CALCULOS TIPICOS

LECHO DE CATALIZADOR CVP-R8 (Fluido manométrico CCl_4)

1. ***Diferencia promedio de altura manométrica:***

$$\Delta h = \frac{\left(\Delta hMi + \Delta hmi\right)}{2} \times 10^{-2} \qquad [1]$$

Donde:

Δh : Diferencia de altura manométrica promedio (m)

$\Delta h\ Mi$: Diferencia de altura máxima manométrica correspondiente al lecho i (cm)

$\Delta h\ mi$: Diferencia de altura mínima manométrica correspondiente al lecho i (cm)

Nota: La letra "i" toma el lugar de la letra A para el lecho de Arena y la letra C para el de Catalizador.

- Para una Altura del Flotador = (0,2 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$\Delta hMi = 1$ cm

$$\Delta h = \frac{\left(1+1\right)}{2} \times 10^{-2} = 0,01\text{m}$$

$\Delta hmi = 1$ cm

Se sigue los mismos pasos para calcular la diferencia de altura manométrica promedio para alturas mayores del flotador. A continuación se muestra un cálculo tipo para una altura mayor del flotador:

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$\Delta hMi = 3,9$ cm

$$\Delta h = \frac{\left(3,9+3,9\right)}{2} \times 10^{-2} = 0,039\ \text{m}$$

$\Delta hmi = 3,9$ cm

2. ***Caída de Presión en la columna:***

$$\Delta P = \rho_{LM} \times g \times \Delta h \qquad [2]$$

Donde:

ΔP : Caída de presión en la columna (Pa)
ρ_{LM} : Densidad del líquido manométrico (Kg/m^3) $\rho_{CCl_4} = 9{,}69$ Kg/m^3
g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

- Para una Altura del Flotador = (0,2 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta h = 0{,}01\,\text{m} \qquad \Delta P = 9{,}69_{Kg/m^3} \times 9{,}81_{m/s^2} \times 0{,}01_m = 0{,}951\ \text{Pa}$$

Se sigue los mismos pasos para calcular la caída de presión para alturas mayores del flotador. A continuación se muestra un cálculo tipo para una altura mayor del flotador:

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta h = 0{,}039\,\text{m} \qquad \Delta P = 9{,}69_{Kg/m^3} \times 9{,}81_{m/s^2} \times 0{,}039_m = 3{,}707\ \text{Pa}$$

3. ***Presión de operación promedio de la columna:***

$$\overline{P} = P \times 133{,}32 + \frac{\Delta P}{2} \qquad [3]$$

Donde:

$\overline{P}$: Presión de operación promedio de la columna (Pa)
P : Presión ambiental (mmHg) P = 690,8 mmHg
133.32: Factor de conversión de P de unidades de mmHg a Pa

- Para una Altura del Flotador = (0,2 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta P = 0{,}951\ \text{Pa} \qquad \overline{P} = 690_{mmHg} \times 133{,}32 + \frac{0{,}951_{Pa}}{2} = 92097{,}93\,\text{Pa}$$

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta P = 3{,}070\ \text{Pa} \qquad \overline{P} = 690_{mmHg} \times 133{,}32 + \frac{3{,}07_{Pa}}{2} = 92098{,}07\,\text{Pa}$$

4. ***Densidad Promedio del Aire:***

$$\rho_{\mathrm{a}} = \frac{\overline{P} \times \overline{M}}{R \times (T + 273)} \qquad [4]$$

Donde:

ρ_{a} : Densidad promedio del aire (Kg/m^3)
$\overline{M}$: Peso molecular promedio del aire (Kg/Kgmol)
R : Constante universal de los gases (J/Kmol.K)
T : Temperatura ambiental del laboratorio (°C)

- Para una Altura del Flotador = (0,2 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\overline{P} = 92097{,}93\,\mathrm{Pa} \qquad \rho_{\mathrm{a}} = \frac{92097{,}93 Pa \times 28{,}84 Kg/Kmol}{8314 J/kmolK \times (26 + 273) K} = 1{,}068 Kg/m^3$$

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\overline{P} = 92098{,}07\ \mathrm{Pa} \qquad \rho_{\mathrm{a}} = \frac{92098{,}07 Pa \times 28{,}84 Kg/Kmol}{8314 J/kmolK \times (26 + 273) K} = 1{,}068 Kg/m^3$$

5. ***Caudal de operación:***

$$Q_{op} = \frac{P_c \times Q_c \times T}{\overline{P} \times T_c} \qquad [5]$$

Donde:

Q_{OP} : Caudal de operación (m^3/s)
P_C : Presión de calibración (Pa) (ver datos en la curva de calibración del rotámetro)
Q_C : Caudal de calibración (m^3/s)
T_C : Temperatura de calibración (K) (ver datos en la curva de calibración del rotámetro)

Empleando el ajuste que se obtiene por Excel de la curva de calibración se obtiene el caudal de calibración para una cierta altura de rotámetro:

$$Q_c = \frac{0{,}0975 \times h_{\mathrm{rot}}^{\ 2} + 9{,}7614 \times h_{\mathrm{rot}} + 35{,}049}{60000} [=] \frac{m^3}{s}$$

$$h [=] \mathrm{cm}$$

- Para una Altura del Flotador = (0,2 ± 0,1) cm se tiene que:

Q_c =6,168 x 10^{-4}m³/s $\quad Q_{op} = \dfrac{101325Pa \times 299K \times 6{,}168.10^{-4}\text{m}^3\text{/s}}{92097{,}93Pa \times 288K} = 7{,}04 \times 10^{-4}\,\text{m}^3\text{/s}$

- Para una Altura del Flotador = (27,0 ± 0,1) cm se tiene que:

Q_c =6,16 x 10^{-3}m³/s $\quad Q_{op} = \dfrac{101325Pa \times 6{,}16 \times 10^{-3}\,m^3/s \times 299K}{92098{,}07Pa \times 288K} = 7{,}03 \times 10^{-3}\,\text{m}^3\text{/s}$

6. ***Velocidad Superficial:***

$$U_s = \frac{4 \times Q_{op}}{\pi \times D_c^2} \qquad [6]$$

Donde:

U_S : Velocidad superficial del fluido (m/s)
D_C : Diámetro interno de la columna (m) = 0,071 m

- Para una Altura del Flotador = (0,2 ± 0,1) cm se tiene que:

$Q_{op} = 7{,}04 \times 10^{-4}$ m³/s $\qquad U_s = \dfrac{4 \times 7{,}04 \times 10^{-4}\,m^3/s}{\pi \times (0{,}071m)^2} = 0{,}178\,\text{m/s}$

- Para una Altura del Flotador = (0,2 ± 0,1) cm se tiene que:

$Q_{op} = 7{,}03 \times 10^{-3}$ m³/s $\qquad U_s = \dfrac{4 \times 7{,}03 \times 10^{-3}\,m^3/s}{\pi \times (0{,}071m)^2} = 1{,}779\,\text{m/s}$

7. ***Número de Reynolds:***

$$\text{Re} = \frac{\rho_a \times U_s \times D_p}{\mu_a} \qquad [7]$$

Donde:

Re : Número de Reynolds (adimensional)
D_P : Diámetro de la partícula (m) = 0,0016 m
μ_a : Viscosidad del aire a las condiciones de operación (Pa.s) = 1,83.10^{-5} Pa.s

- Para una Altura del Flotador = (0,2 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\mathrm{Re} = \frac{1,086 Kg/m^3 \times 0,178 m/s \times 0,0016 m}{1,83.10^{-5}} = 16,90$$

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\mathrm{Re} = \frac{1,086 Kg/m^3 \times 1,779 m/s \times 0,0016 m}{1,83.10^{-5}} = 166,15$$

8. ***Altura del lecho compacto:***

$$H_{LC} = H_{LFi} \times (1 - \varepsilon_o) \qquad [8]$$

Donde:

H_{LC} : Altura del lecho compacto (m)
H_{LF} i: Altura del lecho fijo (m)
ε_o : Fracción vacía para el lecho fijo (adimensional)

$$H_{LC} = 10,5 cm \times (1 - 0,373) \times 10^{-2} m/cm = 0,066 m$$

9. ***Altura Promedio del Lecho:***

$$\overline{H} = \frac{(H_{Mi} + H_{mi})}{2} \times 10^{-2} \qquad [9]$$

Donde:

H : Altura promedio del lecho (m)
H_{Mi} : Altura máxima del lecho i alcanzada (cm)
H_{mi} : Altura mínima del lecho i alcanzada (cm)

Como entre el rango de mediciones [0 – 22] el lecho se encuentra en condiciones fija por lo tanto se obtiene:

$H_{Mi} = H_{mi}$ = 10,5 cm

$$\overline{H} = \frac{(10,5 cm + 10,5 cm)}{2} \times 10^{-2} m/cm = 0,105 m$$

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

H_{Mi} = 25,6 cm

$$\overline{H} = \frac{(25,6 cm + 22,3 cm)}{2} \times 10^{-2} m/cm = 0,240 m$$

H_{mi} = 22,3 cm

10. Fracción Vacía del Lecho:

$$\varepsilon = \frac{\overline{H} - H_{LC}}{\overline{H}} \qquad [10]$$

Donde:

ε : Fracción vacía del lecho (adimensional.)

$$\varepsilon = \frac{\overline{H} - H_{LC}}{\overline{H}}$$

- Para una Altura del Flotador = (0,2 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$\overline{H}$ =0,105 m $$\varepsilon = \frac{0{,}105m - 0{,}066m}{0{,}105m} = 0{,}373$$

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$\overline{H}$ =0,240 m $$\varepsilon = \frac{0{,}240m - 0{,}066m}{0{,}240m} = 0{,}725$$

11. Parámetro de Correlación de Wilhelm y Kwauk:

$$K\Delta P = \frac{D_p{}^3 \times \rho_a \times \Delta P}{2 \times \mu_a{}^2 \times H_{LC}} \qquad [11]$$

Donde:

$K\,P\,\Delta$: Parámetro de correlación de Wilhelm y Kwauk (adimensional)

- Para una Altura del Flotador = (0,2 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$K\Delta P = \frac{(0{,}0016m)^3 \times 1{,}068Kg/m^3 \times 0{,}951Pa}{2 \times (1{,}83.10^{-5}Pa.s)^2 \times 0{,}066m} = 94{,}347$$

- Para una Altura del Flotador = (27,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$K\Delta P = \frac{(0{,}0016m)^3 \times 1{,}068Kg/m^3 \times 3{,}070Pa}{2 \times (1{,}83.10^{-5}Pa.s)^2 \times 0{,}066m} = 367{,}958$$

12. Velocidad Mínima de Fluidización Experimental:

$$U^{e}{}_{MF} = \frac{4 \times Q_{MF}}{\pi \times D_c{}^2} \qquad [12]$$

Donde:

$U^{e}{}_{MF}$: Velocidad mínima de fluidización experimental (m/s)
Q_{MF} : Caudal de operación de mínima fluidización (m^3/s)

El Caudal mínimo de fluidización se obtiene a partir de la curva de calibración del rotámetro empleando la altura del rotámetro donde empieza la mínima fluidización:

$h_{ROT.MF} = 5,4$ cm

$$Q_{MF} = \frac{0,0975 \times (5,4cm)^2 + 9,7614 \times 5,4cm + 35,049}{60000} \times \frac{101325 Pa \times 299K}{92101,3 Pa \times 288K} = 0,0017 \frac{m^3}{s}$$

$$U^{e}{}_{MF} = \frac{4 \times 0,0017 m^3/s}{\pi \times (0,07m)^2} = 0,448 m/s$$

13. Velocidad Mínima de Fluidización Teórica (Ecuación de Ergun):

$$\frac{\Delta P_{MF}}{H_{MF}} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \times \frac{\mu_a \times U^{T}{}_{MF}}{D_p{}^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon) \times \rho_a \times U^{T}{}_{MF}{}^2}{\varepsilon^3 \times D_p}$$

Donde:
ΔP_{MF}: Caída de presión de mínima fluidización experimental (Pa)
H_{MF} : Altura de mínima fluidización experimental (m)
$U_{t\,MF}$: Velocidad mínima de fluidización teórica (m/s)

A partir de ésta se obtiene que para un ε = 0,4

$$ga = \frac{\rho_a \times (\rho_p - \rho_a) \times g \times D_P{}^3}{\mu a^2}$$

$$\mathrm{Re}_{MF} = 25,7 \times \left[\sqrt{1 + 5,53.10^{-5} \times ga} - 1 \right]$$

$$U^{T}{}_{MF} = \frac{25,7 \times \left[\sqrt{1 + 5,53.10^{-5} \times \frac{\rho_a \times (\rho_p - \rho_a) \times g \times D_P{}^3}{\mu a^2}} - 1 \right] \times \mu_a}{\rho_a \times D_P} \qquad [13]$$

$$U^{T}{}_{MF} = \frac{25,7 \times \left[\sqrt{1 + 5,53.10^{-5} \times \frac{1,086 Kg/m^3 \times (506,19 Kg/m^3 - 1,086 Kg/m^3) \times 9,81 m/s^2 \times (0,0016 m)^3}{(1,83.10^{-5} Pa.s)^2}} - 1 \right] \times 1,83.10^{-5} Pa.s}{1,086 Kg/m^3 \times 0,0016 m}$$

$$U^{T}{}_{MF} = 0,313 \text{m/s}$$

14. <u>Desviación Porcentual del Velocidad Mínima de Fluidización:</u>

$$\%Desv = \frac{|V_T - V_{EXP}|}{V_T} \times 100 \qquad [14]$$

Donde:

$Desv$ % : Desviación porcentual (%)
V_T : Valor teórico
V_{Exp} : Valor experimental

$$\%Desv = \frac{|0,313 m/s - 0,448 m/s|}{0,313 m/s} \times 100 = 43,13\%$$

15. <u>Número de Froude:</u>

$$N_F = \frac{U_{MF}}{D_P \times g} \qquad [15]$$

N_F: Numero de Froude (adimensional)

Experimental:

$$N_F = \frac{0,448 m/s}{0,0016 m \times 9,81 m/s^2} = 12,81$$

Teórico:

$$N_F = \frac{0,313 m/s}{0,0016 m \times 9,81 m/s^2} = 19,94$$

16. <u>Desviación Porcentual del Número Froude:</u>

Empleando la ecuación [14] se tiene:

$$\%Desv = \frac{|19,94 m/s - 12,81 m/s|}{19,94 m/s} = 35,76\%$$

LECHO DE ARENA DE MAR (Fluido manométrico Hg)

1. *Diferencia promedio de altura manométrica:*

Empleando la ecuación [1] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta hMi = 0,9 \text{ cm} \qquad \Delta h = \frac{(0,9+0,9)}{2}\times 10^{-2} = 0,009\,\text{m}$$

$$\Delta hmi = 0,9 \text{ cm}$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta hMi = 3 \text{ cm} \qquad \Delta h = \frac{(3,0+2,3)}{2}\times 10^{-2} = 0,027\,\text{m}$$

$$\Delta hmi = 2,3 \text{ cm}$$

2. *Caída de Presión en la columna:*

Empleando la ecuación [2] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta h = 0,009\,\text{m} \qquad \Delta P = 13531,16_{Kg/m^3}\times 9,81_{m/s^2}\times 0,009_{m} = 1194,67 \text{ Pa}$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\Delta h = 0,027\,\text{m} \qquad \Delta P = 13531,16_{Kg/m^3}\times 9,81_{m/s^2}\times 0,027_{m} = 3517,63 \text{ Pa}$$

3. *Presión de operación promedio de la columna:*

Empleando la ecuación [3] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\overline{P} = 690_{mmHg}\times 133,32 + \frac{1194,67\,Pa}{2} = 92694,79\text{ Pa}$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\overline{P} = 690_{mmHg}\times 133,32 + \frac{3517,63\,Pa}{2} = 93856,27 \text{ Pa}$$

4. Densidad Promedio del Aire:

Empleando la ecuación [4] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\overline{P} = 92694,79 \text{ Pa} \qquad \rho_a = \frac{92694,79 Pa \times 28,84 Kg/Kmol}{8314 J/kmolK \times (26+273) K} = 1,075 Kg/m^3$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\overline{P} = 93856,27 \text{ Pa} \qquad \rho_a = \frac{93856,27 Pa \times 28,84 Kg/Kmol}{8314 J/kmolK \times (26+273) K} = 1,089 Kg/m^3$$

5. Caudal de Operación:

Empleando la ecuación [5] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$Q_c = 7,4 \text{ x } 10^{-4} \text{m}^3\text{/s} \qquad Q_{op} = \frac{101325 Pa \times 7,4 \times 10^{-4} m^3/s \times 299 K}{92694,79 Pa \times 288 K} = 0,001 \text{m}^3\text{/s}$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$Q_c = 5,7 \text{ x } 10^{-3} \text{m}^3\text{/s} \qquad Q_{op} = \frac{101325 Pa \times 5,7 \times 10^{-3} m^3/s \times 299 K}{93856,27 Pa \times 288 K} = 0,006 \text{ m}^3\text{/s}$$

6. Velocidad Superficial:

Empleando la ecuación [6] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$Q_{op} = 0,001 \text{ m}^3\text{/s} \qquad U_s = \frac{4 \times 0,001 m^3/s}{\pi \times (0,071 m)^2} = 0,215 \text{ m/s}$$

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$Q_{op} = 0,006 \text{ m}^3\text{/s} \qquad U_s = \frac{4 \times 0,006 m^3/s}{\pi \times (0,071 m)^2} = 1,640 \text{ m/s}$$

7. Número de Reynolds:

Empleando la ecuación [7] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\mathrm{Re} = \frac{1,075 Kg/m^3 \times 0,215 m/s \times 0,00071 m}{1,83.10^{-5}} = 8,956$$

- Para una Altura del Flotador = (1 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$\mathrm{Re} = \frac{1,089 Kg/m^3 \times 1,640 m/s \times 0,00071 m}{1,83.10^{-5}} = 69,27$$

8. Altura del lecho compacto:

Empleando la ecuación [8] se tiene que:

$$H_{LC} = 12,4 cm \times (1 - 0,408) \times 10^{-2} m/cm = 0,073 m$$

9. Altura Promedio del Lecho:

Empleando la ecuación [9] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$H_{Mi} = H_{mi}$ =12,4 cm

$$\overline{H} = \frac{(12,4 cm + 12,4 cm)}{2} \times 10^{-2} m/cm = 0,124 m$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

H_{Mi} = 37,0 cm

H_{mi} = 30,0 cm

$$\overline{H} = \frac{(30,0 cm + 37,0 cm)}{2} \times 10^{-2} m/cm = 0,335 m$$

10. Fracción Vacía del Lecho:

Empleando la ecuación [10] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$\overline{H}$ =0,124 m $$\varepsilon = \frac{0,124m - 0,073m}{0,124m} = 0,408$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$\overline{H}$ =0,335 m $$\varepsilon = \frac{0,335m - 0,073m}{0,335m} = 0,781$$

11. Parámetro de Correlación de Wilhelm y Kwauk:

$$K\Delta P = \frac{D_p{}^3 \times \rho_a \times \Delta P}{2 \times \mu_a{}^2 \times H_{LC}}$$

Empleando la ecuación [11] se tiene que:

- Para una Altura del Flotador = (1,0 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$K\Delta P = \frac{(0,00071m)^3 \times 1,075Kg/m^3 \times 1194,67Pa}{2 \times (1,83.10^{-5}Pa.s)^2 \times 0,073m} = 9352,23$$

- Para una Altura del Flotador = (25,5 $\pm$ 0,1) cm se tiene que:

$$K\Delta P = \frac{(0,00071m)^3 \times 1,075Kg/m^3 \times 3517,63Pa}{2 \times (1,83.10^{-5}Pa.s)^2 \times 0,073m} = 27882,18$$

12. Velocidad Mínima de Fluidización Experimental:

Empleando la ecuación [12] se tiene que:

$h_{ROT.MF} = 4,5$ cm

$$Q_{MF} = \frac{0,0975 \times (4,5cm)^2 + 9,7614 \times 4,5cm + 35,049}{60000} \times \frac{101325Pa \times 299K}{93026,64Pa \times 288K} = 0,0015\frac{m^3}{s}$$

$$U^e{}_{MF} = \frac{4 \times 0,0015m^3/s}{\pi \times (0,07m)^2} = 0,391m/s$$

13. <u>Velocidad Mínima de Fluidización Teórica (Ecuación de Ergun):</u>

Empleando la ecuación [13] se tiene que:

$$U^{T}_{MF} = \frac{25,7\times\left[\sqrt{1+5,53.10^{-5}\times\frac{1,075Kg/m^{3}\times(2643,08Kg/m^{3}-1,075Kg/m^{3})\times 9,81m/s^{2}\times(0,00071m)^{3}}{(1,83.10^{-5}Pa.s)^{2}}}-1\right]\times 1,83.10^{-5}Pa.s}{1,075Kg/m^{3}\times 0,00071m}$$

$$U^{T}_{MF} = 0,386 \text{ m/s}$$

14. <u>Desviación Porcentual del Velocidad Mínima de Fluidización:</u>

Empleando la ecuación [14] se tiene que:

$$\%Desv = \frac{\left|0,386m/s - 0,391m/s\right|}{0,386m/s}\times 100 = 1,29\%$$

15. <u>Número de Froude:</u>

Empleando la ecuación [15] se tiene que:

Experimental:

$$N_F = \frac{0,393m/s}{0,00071m\times 9,81m/s^{2}} = 56,42$$

Teórico:

$$N_F = \frac{0,386m/s}{0,00071m\times 9,81m/s^{2}} = 55,42$$

16. <u>Desviación Porcentual del Número de Froude:</u>

Empleando la ecuación [14] se tiene que:

$$\%Desv = \frac{\left|55,42m/s - 56,42m/s\right|}{55,42m/s}\times 100 = 1,80\%$$