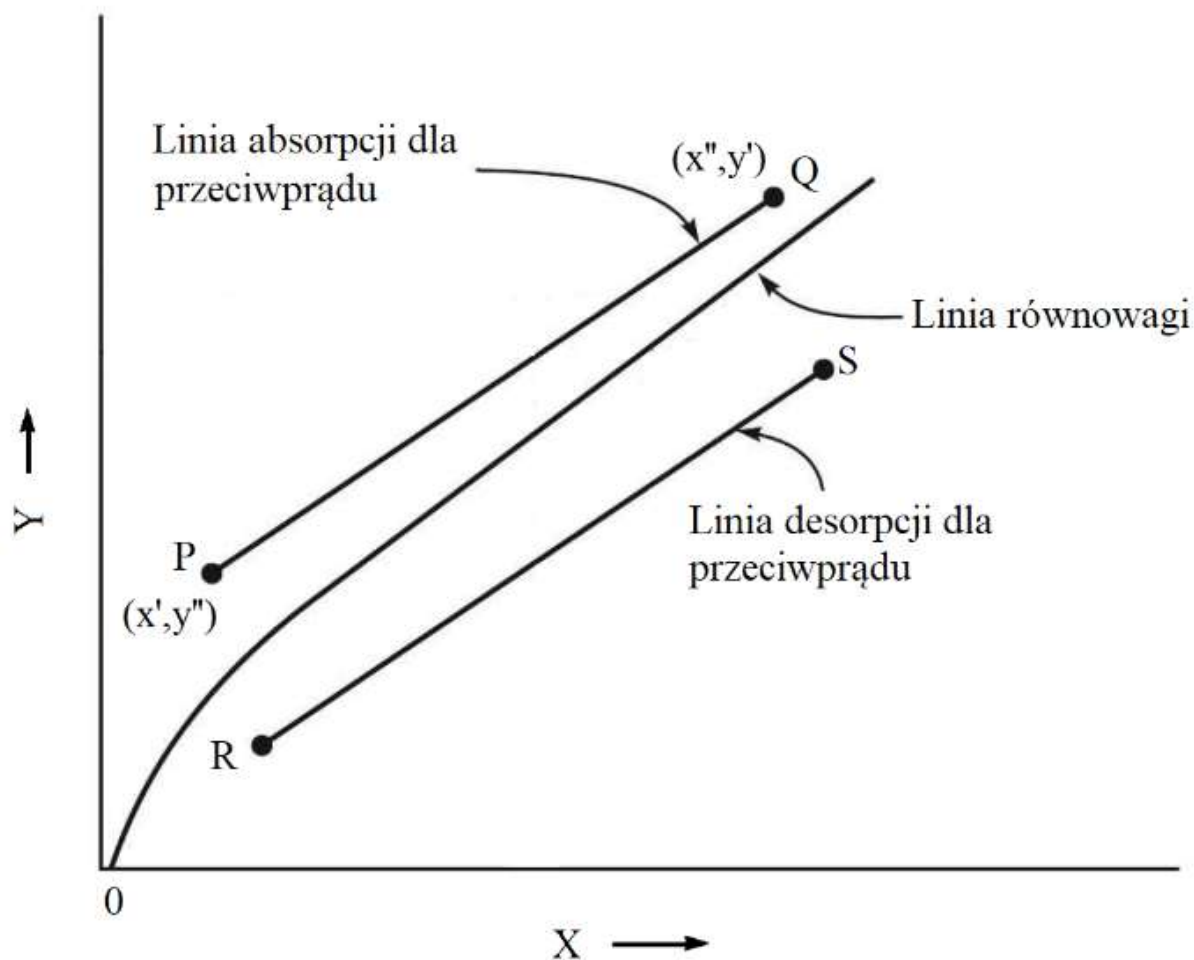
$$E_{OG} = E_{MG} \quad (4)$$

Sprawność półki jest wskaźnikiem, jak blisko wydajność rzeczywistej półki jest bliska półce idealnej.

$$E_o = \frac{\text{liczba półek teoretycznych}}{\text{liczba półek rzeczywistych}} \quad (5)$$

Zależność

$$E_o = \frac{\ln \left[1 + E_{MG} \left(\frac{m\bar{V}}{\bar{L}} - 1 \right) \right]}{\ln \left(\frac{m\bar{V}}{\bar{L}} - 1 \right)} \quad (6)$$



Rys. 3. Wykres obrazujący wymianę masy przy absorpcji i desorpcji
 y – Ułamek molowy fazy gazowej
 x – Ułamek molowy fazy ciekłej

Dla prosto liniowego przebiegu linii równowagi i niewielkich stężeń substancji przenoszonej liczbę jednostek przenikania masy można obliczyć z zależności

$$n_{og} = \frac{1}{1 - \frac{1}{A}} \cdot \ln \left(\frac{y' - y^*(x'')}{y'' - y^*(x')} \right) \quad (7)$$

Gdzie:

$A = \frac{\bar{L}}{m \cdot \bar{V}}$ - współczynnik absorpcji,

\bar{L} - molowe natężenie przepływu cieczy $\frac{mol}{s}$,

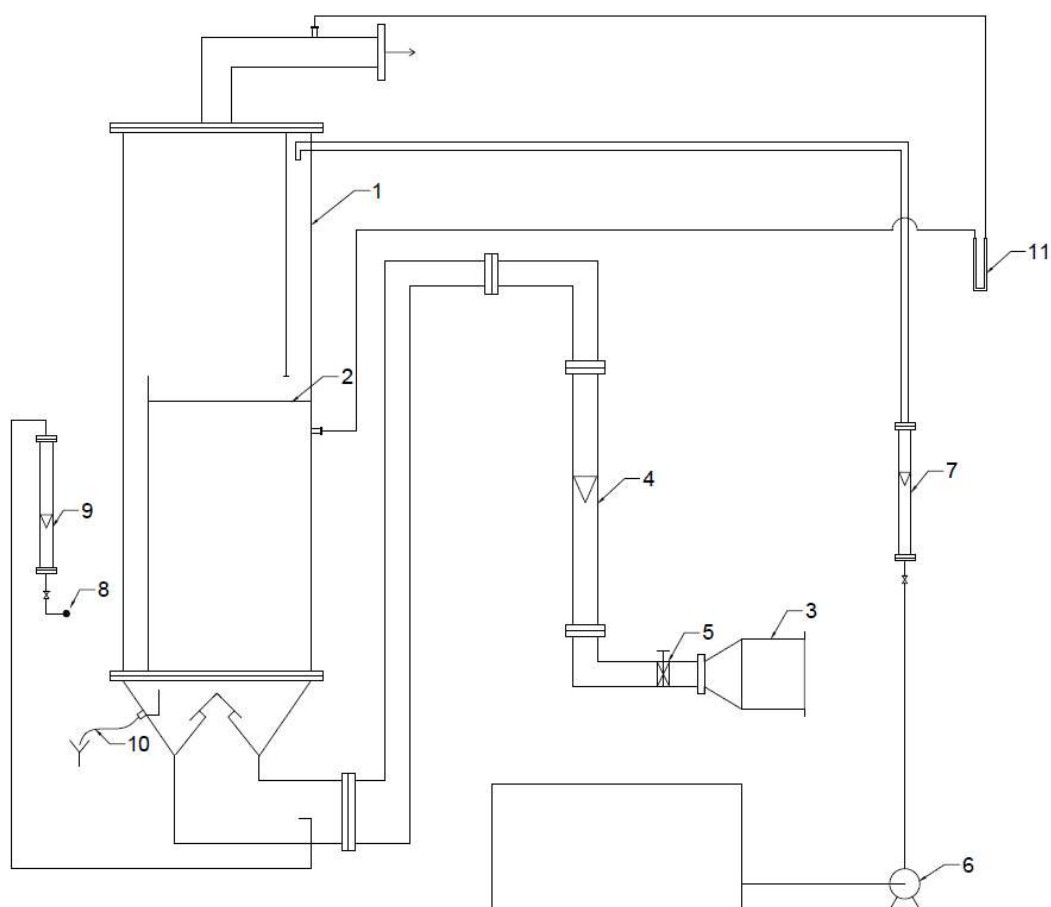
\bar{V} - molowe natężenie przepływu gazu $\frac{mol}{s}$,

m - współczynnik podziału ($y = mx$),

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne określenie sprawności półki sitowej, pracującej w aparacie do wymiany masy w układzie gaz-ciecz, a następnie porównanie danych eksperymentalnych z obliczonymi wartościami sprawności E_G , z uwzględnieniem zależności podanych we wprowadzeniu.

3. Schemat aparatury



1. Kolumna, 2. Półka sitowa, 3. Dmuchawa, 4. Rotometr, 5. Zasuwa, 6. Pompa, 7. Rotometr, 8. Źródło CO₂, 9. Rotometr, 10. Odpływ cieczy, 11. Manometr

Rys. 4. Schemat aparatury doświadczalnej

4. Metodyka pomiarów

Sprawność półki sitowej może być określana zarówno dla procesy adsorpcji, jak i desorpcji. Sposób wykonania doświadczeń w obu tych przypadkach różni się nieznacznie.

W adsorpcji początkowe stężenie gazu na wlocie (y') określa się ze stosunku CO₂ i powietrza, mierząc natężenie objętościowe przepływu gazów za pomocą rotametrów 4 i 9 (rys. 4). W desorpcji stężenie CO₂ w cieczy na wylocie określa się metodą analizy strąceniowej ($\text{BaOH}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{BaCO}_2 + \text{H}_2\text{O}$); nadmiar BaOH₂ odmiareczkuje się za pomocą 0.01 HCl.

- 1) Włączyć dmuchawę 3 regulując przepływ powietrza zasuwą 5 do zadanej wartości
- 2) Włączyć pompę podającą ciecz 6 nastawiając żądany przepływ.
- 3) Oznaczyć stężenie CO₂ w wodzie i powietrzu na wlocie i wylocie kolumny.
- 4) Po ustaleniu się pracy kolumny (ok. 10 minut) pobrać 3 próbki cieczy odpływającej z półki ok 20 cm³
- 5) Oznaczyć zawartość CO₂ w probówkach cieczy opuszczającej aparat. Oznaczanie wykonać bezpośrednio po pobraniu próbek.
- 6) Po kolejnych 10 minutach pracy aparatu pobrać następne próbki cieczy i wykonać oznaczenia CO₂.

5. Opracowanie wyników

Podczas doświadczenia stężenie absorbowanego lub desorbowanego CO₂ jest niewielkie. Można zatem przyjąć, że natężenie przepływu fazy ciekłej i gazowej w kolumnie są stałe wzdłuż wysokości. W doświadczeniu oznacza się stężenie CO₂ w fazie ciekłej na wejściu i na wyjściu z aparatu. Stężenia w fazie gazowej obliczane są z bilansu. Stężenie równowagowe w fazie gazowej do stężenia w fazie ciekłej można obliczyć z równania linii równowagi dla układu CO₂ - powietrze – woda

$$m_{px} = \frac{124,5}{a - b \cdot p} \quad (8)$$

gdzie p- prężność parcyjna CO₂, MPa.

Temperatura [°C]	0	25	50	75	100
a	1,84	0,755	0,425	0,308	0,231
b	0,265	0,0428	0,0159	0,00985	0,000328

$$p = m_{px} \cdot x \quad (9)$$

Po określeniu wartości stężenia równowagowego w fazie gazowej obliczamy sprawność półki wg zależności (1). Jest to doświadczalna wartość sprawności. Następnie obliczamy wartość sprawności wg zależności modelowych (3).

Oprócz wyników doświadczeń należy podać charakterystykę badanej półki sitowej oraz omówić wpływ parametrów ruchowych pracy półki na jej sprawność.

Uwaga. Przy oznaczaniu CO₂ w wodzie należy zwrócić uwagę na to, że stężenia CO₂ są bardzo ($1 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-4} \text{ kmol/kmol}$).

Wyniki zestawić w tabeli.

Lp.	x'	x''	y' lub y'	y*	$E_{dośw.}$	$E_{obl.}$	L	V	$\Delta P_{półki}$ MPa
	kmol/kmol						kmol/s		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

6. Bibliografia

[1] Binay K. Dutta, Principles of Mass Transfer and Separation Processes-PHI (2009)

[2] Praca zbiorcza pod redakcją Danuty Beliny-Freundlich, Laboratorium inżynierii procesowej, cz.2, Wrocław 1981

Wymiana masy od ciała stałego do cieczy w warunkach konwekcji naturalnej

Opracowała:
Joanna Rzyczkowska

1. Wprowadzenie

Na początku warto wyjaśnić czym jest konwekcja naturalna. W konwekcji naturalnej wymiana masy następuje na skutek różnicy gęstości mediów. Najprostszym sposobem na wytłumaczenie tego zjawiska jest rozpatrzenie przykładu parzenia kawy lub herbaty z cukrem. Zalewamy kawę wodę i następnie dodajemy kostkę cukru. W zawieszynie następuje dyfuzja molekularna cząsteczek kostki cukru do kawy. W momencie kiedy kostka cukru się rozpuści i powstanie nam mieszanina jednorodna mamy już proces zakończony. Konwekcja naturalna jak sama nazwa wskazuje jest wtedy, gdy nie zamieszamy kawy tylko dajemy czas cukrowi, aby sam się rozpuścił. Użycie w tym wypadku łyżeczki jest już konwekcją wymuszoną, gdyż mamy czynnik mechaniczny.

Mechanizm powstawania różnicy gęstości można opisać w następujący sposób. Wraz z rozpuszczaniem się kostki cukru rośnie stężenie cieczy przy jego górnej powierzchni. Jednocześnie maleje ono pod kostką. W ten sposób powstaje różnica stężeń, dzięki której zachodzi konwekcja naturalna i transport masy. Warunek ten jest spełniony tylko w przypadku, gdy kostka jest zawieszona w cieczy.

Ważne jest, aby pamiętać, że podczas wymiany masy stężenie zmienia się w przestrzeni i czasie:

$$C = f(x, y, z, \tau) \quad (1)$$

Największa zmiana stężenia zachodzi z kierunku normalnej do tej powierzchni n i charakteryzuje się ją gradientem stężenia:

$$\text{grad } C = \frac{\partial C}{\partial n} \quad (2)$$

Gęstość strumienia dyfuzyjnego charakteryzuje się jako stosunek strumienia dyfuzyjnego do powierzchni:

$$I = \frac{dm}{Ad\tau} \quad (3)$$

Czas w mianowniku w powyższym równaniu wynika z definicji strumienia dyfuzyjnego, którym jest ilość masy substancji przechodząca przez powierzchnię izostężeniową (zbiór punktów o jednakowym stężeniu) w jednostce czasu.

Powyższe równanie można zapisać zgodnie z Prawem Ficka, które stosujemy, gdy nie zmienia się w czasie stężenie strumienia dyfuzji objętościowej.

$$I = -D \text{ grad } C \quad (4)$$

Gdzie: D – współczynnik dyfuzji [m^2/s].

Gęstość strumienia dyfuzyjnego można też zapisać za pomocą drugiego prawa Ficka, które przewiduje wpływ dyfuzji:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Rozpatrując ośrodek ruchomy, w którym zachodzi konwekcja naturalna, czyli obecny jest gradient stężeń, a masa jest przenoszona z wykorzystaniem dyfuzji cząsteczkowej oraz konwekcji, równanie dyfuzji konwekcyjnej zapisujemy jako:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Wymianę masy od ciała stałego do cieczy charakteryzuje współczynnik wnikania masy, który można zdefiniować jako stosunek współczynnika dyfuzji do drogi dyfuzji.

$$\beta = \frac{D}{s} \quad (7)$$

s – droga dyfuzji [m]

Ze zjawiskiem wnikania masy od ciała stałego do cieczy można spotkać się w bardzo wielu obszarach, obecnie większość procesów przemysłowych wykorzystuje to zjawisko z wykorzystaniem konwekcji wymuszonej. W dobie pośpiechu i ekonomiczności nie wykorzystuje się procesu wnikania masy od ciała stałego do cieczy w warunkach konwekcji naturalnej.

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie rozpuszczalności kryształów $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ w warunkach konwekcji naturalnej oraz porównanie otrzymanych wyników z rozwiązaniem teoretycznym procesem niestacjonarnej wymiany masy od cząsteczki kulistej do cieczy.

3. Metodyka pomiarów

Wyróżnia się trzy rodzaje wyznaczania współczynnika wnikania masy:

- Analiza teoretyczna – badanie hydrodynamiki układu ciecz ciało stałe,
- Metoda eksperymentalna – badanie chemicznego oddziaływania ciała stałego z cieczą,
- Metoda analityczna – badanie krzywych kinetyki ekstrakcji.

Podczas doświadczenia korzysta się z metody analitycznej, dlatego też ona zostanie tutaj szerzej omówiona.

Metoda analityczna wykorzystana w doświadczeniu wykorzystuje założenie o dyfuzyjnej warstewce granicznej przylegającej do powierzchni ciała stałego. W warstewce tej stężenie spada od wartości na powierzchni ciała stałego do wartości w rdzeniu cieczy, a rozkład stężenia $C(x,y)$ opisuje poniższe równanie:

$$w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (8)$$

$$C(x, 0) = C_p \quad (9)$$

$$C(x, \infty) = C_1 \quad (10)$$

C_p – stężenie na powierzchni kuli [kmol/m^3], C_1 – stężenie w rdzeniu cieczy [kmol/m^3].

W powyższym równaniu składowe $w_x(x,y)$ oraz $w_y(x,y)$ powinny być wyznaczone z rozwiązań warunków hydrodynamicznych dla układu. Gdy scałkujemy równanie zapisane wyżej to otrzymamy strumień dyfuzyjny z powierzchni A :

$$J = \beta(C_p - C_1)A = -D \int_{A_1}^{A_2} \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0} dA \quad (11)$$

J – strumień dyfuzyjny [kmol/s].

Teraz rozpatrzmy teoretyczne wyznaczenie współczynnika wnikania masy od kulistego ciała stałego do cieczy. W przypadku konwekcji naturalnej liczba Reynoldsa wynosi 0, ponieważ nie ma ruchu, dlatego w równaniu dyfuzji stacjonarnej można pominąć człony konwekcyjne:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

$$C = (C_p - C_1) \frac{d}{2r} + C_1 \quad (13)$$

C – rozkład stężeń, gdy $Re=0$ dla kuli, r – promień wektor punktu ($r \geq d/2$).

Ubytek masy cieczy oddawanej z powierzchni kuli w czasie można zapisać jako:

$$\dot{m} = 2\pi d D (C_p - C_1) \quad (14)$$

co odpowiada wartości:

$$Sh = 2.$$

Liczba Sherwooda to stosunek współczynnika wnikania masy do strumienia molowego dyfuzji molekularnej przez nieruchome ciało o grubości l .

$$Sh = \frac{\beta l}{\delta} = \frac{kl}{\rho D} \quad (15)$$

Gdzie: δ – dynamiczny współczynnik dyfuzji [m^2/s], D – kinematyczny współczynnik dyfuzji [m^2/s], k – współczynnik przenikania masy [$kg/(m^2 \cdot s)$], ρ – gęstość [kg/m^3]

Powyższe wyprowadzenie jest prawdziwe dla dyfuzji masy do porowatej kuli, która swoją budową uniemożliwia powstawanie ruchów konwekcyjnych.

Dla naszego doświadczenia należy rozważyć poniższe równanie dyfuzji:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (16)$$

$$C = C(r, t) \quad (17)$$

$$C(a, t) = C_p \quad (18)$$

$$C(r, 0) = C_1 \quad (19)$$

$$C(\infty, t) = C_1, \quad (20)$$

którego rozwiązanie daje następujące wyniki:

$$\frac{C - C_1}{C_p - C_1} = 1 - \left(\operatorname{erf} \frac{\frac{v}{a} - 1}{2\sqrt{\tau'}} \right) \frac{a}{r} \quad (21)$$

$$Sh = 2 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\pi\tau'}} \right) \quad (22)$$

$$\tau' = \frac{D\tau}{a^2} \quad (23)$$

a – promień kuli [m].

W warstwach cieczy graniczących z powierzchnią ciała stałego powstają ruchy spowodowane różnicami gęstości roztworu przy powierzchni cząstki i w odległości od niej. Taka różnica gęstości wpływa na intensywność wymiany masy, która jest większa niż wynika to powyższych rozważań.

Dlatego w opracowaniu doświadczenia należy skorzystać z następujących liczb Sherwooda, które obrazują zależność wnikania masy od czasu, współczynnika dyfuzji i promienia cząsteczki:

$$Sh = 0,6 \sqrt[4]{ScGr} \quad (24)$$

$$ScGr = \frac{\rho_p - \rho_c}{\rho_c} \frac{gd^3}{vD} \quad (25)$$

ρ_p – gęstość roztworu przy powierzchni cząstki, ρ_c – gęstość głównej masy cieczy.

Powyższe równanie jest prawdziwe dla zakresu:

$$10^6 < ScGr < 10^{11}$$

Natomiast dla:

$$ScGr > 10^{11}$$

Należy korzystać z poniższej zależności:

$$Sh = 0,135 \sqrt[3]{ScGr} \quad (26)$$

4. Metodyka pomiarów

Podczas doświadczenia korzysta się z metody analitycznej. Aby przeprowadzić doświadczenie należy:

- 1) Zważyć monokryształ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,
- 2) Zrobić zdjęcie kryształu na kartce papieru milimetrowego,

- 3) Obliczyć ilość odważników, aby waga pozostała w równowadze po położeniu na niej monokryształu,
- 4) Wagę obciążyć odpowiednią ilością odważników pomniejszoną o 0,5g i włączyć stoper w momencie zanurzenia kryształu w zlewce z 400 ml wody destylowanej,
- 5) Zanotować czas, gdy waga przyjmie położenie równowagi,
- 6) Po każdym osiągnięciu równowagi przez wagę należy zdjąć odważnik i przekręcić wajchę,
- 7) Notować czas po każdej zmianie masy kryształu o 0,1 g,
- 8) Doświadczenie należy zakończyć po około 30 minutach,
- 9) Kryształ szybko wyjąć z wody i osuszyć za pomocą chusteczki,
- 10) Ponownie zrobić zdjęcie kryształu na kartce papieru milimetrowego,
- 11) Następnego dnia należy zważyć jeszcze raz kryształ.

5. Opracowanie wyników

Wyniki należy wpisywać do tabeli dołączonej na końcu rozdziału.

Współczynnik wnikania masy można obliczyć opierając się na następującej zależności:

$$\frac{-\Delta m}{\Delta \tau} = \beta \cdot A \cdot (C_p - C_l) \cdot M \quad (26)$$

$-\Delta m$ – ubytek masy kryształu [kg], $\Delta \tau$ – czas rozpuszczania 0,1 g monokryształu [s],
 β – współczynnik wnikania masy [m/s], A – powierzchnia kryształu średnia w czasie $\Delta \tau$ [m²],
 C_p – stężenie na powierzchni kryształu [kmol/m³], C_l – stężenie w rdzeniu cieczy [kmol/m³],
 M – masa molowa kryształu [kg/kmol]

Kształt monokryształu znacznie różni się od kuli, dlatego w celu ułatwienia obliczeń, należy policzyć jego średnicę zastępczą. Usprawni ona obliczenia objętości i powierzchni kryształu.

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho_s}} \quad (27)$$

m – masa kryształu [kg].

Powierzchnię kryształu można wyznaczyć, znając jego masę z następującej zależności:

$$A = \pi\varphi \left(\frac{6m}{\pi\rho_s} \right)^{2/3} \quad (28)$$

φ - doświadczalny współczynnik kształtu monokryształu $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 1,40.

Ciężar kryształu w wodzie można obliczyć za pomocą równania:

$$Q_u = Q_p - Q_{wy} = \frac{\pi d_z^3}{6} g(\rho_s - \rho_c) \quad (29)$$

Q_u – ciężar kryształu w wodzie [N], Q_p – ciężar kryształu w powietrzu [N], Q_{wy} – siła wyporu [N], g – przyspieszenie ziemskie – 9,81 [m/s²].

Jeśli ubytek masy monokryształu nie przekracza 20% jego początkowej masy to współczynnik wnikania masy wynosi:

$$\beta = \frac{-\Delta m}{\Delta \tau} \cdot \frac{1}{\bar{A} \cdot C_p \cdot M} \quad (30)$$

\bar{A} – średnia arytmetyczna powierzchni początkowej i końcowej [m²].

Ubytek masy kryształu w powietrzu należy obliczyć z poniższego równania:

$$m_p = m_w \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_c}. \quad (31)$$

Doświadczalną liczbę Sherwooda należy obliczyć z poniższej zależności:

$$Sh = \frac{\beta d_z}{D} \quad (32)$$

Uwagi do sprawozdania:

- Ubytek masy ($-\Delta m$) należy policzyć jako różnicę masy kryształu w powietrzu w czasie równym zero i masę kryształu po czasie zmierzonym.
- \bar{A} należy liczyć jako średnią arytmetyczną powierzchni w czasie równym zero i masę kryształu po czasie zmierzonym.
- Do równania Sh należy wstawić średnicę zastępczą.
- Gęstość roztworu przy powierzchni kryształu wynosi:

$$\rho_p = 1297 \frac{kg}{m^3}$$

- Współczynnik dyfuzji CuSO₄ $D = 5,15 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$.

Do sprawozdania należy dołączyć:

- poniższą tabelę
- wykres zależności liczby Sh od czasu dla trzech przypadków, Sh_{dosw}, Sh 1, Sh 2

- zdjęcia monokryształów
- w tabeli należy również policzyć błąd względny porównując go z wartościami doświadczalnymi.

Należy:

- policzyć gęstość wody na końcu doświadczenia
- w tabeli należy policzyć liczbę Sh_{dosw} , $Sh 1$, $Sh 2$, gdzie
- $Sh 1$ to liczba Sherwooda dla warunku $10^6 < ScGr < 10^{11}$
- $Sh 2$ to liczba Sherwooda dla warunku $ScGr > 10^{11}$
- obliczyć współczynnik wnikania masy doświadczalny i teoretyczny
- omówić wyniki
- wyjaśnić przyczyny niedokładności
- omówić wpływ kształtu monokryształu i jego powierzchni na czas wnikania masy.

Tabela 1.

Lp.	τ [s]	m_w	m_p	$-\Delta m$	\bar{A} [m ²]	d_z [m]	Sh_{dos}	$ScGr$	β_{dos}	$Sh1$	β_{t1}	Błąd	$Sh2$	β_{t2}	Błąd
		G													

6. Bibliografia

- [1] Laboratorium inżynierii procesowej cz. II, Przenoszenie ciepła i masy, Praca zbiorowa pod redakcją Danuty Beliny-Freundlich
- [2] Principles of mass transfer and separation processes, Binay K. Dutta

Pomiar przemieszczenia wzdłużnego metodą impulsową

Opracowała:
Sylwia Oleś

1. Wprowadzenie

Przenikanie masy między dwoma fazami można podzielić na 3 etapy:

- Wnikanie składnika A z rdzenia fazy x,
- Absorpcji składnika na powierzchni międzyfazowej x-y,
- Wnikanie składnika A z powierzchni międzyfazowej do rdzenia fazy y.

Siłą napędową tego procesu jest różnica stężeń w rdzeniu fazy i na powierzchni międzyfazowej, zmieniająca się wzdłuż aparatu, którą można wyrazić w następującej postaci:

$$w_N = \beta_x \cdot (x - x_i) = -\beta_y \cdot (y - y_i) \quad (1)$$

Równania równowagi:

$$y_i = m \cdot x_i \quad (2)$$

$$y^* = m \cdot x \quad (3)$$

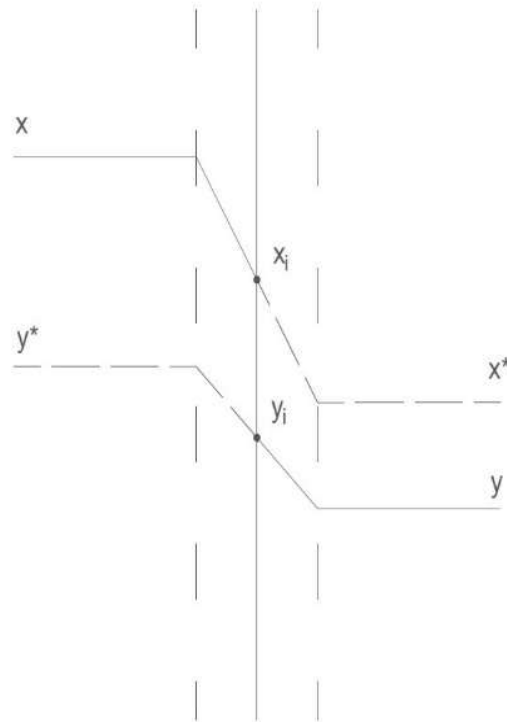
$$x^* = \frac{y}{m} \quad (4)$$

gdzie: w_N – prędkość molowa przenoszenia substancji [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], y_i – ułamek składnika w równowadze z fazą gazową na powierzchni międzyfazowej, x_i – ułamek składnika w równowadze z fazą ciekłą na powierzchni międzyfazowej, y^* - ułamek rzeczywisty, m – współczynnik podziału, β – współczynnik wnikania masy [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$].

W ustalonym przepływie płynu przez aparat typu rura czy zbiornik, w którym zachodzi przemiana fizyczna, chemiczna wyróżnia się dwa podstawowe modele:

- przepływ cieczy idealnie wymieszanej
- przepływ tłokowy

Modele te mają na celu uprościć obliczenia procesowe.

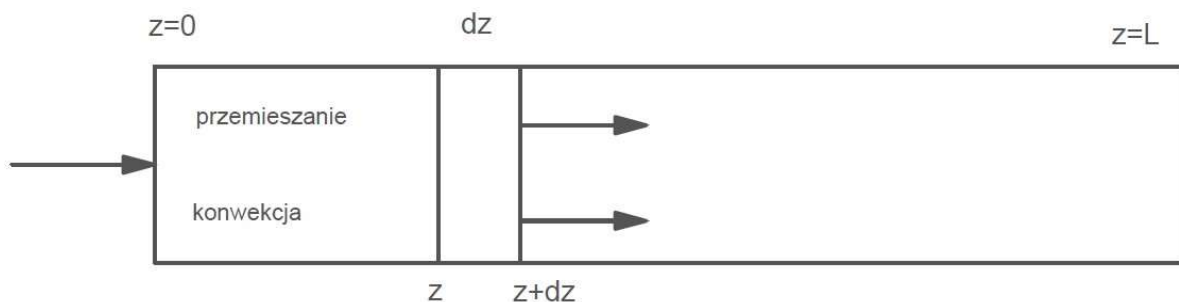


Rysunek 1. Profil stężenia w pobliżu powierzchni międzyfazowej

Pierwszy z nich zakłada idealne wymieszanie cieczy w aparacie i w strumieniu opuszczającym aparat. Każdy element płynu ma te same wielkości intensywne. Założenie to jest spełnione dla przepływowych reaktorów z mieszaniem oraz półek kolumn rektyfikacyjnych.

Model przepływu tłokowego opiera się na założeniu całkowitego braku mieszalności elementów płynu, zarówno wzdłużnej jak i poprzecznej. Cząstki płynu, które wpłynęły do aparatu mają tą samą, stałą prędkość, równoległą drogę i wypływają w tym samym czasie. Przepływ tłokowy znajduje zastosowanie w obliczeniach wymienników ciepła, kolumnach z wypełnieniem czy reaktorach z katalizatorami.

Przedstawione powyżej założenia dotyczą warunków idealnych, które nie występują w rzeczywistości, jednym z zaburzeń jest przemieszanie wzdłużne. Zjawisko dyspersji wzdłużnej jest to mieszanie elementów płynu w kierunku zgodnym z przepływem [1].



Rysunek 2. Schematyczne przedstawienie przemieszania wzdłużnego w jednej z płynących faz

Rozpatrzmy przemieszanie znacznika w płynącej fazie

$$w \cdot z - w \cdot \left(z + \frac{dx}{dz} \right) - D_E \cdot \frac{dx}{dz} - \left(D_E \cdot \frac{d}{dz} \cdot \left(x + \frac{dx}{dz} \right) \right) = \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

$$-w \cdot \frac{dx}{dz} + D_E \cdot \frac{d^2x}{dz^2} - \frac{dx}{dt} = 0 \quad (6)$$

Wprowadzając bezwymiarowe moduły

$$Pe = \frac{w \cdot L}{D_E} \quad (7)$$

$$Z = \frac{z}{L} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{w \cdot t}{L} \quad (9)$$

Gdzie: Pe – liczba Pecleta, w – prędkość liniowa [m/s], L – długość wymiennika [m], D_E – współczynnik przemieszania w badanej fazie [m²/s], Z – bezwymiarowa długość, z – odległość od początku układu pomiarowego [m], τ – bezwymiarowy czas, t – czas [s].

Otrzymano:

$$-w \cdot \frac{\partial x}{\partial (Z \cdot L)} + \frac{w \cdot L}{Pe} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial (Z \cdot L)^2} - \frac{\partial x}{\partial \left(\frac{\tau \cdot L}{w} \right)} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z} + \frac{1}{Pe} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial Z^2} - \frac{\partial x}{\partial \tau} = 0 \quad (11)$$

Warunki brzegowe równań

- Płaski profil stężenia na końcu wymiennika

$$\frac{\partial x(1)}{\partial Z} = 0 \quad (12)$$

- Stężenie na wlocie wymiennika jest równe stężeniu wprowadzanej fazy

$$x_{wlot} = x(r) - \frac{1}{Pe} \cdot \frac{\partial^2 x(r)}{\partial Z^2} - \frac{\partial x}{\partial \tau} = 0 \quad (13)$$

$x(r)$ – stężenie w funkcji odległości od modelowego miejsca [kmol/m³]

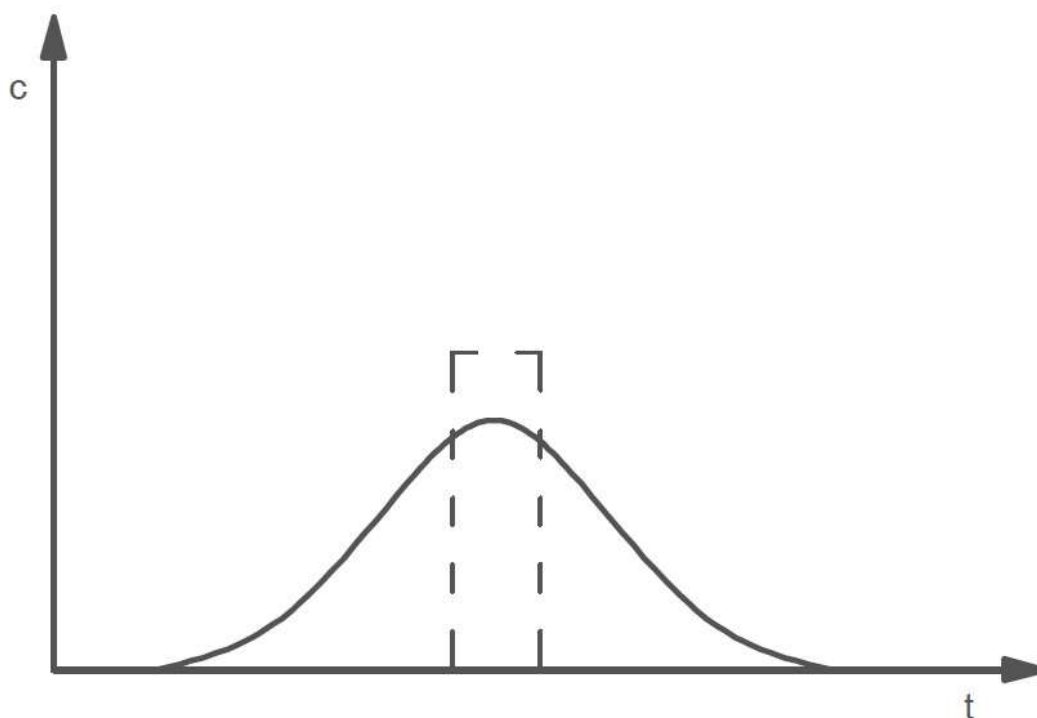
Sygnal wyjściowy jest funkcją rozkładu czasu przebywania, więc momenty można zapisać w poniższej postaci [2] :

$$m = \frac{\int_0^{\infty} t^n f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} \quad (14)$$

Wariancja sygnału wyjściowego z aparatu, przy jednostkowym impulsie sygnału wejściowego:

$$\sigma_{2y}^2 = \frac{2}{Pe^2} \cdot (Pe - 1 + e^{-Pe}) \quad (15)$$

Wykres nr 1 przedstawia kształty sygnału wejściowego i wyjściowego znacznika badanego metodą impulsową. Można zauważyć, że sygnał wejściowy odbierany jest w postaci jednego sygnału przez krótki czas (prostokąt), natomiast sygnał wyjściowy można zaobserwować dopiero przez mierzenie w dłuższym przedziale czasu przewodność, aż do uchwycenia maksimum funkcji.



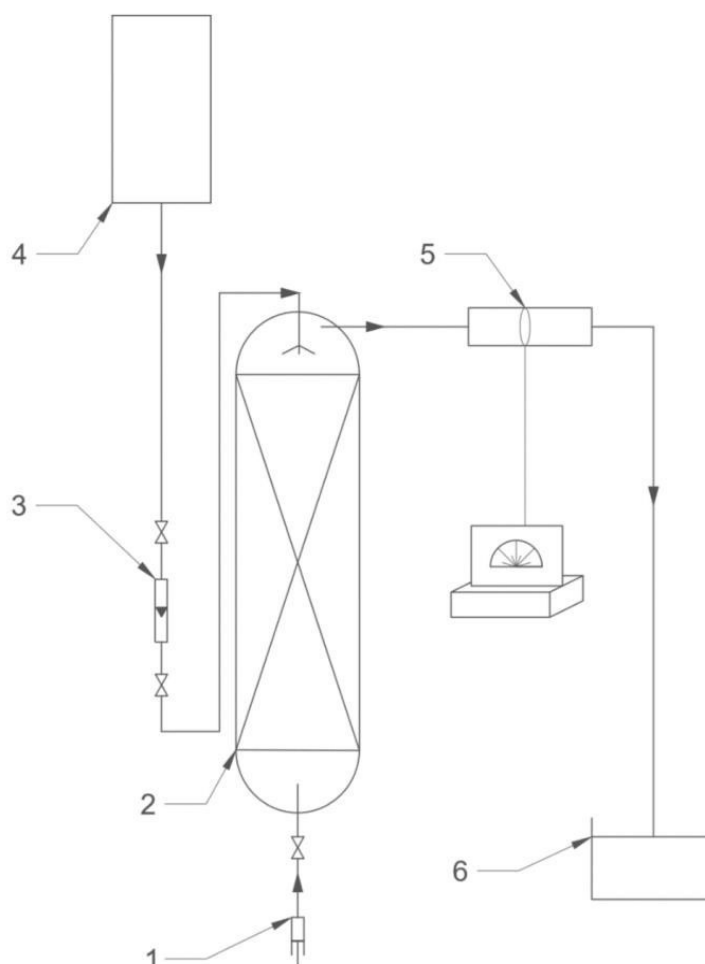
Wykres 1. Wykres sygnału wejściowego i wyjściowego jako funkcji przewodności od czasu

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika przemieszania wzdłużnego w fazie zwartej w kolumnie ekstrakcyjnej z wypełnieniem metodą impulsową.

3. Schemat aparatury

Aparatura doświadczalna została przedstawiona na schemacie nr 1. Ze zbiornika (4) do kolumny (2) podawana jest faza zwarta. Rotametrem (3) ustawia się zadane natężenie przepływu. Medium podawane od góry przepływa na dół natomiast od dołu za pomocą dozownika (1) wstrzykiwany jest znacznik. Pokonując on drogę przez wypełnienie, a następnie przemieszcza się do celki pomiarowej, w której przewodnictwo mierzy się konduktometrem (5). Następnie badany roztwór trafia do zbiornika (6).



Rysunek 3. Schemat aparatury

1 – dozownik tłokowy znacznika, 2 – kolumna ekstrakcyjna, 3 – rotametr, 4 – zbiornik fazy zwartej, 5 – celka pomiarowa, 6 – zbiornik.

4. Metodyka pomiarów

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy upewnić się czy konduktometr jest podłączony do aparatury doświadczalnej. Następnie ustawić zadane przez prowadzącego natężenia fazy zwartej (wody dejonizowanej). Wycechować rotametr mierząc objętość przepływu w czasie, przy pomocy cylindra miarowego. Do strzykawki znajdującej się na stanowisku pobrać roztwór soli (NaCl), następnie podłączyć do kolumny (rys. 1), i wstrzyknąć znacznik. Podczas tej operacji ważne jest aby substancja została podana stosunkowo szybko, ale równomiernie.

Od tego momentu należy mierzyć konduktancje w czasie. Na początku nie ma zmian przewodnictwa, po pewnym czasie przewodnictwo zacznie gwałtownie rosnać, wówczas należy zwiększyć ilość pomiarów. Proces należy prowadzić do wartości konduktancji mierzonych na początku dla wody.

5. Opracowanie wyników

Do określenia przemieszania wzdłużnego można posłużyć się liczbą Pe lub współczynnikiem przemieszania D_E , aby to wyznaczyć należy znaleźć wariację sygnału wyjściowego.

$$\sigma_{2y}^2 = \frac{2}{Pe^2} \cdot (Pe - 1 + e^{-Pe}) \quad (15)$$

Aby policzyć żądane wielkości należy sporządzić wykresy:

- Funkcji stężenia w czasie $c = f(t)$
- Należy pamiętać, że początkowo mierzona konduktancja, a co za tym idzie stężenie jest tzw. tłem, ponieważ jest to przewodnictwo wody. Wartość tego stężenia należy przyjąć zero, odjąć od reszty stężeń.
- Zależności $\left(\frac{t}{\bar{t}} - m_1\right)^2 \cdot c = f(t)$
- Funkcji $ct = f(t)$

Następnie policzyć pierwszy moment ze wzoru (1), wariację sygnału wyjściowego, liczbę Peckleta i współczynnik przemieszania.

Wszystkie dane zebrać w tabelach, dołączyć wykonane wykresy.

6. Bibliografia

- [1] A. Burghardt „Zagadnienia dyspersji wzdłużnej w ciągłych reaktorach przepływowych”
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją Danuty Beliny-Freundlich „Laboratorium z inżynierii procesowej cz. II, Przenoszenie ciepła i masy”
- [3] Binay K. Dutta „Principles of Mass Trasfer and Separation Processes”

Pomiar współczynnika wnikania masy od powierzchni ciała stałego przy konwekcji wymuszonej

Opracował:
Damian Bartosik

1. Wprowadzenie

Proces rozpuszczania ciała stałego w nieruchomym płynie zachodzi powoli. Główną rolę odgrywa tutaj proces dyfuzji. Jednakże w momencie, w którym wprawimy płyn w ruch szybkość rozpuszczania wzrośnie. Odpowiada za to zjawisko **konwekcyjnego transportu masy**.

Można je opisać na przykładzie rozpuszczania kostki cukru w szklance wody. Woda będąca w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią cukru nasyca się cukrem w sposób ciągły, jednocześnie cukier dyfunduje od powierzchni międzyfazowej, przez cienką warstwę płynu przylegającą do ciała stałego do rdzenia płynu. Konsekwencją czego jest spadek stężenia cukru na powierzchni międzyfazowej, co z kolei powoduje rozpuszczanie się kolejnych porcji cukru. Grubość filmu przylegającego do ciała stałego zaczyna maleć gdy zaczynamy mieszać wodę a tym samym wzrasta szybkość rozpuszczania.

Wyróżnić można dwa rodzaje konwekcyjnego transportu masy:

- **Konwekcję wymuszoną**, która zachodzi w momencie gdy do układu zostaje przyłożona zewnętrzna siła wywołująca ruch płynu na przykład za pomocą pompy, wentylatora czy mieszadła
- **Konwekcję naturalną** zachodzącą w momencie gdy ruch płynu spowodowany jest różnicą jego gęstości.

Podczas tego ćwiczenia skupimy się jednak tylko na **konwekcji wymuszonej**.

Z powodu złożoności procesu jakim jest konwekcyjny ruch masy, do zagadnień z nim związanych wykorzystuje się uproszczoną, praktyczną metodę, która korzysta z koncepcji współczynnika wnikania masy β . Bazuje ona na dwóch fenomenologicznych założeniach:

- Strumień masy jest proporcjonalny do stężeniowej siły napędowej.
- Strumień masy jest proporcjonalny do pola powierzchni kontaktu faz.

Ruch cząstek z głębi fazy do powierzchni styku faz, jak również od powierzchni do wnętrza fazy nazywamy wnikaniem masy. Wnikanie może obejmować oba rodzaje ruchu masy, tj. czystą dyfuzję cząsteczkową oraz dyfuzję burzliwą (konwekcję). Ilościowe ujęcie procesu wnikania masy umożliwia obliczenie współczynników wnikania masy β i ustalenie zależności tej wielkości od warunków hydrodynamicznych.

Aby opisać współczynnik wnikania masy oraz inne parametry płynu wykorzystuje się moduły bezwymiarowe, dla transportu masy są to liczby Sherwooda (Sh) oraz liczba Schmidta (Sc).

1) Liczba Sherwooda

$$Sh = \frac{\beta \cdot l}{D_d} \quad (1)$$

gdzie:

β – Współczynnik wnikania masy $\left[\frac{m}{s}\right]$

l – Charakterystyczny wymiar liniowy [m]

D_d – Współczynnik dyfuzji $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

2) Liczba Schmidta

$$Sc = \frac{\nu}{D_d} \quad (2)$$

ν – Lepkość kinematyczna płynu $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

D_d – Współczynnik dyfuzji $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Nieustalona dyfuzja z nałożoną konwekcją opisana jest równaniem:

$$\frac{\delta C}{\delta \tau} = D \left(\frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 C}{\delta z^2} \right) - \left(W_x \frac{\delta C}{\delta x} + W_y \frac{\delta C}{\delta y} + W_z \frac{\delta C}{\delta z} \right) \quad (3)$$

Dla procesu ustalonego w czasie w układzie dwuwymiarowym z dyfuzją przebiegającą w jednym kierunku powyższe równanie przybierze postać:

$$W_x \frac{\delta C}{\delta x} + W_y \frac{\delta C}{\delta y} = D \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} \quad (4)$$

Współczynnik wnikania masy można wyliczyć za pomocą odpowiednich korelacji, które zostały opracowane na podstawie dużej liczby przeprowadzonych eksperymentów. Pamiętać jednak należy, że korelacje te są prawdziwe jedynie dla zakresu warunków, w których zostały wyznaczone.

Wnikanie masy od powierzchni płaskiej.

Analityczne rozwiązanie równania dla płyty płaskiej i ruchu laminarnego prowadzi do związku:

$$Sh_L = 0,66 \cdot Re_L^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Dla przepływu burzliwego natomiast otrzymuje się zależność :

$$Sh_L = 0,0364 \cdot Re_L^{\frac{4}{5}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Indeks „L” oznacza, że wymiarem liniowym jest długość płyty.

Wnikanie masy od powierzchni kuli.

W przypadku wnikania masy od powierzchni kuli do przepływającej cieczy rozwiązanie równania (4) dokonane przez Ruckensteina dla ruchu laminarnego ($Re \ll 1$) prowadzi do zależności:

$$Sh = 0,998 \cdot (Re \cdot Sc)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Akselrud sprawdził doświadczalnie prawdziwość tego równania i otrzymał związek:

$$Sh = 1,1 \cdot (Re \cdot Sc)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Dla ruchu burzliwego ($Re \gg 1$) znane są zależności typu:

$$Sh = k \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

gdzie wartości stałej k wyznaczone doświadczalnie przez różnych autorów zawarte są w granicach od 0.5 do 1.0.

Wartość liczby Sherwooda oblicza się także z równania:

$$Sh = 2 + 0,6 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

otrzymanego przez analogię do równania Fröslinga, które opisuje wnikanie ciepła od powierzchni kuli. Zależność ta została potwierdzona doświadczalnie dla substancji kul naftalenu w strumieniu powietrza i rozpuszczania cząstek czystych soli w strumieniu wody.

W przypadku, gdy rozpuszczaniu towarzyszy powstawanie dużych prądów konwekcyjnych, wprowadza się w do równań wyrażenie Gr/Re^2 . Weinspach wyraża wartość liczby Sherwooda w takim przypadku za pomocą równania:

$$Sh = 0,29 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{0,56} \left(\frac{Gr}{Re^2} \right)^{0,066} \quad (11)$$

gdzie:

$$Gr = \frac{\rho_p - \rho_c}{\rho_p} \cdot \frac{g \cdot d_z^3}{\nu^2} \quad (12)$$

ρ_p – Gęstość cieczy przy powierzchni ciała stałego $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

ρ_c – Gęstość płynu, w którym rozpuszczana jest cząstka $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

d_z – Średnica zastępcza [m]

ν – Lepkość kinematyczna płynu $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

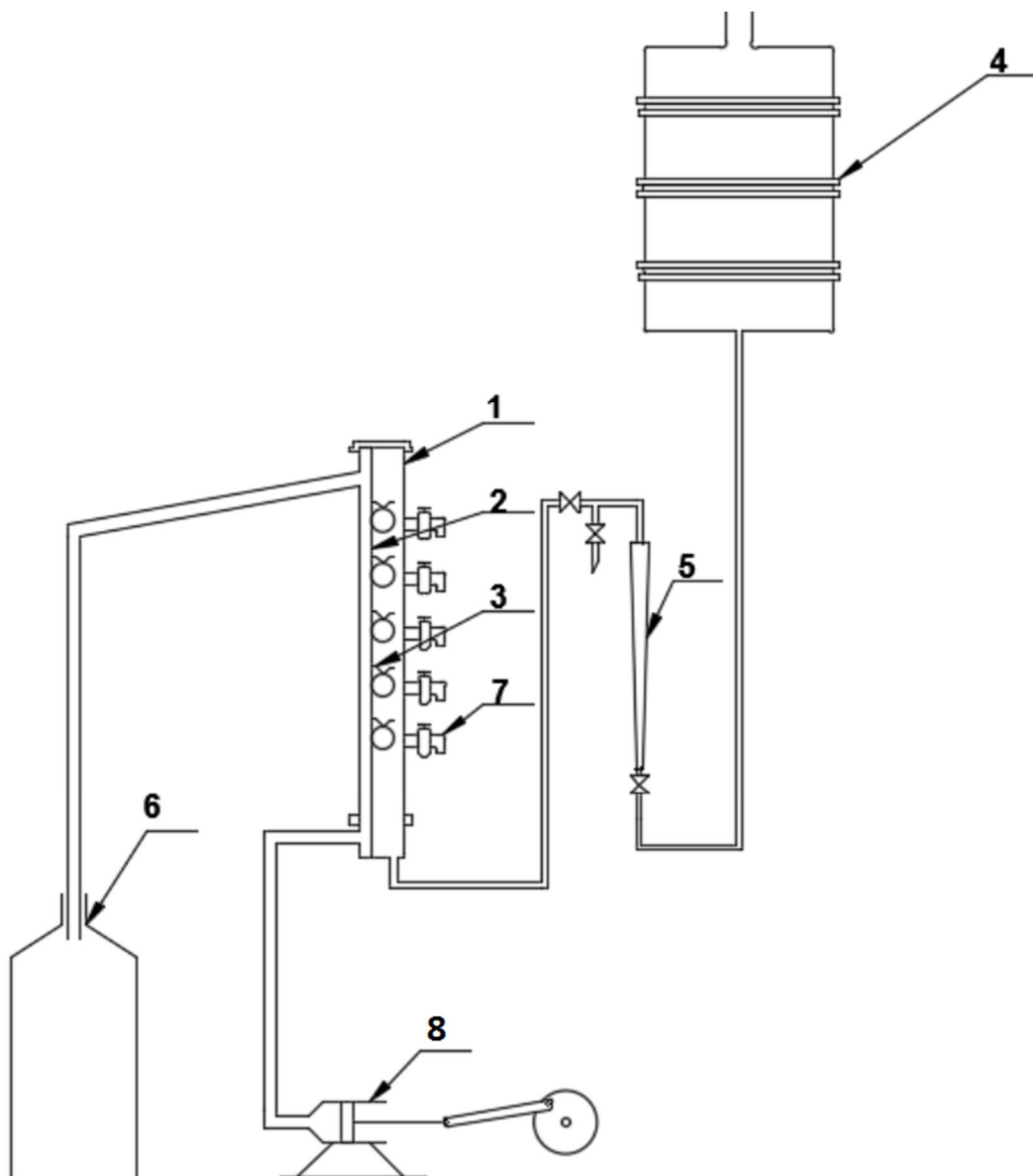
g – Przyspieszenie ziemskie $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$

Jednym z prostszych sposobów intensyfikacji wymiany masy w układach wielofazowych jest zastosowanie pulsacji (drgań o częstościach mniejszych od akustycznych) jednej z faz. Najczęściej spotykana forma ilościowego opisu wpływu pulsacji na kinetykę wymiany masy polega na zastąpieniu prędkości przepływu cieczy występującej w liczbie Reynoldsa, średnią prędkością ruchu pulsacyjnego, tj. $4An$, lub gdy obie te prędkości są porównywalne – ich sumą. A oznacza amplitudę, a n – częstotliwość pulsacji.

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie średniego współczynnika wnikania masy od powierzchni kryształów $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ do przepływającej wody oraz wody dodatkowo poddawanej pulsacji.

3. Schemat aparatury



Rysunek 1. Schemat instalacji doświadczalnej

Schemat stanowiska doświadczalnego przedstawiono na rys. 1. Głównym elementem instalacji jest kolumna szklana o średnicy $D_k = 0,05$ m. W jej wnętrzu znajduje się pręt metalowy (2) z haczykami (3) służącymi do mocowania kryształów w osi kolumny. Woda wpływa do kolumny ze zbiornika naporowego (4) poprzez rotametr (5), który mierzy jej natężenie przepływu, płynie w górę i odprowadzana jest do zbiornika cieczy zużytej (6). Wzdłuż wysokości kolumny rozmieszczone są krany do pobierania próbek cieczy (7). Pulsacje słupa cieczy w kolumnie są wywoływane bezzaworową pompą nurnikową (8).

4. Metodyka pomiarów

Do haczyków należy przymocować uprzednio zważone kryształy $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, następnie za pomocą zaworu ustalić podane przez prowadzącego natężenie przepływu cieczy (mierzone rotametrem). Włożyć do kolumny pręt z zamocowanymi kryształami tak, aby znajdowały się w osi kolumny. Od tego momentu należy rozpocząć mierzenie czasu trwania doświadczenia. Po wymianie dwóch objętości cieczy w kolumnie można zacząć pobierać próbki cieczy w taki sposób by nie zakłócić przepływu w aparacie. Doświadczenie kończy się w momencie wyjęcia pręta z kryształami. W drugiej części doświadczenia należy dodatkowo uruchomić pulsator, pozostałe czynności pozostają bez zmian. Po wysuszeniu kryształów (ok. 1 doby) należy je zważyć i obliczyć ubytek masy.

Stężenie siarczanu miedzi zmierzy się metodą kolometryczną. Aby to zrobić należy:

- Pobrać 5 cm^3 próbki cieczy, dodać 5 cm^3 10% wodnego roztworu amoniaku i za pomocą spektrofotometru odczytać ekstynkcję przy długości fali 600 nm.
- Oznaczyć także ekstynkcję cieczy wychodzącej z kolumny. Pomiary za pomocą spektrofotometru należy wykonać jak najszybciej gdyż z upływem czasu absorbancja próbki gwałtownie maleje. Stężenie $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ obliczamy za pomocą zależności.

$$A = 0,12 C$$

W celu sprawdzenia poprawności oznaczeń należy wykonać bilans masowy doświadczenia. Zmierzyć cylindrem miarowym objętość cieczy zużytej w doświadczeniu i oznaczyć w niej stężenie siarczanu miedzi. Obliczoną z iloczynu objętości i stężenia masę $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ porównać z ubytkiem masy kryształów.

5. Opracowanie wyników

Podczas opracowywania wyników pomiarów należy skorzystać z następujących stałych:

Tabela 1

C^*	ϕ	ρ	ρ_p	H_k	D_k	D_d
$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$[-]$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$[m]$	$[m]$	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
290	1,40	1297	1297	1	0,05	$5,15 \cdot 10^{-10}$

Współczynnik wnikania masy należy obliczyć za pomocą dwóch metod:

Metoda pierwsza opiera się na równaniu, opisującym szybkość rozpuszczania, i pomiarze ubytku masy kryształów

$$\beta = \frac{-\Delta m}{\Delta \tau} \frac{1}{A_{sr} \cdot (C^* - C)}$$

C^* - Stężenie na powierzchni ciała stałego, które przyjmuje się równe stężeniu nasycenia,
 C - Stężenie aktualne w kolumnie na wysokości kryształu.

Powierzchnię masy A_{sr} obliczyć jako średnią arytmetyczną powierzchni kryształów na początku i na końcu doświadczenia, korzystając ze wzoru określającego zależność powierzchni kryształu od jego masy.

$$A = \pi \cdot \phi \cdot \left(\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho} \right)^{\frac{2}{3}}$$

ϕ - Współczynnik kształtu

ρ - Gęstość $\text{CuSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Metoda druga wykorzystuje wzór określający rzeczywistą liczbę jednostek wnikania masy N_c :

$$N_c = \frac{C_1 - C_0}{\int_0^1 (C^* - C) dZ}$$

C_1 - Stężenie na bezwymiarowej wysokości $Z = 1$

C_0 - Stężenie na wlocie do kolumny, równe zeru

Ponieważ stężenia C uzyskiwane w kolumnie stanowią niewielki procent stężenia C^* , należy przyjąć, że:

$$\int_0^1 (C^* - C) dZ = C^*$$

Zatem:

$$N_c = \frac{C_1}{C^*}$$

Zależność pomiędzy współczynnikiem wnikania masy β a rzeczywistą liczbą jednostek wnikania masy jest następująca:

$$\beta = \frac{N_c \cdot w}{a \cdot H_k}$$

w – Prędkość cieczy

a – Średnia powierzchnia wszystkich kryształów rozwijana w 1m^3 kolumny

H_k – wysokość słupa cieczy w kolumnie

Porównać współczynniki wnikania masy obliczone za pomocą dwóch metod i wyliczyć wartość średnią. Obliczyć doświadczalną wartość liczby Sherwooda dla obu doświadczeń, a następnie porównać je z wartościami wyliczonymi z równania (11) w którym wartość liczby Grashoffa oblicza się z zależności:

$$Gr = \frac{\rho_p - \rho_c}{\rho_p} \cdot \frac{g \cdot d_z^3}{\nu^2}$$

ρ_p – Gęstość cieczy przy powierzchni ciała stałego

ρ_c – Gęstość wody

d_z – Zastępcza średnica kryształu wyliczona dla średniej masy w trakcie doświadczenia

g – Przyspieszenie ziemskie

ν – Lepkość kinematyczna wody

$$d_z = \left(\frac{6 \cdot m_{sr}}{\pi \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Prędkość występującą w liczbie Reynoldsa w drugim doświadczeniu zastąpić iloczynem $4A \cdot n$.

Wyniki obliczeń należy zestawić w tabeli i wyciągnąć odpowiednie wnioski.

Tabela 2 Zestawienie wyników pomiarów

Lp.	Masy kryształów $m \cdot 10^3$ [kg]		$\Delta\tau$ [s]	C $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$A \cdot 10^3$ [m]	n [s ⁻¹]	\dot{V} $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
	początkowe	końcowe					
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
Wylot							

Tabela 3 Zestawienie wyników obliczeń


<i>Lp.</i>	$-\Delta m \cdot 10^3$ [kg]	$A_{sr} \cdot 10^4$ [m ²]	$\beta \cdot 10^5$ z (11) [$\frac{m}{s}$]	$\beta \cdot 10^5$ z (16) [$\frac{m}{s}$]	$Sh_{do\acute{s}w.}$	$Sh_{obl.}$
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
Wylot						

6. Bibliografia

- [1] Dutta Binay K. „Principles of Mass Transfer and Separation Process”
 [2] Wojciech Skrzypiński “Laboratorium Procesy Dyfuzyjne - skrypt”


Protokoły do sprawozdań

Protokoły do sprawozdań należy uzupełnić, wydrukować i załączyć do gotowego sprawozdania. Po zakończeniu ćwiczenia należy poprosić prowadzącego o przekazanie uwag dotyczących ćwiczenia oraz o podpisanie protokołu. Protokół do konkretnego ćwiczenia należy wydrukować przed rozpoczęciem laboratorium. Wzór przykładowego sprawozdania znajduje się pod koniec skryptu.

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			


1. Pomiary

kształtka	wysokość [mm]	średnica [mm]	masa początkowa [g]	masa końcowa [g]	ubytek masy [g]
1					
2					
3					

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			


1. Pomiary

\dot{V}_{org} [dm ³ /h]	\dot{V}_{woda} [dm ³ /h]	Ilość użytego 0,1M NaOH [cm ³]		
		surowiec	rafinat	ekstrakt

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			


1. Pomiary

\dot{V}_{org} [dm ³ /h]	\dot{V}_{woda} [dm ³ /h]	Ilość użytego 0,1M NaOH [cm ³]		
		surowiec	rafinat	ekstrakt

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			

1. Pomiary


Stopień	V_r [cm ³]	V_e [cm ³]
1.		
2.		
3.		

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			

1. Pomiary

Stopień	V_r [cm ³]	V_e [cm ³]
1.		

Stopień	V_r [cm ³]	V_e [cm ³]
1.		
2.		

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			

Dane ogólne

Miano Ba(OH) ₂	HCl [ml]
1.	
2.	
Stężenie CO ₂ w powietrzu	[%]
1.	
2.	

Tabela wartości mierzonych

Pomiar I


Natężenie powietrza:

Stężenie CO ₂ w wodzie	HCl [ml]
1.	
2.	
Stężenie CO ₂ w powietrzu	[%]
1.	
2.	

Pomiar II

Natężenie powietrza:

Stężenie CO ₂ w wodzie	HCl [ml]
1.	
2.	
Stężenie CO ₂ w powietrzu	[%]
1.	
2.	


 Politechnika Wrocławska	Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			

1. Pomiary

Masa kryształu na początku:

Masa po 1 dniu:

Masa kryształu [g]	Czas [min]	Masa kryształu [g]	Czas [min]	Masa kryształu [g]	Czas [min]

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			


1. Pomiary

Dane ogólne

Wysokość kolumny [m]	
Średnica kolumny [m]	
Natężenie przepływu [ml/s]	

Tabela wartości mierzonych

Nr pomiaru	Czas [min]	Przewodnictwo [μS]	Nr pomiaru	Czas [min]	Przewodnictwo [μS]
1			36		
2			37		
3			38		
4			39		
5			40		
6			41		
7			42		
8			43		
9			44		
10			45		
11			46		
12			47		
13			48		
14			49		
15			50		
16			51		
17			52		
18			53		
19			54		
20			55		
21			56		
22			57		
23			58		
24			59		
25			60		
26			61		
27			62		
28			63		
29			64		
30			65		
31			66		
32			67		
33			68		
34			69		
35			70		

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			


1. Pomiary

Czas:

Natężenie przepływu wody:

Masa kryształu przed doświadczeniem [g]	Masa kryształu po 1 dniu [g]	Absorbancja roztworu

Przykładowe sprawozdanie

 Politechnika Wroclawska	Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny		
	Procesy dyfuzyjne – laboratorium		
	Podpis prowadzącego	Termin zajęć	Nr grupy
Nr i tytuł ćwiczenia	Objętościowy współczynnik wnikania i wysokość jednostki przenikania masy w kolumnie ekstrakcyjnej dla układu ciecz – ciecz I		
Data wykonania ćwiczenia	Skład grupy		Ocena/ uwagi
Data oddania sprawozdania			

Oznaczenie

A

C

E

Znaczenie

Pole powierzchni kwasu

Stężenie molowe

Ekstrakt

Jednostka

m^2

mol/dm^3

-

1) Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest ...

2) Schemat aparatury

3) Wyniki i obserwacje

W trakcie prowadzenia procesu...

(proszę pamiętać o zawarciu w tym punkcie wykresów!!!)

4) Przykładowe obliczenia

1. Obliczanie punktu S dla trójkąta Gibbsa:

Dane:

Obliczenia:

Wyniki:

5) Wnioski

- Wniosek 1
- Wniosek 2

6) Literatura

[1] Dutta Binay K. „Principles of Mass Transfer and Separation Process”