

Politechnika Śląska Gliwice
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów

Ćwiczenia laboratoryjne

Hydrodynamika warstwy fluidalnej trójczynnikowej

PROWADZĄCY
dr inż. Wojciech Olczyk

GLIWICE , 2014 rok

I. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

Fluidyzacją nazywamy stan wzajemnych relacji zachodzących pomiędzy ciałem stałym, gazem lub cieczą powodujących pozorne zawieszenie cząstki ciała stałego w ośrodku fluidyzującym (fluidyzacja stacjonarna) lub jej przemieszczenie w określonych warunkach (fluidyzacja cyrkulacyjna). Z tego względu rozważamy procesy fluidalne gazowe, ciekłe, a także trójczynnikiowe – ciało stałe, ciecz (ciecze) i gaz. Ponadto można wyróżnić warstwy fluidalne monodispersyjne (utworzone z cząstek o jednakowych kształtach i wymiarach) lub polidispersyjne o jednakowych własnościach fizycznych lub wieloskładnikowe o cząstkach mono- lub polidispersyjnych o różnych gęstościach, a także różnych wielkości ziaren.

Warstwa fluidalna stanowiąc zespół cząstek zawieszonych w strumieniu gazu lub cieczy może być traktowana jako pseudopłyn wykazujący podobne właściwości jak ciecz (lepkość, gęstość). Do podstawowych jej właściwości upodabniających ją do cieczy zaliczyć należy to, że większe elementy o mniejszej gęstości niż warstwa lub dla których siła wyporu jest większa od siły ciężkości pływają po jej powierzchni. Zjawisko zawieszenia cząstek fazy stałej w fazie gazowej lub ciekłej wymaga spełnienia warunku równowagi sił działających na cząstkę tj. siły oporu warstwy (wyrażonych spadkiem ciśnienia w warstwie o przekroju poprzecznym F_w i wysokości zależnej od stanu rozwinięcia fluidyzacji, przy czym dla warunku początku fluidyzacji wysokość ta wynosi H_{mf}) z siłami ciężkości i wyporu.

$$\Delta p_w F_w = F_w H_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) [(\rho_s - \rho_g) g] \quad (1)$$

Pojęcie fluidyzacji trójczynnikiowej .

W ostatnich latach bardzo dużym powodzeniem w oczyszczaniu gazów cieszą się aparaty z trójczynnikiową warstwą fluidalną. Znalazły one bardzo szerokie zastosowanie w energetyce i przemyśle. Fluidyzacja trójczynnikiowa polega na połączeniu trzech faz – fazy ciekłej, stałej i gazowej. Polega ona na fluidyzacji złoża stałego poprzez fazę gazową i jednoczesny przepływ przez układ w/w fazy ciekłej. Fazę gazową podaje się zawsze od dołu kolumny, natomiast fazę ciekłą można realizować na kilka sposobów:

- fluidyzacja trójczynnikiowa przeciwprądowa – ciecz jest wprowadzana od góry aparatu poprzez zraszacz i porusza się w dół w przeciwprądzie ze strumieniem gazu ,
- fluidyzacja trójczynnikiowa przeciwprądowo-współprądowa – ciecz wprowadzana jest od dołu aparatu (pod rusztem lub bezpośrednio na ruszt) i jest rozprowadzana w całej objętości złoża fluidalnego, dzięki intensywnemu ruchowi elementów złoża ,

- fluidyzacja trójczynnikowa współprądowa – ciecz jest doprowadzana od dołu kolumny i we współprądzie z fazą gazową przepływa do góry aparatu gdzie zostaje odprowadzona przelewem.

Najczęściej stosowanymi elementami wypełnień w aparatach fluidalnych trójczynnikowych są kule (pełne), sfery (puste), bądź rozety o powierzchniach gładkich lub porowatych.

Minimalna prędkość fluidyzacji trójczynnikowej

Minimalna prędkość fluidyzacji jest to stan, przy którym spadek ciśnienia odpowiada parciu hydrostatycznemu warstwy złoża, w której następuje ekspansja złoża. Wartość krytyczna prędkości gazu złoża trójfazowego różni się od wartości dla złoża niezraszanego. Na prędkość tą oprócz czynników uwzględnionych w teorii dla złoża bez zraszania, zasadniczy wpływ ma strumień cieczy zraszającej oraz powierzchnia swobodna rusztu F_{sr} . Nie opracowano dotychczas uniwersalnego modelu matematycznego, pozwalającego z dużą dokładnością wyznaczyć parametry pracy kolumny z ruchomym wypełnieniem. W literaturze [1, 4] przedstawiono równanie empiryczne Gelperin'a dla określonych warunków:

- układ woda – powietrze - wypełnienie kuliste ($\rho_{wk} = 160 \div 910 \text{ kg/m}^3$)
- w kolumnach o średnicy $60 \div 370 \text{ mm}$,
- dla rusztów o szerokości szczeliny $s = 2 \div 6 \text{ mm}$.

$$\frac{u_{mft}^2}{gd_k} = K \cdot F_{sr}^{1,45} \cdot \exp \left[-12,6 \left(\frac{\dot{V}_c}{\dot{V}_g} \right)^{0,25} \right] \quad (2)$$

gdzie : $K = f(s)$; $s = 2 \text{ mm}$, $K = 2,8 \cdot 10^3$

$s = 3 \div 6 \text{ mm}$, $K = 4,6 \cdot 10^3$,

d_k – średnica elementów wypełnienia [m] ,

$\dot{V}_c$ - objętościowy strumień cieczy zraszanej [m^3/s] ,

$\dot{V}_g$ - objętościowy strumień gazu zraszanego [m^3/s] .

Błąd powyższego równania oszacowano na $\pm 12\%$.

Charakterystyka warstwy fluidalnej

Geometrię warstwy charakteryzuje taka wartość jak porowatość, która określana jest stosunkiem objętości wolnych przestrzeni w warstwie $V_{p.w.}$ do całkowitej objętości warstwy V_c w danych warunkach (V_m - objętość wypełnienia):

$$\varepsilon = \frac{V_{p.w.}}{V_c} = \frac{V_c - V_m}{V_c} \quad (3)$$

Następnym parametrem określającym charakterystykę warstwy to jednostkowa powierzchnia wypełnienia a [m^2/m^3]. Parametr ten można przedstawić w odniesieniu do łącznej objętości cząstek (a_z) lub do objętości warstwy (a_w) . [3]

$$a_z = \frac{N \pi d^2}{N \frac{\pi d^3}{6}} = \frac{6}{d} \quad (4)$$

$$a_w = \frac{N \pi d^2}{N \frac{\pi d^3}{6(1-\varepsilon)}} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \quad (5)$$

W układach rzeczywistych kształt cząstek warstwy odbiega od kształtu kuli a średnicę ekwiwalentną wyznaczamy ze wzoru [3] :

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6V_{cz}}{\pi}} \quad (6)$$

Odstępstwo kształtu cząstek od kształtu kuli można ująć w postaci współczynników kształtu φ lub sferyczności ψ [7] :

$$\varphi = \frac{S_z}{S_k} = \frac{S_z}{\pi d_e^2} \quad (7)$$

Natomiast współczynnik sferyczności stanowi odwrotność współczynnika kształtu $\varphi = \psi^{-1}$.

Oba współczynniki dla ziarna idealnie kulistego osiągają wartość równą jedności , a w pozostałych przypadkach osiągają wartość $\varphi \geq 1$ i $\psi \leq 1$ [3] .

Aby warstwa fluidalna pracowała w sposób prawidłowy należy pamiętać, aby stosunek średnicy kolumny fluidyzacyjnej do średnicy ekwiwalentnej wypełnienia zachował nierówność [1, 3] :

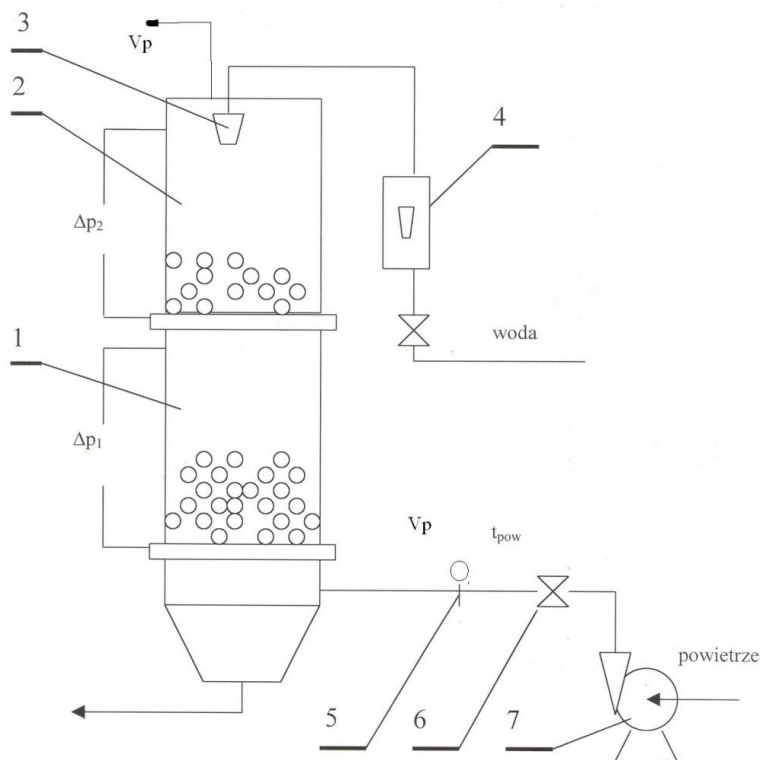
$$\frac{D}{d_e} > 10 \quad (8)$$

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie charakterystyki warstwy fluidalnej trójczynnikowej, dla trzech ustawień rusztu, oraz dla różnych strumieni cieczy zraszających.

Należy również obliczyć minimalną prędkość fluidyzacji i porównać z wartością wyznaczoną doświadczalnie na stanowisku badawczym.

Schemat stanowiska



Rys.1. Schemat stanowiska pomiarowego.

1 - komora fluidalna, 2 - komora fluidalna II, 3 - zraszacz, 4 - rotometr, 5 - przepływomierz do pomiaru strumienia powietrza, 6 - zawór regulacyjny, 7 - wentylator.

Przebieg ćwiczenia

- Do komory fluidalnej wsypać wybrany typ wypełnienia,
- Włączyć wentylator tłoczący powietrze, wyregulować przepływ wody,
- Określenie spadku ciśnienia na warstwie – zwiększając stopniowo natężenie przepływu powietrza, o ustaloną podziałkę odczytujemy na U- rurce spadek ciśnienia i rejestrujemy w tabeli pomiarowej, pomiar dla złoża suchego.
- Określenie spadku ciśnienia na warstwie – zwiększając stopniowo natężenie przepływu powietrza, o ustaloną podziałkę odczytujemy na U- rurce spadek ciśnienia i rejestrujemy w tabeli pomiarowej, pomiar dla złoża zraszanego przy ustalonym strumieniu przepływającej cieczy (trzy charakterystyki dla trzech różnych wartości strumienia cieczy).

- Pomiary należy wykonać przy wzrastającej prędkości przepływu powietrza (charakterystyka rosnąca), a następnie przy malejącej prędkości przepływu powietrza (charakterystyka malejąca).

Opracowanie wyników

Odczyty wskazań przyrządów pomiarowych należy zanotować w tabeli pomiarowej (Tabela1). Tabela powinna zawierać następujące pozycje w układzie kolumnowym:

- objętościowe natężenie przepływu powietrza V_p [m^3/h]
- temperaturę przepływającego powietrza t_p [$^{\circ}\text{C}$],
- różnica wysokości słupa cieczy odczytana na U-rurce to spadek ciśnienia na warstwie materiału Δp_s [mmH_2O].

Tabela 1. Wartości zmierzone i obliczone

Typ wypełnienia: – Wysokość złoża - $h_w =$ Średnica wew. aparatu $D_k =$ Temp. otoczenia $t_{ot} =$									
l.p.	$V_{\text{pow}(n)}$	t_{pow}	Δp_{1s}	Δp_{2s}	V_{zr1}	Δp_{w1}	Δp_{w2}	$V_{\text{pow}(rz)}$	w_p
	[m^3/h]	[$^{\circ}\text{C}$]	[mmH_2O]	[mmH_2O]	[m^3/h]	[Pa]	[Pa]	[m^3/h]	[m/s]
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									

Obliczenia:

- strumień rzeczywisty przepływającego powietrza:

$$V_{p(rz)} = V_{p(n)} \cdot \frac{273+t_p}{273} \cdot \frac{p_n}{p_{rz}} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

- prędkość przepływu powietrza przez aparat (jest to tzw. prędkość na pustym aparacie) w_p [m/s], średnica wewnętrzna kolumny wynosi $D_k = 0,290$ [m].

$$w_p = \frac{4V_{p(rz)}}{3600\pi D_k^2} \quad [\text{m/s}]$$

Obliczyć wartość spadku ciśnienia na warstwie w [Pa]

$$\Delta p_w = \frac{g \cdot \Delta p_s}{1000} \cdot (\rho_m - \rho_p) \quad [\text{Pa}]$$

gdzie: Δp_s [mmH₂O] - zmierzony spadek ciśnienia w warstwie,

ρ_m [kg/m³] - gęstość cieczy manometrycznej ($\rho_m = 1000$ [kg/m³]),

ρ_p [kg/m³] - gęstość powietrza nad cieczą manometryczną,

g [m/s²] - przyspieszenie ziemskie ($g = 9,81$ [m/s²]).

Wyniki obliczeń przedstawić w tabeli oraz przedstawić graficznie na wykresach spadku ciśnienia na warstwie w funkcji prędkości przepływającego powietrza $\Delta p_w = f(w_p)$, i w zależności od strumienia przepływającej cieczy (każda charakterystyka oddzielnie).

Wykonać jeden wykres zbiorczy dla wszystkich strumieni cieczy, $\Delta p_w = f(w_p)$, (tylko charakterystyki rosnące).

Obliczyć minimalną prędkość fluidyzacji na podstawie wzorów z literatury (przykładowo wzór Gelperin'a) i porównać z danymi doświadczalnymi z wykresów i obserwacji stanowiska laboratoryjnego.

LITERATURA

1. Laszuk A.: Hydrodynamika Fluidyzacji trójfazowej; Zeszyt nr 4 / 1995 r.
2. Troniewski L.: Tablice do obliczeń procesowych; Skrypt uczelniany nr 117, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Opole 1987 r.
3. Wandrasz J., Zieliński J.: Procesy fluidalne utylizacji odpadów; PAN, Warszawa 1984 r.
4. Razumow I.M.: Fluidyzacja i transport pneumatyczny materiałów sypkich. WNT Warszawa 1975r.
5. Koch R., Noworyta A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT, Warszawa 1995.
6. Warych J., Center J.: Inżynieria chemiczna i procesowa; Politechnika Wrocławska, Wrocław 1995 r.