VIII. DISEÑO DE LA 2a. TORRE ABSORBEDORA

8.1 DETERMINACION DEL FLUJO DEL LIQUIDO

Planteamiento del problema.

Se va a eliminar el SO_2 del gas producto de la combustión de un aceite residual lavándose con agua.

En la primera torre se absorbe el 70 % del SO_2 y se espera que en la segunda unidad de absorción se absorba el 20 % restante del contenido original de SO_2, para que los gases salgan con un contenido menor al 10 % de SO_2 original.

La corriente gaseosa saliente de la primera torre se dirigirá a la segunda, conservando sus características de flujo, concentraciones, presión y temperatura. El flujo de gas es de 0.71 m^3/min (0.0118 m^3/s) con una concentración de SO_2 de $1.35x10^{-4}$ a la entrada de la segunda torre. Tanto la corriente gaseosa como la corriente líquida estarán a 1 atm de presión y 25 °C de temperatura.

Se empleará agua fresca (sin contenido de SO_2) para lavar los gases.
Se utilizará un flujo de circulación del agua de 1.5 veces el mínimo.
Calcular el flujo de circulación del agua requerido para la segunda torre.
Suponer, en el equilibrio, un sistema aire-SO_2-agua.

Solución:

Nuevamente, se inicia representando la curva de equilibrio del sistema agua-SO_2-aire, y la línea de operación, en unidades de fracciones molares, a 1 atm y 25 °C,
La curva de equilibrio es la misma que la empleada en el diseño de la primera torre (ya que se trabaja en iguales condiciones de temperatura y presión), sólo que esta vez, el intervalo de concentraciones de interés es más pequeño.

Las coordenadas y_e^* y x_e^* se encuentran a partir de las presiones parciales y de c_A'(pesos de SO_2/100 pesos de H_2O) tomadas de los datos de equilibrio de la misma manera que se realizó en el diseño de la primera torre.

Tabla 8-1. Solubilidad del SO_2 en agua, 25 °C y 1 atm.

C_A'	P_A parcial, mmHg	x (10^{-4})	X (10^{-4})	y(10^{-3})	Y(10^{-3})
7.5	602.5	206.6	210.9	792.8	3825.4
5.0	394.0	138.7	140.6	518.4	1076.5
2.5	188.5	69.8	70.30	248.02	329.83
1.5	108.5	42.0	42.20	142.8	166.5
1.0	69.0	28.0	28.10	90.79	99.86
0.7	45.5	19.6488	19.687	59.87	63.68
0.5	31.0	14.0427	14.063	40.789	42.524
0.3	12.05	8.430	8.4375	15.855	16.111
0.2	7.1	5.6218	5.625	9.342	9.43
0.15	4.8	4.217	4.2187	6.3158	6.3559
0.10	3.95	2.8117	2.8125	5.1974	5.2245
0.05	1.45	1.4060	1.4062	1.9079	1.9115
0.02	0.55	0.56247	0.5625	0.72368	7.2421

Las relaciones molares correspondientes serían:

x = mol de A / moles totales de líquido
x = moles de SO_2 / moles (SO_2 + agua)

X = moles de A / moles de disolvente
$X = x / (1 - x)$

y = moles de A / moles totales de gas
y = moles de SO_2 / moles aire

Y = moles de A / moles de gas seco
$Y = y / (1 - y)$

Se toma como base 1 min (por conveniencia).
Se define L, Ls, G, Gs en kmol/min.

Se impondrá subíndice 1 para designar las corrientes al fondo de la torre, y subíndice 2 para referirse a la parte superior.

$G = 0.71\ m^3/min \times (273 / 298) \times (1 / 22.41) = 0.029$ kmol/min

$y_1 = 0.000135 = 1.35\times10^{-4}$
$Y_1 = y_1/(1-y_1) \cong 1.35\times10^{-4}$ kmol SO_2 / kmol gas seco

$G_S = G_1\,(1-Y_1) = 0.028996$ kmol/min $\cong 0.029$ kmol/min

Para la absorción del 70 % del SO_2:
$Y_2 = 0.3\ (1.35x10^{-4}) = 4.05x10^{-5}$ mol SO_2/kmol de gas seco
$y_2 = Y_2/(1 + Y_2) \cong 4.05x10^{-5}$ fmol
$x_2 = 0 \quad X_2 = 0$

En la figura 10, junto a la curva de equilibrio se trazan las líneas de operación, las cuales se originan en el punto A. Para el flujo mínimo de agua, $L_{S\,mín}$, se traza la línea $\overline{AB}$ que toca a la curva de equilibrio en el punto B. De ahí:

En $Y_1 = 1.35x10^{-4}$, $X_1^* = 1.05x10^{-5}$ (punto B)
La pendiente de la línea AB está dada por la relación $L_{S\,min}/G_S$

La pendiente m de la línea de equilibrio, entre la primera pareja de puntos proporcionada en los datos de equilibrio es:

$$m = \Delta y/\Delta x$$
$$m = (7.2368x10^{-4} - 0) / (5.6247x10^{-5} - 0)$$
$$m = 12.87$$

Por lo tanto, la línea de equilibrio, $y^* = mx$, queda representada por:

$$y^* = 12.87\ x$$

Del balance de masa :

$$L_S\,(X_1 - X_2) = G\,(Y_1 - Y_2)$$
puesto que $X_2 = 0$,
$$L_S/G_S = (Y_1 - Y_2) / X_1^*$$

$$L_{S\,mínimo} = G_S(Y_1 - Y_2) / X_1^*$$
$$L_{S\,min} = 0.029\ (1.35x10^{-4} - 4.05x10^{-5} / 1.05x10^{-5}$$
$$L_{S\,min} = 0.261 \text{ kmol agua/min}$$

Para un flujo de agua igual a 1.5 veces el mínimo:

$$L_S = 1.5\ (0.261) = 0.392 \text{ kmol agua/min}$$

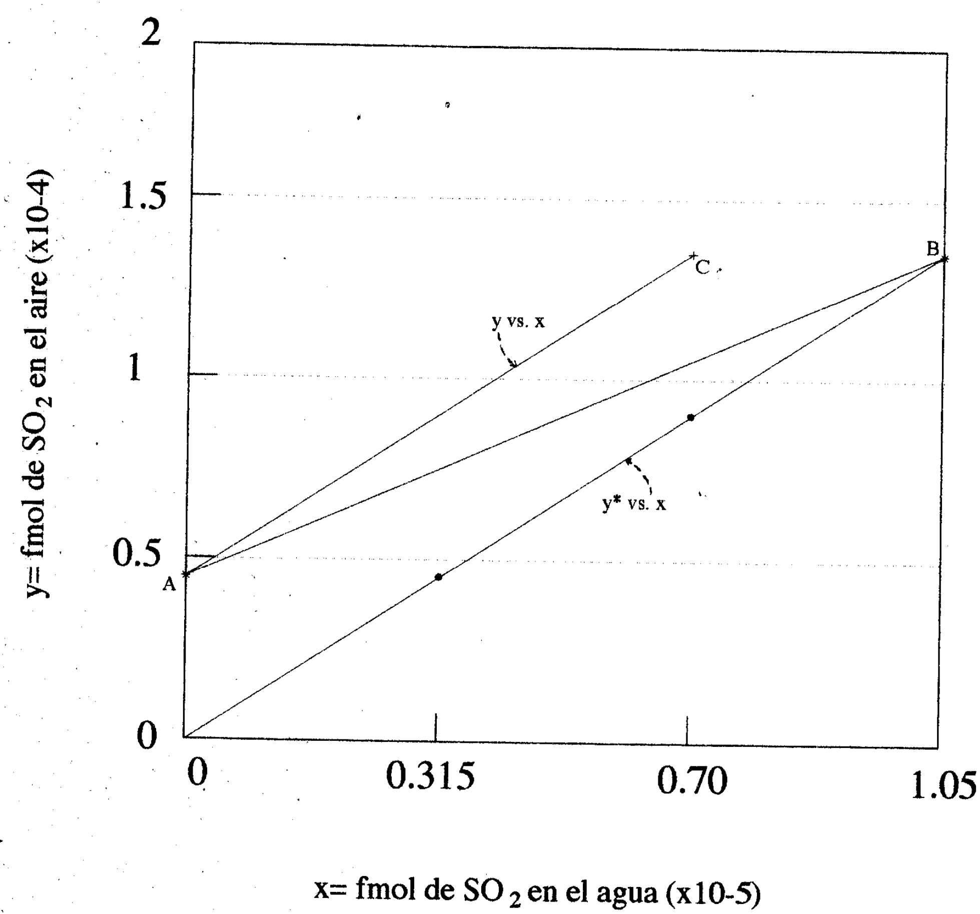
La concentración de SO_2 en el agua de salida de la primera torre será:

$$X_1 = (L_S / G_S)(Y_1 - Y_2)$$

$$X_1 = (0.029 / 0.392)\ (1.35x10^{-4} - 4.05x10^{-5})$$
$$X_1 = 0.7x10^{-5} \text{ f mol}$$

Si al punto con coordenadas $X_1 = 0.7x10^{-5}$, $Y_1 = 1.35x10^{-4}$ se le nombra punto C, entonces a la línea $\overline{AC}$ se le llamará línea operante y tendrá pendiente Ls/Gs.

LINEAS DE EQUILIBRIO Y OPERACION
2do. lavador



$y^* = 12.87x$, $y = 13.5x$

Sistema Aire-SO_2-agua, 25°C, 1 atm

Fig. 10 Líneas de equilibrio y operación, 2do. absorbedor.

Respuesta. Para 1.5 veces el mínimo, el flujo de circulación del agua es de 0.392 kmol/min = 7.05 kg/min = 0.1175 kg/seg. Este flujo de agua es el mismo que el necesario en la primera torre absorbedora, debido a que las condiciones son muy similares (presión, temperatura y grado de eliminación).

8.2 DETERMINACION DEL DIAMETRO DE LA TORRE

Planteamiento del problema.

Se pretende eliminar el SO_2 contenido en un gas con características similares a las del aire, poniendo el gas a contracorriente con agua en una torre empacada de anillos Pall de 16 mm (5/8 plg). El gas entra con un flujo de 0.71 m^3/min a 1 atmósfera y 25 °C. Contiene 0.0135 % de SO_2 y se eliminará el 70 %. El flujo de agua, previamente calculado, entrará a 0.392 kmol/min (7 kg/min).

Escoger un diámetro adecuado de la torre.

Solución:

Datos:

$\rho_{H_2O,\,25°C} = \rho_L = 997.045$ kg/m^3 = 62.113 lb/pie^3
$\mu_{H_2O,\,25°C} = 0.894$ cp
Peso molecular del gas de entrada (PM) = 30.49
$\rho_G = \rho_{Gas,\,25°C} = (30.49 / 22.41) \times (273 / 298) = 1.19$ kg/m^3 = 0.07766 lb/pie^3

$y_1 = 1.35\times10^{-4} \cong Y_1$ $\quad$ $y_2 = 4.05\times10^{-5} \cong Y_2$
$x_1 = 0.70\times10^{-5} \cong X_1$ $\quad$ $x_2 = 0 = X_2$

El diámetro selecionado se ajustará a los flujos promedio de gas y agua.

Flujo volumétrico del gas de entrada = V = 0.71 m^3/min = 0.0118 m^3/s
Flujo molar del gas = G = 0.029 kmol/min = 4.83×10^{-4} kmol/s
Flujo másico = G′ = 0.87 kg/min = 0.014 kg/seg

Para una absorción del 70 % del SO_2:

SO_2 absorbido = (0.029 kmol/min) ($1.35x10^{-4}$) (.7)(64 kg/kmol)
= $1.754x10^{-4}$ kg/min = 2.74 x 10^{-6} kmol/min

Flujo de líquido a la salida = L′ = 7.05 + $1.754x10^{-4}$ ≅ 7.05 kg/min

Determinación del diamétro (D.I.) de la torre y caída de presión:

Se supone D.I. de 12.5 cm (5 plg).

Area de sección transversal = $\pi(D.I.)^2/4 = \pi(.125\ m)^2/4$
$A_{S.T.}$ =0.01227 m^2

G = (0.014 kg/seg) / 0.01227 m^2 = 1.145 kg/m^2.s = 0.234 lb/pie^2.s = 842.5 lb/pie^2.hr
L = 0.1175 / 0.01227 = 9.58 kg/m^2.s = 1.957 lb/pie^2.s = 7,046 lb/pie^2.hr

De el Apéndice K (Fig. 18-38, Manual del I. Q; 1986), calculamos la abscisa:

L, G [=] lb/pie^2.s
ρ_G, ρ_L [=] lb/pie^3

$$(L/G)(\rho_G / \rho_L)^{1/2} = (1.957 / 0.234)(0.07766 / 62.113)^{1/2} = 0.297$$

Para el cálculo de la ordenada:

Para anillos Pall, 16 mm (5/8 plg):
F_P = 97 (Apéndice L)
$\psi = \rho_{H_2O}/\rho_L = 1$
g_c = 32.2 lb.pie/lb.s^2
$\mu^{0.2}$ = 0.978

$$G^2F_P\psi\mu^{0.2} / \rho_G\rho_Lg_C = (0.234)^2(97)(1)(0.978) / [(0.07766)(62.113)(32.2)]$$
$$G^2F_P\psi\mu^{0.2} / \rho_G\rho_Lg_C = 0.0335$$

De acuerdo con el Apéndice K, a la intersección de ambas coordenadas le corresponde una caída de presión, ΔP, de 0.50 plgH_2O/pie, mientras en el Apéndice M (Fig. 9-11A Ludwig), este punto cae muy cerca de la línea B, que representa la mayoría de los datos.

Tal como en el caso de la primera torre, se acepta como adecuado un D.I. de 12.5 cm, produciéndose una ΔP de 0.5 plg/pie. Como era de esperarse, los diámetros de ambas torres resultaron iguales, dado que ambas manejan los mismos flujos de líquido y gas.

8.3 DETERMINACION DE LA ALTURA DE LA TORRE

Planteamiento del problema.

El absorbedor del ejemplo anterior, una torre empacada con diámetro de 12.5 cm (5 plg.), llena de anillos Pall de 16 mm (5/8 plg.), operará bajo las siguientes condiciones:

Gas:
Contenido de SO_2:

entrada: $y_1 = 1.35x10^{-4} \cong Y_1$
salida: $y_2 = 4.05x10^{-5} \cong Y_2$

Flujo de entrada = 0.71 m^3/min = $4.83x10^{-4}$ kmol/s = G
G´ = (0.014 kg/seg)/0.01227 m^2 = 1.145 kg/m^2.s = 0.234 lb/pie^2.s = 842.5 lb/pie^2.hr
Gas sin SO_2 = Gs = G (1-Y_1) $\cong$ G

Líquido:
Contenido de SO_2:

entrada: libre de SO_2 ; $x_2 = 0 = X_2$
salida: $x_1 = 0.70x10^{-5} \cong X_1$

Flujo entrada = L = 0.392 kmol/min
L´ = 7.05 kg/min = 0.1175 kg/seg.
L´ = 0.1175/0.01227 = 9.58 kg/m^2.s = 1.957 lb/pie^2.s = 7,046 lb/pie^2.hr

Calcular la profundidad necesaria del empaque.

Solución:

Para determinar la altura de la sección empacada, Z, es necesario calcular la altura de una unidad de transferencia, HTU, así como el número de unidades de transferencia, N, definiendo:

$$Z = N.HTU$$

8.3.1 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE UNA UNIDAD DE TRANSFERENCIA

Whitney y Vivian encontraron las siguientes correlaciones para el cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de masa para la absorción de SO_2 en agua, utilizando anillos Rasching de 1 plg:

$$k_La = 0.048\ L^{0.82}$$
$$k_Ga = 0.028\ G^{0.7}\ L^{0.25}$$

donde G y L son los flujos promedio de gas y agua, en lb/hr.pie^2 de sección transversal de la torre ; y k_L y k_Ga en lbmol/(hr.pie^3)(lbmol/pie^3)

Aplicando la relación de áreas eficaces de intercambio se ajustaron las correlaciones encontradas por Whitney y Vivian para anillos Pall plásticos, de 16 mm, a 25 °C, y 1 atm, de la manera ya descrita en el diseño de la primera torre, quedando:

$$k_La = 0.086\ L^{0.82}$$
$$k_Ga = 0.050\ G^{0.7}\ L^{0.25}$$

De donde se obtienen las alturas de unidades de transferencia individuales:

$$H_L = 0.1872\ L^{0.18},\ \text{en pies,}$$
$$H_G = 0.242\ G^{0.3}/L^{025}\ ,\ \text{en pies}$$

Mientras que las resistencias globales son:

$$H_{OL} = 0.1872\ L^{0.18} + 0.0303\ L^{0.75}/G^{0.7}\ ,\ \text{en pies}$$
$$H_{OG} = 0.242\ G^{0.3}/L^{025} + 1.5\ G/L^{0.82}\ ,\ \text{en pies}$$

donde G y L se dan en lb/pie^2.h

Si: G = 842.5 lb/pie^2.hr y L = 7046 lb/pie^2.hr:

H_L = 0.9226 pies
H_{OL} = 0.9226 + 0.2088 = 1.1314 pies
H_G = 0.20 pies
H_{OG} = 0.20 + 0.883 = 1.083 pies

8.3.2 DETERMINACION DEL NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA

El número de unidades de transferencia para mezclas diluídas, con líneas de equilibrio y operante rectas, se define como:

$$N_{OG} = (y_1 - y_2) / (y - y^*)_M$$

$$(y - y^*)_M = [(y - y^*)_1 - (y - y^*)_2] / \ln [(y - y^*)_1 / (y - y^*_2)]$$

Mientras que para la fase líquida

$$N_{OL} = (x_1 - x_2)/(x^* - x)_M$$

$$(x^* - x)_M = [(x^* - x)_1 - (x^* - x)_2] / \ln [(x^* - x)_1 / (x^* - x)_2]$$

En este problema:

$y_1 = 1.35x10^{-4}$, $x_1 = 0.70x10^{-5}$; $y_1^* = mx_1 = 9x10^{-5}$, $x_1^* = y_1/m = 1.05x10^{-5}$
$y^* = mx = 12.87\ x$; $m = 12.87$
$(y - y^*)_1 = 0.45x10^{-4}$; $(x^* - x)_1 = 0.349x10^{-5}$

$y_2 = 4.05x10^{-5}$, $x_2 = 0$, $y_2^* = mx_2 = 0$, $x_2^* = y_2/m = 0.315x10^{-5}$
$(y - y^*)_2 = 4.05x10^{-5}$; $(x^* - x)_2 = 0.315x10^{-5}$

Las diferencias medias logarítmicas de las concentraciones son:

$$(y - y^*)_M = [0.45x10^{-4} - 4.05x10^{-5}] / \ln [0.45x10^{-4} / 4.05x10^{-4}]$$
$$= 4.271x10^{-5}$$

Mientras que:

$$N_{OG} = (y_1 - y_2) / (y - y^*)_M$$
$$N_{OG} = (1.35x10^{-4} - 4.05x10^{-5}) / 4.271x10^{-5}$$
$$N_{OG} = 2.212571$$

Y para la fase líquida:

$$(x^* - x)_1 = 0.394x10^{-5}$$
$$(x^* - x)_2 = 0.315x10^{-5}$$
$$(x^* - x)_M = 0.332x10^{-5}$$

$$N_{OL} = (0.7x10^{-5} - 0) / 0.332x10^{-5}$$
$$N_{OL} = 2.1072$$

8.3.3 DETERMINACION DE LA ALTURA TOTAL DE EMPAQUE

Si:

$$N_{OG} = 2.212571 \text{ y } H_{OG} = 1.083 \text{ pies,}$$

$$Z = 2.396 \text{ pies} = 73 \text{ cm}$$

$$N_{OL} = 2.1072 \;\; y \;\; H_{OL} = 1.1314 \text{ pies},$$

$$Z = 2.3841 \text{ pies} = 72.7 \text{ cm}$$

Respuesta. La altura de la sección de empaque es de 73 cm. Dado que Z obtenida para la fase líquida concuerda para la Z del gas, el empleo de los coeficientes globales, así como las simplificaciones para sistemas diluídos y las modificaciones a los coeficientes de transferencia de masa para anillos Pall, son adecuados.

8.4 EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE LA TORRE

Planteamiento del problema.

Se trata de checar el diseño de una torre de absorción con D.I. de 12.5 cm, empacada con anillos Pall de 16 mm (5/8 plg), y una altura igual a 73 cm (2.4 pies).

Solución.

Caída de presión total

De los rangos de operación, con:

$$(L / G)(\rho_G / \rho_L)^{1/2} = 0.297 \;\; \text{(abscisa)}$$
$$G^2 F_P \psi \mu^{0.2} / \rho_G \rho_L g_C = 0.0335 \;\; \text{(ordenada)}$$

El Apéndice K muestra una $\Delta P = 0.5$ plg H_2O/pie de empaque irrigado.

La caída de presión para el empaque seco se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta P/Z = 1.405 \times 10^{-10} \, C_D \, G'^2/\rho_G$$

donde:
$C_D = 207$ (Apéndice P)
ρ_G [=] lb/pie^3
G' [=] lb/pie^2.hr

SO_2 absorbido = 1.754×10^{-4} kg/min = 0.858 kg/m^2.hr = 0.175 lb/pie^2.hr
$G' = G' - SO_2$ absorbido = 842.5 - 0.175 = 842.325 lb/pie^2.hr

$$\Delta P/Z = 1.405x10^{-10}\,(207)\,(842.325)^2/0.07766$$
$$\Delta P/Z = 0.266\ lb/pie^2.hr$$

La caída de presión total es:

$$\Delta P_T = \Delta P_{empaque\ seco} + \Delta P_{empaque\ húmedo}$$
$$\Delta P/Z = (0.266 + 0.5) = 0.766\ plg\ H_2O/pie\ de\ empaque$$

Si tomamos en cuenta que la altura empacada de la torre es de 2.4 pies:

$$\Delta P = 1.837\ plg\ H_2O$$

Cálculo del % estimado de inundación:

Con la abscisa de 0.297, se lee en el Ap. K la ordenada correspondiente en la línea de inundación como 0.067. De aquí:

$$\%\ inudación = (100)\ 0.0335/0.067$$
$$\%\ inundación = 50\ \%$$

Puesto que la inundación representa la condición de capacidad máxima para una columna empacada, el hecho de haber obtenido un 50 % aproximado de inundación, significa que la torre, bajo las condiciones señaladas, trabaja a la mitad de su capacidad total.

Con la misma abscisa de 0.297, se busca la ordenada correspondiente a la línea B del Ap. M, y se encuentra que ésta es muy cercana a la de operación (0.0335), lo cual indica que se está trabajando a condiciones óptimas de carga.

De acuerdo a los valores encontrados de ΔP, % de inundación y condiciones de carga, se acepta el D.I. de 12.5 cm como adecuado.