

Tema 5

TRANSPORTE EN INTERFASE

5.1 Factor de fricción

5.2 Coeficientes de transferencia de materia

Este material se publica bajo licencia: Creative Commons BY-NC-SA 4.0



Factor de fricción (I)

Una planta industrial requiere generar vapor de agua a una determinada presión, enviando un flujo de agua de $226,8 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ hacia la caldera. El agua de partida está acumulada en un depósito. Un diagrama de flujo del proceso se muestra en la figura 1. Por parte de la dirección técnica se ha planteado la compra de 3 bombas diferentes: 200 HP, 250 HP y 300 HP. Asumiendo que:

- 1) La eficiencia mecánica de cualquiera de ellas es de 0,75.
- 2) La longitud equivalente de los accesorios en el sistema de tuberías es aproximadamente de 96 m.
- 3) El diámetro de la tubería es de 15,4 cm.
- 4) La rugosidad relativa de la tubería es de 0,001.

¿Qué bomba habría que ubicar para poder alcanzar la presión solicitada y por qué?

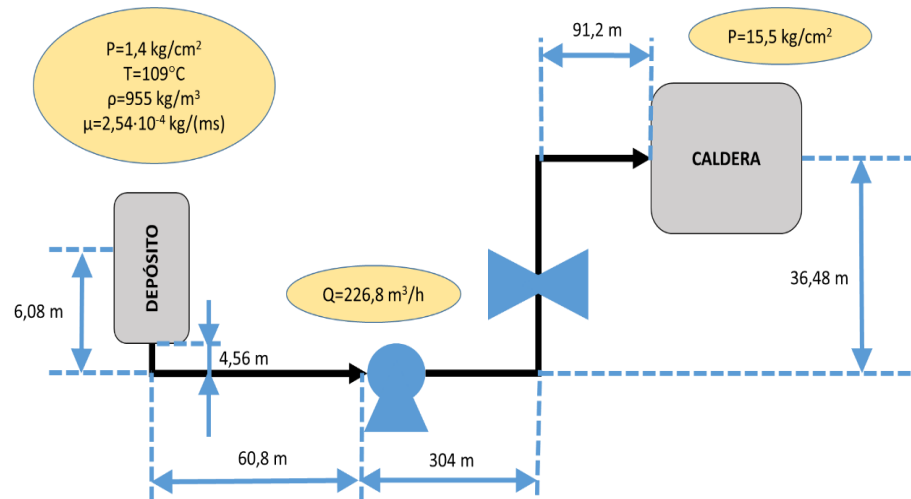
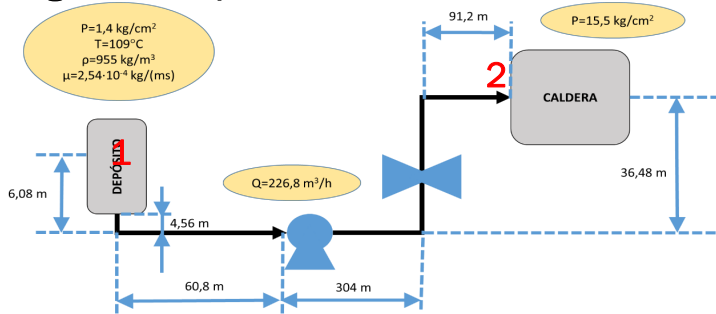


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso

Factor de fricción (I)

Solución:

Diagrama de proceso:



$$z_2 = 36,48 \text{ m} \quad z_1 = 6,08 \text{ m}$$

$$u_2 = \frac{Q}{A} = 226,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,154 \text{ m})^2} = 3,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad u_1 = 0$$

$$P_2 = 15,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad P_1 = 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{\sum F}{L} = 2f_F \frac{u^2}{D}$$

Balance de energía mecánica en el sistema:

$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_S - \sum F$$

$$g \cdot \Delta z = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (36,48 \text{ m} - 6,08 \text{ m}) = 298,224 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

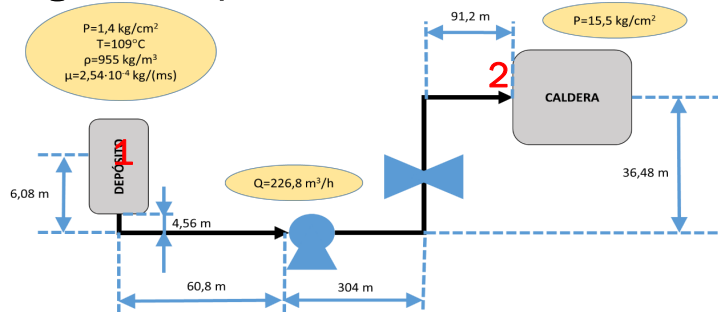
$$\frac{\Delta u^2}{2} = \frac{\left(3,04 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left(0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 5,719 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\left(15,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \cdot \frac{10000 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2}}{955 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1448,38 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Factor de fricción (I)

Solución:

Diagrama de proceso:



$$z_2 = 36,48 \text{ m} \quad z_1 = 6,08 \text{ m}$$

$$u_2 = \frac{Q}{A} = 226,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,154 \text{ m})^2} = 3,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad u_1 = 0$$

$$P_2 = 15,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad P_1 = 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{\Sigma F}{L} = 2f_F \frac{u^2}{D}$$

Para estimar las pérdidas de energía por fricción, se calcula el número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{u \cdot l \cdot \rho}{\mu}$$

Donde "u" es la velocidad del fluido, "l" es la longitud característica, "ρ" es la densidad del fluido y "μ" es la viscosidad dinámica del fluido.

$$u = 3,38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho = 955 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$l = 0,154 \text{ m}$$

$$\mu = 2,54 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$Re = \frac{u \cdot l \cdot \rho}{\mu} = \frac{3,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,154 \text{ m} \cdot 955 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2,54 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 1,958 \cdot 10^6$$

También sabemos que la rugosidad relativa:

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,001$$

Factor de fricción (I)

Solución:

Una vez se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se puede obtener el factor de fricción de manera gráfica o numérica:

De manera gráfica:

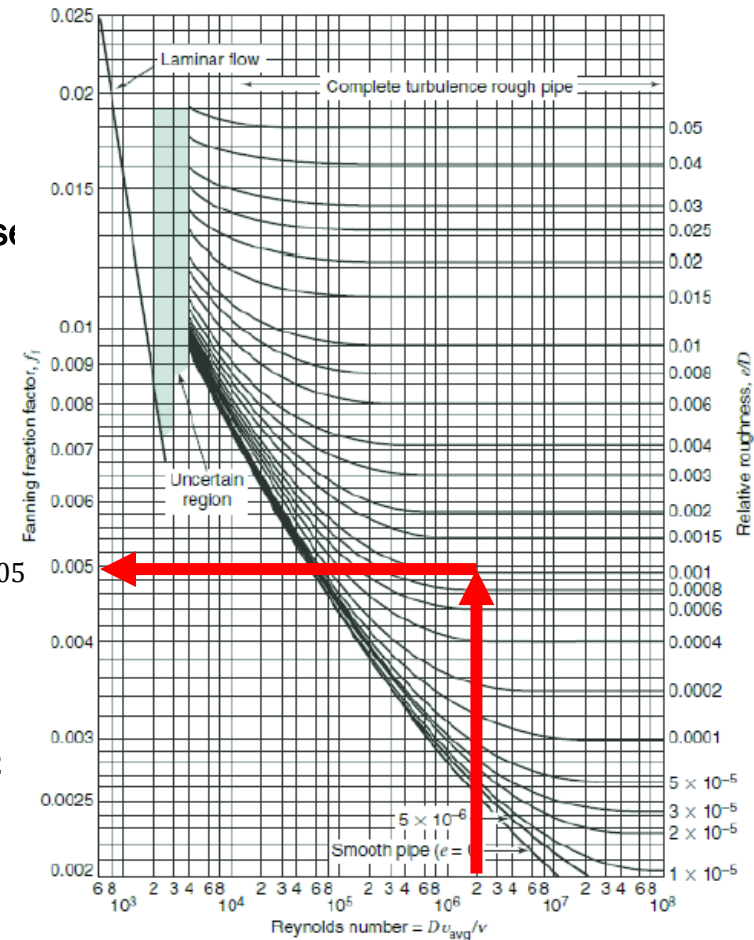
$$Re = 1,958 \cdot 10^6$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,001$$

$$f_{\text{FANNING}} \sim 0,005$$

$$f_{\text{DARCY}} = 4 \cdot f_{\text{FANNING}}$$

$$f_{\text{DARCY}} \sim 4 \cdot 0,005 \sim 0,02$$



Factor de fricción (I)

Solución:

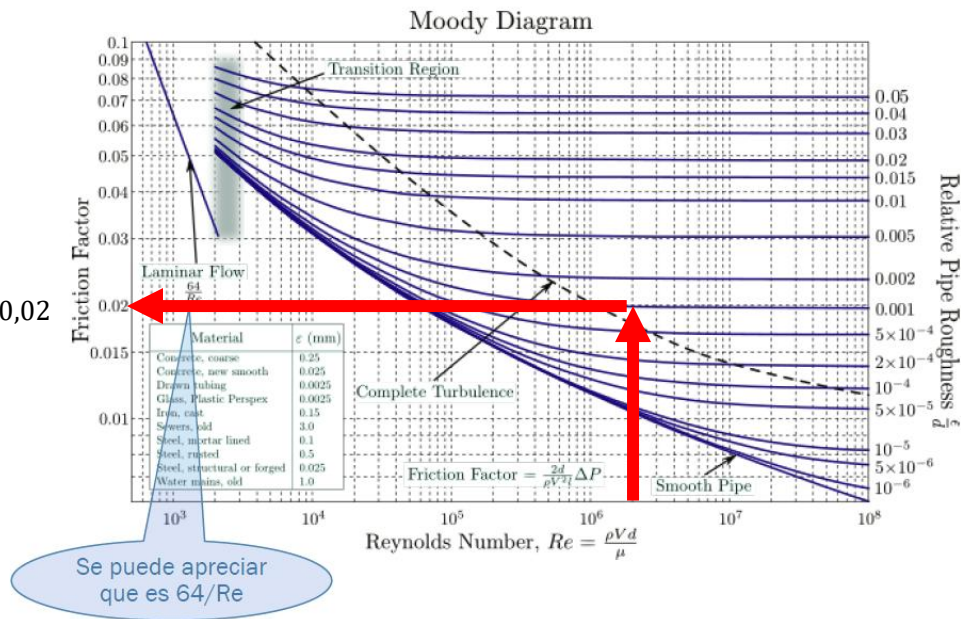
Una vez se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se puede obtener el factor de fricción de manera gráfica o numérica:

De manera gráfica:

$$Re = 1,958 \cdot 10^6$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,001$$

$$f_{\text{DARCY}} \sim 0,02$$



Factor de fricción (I)

Solución:

Una vez se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se puede obtener el factor de fricción de manera gráfica o numérica:

De manera numérica:

Ecuación de Colebrook (-White) (1939)

$$\frac{1}{\sqrt{f_{Darcy}}} = -2 \log \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{f_{Darcy}}} + \frac{1}{3,7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) \right] \quad \begin{array}{l} Re = 1,958 \cdot 10^6 > 4000 \\ \frac{\epsilon}{D} = 0,001 \end{array}$$

$$f_{Darcy} = 0,0197 \longrightarrow f_{FANNING} = 4,925 \cdot 10^{-3}$$

Ecuación de Pavlov

$$\frac{1}{\sqrt{f_{Darcy}}} = -2 \log \left[\frac{1}{3,7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad \begin{array}{l} Re = 1,958 \cdot 10^6 > 4000 \\ \frac{\epsilon}{D} = 0,001 \end{array}$$

$$f_{Darcy} = 0,0197 \longrightarrow f_{FANNING} = 4,925 \cdot 10^{-3}$$

Factor de fricción (I)

Solución:

Una vez se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se puede obtener el factor de fricción de manera gráfica o numérica:

De manera numérica:

Ecuación de Haaland

$$\frac{1}{\sqrt{f_{Darcy}}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{1}{3,7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad \begin{array}{l} Re = 1,958 \cdot 10^6 > 4000 \\ \frac{\epsilon}{D} = 0,001 \end{array}$$

$$f_{DARCY} = 0,0198 \longrightarrow f_{FANNING} = 4,95 \cdot 10^{-3}$$

Ecuación de Swamee-Jain

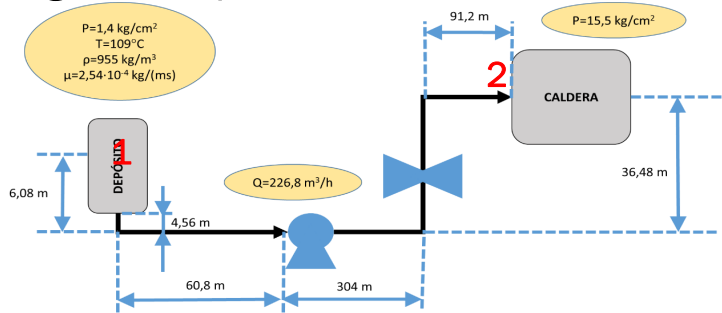
$$f_{Darcy} = \frac{0,25}{\log \left[\frac{1}{3,7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]^2} \quad \begin{array}{l} Re = 1,958 \cdot 10^6 > 4000 \\ \frac{\epsilon}{D} = 0,001 \end{array}$$

$$f_{DARCY} = 0,0198 \longrightarrow f_{FANNING} = 4,95 \cdot 10^{-3}$$

Factor de fricción (I)

Solución:

Diagrama de proceso:



$$z_2 = 36,48 \text{ m} \quad z_1 = 6,08 \text{ m}$$

$$u_2 = \frac{Q}{A} = 226,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,154 \text{ m})^2} = 3,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad u_1 = 0$$

$$P_2 = 15,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad P_1 = 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{\sum F}{L} = 2f_F \frac{u^2}{D}$$

Balance de energía mecánica en el sistema:

$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_S - \sum F \quad \frac{\sum F}{L} = f_{\text{DARCY}} \frac{u^2}{2D} = 0,002 \cdot \frac{\left(3,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \cdot 0,154 \text{ m}} = 0,735 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}}$$

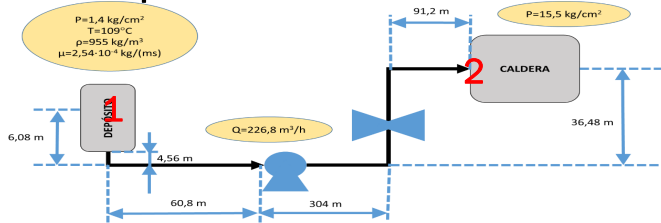
L comprende la longitud de las conducciones, así como la longitud equivalente de los accesorios en el sistema de tuberías. $L = 4,56 \text{ m} + 60,8 \text{ m} + 304 \text{ m} + 36,48 \text{ m} + 91,2 \text{ m} + 96 \text{ m} = 593,04 \text{ m}$

$$\sum F = \frac{\sum F}{L} \cdot L = 0,735 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}} \cdot 593,04 \text{ m} = 435,88 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Factor de fricción (I)

Solución:

Diagrama de proceso:



Balance de energía mecánica en el sistema:

$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_s - \sum F$$

$$298,224 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 5,719 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 1448,38 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = W_s - 435,88 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\text{Potencia} = \frac{2188,203 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot 955 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 226,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,75} = 175537,6 \text{ W} = 175,5 \text{ kW} = 235,2 \text{ HP}$$

Necesitaríamos ubicar la bomba de **250 HP** para alcanzar la presión solicitada

$$z_2 = 36,48 \text{ m} \quad z_1 = 6,08 \text{ m}$$

$$u_2 = \frac{Q}{A} = 226,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,154 \text{ m})^2} = 3,38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad u_1 = 0$$

$$P_2 = 15,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad P_1 = 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sum F = 435,88 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$W_s = 2188,203 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Factor de fricción (II)

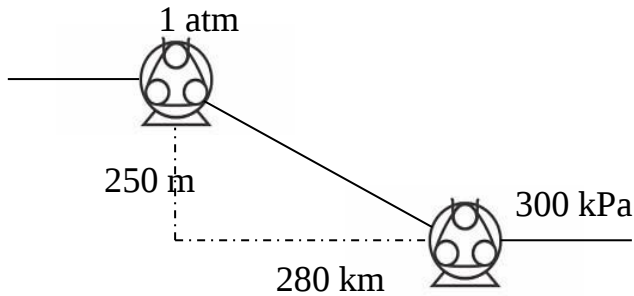
Dos estaciones de bombeo están conectadas a través de una tubería de 280 km. El caudal de bombeo es de $0,56 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a través de una tubería de acero de 0,62 m y rugosidad relativa de 0,00015. La estación de descarga debe operar a 300 kPa, mientras que la de carga se encuentra a presión atmosférica. La cota de la estación de descarga es 250 m inferior a la de carga. La densidad del aceite es de $810 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y su viscosidad cinemática de $4,5\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

¿Cuál sería la potencia de bombeo necesaria?

Factor de fricción (II) (1ª Parte)

Solución:

Diagrama de proceso:



$$z_1 = 250 \text{ m} \quad z_2 = 0 \text{ m}$$

$$u_1 = u_2 = 0,56 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,62 \text{ m})^2} = 1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_1 = 101 \text{ kPa} \quad P_2 = 300 \text{ kPa}$$

$$\frac{\sum F}{L} = 2f_F \frac{u^2}{D}$$

Balance de energía mecánica en el sistema:

$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_s - \sum F$$

$$g \cdot \Delta z = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0 \text{ m} - 250 \text{ m}) = -2452,5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\Delta u^2}{2} = \frac{\left(1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left(1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 0 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{(300 - 101) \text{ kPa} \cdot \frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ KPa}}}{810 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 245,679 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Factor de fricción (II) (1ª Parte)

Solución:

Para estimar las pérdidas de energía por fricción, se calcula el número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{u \cdot l}{\tau}$$

Donde "u" es la velocidad del fluido, "l" es la longitud característica y "τ" es la viscosidad cinemática del fluido.

$$u = 1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$l = 0,62 \text{ m}$$

$$\tau = 4,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Re = \frac{u \cdot l}{\tau} = \frac{1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,62 \text{ m}}{4,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 2,55 \cdot 10^5$$

También sabemos que la rugosidad relativa:

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,00015$$

Factor de fricción (II) (1ª Parte)

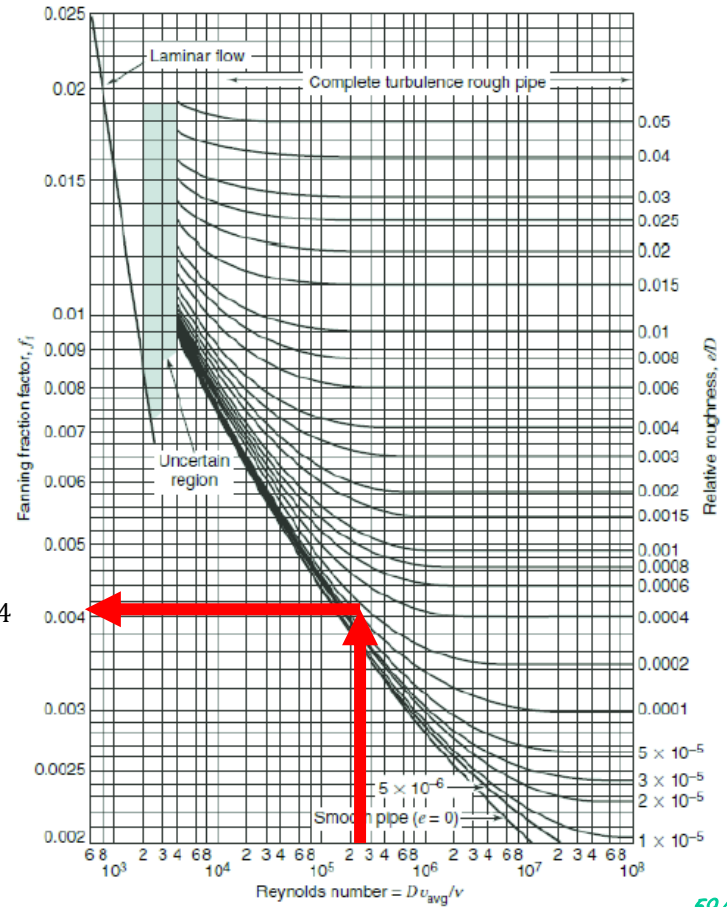
Solución:

Una vez se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se puede obtener el factor de fricción de manera gráfica o numérica:
De manera gráfica:

$$Re = 2,55 \cdot 10^5$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,00015$$

$$f_{\text{FANNING}} \sim 0,004$$
$$f_{\text{DARCY}} = 4 \cdot f_{\text{FANNING}}$$
$$f_{\text{DARCY}} \sim 4 \cdot 0,004 \sim 0,016$$



Factor de fricción (II) (1ª Parte)

Solución:

Una vez se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se puede obtener el factor de fricción de manera gráfica o numérica:

De manera numérica:

Ecuación de Swamee-Jain

$$f_{Darcy} = \frac{0,25}{\log \left[\frac{1}{3,7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]^2}$$

$$Re = 2,55 \cdot 10^5 > 4000$$

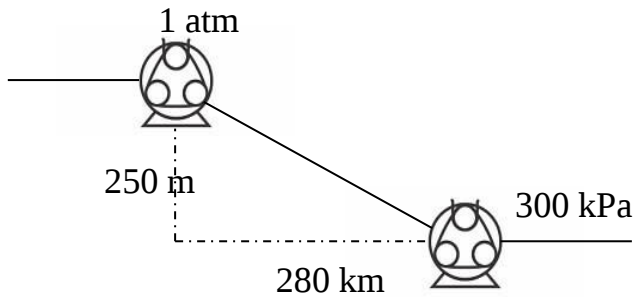
$$\frac{\epsilon}{D} = 0,00015$$

$$f_{Darcy} = 0,0162 \longrightarrow f_{FANNING} = 4,05 \cdot 10^{-3}$$

Factor de fricción (II) (1ª Parte)

Solución:

Diagrama de proceso:



$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_s - \sum F$$

$$g \cdot \Delta z = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0 \text{ m} - 250 \text{ m}) = -2452,5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\Delta u^2}{2} = \frac{\left(1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left(1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 0 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{(300 - 101) \text{ kPa} \cdot \frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ KPa}}}{810 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 245,679 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\sum F}{L} = f D_{\text{RCY}} \frac{u^2}{2D} = 0,0162 \cdot \frac{\left(1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{0,62 \text{ m}} = 0,0449 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}}$$

L es la longitud de la conducción:

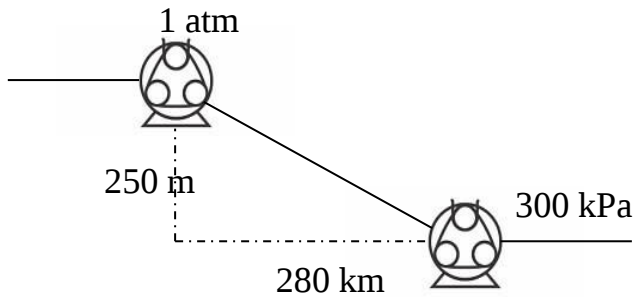
$$L = 280 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$\sum F = \frac{\sum F}{L} \cdot L = 0,0449 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}} \cdot 280 \cdot 10^3 \text{ m} = 12573,92 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Factor de fricción (II) (1ª Parte)

Solución:

Diagrama de proceso:



Balance de energía mecánica en el sistema:

$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_S - \sum F$$

$$-2452,5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 0 + 245,679 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = W_S - 12573,92 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$W_S = 10367,09 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 10367,09 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\text{Potencia} = 10367,09 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 810 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,56 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 4702,5 \text{ kW} = 4,70 \text{ MW}$$

Factor de fricción (II)

Dos estaciones de bombeo están conectadas a través de una tubería de 280 km. El caudal de bombeo es de $0,56 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a través de una tubería de acero de 0,62 m y rugosidad relativa de 0,00015. La estación de descarga debe operar a 300 kPa, mientras que la de carga se encuentra a presión atmosférica. La cota de la estación de descarga es 250 m inferior a la de carga. La densidad del aceite es de $810 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y su viscosidad cinemática de $4,5\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

¿Cuál sería la potencia de bombeo necesaria?

Si como consecuencia de unas obras de reparación es necesario sustituir un tramo de la tubería por otro de longitud 10 km (la longitud entre las estaciones sigue siendo la misma) y diámetro 0,42 m siendo el mismo material

¿Cuál sería la potencia de bombeo necesaria como consecuencia de la sustitución del tramo?

Factor de fricción (II) (2ª Parte)

Solución:

Para estimar las pérdidas de energía por fricción, se calcula el número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{u \cdot l}{\tau} \quad \text{Donde "u" es la velocidad del fluido, "l" es la longitud característica y "\tau" es la viscosidad cinemática del fluido.}$$

$$u_1 = 0,56 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,42 \text{ m})^2} = 4,04 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$l = 0,42 \text{ m}$$

$$\tau = 4,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Re = \frac{u \cdot l}{\tau} = \frac{4,04 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,42 \text{ m}}{4,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 3,77 \cdot 10^5$$

También sabemos que la rugosidad relativa:

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,00015$$

Factor de fricción (II) (2ª Parte)

Solución:

Una vez se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se puede obtener el factor de fricción de manera gráfica o numérica:

De manera numérica:

[Ecuación de Swamee-Jain](#)

$$f_{Darcy} = \frac{0,25}{\log \left[\frac{1}{3,7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]^2}$$

$$Re = 3,77 \cdot 10^5 > 4000$$

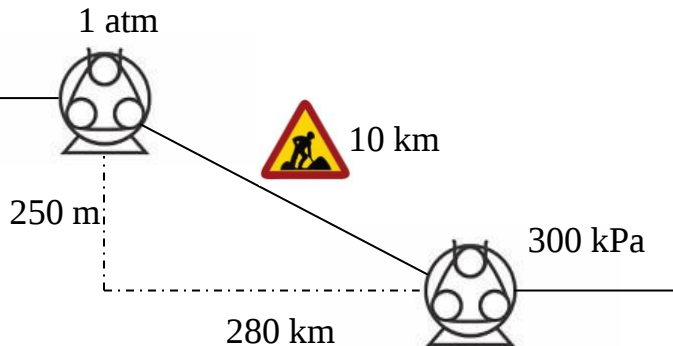
$$\frac{\epsilon}{D} = 0,00015$$

$$f_{Darcy} = 0,0154 \longrightarrow f_{FANNING} = 3,86 \cdot 10^{-3}$$

Factor de fricción (II) (2ª Parte)

Solución:

Diagrama de proceso:



Una vez se conoce el factor de fricción, se puede calcular el término de pérdidas por fricción y por unidad de longitud del nuevo tramo:

$$\frac{\sum F}{L} = f D_{RCY} \frac{u^2}{2D} = 0,0154 \cdot \frac{\left(4,04 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 0,42 m} = 0,299 \frac{m^2 \cdot s^{-2}}{m}$$

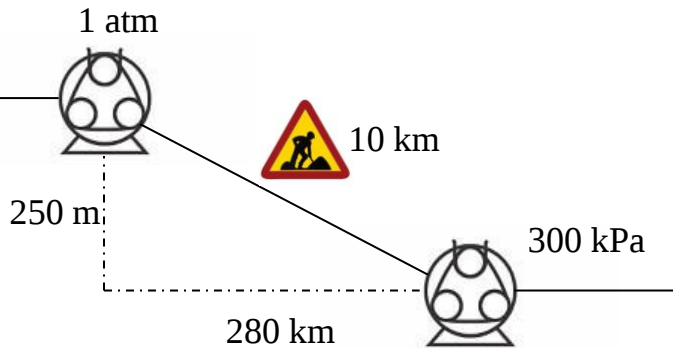
$$L = 10 \cdot 10^3 m$$

$$\sum F = \frac{\sum F}{L} \cdot L = 0,299 \frac{m^2 \cdot s^{-2}}{m} \cdot 10 \cdot 10^3 m = 2999,3 \frac{m^2}{s^2}$$

Factor de fricción (II) (2ª Parte)

Solución:

Diagrama de proceso:



Teniendo en cuenta, que las pérdidas por fricción por unidad de longitud del tramo inicial son ahora:

$$\frac{\Sigma F}{L} = f D A_{RCY} \frac{u^2}{2D} = 0,0162 \cdot \frac{\left(1,854 \frac{m}{s}\right)^2}{0,62 m} = 0,0499 \frac{m^2 \cdot s^{-2}}{m}$$

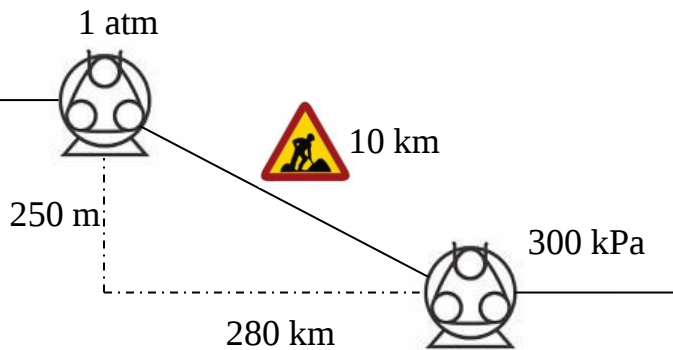
$$L = 270 \cdot 10^3 m$$

$$\Sigma F = \frac{\Sigma F}{L} \cdot L = 0,0499 \frac{m^2 \cdot s^{-2}}{m} \cdot 270 \cdot 10^3 m = 12123 \frac{m^2}{s^2}$$

Factor de fricción (II) (2ª Parte)

Solución:

Diagrama de proceso:



$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_s - \sum F$$

$$g \cdot \Delta z = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0 \text{ m} - 250 \text{ m}) = -2452,5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\Delta u^2}{2} = \frac{\left(1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left(1,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 0 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

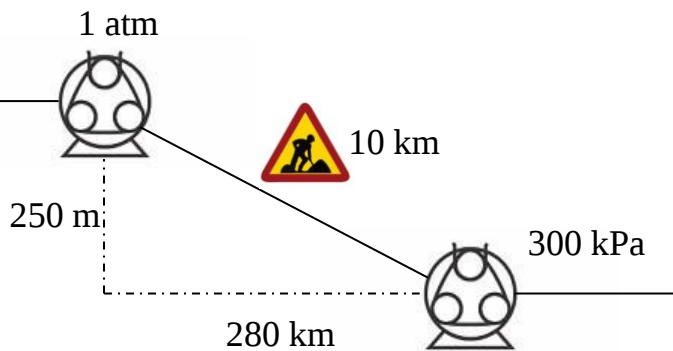
$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{(300 - 101) \text{ kPa} \cdot \frac{1000 \text{ Pa}}{1 \text{ KPa}}}{810 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 245,679 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\sum F = \underbrace{2999,3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}_{10 \text{ km}} + \underbrace{12123 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}_{270 \text{ km}} = 15115 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Factor de fricción (II) (2ª Parte)

Solución:

Diagrama de proceso:



Balance de energía mecánica en el sistema:

$$g \Delta z + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) = W_S - \sum F$$

$$-2452,5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 0 + 245,679 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = W_S - 15115 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$W_S = 12908,4 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 12908,4 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\text{Potencia} = 12908,4 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 810 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,56 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ MW}}{10^6 \text{ W}} = 5,85 \text{ MW}$$

Tema 5

TRANSPORTE EN INTERFASE

5.1 Factor de fricción

5.2 Coeficientes de transferencia de materia

Coeficiente de transferencia de materia (I)

Una plancha plana de acero de dimensiones 1,5 m por 1,5 m se dispone a secar en el interior de una cámara de secado, una vez que la pintura ha sido rociada con spray en su superficie (ver fig. 1). La pintura contiene benceno, de tal forma que la presión parcial en la superficie es de 0,137 atm a la temperatura del proceso que es 27 °C. Para el secado se emplea una corriente de aire también a 27 °C y 1 atm de presión. La corriente de aire para el secado es de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. La cámara de secado se ajusta al ancho de la placa (1,5 m) y posee una altura de 1 m.

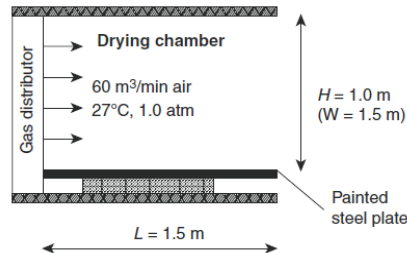


Fig. 1. Esquema de la cámara de secado de pintura

- Determinar el coeficiente de transferencia de materia promedio
- Determinar la velocidad con la que se evapora el disolvente expresada en $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ asumiendo que la concentración de benceno en la corriente de aire es despreciable

Coeficiente de transferencia de materia (I)

Una plancha plana de acero de dimensiones 1,5 m por 1,5 m se dispone a secar en el interior de una cámara de secado, una vez que la pintura ha sido rociada con spray en su superficie (ver fig. 1). La pintura contiene benceno, de tal forma que la presión parcial en la superficie es de 0,137 atm a la temperatura del proceso que es 27 °C. Para el secado se emplea una corriente de aire también a 27 °C y 1 atm de presión. La corriente de aire para el secado es de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. La cámara de secado se ajusta al ancho de la placa (1,5 m) y posee una altura de 1 m.

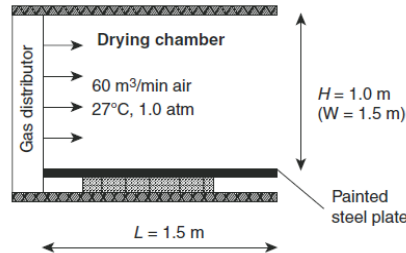


Fig. 1. Esquema de la cámara de secado de pintura

Datos a la temperatura del proceso: la viscosidad cinemática del aire es $1,569 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; la difusividad del benceno en aire es $0,0972 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; el peso molecular del benceno es $78 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Coeficiente de transferencia de materia (I)

Solución:

Se calcula la velocidad en la cámara:

$$u = \frac{60 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{(1,5 \text{ m} \cdot 1 \text{ m})} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0,66 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 66 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

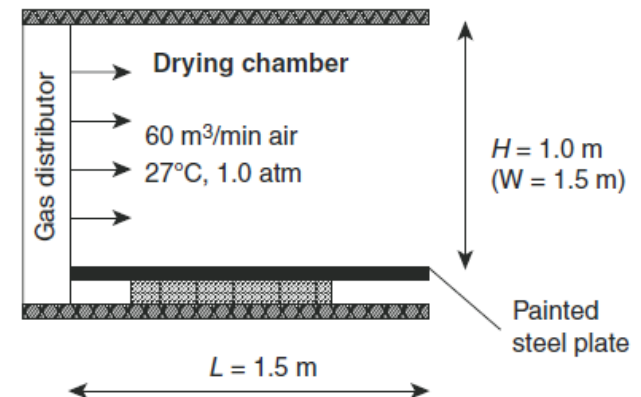
Se calcula el número adimensional de Reynolds (Re) y Schmidt (Sc):

$$\text{Re} = \frac{u \cdot l}{\tau} \quad \text{Sc} = \frac{\tau}{D_{AB}}$$

Donde “u” es la velocidad, “l” es la longitud característica, “τ” es la viscosidad cinemática del fluido y “D_{AB}” es la difusividad.

$$\text{Re} = \frac{u \cdot l}{\tau} = \frac{0,66 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,5 \text{ m}}{1,569 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 64.054$$

$$\text{Sc} = \frac{\tau}{D_{AB}} = \frac{1,569 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{0,0972 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}} = 1,614$$



Coeficiente de transferencia de materia (I)

Solución:

Se calcula el número adimensional de Sherwood (Sh):

$$Sh = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } Re < 2 \cdot 10^5$$

$$Sh = 0,664 \cdot 64.054^{\frac{1}{2}} \cdot 1,614^{\frac{1}{3}} = 197,125$$

Además, sabemos por definición a que es igual el número Sherwood (Sh):

$$Sh = \frac{k_x \cdot L}{D_{AB}}$$

Donde “ k_x ” es coeficiente de transferencia de materia, “ L ” es la longitud característica y “ D_{AB} ” es la difusividad.

Si despejamos k_x de la anterior ecuación, tenemos que:

$$k_x = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} = \frac{197,125 \cdot 0,0972 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}}{1,5 \text{ m}} = 1,27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (I)

Una plancha plana de acero de dimensiones 1,5 m por 1,5 m se dispone a secar en el interior de una cámara de secado, una vez que la pintura ha sido rociada con spray en su superficie (ver fig. 1). La pintura contiene benceno, de tal forma que la presión parcial en la superficie es de 0,137 atm a la temperatura del proceso que es 27 °C. Para el secado se emplea una corriente de aire también a 27 °C y 1 atm de presión. La corriente de aire para el secado es de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. La cámara de secado se ajusta al ancho de la placa (1,5 m) y posee una altura de 1 m.

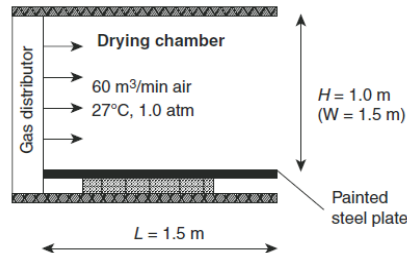


Fig. 1. Esquema de la cámara de secado de pintura

- Determinar el coeficiente de transferencia de materia promedio
- Determinar la velocidad con la que se evapora el disolvente expresada en $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ asumiendo que la concentración de benceno en la corriente de aire es despreciable

Coeficiente de transferencia de materia (I)

Solución:

El ratio de evaporación de benceno vendrá dado por la expresión correspondiente:

$$N_A = k_x \cdot (C_{b,s} - C_{b,b})$$

Donde “ k_x ” es coeficiente de transferencia de materia, “ $C_{b,s}$ ” es la concentración de benceno en la superficie y “ $C_{b,b}$ ” es la concentración de benceno en el aire.

La concentración de benceno en la superficie se obtiene conociendo el valor de la presión parcial:

$$C_{b,s} = \frac{0,137 \text{ atm}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 300 \text{ K}} = 5,56 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 5,56 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$C_{b,b} = 0 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Por lo que el ratio de evaporación de benceno será:

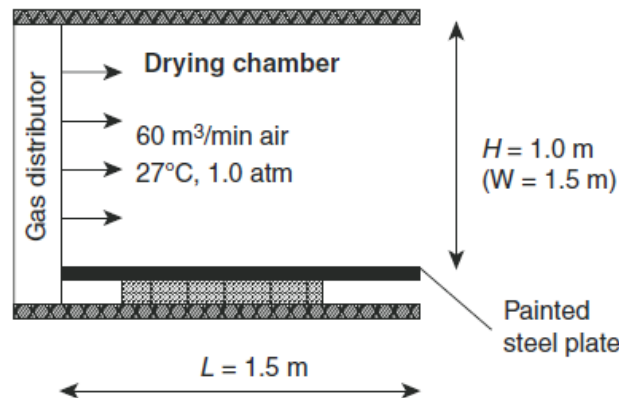
$$N_A = k_x \cdot (C_{b,s} - C_{b,b}) = 1,27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left(5,56 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} - 0 \right) = 7,06 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (I)

Solución:

Por lo que el ratio de evaporación de benceno será:

$$N_A = k_x \cdot (C_{b,s} - C_{b,b}) = 1,27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left(5,56 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} - 0 \right) = 7,06 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$



Por lo que el la velocidad de evaporación:

$$W_A = 7,06 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot (1,5 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}) \cdot 78 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 74,44 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (II)

Una película delgada de polímero se somete a un proceso de evaporación de acuerdo a la fig. 1. Ambos lados de la película de polímero están en contacto con la corriente de aire. La película de polímero se enrolla al final de la línea. El ancho de la película es de 0,5 m y la longitud de la cinta es de 2,5 m. La corriente de aire circula con una velocidad de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la dirección perpendicular al movimiento de la película. La película está formada por el polímero y el *n*-hexano como disolvente. La presión parcial del *n*-hexano a 20°C es de 0,16 atm.

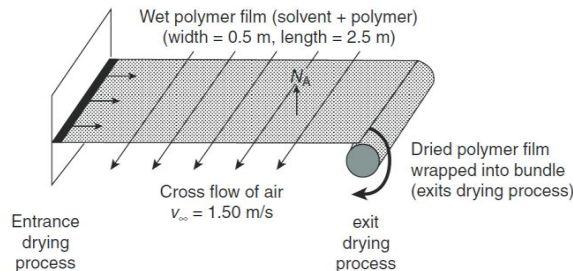


Fig. 1. Esquema de la cinta para la evaporación de *n*-hexano.

- Determinar en las condiciones de proceso el número de Sc y el número de Sh promedio.
- Determinar el ratio de evaporación de *n*-hexano en $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ teniendo en cuenta que la evaporación se produce por ambos lados de la película.

Coeficiente de transferencia de materia (II)

Una película delgada de polímero se somete a un proceso de evaporación de acuerdo a la fig. 1. Ambos lados de la película de polímero están en contacto con la corriente de aire. La película de polímero se enrolla al final de la línea. El ancho de la película es de 0,5 m y la longitud de la cinta es de 2,5 m. La corriente de aire circula con una velocidad de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la dirección perpendicular al movimiento de la película. La película está formada por el polímero y el *n*-hexano como disolvente. La presión parcial del *n*-hexano a 20°C es de 0,16 atm.

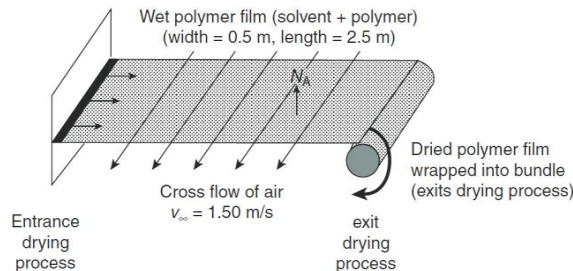


Fig. 1. Esquema de la cinta para la evaporación de *n*-hexano.

Datos a la temperatura del proceso: la viscosidad cinemática del aire es $1,5\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; la difusividad del *n*-hexano en aire es $0,080 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; el peso molecular del *n*-hexano es $86 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Coeficiente de transferencia de materia (II)

Solución:

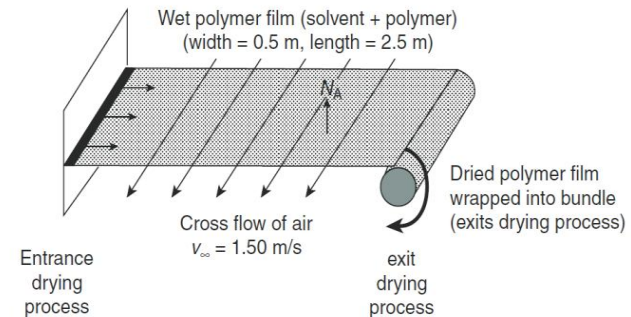
Se calcula el número adimensional de Reynolds (Re) y Schmidt (Sc):

$$Re = \frac{u \cdot l}{\tau} \qquad Sc = \frac{\tau}{D_{AB}}$$

Donde “u” es la velocidad, “l” es la longitud característica, “τ” es la viscosidad cinemática del fluido y “D_{AB}” es la difusividad.

$$Re = \frac{u \cdot l}{\tau} = \frac{1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,5 \text{ m}}{1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 50.000$$

$$Sc = \frac{\tau}{D_{AB}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{0,08 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}} = 1,875$$



Se calcula el número adimensional de Sherwood (Sh):

$$Sh = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } Re < 2 \cdot 10^5$$

$$Sh = 0,664 \cdot 50.000^{\frac{1}{2}} \cdot 1,875^{\frac{1}{3}} = 183,08$$

Coeficiente de transferencia de materia (II)

Solución:

Sabemos por definición a que es igual el número Sherwood (Sh):

$$Sh = \frac{k_x \cdot L}{D_{AB}}$$

Donde “ k_x ” es coeficiente de transferencia de materia, “ L ” es la longitud característica y “ D_{AB} ” es la difusividad.

$$k_x = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} = \frac{183,08 \cdot 0,08 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2}}{0,5 \text{ m}} = 2,93 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El ratio de evaporación de n-hexano vendrá dado por la expresión correspondiente:

$$N_A = k_x \cdot (C_{h,s} - C_{h,b})$$

Donde “ k_x ” es coeficiente de transferencia de materia, “ $C_{h,s}$ ” es la concentración de n-hexano en la superficie y “ $C_{h,b}$ ” es la concentración de n-hexano en el aire.

Coeficiente de transferencia de materia (II)

Una película delgada de polímero se somete a un proceso de evaporación de acuerdo a la fig. 1. Ambos lados de la película de polímero están en contacto con la corriente de aire. La película de polímero se enrolla al final de la línea. El ancho de la película es de 0,5 m y la longitud de la cinta es de 2,5 m. La corriente de aire circula con una velocidad de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la dirección perpendicular al movimiento de la película. La película está formada por el polímero y el *n*-hexano como disolvente. La presión parcial del *n*-hexano a 20°C es de 0,16 atm.

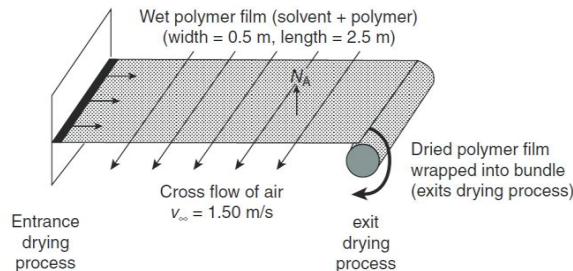


Fig. 1. Esquema de la cinta para la evaporación de *n*-hexano.

c) A la entrada del proceso de secado, la película tiene una carga de disolvente de 0,1 g de *n*-hexano por g de polímero. Si tenemos en cuenta que entran 50 g de polímero por segundo, ¿Cuál será la carga de disolvente antes de ser enrollado en g de *n*-hexano por g de polímero?

Coeficiente de transferencia de materia (II)

Solución:

El ratio de evaporación de n-hexano vendrá dado por la expresión correspondiente:

$$N_A = k_x \cdot (C_{h,s} - C_{h,b})$$

Donde “ k_x ” es coeficiente de transferencia de materia, “ $C_{h,s}$ ” es la concentración de n-hexano en la superficie y “ $C_{h,b}$ ” es la concentración de n-hexano en el aire.

$$C_{h,s} = \frac{0,16 \text{ atm}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 293 \text{ K}} = 6,65 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 6,65 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$C_{h,b} = 0 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Por lo que el ratio de evaporación de n-hexano;

$$N_A = k_x \cdot (C_{h,s} - C_{h,b}) = 2,93 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left(6,65 - 0 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right) = 0,0194 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Siendo la velocidad de evaporación:

$$W_A = 0,0194 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot (0,5 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m}) \cdot 2 \cdot 86 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 4,171 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

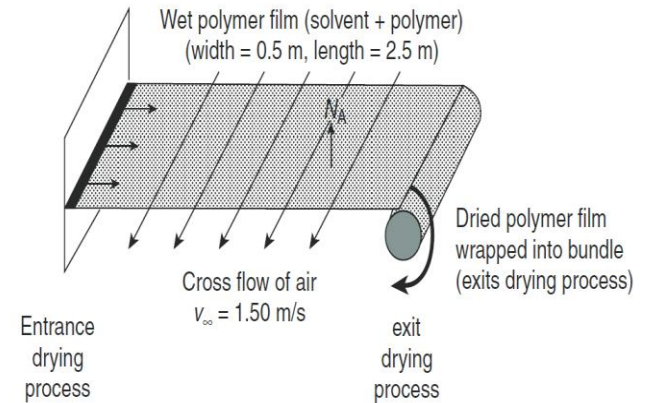
Coeficiente de transferencia de materia (II)

Solución:

Si planteamos un balance de materia al n-hexano, tenemos que:

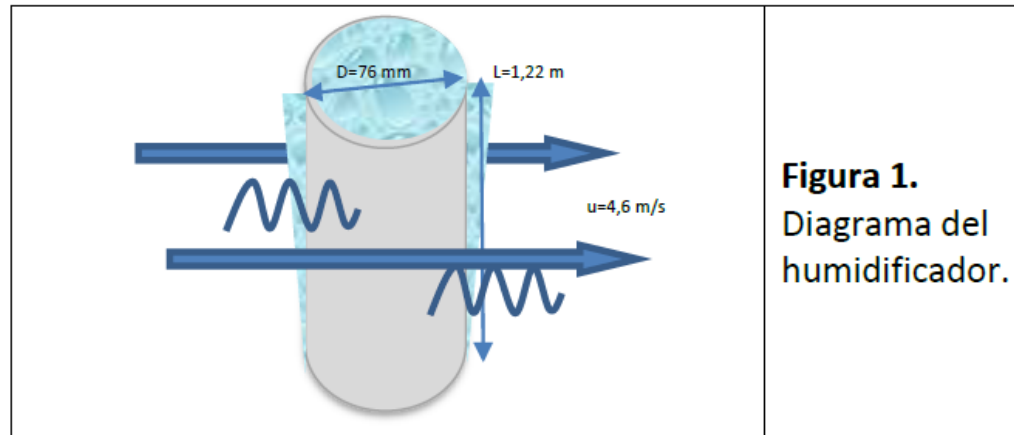
$$50 \frac{\text{g P}}{\text{s}} \cdot 0,1 \frac{\text{g H}}{\text{g P}} = 50 \frac{\text{g P}}{\text{s}} \cdot x \frac{\text{g H}}{\text{g P}} + 4,171 \frac{\text{g H}}{\text{s}}$$
$$x = 0,01658 \frac{\text{g H}}{\text{g P}}$$

Por lo que se ha reducido un 83,42%.



Coeficiente de transferencia de materia (III)

La figura 1 muestra un humidificador. Este humidificador se emplea para aumentar la humedad relativa de una corriente de aire que fluye perpendicularmente a su alrededor. Una fina capa de agua desciende desde la parte superior del humidificador a la inferior. Es posible asumir que la temperatura de la capa fina de agua está a 290 K. El humidificador tiene forma cilíndrica y está colocado verticalmente con respecto al suelo. El diámetro de dicho humidificador es de 76 mm y posee una altura de 1,22 m. La corriente de aire seco (no tiene agua) se encuentra a 310 K y 1 atm, y pasa perpendicularmente al humidificador a una velocidad de $4,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La corriente de aire tiene una densidad de $1,1769 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y una viscosidad cinemática de $1,5689\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ a la temperatura de la película y a 1 atm. La difusividad del agua en aire a 298 K es de $2,6\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. El peso molecular del aire es de $28,9 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.



La presión parcial del agua a la temperatura de 290 K es de $1,73\cdot 10^3 \text{ Pa}$. La temperatura de la película es el promedio de la capa de agua y el aire del entorno.

Coeficiente de transferencia de materia (III)

Solución:

1. Dibujar un diagrama de flujo del proceso, identificando las posibles entradas y salidas



2. Determinar la difusividad del agua en aire a la temperatura de la película. Para conocer la difusividad $D_{\text{Agua-Aire}}^T$ a una temperatura cualquiera T (K) diferente de la temperatura de referencia conocida T_{ref} (K) emplear la expresión:

$$D_{\text{Agua-Aire}}^T = D_{\text{Agua-Aire}}^{T_{\text{ref}}} \cdot \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{3/2} \quad \text{Donde } D_{\text{Agua-Aire}}^{T_{\text{ref}}} \text{ es la difusividad del agua a la temperatura de referencia conocida } T_{\text{ref}}$$

$$T_{\text{pel}} = \frac{310 + 290}{2} = 300 \text{ K} \quad D_{\text{Agua-Aire}}^T = 2,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot \left(\frac{300}{298} \right)^{3/2} = 2,62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (III)

Solución:

3. Seleccionar la correlación adecuada para la geometría existente (Anexo I)

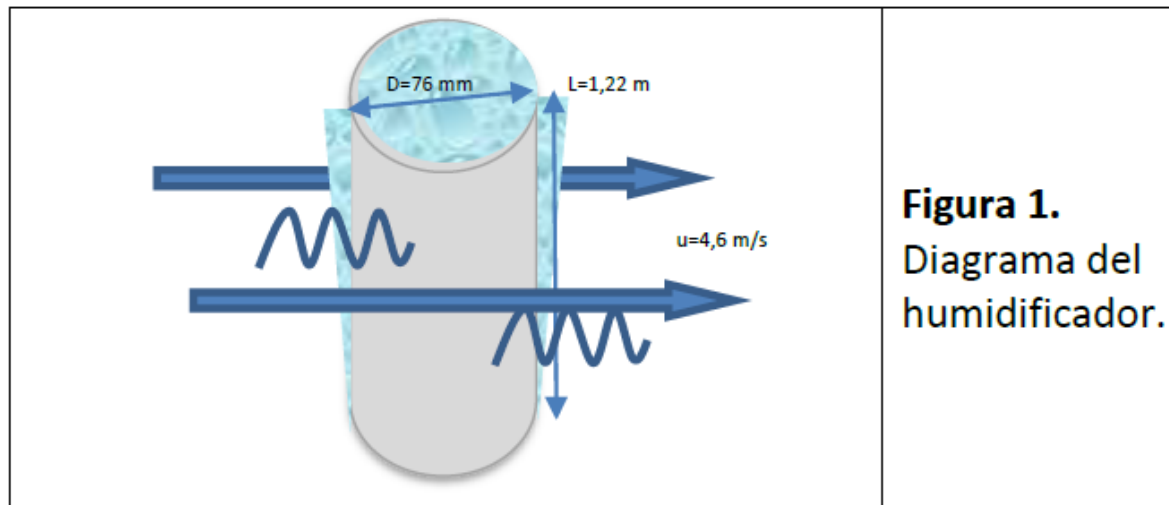


Figura 1.
Diagrama del
humidificador.

Correlación de Bedingfield y Drew para flujo de gas perpendicular a un cilindro (exterior del cilindro).

Coeficiente de transferencia de materia (III)

Solución:

4. Calcular el valor del coeficiente de transferencia de materia del agua e indicar las correspondientes unidades

$$\frac{k_G P (Sc)^{0,56}}{G_M} = 0,281 (Re_D)^{-0,4}$$

$$Re_D = \frac{u \cdot l}{\tau} = \frac{4,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,076 \text{ m}}{1,5689 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 22.283,1$$

$$Sc = \frac{\tau}{D_{AB}} = \frac{1,5689 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{2,62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 0,598$$

$$G_M = 4,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,1769 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{28,9 \text{ kg}} = 0,187 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (III)

Solución:

4. Calcular el valor del coeficiente de transferencia de materia del agua e indicar las correspondientes unidades

$$\frac{k_G P (Sc)^{0,56}}{G_M} = 0,281 (Re_D)^{-0,4}$$

$$\frac{k_G \cdot 101.325 \text{ Pa} \cdot (0,598)^{0,56}}{0,187 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}} = 0,281 (22.283,1)^{-0,4}$$

$$k_G = 1,260 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (III)

Solución:

5. Calcular la cantidad de agua que puede se puede suministrar a la parte superior del humidificador en unidades de kilogramos por segundo para evitar que llegue agua a la parte inferior del mismo. El agua sale por la parte superior del cilindro y rebosa por la pared superior por lo que cae uniformemente a través de la pared vertical.

El ratio de evaporación de agua vendrá dado por la expresión correspondiente:

$$N_A = k_G \cdot (C_{a,s} - C_{a,b})$$

Donde “ k_x ” es coeficiente de transferencia de materia, “ $C_{a,s}$ ” es la concentración de agua en la superficie y “ $C_{a,b}$ ” es la concentración de agua en el aire.

$$N_A = 1,260 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \cdot (1,73 \cdot 10^3 \text{ Pa} - 0) = 2,193 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Siendo la velocidad de evaporación:

$$W_A = 2,193 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot \pi \cdot (0,076 \text{ m} \cdot 1,22 \text{ m}) \cdot 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 1,15 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Para eliminar cloroformo de una corriente de agua subterránea y lograr su potabilización, se utiliza una columna de stripping, de forma que se pueda desorber el cloroformo. La columna de stripping (forma cilíndrica) tiene un diámetro igual a $D_{COL}=3\text{ ft}$. El caudal volumétrico de la corriente líquida de agua contaminada con cloroformo es de $Q_L=0,379\text{ ft}^3\cdot\text{s}^{-1}$. El caudal volumétrico de la corriente gaseosa de aire Q_V es 100 veces superior. La columna posee un relleno de tri-paks de polietileno (tamaño nominal del relleno empleado $d_p=0,167\text{ ft}$), cuyas características son un área específica interfacial de relleno $a_t=47,85\text{ ft}^2\cdot\text{ft}^{-3}$, y una tensión superficial crítica de $\sigma_c=0,0728\text{ lb}\cdot\text{s}^{-2}$. El relleno de tri-paks está colocado de forma aleatoria. Las propiedades físicas de las corrientes de agua líquida (líquida) y aire (gas) son en las condiciones de presión y temperatura de operación las dadas por la tabla 1:

Tabla 1. Propiedades físicas de las corrientes líquida (agua) y gas (aire)

		Valor	Unidades
Viscosidad de la fase líquida	μ_L	$6,733\cdot10^{-4}$	$\text{lb}\cdot\text{ft}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Densidad de la fase líquida	ρ_L	62,318	$\text{lb}\cdot\text{ft}^{-3}$
Difusividad cloroformo en agua	D_{CL}	$6,45\cdot10^{-9}$	$\text{ft}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Tensión superficial de la fase líquida	σ_L	0,161	$\text{lb}\cdot\text{s}^{-2}$
Viscosidad de la fase gas	μ_G	$1,216\cdot10^{-5}$	$\text{lb}\cdot\text{ft}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Densidad de la fase gas	ρ_G	0,07516	$\text{lb}\cdot\text{ft}^{-3}$
Difusividad cloroformo en aire	D_{CG}	$1,012\cdot10^{-4}$	$\text{ft}^2\cdot\text{s}^{-1}$

Las correlaciones de coeficientes individuales de transferencia de materia para lechos colocados de forma aleatoria se encuentran en el Anexo I. Se pide resolver las siguientes cuestiones:

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

1. Realizar un diagrama de proceso sencillo, indicando las corrientes de entrada y salida de la columna de stripping



Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

2. Calcular el valor del número de Reynolds para la fase gas Re_G

$$Re_G = \frac{u_G \cdot \rho_G}{\mu_G} \left(\frac{1}{a_t} \right) = \frac{5,36 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cdot 0,07516 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{1,216 \cdot 10^{-5} \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}}} \cdot \left(\frac{1}{47,85 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3}} \right) = 692,62$$

Donde “ u_G ” es la velocidad lineal de la corriente gaseosa, “ ρ_G ” es la densidad de la corriente gaseosa, “ μ_G ” es la viscosidad dinámica de la corriente gaseosa y “ a_t ” es el área específica interfacial del relleno.

$$u_G = \frac{37,9 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi}{4} \cdot (3 \text{ ft})^2} = 5,36 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

3. Calcular el valor de G (densidad de flujo másico de la fase gas)

$$G = u_G \cdot \rho_G = 5,36 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cdot 0,07516 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 0,403 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}}$$

4. Calcular el valor del número de Schmidt para la fase gas Sc_G

$$Sc_G = \frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D_{CG}} = \frac{1,216 \cdot 10^{-5} \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}}}{0,07516 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \cdot 1,012 \cdot 10^{-4} \frac{\text{ft}^2}{\text{s}}} = 1,598$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

5. Calcular el valor del coeficiente de transferencia de materia para la fase gas, indicando las unidades correspondientes para k_G

$$\frac{k_G}{(a_t \cdot D_{CG})} = A \cdot Re_G^{0,7} \cdot Sc_G^{0,333} \cdot (a_t \cdot d_p)^{-2} \quad \text{Anexo I}$$

$$\frac{k_G}{\left(47,85 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3} \cdot 1,012 \cdot 10^{-4} \frac{\text{ft}^2}{\text{s}}\right)} = 5,26 \cdot 692,62^{0,7} \cdot 1,598^{0,333} \cdot \left(47,85 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3} \cdot 0,167 \text{ ft}\right)^{-2}$$

$$\frac{k_G}{4,842 \cdot 10^{-3} \frac{\text{ft}}{\text{s}}} = 9,320$$

$$k_G = 0,0451 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

6. Calcular el valor del número de Reynolds para la fase líquida Re_L

$$Re_L = \frac{u_L \cdot \rho_L}{\mu_L} \left(\frac{1}{a_w} \right)$$

Donde “ u_L ” es la velocidad lineal de la corriente líquida, “ ρ_L ” es la densidad de la corriente líquida, “ μ_L ” es la viscosidad dinámica de la corriente líquida y “ a_w ” es el área específica de relleno mojada.

Se debe calcular el área específica de relleno mojada (a_w) a partir de las ecuaciones del Anexo II

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

6. Cálculo del área específica de relleno mojada (a_w):

$$Re_L^* = \frac{u_L \cdot \rho_L}{\mu_L} \left(\frac{1}{a_t} \right) = \frac{0,0536 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cdot 62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{6,733 \cdot 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}}} \cdot \left(\frac{1}{47,85 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3}} \right) = 103,67$$

$$L = 0,0536 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cdot 62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 3,340 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}}$$

$$Fr = \frac{L^2 \cdot a_t}{(\rho_L)^2 \cdot g} = \frac{\left(3,340 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}} \right)^2 \cdot 47,85 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3}}{\left(62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right)^2 \cdot 32,17 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}} = 4,27 \cdot 10^{-3}$$

$$We = \frac{L^2 \cdot}{\sigma_L \cdot \rho_L \cdot a_t} = \frac{\left(3,340 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}} \right)^2}{0,161 \frac{\text{lb}}{\text{s}^2} \cdot 62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \cdot 47,85 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3}} = 0,023$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

6. Cálculo del área específica de relleno mojada (a_w):

$$\frac{a_w}{a_t} = 1 - \exp \left(-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right)^{0,75} \cdot Re_L^{*0,1} \cdot Fr^{-0,05} \cdot We^{0,2} \right)$$

$$\frac{a_w}{a_t} = 0,544$$

$$a_w = 26,03 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3}$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

6. Calcular el valor del número de Reynolds para la fase líquida Re_L

$$Re_L = \frac{u_L \cdot \rho_L}{\mu_L} \left(\frac{1}{a_w} \right) \qquad u_L = \frac{0,379 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi}{4} \cdot (3 \text{ ft})^2} = 0,0536 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Donde “ u_L ” es la velocidad lineal <de la corriente líquida, “ ρ_L ” es la densidad de la corriente líquida, “ μ_L ” es la viscosidad dinámica de la corriente líquida y “ a_w ” es el área específica de relleno mojada.

$$Re_L = \frac{u_L \cdot \rho_L}{\mu_L} \left(\frac{1}{a_w} \right) = \frac{0,0536 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cdot 62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{6,733 \cdot 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}}} \cdot \left(\frac{1}{26,03 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3}} \right) = 190,67$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

7. Calcular el valor de L (densidad de flujo másico de la fase líquida)

$$L = u_L \cdot \rho_L = 0,0536 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cdot 62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 3,340 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}}$$

8. Calcular el valor del número de Schmidt para la fase líquida Sc_L

$$Sc_L = \frac{\mu_L}{\rho_L \cdot D_{CL}} = \frac{6,733 \cdot 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}}}{62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \cdot 6,45 \cdot 10^{-9} \frac{\text{ft}^2}{\text{s}}} = 1675,07$$

Coeficiente de transferencia de materia (IV)

Solución:

9. Calcular el valor del coeficiente de transferencia de materia para la fase líquida, indicando las unidades correspondientes para k_L

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_L \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,0051 \cdot Re_L^{0,667} \cdot Sc_L^{-0,5} \cdot (a_t \cdot d_p)^{0,4} \quad \text{Anexo I}$$

$$k_L \left(\frac{62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{6,733 \cdot 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}} \cdot 32,17 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,0051 \cdot 190,67^{0,667} \cdot 1675,07^{-0,5} \cdot \left(47,85 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3} \cdot 0,167 \text{ ft} \right)^{0,4}$$

$$k_L \left(\frac{62,318 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{6,733 \cdot 10^{-4} \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}} \cdot 32,17 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,00949$$

$$k_L = 6,67 \cdot 10^{-4} \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (V)

Una columna de sección circular se emplea para eliminar un contaminante A de una corriente de agua residual. Para ello, en contracorriente, se emplea una corriente de aire. En un cierto punto de la columna, la concentración de A en la corriente de agua residual es de $C_{A,b}=1\cdot 10^{-6} \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$ mientras que la concentración de A en la corriente de aire es prácticamente nula $P_{A,b}\approx 0 \text{ atm}$. Dentro de la columna, en ese punto, los valores de los coeficientes de transferencia de materia para la fase líquida y gaseosa son respectivamente:

$$k_x = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)} \quad k_y = 0,01 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}$$

Dado el rango de concentraciones de trabajo, es posible aplicar la ley de Henry por lo que:

$$p_{A,i} = H C_{A,i}$$

Donde $P_{A,i}$ es la presión parcial de A en la corriente de aire y $C_{A,i}$ es la concentración de A en la corriente de agua residual, siendo la constante de Henry:

$$H = 10 \frac{\text{atm}}{\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)}$$

Se pide determinar:

- a) Los coeficientes globales de transferencia de materia K_L y K_G .*
- b) El flujo másico de A en ese punto de la columna.*

Coeficiente de transferencia de materia (V)

Solución:

Aplicando la teoría de las dos resistencias:

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{H \cdot k_y}$$

Si despejamos el coeficientes global de transferencia de materia para la fase líquida, tenemos que:

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)}} + \frac{1}{10 \frac{\text{atm}}{\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)} \cdot 0,01 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}}$$

$$K_x = 4,975 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)}$$

Coeficiente de transferencia de materia (V)

Solución:

Aplicando la teoría de las dos resistencias:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{H}{k_x}$$

Si despejamos el coeficientes global de transferencia de materia para la fase gaseosa, tenemos que:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{0,01 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}} + \frac{10 \frac{\text{atm}}{\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)}}{5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)}}$$
$$K_y = 4,975 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}$$

Coeficiente de transferencia de materia (V)

Solución:

Si calculamos la densidad de flujo molar de A:

$$N_A = K_x \cdot (C_{A,b} - C_{A,e})$$

Donde “ K_x ” es coeficiente global de transferencia de materia para la fase líquida, “ $C_{A,b}$ ” es la concentración del contaminante en el agua residual y “ $C_{A,e}$ ” es la concentración del contaminante en el aire.

$$\begin{aligned} N_A &= K_x \cdot (C_{A,b} - C_{A,e}) = 4,975 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)} \cdot \left(1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} - 0\right) \\ &= 4,975 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

Coeficiente de transferencia de materia (V)

Solución:

Además, también se puede calcular la densidad de flujo molar de A a partir de:

$$N_A = K_y \cdot (P_{A,e} - P_{A,b})$$

$$\begin{aligned} N_A &= K_y \cdot (P_{A,e} - P_{A,b}) = 4,975 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}} \cdot \left(1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \cdot 10 \frac{\text{atm}}{\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)} - 0 \right) \\ &= 4,975 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

Demostrando que se puede obtener la densidad de flujo molar de A a partir del coeficiente global de transferencia de materia de la fase líquida y la fase gaseosa.