

34

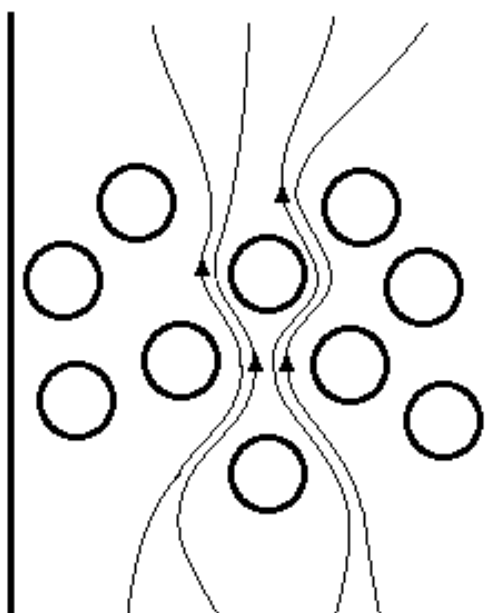
Złoże Fluidalne



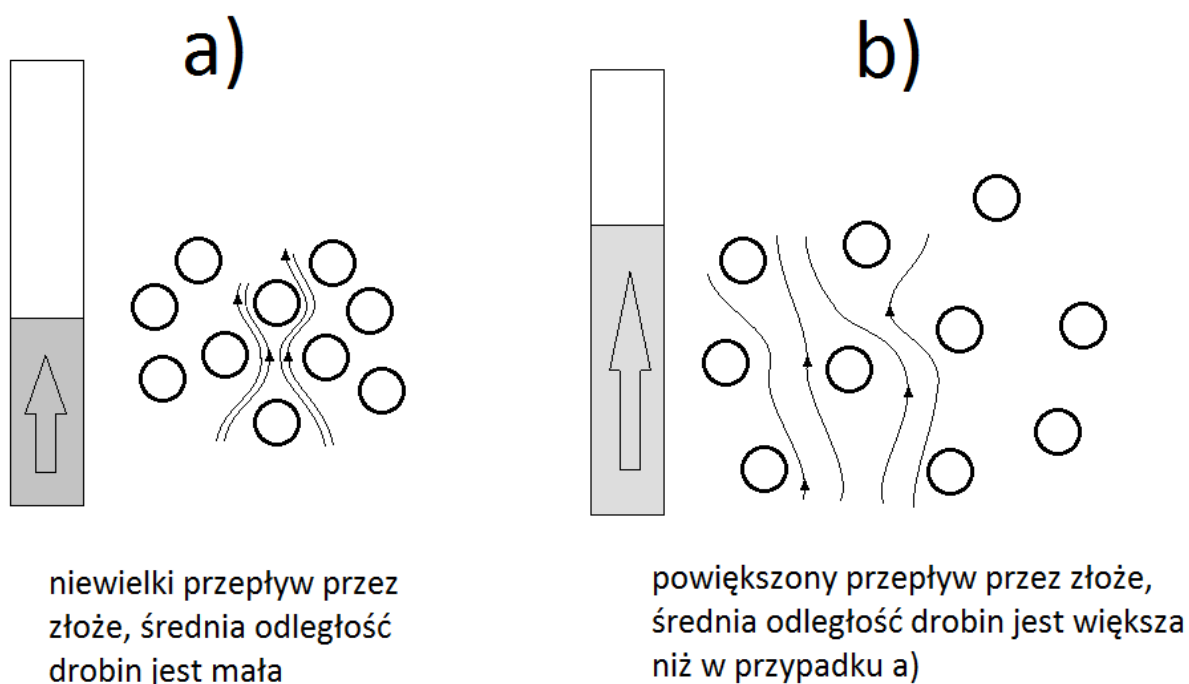
1 Wstęp teoretyczny

1.1 Proces fluidyzacji

Fluidyzacja, to proces tworzenia się dynamicznej zawiesiny (zwanej dalej złożem fluidalnym) granulowanego ciała stałego w płynie. W polu grawitacyjnym, tworzenie takiej zawiesiny następuje gdy przez pokład granulowanego materiału przetłaczany z dołu do góry jest płyn. Gdy prędkość płynu, opływającego cząstki granulatu osiągnie prędkość spadku swobodnego tych drobin (tj. prędkość przy której opór aero- lub hydrodynamiczny zrównuje się z ciężarem cząstki) wówczas drobinę tę są unoszone przez strumień. Zawieszona w przepływie drobinę, znajdują się w „chaotycznym” ruchu, i zderzają między sobą. W efekcie pod wieloma względami złożo fluidalne zachowuje się niczym wrzący płyn. Zastanawiającym może wydawać się fakt, że unoszone drobinę nie są wydmuchiwane ze złoża i dlatego całe złożo nie przemieszcza się pionowo w pojemniku. Zagadnienie to wyjaśnia rysunek 1. Powyżej powierzchni złoża, strumień nie płynie już pomiędzy drobinami, płynie więc polem przekroju większym niżeli poprzez złożo. Większy przekrój niosący strumień, oznacza niższą jego prędkość, dlatego też w objętości powyżej złoża (do pewnej wartości natężenia przepływu) prędkość płynu jest niższa niżeli prędkość spadku swobodnego drobin. Z tego samego powodu całe złożo nie może unieść się ponad dno pojemnika. Takie podniesienie oznaczało by że prędkość płynu pod złożem podobnie jak nad nim byłaby niższa niżeli prędkość spadku swobodnego drobin. W pewnym sensie można powiedzieć więc, że złożo fluidalne nieustannie spada na dno ograniczającego je pojemnika. Nawet jeżeli strumień tłoczony przez złożo jest większy, niżeli graniczny, wymagany dla fluidyzacji, górna powierzchnia złoża podnosi się, zwiększając pozorną objętość złoża fluidalnego. Powoduje to wzajemne oddalenie się drobin i ponowny spadek prędkości opływającego je płynu do około, prędkości spadku swobodnego. Pokazuje to rysunek 2.



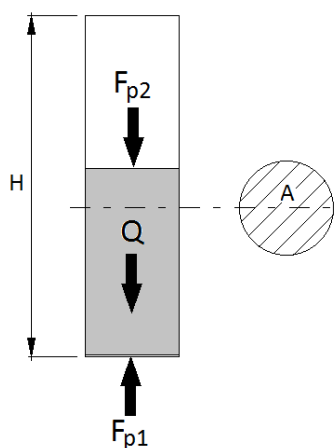
Rys. 1 Linie prądu dla złoża hipotetycznie zawieszono nad dnem pojemnika



Rys. 2 Powiększanie się pozornej objętości złoża, w odpowiedzi na zwiększenie przetłaczanego przez nie strumienia płynu

1.2 Spadek ciśnienia strumienia przepływającego przez złożę fluidalne.

Płyn opływając drobinę złoża, generuje na nich siły aero- bądź hydrodynamiczne. W konsekwencji ciśnienie płynu spada przy przepływie przez każdą kolejną „warstwę” złoża fluidalnego. Dla złoża w stanie pełnej fluidyzacji, ten spadek ciśnienia wyznaczyć można analizując układ sił oddziałujących na



Rys. 3 Układ sił pionowych oddziałujących na złożę fluidalne

objętość kontrolną złoża fluidalnego (rysunek 3, zaciemniony obszar). Jediną siłą masową oddziałującą na złożę jest ciężar samych drobin i płynu pomiędzy nimi. Poza tym oddziałują dwie siły parcia od ciśnień po obu stronach złoża. Ze względu na chaotyczny ruch drobin, uznać można że wypadkowe oddziaływanie tarcia z bocznymi ścianami złoża jest pomijalne. Równowaga statyczna dla układu na rys. 3 przedstawia się następująco:

$$F_{p1} - F_{p2} = Q \quad (1.1)$$

Podstawiając za wartości tych sił wyrażenia zależne od ciśnień i parametrów złoża:

$$(p_1 - p_2)A = gHA[(1 - \varepsilon)\rho + \varepsilon\rho_f] \quad (1.2)$$

Gdzie: p_1 , p_2 – ciśnienia odpowiednio przed i za złożem, g – przyspieszenie ziemskie, ε – porowatość złoża (stosunek objętości przestrzeni między drobinami do całej objętości złoża), ρ – gęstość materiału tworzącego drobinę, ρ_f – gęstość płynu opływającego złożę. Stąd różnica ciśnień:

$$p_1 - p_2 = gH(1 - \varepsilon)(\rho - \rho_f) + \rho_f gH \quad (1.3)$$

Prawa strona równania 1.3 składa się z dwóch członów, pierwszy z nich to spadek ciśnienia wywołany opływem złoża fluidalnego, drugi z nich to człon hydrostatyczny. Tak więc spadek ciśnienia na złożu fluidalnym w stanie pełnej fluidyzacji określa zależność:

$$\Delta p_{ff} = gH(1 - \varepsilon)(\rho - \rho_f) \quad (1.4)$$

Wzór 1.4 sugeruje zależność spadku ciśnienia od porowatości - ε , która jak sugerowano wcześniej zmienia się w zależności od natężenia przepływu przez złożę, należy jednak zauważyć że człon $H(1-\varepsilon)$ równoznaczny jest z V/A (czyli stosunkiem objętości samych drobin, do pola przekroju złoża). Idąc dalej, objętość drobin powiązać można z ich masą i gęstością, uzyskując zależność:

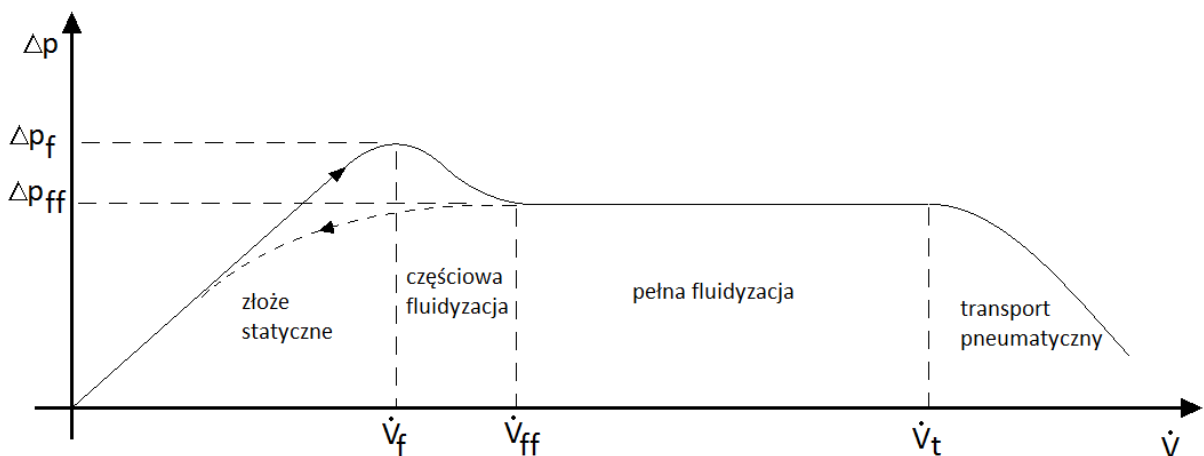
$$\Delta p_{ff} = g \frac{m}{\rho A} (\rho - \rho_f) = \frac{mg}{A} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho}\right) \quad (1.5)$$

Gdzie m – masa drobin z których zbudowane jest złożę.

Dodatkowo, masę granulatu, opisać można korzystając z jej gęstości pozornej (tj. stosunku masy granulatu do objętości jaką zajmuje wraz z przestrzeniami pomiędzy luźno usypanym granulatem), wówczas wyrażenie 1.5 przyjmie postać:

$$\Delta p_{ff} = gH_s \rho_p \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho}\right) \quad (1.6)$$

Gdzie: H_s – Wysokość złoża statycznego, ρ_p – gęstość pozorna złoża bez płynu. Zależność 1.6 pokazuje, że spadek ciśnienia wskutek przepływu przez złożę fluidalne zmienia się jedynie w zależności od gęstości materiałów tworzących złożę, i masy drobin przypadającej na jednostkę powierzchni przekroju poziomego złoża. Spodziewamy się więc, że w zakresie pełnej fluidyzacji spadek ciśnienia na złożu będzie niezależny od natężenia przepływu przez to złożę. Charakterystykę spadku ciśnienia na złożu fluidalnym ukazuje rysunek 4. Gdy złożę jest statyczne (tj. nie występuje fluidyzacja i związany z nią ruch), spadek ciśnienia na złożu rośnie wraz z wydatkiem przepływu. W pewnym momencie, zachodzi częściowa fluidyzacja złoża w której to część objętości złoża podlega fluidyzacji, w tym momencie na złożu występuje maksimum spadku ciśnienia (Δp_f). Maksimum tego nie obserwuje się zwykle przy zmniejszaniu natężenia przepływu, można więc powiedzieć, że zjawisko to charakteryzuje pewna histereza. Dalsze zwiększanie przepływu powoduje zwiększanie się stopnia fluidyzacji złoża i zmniejszanie spadku ciśnienia aż do ustalenia się na poziomie wartości odpowiadającej pełnej fluidyzacji (Δp_{ff} , równanie 1.4 i 1.5). Dalsze zwiększanie strumienia płynu powoduje jedynie zwiększanie się średniej odległości między drobinami i podnoszenie się powierzchni złoża. Pełna fluidyzacja ma miejsce aż do pewnej granicznej wartości przepływu, przy której prędkość przepływu jest wystarczająca by porywać drobinę ze złoża i rozpoczyna się transport pneumatyczny drobin.

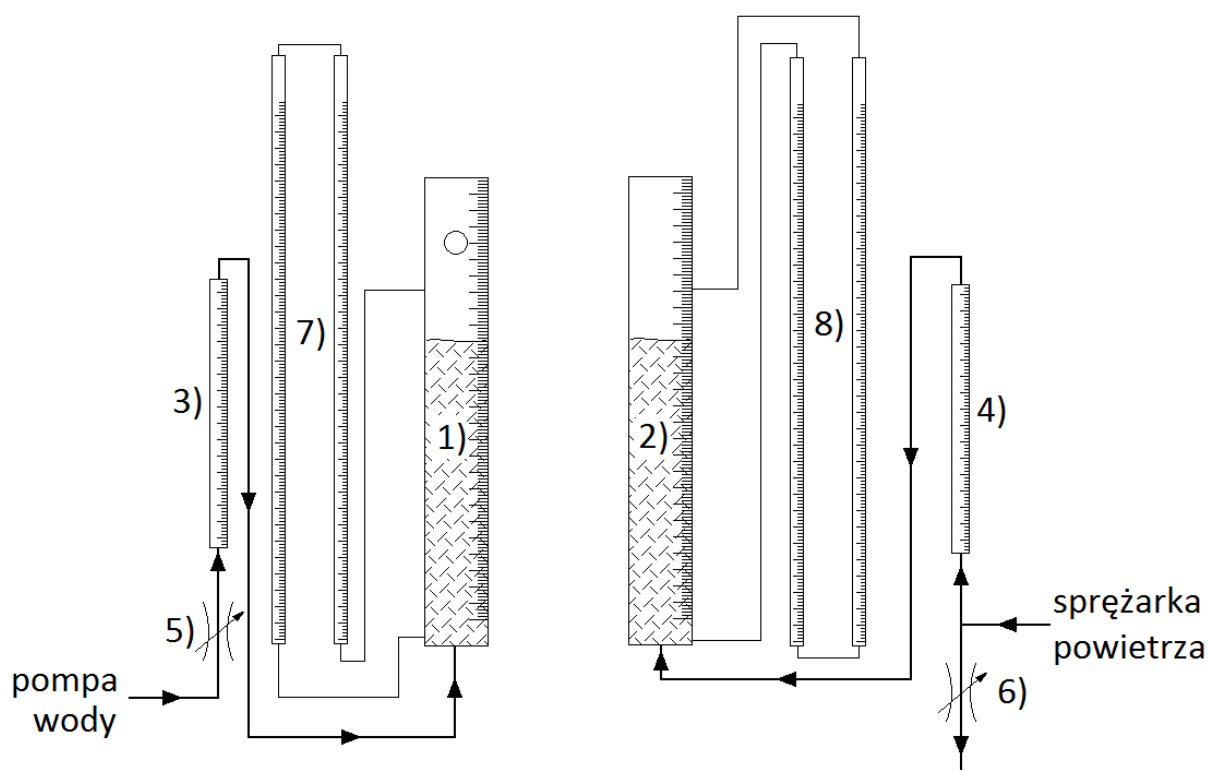


Rys. 4 Spadek ciśnienia płynu w zależności od strumienia objętości płynu przepływającego przez złożę

2 Ćwiczenie laboratoryjne

Ćwiczenie laboratoryjne opierać się będzie na dwóch grupach pomiarów, pierwsza grupa to pomiary parametrów luźno usypanego złoża. Są one wyznaczone by przewidzieć wartość spadku ciśnienia złoża w stanie pełnej fluidyzacji dla celów porównania wartości wyznaczonej analitycznie z wynikami pomiarów. Druga – główna grupa pomiarów ma na celu wyznaczenie charakterystyki złoża (jak na rysunku 4). Poza charakterystyką $\Delta p(\dot{V})$, mierzona będzie także wysokość (a więc i pośrednio objętość) złoża by zobrazować „rozprężanie się złoża fluidalnego wraz ze wzrostem przepływu.

Główna część ćwiczenia przeprowadzona będzie na stanowisku dydaktycznym (rysunki 5 i 6), wyposażonym w dwa cylindryczne fluidyzatory (patrz rysunek 5, 1 i 2). Oba fluidyzatory zasilane są poprzez rotametry 3 i 4 (tj. przepływomierze pływakowe o zmiennym przekroju) pozwalające na pomiar objętościowego natężenia przepływu przez oba złoże. Dla obu złożeń, regulowane jest natężenie przepływu przez złoże. W przypadku złoża wodnego, regulacja odbywa się za pomocą zaworu dławiącego 5, przydtławiającego wylot pompy (połączonej z silnikiem poprzez sprzęgło magnetyczne). W przypadku złoża fluidyzowanego powietrzem, regulacja strumienia odbywa się poprzez regulowanie strumienia upuszczanego do otoczenia przez zawór dławiący 6. Pomiar spadku ciśnienia na obu złożach, odbywa się przy pomocy manometrów cieczowych (w postaci tzw. U-rurek 7 i 8). Cieczą manometryczną w wypadku obu manometrów jest woda. Zestaw pomiarowy skonstruowany jest tak, że różnica poziomów cieczy w gałęziach U-rurki odpowiada spadkowi ciśnienia na złożu zdefiniowanemu jak w równaniach 1.4-1.6. tj. z kompensacją członu aero- bądź hydrostatycznego obecnego w równaniu 1.3.



Rys. 5 Schemat stanowiska pomiarowego. 1) – fluidyzator wodny, 2) – fluidyzator powietrzny, 3) – przepływomierz wody, 4) – przepływomierz powietrza, 5) – zawór dławiący do regulacji przepływu wody, 6) – zawór dławiący do regulacji przepływu powietrza upuszczanego do atmosfery, 7) – U-rurka do pomiaru spadku ciśnienia na złożu wodnym, 8) – U-rurka do pomiaru spadku ciśnienia na złożu powietrznym

2.1 Pomiar własności złoza w celu wyznaczenia gęstości charakterystycznych

Dla określenia spodziewanej wartości spadku ciśnienia na złożu, znać musimy (poza wysokością złoza mierzoną już na stanowisku pomiarów głównych) trzy różne gęstości charakteryzujące złoże. Gęstość pozorną złoza statycznego (luźno usypanego), gęstość materiału tworzącego drobinę, oraz gęstość płynu fluidyzującego. Gęstość pozorną wyznaczamy nasypując do odtarowanego naczynia wyposażonego w skalę wskazującą objętość granulatu badanego złoza. Następnie ważymy to naczynie. Gęstość pozorną obliczamy jako:

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \quad (2.1)$$

Gdzie: m – masa granulatu (pamiętamy że podczas pomiaru, przestrzeń pomiędzy drobinami wypełnia powietrze, ponieważ jednak gęstość powietrza jest ponad 1000 razy mniejsza aniżeli materiałów tworzących złoże, wpływ masy powietrza przy ważeniu można pominąć), V_p – objętość zajmowana w naczyniu przez luźno usypany granulak.

Kolejną gęstością jaką wyznaczamy, jest gęstość samego materiału sypkiego – ρ . W celu jej wyznaczenia musimy odnieść masę samego granulatu – m (zmierzoną poprzednio) do objętości zajmowanej jedynie przez drobinę (bez przestrzeni pomiędzy nimi). W tym celu granulak zalewamy wodą do tego samego poziomu do którego w naczyniu sięgał granulak luźno usypany. Robimy stopniowo, starając się by woda wypełniła wszystkie przestrzenie między drobinami. Odtarowane naczynie, z zalany granulatem ponownie ważymy uzyskując masę m_2 . Gęstość materiału drobin uzyskujemy z zależności:

$$\rho = \frac{m}{V_p - V_w} = \frac{m}{V_p - \frac{m_w}{\rho_{wody}}} \quad (2.2)$$

Gdzie: V_w - objętość dolanej wody, m_w – masa dolanej wody ($m_2 - m$), ρ_{wody} – gęstość wody (można przybliżyć 1000 kg/m³ lub posłużyć się tabelą 1)

Tabela 1

Temperatura wody [°C]	ρ_{wody} [kg/m ³]
4	999,9720
10	999,7026
15	999,1026
20	998,2071
25	997,0479

Gęstości płynów fluidyzujących ρ_f , dla wody przyjmujemy tak jak do równania 2.2, dla powietrza gęstość przybliżyć możemy korzystając z zależności dla gazu doskonałego

$$\rho_{pow.} = \frac{p}{R_{pow.} T} \quad (2.3)$$

Dla wyznaczenia gęstości powietrza, jego parametry termodynamiczne (ciśnienie – p i temperaturę – T) przyjąć można jako bliską ciśnieniu atmosferycznemu i temperaturze otoczenia. Indywidualna stała gazowa powietrza – $R_{pow.}$ to ok. 287 J/(kgK)

2.2 Pomiar charakterystyki złoża fluidalnego

Na stanowisku pomiarowym, przed uruchomieniem przepływu czynnika fluidyzującego, odczytujemy wartość wysokości złoża statycznego – H_s , przy pomocy skali znajdującej się na cylindrze fluidyzatora. Następnie uruchamiamy pompę wody i/lub sprężarkę powietrza (zależnie od tego czy chcemy wykonywać pomiaru dla obu złożeń równoległe czy wykonać je osobno). Pomiary rozpoczynamy od blisko zerowego przepływu, i zwiększamy go stopniowo regulując odpowiednio zaworem (zawory 5 i 6 na rysunku 5). Dla wygody odczytu przepływ zmieniać można co wartość działki rotametu. Dla każdej wartości przepływu czynnika fluidyzującego odczytujemy i odnotowujemy wysokość złoża, wysokości słupów cieczy manometrycznych, oraz natężenie przepływu przez złoże. Pomiary wykonujemy od zerowego do maksymalnego przepływu przez złoże, po czym zaczynamy zmniejszać wartości natężenia przepływu przez złoże i odnotowywać te same parametry. Dla dowolnego pomiaru, spadek ciśnienia na złożu, wyznaczamy w jednostkach wysokości słupa wody jako różnicę poziomów cieczy manometrycznej w gałęziach U-rurki - ΔH , którą możemy przeliczyć na inne jednostki ciśnienia korzystając ze wzoru na ciśnienie hydrostatyczne:

$$\Delta p = \Delta H * \rho_{wody} * g \quad (2.4)$$

3 Przebieg pomiarów:

3.1 Wyznaczenie gęstości charakterystycznych złoża:

- a) Pobranie próbki granulatu tworzącego złoże.
- b) Odtarowanie naczynia do ważenia próbki
- c) Odmierzenie i zanotowanie znajdującej się w naczyniu objętości złoża luźno usypanego
- d) Zważenie na wadze z uprzednio odtarowaną wagą naczynia masy próbki (zanotowanie wartości m)
- e) Stopniowe zalanie próbki wodą, ważne by poziom cieczy pokrywał się z poziomem materiału sypkiego
- f) Zważenie próbki zalanej (odnotowanie wartości masy $m_2=m+m_{wody}$)

- g) Odnotowanie temperatury i ciśnienia atmosferycznego dla późniejszych estymacji gęstości wody i powietrza.

3.2 Wyznaczanie charakterystyki złoża

- a) Upewnić się, że zarówno pompa wody jak i obie U-rurki zalane są wodą (w przypadku manometrów cieczowych przed uruchomieniem pompy powinny być one zalane mniej więcej do połowy wysokości dla maksymalizacji ich zakresu pomiarowego
- b) Uruchomienie pompy/sprężarki
- c) Stopniowe zwiększanie przepływu od minimalnego wskazania rotametu do maksimum i z powrotem, dla każdej kolejnej wartości odnotować natężenie przepływu - \dot{V} , H_1 i H_2 (poziomy wody w gałęziach U-rurki) i wysokość złoża H_z .
- d) Wyłączenie pompy/sprężarki

Pomiary z punktu 3.2 instrukcji wykonywać można równolegle dla dwóch fluidyzatorów bądź najpierw dla jednego a potem dla drugiego, wybór jeżeli nie określony przez prowadzącego leży w gestii grupy laboratoryjnej.

3.3 Wytyczne dodatkowe odnośnie ćwiczenia

Sprawozdanie oprócz wielkości do wyznaczenia w przykładowym szablonie dołączonym na końcu tej instrukcji powinno zawierać:

- a) Wykresy charakterystyk $\Delta p(\dot{V})$
- b) Porównanie wartości Δp_{ff} odczytanego z wyznaczonych charakterystyk z wartościami wyznaczonymi analitycznie w punkcie 1 sprawozdania.
- c) Obserwacje odnośnie zachowania się złoża i wnioski

Informacje dodatkowe:

- a) Należy pamiętać, że analityczny model dla wyznaczania Δp_{ff} zawarty we wzorach 1.4 do 1.6 jest uproszczony (nie uwzględnia np. opisu ruchu drobin ani nierównomierności przepływu w objętości złoża)
- b) Odczytywanie wartości H_z może stwarzać trudności gdyż w stanie fluidalnym powierzchnia złoża jest w ciągłym ruchu i odczyt tej wielkości wymusza subiektywne określanie średniego poziomu tej powierzchni

POLITECHNIKA POZNAŃSKA Instytut Energetyki Ciepłej ite.put.poznan.pl		
Temat: Badanie złoza statycznego i fluidalnego. Wyznaczanie charakterystyk $\Delta p(\dot{V})$ złoza		
Imię i Nazwisko:	Nr indeksu:	Rok akademicki/Grupa:
Data wykonania:	Ocena:	Podpis prowadzącego:

1. Wyznaczanie gęstości charakterystycznych dla złoza powietrznego :

1.1 Pomiary:

Ciśnienie atmosferyczne $p_{atm} =$
 Temperatura otoczenia $T =$
 Objętość pobranej próbki $V_p =$
 Masa pobranej próbki materiału sypkiego: $m =$
 Masa po dolaniu wody $m_2 =$

1.2 Wyznaczone wielkości:

Gęstość powietrza (zależność 2.3)

$\rho_{pow.} =$

Przyjęta gęstość wody $\rho_{wody} =$

Gęstość pozorna materiału sypkiego (zależność 2.1)

$\rho_p =$

Gęstość drobin tworzących złoże (zależność 2.2)

$\rho =$

2. Wyznaczanie gęstości charakterystycznych dla złoza wodnego (jeżeli inne aniżeli w punkcie 1):

2.1 Pomiary:

Objętość pobranej próbki $V_p =$
 Masa pobranej próbki materiału sypkiego: $m =$
 Masa po dolaniu wody $m_2 =$

2.2 Wyznaczone wielkości:

Przyjęta gęstość wody $\rho_{wody} =$

Gęstość pozorna materiału sypkiego (zależność 2.1)

$\rho_p =$

Gęstość drobin tworzących złoże (zależność 2.2)

$\rho =$

3 Wyznaczanie charakterystyki złoża fluidalnego powietrznego:

Wysokość złoża statycznego $H_s =$

Spodziewany spadek ciśnienia w stanie pełnej fluidyzacji (zależność 1.6):

$\Delta p_{ff} =$

Pomiary dla przepływu przez złożo:

Lp.	\dot{V}	H_1	H_2	H_z	ΔH	Δp	$\frac{H_z}{H_s}$
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							
9.							
10.							
11.							
12.							
13.							
14.							
15.							
16.							
17.							
18.							
19.							
20.							

4 Wyznaczanie charakterystyki złoża fluidalnego wodnego.

Wysokość złoża statycznego: $H_s =$

Spodziewany spadek ciśnienia w stanie pełnej fluidyzacji (zależność 1.6):

$\Delta p_{ff} =$

Pomiary dla przepływu przez złożo:

Lp.	\dot{V}	H_1	H_2	H_z	ΔH	Δp	$\frac{H_z}{H_s}$
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							

Lp.	\dot{V}	H_1	H_2	H_z	ΔH	Δp	$\frac{H_z}{H_s}$
8.							
9.							
10.							
11.							
12.							
13.							
14.							
15.							
16.							
17.							
18.							
19.							
20.							

5 Wnioski, obserwacje, wykresy: