

CONTENIDO

Prólogo	xv
Introducción	xvii
Notación	xxi

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DEL TRANSPORTE DE MASA	1
1.1 Principios básicos	2
1.1.1 Características de la difusión de masa	2
1.1.2 Descripción del fenómeno	3
1.1.3 Definiciones de velocidad media y densidad de flujo	4
1.1.4 Ecuación de mecanismo del transporte de masa	5
1.1.5 La ley de Fick en relación con coordenadas fijas	5
1.2 Difusividad	7
1.2.1 Significado y definición	7
1.2.2 Cálculo de la difusividad	7
1.2.2.1 Difusividad en gases	7
1.2.2.2 Difusividad en líquidos	11
1.2.2.3 Difusividad en sólidos	13
1.2.3 Determinación experimental de la difusividad en gases	13
1.2.4 Caso de las membranas	13
1.3 Ecuación de continuidad	14
1.3.1 Ecuación global	14
1.3.2 Ecuación para un componente de una mezcla binaria	15
1.4 Efectos acoplados	17
Preguntas	18
Problemas	18
Soluciones	19
Referencias	19

CAPÍTULO 2

MODELOS MATEMÁTICOS PARA TRANSFERENCIA DE MASA

21

2.1	Modelado de sistemas de transferencia de masa	22
2.1.1	Difusión en fase inmóvil	22
2.1.2	Difusión de un gas en otro inmóvil	27
2.1.3	Absorción con reacción química de primer orden	29
2.1.3.1	Caso análogo: absorción en un catalizador sólido	31
2.1.4	Evaporación de una esfera en un medio inmóvil infinito	34
2.1.5	Transferencia simultánea de masa y <i>momentum</i>	37
2.1.5.1	Caso análogo: absorción física en régimen transitorio	40
2.1.6	Transferencia en régimen pseudoestable	43
2.1.6.1	Caso de frontera móvil	43
2.1.6.2	Caso de condición frontera cambiante	45
2.2	Ecuaciones de transporte extendidas	46
2.2.1	Solución de las ecuaciones extendidas	48
2.2.2	Condiciones de aplicación de las ecuaciones extendidas	48
2.3	Aspectos termodinámicos	49
	Preguntas	50
	Problemas	50
	Soluciones	53
	Referencias	54

CAPÍTULO 3

TEORÍA DE LA CAPA LÍMITE

57

3.1	Capa límite hidrodinámica	58
3.1.1	Descripción del fenómeno	58
3.1.2	Solución del modelo matemático	59
3.1.3	Definición del factor de fricción	62
3.2	Capa límite térmica	62
3.2.1	Descripción del fenómeno	62
3.2.2	Solución del modelo matemático	62
3.2.3	Coefficiente de transferencia de calor	63
3.3	Capa límite de transferencia de masa	64
3.3.1	Descripción del fenómeno	64
3.3.2	Coefficiente de transferencia de masa	65
3.4	Analogía de Chilton-Colburn	66
	Preguntas	68
	Problemas	68
	Soluciones	69
	Referencias	69

CAPÍTULO 4

MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD
DE TRANSFERENCIA DE MASA

	71
Primera parte. Transferencia desde la interfase	72
4.1 Modelos de transferencia	72
4.1.1 Modelo de película estática de Whitman	72
4.2 Coeficientes de transferencia de masa. Definición	73
4.2.1 Coeficientes generales	73
4.2.2 Coeficientes particulares	74
4.2.3 Coeficientes volumétricos	74
4.3 Determinación experimental y uso de los coeficientes de transferencia	75
4.4 Cálculo de la velocidad de transferencia	78
4.4.1 Correlaciones para calcular el coeficiente de transferencia	78
4.5 Modelos de renovación de superficie	80
Segunda parte. Transferencia interfásial	82
4.6 Equilibrio interfásial líquido-gas	83
4.7 Velocidad de transferencia interfásial. Soluciones diluidas	83
4.7.1 Definición del coeficiente global de transferencia	84
4.7.2 Potencial global. Caso líquido-gas	84
4.7.3 Cálculo de los coeficientes globales. Modelo de la doble resistencia	85
4.7.4 Paso limitante	87
4.7.5 Cálculo de las composiciones interfásiales. Línea de unión	89
4.8 Velocidad de transferencia. Soluciones concentradas	91
4.9 Cálculo de la velocidad de transferencia de dos componentes	92
4.9.1 Existencia de un paso limitante	94
4.10 Velocidad de transferencia interfásial con reacción química	95
4.10.1 Velocidad del proceso	95
4.10.2 Caso especial: reacción irreversible de primer orden no instantánea	96
4.11 Sistemas con parámetros concentrados	98
Preguntas	101
Problemas	102
Soluciones	103
Referencias	104

CAPÍTULO 5

FUNDAMENTOS DE LAS OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA	105
5.1 Operaciones con transferencia de masa	106
5.2 Importancia de los procesos de separación	107
5.3 Tipos de operación	107
5.4 Equipo de operaciones de transferencia de masa	108
5.4.1 La columna de platos	108
5.4.2 Contacto continuo	110
5.4.3 Contacto gas-líquido por burbujeo	111
5.4.4 Columnas de burbujeo	111
5.4.5 Comparación entre las columnas empacadas y de platos	112
5.5 Cálculo del equipo de contacto con etapas	112
5.6 Cálculo de equipo para contacto continuo	113
5.7 Equilibrio de fases en los procesos de separación	113
5.7.1 Equilibrio vapor-líquido	113
5.7.2 Sistemas líquido-líquido	115
5.7.3 Sistemas gas-líquido	116
5.7.4 Relación de equilibrio por medio de nomogramas	116
5.7.5 Diagramas de fases (sistemas binarios y ternarios)	118
5.7.5.1 Sistemas vapor-líquido (destilación, evaporación instantánea)	118
5.7.6 Volatilidad relativa	120
5.7.7 Equilibrio líquido-líquido (extracción líquida)	122
5.7.8 Sistemas gas-líquido (absorción de gases)	123
5.8 Evaporación instantánea en sistemas de multicomponentes	124
5.8.1 Caso 1: P y T especificadas	126
5.8.2 Caso 2: P y $V/F = 0$ especificados: líquido saturado o punto de burbuja	128
5.8.3 Caso 3: P y $V/F = 1$ especificadas: vapor saturado o punto de rocío	129
5.9 Evaporación instantánea en sistemas binarios	129
5.10 Determinación de la condición térmica de una mezcla líquida o vapor	131
5.11 Cálculo de las dimensiones de un tanque vertical de evaporación instantánea	133
Preguntas	136
Problemas	137
Soluciones	140
Referencias	140

CAPÍTULO 6**ABSORCIÓN GAS-LÍQUIDO POR CONTACTO CONTINUO**

Introducción	143
6.1 La columna empacada	144
6.1.1 Empaques	145
6.1.2 Comportamiento hidráulico	146
6.1.3 Punto de inundación	148
6.2 Coeficientes de transferencia de masa	148
6.2.1 Determinación experimental	151
6.2.2 Correlaciones de Billet-Schultes	151
6.2.3 Correlaciones de Sherwood y Molstad	155
6.3 Diseño de columnas empacadas para absorción líquido-gas	156
6.3.1 Línea de operación	157
6.3.1.1 Caso de mezclas gaseosas diluidas	158
6.3.1.2 Caso de mezclas gaseosas concentradas	158
6.3.2 Línea de equilibrio	159
6.3.3 Ecuación de diseño	159
6.3.3.1 Caso de soluciones diluidas: línea de equilibrio recta	160
6.3.3.2 Caso de soluciones concentradas	162
6.3.3.3 Unidades de transferencia	163
6.3.4 Cálculo del flujo de líquido	164
6.3.5 Diámetro de la columna	166
6.3.6 Flujo en paralelo	168
6.4 Desorción	172
6.5 Absorción por burbujeo	172
Preguntas	174
Problemas	174
Soluciones	176
Referencias	176

CAPÍTULO 7**DESTILACIÓN**

7.1 Destilación fraccionada	177
7.2 Secuencia de diseño en destilación fraccionada	178
7.2.1 Presión de operación	179
7.2.2 Etapa ideal	180
7.3 Método de McCabe-Thiele	180
7.3.1 Sección de enriquecimiento	180
7.3.2 Sección de agotamiento	182
7.3.3 Alimentación	183
7.3.4 Localización del plato de alimentación	185
7.3.5 Condiciones de operación limitantes	185
7.3.6 Relación de reflujo óptima	187

7.4	Método numérico o analítico	194
7.5	Diámetro de plato y de columna	197
7.6	Eficiencia y número real de platos	199
	7.6.1 Comentarios finales acerca de eficiencias de plato y de columna	201
7.7	Columnas empacadas en destilación	205
7.8	Destilación de multicomponentes	209
7.9	Caso de estudio propuesto: cambio de platos de válvulas por empaque estructurado en una columna de destilación para aumentar capacidad	216
7.10	Caso de estudio resuelto: análisis de exergía en columnas de destilación	216
	7.10.1 Caso 1 (primera configuración). Una sola columna de destilación (SC)	218
	7.10.2 Caso 2 (segunda configuración). Dos columnas con alimentación dividida (FS)	218
	7.10.3 Caso 3 (tercera configuración). Dos columnas con integración de calor hacia atrás (LSR)	219
	Preguntas	222
	Problemas	223
	Soluciones	226
	Referencias	226
CAPÍTULO 8		
EXTRACCIÓN		227
8.1	Extracción líquido-líquido	228
8.2	Equipo para la extracción líquido-líquido	228
8.3	Selección del solvente	231
8.4	Equilibrio líquido-líquido	231
8.5	Balances de materia en extracción líquida	232
8.6	Extracción en una sola etapa	233
8.7	Extracción en varias etapas a corrientes cruzadas	235
8.8	Extracción en varias etapas a contracorriente, método gráfico	239
8.9	Extracción en varias etapas a contracorriente, método analítico con ecuaciones de Kremser	243
8.10	Cálculo de flujo de disolvente mínimo	245
8.11	Estimación de la altura de la columna de extracción	246
	8.11.1 Eficiencia global de la columna (E_0)	246
	8.11.2 Altura equivalente a un plato teórico (HETP)	247

8.12	Estimación del diámetro de la columna de extracción con flujo a contracorriente	247
8.13	Extracción sólido-líquido o extracción por solventes	252
8.14	Extracción supercrítica	253
	Preguntas	254
	Problemas	256
	Referencias	260

CAPÍTULO 9

CONTACTO AIRE-AGUA 261

9.1	Definiciones básicas	262
9.1.1	Presión de vapor en el equilibrio	262
9.1.2	Humedad molar absoluta	262
9.1.3	Humedad másica absoluta	262
9.1.4	Humedad de saturación	263
9.1.5	Humedad absoluta porcentual o porcentaje de humedad absoluta	263
9.1.6	Humedad relativa	263
9.1.7	Punto de rocío	265
9.1.8	Volumen húmedo	266
9.1.9	Calor húmedo (C_h)	266
9.1.10	Calor húmedo medio (C_{hm})	267
9.1.11	Entalpía de aire húmedo (o entalpía total)	268
9.2	Temperatura de saturación adiabática	269
9.2.1	Descripción del proceso teórico	270
9.3	Carta de humedad o psicrométrica	272
9.4	Temperatura de bulbo húmedo	275
9.5	Operaciones de contacto aire-agua	280
9.5.1	Ecuaciones de diseño	281
9.5.2	Humidificación de aire	284
9.5.3	Humidificación-enfriamiento adiabático de aire	287
9.5.4	Deshumidificación de aire por contacto directo	289
9.5.5	Enfriamiento de agua a contracorriente	291
9.5.5.1	Ecuación de diseño	292
9.5.5.2	Línea de operación	293
9.5.5.3	Línea de equilibrio	294
9.5.5.4	Líneas de unión y coeficiente global de transferencia	294
9.5.5.5	Integral de Merkel	295
9.5.5.6	Función de empaque o característica de torre	295
9.5.5.7	Método NUT y AUT	296
9.5.5.8	Flujo mínimo de aire	296
9.5.5.9	Relación agua-aire para una torre de enfriamiento de altura conocida	297
9.5.5.10	Cálculo de la altura de una torre de enfriamiento de agua	299

9.6	Aplicación a la operación de secado	300
	Preguntas	303
	Problemas	303
	Soluciones	304
	Referencias	305
CAPÍTULO 10		
ABSORCIÓN DE OXÍGENO EN BIORREACTORES		307
10.1	Requerimiento de oxígeno en los procesos de fermentación	309
10.2	Determinación experimental de $k_L a$ en fermentadores por métodos fisicoquímicos	312
	10.2.1 Método del sulfito	312
	10.2.2 Método dinámico por desgasificación	314
	10.2.3 Correlaciones para calcular los coeficientes de transferencia en la fase líquida	316
	10.2.4 Cálculo de la potencia consumida P_G	317
10.3	Determinación experimental de $k_L a$ en fermentadores por métodos biológicos	317
	10.3.1 Método dinámico	317
	10.3.2 Método de balances gaseosos	319
	10.3.3 Implementación del método de balances gaseosos	320
	10.3.4 Corrección de $k_L a$ por influencia de las burbujas	322
	Preguntas	323
	Problemas	324
	Soluciones	325
	Referencias	325
APÉNDICES		
A	Funciones y definiciones matemáticas	328
	A.1 Derivada sustancial	328
	A.2 Función error	328
	A.2.1 Regla de Leibnitz para derivar una integral	329
	A.2.2 Derivada de la función error	330
	A.3 Funciones Bessel	330
	A.3.1 Funciones Bessel ordinarias	330
	A.3.2 Funciones Bessel modificadas	331
B	Métodos de determinación de la difusividad	333
	B.1 Método de Winklemann para determinar difusividad en fase gaseosa	333
	B.2 Método del sulfito	333
	B.2.1 Solubilidad del oxígeno	333
	B.2.2 Generalización de los cálculos	334
	B.2.3 Procedimiento de laboratorio para el método del sulfito	335

C	Propiedades físicas de sustancias puras	336
C.1	Propiedades del aire a $P = 1$ atm	336
C.2	Propiedades del agua líquida	337
D	Datos de equilibrio vapor-líquido y de entalpía-concentración de diversos sistemas	338
D.1	Datos de equilibrio vapor-líquido	338
D.2	Datos de entalpía concentración	339
E	Datos de equilibrio líquido-líquido de diversos sistemas ternarios	341
F	Los nomogramas de DePriester y la ecuación de McWilliams	343
F.1	Nomogramas de DePriester	343
F.2	Ecuación de McWilliams	345
Índice		347