

## Ćwiczenie 9:

### OKREŚLANIE STANÓW ZŁOŻA FLUIDALNEGO

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z różnymi stanami warstwy fluidalnej oraz eksperymentalne wyznaczenie prędkości początku fluidyzacji.

#### 2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Fluidyzacja jest to proces dwufazowy polegający na tym, że warstwa materiału sypkiego ułożona na ruszcie jest doprowadzana do stanu pseudopłynnego za pomocą strugi płynu tłoczonego z dołu. Tak utworzona warstwa fluidalna znajduje się w stanie quasi stabilnym tylko w pewnym przedziale prędkości przepływu gazu (lub cieczy), zależnym od rozmiarów cząstek i stosunku gęstości obu faz. Warstwa fluidalna zachowuje się jak ciecz ze względu na brak sztywności postaciowej oraz ze względu na obecność ciśnienia hydrostatycznego i lepkości. Cząstki ciała stałego charakteryzują się najczęściej rozmiarem od 25  $\mu\text{m}$  do 3 mm.

Zalety złoża fluidalnego w porównaniu ze złożem stałym są następujące:

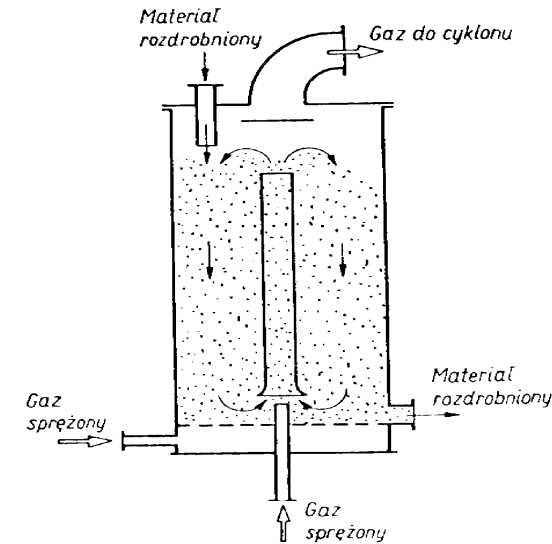
- szybkie wyrównywanie się temperatury w złożu,
- duże współczynniki wnikania ciepła i masy,
- duża powierzchnia czynna złoża,
- możliwość prowadzenia procesu z ciałem stałym tak jak z cieczą.

Natomiast do wad warstwy fluidalnej zalicza się:

- znacznie mniejsze niż w przypadku złoża nieruchomego stężenie ciała stałego,
- straty ciała stałego na skutek ścierania,
- powstawanie pyłu,
- erozja ścianek aparatu.

Zastosowanie fluidyzacji jest bardzo duże i ciągle zwiększa się w procesach katalitycznych (jak np. krakowanie, synteza benzyny) i niekatalitycznych (spalanie węgla, wytwarzanie węgla aktywnych, zgazowanie węgla itp.). Zjawisko to jest także praktycznie stosowane w procesach fizycznych, np.

podczas mieszania, transportu materiałów rozdrobnionych, ochładzania czy podgrzewania, adsorpcji i suszenia. Przykład aparatu w którym wykorzystywany jest proces fluidyzacji przedstawia rys. 1.



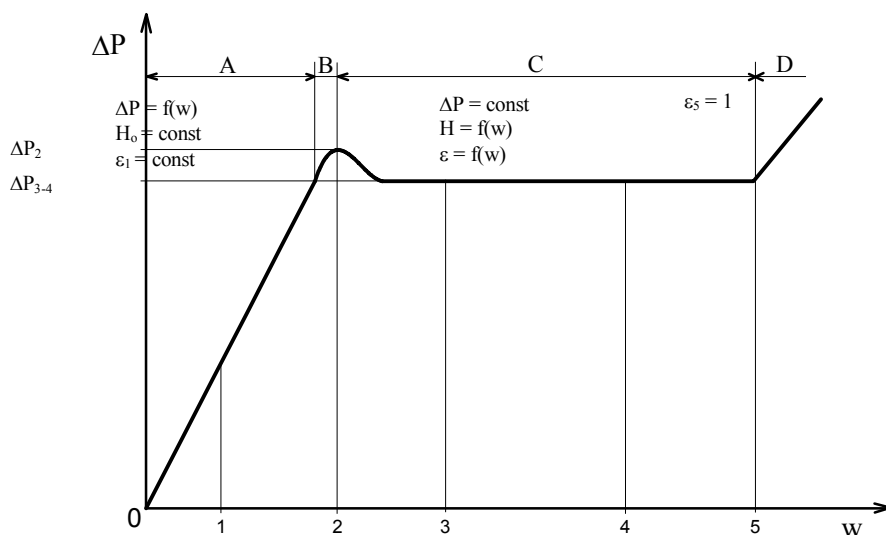
Rys. 1. Mieszalnik fluidyzacyjny

Obecnie coraz szersze zastosowanie przemysłowe znajdują aparaty z trójfazowym złożem fluidalnym. W aparatach tego typu, jedna z substancji roboczych występuje w postaci gazu, a druga w postaci cieczy. Obecność fluidalnego stałego wypełnienia (niekiedy spełniającego również rolę katalizatora) w środowisku kontaktującego się gazu i cieczy, intensyfikuje procesy wymiany ciepła i masy. Aparaty ze złożem trójfazowym mogą pracować jako współ- lub przeciwrzędowe. W aparatach współrzędowych strumienie gazu i cieczy przechodzą od dołu ku górze przez warstwę fluidowanego złoża. W aparatach przeciwrzędowych złożo jest zraszane cieczą od góry, a gaz przepływa w kierunku przeciwnym, powodując jednocześnie „upłynnienie” warstwy ciała stałego.

Strata ciśnienia płynu przepływającego przez złożo nieruchome zwiększa się z kwadratem prędkości. W momencie, gdy nadciśnienie przewyższa ciśnienie statyczne ładunku, następuje niewielka jego ekspansja, a podczas dalszego zwiększania prędkości przepływu ładunek przechodzi w stan fluidalny.

Różne stany warstwy fluidalnej dogodnie jest przedstawiać na tle wykresu  $\Delta P=f(w)$ , gdzie  $\Delta P$  jest stratą ciśnienia na grubości warstwy, a  $w$  prędkością przepływu płynu.

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rys. 2, wyróżnić można następujące stany warstwy ciała stałego.



Rys. 2. Charakterystyka warstwy ciała stałego w układzie podwójnie logarytmicznym

A - warstwa nieruchoma, B - warstwa ruchoma, C - warstwa fluidalna,  
D - transport pneumatyczny

**Stan nieruchomy warstwy** jest określony jako stan 1. Cząstki są wtedy nieruchome i podtrzymywane przez kontakt z innymi cząstkami. Spoczywają one na ruszcie, który nie tylko utrzymuje warstwę, lecz także równomiernie rozdziela tłoczony od dołu płyn. Strata ciśnienia zwiększa się wraz ze zwiększaniem prędkości  $w$ . Warstwa charakteryzuje się minimalną porowatością  $\varepsilon_1$ , wynikającą z wzajemnego ułożenia cząstek, a także odpowiadającą tej porowatości wysokością  $H_1$ . Przepływ gazu ma charakter typowy dla przepływów przez warstwę sypką lub porowatą.

**Warstwa ruchoma** odpowiada stanowi 2. Warstwa nieruchoma zostaje rozluźniona, przy czym cząstki pozostają w dalszym ciągu we wzajemnym kontakcie i nie zmieniając położenia względem siebie przesuwiają się względem ścian aparatu fluidyzacyjnego. Wykonują przy tym oscylacyjne ruchy z małą amplitudą, tak jakby były zawieszony w strudze płynu. Wspomniane rozluźnienie warstwy następuje wtedy, gdy nadciśnienie płynu zrówna się z ciśnieniem

wywieranym przez warstwę. Taki stan oznacza początek fluidyzacji, odpowiada mu prędkość początku fluidyzacji  $w = w_2$ , porowatość  $\varepsilon_2$  i wysokość warstwy  $H_2$ . Strata ciśnienia  $\Delta P_2$  jest wówczas największa. Pojawia się lokalne maksimum, spowodowane siłami wzajemnego oddziaływania cząstek ciała stałego tworzącego złożę. W przypadku cząstek dużych siły te są jednak małe i maksimum to nie występuje.

**Warstwa fluidalna** odpowiada stanom 3 i 4. Gdy zostanie przekroczona prędkość  $w_2$  wówczas powstaje warstwa fluidalna z fazą gęstą, którą charakteryzuje wyraźnie zaznaczona górna granica. Gdy prędkość gazu dalej zwiększa się, warstwa zwiększa swą wysokość oraz porowatość (średnią). Drobne cząstki przemieszczają się do góry, tworząc tzw. fazę rzadką czyli zawieszinę o małym stężeniu (dużej porowatości), nie mającą górnej powierzchni swobodnej. Pomiedzy fazą gęstą a rzadką utrzymuje się dosyć wyraźna granica. Porowatość warstwy fluidalnej zmienia się zatem w przedziale  $\varepsilon_2 < \varepsilon < 1$ . Cechą charakterystyczną warstwy fluidalnej jest prawie stała strata ciśnienia  $\Delta P_{3-4}$ , mimo zwiększania prędkości. Strata ciśnienia ma nieco mniejszą wartość niż na początku fluidyzacji, a różnica ( $\Delta P_2 - \Delta P_{3-4}$ ) jest spowodowana siłami wiążącymi, które występują pomiędzy cząstkami.

Przy dalszym zwiększaniu prędkości gazu stężenie fazy rzadkiej zwiększa się, a fazy gęstej maleje. Gdy prędkość przepływu zrówna się z prędkością swobodnego opadania cząstek, powstaje stan graniczny, w którym kończy się fluidyzacja ( $\varepsilon_s = 1$ ). Odpowiednia prędkość przepływu gazu zwana jest prędkością zawisania; jest ona równa prędkości swobodnego opadania cząstki w gazie nieruchomym. Jeżeli prędkość przepływu gazu jest większa od prędkości swobodnego opadania cząstek, cząstki są wywiewane z warstwy i unoszone w strudze gazu, a zatem zaczyna się transport pneumatyczny. Dla złoża zasilanego fazą stałą w sposób ciągły, strata ciśnienia zwiększa się wtedy wraz ze zwiększaniem prędkości przepływu gazu. Jednocześnie dochodzi do istotnego zaburzenia działania aparatu fluidalnego, objawiającego się innym od założonego kierunkiem rozpręwu faz.

Rodzaje warstw fluidalnych przedstawiono na rys. 3. Ogólny ich podział wyróżnia warstwy fluidalne jednorodne i niejednorodne. Poszczególne rodzaje warstw można natomiast scharakteryzować następująco.

**Warstwa jednorodna** wykazuje jednakową porowatość we wszystkich punktach, (rys. 3a).

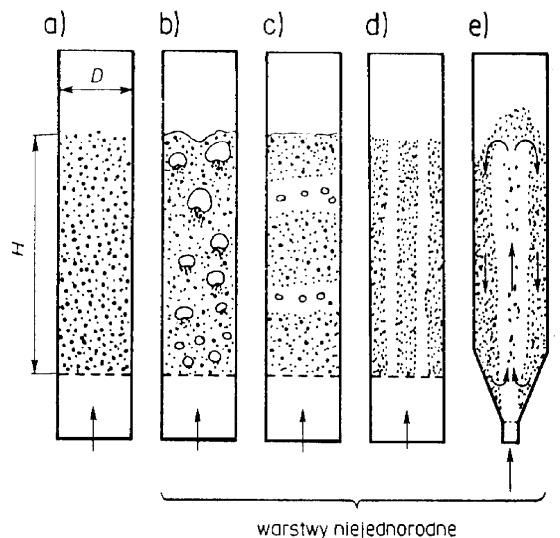
**Warstwa pęcherzykowa** charakteryzuje się tym, że część gazu płynie w postaci pęcherzy, (rys. 3b), wobec czego porowatość nie jest jednakowa we wszystkich punktach warstwy.

**Warstwa tłokowa** (nazywana również warstwą pulsującą) charakteryzuje się tym, że pęcherze urastają do rozmiarów równych średnicy aparatu, tworząc

poprzeczne warstwy gazu, (rys. 3c). Warstwy zawiesiny znajdujące się pomiędzy nimi poruszają się ku górze na podobieństwo tłoków.

**Warstwa kanalikowa** charakteryzuje się występowaniem pionowych kanałów, przez które przepływa znaczna część płynu, nie wprawiając w ruch cząsteczek na całym przekroju aparatu, (rys. 3d).

**Warstwa fontanna** charakteryzuje się tym, że cząstki są wynoszone do góry w obszarze występowania dużej prędkości w rdzeniu aparatu, a opadają na dół w obszarze małej prędkości w pobliżu ścian, (rys. 3e).



Rys. 3. Rodzaje warstw fluidalnych

a) jednorodna, b) pęcherzykowa, c) tłokowa, d) kanalikowa, e) fontanna

Umiejętność obliczania prędkości początku fluidyzacji  $w_2$  ma podstawowe znaczenie w projektowaniu i badaniu rzeczywistych procesów fluidyzacji. Choć procesy te są na ogół realizowane przy dość dużej prędkości, to niektóre z nich przebiegają tylko nieco powyżej prędkości  $w_2$ . Prędkość  $w_2$  odpowiada takiej prędkości przepływu, podczas której nadciśnienie płynu  $\Delta P_2$  zrównuje się z ciśnieniem wywieranym przez warstwę fluidalną o wysokości  $H_2$ . Równanie pozwalające określić prędkość początku fluidyzacji ma postać

$$\frac{1,75 \rho_p}{\varepsilon_2^3 \psi d_s} w_2^2 + \frac{150 (1 - \varepsilon_2) \eta_p}{\varepsilon_2^3 (\psi d_s)^2} w_2 - (\rho_s - \rho_p) g = 0 \quad (1)$$

gdzie:  $w_2$  - prędkość początku fluidyzacji, m/s;  
 $\varepsilon_2$  - porowatość złoża dla początku fluidyzacji, -;

- $d_s$  - średnica cząstek ciała stałego, m;  
 $\psi$  - sferyczność cząstek, -;  
 $\rho_p$  - gęstość płynu,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\eta_p$  - współczynnik dynamiczny lepkości płynu,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  
 $\rho_s$  - gęstość ciała stałego,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\mathfrak{G}$  - przyspieszenie ziemskie,  $\text{m/s}^2$ .

Zwykle porowatość złoża  $\varepsilon_2$  jest wielkością nieznaną. W celu jej określenia można skorzystać z empirycznych zależności podawanych w literaturze w postaci

$$\frac{1-\varepsilon_2}{\psi^2 \varepsilon_2^3} \approx 11 \quad \text{oraz} \quad \frac{1}{\psi \varepsilon_2^3} \approx 14. \quad (2)$$

Dla określenia poprawnych warunków pracy aparatu ze złożem fluidalnym konieczne jest również wyznaczenie zwiększenia objętości złoża w stosunku do złoża nieruchomego oraz oporów przepływu płynu przez warstwę fluidalną.

Zwiększenie objętości złoża, w miarę zwiększania porowatości związanej ze zwiększającym się strumieniem płynu, można obliczyć na podstawie zależności

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{1-\varepsilon_2}{1-\varepsilon_1} \quad (3)$$

gdzie:  $H_1, \varepsilon_1$  - wysokość i porowatość warstwy nieruchomej;

$H_2, \varepsilon_2$  - wysokość i porowatość warstwy dla początku fluidyzacji.

Opór przepływu płynu przez warstwę fluidalną wyznaczyć można z równania

$$\Delta P_f \approx \Delta P_2 = H_2 (1 - \varepsilon_2) (\rho_s - \rho_p) \mathfrak{G}, \quad (4)$$

pamiętając jednak o tym, że na sumaryczną stratę ciśnienia w aparacie fluidalnym mają również istotny wpływ miejscowe opory przepływu płynu przez ruszt podtrzymujący warstwę.

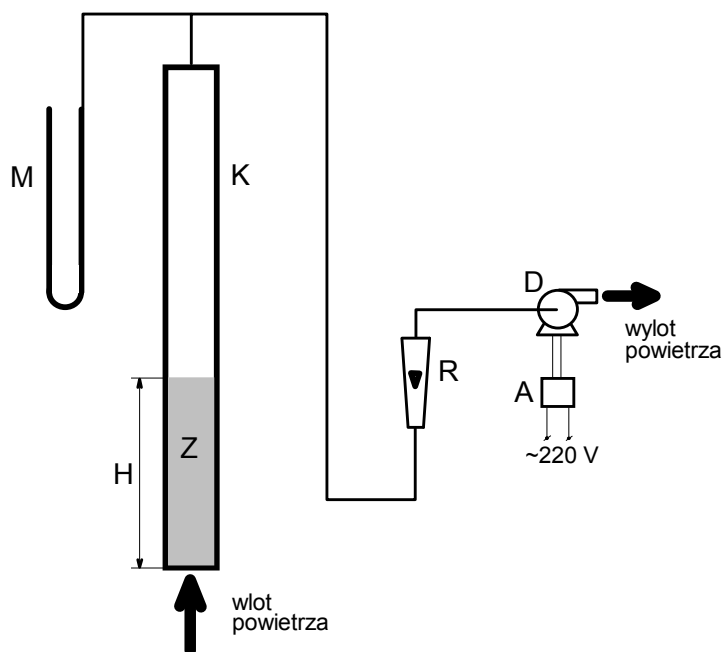
Warunki odpowiadające punktowi początku fluidyzacji można stosunkowo wyraźnie zaobserwować i określić, natomiast przejście między stanem fluidalnym i transportem pneumatycznym nie daje się jednoznacznie określić. Podczas silnego porywania cząstek ciała stałego z warstwy fluidalnej opór przepływu warstwy zmniejsza się i w momencie, gdy prędkość płynu przekracza prędkość opadania pojedynczej cząstki, następuje ich szybkie wyrzucanie z aparatu. Porównując opór przepływu podczas unoszenia cząstki z ciężarem cząstki, prędkość unoszenia można określić zależnością

$$w_5 = \sqrt{\frac{4 d_s \mathfrak{G} (\rho_s - \rho_p)}{3 \xi \rho_p}}, \quad (5)$$

gdzie:  $\xi$  - liczba oporu ruchu cząstki, -.

### 3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego do badania przebiegu fluidyzacji warstwy zgranulowanego ciała stałego strumieniem powietrza, przedstawiono na rys. 4. Głównym elementem stanowiska jest pionowa szklana rura o średnicy wewnętrznej 54 mm, zakończona u dołu rusztem siatkowym na którym spoczy-



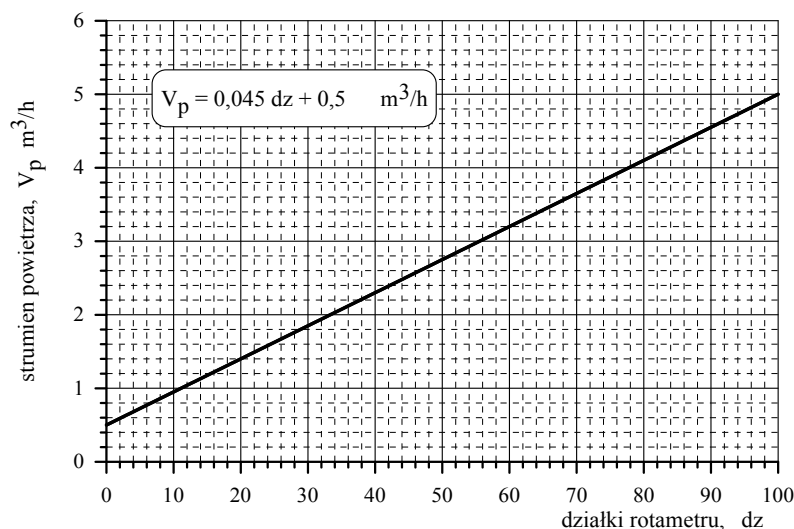
Rys. 4. Schemat stanowiska do badania procesu fluidyzacji

K - pionowa rura szklana o średnicy 54 mm, Z - złożę granulek polietylenu spoczywające na ruszcie; R - rotametr powietrza; M - manometr U-rurkowy, D - dmuchawa, A - autotransformator

wa złożę utworzone z granulek polietylenu. Charakterystyka cząstek stałych jest następująca:

- gęstość  $\rho_s = 920 \text{ kg/m}^3$ ;
- średnica  $d_s = 3 \text{ mm}$ ;
- porowatość w złożu nieruchomym  $\varepsilon_1 = 0,38$ ;
- sferyczność  $\psi = 0,825$ .

Przepływ gazu przez warstwę zgranulowanego ciała stałego wymuszany jest za pomocą dmuchawy D zasysającej powietrze atmosferyczne. Dmuchawa zasilana jest przez autotransformator, co umożliwia płynną regulację jej prędkości obrotowej, a tym samym wydajności. Pomiar oporów przepływu powietrza przez warstwę polietylenu, umożliwia wypełniony wodą manometr U-rurkowy M, wskazujący wartość podciśnienia wytwarzającego się w kanale ponad złożem. Naniesiona na szklanej rurze podziałka milimetrowa umożliwia ocenę ekspansji złoża. Strumień powietrza mierzony jest rotametrem R, którego charakterystykę przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyka rotametru powietrza

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W celu przeprowadzenia badań przebiegu procesu fluidyzacji na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rys. 3, należy:

- zdemontować górne elastyczne połączenie rury szklanej z instalacją ssącą, a następnie wypełnić rurę do wysokości około 20 cm suchymi granulami polietylenu;
- zamontować ponownie połączenie rury szklanej z dmuchawą oraz zanotować początkową wysokość warstwy polietylenu w kolumnie;
- przełącznikiem na pulpicie stanowiska włączyć autotransformator zasilający dmuchawę;
- zmieniając strumień powietrza przepływającego przez warstwę, obserwować zmiany jego oporów przepływu;



- e) szczególną uwagę zwrócić na początek fluidyzacji i odpowiadający jej strumień gazu;
- f) po przejściu złoża w stan fluidalny, obserwować zmiany jego wysokości w zależności od strumienia powietrza;
- g) prowadzić identyfikację tworzących się rodzajów warstwy fluidalnej;
- h) zwracać uwagę na zachowanie się cząstek ciała stałego w każdym z obserwowanych rodzajów warstw;
- i) określić wartość strumienia gazu odpowiadającą przejściu złoża fluidalnego w transport pneumatyczny cząstek ciała stałego;
- j) wyniki prowadzonych obserwacji i pomiarów każdorazowo notować w tabeli;

<b>Badanie procesu fluidyzacji</b>					
Średnica kolumny:		D = 54 mm			
Gęstość ciała stałego:		$\rho_s = 920 \text{ kg/m}^3$			
Średnica cząstek ciała stałego:		$d_s = 3 \text{ mm}$			
Sferyczność cząstek ciała stałego:		$\Psi = 0,825$			
Porowatość złoża nieruchomego:		$\varepsilon_1 = 0,38$			
Początkowa wysokość warstwy:		$H_1 = \dots\dots\dots \text{ mm}$			
Temperatura powietrza :		$t_p = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{C}$			
Gęstość powietrza:		$\rho_p = \dots\dots\dots \text{ kg/m}^3$			
Lepkości powietrza:		$\eta_p = \dots\dots\dots \text{ mPa}\cdot\text{s}$			
Strumień powietrza		Opór przepływu	Wysokość warstwy	Rodzaj warstwy	Uwagi
dz	$\text{m}^3/\text{h}$	mm H <sub>2</sub> O	mm	-	-
5					
10					
...					

- k) w trakcie badań zwrócić uwagę na wydajność dmuchawy, gdyż wytworzenie zbyt dużego podciśnienia w instalacji ssącej może spowodować wysianie wody z manometru U-rurkowego, a tym samym uniemożliwić kontynuację ćwiczenia;
- l) po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie autotransformatora.

## 5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

1. Na podstawie uzyskanych wyników badań, sporządzić w układzie współrzędnych logarytmicznych charakterystykę  $\Delta P = f(w)$ , jak na rys. 2.

2. Na podstawie sporządzonej charakterystyki określić prędkość początku fluidyzacji oraz porównać jej wartość z wartością otrzymaną na podstawie równania (1).
3. Na podstawie równania (5) określić teoretyczną prędkość przepływu powietrza odpowiadającą początkowi transportu pneumatycznego granulek polietylenu w kanale i porównać otrzymaną wartość z danymi otrzymanymi w trakcie pomiarów. Sposób określenia liczby oporu przepływu  $\xi$  występującej w równaniu (5) zawiera instrukcja do ćwiczenia 7 pt. „Badanie procesu sedymentacji zawiesin”.
4. Podać zakresy występowania zaobserwowanych rodzajów warstwy fluidalnej w zależności od prędkości przepływu powietrza.
5. Przedstawić wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

## **6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA**

- [1] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992
- [2] ORZECZOWSKI Z.: Przepływy dwufazowe, jednowymiarowe, ustalone, adiabatyczne, PWN W-wa 1990
- [3] TRONIEWSKI L. i inni; Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996

## **7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH**

1. Cechy charakteryzujące złoża fluidalne.
2. Zalety i wady złoża fluidalnego.
3. Przykłady wykorzystania złoża fluidalnego w aparaturze przemysłowej.
4. Rodzaje złoża fluidalnego.
5. Opory przepływu gazu przez złoża zgranulowanego ciała stałego.