

U N I V E R S I D A D D E C H I L E
FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS Y FARMACEUTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORMATIVAS

Serie : Monografías sobre Ingeniería de Alimentos
Publicación : Nº 6

" TRANSFERENCIA DE MASA "

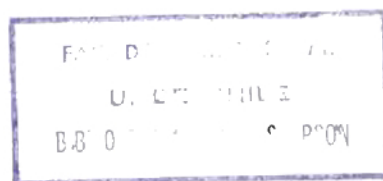
Prof. Ing Eduardo S. Castro M.
Prof. Ing. Fernando Osorio L.

U N I V E R S I D A D D E C H I L E
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS Y FARMACÉUTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORMATIVAS

Serie : Monografías sobre Ingeniería de Alimentos

Publicación : Nº 6

" T R A N S F E R E N C I A D E M A S A "



Prof. Ing Eduardo S. Castro M.
Prof. Ing. Fernando Osorio L.

12219

1 9 8 4

P R O L O G O

Esta obra está destinada a Ingenieros en Alimentos y los ejemplos extraídos de la literatura son los más ilustrativos de las materias tratadas, esto le permite aplicar los principios de transferencia de masa a los problemas propios de su especialidad.

I	Introducción	1
II	Transferencia de masa	1
	2.1 Operaciones con transferencia de masa	1
	2.2 Ley de Fick	6
	2.3 Difusividad de gases	9
	2.4 Difusión molecular en líquidos	14
	2.5 Difusión en sólidos	17
III	Coefficientes de transferencia de masa	23
	3.1 Coeficientes de transferencia de masa en flujo laminar	23
	3.2 Coeficientes de transferencia de masa en flujo turbulento	26
	3.3 Analogías entre transferencia de masa, calor y momento	28
IV	Transferencia de masa en la interfase	40
	4.1 Coeficientes globales de transferencia de masa	43
	4.2 Coeficientes locales: caso general	46
V	Procesos de transferencia de masa	53
	5.1 Proceso en co-corriente	54
	5.2 Proceso en contra corriente	56
	5.3 Proceso en cascada	57
	5.4 Absorción de gases	63
VI	Bibliografía	77

Anexo 1 : Ejercicios resueltos

Anexo 2 : Ejercicios propuestos

I INTRODUCCION

Dentro de las operaciones básicas hay un cierto número cuya finalidad es la separación total o parcial de los componentes de una mezcla por difusión a través de la misma o de otra con la que aquella está en contacto. Aunque estas operaciones pueden diferir en otros muchos aspectos, las leyes en que se basan son las mismas.

Muchas de estas operaciones se desarrollaron de modo independiente, con aparatos y métodos propios, pero a medida que se profundiza en su estudio, eliminando lo que hay de empírico en los aparatos y en los métodos, se ponen de manifiesto analogías que son consecuencia de la identidad de principios básicos. Si se unen a estos la igualdad de las finalidades -separación de mezclas- se comprende la conveniencia de estudiar conjuntamente muchos de los aspectos de estas operaciones difusionales u operaciones de transferencia de masa.

II TRANSFERENCIA DE MASA

2.1 Operaciones con transferencia de masa

2.1.1. Clasificación de las separaciones con transferencia de masa.

Los 3 estados de agregación: gas, líquido y sólido permiten 6 posibilidades de contacto de fases:

- i) gas-gas : esta categoría no es prácticamente realizable ya que todos los gases son solubles entre sí.
- ii) gas-líquido : -Destilación (ácido acético y agua)- Absorción gaseosa (desorción).
(Ejemplo: mezcla amoníaco-aire en contacto con agua líquida, una gran cantidad de amoníaco, pero esencialmente nada de aire, se disolverá en el líquido).
- Humidificación (dehumidificación) contacto entre aire seco y agua líquida.
- iii) gas-sólido : -sublimación de un sólido - secado.

iv) líq-líq : extracción líquido, contacto directo de 2 fases inmiscibles. Ejemplo sol de acetona -agua se agita con tetracloruro y se deja reposar, la acetona se encuentra en gran proporción en el tetracloruro de carbono.

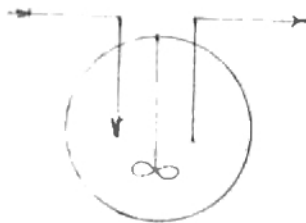
v) líquido-sólido :

- cristalización fraccionada
- lixiviación: extracción mediante hexano del aceite de las oleaginosas.
- adsorción: eliminación de las materias coloreadas que contaminan las soluciones impuras de agua poniendo en contacto las soluciones líquidas con carbón activado.

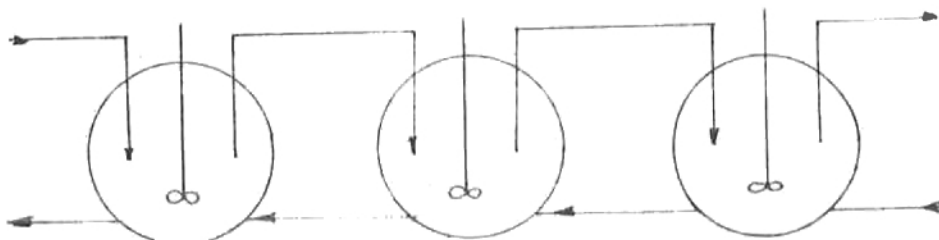
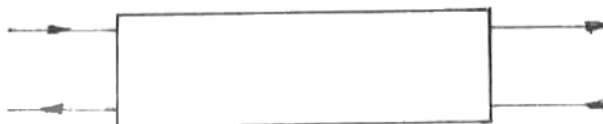
vi) sólido-sólido : debido a las velocidades de difusión extremadamente lenta entre fases sólidas, no existen operaciones industriales de separación en esta categoría.

Clasificación según las características de los procesos

- Discontinuos : Batch - No estacionario
- Semicontínuos



- Continuos



Definiciones

ρ_1 : concentración másica de la especie 1

$$\rho_1 = \frac{\text{g de } i}{\text{vol total}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cc}} \right]$$

w_1 : fracción másica de la especie 1 = $\frac{\text{g de } i}{\text{g totales}} = \frac{\rho_1}{\rho}$

C_1 : concentración molar de la especie 1 = $\frac{\text{moles } i}{\text{vol total}} = \frac{\rho_1}{M_1}$

M_1 : peso molecular de la especie i

X_1 : fracción molar de la especie 1 = $\frac{\text{moles } i}{\text{moles totales}} = \frac{C_1}{C}$

$$C = \sum_{i=1}^m C_i \quad \rho = \sum_{i=1}^m \rho_i$$

Velocidades

$\rho_1 v_1 = \left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right] \left[\frac{\text{longitud}}{\text{tiempo}} \right] = \left[\frac{\text{masa}}{\text{área} \times \text{tiempo}} \right] = \text{flujo másico por unidad de superficie}$

En base a esto se puede definir una velocidad media másica, que es perpendicular a la dirección del flujo.

$$\bar{v} = \frac{\sum \rho_i \bar{v}_i}{\sum \rho_i} = \frac{\sum \rho_i \bar{v}_i}{\rho}$$

velocidad media másica con respecto a ejes fijos: es la velocidad que puede medirse con un tubo pitot

$$V = \bar{v}^* = \frac{\sum C_i v_i}{\sum C_i} = \frac{\sum C_i \bar{v}_i}{C}$$

velocidad media molar con respecto a ejes fijos.

$C \bar{v}^*$: velocidad local con la que los moles atraviesan una sección unitaria colocada perpendicularmente a la velocidad.

Velocidad de difusión: se define para elementos binarios

\bar{V}_{AD} : velocidad de la especie A por difusión.

$\bar{V}_{AD} = \bar{V}_A - \bar{V}$ velocidad de difusión másica

\bar{V}_A : velocidad de la especie A

\bar{V} : velocidad media másica

\bar{V}_{AD}^* : $\bar{V}_A - \bar{V}^*$ velocidad de difusión molar

Flujos: el flujo de transferencia de masa de una especie dada, es un vector que indica la cantidad de una especie particular en unidades molares o másicas, que cruza un área dada por unidad de tiempo.

Densidad de flujo molar : $\bar{N}_A = C_A \bar{V}_A \left[\frac{\text{moles}}{\text{área x tiempo}} \right]$: representa

los moles de A que cruzan la unidad de área por unidad de tiempo, con respecto a coordenadas fijas.

Densidad de flujo másico : $\bar{n}_A = \int_A \bar{V}_A$ = representa los gramos de A que cruzan la unidad de área por unidad de tiempo, con respecto a coordenadas fijas.

En una solución no uniforme conteniendo dos constituyentes, estos deben difundir entre sí y el resultado final es la uniformidad, esto conduce al uso de 2 flujos para describir el movimiento de un componente.

N : el flujo relativo a un lugar fijo en el espacio, y

J : el flujo de un componente relativo a la velocidad molar media de todos los componentes.

N : es importante en las aplicaciones del proyecto del equipo.

J : es característica de la naturaleza del componente.

Ejemplo: Un pescador está más interesado en la velocidad a la cual nada un pez río arriba (contra la corriente) para alcanzar su anzuelo (análogo a N); pero la velocidad del pez relativa a la corriente (análogo a J) es más característica de la habilidad del pez para nadar.

luego, con respecto a ejes móviles.

Flujo molar : $\bar{J}_A^* = C_A \bar{V}_{AD}^*$ ($\bar{V}_{AD}^* = \bar{V}_A - \bar{V}^*$)

Flujo másico : $\bar{J}_A = \int_A \bar{V}_{AD}$

$$J_A^* = C_A \bar{v}_A^* = C_A (\bar{v}_A - \bar{v}^*) = \underbrace{C_A \bar{v}_A}_{\bar{N}_A} - \underbrace{C_A \bar{v}^*}_{\frac{C_A (C_A \bar{v}_A + C_B \bar{v}_B)}{C_A + C_B}}$$

$$\text{ya que: } \bar{v}^* = \frac{\sum C_i \bar{v}_i}{\sum C_i} = \frac{C_1 \bar{v}_1 + C_2 \bar{v}_2}{C_1 + C_2}$$

$$x_1 = \frac{C_1}{C} \Rightarrow x_A = \frac{C_A}{C_A + C_B}$$

$$J_A^* = \bar{N}_A - \frac{C_A}{C_A + C_B} (C_A \bar{v}_A + C_B \bar{v}_B)$$

$$J_A^* = \bar{N}_A - x_A (\bar{N}_A + \bar{N}_B)$$

extrapolando

$$J_1^* = \bar{N}_1 - x_1 \sum_{h=1}^m \bar{N}_h$$

$$J_1 = \bar{n}_1 - w_1 \sum_{h=1}^m n_h$$

Se referirá en lo sucesivo a las operaciones difusionales realizadas por contacto entre fases inmiscibles.

Contacto entre fases inmiscibles.

Se supondrá que las 2 fases, separadas por la superficie que se llama interfase, se mueven con velocidades globales diferentes.

Se puede distinguir en cada fase una capa laminar, adjunta a la interfase y separada del núcleo turbulento por una zona de transición.

Si en la zona de régimen turbulento existe en un momento dado una diferencia de concentraciones de un componente en 2 puntos de dicha zona esta diferencia disminuirá rápidamente ya que el movimiento desordenado de todas las partículas de fluido tiende a igualar las concentraciones.

En la capa laminar las partículas se mueven paralelas a la interfase y no existe causa "exterior" que tienda a desplazarlas perpendicular a la misma. Sin embargo, las moléculas de "una clase", pueden tener un movimiento global relativo debido a causas "interiores", el

desplazamiento se origina de las zonas de mayor concentración a las de menor concentración, y no es diferente del que tendría lugar en el seno de un fluido en reposo. Por deberse a fuerzas moleculares, este fenómeno se conoce con el nombre de difusión molecular.

En la difusión de un componente a través de la capa de transición y el núcleo turbulento el movimiento de las partículas se superpone a la difusión molecular, luego la velocidad de transporte de componente depende de las condiciones del movimiento de la fase.

El estudio de la difusión sigue el siguiente orden:

- a) difusión molecular (fluidos en reposo o capas laminares).
- b) difusión en flujo turbulento (en el seno de una fase) perpendicularmente a la dirección global del flujo, y a lo largo de una distancia que comprende la capa laminar, la de transición y la zona turbulenta.
- c) difusión entre fases.

2.2. Ley de Fick de la difusión

Si una solución es totalmente uniforme en la concentración de sus componentes, no se lleva a cabo ninguna alteración; pero si no es completamente uniforme, la solución se dirige espontáneamente por difusión al estado uniforme, moviéndose las sustancias desde la zona de mayor concentración hacia la de menor concentración.

En consecuencia, el régimen al cual se mueve al soluto, en cualquier punto y en una dirección cualquiera, dependerá del gradiente de concentración en ese punto y en esa dirección.

Ley de Fick: Dice que el flujo de masa por unidad de área perpendicular a la dirección del flujo es proporcional al gradiente de concentración; la constante de proporcionalidad se llama: DIFUSIVIDAD, para $T = \text{cte}$ y $P = \text{cte}$.

Expresión matemática:
$$J_A^* = - D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

para un componente A.

\bar{J}_A : flujo molar en la dirección z relativa a la velocidad molar media.

D_{AB} : difusividad o coeficiente de difusión de un componente A en solución en B.

Z : dirección del movimiento.

C_A : concentración del componente A

El signo (-) indica que la difusión se produce desde la concentración mayor a la menor $C_{A1} - C_{A2} < 0$

La difusividad debe ser definida para los sistemas:

Ej. O_2 - aire

Si se plantean las expresiones para los fenómenos de transferencia de calor, de momentum y de masa

de la ley de Fourier : $q_y = -\alpha \nabla (\rho c_p T)$ en que $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$

de la ley de Newton : $\tau_{yx} = -\nu \nabla (\rho \bar{v})$

de la ley de Fick : $J_i = -D_i \nabla (\rho w_i)$

$$\rho \left[\frac{g \text{ totales}}{cc} \right]$$

$$w_i \left[\frac{g_i}{g \text{ totales}} \right]$$

se puede concluir que son similares en forma los siguientes coeficientes:

$$\alpha, \nu, D_i \left[\frac{cm^2}{s} \right]$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \left[\frac{cm^2}{s} \right]$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{g/cm \cdot s}{g/cm^3} \right]$$

de la ley de Fick : $\bar{J}_A^* = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$

y anteriormente $\bar{J}_A^* = \bar{N}_A - X_A (\bar{N}_A + \bar{N}_B)$

$$\bar{N}_A = X_A (\bar{N}_A + \bar{N}_B) + \bar{J}_A^*$$

luego $\bar{N}_A = X_A (\bar{N}_A + \bar{N}_B) - D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$

y en forma análoga

$$\bar{N}_A = w_A (\bar{N}_A + \bar{N}_B) - D_{AB} \frac{\partial w_A}{\partial z}$$

El flujo total de la especie tiene 2 componentes:

- 1) término de arrastre: movimiento de A debido al flujo
- 11) flujo difusional: movimiento de A por difusión pura.

Difusión Molecular Unidireccional en fluidos en estado estacionario, en reposo y con flujo laminar.

Caso de difusión sólo en la dirección z, N_A y $N_B = \text{Ctes}$, $D_{AB} = \text{Cte}$.

$$\bar{N}_A = X_A (\bar{N}_A + \bar{N}_B) - D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

$$- D_{AB} \frac{dC_A}{dz} = N_A - X_A (N_A + N_B); X_A = \frac{C_A}{C} = \frac{C_A}{C_A + C_B}$$

$$- CD_{AB} \frac{dC_A}{dz} = C N_A - C_A (N_A + N_B)$$

C_{A2} : Conc. baja

C_{A1} : Conc. alta

$$\int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{-dC_A}{C N_A - C_A (N_A + N_B)} = \frac{1}{CD_{AB}} \int_{z_1}^{z_2} dz$$

$$\frac{1}{(N_A + N_B)} \left[\frac{N_A C - C_{A2} (N_A + N_B)}{N_A C - C_{A1} (N_A + N_B)} \right] = \frac{z_2 - z_1}{CD_{AB}}$$

Con esta ecuación, haciendo las transformaciones adecuadas, se pueden resolver problemas de difusión en gases para el caso de difusión en estado estacionario de A a través de B que no difunde ($N_B = 0$). (Estancado)

Ejemplo: El O_2 (A) difunde a través de $CO(B)$ en condiciones estacionarias; el CO no difunde en A. La presión total es 1 atm. y la temperatura es $0^\circ C$. La presión parcial del O_2 en dos planos separados 0,2 cm. es 100 y 50 mm Hg respectivamente. La difusividad para la mezcla es $0,185 \text{ cm}^2/\text{s}$. Calcular la velocidad de difusión del O_2 en $\text{gmol}/\text{cm}^2 \text{ s}$, a través de los 2 planos.