

EJEMPLO 5.2-2. Difusión de Agua a Través de Aire en Reposo

El agua que está en el fondo de un tubo metálico estrecho se mantiene a temperatura constante de 293 K. La presión total del aire (que se supone seco) es 1.01325×10^5 Pa (1.0 atm) y la temperatura es 293 K (20°C). El agua se evapora y se difunde a través del aire en el tubo y la trayectoria de difusión $z_2 - z_1$ tiene 6 plg de longitud. (El diagrama es similar al de la Fig. 5.2-2a.) Calcúlese la velocidad de evaporación en estado estable en mol lb/hr · pie² y mol kg/seg · m². La difusividad del vapor de agua a 293 K y 1 atm de presión es 0.250×10^{-4} m²/seg.

Solución: La difusividad se convierte en pie²/hr usando el factor de conversión del Apéndice A.1

$$D_{AB} = 0.250 \times 10^{-4} (3.875 \times 10^{-4}) = 0.969 \text{ pie}^2/\text{hr}$$

En base al Apéndice A.2, la presión de vapor del agua a 20°C es 17.54 mm o $p_{A1} = 17.54/760 = 0.0231$ atm = $0.0231(1.01325 \times 10^5) = 2.341 \times 10^3$ Pa, $p_{A2} = 0$ (aire puro). Puesto que la temperatura es 20°C (68°F), $T = 460 + 68 = 528^\circ\text{R} = 293$ K. Del Apéndice A.1, $R = 0.730$ pie³ · atm/mol lb · °R. Para calcular el valor de p_{BM} a partir de la Ec. (5.2-21),

$$p_{B1} = P - p_{A1} = 1.00 - 0.0231 = 0.9769 \text{ atm}$$

$$p_{B2} = P - p_{A2} = 1.00 - 0 = 1.00 \text{ atm}$$

$$p_{BM} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln(p_{B2}/p_{B1})} = \frac{1.00 - 0.9769}{\ln(1.00/0.9769)} = 0.988 \text{ atm} = 1.001 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Puesto que p_{B1} es cercano a p_{B2} puede emplearse la media lineal $(p_{B1} + p_{B2})/2$ para un valor muy similar a p_{BM} .

Sustituyendo en la Ec. (5.2-22) con $z_2 - z_1 = 0.5$ pie (0.1524 m),

$$N_A = \frac{D_{AB}P}{RT(z_2 - z_1)p_{BM}} (p_{A1} - p_{A2}) = \frac{(0.969)(1.0)(0.0231 - 0)}{(0.730)(528)(0.5)(0.988)}$$

$$N_A = 1.175 \times 10^{-4} \text{ mol lb/hr} \cdot \text{pie}^2$$

$$N_A = \frac{(0.250 \times 10^{-4})(1.01325 \times 10^5)(2.341 \times 10^3 - 0)}{(8314)(293)(0.1524)(1.001 \times 10^5)}$$

$$= 1.595 \times 10^{-7} \text{ mol kg/seg} \cdot \text{m}^2$$

EJEMPLO 5.3-1. Difusión de Etanol (A) a Través de Agua (B)

Una solución de etanol (A)-agua (B) en forma de película estacionaria de 2.0 mm de espesor a 293 K, está en contacto con la superficie de un disolvente orgánico en el cual el etanol es soluble, pero el agua no. Por tanto, $N_B = 0$. En el punto 1, la concentración del etanol es 16.8% en peso y la solución tiene una densidad $\rho_1 = 972.8 \text{ kg/m}^3$. En el punto 2, la concentración del etanol es 6.8% en peso y $\rho_2 = 988.1 \text{ kg/m}^3$ (P1). La difusividad del etanol es $2.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{hr}$ (T2). Calcúlese el flujo de estado estable N_A .

Solución: La difusividad es $D_{AB} = 2.87 \times 10^{-5} / (3.875 \times 10^4) = 0.740 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{seg}$. Los pesos moleculares de A y B son $M_A = 46.05$ y $M_B = 18.02$. Para un porcentaje en peso de 6.8, la fracción mol de etanol (A) es la siguiente cuando se usan 100 kg de solución:

$$x_{A2} = \frac{6.8/46.05}{6.8/46.05 + 93.2/18.02} = \frac{0.1477}{0.1477 + 5.17} = 0.0277$$

Entonces, $x_{B2} = 1 - 0.0277 = 0.9723$. Calculando x_{A1} de manera similar $x_{A1} = 0.0732$ y $x_{B1} = 1 - 0.0732 = 0.9268$. Para calcular el peso molecular M_2 en el punto 2,

$$M_2 = \frac{100 \text{ kg}}{(0.1477 + 5.17) \text{ mol kg}} = 18.75 \text{ kg/mol kg}$$

De manera similar, $M_1 = 20.07$. Con la Ec. (5.3-2),

$$c_{\text{prom}} = \frac{\rho_1/M_1 + \rho_2/M_2}{2} = \frac{972.8/20.07 + 988.1/18.75}{2} = 50.6 \text{ mol kg/m}^3$$

Para calcular x_{BM} con la Ec. (5.3-4) puede emplearse la media lineal, pues x_{B1} y x_{B2} son valores bastante cercanos entre sí,

$$x_{BM} = \frac{x_{B1} + x_{B2}}{2} = \frac{0.9268 + 0.9723}{2} = 0.949$$

Sustituyendo en la Ec. (5.3-3) y resolviendo,

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{D_{AB} c_{\text{prom}}}{(z_2 - z_1) x_{BM}} (x_{A1} - x_{A2}) = \frac{(0.740 \times 10^{-9})(50.6)(0.0732 - 0.0277)}{(2/1000)(0.949)} \\ &= 8.99 \times 10^{-7} \text{ mol kg/seg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

EJEMPLO 5.5-1. Difusión de H_2 a Través de una Membrana de Neopreno

A través de una membrana de neopreno vulcanizado de 0.5 mm de espesor, se está difundiendo hidrógeno gaseoso a 17°C y 0.010 atm de presión parcial. La presión del H_2 del otro lado de la membrana es cero. Calcúlese el flujo específico de estado estable, suponiendo que la única resistencia a la difusión es la membrana. La solubilidad S del H_2 gaseoso en el neopreno a 17°C es 0.051 m³ (a TPE de 0°C y 1 atm)/m³ sólido · atm y la difusividad D_{AB} es 1.03×10^{-10} m²/seg, a 17°C.

Solución: En la Fig. 5.5-1 se muestra un diagrama simple de las concentraciones. La concentración de equilibrio c_{A1} en la superficie interior calculada con la Ec. (5.5-5) es,

$$c_{A1} = \frac{S}{22.414} p_{A1} = \frac{(0.051)(0.010)}{22.414} = 2.28 \times 10^{-5} \text{ mol kg } H_2/\text{m}^3 \text{ sólido}$$

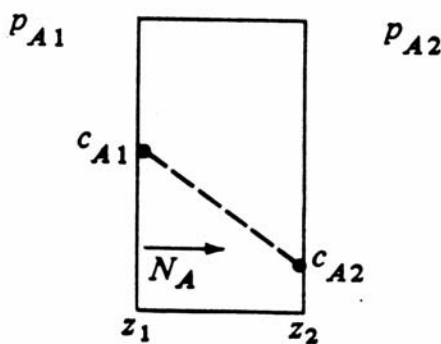


FIGURA 5.5-1. Concentraciones para el Ej. 5.5-1

Puesto que el valor de p_{A2} del otro lado es 0, $c_{A2} = 0$. Sustituyendo en la Ec. (5.5-2) y resolviendo,

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{D_{AB}(c_{A1} - c_{A2})}{z_2 - z_1} = \frac{(1.03 \times 10^{-10})(2.28 \times 10^{-5} - 0)}{(0.5 - 0)/1000} \\ &= 4.69 \times 10^{-12} \text{ mol kg } H_2/\text{seg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

EJEMPLO 5.5-2. Difusión a Través de una Película de Empaque Usando la Permeabilidad

Se tiene a prueba una película de polietileno de 0.015 cm de espesor para el empaque de un producto farmacéutico a 30°C. Si la presión parcial del O₂ en el exterior es 0.21 atm y en el interior es 0.01 atm, calcúlese el flujo de difusión del O₂ en estado estable. Usense datos de permeabilidad de la Tabla 5.5-1. Supóngase que las resistencias a la difusión en el exterior y en el interior de la película son despreciables en comparación con la resistencia de la propia película.

Solución: En base a la Tabla 5.5-1, $P_M = 4.17(10^{-8})$ cc soluto (TPE)/(seg · cm² · atm/cm). Sustituyendo en la Ec. (5.5-8),

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{P_M(p_{A1} - p_{A2})}{(22,414)(z_2 - z_1)} = \frac{4.17(10^{-8})(0.21 - 0.01)}{(22,414)(0.015 - 0)} \\ &= 2.48 \times 10^{-11} \text{ molg/s} \cdot \text{cm}^2 \quad (2.48 \times 10^{-10} \text{ molkg/s} \cdot \text{m}^2) \end{aligned}$$

Nótese que la película de una poliamida (nylon) tiene un valor mucho menor a la permeabilidad P_M de O₂ por lo que sería un empaque más adecuado.

EJEMPLO 5.6-1. Difusión de Estado Inestable en una Placa de Gel de Agar

Una placa sólida de 5.15% de agar en peso, a 278 K y 10.16 mm de espesor, contiene una concentración uniforme de 0.1 mol kg/m³ de urea. La difusión sólo se verifica en la dirección x a través de dos superficies paralelas planas con una separación de 10.16 mm. La placa se sumerge súbitamente en agua pura turbulenta, por lo que puede suponerse que la resistencia superficial es despreciable; es decir, el coeficiente convectivo k_c es muy grande. La difusividad de la urea en el agar (consúltese la Tabla 5.4-2) es 4.72×10^{-10} m²/seg.

(a) Calcúlense las concentraciones en el punto medio de la placa (a 5.08 mm de la superficie) y a 2.54 mm de la superficie después de 10 hr.

(b) ¿Cuál sería la concentración del punto medio después de 10 hr si el espesor de la placa se redujera a la mitad?

Solución: Para la parte (a), $c_0 = 0.10$ mol kg/m³, $c_1 = 0$ para el agua pura y $c =$ concentración a la distancia x desde la línea central al tiempo t seg. El coeficiente de distribución de equilibrio K en la Ec. (5.6-16) puede suponerse igual a 1.0, pues el agua de la solución acuosa del gel y del exterior debe tener propiedades muy semejantes. A partir de la Tabla 5.6-1.

$$Y = \frac{c_1/K - c}{c_1/K - c_0} = \frac{0/1.0 - c}{0/1.0 - 0.10}$$

Además, $x_1 = 10.16/(1\,000 \times 2) = 5.08 \times 10^{-3}$ m (espesor medio de la placa), $x = 0$ (centro), $X = D_{AB}t/x_1^2 = (4.72 \times 10^{-10})(10 \times 3\,600)/(5.08 \times 10^{-3})^2 = 0.658$. La posición relativa $n = x/x_1 = 0/5.08 \times 10^{-3} = 0$ y la resistencia relativa $m = D_{AB}/Kk_c x_1 = 0$, pues k_c es muy grande (resistencia cero).

En base a la Fig. 4.3-5, para $X = 0.658$, $m = 0$ y $n = 0$,

$$Y = 0.275 = \frac{0 - c}{0 - 0.10}$$

Resolviendo, $c = 0.0275$ mol kg/m³ cuando $x = 0$.

Para el punto situado a 2.54 mm de la superficie o 2.54 mm del centro, $x = 2.54/1\,000 = 2.54 \times 10^{-3}$ m, $X = 0.658$, $m = 0$, $n = x/x_1 = 2.54 \times 10^{-3}/5.08 \times 10^{-3} = 0.5$. Entonces, en base a la Fig. 4.3-5, $Y = 0.172$. Despejando, $c = 0.0172$ mol kg/m³.

Para la parte (b) y la mitad del espesor, $X = 0.658/(0.5)^2 = 2.632$, $n = 0$ y $m = 0$. Por tanto, $Y = 0.0020$ y $c = 2.0 \times 10^{-4}$ mol kg/m³.

EJEMPLO 5.6-2. Difusión de Estado Inestable en una Placa Semiinfinita

Una placa muy gruesa tiene concentración uniforme de soluto A de $c_0 = 1.0 \times 10^{-2}$ mol kg A/m³. La cara frontal se expone de manera repentina a la acción de un flujo de fluido con una concentración $c_1 = 0.10$ mol kg A/m³ y coeficiente convectivo $k_c = 2 \times 10^{-7}$ m/seg. El coeficiente de distribución de equilibrio $K = c_{Li}/c_i = 2.0$. Suponiendo que la placa es un sólido semiinfinito, calcúlese la concentración en el sólido en la superficie ($x = 0$) y a $x = 0.01$ de la superficie después de $t = 3 \times 10^4$ seg. La difusividad en el sólido es $D_{AB} = 4 \times 10^{-9}$ m²/seg.

Solución: Para usar la Fig. 4.3-3,

$$\frac{Kk_c}{D_{AB}} \sqrt{D_{AB}t} = \frac{(2.0)(2 \times 10^{-7})}{4 \times 10^{-9}} \sqrt{(4 \times 10^{-9})(3 \times 10^4)} = 1.095$$

Para $x = 0.01$ m de la superficie del sólido,

$$\frac{x}{2\sqrt{D_{AB}t}} = \frac{0.01}{2\sqrt{(4 \times 10^{-9})(3 \times 10^4)}} = 0.457$$

En base a la gráfica, $1 - Y = 0.26$. Entonces, sustituyendo en la ecuación para $(1 - Y)$ de la Tabla 5.6-1 y resolviendo,

$$1 - Y = \frac{c - c_0}{c_1/K - c_0} = \frac{c - 1 \times 10^{-2}}{(10 \times 10^{-2})/2 - 1 \times 10^{-2}} = 0.26$$

$$c = 2.04 \times 10^{-2} \text{ mol kg/m}^3 \quad (\text{cuando } x = 0.01 \text{ m})$$

Para $x = 0$ m (esto es, en la superficie del sólido),

$$\frac{x}{2\sqrt{D_{AB}t}} = 0$$

De acuerdo con la gráfica, $1 - Y = 0.62$. Despejando, $c = 3.48 \times 10^{-2}$. Este valor es el mismo que el de c_1 que muestra la Fig. 5.6-3b. Para calcular la concentración c_{Li} en el líquido de la interfase,

$$C_{Li} = Kc_i = (2.0)(3.48 \times 10^{-2}) = 6.96 \times 10^{-2} \text{ mol kg/m}^3$$

Una gráfica de estos valores sería similar a la Fig. 5.6-3b.