

PROBLEMAS TEMA 5: TRANSPORTE EN INTERFASE

FACTOR DE FRICCIÓN

1. 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?

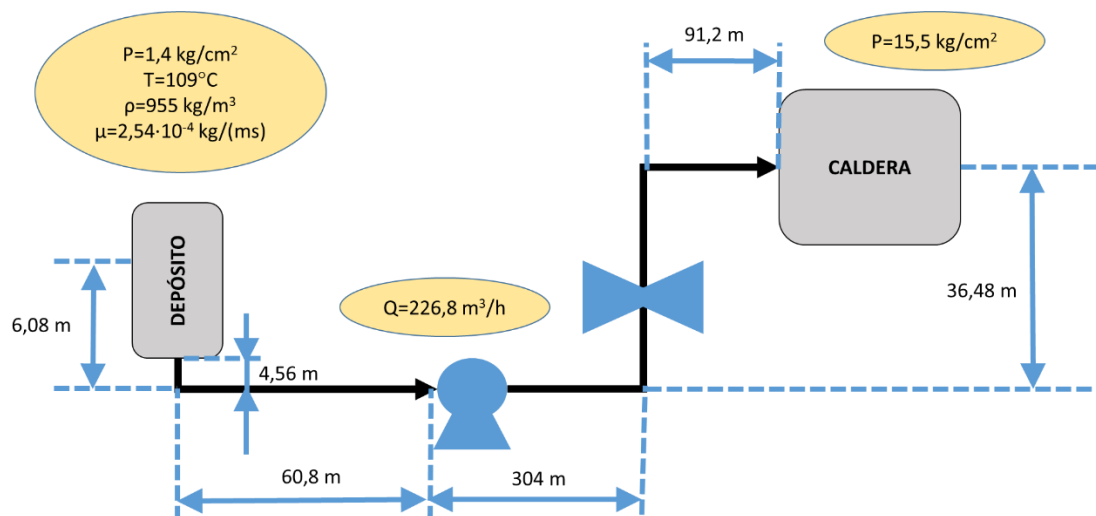


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso.

Datos: $1,34 \text{ HP} = 1 \text{ kW}$

Solución: Necesitamos ubicar la bomba de 250 HP para alcanzar la presión solicitada.

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 de diámetro 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?

Solución: 4,70 MW y 5,85 MW

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MATERIA

3. 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 figura 3). 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.

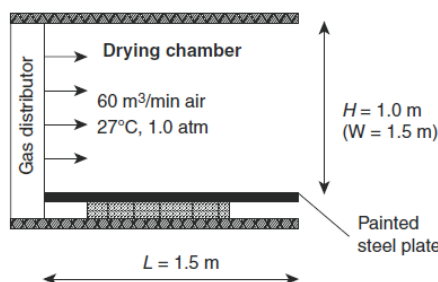


Figura 3. Esquema de la cámara de secado de pintura

- Determinar el coeficiente de transferencia de materia promedio
- Determinar la velocidad con la que se evapora el disolvente, expresada en g/min asumiendo que la concentración de benceno en la corriente de aire es despreciable

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 $78 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Solución: (a) $k_x = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y (b) $74 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$

4. Coeficiente de transferencia de materia (II)

Una película delgada de polímero se somete a un proceso de evaporación de acuerdo a la figura 4. 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.

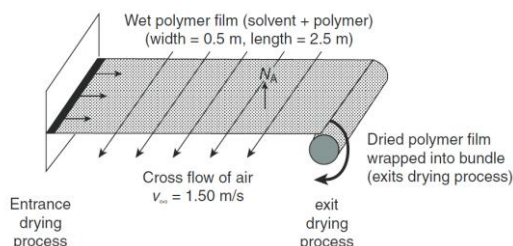


Figura 4. Esquema de la cinta para la evaporación de n-hexano

- Determinar en las condiciones de proceso el número de Sc y el número de Sh promedio
- Determinar la ratio de evaporación de n-hexano en g/s teniendo en cuenta que la evaporación se produce por ambos lados de la película
- 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?

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 $86 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Solución: (a) $Sc = 1,875$; $Sh = 183,1$; (b) $4,17 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, y (c) $0,01658 \text{ g H} \cdot (\text{g P})^{-1}$

5. Coefficiente de transferencia de materia (III)

La figura 6 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 $28,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

- Dibujar un diagrama de flujo del proceso, identificando las posibles entradas y salidas
- 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:

$$D_{\text{Agua-Aire}}^T = D_{\text{Agua-Aire}}^{T_{\text{ref}}} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{3/2}$$

Donde $D_{\text{Agua-Aire}}^{T_{\text{ref}}}$ es la difusividad del agua a la temperatura de referencia conocida T_{ref}

- Seleccionar la correlación adecuada para la geometría existente (Anexo)
- Calcular el valor del coeficiente de transferencia de materia del agua e indicar las correspondientes unidades
- Calcular la cantidad de agua que puede ser suministrada 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.

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.

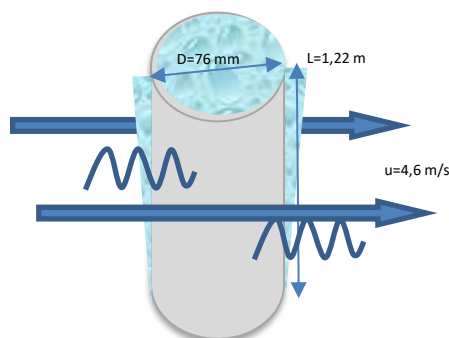


Figura 6.
Diagrama del
humidificador.

Solución: (2) $2,62 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, (4) $1,26 \cdot 10^{-8} \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, y (5) $1,15 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

6. 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 $D_{\text{COL}}=3 \text{ ft}$. 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 $\sigma_c=0,0728 \text{ lb} \cdot \text{s}^{-2}$. 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	$6,733 \cdot 10^{-4}$	$\text{lb} \cdot \text{ft}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Densidad de la fase líquida	ρ_L	62,318	$\text{lb} \cdot \text{ft}^{-3}$
Difusividad cloroformo en agua	D_{CL}	$6,45 \cdot 10^{-9}$	$\text{ft}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Tensión superficial de la fase líquida	σ_L	0,161	$\text{lb} \cdot \text{s}^{-2}$
Viscosidad de la fase gas	μ_G	$1,216 \cdot 10^{-5}$	$\text{lb} \cdot \text{ft}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Densidad de la fase gas	ρ_G	0,07516	$\text{lb} \cdot \text{ft}^{-3}$
Difusividad cloroformo en aire	D_{CG}	$1,012 \cdot 10^{-4}$	$\text{ft}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

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

- 1) Realizar un diagrama de proceso sencillo, indicando las corrientes de entrada y salida de la columna de stripping.
- 2) Calcular el valor del número de Reynolds para la fase gas Re_G .
- 3) Calcular el valor de G (densidad de flujo másico de la fase gas).
- 4) Calcular el valor del número de Schmidt para la fase gas Sc_G .
- 5) Calcular el valor del coeficiente de transferencia de materia para la fase gas, indicando las unidades correspondientes para k_G .
- 6) Calcular el valor del número de Reynolds para la fase líquida Re_L .
- 7) Calcular el valor de L (densidad de flujo másico de la fase líquida).

- 8) Calcular el valor del número de Schmidt para la fase líquida Sc_L .
9) Calcular el valor del coeficiente de transferencia de materia para la fase líquida, indicando las unidades correspondientes para k_L .
Nota: lb indica libras (masa), y ft pies (longitud).

Solución: (2) 692,62; (3) $0,403 \text{ lb} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; (4) 1,598; (5) $0,0451 \text{ ft} \cdot \text{s}^{-1}$; (6) 190,67; (7) 3,34 $\text{lb} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; (8) 1675,07; (9) $6,67 \cdot 10^{-4} \text{ ft} \cdot \text{s}^{-1}$

7. 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:

$$k_x = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$k_y = 0,01 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}$$

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:

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

Solución: a) $k_L = 4,975 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y $k_G = 4,975 \cdot 10^{-5} \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$, b) $4,975 \cdot 10^{-10} \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

ANEXO

CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN LECHOS RELLENOS COLOCADOS ALEATORIAMENTE

Correlación para el cálculo del área específica de relleno mojada a_w (ft²/ft³)

$$\frac{a_w}{a_t} = 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right)^{0,75} Re_L^{*0,1} Fr_{\square}^{-0,05} We_{\square}^{0,2} \right]$$

Donde

Re_L^* es el número de Reynolds para la fase líquida $Re_L^* = \frac{u_L \rho_L}{\mu_L} \left(\frac{1}{a_t} \right)$ que se referencia a a_t [-]

Fr es el número de Froude para la fase líquida $Fr = \frac{L^2 a_t}{(\rho_L)^2 g}$ [-]

We es el número de Weber para la fase líquida $We = \frac{L^2}{\rho_L \sigma_L a_t}$ [-]

L es la densidad de flujo másico para la fase líquida [lb·ft⁻²·s⁻¹]

g es la aceleración debida a la gravedad [32,17 ft·s⁻²]

Correlación de Onda para la fase vapor

$$\frac{k_v}{(a_t D_v)} = A Re_v^{0,7} Sc_v^{0,333} (a_t d_p)^{-2}$$

Donde

k_v es el coeficiente individual de transferencia de materia de la fase vapor

a_t es el área específica interfacial del relleno [ft²·ft⁻³]

d_p es el tamaño nominal del relleno empleado [ft]

D_v es la difusividad en la fase vapor [ft²·s⁻¹]

Re_v es el número de Reynolds para la fase vapor $Re_v = \frac{u_v \rho_v}{\mu_v} \left(\frac{1}{a_t} \right)$ siendo a_t el área específica de relleno [-]

ρ_v es la densidad de la corriente de vapor [lb·ft⁻³]

Sc_v es el número de Schmidt para la fase vapor [-]

A es una constante adimensional que toma el valor $A=2$ si $d_p < 0,039$ ft y el valor $A=5,23$ si $d_p \geq 0,039$ ft

Correlación de Onda para la fase líquida:

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

Donde

k_L es el coeficiente de transferencia de materia de la fase líquida

a_t es el área específica interfacial [ft²·ft⁻³]

d_p es el tamaño nominal del relleno empleado [ft]

D_L es la difusividad en la fase líquida [ft²·s⁻¹]

Re_L es el número de Reynolds para la fase líquida $Re_L = \frac{u_L \rho_L}{\mu_L} \left(\frac{1}{a_w} \right)$ que se referencia a a_w , el área de relleno específica mojada [-]

ρ_L es la densidad para la fase líquida [lb·ft⁻³]

μ_L es la viscosidad para la fase líquida [$\text{lb} \cdot \text{ft}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
 Sc_L es el número de Schmidt para la fase líquida [-]
 g es la aceleración debida a la gravedad [$32,17 \text{ ft} \cdot \text{s}^{-2}$]

CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN CILINDROS INDIVIDUALES

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

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

Donde

Donde k_G es el coeficiente de transferencia de materia;

P es la presión total del sistema;

Sc es número adimensional de Schmidt;

G_M es la densidad de flujo molar del gas fluyendo perpendicular al cilindro en unidades de $\text{kmol}/(\text{m}^2\text{s})$;

Re_D es el número de Reynolds para flujo normal a un cilindro sólido, siendo la longitud característica el diámetro del cilindro

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

$$\frac{k_c (Sc)^{0,56}}{u_\infty} = 0,281 (Re_D)^{-0,4}$$

Donde:

k_c es el coeficiente de transferencia de materia;

Sc es número adimensional de Schmidt;

u_∞ es la velocidad lineal de la corriente de líquido;

Re_D es el número de Reynolds para flujo normal a un cilindro sólido, siendo la longitud característica el diámetro del cilindro

CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN ESFERAS INDIVIDUALES

Correlación de Frössling para convección forzada (exterior de la esfera):

$$Sh = 2 + 0,552Re_{Sp}^{1/2}Sc_{\square}^{1/3}$$

Donde

Sh es número adimensional de Sherwood, siendo la longitud característica el diámetro de la esfera.

Sc es número adimensional de Schmidt; y

Re_{Sp} es el número de Reynolds para esferas, siendo la longitud característica el diámetro de la esfera

Número de Sherwood si sólo existe difusión molecular y no hay convección forzada (exterior de la esfera):

$$Sh = 2$$

Donde

Sh es número adimensional de Sherwood, siendo la longitud característica el diámetro de la esfera.

CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN TUBERIAS

$$k_L = \frac{D_{AB}}{L} \left[0,023 (Re_D)^{0,83} (Sc)^{\frac{1}{3}} \right]$$

Donde

k_L es el coeficiente de transferencia de materia;

D_{AB} es la difusividad de la especie A en el agua [cm^2/s];

L es la longitud característica (cm);

Re_D es el número adimensional de Reynolds;

Sc es número adimensional de Schmidt;