

Wydział Chemii UMCS  
Zakład Technologii Chemicznej

Ćwiczenie nr 11

Fluidyzacja.

Lublin

## 2.2. Fluidyzacja

Bardzo często w produkcji lub w przetwórstwie mamy do czynienia z substancją w postaci rozdrobnionej fazy stałej. Faza stała może pełnić różne role w przebiegu procesu. Może nie brać udziału w głównym procesie, a jedynie umożliwiać rozwinięcie powierzchni kontaktu faz, na przykład jako wypełnienie kolumn absorpcyjnych, destylacyjnych lub ekstrakcyjnych. Może znajdować się w reaktorach chemicznych jako katalizator. Może także brać czynny udział w procesie jako jeden z reagentów.

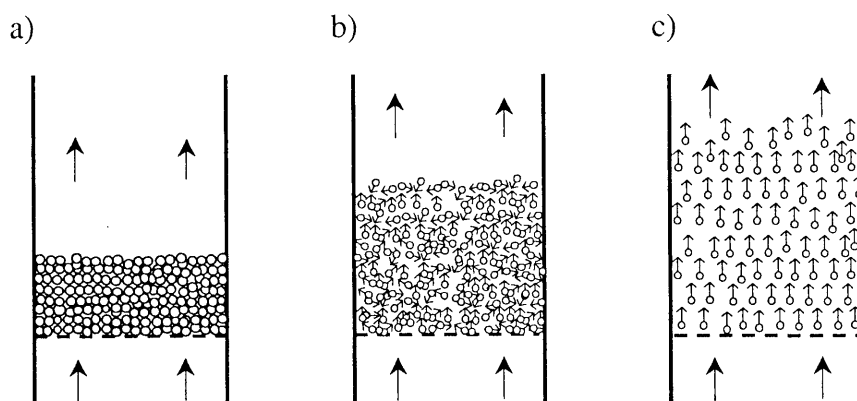
Sposób kontaktowania się przepływającego płynu z rozdrobnioną fazą stałą znajdującą się w aparacie o porowatym dnie, w zależności od zachowania się ziaren ciała stałego, można podzielić na trzy rodzaje:

- przepływ płynu przez nieruchome złożo fazy stałej (cząstki ciała stałego nie poruszają się względem ścianek aparatu ani względem siebie, na przykład są zatrzymywane pomiędzy dwoma porowatymi ekranami lub płyn przepływa z niewielką prędkością),
- przepływ płynu przez złożo fluidalne (szczegółowo omówione poniżej),
- transport pneumatyczny fazy stałej (płyn porywa cząstki ciała stałego i razem poruszają się w aparacie).

### 2.2.1. Ogólna charakterystyka fluidyzacji

Jak wynika z przedstawionej powyżej klasyfikacji, z fluidyzacją mamy do czynienia, gdy przez złożo sypkiego materiału przepływa płyn z prędkością mniejszą od wymaganej do transportu, a większą od dopuszczalnej dla warstwy nieruchomej. Aby określić przedział prędkości płynu, w którym występuje fluidyzacja, rozpatrzmy prosty przykład. W aparacie o stałym polu powierzchni przekroju  $f$  [m<sup>2</sup>] i perforowanym dnie mamy nasypaną warstwę ziaren ciała sypkiego. Objętość zajęta przez złożo (objętość warstwy) oznaczmy przez  $v_w$  [m<sup>3</sup>], a objętość samych ziaren przez  $v_z$  [m<sup>3</sup>].

Zaczynamy od dołu do góry przepuszczać przez aparat płyn o gęstości  $\rho_p$  [kg/m<sup>3</sup>] z objętościowym natężeniem przepływu wynoszącym  $V$  [m<sup>3</sup>/s] (rysunek 2.2.1). Liniowa szybkość przepływu płynu przez kolumnę (prędkość pozorna – prędkość odniesiona do przekroju aparatu)  $u$  [m/s] będzie wynosić:

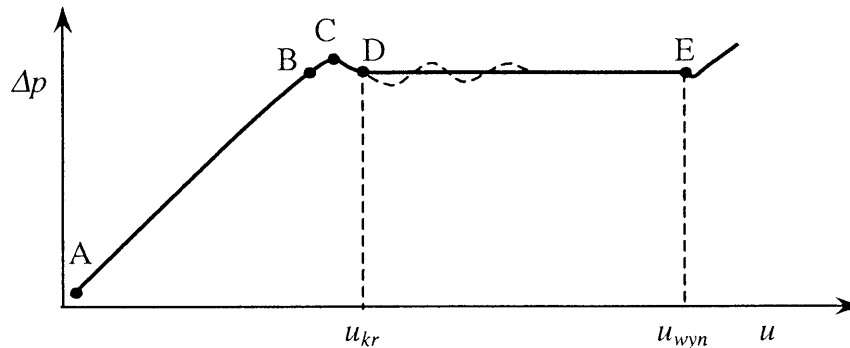


Rysunek 2.2.1. Przepływ gazu w warstwie cząstek stałych; a) warstwa nieruchoma, b) złożo fluidalne, c) unoszenie cząstek stałych przez gaz

$$u = \frac{V}{f} \quad (2.2.1)$$

Mierzmy różnicę ciśnień pomiędzy ciśnieniem płynu pod przegrodą i nad złożem. Odejmując od mierzonej wielkości spadek ciśnienia na samej przegrodzie porowatej, otrzymamy spadek ciśnienia na warstwie materiału sypkiego  $\Delta p$  [Pa].

Przy wzroście natężenia przepływu wzrasta opór stawiany przepływającemu płynowi, co powoduje zwiększenie spadku ciśnienia na złożu. Zależność spadku ciśnienia na warstwie cząsteczek stałych ( $\Delta p$ ) od prędkości płynu ( $u$ ) przedstawia rysunek 2.2.2. Początkowo cząsteczki ciała stałego utrzymywane są w bezruchu siłami spójności i ciężkości (odcinek A–B).



Rysunek 2.2.2. Zależność spadku ciśnienia na złożu od prędkości płynu

Zwiększając prędkość płynu dochodzimy do momentu, w którym siła dynamicznego oddziaływania strumienia gazu – siła działająca na złożu jako całość ( $\Delta p \cdot f$ ) będzie równa ciężarowi materiału stanowiącego złożu, pomniejszonemu o siłę wyporu:

$$\Delta p \cdot f = v_z \cdot \rho \cdot g - v_z \cdot \rho_p \cdot g = v_z \cdot (\rho - \rho_p) \cdot g \quad (2.2.2)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość ziaren [ $\text{kg/m}^3$ ],  $\rho_p$  – gęstość płynu [ $\text{kg/m}^3$ ],  $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m/s}^2$ ].

Następuje wówczas uniesienie – ekspansja złoża (łuk B–C–D na rysunku 2.2.2). Ale ponieważ siły spójności (zlepiające cząstki) są za małe, aby nadal utrzymywać cząstki blisko siebie, następuje oddzielenie cząstek od siebie. Obserwujemy spulchnienie złoża. Poszczególne ziarna złoża są wprowadzane w ruch, przemieszczają się względem siebie. W punkcie D fluidyzacja jest zupełna i wszystkie cząstki poruszają się. Cząstki ciała stałego nie mogą jednak wydostać się ponad warstwę fluidalną, ponieważ rzeczywista prędkość gazu nad warstwą jest mniejsza od prędkości swobodnego opadania cząstek. Cząstki są uwięzione w warstwie, a jednocześnie przemieszczają się względem siebie. Tak uformowana warstwa fluidalna przypomina wrzącą ciecz. Zachodzi w niej silne mieszanie się cząstek ciała stałego. Stan taki nazywamy fluidalnym. Stan ten charakteryzuje się stałym oporem przepływu płynu;  $\Delta p = \text{const}$  (krzywa D–E). Linia przerywana pokazuje często spotykany przebieg zmian ciśnienia.

W momencie, gdy prędkość płynu w aparacie przekroczy prędkość swobodnego opadania ziaren, nastąpi wywianie ziaren ciała stałego z aparatu. Prędkość, przy której ma miejsce to zjawisko, nosi nazwę prędkości wynoszenia ( $u_{\text{wyn}}$ ). Zjawisko to wykorzystuje się do transportu pneumatycznego materiałów sypkich. Stan fluidalny zaczyna się od prędkości krytycznej  $u_{kr}$ , a kończy na prędkości wynoszenia  $u_{\text{wyn}}$ .

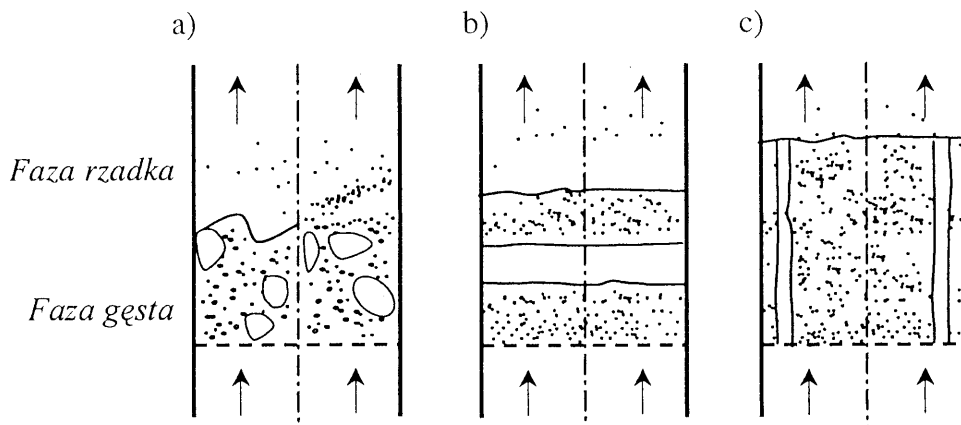
**Krytyczną prędkość fluidyzacji** ( $u_{kr}$ ) definiuje się jako najmniejszą prędkość przepływu płynu, przy której uzyskuje się stałą wartość spadku ciśnienia na złożu ciała stałego. Występowanie stałej różnicy ciśnień pod i nad złożem można tłumaczyć tym, że przy pod-

wyższaniu natężenia przepływu płynu, a tym samym jego szybkości liniowej ( $u$ ), zachodzi jednocześnie zwiększanie się objętości warstwy fluidalnej i odległości między ziarnami złoża. W następstwie tego rzeczywista prędkość gazu pomiędzy ziarnami złoża ( $u_{rz}$ ), od której zależy opór warstwy, pozostaje niezmienna.

Gdy wielkość ziaren ciała stałego nie jest jednakowa, to w złożu fluidalnym można wyróżnić dwie pseudofazy: gęstą oraz rzadką. Część dolna, która odznacza się od pozostałej wyraźną granicą, nazywana jest fazą gęstą. Faza rzadka składa się z cząstek drobniejszych, które podlegają stale wywiewaniu.

Jeżeli złoże jest w miarę jednorodne, tzn. dowolny element warstwy fluidalnej „wyjęty” ze złoża ma to samo stężenie fazy stałej, fluidyzację nazywamy jednorodną. Fluidyzacja cieczą jest najczęściej jednorodna. Fluidyzacja gazem jest prawie w 100% przypadków niejednorodna.

Typowym zakłóceniem fluidyzacji jest powstawanie dużych pęcherzy gazu i towarzyszący temu nierównomierny rozkład ziaren w złożu (rysunek 2.2.3). Gdy wielkość pęcherzy gazu staje się współmierna ze średnicą aparatu, może dojść do tworzenia się korków powietrznych (rysunek 2.2.3.b) niekorzystnie wpływających na złoże. Złoże jest pulsacyjnie podrzucane zamiast równomiernego mieszania ziaren ciała stałego.



Rysunek 2.2.3. Zakłócenia fluidyzacji: a) powstawanie dużych pęcherzy gazu, b) pulsacja, c) kanalikowanie

Często pojawia się też zjawisko kanalikowania (rysunek 2.2.3.c), szczególnie przy ściankach aparatu i dla złożeń, w których ziarna ciała stałego (na przykład cukru) ulegają zlepianiu. Od dna do górnej granicy złoża tworzą się kanały, w których nie ma ziaren.

Stopień jednorodności fluidyzacji określa liczba Frouda:

$$Fr = \frac{u_{kr}^2}{g \cdot d_z} \quad (2.2.3)$$

gdzie:  $d_z$  – średnica zastępcza ziaren [m] – jest to średnica cząstki o objętości równej średniej objętości wszystkich ziaren w złożu.

Jeśli liczba Frouda odpowiadająca krytycznej prędkości fluidyzacji jest mniejsza od jedności, to na ogół występuje fluidyzacja jednorodna, w przeciwnym razie należy oczekiwać fluidyzacji niejednorodnej.

## 2.2.2. Teoretyczne wyznaczenie krytycznej prędkości fluidyzacji

Jednym z ważniejszych parametrów złoża ziaren, nieruchomego i fluidalnego, jest porowatość  $\varepsilon$  – objętościowy udział przestrzeni międzyziarnowej w złożu:

$$\varepsilon = \frac{v_w - v_z}{v_w} = 1 - \frac{v_z}{v_w} \quad (2.2.4)$$

gdzie:  $v_w$  – objętość warstwy [ $m^3$ ];  $v_z$  – objętość samych ziaren [ $m^3$ ].

Dla warstwy nieruchomej, złożonej z ziaren kulistych o jednakowej średnicy, niezależnie od ich rozmiaru, porowatość ( $\varepsilon$ ) wynosi w przybliżeniu 0,4.

Wraz ze wzrostem natężenia przepływu gazu rośnie porowatość ( $\varepsilon$ ) złoża fluidalnego (wzrasta jego objętość  $v_w$  przy stałej objętości  $v_z$ ). Dla szybkości wynoszenia  $u_{wyn}$  można przyjąć, że  $v_w \gg v_z$  i  $\varepsilon = 1$ . Dlatego stan fluidalny może występować w przedziale od  $\varepsilon = 0,4$  do  $\varepsilon = 1$ . Wartości te mogą być również przyjęte, z niewielkim przybliżeniem i dla ziaren w formie wielościanu.

Spadek ciśnienia przy przepływie przez złożę sypkiego materiału można określić, wykorzystując doświadczalne równanie Leva:

$$\Delta p = \frac{200 \cdot \eta \cdot H_0 \cdot u \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \phi^2}{d_z^2 \cdot \varepsilon^3} \quad (2.2.5)$$

gdzie:  $\eta$  – dynamiczna lepkość gazu [ $Pa \cdot s$ ],

$H_0$  – wysokość złoża odpowiadająca krytycznej prędkości fluidyzacji [ $m$ ],

$\phi$  – czynnik kształtu ziaren – jest to współczynnik pokazujący ile razy powierzchnia cząstki jest większa od powierzchni kuli o tej samej objętości.

Równanie (2.2.5) jest słuszne dla przepływu laminarnego, w tym przypadku liczba kryterialna Reynoldsa ( $Re$ ) definiowana następująco:

$$Re = \frac{u \cdot d_z \cdot \rho_p}{\eta} \quad (2.2.6)$$

musi być mniejsza od 10.

Do wyznaczenia krytycznej prędkości ( $u_{kr}$ ) możemy wykorzystać równanie (2.2.2). Uwzględniając definicję porowatości ( $v_z = v_w \cdot (1 - \varepsilon)$ ) oraz przedstawiając objętość złoża w postaci iloczynu wysokości złoża i pola powierzchni przekroju aparatu ( $v_w = H_0 \cdot f$ ), równanie (2.2.2) przyjmie postać:

$$\Delta p \cdot f = H_0 \cdot f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho - \rho_p) \cdot g \quad (2.2.7)$$

Otrzymujemy więc zależność:

$$\Delta p = H_0 \cdot g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho - \rho_p) \quad (2.2.8)$$

Porównując wartości spadku ciśnienia w momencie początku fluidyzacji (równania 2.2.5 i 2.2.8) otrzymujemy zależność na krytyczną prędkość fluidyzacji:

$$u_{kr} = \frac{d_z^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot (\rho - \rho_p) \cdot g}{200 \cdot \eta \cdot \phi^2 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.2.9)$$

Jak wynika z powyższego równania, dla danego materiału sypkiego i przy stałej początkowej porowatości złoża ( $\varepsilon$ ), prędkość krytyczna nie zależy od wysokości złoża ( $H_0$ ). Uwidacznia się natomiast wpływ czynników zmieniających lepkość płynu ( $\eta$ ), na przykład rodzaj płynu, temperatura.

Do obliczenia urządzeń do fluidyzacji konieczne jest znalezienie zależności pomiędzy właściwościami fizycznymi płynu, szybkością wywiewania i porowatością złoża. Tak jak często ma to miejsce w praktyce, zależności powyższe są przedstawiane w formie wykre-

sów funkcji zmiennych bezwymiarowych. Przy rozpatrywaniu hydrodynamiki stanu fluidalnego bardzo wygodne jest posługiwanie się zależnością graficzną pomiędzy kryteriami Laszczenki ( $Ly$ ) i Archimedesesa ( $Ar$ ):

$$Ly = f(Ar) \quad (2.2.10)$$

Liczbę kryterialną Laszczenki obliczamy ze wzoru:

$$Ly = \frac{u^3 \cdot \rho_p^2}{\eta \cdot (\rho - \rho_p) \cdot g} \quad (2.2.11)$$

Liczbę Archimedesesa wyznaczamy z zależności:

$$Ar = \frac{d_z^3 \cdot \rho_p \cdot (\rho - \rho_p) \cdot g}{\eta^2} \quad (2.2.12)$$

Przyjmując, że gęstość ciała stałego ( $\rho$ ) jest dużo większa od gęstości gazu ( $\rho_g$ ), wyrażenia powyższe ulegają uproszczeniu:

$$Ly = \frac{u^3 \cdot \rho_g^2}{\eta \cdot \rho \cdot g} \quad (2.2.13)$$

$$Ar = \frac{d_z^3 \cdot \rho_g \cdot \rho \cdot g}{\eta^2} \quad (2.2.14)$$

W literaturze spotyka się często określenie krytycznej prędkości fluidyzacji w postaci równań kryterialnych typu  $Re_{kr} = f(Ar)$ , gdzie  $Re_{kr}$  jest liczbą Reynoldsa odpowiadającą krytycznej prędkości fluidyzacji. Jedną z częściej cytowanych zależności ma postać:

$$Re_{kr} = \frac{Ar}{150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} + \frac{1,75}{\varepsilon^3} \cdot Ar} \quad (2.2.15)$$

Po wyliczeniu liczb  $Ar$  i  $Re$  krytyczną prędkość fluidyzacji można obliczyć na podstawie równania 2.2.6.

### 2.2.3. Zastosowanie fluidyzacji w praktyce przemysłowej

Proces fluidyzacji charakteryzuje się wieloma zaletami. Ze względu na silnie rozwiniętą powierzchnię zetknięcia faz oraz dzięki stałemu odnawianiu powierzchni międzyfazowej na skutek intensywnego mieszania powstają korzystne warunki do wymiany ciepła i masy. Umożliwia to zastosowanie fluidyzacji w heterogenicznych procesach chemicznych prowadzonych w układzie ciało stałe – gaz, a zwłaszcza przebiegających ze znacznym efektem cieplnym. Ważną zaletą fluidyzacji jest również łatwość utrzymania stałych parametrów ciała stałego, poprzez wymianę części wsadu, bez konieczności przerywania procesu. Doskonale mieszanie umożliwia uzyskanie jednorodnej mieszaniny kilku substancji o różnych właściwościach fizycznych. Fluidyzacja umożliwia wymianę dużych ilości ciepła (poprzez wykorzystanie różnic w pojemnościach cieplnych ciał stałych i gazów). Te cechy fluidyzacji prowadzą do wzrostu szybkości przebiegu procesów, a zatem wzrostu wydajności aparatów.

Powyższe zalety pozwoliły na zastosowanie fluidyzacji w dużej ilości procesów w różnych gałęziach przemysłu. Oto niektóre z nich:

1. Suszenie minerałów, nawozów i produktów spożywczych.
2. Reakcje chemiczne (na przykład katalityczny kraking węglowodorów, synteza chlorków alkilowych, akrylonitrylu, produkcja bezwodnika ftalowego, reakcja Fischera Tropscha i inne).
3. Gazyfikacja paliw stałych – wydobywanie węglowodorów z łupków bitumicznych, zgazowanie węgla w generatorze Winklera (pierwsze zastosowanie fluidyzacji w praktyce przemysłowej w roku 1926), spalanie węgla w kotłach fluidalnych, pozwalające na ograniczenie emisji tlenków azotu i siarki.
4. Obróbka minerałów (produkcja wapna palonego, redukcja tlenków żelaza, utlenianie minerałów zawierających siarkę, prażenie koncentratów flotacyjnych).
5. Adsorpcja (odzyskiwanie  $CS_2$ , osuszanie gazów).
6. Powlekanie metali warstwami plastycznymi.
7. Mieszanie (proszki szklane, przemysł chemiczny i metalurgiczny).
8. Blanszowanie produktów spożywczych.

## 2.2.4. Opis ćwiczenia

### Cel ćwiczenia

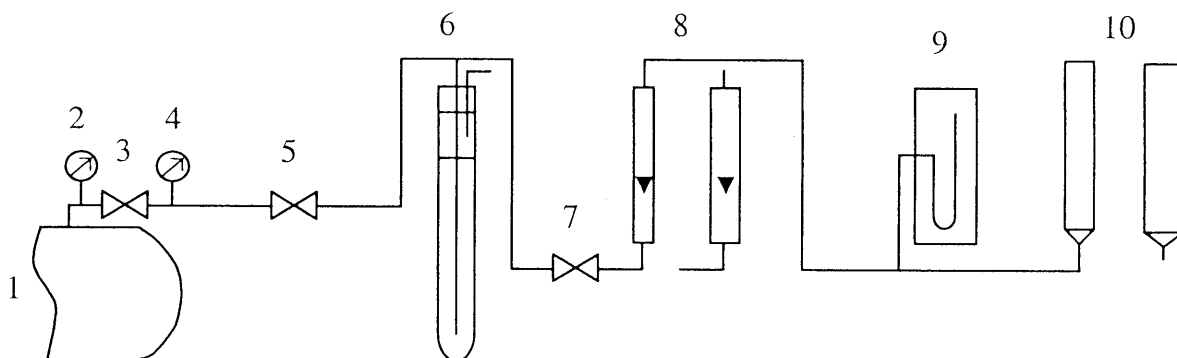
Celem ćwiczenia jest wprowadzenie w zagadnienia związane z fluidyzacją oraz zapoznanie ze sposobami wyznaczania podstawowych wielkości charakteryzujących tę operację jednostkową.

### Zadania

Znaleźć krytyczną prędkość fluidyzacji oraz prędkość wynoszenia dla ciała stałego wskazanego przez prowadzącego ćwiczenia. Porównać wielkości otrzymane doświadczalnie z uzyskanymi na podstawie obliczeń teoretycznych.

### Aparatura

Zestaw do badania zjawiska fluidyzacji (rysunek 2.2.4) składa się ze sprężarki (1), na której zamocowany jest zawór redukcyjny (3) z manometrami wysokiego (2) i niskiego ciśnienia (4), zaworu igłowego (5); manostatu (6); zaworu igłowego (7); rotametrów (8); manometru różnicowego (9); kolumn fluidyzacyjnych o różnej średnicy (10).



Rysunek 2.2.4. Schemat zestawu aparatury do badania zjawiska fluidyzacji

## Wykonanie ćwiczenia

Eksperymentalne badanie zjawiska fluidyzacji należy wykonać dla jednego rodzaju ciała stałego w dwu kolumnach o różnej średnicy. Rodzaj ciała stałego oraz rotametr wskazuje prowadzący ćwiczenia. Na początku należy wykonać pomiary dla kolumny bez złoża ciała stałego. W tym celu należy:

1. Włączyć sprężarkę powietrza i naładować do ciśnienia 0,5 MPa. Sprężarka powinna automatycznie wyłączyć się po osiągnięciu ciśnienia około 0,6 MPa. Ustawić ciśnienie na wyjściu równe 0,1 MPa, przez wkręcenie zaworu redukcyjnego (3) w sprężarce.
2. Połączyć strumień gazu z pierwszą kolumną.
3. Odkręcając zawór igłowy (5), ustalić przepływ gazu tak, aby przez manostat (6) wypływały pojedyncze pęcherzyki gazu.
4. Następnie odkręcając zawór (7), ustalić przepływ gazu przez rotametr.  
*Uwaga: przepływ ustalać tylko przez odkręcanie zaworu (7). Należy unikać zmniejszania przepływu, na przykład po to, aby ściśle ustalić położenie rotametru.*
5. Początkowo wskazania pływaka w rotametrze przy kolejnych pomiarach powinno zmieniać się o 2 kreski (co najmniej do 10 na skali przyrządu), a następnie co 5 kresk. Stale kontrolować pracę manostatu i w razie zaniku wypływających pęcherzyków powietrza zwiększyć przepływ gazu przez większe odkręcenie zaworu (5).
6. Przy każdym położeniu pływaka w rotametrze notować różnicę ciśnień powstałą na tkaninie – perforowanej przegrodzie kolumny. Wyniki wpisywać do tabeli 2.2.1.

Tabela 2.2.1. Wyniki eksperymentalnych pomiarów fluidyzacji ciała stałego

Lp	Wskazania rotametru	$\Delta p$ samej tkaniny [mm H <sub>2</sub> O]	$\Delta p$ tkaniny i złoża [mm H <sub>2</sub> O]			Przepływ powietrza		Opór ( $\Delta p$ ) złoża [mm H <sub>2</sub> O]
			Pomiar 1	Pomiar 2	Średnia	[dm <sup>3</sup> /min]	[m/s]	
Kolumna 1								
Kolumna 2								

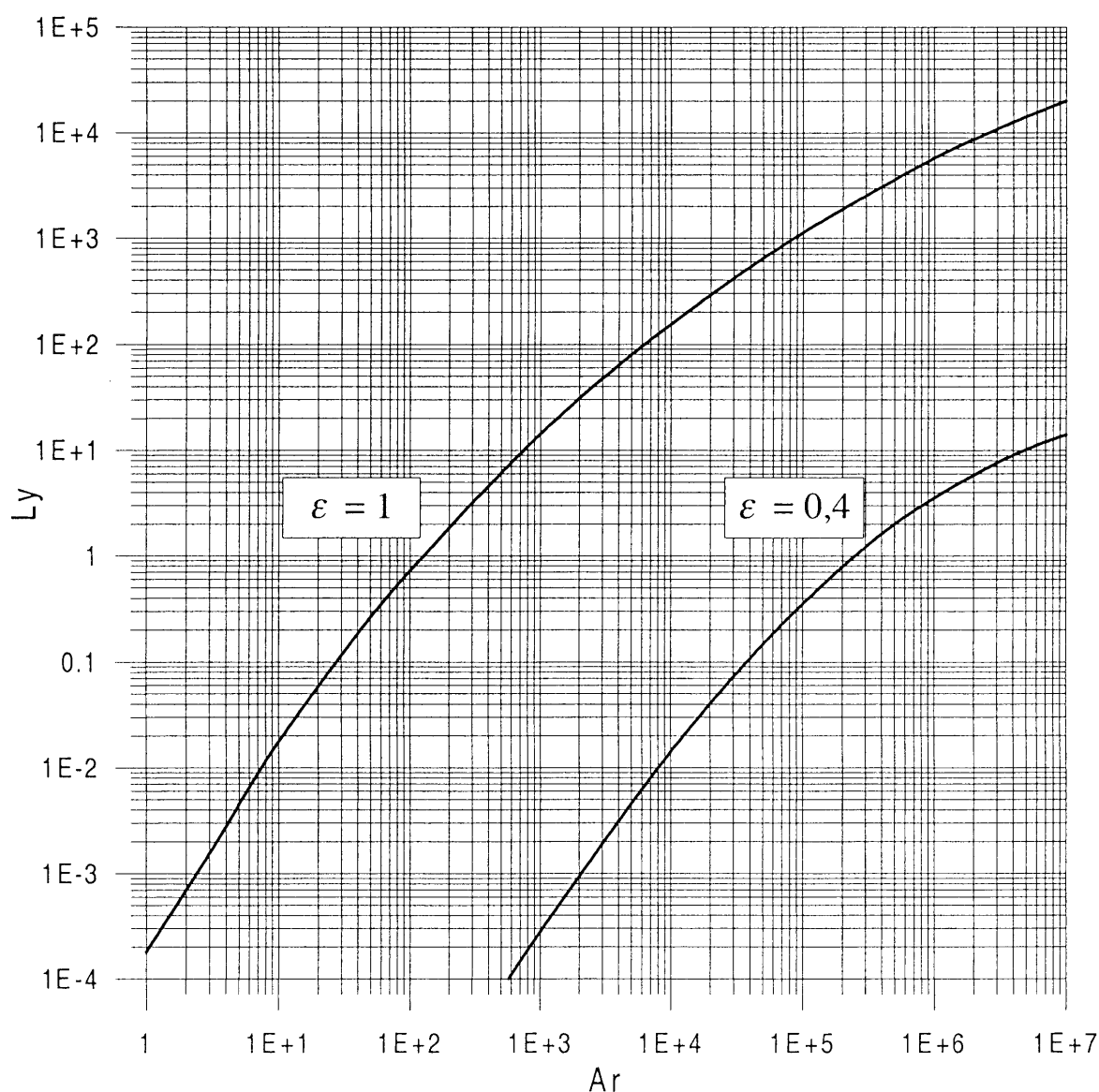
7. Po wykonaniu charakterystyki przegrody kolumny dla całego zakresu wskazań rotametru zakręcić zawory (5) i (7).
8. Odważyć na wadze technicznej 50–70 g rozdrobnionego ciała stałego wybranego do badania fluidyzacji i wsypać go do kolumny. Zmierzyć wysokość złoża. Zanotować nazwę ciała stałego, średnicę ziaren (frakcję) oraz ich gęstość – wartości te podane są na pojemniku z badaną substancją.
9. Analogicznie do wykonanej wcześniej charakterystyki samej przegrody, wykonać pomiar (punkty 3–7) dla kolumny ze złożem ciała stałego, starając się, aby spadek ciśnienia był mierzony dla tych samych przepływów. Obserwować zmiany zachodzące w złożu ciała stałego.
10. Pomiar wykonać dwukrotnie. Każdorazowo po skończeniu poprzedniego pomiaru lekko stuknąć kolumnę, aby doprowadzić złoże do stanu wyjściowego przed pomiarem. Po zakończeniu pomiarów wsypać ziarno ciała stałego z powrotem do pojemnika.



11. Wykonać badanie fluidyzacji tego samego ciała stałego w drugiej kolumnie (według punktów 2–10).
12. Zmierzyć średnicę wewnętrzną obu kolumn i temperaturę gazu (temperatura powietrza w pracowni). Z krzywych kalibracyjnych rotametrów odczytać wartości przepływów objętościowych odpowiadających położeniom pływaka rotametry nastawianym w czasie pomiarów.

### Opracowanie wyników fluidyzacji

1. Narysować, dla każdej kolumny, wykres zależności spadku ciśnienia ( $\Delta p$ ) na złożu od szybkości przepływu powietrza [m/s] przez złożo. W tym celu należy spadek ciśnienia  $\Delta p$  na złożu z tkaniną (wartość średnia) zmniejszyć o wielkość spadku ciśnienia na samej tkaninie. Liniową szybkość przepływu powietrza obliczyć z równania (2.2.1).
2. Na podstawie sporządzonych wykresów określić prędkość krytyczną ( $u_{kr}$ ), tak jak na rysunku 2.2.2. Do dalszych obliczeń wyznaczyć średnią wartość prędkości krytycznej.
3. Wyliczyć kryterium Laszczenki (2.2.11) dla prędkości krytycznej (doświadczalnej) i odszukać z rysunku 2.2.5 zależności kryterium Laszczenki od kryterium Archimedeasa, wartość liczby Archimedeasa dla  $\varepsilon = 0,4$ .



Rysunek 2.2.5. Zależność między liczbami Laszczenki i Archimedeasa

4. Po wyznaczeniu liczby Archimedes, obliczyć średnią wartość średnicy ziaren złoża (na podstawie równania 2.2.12). Porównać z wartością odczytaną z etykiety pojemnika z ziarnem ciała stałego.
5. Z wykresu zależności kryteriów  $Ly = f(Ar)$  znaleźć wartość kryterium Laszczenki dla  $\varepsilon = 1$  (dla liczby Archimedes określonej w punkcie 3) i obliczyć prędkość wynoszenia  $u_{wyn}$  (na podstawie równania 2.2.11).
6. Na podstawie równania (2.2.2) określić ciężar ziaren w złożu (równy iloczynowi  $G_z = \Delta p \cdot f$ ). Porównać z wartością zmierzona ( $G_z = m \cdot g$ )
7. Wyniki umieścić w tabeli 2.2.2.  
Dane potrzebne do przeprowadzenia powyższych obliczeń (dotyczące gęstości i lepkości powietrza) znajdują się w tabeli 2.2.3.

Tabela 2.2.2. Parametry fluidyzacji badanego ciała stałego

Nazwa ciała stałego	Krytyczna prędkość fluidyzacji $u_{kr}$ [m/s]			Średnica ziaren $d_z$ [m]	Prędkość wynoszenia $u_{wyn}$ [m/s]	Ciężar złoża $G_w$ [N]
	Kolumna		Wartość średnia			
	I	II				

Tabela 2.2.3. Właściwości suchego powietrza pod ciśnieniem  $1 \cdot 10^5$  Pa

Temperatura [°C]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [10 <sup>-5</sup> Pa·s]
0	1,293	1,717
10	1,247	1,766
20	1,205	1,815
30	1,165	1,864
40	1,128	1,913
50	1,093	1,962
60	1,060	2,011

#### 2.2.4. Symbole wielkości używanych w rozdziale 2.2

- $\Delta p$  – różnica ciśnień,
- $\rho$  – gęstość ziaren,
- $\rho_g$  – gęstość gazu,
- $\rho_p$  – gęstość płynu,
- $\varepsilon$  – porowatość złoża,
- $\eta$  – dynamiczna lepkość gazu,
- $\phi$  – czynnik kształtu,

- $Ar$  – liczba Archimedes,
   
 $d_z$  – średnica zastępcza ziaren ciała stałego,
   
 $f$  – pole powierzchni przekroju,
   
 $Fr$  – liczba Frouda,
   
 $g$  – przyspieszenie ziemskie,
   
 $G_z$  – ciężar ziaren w złożu,
   
 $H_0$  – wysokość złoża odpowiadająca krytycznej prędkości fluidyzacji,
   
 $Ly$  – liczba Laszczenki,
   
 $m$  – masa,
   
 $Re$  – liczba Reynoldsa,
   
 $Re_{kr}$  – liczba Reynoldsa odpowiadająca krytycznej prędkości fluidyzacji,
   
 $U$  – liniowa szybkość przepływu płynu przez kolumnę (prędkość pozorna),
   
 $u_{kr}$  – krytyczna prędkość fluidyzacji,
   
 $u_{wyn}$  – prędkość wynoszenia,
   
 $V$  – objęściowe natężenie przepływu płynu,
   
 $v_w$  – objętość warstwy ciała stałego,
   
 $v_z$  – objętość samych ziaren ciała stałego,

## Literatura

1. Bis Z., *Fluidyzacja cyrkulacyjna mieszanin polidispersyjnych*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1999.
2. Ciborowski J., *Podstawy inżynierii chemicznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1965.
3. Kandefer S., *Spalanie fluidalne odpadów i paliw niskogatunkowych*, Politechnika Krakowska, Kraków 1989.
4. Koch R., Noworyta A., *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
5. Kozak D., *Wybrane operacje jednostkowe i aparatury przemysłu chemicznego*, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 1986.
6. Kuczyński W., *Podręcznik do ćwiczeń z technologii chemicznej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.
7. Lewicki P., *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.