UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

Ingeniería Química Experimental

LEM III y LEM IV

Autores:
Paula Álvarez Fernández
Margarita Castillo Agreda
Elvia Mayen Santos
María Elena Quiroz Macías
Eligio Pastor Rivero Martínez
Celestino Silva Escalona
Ana María Sixto Berrocal
Ana María Soto Bautista

UNAM
CUAUTITLÁN

Ediciones FESC

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ingeniería Química Experimental

LEM III y LEM IV

Asignatura: **Laboratorio Experimental Multidisciplinario III y IV**
Clave de la asignatura: **1521-1623**

Carrera: **Ingeniería Química**
Clave de la carrera: **10531**

Autores:
Paula Álvarez Fernández
Margarita Castillo Agreda
Elvia Mayen Santos
María Elena Quiroz Macías
Eligio Pastor Rivero Martínez
Celestino Silva Escalona
Ana María Sixto Berrocal
Ana María Soto Bautista

Revisión: **junio de 2013**

Índice

Presentación general 7
Evaluación 9
Medidas de seguridad en el LEM 13

LEM III 19
Presentación 21
Objetivo general 22
Contenido del curso 22
Intercambiador de calor de doble tubo 23
Intercambiadores de calor de tubos y coraza I 27
Intercambiadores de calor de tubo y coraza II 31
Intercambiadores de calor de flujo cruzado 35
Banco de intercambiadores de calor 41
Banco de intercambiadores de calor-intercambiador de placas 47
Transferencia de calor en recipientes enchaquetados 53
Evaporación 57

LEM IV 63
Presentación 65
Objetivo general 66
Contenido del curso 66
Difusión molecular 67
Psicrometría 73
Relleno de columnas 77
Caídas de presión en torres empacadas 81
Humidificación adiabática 87
Torres de enfriamiento 93
Proyecto 103
Metodología para el proyecto de investigación 113

ANEXO 117

Presentación general

Actualmente todas las universidades e institutos importantes cuentan con laboratorios en donde se favorezca la integración del trabajo teórico y experimental, posibilitando con ello el trabajo interdisciplinario.

Los laboratorios son los espacios académicos adecuados para proporcionar al estudiante la formación práctica necesaria para un buen desempeño profesional, estimulando su ingenio y esfuerzo para dar respuesta a los problemas y necesidades que se le puedan presentar. Con tal fin se propone el trabajo experimental que se desarrolla en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario de Ingeniería Química.

El continuo crecimiento del LEM de Ingeniería Química, así como la importancia de la enseñanza práctica en el aprendizaje de la Ingeniería Química, hace posible que se consideren a los cursos del LEM como asignatura independiente y no como laboratorio de apoyo a la teoría. Por tal razón, surge la necesidad de generar material de apoyo; manuales que ayuden al alumno al desarrollo de la parte experimental en sus cursos del LEM.

En el primer manual de prácticas se abordaron temas de medición de variables y balance de materia y energía, así como el de flujo de fluidos que sirve al alumno como introducción al laboratorio y a diversos temas de la Ingeniería; podemos ahora dar una continuidad a esos temas. En este manual se tratarán las asignaturas de LEM III (Transferencia de calor) y LEM IV (Transferencia de masa).

En la parte correspondiente a la transferencia de calor el alumno seguirá la metodología de los dos anteriores LEM's donde se plantean sesiones experimentales, a través de una serie de problemas que el alumno debe resolver de forma teórico práctica, con la característica de que estos problemas se presentan de una forma estructurada, permitiendo al alumno la resolución de los mismos de manera cuantitativa.

Por otra parte en el curso referente a transferencia de masa, éste será dividido en dos partes: la primera que es abordada como sesiones experimentales estructuradas y la segunda donde se introducirá al alumno al trabajo por proyectos.

En esta modalidad se plantea un problema experimental abierto, donde el alumno propondrá un plan de trabajo experimental y lo ejecutará con el visto bueno del asesor. Dando con el análisis de resultados la respuesta al problema planteado.

Es importante hacer notar que tanto para el LEM III y IV , el alumno cuenta con los equipos que se consideran primordiales para el desarrollo experimental necesario de ambas asignaturas; además aplique los fundamentos que forman parte de las asignaturas de transferencia de calor y de masa.

Los alumnos al tener la opción de operar y conocer a fondo los equipos pueden ser capaces de dar respuesta al problema que se presenta en la sesión experimental, y también podrán tener una muy amplia idea de los equipos que utilizarán industrialmente, ya que encontrarán, incluso, equipos similares a los aquí existentes.

Siguiendo la estructura del primer manual, a continuación se anexa el formato de los temas, lo referente a evaluación, formato de informe experimental y seguridad en el LEM.

Cada uno de los temas presentados tendrá el siguiente formato:

1. Tema e introducción.
2. Objetivos generales.
3. Problema experimental (cuando no sea un proyecto donde el alumno será el que lo especifique).
4. Material, servicios y equipo.
5. Conocimientos previos (son las bases de conocimientos teóricos que el alumno debe tener para realizar el tema propuesto).
6. Indicaciones experimentales (modo de operar correctamente el equipo, recomendaciones de trabajo y de seguridad que se deben tener).
7. Puntos importantes que deben ser incluidos en el informe (cálculos y hojas de datos que deben incluirse en el reporte además de lo básico en un informe).
8. Bibliografía complementaria.

Evaluación

Cada práctica o proyecto será evaluado de acuerdo con los siguientes parámetros:

a) Conocimientos previos
b) Trabajo experimental
c) Informe de resultados experimentales

A cada uno de estos parámetros se le asignara un porcentaje de la calificación total de la siguiente manera:

a) Conocimientos previos 30 %

Cuando se entregue un trabajo por escrito en forma individual este parámetro, que en total vale 30 % de la calificación final, estará subdividido en 4 puntos fundamentales que son:

- Presentación
- Puntualidad
- Contenido
- Integración de los conceptos al trabajo experimental 1

Antes o durante la sesión, el profesor cuestionará a los alumnos en relación a los conceptos básicos para comprender el problema experimental y obtener los resultados propuestos.

b) Trabajo experimental 30 %

El desarrollo de la práctica o proyecto en el laboratorio corresponderá el mayor porcentaje de la evaluación. Se evaluará sobre todo la organización para empleo óptimo de todos los recursos disponibles (humano, equipo, tiempo, materia prima, etc.) por parte del equipo integrado por los alumnos.

Se evaluarán los siguientes aspectos:

- Planeación del experimento.
- Distribución del trabajo.
- Medición adecuada de todas las variables para obtener los diferentes resultados que posteriormente serán interpretados y analizados.
- Estado del equipo (orden y limpieza).

c) Informe experimental 40 %

Corresponderá el 40 % y también contemplará aspectos tales como:

- Presentación
- Puntualidad
- Contenido
- Discusión de resultados y conclusiones

Para la calificación final de cada Laboratorio Experimental Multidisciplinario (LEM) se considerará el promedio de todas las prácticas y/o proyecto realizados durante el semestre.

Formato para la elaboración del informe experimental

1. Hoja de presentación. Deberá incluir el LEM correspondiente, título de la práctica, nombres de los integrantes, nombre del (os) profesor (es), grupo y fecha.
2. Índice (opcional).
3. Introducción. Mencionar la importancia del trabajo experimental realizado y su aplicación a nivel industrial.
4. Generalidades. Resumen de los fundamentos teóricos relacionados con la práctica y operación de equipos o instrumentos utilizados, según sea el caso.
5. Descripción de actividades realizadas. Explicar detalladamente los pasos que se siguieron durante la experimentación. Incluir el diagrama de flujo y/o montaje experimental. Además, debe contener el número de experimentos realizados; identificación de variables y los niveles trabajados.
6. Presentación de resultados. Tablas de recolección de datos, gráficos y esquemas que se sugieren en los "Puntos importantes" mencionados en el formato correspondiente a la práctica realizada.
7. Observaciones y análisis de resultados. A partir de las tablas y gráficas presentadas en los resultados, comparar los valores experimentales con los reportados en la literatura; anotar posibles desviaciones y explicar las causas que las originaron.
8. Memoria de cálculo (según sea el caso). Incluir las ecuaciones necesarias, de manera secuencial. Descripción de cada uno de sus términos y unidades.

9. Conclusiones. Mencionar si se cumplieron los objetivos planteados en su práctica; en caso contrario se deberá explicar. Según sea el caso, corroborar las tendencias de los datos experimentales con la literatura correspondiente.
10. Bibliografía. Escribirla completa y en orden alfabético.

Nota: Cuidar la ortografía, limpieza y orden.

Si se requiere de más información para la elaboración del informe se sugiere la siguiente bibliografía:

- Agg, Thomas Radford, n. (1878), *The preparation of engineering reports*, New York McGraw Hill, 1995.
- Miller Irwin; *Probabilidad y estadística para ingenieros*, Ed. Reverté, México, (l992).
- Montgomery C. Douglas. *Diseño y análisis de experimentos*, Ed. Iberoamericana, México, (1998).
- *Scientific and thecnical reports: organization, preparation, and production*, New York: American National Standards Institute, (1987).

Medidas de seguridad en el LEM

A continuación se describen brevemente las recomendaciones generales a seguir para prevenir o evitar la exposición a riesgos posibles que pueden ocasionar accidentes o incidentes, trayendo como consecuencia un daño físico dentro del LEM, así como aquellas prácticas seguras que minimizan su potencial para producir daños. El cumplimiento de las mismas, constituirá uno de los mejores medios para lograr unas condiciones de trabajo seguras en nuestro ámbito universitario.

- Se debe utilizar siempre bata de laboratorio y calzado cerrado (no se recomienda la ejecución de las prácticas con calzado abierto, tipo sandalia u otro tipo que deje el pie al descubierto).

- Se recomienda llevar el pelo siempre recogido y no utilizar pulseras, colgantes, mangas anchas, bufandas, etc. Se tratará de evitar el uso de ropa suelta.

- En el laboratorio no se debe fumar, comer, ni beber. Tampoco almacenar comida o bebidas en frigoríficos situados en el mismo.

- Hay que utilizar siempre los equipos de protección personal cuando el profesor lo indique o el trabajo experimental a desarrollar así lo requiera: como mínimo lentes de seguridad, viseras o pantallas faciales (siempre que sea necesario proteger los ojos y la cara de salpicaduras o impactos); guantes tipo látex (para manipular sustancias químicas) o de materiales resistentes al calor (cuando se vayan a operar equipos que requieran suministro de vapor); casco, tapones auditivos, mandiles y polainas.

- NUNCA trabajar solo en el laboratorio o taller (BAJO NINGÚN CONCEPTO).

- Se debe trabajar siempre con los sistemas de extracción y renovación mecánica de aire conectados.

- Tratar de mantener el máximo orden y limpieza posibles dentro del laboratorio o del taller (tanto a nivel de comportamiento personal, como a nivel material). No se deben bloquear las

rutas de escape o pasillos con equipos, máquinas u otros elementos que entorpezcan la correcta circulación. No se debe correr en el laboratorio.

- Asegurar la desconexión de equipos, aparatos eléctricos, agua, y especialmente de gas al finalizar las actividades. No se debe dejar operaciones en marcha sin vigilancia.

- No deben de realizarse actividades nuevas sin conocer de manera previa: las características de peligrosidad de las sustancias químicas que intervienen, el manejo de los equipos que puedan intervenir y las medidas de protección, tanto colectivas como individuales, que deben ser adoptadas.

- Cerciorarse, antes de su uso, que las máquinas y equipos cuenten con los dispositivos de seguridad y emergencia. Bajo ningún concepto deben quitarse estos dispositivos de seguridad, salvo en operaciones de reparación y mantenimiento con la máquina desconectada.

- Procurar respetar las zonas señalizadas como de acción de las máquinas que disponen de partes móviles. No se debe penetrar en el interior de las áreas de riesgo mientras la máquina esté en funcionamiento o conectada.

- Atender a la señalización de seguridad (pictogramas) que marca los riesgos potenciales de los lugares de trabajo.

- Las reparaciones de máquinas y equipos de trabajo deben ser llevadas a cabo exclusivamente por personal competente.

- No se deben utilizar herramientas y máquinas para fines diferentes a aquellos para los que han sido diseñadas. No utilizar dispositivos que no se han manejado nunca, que resulten extraños, o sobre los que no se dispone de experiencia suficiente.

- Las operaciones de soldadura y corte con oxiacetileno únicamente se efectuarán si se dispone de conocimientos y práctica suficientes para efectuar dichas tareas.

Cuando se trabaje con sustancias químicas se deberá:

- Leer la etiqueta y consultar la ficha de datos de seguridad del producto antes de su utilización.

- Utilizar únicamente aquellas sustancias que estén en buen estado y cuya fecha de caducidad (en caso de que dispongan de ella) no haya sido sobrepasada.

- No utilizar ningún reactivo al cual le falte la etiqueta del frasco.

- Se deben etiquetar adecuadamente los frascos y recipientes a los que se haya trasvasado (trasladado) algún producto o donde se hayan preparado mezclas, identificando su contenido, a quién pertenece y la información sobre su peligrosidad (reproducir etiquetado original).

- Las prácticas que produzcan gases, vapores, humos o partículas, o que incluyan manipulación de sustancias volátiles, se debe procurar llevarlas a cabo bajo campana.

- Se recomienda lavarse las manos al entrar y salir del laboratorio, y de manera adicional siempre que se haya entrado en contacto con una sustancia química.

- Cuando se manipulen productos químicos que emitan vapores o puedan provocar proyecciones, se debe evitar el uso de lentes de contacto y más aún si no se protege la vista con una gafa de protección de montura tipo integral.

- No se debe pipetear con la boca, hay que tratar de utilizar pipetas de seguridad.

Para evitar la exposición a riesgos eléctricos (electrocución y quemaduras) se recomienda:

- No manipular ningún elemento eléctrico con las manos mojadas, en ambientes húmedos o mojados accidentalmente.

- No quitar la puesta a tierra de los equipos e instalaciones.

- No realizar operaciones en líneas eléctricas, cuadros, centros de transformación o equipos eléctricos si no se posee la formación necesaria para ello.

- No retirar nunca los recubrimientos o aislamientos de las partes activas de los sistemas.

- Para efectuar trabajos en equipos o líneas con corriente eléctrica, además del equipo de protección personal, se debe emplear en cada caso el material de seguridad más adecuado: guantes aislantes, alfombras o banquetas aislantes, vainas o caperuzas aislantes, comprobadores de tensión, herramientas aislantes y material de señalización (discos, barreras, etc.).

En caso de presentarse un incendio se recomienda:

1. Mantener la calma. Lo más importante es ponerse a salvo y dar aviso a los demás.
2. Si el fuego es pequeño y se sabe utilizar un extintor, usarlo. Si el fuego es de consideración, no arriesgarse y mantener la calma evacuando el lugar.
3. Si se debe evacuar el sector apagar los equipos eléctricos y cerrar las llaves de gas y ventanas.
4. Evacuar la zona por la ruta asignada.
5. No correr, caminar rápido, cerrando al paso la mayor cantidad de puertas.
6. No llevar objetos que puedan entorpecer la salida.
7. Si pudo salir, por ninguna causa vuelva a entrar. Dejar que los equipos especializados se encarguen.

Si se desea consultar más información sobre las medidas de seguridad en el laboratorio se sugieren las siguientes referencias:

- Mancera Fernández Mario, *Seguridad e higiene industrial: gestión de riesgos.* Bogotá, Alfa Omega Colombiana, (2012)

- Miguez Mónica, *Seguridad e Higiene: Manual de prevención de riesgos para el sector comercial,* Vigo, Ideas Propias, (2004)

- Varó Galván Pedro José, *Seguridad e higiene: cuaderno prácticas,* San Vicente del Raspera, Publicaciones de la Universidad de Alicale, (2006).

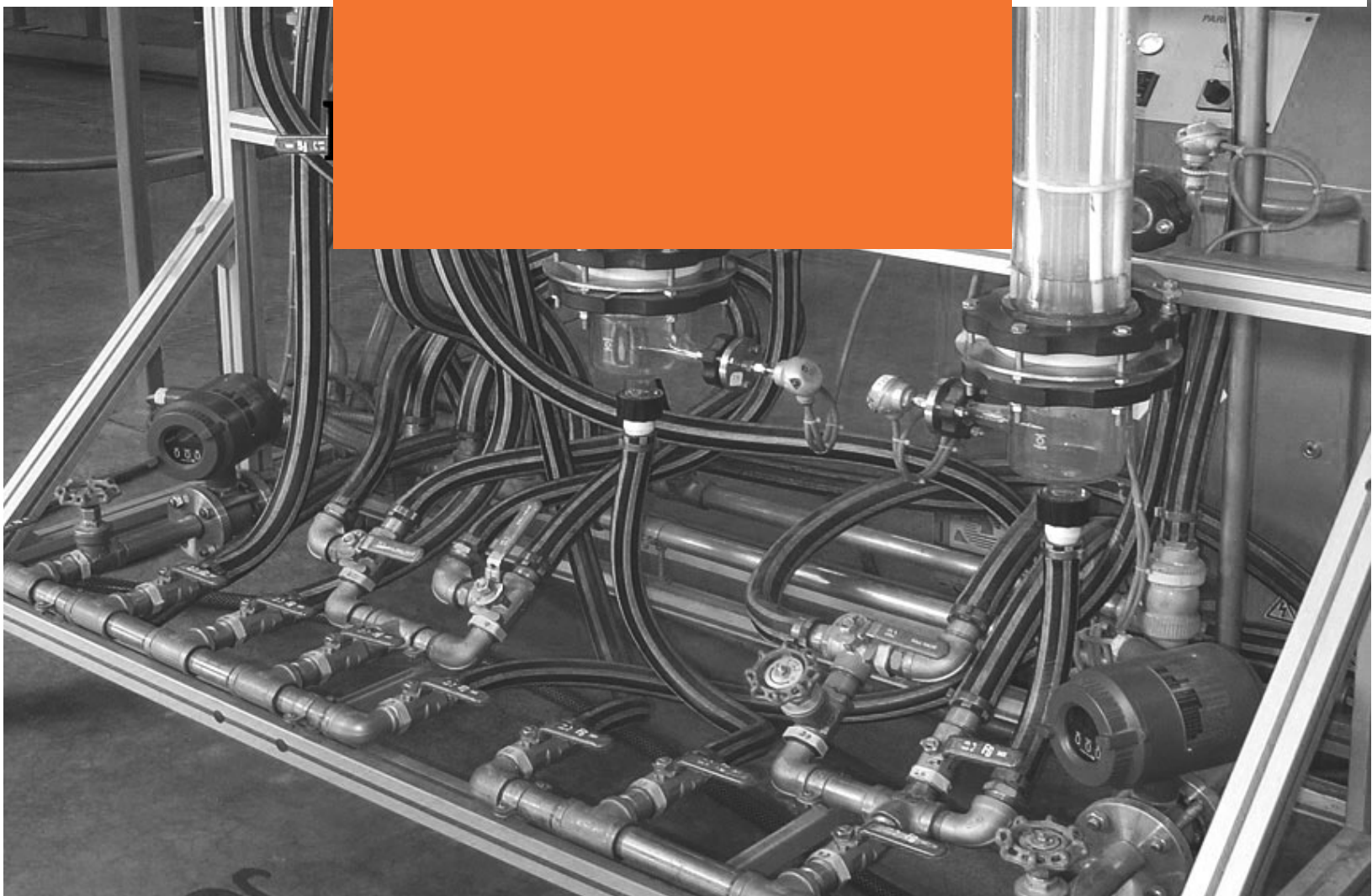
- Hernández Malfavon & Fernández *Seguridad e higiene industrial.* Editorial Limusa, México (2005)

- Alonso Castaño Luis, *Seguridad e higiene laboral en hotelería y restauración*, Madrid, AMV Ediciones Mund-Presa

- Cortes Días José Marid, *Seguridad e higiene del trabajo, técnicas de pevención de riesgos laborales*, Madrid, Tébar S.L., (2007)

- Storch de García José María, *Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas* , España, Díaz de Santos, S.A., (2008)

LEM III



Presentación

Todas las industrias químicas de proceso, utilizan en gran medida la transferencia de energía en forma de calor. El calor es energía en tránsito, que se debe a la diferencia de temperaturas. La transferencia de calor es el área de la ingeniería que trata los mecanismos de la transferencia de energía de un lugar a otro cuando existe una diferencia de temperaturas. La transferencia de calor nos permite determinar la razón, con respecto al tiempo, de energía transferida provocada por un desequilibrio de temperaturas.

La transmisión de energía en forma de calor, tiene lugar en casi todos los procesos industriales. Cada una de las ramas de la tecnología presenta sus propios problemas de transmisión calorífica y los grandes progresos realizados en este campo se deben al esfuerzo de diversos y numerosos investigadores. Los conceptos fundamentales y la teoría de la transmisión calorífica desarrollados son aplicables a todos los problemas técnicos y tecnológicos.

La transferencia de calor suele acompañar algunas operaciones unitarias tales como el secado, la destilación, la evaporación, etc. Por lo que el ingeniero químico debe conocer los principios básicos de diseño y operación de los equipos empleados en transferencia de calor para poder enfrentarse a las múltiples situaciones que se le presenten en su vida profesional.

Con la constante escasez de energía que padecemos, se hace aun más importante estudiar la transferencia de calor, de tal modo que se haga posible utilizar nuevas reservas energéticas con mayor eficiencia. Mediante métodos más adecuados de transporte de energía, utilizando nuevos diseños que minimicen las pérdidas de calor, con una generación de potencia más eficiente y un mejor uso de la misma, se hará posible utilizar nuestras limitadas fuentes de energía de manera conveniente.

En este laboratorio se estudia la transferencia de calor, que nos dará la capacidad teórica y práctica para el buen empleo de los equipos, ya que el calor es de vital importancia no sólo para el proceso en sí, sino también para las diferentes operaciones que se realizan en una planta industrial.

El presente curso está encaminado a ayudar al alumno a obtener el mayor provecho de los equipos a nivel laboratorio y a futuro en la industria.

Objetivo general

Al finalizar el curso el alumno deberá ser capaz de:

Explicar los mecanismos básicos de transferencia de calor, manejar los intercambiadores de calor instalados en el LEM y realizar mediciones de las variables que permiten caracterizar el funcionamiento de los equipos, para comparar los resultados experimentales con los obtenidos, utilizando la metodología del dimensionamiento de intercambiadores de doble tubo, coraza y evaporadores, además de validar las condiciones óptimas de operación de cada uno de ellos.

Contenido del curso

- Intercambiadores de calor de doble tubo (sistema agua-vapor).
- Intercambiadores de calor de tubos y coraza I (sistema agua-vapor).
- Intercambiadores de calor de tubos y coraza II (sistema aire-vapor).
- Intercambiadores de calor de flujo cruzado.
- Banco de intercambiadores de calor (Intercambiador de tubos de vidrio y coraza de vidrio).
- Banco de intercambiadores de calor (Intercambiador de tubos de acero y coraza de vidrio).
- Banco de intercambiadores de calor (Intercambiador de placas).
- Transferencia de calor en recipientes enchaquetados.
- Evaporadores de calandria y de tubos largos.

Intercambiador de calor de doble tubo (Sistema Agua-Vapor)

Introducción

La representación industrial de un intercambiador de doble tubo es la que se muestra en la figura 1. Consta de dos juegos de tubos concéntricos, dos conexiones, cabezal y codo en U. La tubería exterior se apoya en la interior y el fluido entra al tubo interior a través de una conexión roscada. Cuando se arregla en dos pasos la unidad se llama horquilla.

Este tipo de intercambiadores han sido usados por muchos años principalmente para velocidades de flujo bajas y altos rangos de temperatura. Dichas secciones se adaptan mejor a aplicaciones de alta temperatura y alta presión debido a sus diámetros relativamente pequeños. La principal desventaja en el uso de estos intercambiadores es la pequeña superficie de transferencia de calor contenida en una horquilla simple.

Las secciones de doble tubo permiten un verdadero flujo en contracorriente. Estas secciones son particularmente convenientes cuando se requieren aproximaciones estrechas de temperatura al perfil mencionado.

La tubería interior puede ser de dimensiones hasta de 1 ¼" y la exterior de hasta 2 ½" IPS. Son útiles cuando no se requiere más de 100 a 150 ft2 de superficie, para lo cuál pueden disponerse varios pasos en un arreglo serie o paralelo.

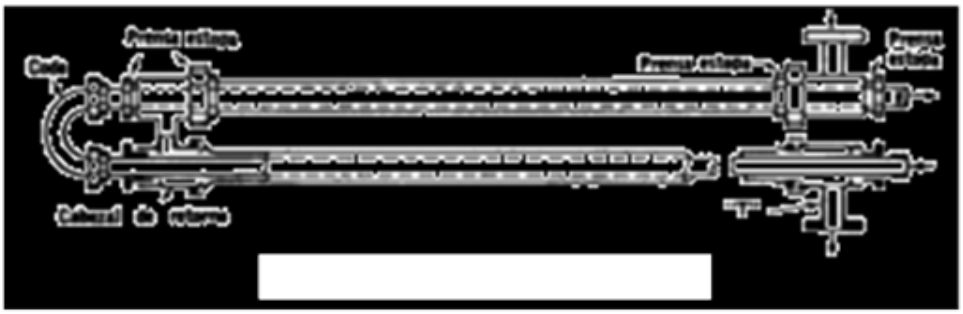


Figura 1. Intercambiador de doble tubo Kern

En la figura 2 se representa el perfil de temperatura para las corrientes de fluido en la configuración de doble tubería. En la práctica a realizar, una de las corrientes experimenta un cambio de temperatura debido a que sólo uno de los fluidos experimenta un cambio de fase.

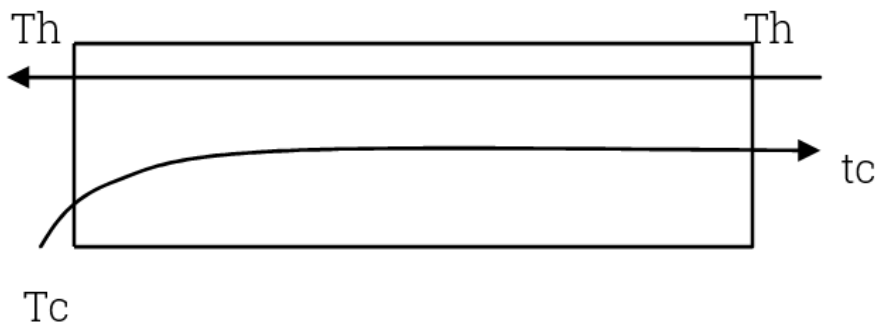


Figura 2. Perfil de temperatura en un intercambiador de doble tubería con un fluido con cambio de fase

Cuando la sección de flujo es diferente a la circular, como en este caso en que se trata de una sección anular, es conveniente expresar los coeficientes de transferencia de calor y factores de fricción mediante las ecuaciones y curvas usadas para tuberías y tubo. Para permitir este tipo de representación para la transferencia de calor en secciones anulares, se utiliza el concepto de diámetro equivalente, y la consideración de que el área de flujo en transferencia de momentum no es la misma que el área de flujo a utilizar para el efecto de transferencia de calor.

Objetivos

- Conocer el funcionamiento de los intercambiadores de doble tubo.
- Comparar los coeficientes globales de transferencia de calor obtenidos experimentalmente con los valores teóricos.
- Identificar las variables de operación.

Problema experimental

Determinar los coeficientes globales de transferencia de calor teóricos y experimentales de un intercambiador de doble tubo a diferentes condiciones de operación.

Material

- Termómetro de bulbo de mercurio

Servicios

- Agua de servicio
- Vapor

Descripción del equipo

El intercambiador de doble tubo instalado en el LEM consta de una sección en forma de horquilla con las siguientes dimensiones nominales:

- i = 1/4 "ced 40 (Diámetro interno)
- e = ¾" ced 40 (Diámetro externo)
- L por sección: 3 ft
- L total = 0.4 + 2 (0.92) = 2.24 m = 7.4 ft

Conocimientos y/o actividades previas

1. Explique qué es un intercambiador de calor.
2. Describa los usos industriales de los equipos de transferencia de calor.
3. Elabore el diagrama de flujo del intercambiador de doble tubo instalado en el LEM I.Q. y describa sus características particulares.
4. Explique cómo se calcula el diámetro equivalente en una sección anular.
5. Escriba las correlaciones utilizadas para el cálculo de los coeficientes de película para el intercambiador de doble tubo, así como el coeficiente global de transferencia de calor teórico.

6. Describa el procedimiento experimental para determinar los coeficientes globales de transferencia de calor.
7. Elabore el diagrama de flujo del equipo instalado en el laboratorio.

Indicaciones experimentales

- Verifique que los servicios se encuentren disponibles.
- Haga circular vapor abriendo la válvula lentamente para evitar el golpe de ariete, a fin de purgar el equipo y permitir el flujo de vapor hasta fijar una presión de trabajo no mayor de 2 kg/cm2.
- Hacer circular el agua de servicio.
- Una vez terminada la experimentación cerrar la válvula del vapor, dejar circular agua, purgar el condensado.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Tabla de datos experimentales.
- Coeficientes globales de transferencia de calor experimentales.
- Coeficientes globales de transferencia de calor teóricos.
- Gráficas de U experimental vs. Re y Ut vs Re.

Bibliografía

- Geankoplis C. I., *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, CECSA, 3ª Edición, México, (1998).
- Perry R.H., *Manual del Ingeniero Químico,* Uteha, 7ª Edición, México, (2010).
- Kern, D. Q., *Procesos de transferencia de calor*, Editorial Patria, México, (2009).

Intercambiadores de calor de tubos y coraza I (Sistema Agua-Vapor)

Introducción

La transferencia de calor es una de las operaciones unitarias más comunes en las plantas de procesamiento de materiales. En esas industrias es necesario transmitir o eliminar energía en forma de calor, ya sea para calentar o enfriar una sustancia, o para cambiar el estado físico de la misma.

El Ingeniero Químico no dispone de un diseño único para estos equipos, ya que existe gran variedad de dispositivos de transmisión calorífica, desde el calentador eléctrico hogareño hasta las gigantescas calderas de las centrales térmicas.

El tipo más común es aquel en el cual el fluido caliente y el frío no están en contacto directo, sino que están separados por una pared de tubos, superficie plana o curvada. La transferencia de calor se efectúa por convección desde el fluido caliente a la pared, a través de esta por conducción y luego por convección al fluido frío.

Cuando se requiere una superficie de transferencia de calor grande, el tipo de intercambiador que se recomienda corresponde a la variedad de tubo y coraza; en este tipo, es posible obtener de manera económica y práctica, una gran superficie de transferencia de calor, colocando los tubos en un haz; los extremos se montan en un soporte. El haz de tubos resultante está encerrado en una cubierta cilíndrica (coraza), con el segundo fluido alrededor y a través de los tubos. En la figura 1 se pueden apreciar las partes básicas de intercambiador de calor de este tipo.

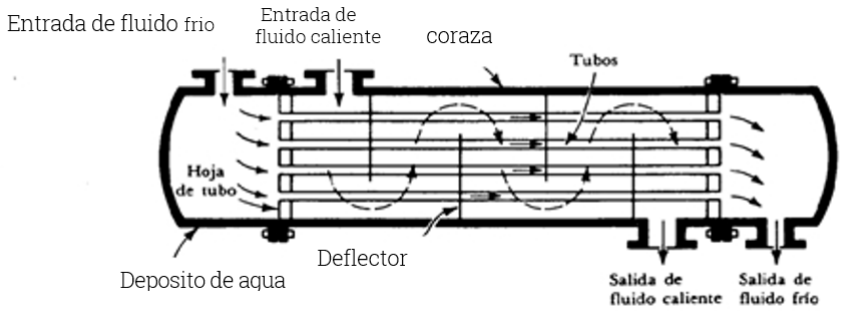


Figura 1. Partes básicas de un intercambiador de calor de tubos y coraza a 1 paso por tubos de Kern

Los fenómenos de transferencia de calor se definen mediante el coeficiente global de transferencia de calor (U).

Se denomina coeficiente global de transferencia de calor (U), a la rapidez de transferencia de calor por unidad de área por unidad de temperatura.

La resistencia global al flujo de calor desde el fluido caliente al frío, es el resultado de la disposición en serie de tres resistencias separadas; en donde dos de las resistencias son las que se ofrecen los fluidos individualmente y la tercera corresponde a la pared del sólido que separa a los fluidos. El coeficiente global se puede evaluar a partir de los coeficientes individuales y la resistencia de la pared del tubo.

ho = coeficiente individual del fluido que circula por fuera de los tubos.

hi = coeficiente individual del fluido que circula por dentro de los tubos.

Objetivos

- Conocer el funcionamiento de los intercambiadores de calor de tubos y coraza.
- Utilizar las correlaciones adecuadas para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor teórico.

Problema experimental

Determinar el coeficiente global de transferencia de calor teórico y experimental del intercambiador de tubos y coraza a diferentes condiciones de operación

Material

- Termómetro de bulbo de mercurio
- Probeta de 1 L; o vaso de p.p. de 4L
- Cronómetro
- Guantes de asbesto

Servicios

- Agua helada
- Vapor

Descripción del equipo

Intercambiador de calor de tubos y coraza instalado en el LEM
4 pasos por los tubos
1 paso por la coraza
Arreglo Δ
$n_t = 12$
BWG = 18
$L_t = 3$ ft
De = 3/4 in
Pt = 15/16 in

Conocimientos y/o actividades previas

1. Mencione los mecanismos en virtud de los cuales se transfiere el calor, y explique en qué consisten.
2. Mencione 3 diferentes tipos de cambiadores de calor, indique las diferentes clasificaciones y mencione los más comunes.
3. ¿Qué es el coeficiente global de transferencia de calor?
4. Establezca qué ecuación se empleará para calcular experimentalmente el coeficiente global de transferencia de calor (Uexp), para el intercambiador empleado.
5. Especifique qué correlación utilizará para el cálculo "teórico" del coeficiente global de transferencia de calor (Ut) para el intercambiador empleado.
6. Explique de qué dependen los coeficientes de transferencia de calor.
7. ¿Qué datos deberá tomar durante su experimentación? ¿Se cambia el orden?
8. Explique si la relación L/D influye en la transmisión calorífica y por qué.
9. Indique entre que valores deben estar comprendidos los coeficientes globales para el sistema agua-vapor.
10. Investigue el nombre de las variables que intervienen en cada uno de los siguientes números adimensionales: Re, St, Nu, Pr, Pe y Gz.

Indicaciones experimentales

- Verificar que estén disponibles los servicios.
- Revisar que todas las válvulas del equipo estén cerradas.
- Purgar el equipo abriendo las válvulas que se le indiquen.
- Verificar que esté cerrada la válvula de retorno de agua helada y abierta la del tanque de condensado.
- Abrir la válvula de agua helada para que circule por el equipo y tomar la temperatura del agua.
- Fijar la alimentación de agua (trabajar a diferentes flujos).
- Vigilar que la presión de vapor NO sobrepase 2 kg/cm2 por seguridad
- Cuando el equipo esté en condiciones estables (no varíe notablemente la presión) tomar lecturas de temperaturas, cantidad de flujo alimentado (con el rotámetro o cubicando el tanque o con la placa de orificio) y presión a que se trabaja.
- Cerrar la válvula de vapor; dejar circular el agua; abrir la válvula de condensado y la del tanque de agua para vaciar el equipo.
- Cerrar todas las válvulas del equipo y de la estación.
- Dejar limpio el equipo.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Presentar en forma tabulada los datos experimentales.
- Calcule los coeficientes globales de transferencia de calor para cada corrida experimental.
- Calcular los coeficientes globales de transferencia de calor utilizando las correlaciones apropiadas.
- Graficar U exp vs Re y Ut vs Re en la misma gráfica.
- Presente en forma tabulada los resultados experimentales y los obtenidos por correlación.

Bibliografía

- Kern D. Q., *Procesos de transferencia de calor,* Editorial Patria, México, (2009).
- Perry R.H., *Manual del Ingeniero Químico,* Uteha, 7ª Edición, México, (2010).
- Valiente A., *Manual del Ingeniero Químico*, Limusa, México, (1993).

Intercambiadores de calor de tubo y coraza II (Sistema Aire-Vapor)

Introducción

Los equipos de transferencia de calor se pueden clasificar por el tipo de flujo que manejan (laminar, turbulento, transciente), o por la función (enfriadores, condensadores etc.).

Así tenemos que para el diseo de estos hay una gran variedad de consideraciones, por ejemplo si el intercambio de calor se presenta entre dos fluidos, en el que uno de ellos tiene una resistencia muy alta a la transferencia de calor en comparación con el otro, el fluido de mayor resistencia "controla" la velocidad de transferencia. Tales casos ocurren, por ejemplo, al calentar aire con vapor de agua. La magnitud relativa del coeficiente de transferencia de calor es aproximadamente 10 para el aire, comparado con 2000 para el vapor.

Esta pobre situación de transferencia de calor requerirá de una gran superficiede transferencia para obtener una velocidad de calentamiento de aire. Por lo que se debe considerar la velocidad de transferencia para el diseño del equipo que va a realizar dicha operación.

El intercambiador que se utilizará está integrado al secador rotatorio, por lo que aquí es un equipo auxiliar, que nos ayuda a precalentar el aire que entrará en el secador.

El equipo que se utiliza es del tipo coraza (1 paso) y tubos (1 paso) que se ilustra en la figura 1.

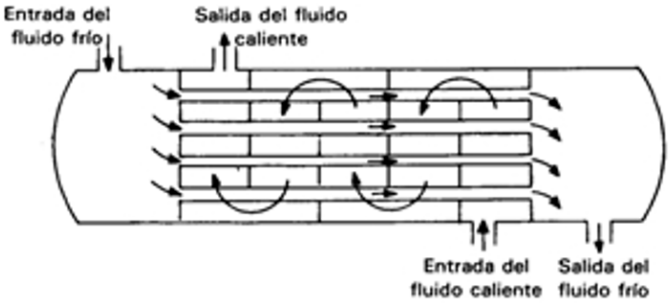


Figura 1. Diagrama de flujo de intercambiador de calor. [Geankoplis, 1998:302]

El cálculo del calentamiento o enfriamiento de gases difiere únicamente en aspectos menores de los procedimientos empleados en los sistemas líquido-líquido. Los valores de los coeficientes de película para los gases son, generalmente, menores que aquellos que se obtienen para líquidos a iguales valores de masa-velocidad; las diferencias son inherentes a las propiedades de los gases.

Los coeficientes de película pueden ser evaluados con precisión mediante el uso de las ecuaciones vistas para líquido-líquido, y no se necesita hacer corrección para el coeficiente de viscosidad a menos que el rango de temperatura sea excesivamente grande.

Objetivos

- Comprender el comportamiento de un fluido compresible en un intercambiador de calor de tubos y coraza.
- Seleccionar y aplicar la correlación apropiada para calcular teóricamente el coeficiente global de transferencia de calor y comparar con el obtenido experimentalmente.

Problema experimental

- Determina experimentalmente el coeficiente global de transferencia de calor así como sus variaciones a diferentes condiciones de operación.

Material

- Termómetro de bulbo de mercurio
- Guantes de asbesto

Servicios

- Aire comprimido
- Vapor

Equipo

Intercambiador de calor de tubos y coraza instalado en el secador rotatorio del LEM con:

$n_t = 12$

De = 1/2 in

Ced. 40

$L_t = 3.64$ ft

Conocimientos y/o actividades previas

1. Mencione las diferencias en magnitud de las propiedades para líquidos y para gases.
2. Explique qué influencia tienen las diferencias mencionadas en el punto anterior en los coeficientes individuales de transferencia de calor de los gases con los líquidos.
3. Especifique qué ecuación se utilizaría para el cálculo experimental del coeficiente global de transferencia de calor (Uexp) para el cambiador utilizado.
4. ¿Qué datos deberá tomar en su experimentación para el cálculo del coeficiente?
5. Especifique qué correlaciones utilizaría para el cálculo teórico del coeficiente global (Ut) para el intercambiador e indique por qué.
6. Indique entre qué valores deberá estar comprendido el coeficiente de transferencia de calor para el sistema aire-vapor.
7. Mencione y describa las diferentes trampas de vapor y sus aplicaciones.

Indicaciones experimentales

- Verificar que estén disponibles los servicios.
- Revisar que todas las válvulas del equipo estén cerradas.
- Purgar el equipo.
- Abrir la válvula de aire para que circule por el equipo y tomar la temperatura del aire.
  Única oportunidad de tener esta lectura.
- Comprobar que el medidor de flujo annubar tenga las válvulas abiertas.
- Vigilar que la presión del vapor no sobrepase 2 kgf/cm2 por seguridad.

- Cuando el equipo esté en condiciones estables (cuando no varíe notablemente la presión de vapor) tomar lecturas de temperaturas, desplazamiento del manómetro en U y presión a que se trabaja.

- Cerrar la válvula de vapor; dejar circular el aire; abrir la válvula de condensado del equipo. Cerrar todas las válvulas del equipo y de la estación.
- Dejar limpio el equipo.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Presentar en forma tabulada los resultados experimentales.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor para cada corrida experimental.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor utilizando las correlaciones apropiadas.
- Graficar Uexp vs Re y Ut vs Re en la misma gráfica.
- Presentar en forma tabulada los resultados experimentales y los obtenidos por correlación.

Bibliografía

- Geankoplis C. J., *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, CECSA, 3ª Edición, México, (1998).
- Holman, J.P., *Transferencia de calor*, CECSA; México, (2003). Kern
- D. Q., *Procesos de Transferencia de calor*, Editorial Patria, México, (2009).
- Perry R.H., *Manual del Ingeniero Químico*, Uteha, 7ª Edición, México, (2010).

Intercambiadores de calor de flujo cruzado (Sistema Aire-Vapor)

Introducción

Como se mencionó en las prácticas anteriores, el Ingeniero Químico cuenta con una gran variedad de diseños de intercambiador de calor, y una de las características, en la mayoría de ellos, es la transferencia de calor de una fase caliente a una fría, ambas separadas por una pared sólida.

Un tipo sencillo de intercambiador de calor, en el cual sólo uno de los fluidos esta confinado, es el "radiador" casero de agua caliente. Otro tipo de intercambiador lo constituye el calentador de aire. El calor procedente del vapor de agua que se condensa se transfiere al aire que circula por el exterior de los tubos. Donde el vapor penetra por la parte superior del aparato y el condensado sale por el fondo.

Generalmente se forza el aire por entre los tubos por medio de un ventilador con objeto de aumentar la velocidad de transferencia calorífica entre la superficie metálica y el aire. En este caso, el confinamiento del aire se limita a una caja que envuelve los tubos y que facilita la conducción del aire que circula entre el haz de tubos o serpentín". En los últimos años, estos calentadores se han usado extensamente para la calefacción de locales industriales, además del calentamiento del aire empleado en los secadores. La figura 1 muestra un ventilador para calefacción.

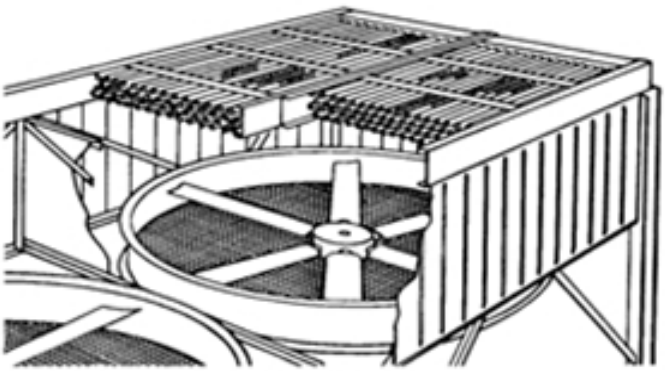


Figura 1. Vista de un ventilador

En la figura 2 se aprecia el tipo de flujo que se maneja en intercambiadores de calor de flujo cruzado.

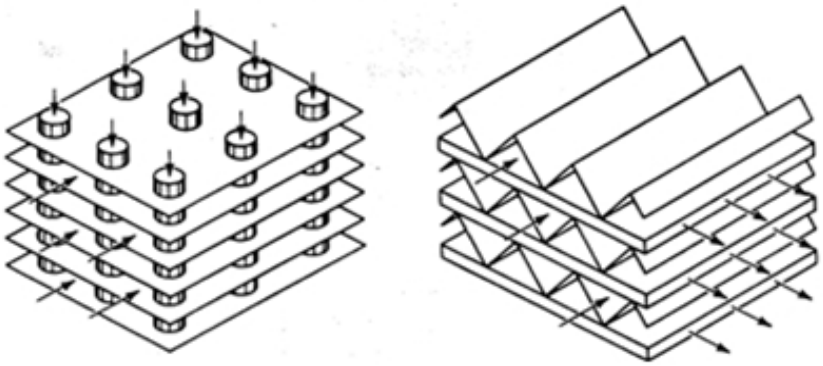


Figura 2. Acomodo perpendicular de las placas

La figura 3 nos muestra claramente cómo se ve que el flujo es perpendicular.

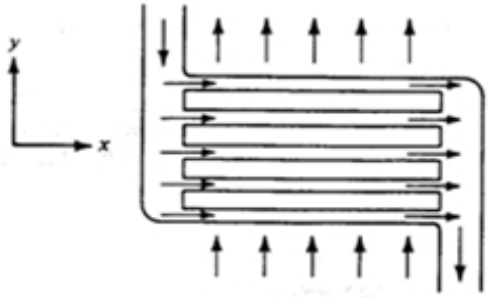


Figura 3. Intercambiador de calor flujo cruzado. Líneas de flujo

En cuanto a las ecuaciones utilizadas para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, se pueden emplear las vistas en la práctica (intercambiador de tubos y coraza) con la diferencia de que este intercambiador, con respecto a los vistos anteriormente, la dirección del flujo es perpendicular y para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor es necesario hacer una corrección final para la media logarítmica de la diferencia de temperaturas (LMTD). Donde la LMTD aparente se multiplicará por un factor de corrección (FT), para obtener la media de la diferencia de temperaturas (ΔTm), esto es:

$$\Delta Tm = LMTD * F_T$$

Conociendo las temperaturas de entrada y salida de los fluidos se puede encontrar fácilmente este factor (FT) en gráficas reportadas en la bibliografía.

Así, también se tienen otros tipo de relaciones para calcular h_{prom} del flujo de aire en dirección perpendicular a cilindros sencillos y lograr así una concordancia en el Nu y Re para calcular el coeficiente global de transferencia de calor teóricamente.

Objetivos

- Conocer el funcionamiento básico del intercambiador de calor de flujo cruzado y comprender la importancia de este tipo de intercambiador en el uso práctico.
- Seleccionar y aplicar la correlación apropiada para calcular teóricamente el coeficiente global de transferencia de calor y comparar con el obtenido experimentalmente.

Problema experimental

Determinar experimental y teóricamente el coeficiente global de transferencia de calor a diferentes condiciones de operación, cuando se tienen los flujos perpendiculares.

Material

- 1 termómetro de bulbo de mercurio
- 1 anemómetro
- Guantes de asbesto

Servicios

- Vapor
- Energía eléctrica

Descripción del equipo

Intercambiador de flujo cruzado instalado en el LEM con arreglo triangularL

nt = 20
L_t = .4721 ft
BWG = 16
P_t = 1 in
De = 0.685 in

Conocimientos y/o actividades previas

1. Explique el funcionamiento de un intercambiador de calor de flujo cruzado.
2. Establezca qué ecuación (es), utilizaría para calcular experimentalmente el coeficiente global de transferencia de calor (Uexp) para el intercambiador anterior.
3. Mencione qué correlaciones se pueden utilizar para calcular teóricamente el coeficiente de transferencia de calor (Ut) para el flujo cruzado en el sistema experimental y explique por qué las seleccionó.
4. ¿Qué datos debe tomar durante la experimentación para el cálculo del coeficiente?
5. Explique qué uso tiene el anemómetro y cuál es su principio de funcionamiento.

Indicaciones experimentales

- Verificar que estén disponibles los servicios y abrir las válvulas.
- Revisar que todas las válvulas del equipo estén cerradas.
- Purgar el equipo; válvula de condensado abierta.
- Accionar el ventilador (extractor) para que jale el aire al interior del equipo.
- Tomar la temperatura del aire.
- Cuando el equipo esté en condiciones estables (cuando no varíe notablemente la presión) tomar lecturas de temperaturas, velocidad de flujo de aire de alimentación (utilizar el anemómetro) y presión a que se trabaja.
- Al variar las revoluciones por minuto del extractor cuidar no exceder al 70 %.
- Cerrar válvula de vapor, dejar circular el aire, abrir válvula de condensado, cerrar todas las válvulas del equipo y de la estación.
- Dejar limpio el equipo.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Presentar en forma tabulada los resultados experimentales.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor para cada corrida experimental.
- Calcule el coeficiente global de transferencia de calor utilizando las correlaciones apropiadas.
- Grafique U exp. vs Re y Ut vs Re en la misma gráfica
- Presente en forma tabulada los resultados obtenidos experimentalmente y por correlación.

Bibliografía

- Kern D. Q., *Procesos de transferencia de calor.*, Editorial Patria, Mxico, (2009).
- Perry R.H., *Manual del Ingeniero Químico*, Uteha, 7ª Edición, Mxico, (2010).
- Valiente A.*, Manual del Ingeniero Químico*, Limusa, México, (1993).
- Welty J. R., Wicks C. E., Wilson R.E., *Transferencia de momento, calor y masa*, Limusa, México, (1985).
- Cao, E., *Transferencia de calor en ingenería de procesos,* Editorial Nueva Librería, México (2006).

Banco de intercambiadores de calor
(Intercambiador de tubos de vidrio y coraza de vidrio)
(Intercambiador de tubos de acero inoxidable y coraza de vidrio)

Introducción

Intercambiador de calor, por definición es un equipo cuyo principal propósito es la transferencia de energía entre dos fluidos. Una corriente donde circula un fluido frío y otra donde circula un fluido caliente, que no están en contacto directo sino que están separados por la pared de un tubo o algún tipo de superficie. Los tubos que están concentrados en una coraza pueden ser de diferentes materiales. Los cuales de acuerdo a su estructura molecular tienen cierta conductividad térmica, lo que implica el realizar un diseño adecuado para el tipo de fluido que queramos tratar y nos permita un porcentaje alto de eficie cia en la transmisión de calor.

En el diseño y selección del material de los tubos se debe tomar en cuenta la corrosión que pueden causar los fluidos que se están manejando. El material de construcción más común es el acero al carbón. Aunque se pueden construir de otros materiales como acero inoxidable, el cual se utiliza en plantas químicas para prevenir la corrosión; y sobretodo en el área alimentaria y farmacéutica donde se requiere que el fluido a calentar o enfriar no se vea contaminado por el material de los tubos. Otros materiales son las aleaciones de diversos metales utilizadas para servicios en las plantas químicas y petroquímicas, en el enfriamiento de agua.

En el LEM existen otros intercambiadores de tubos y coraza, construidos de acero al carbón en posición horizontal y arreglos de flujo a contracorriente y en paralelo; la finalidad de experimentar con ellos es determinar la eficiencia que cada uno aporta con base en sus diferencias y que ya se han estudiado en prácticas anteriores, así como la importancia de calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U); por lo que en esta práctica nos enfocaremos a hacer la comparación, en cuanto al funcionamiento y rendimiento de intercambiadores de calor de vidrio y cómo influye el material de construcción de los tubos, el arreglo del fluido así como la posición del equipo.

Objetivo

Comprender la importancia del coeficiente de transferencia de calor como medida de la eficiencia de un intercambiador y estudiar sus variaciones al cambiar el material de construcción del intercambiador de calor y modificando la dirección del flujo.

Problema experimental

Obtener experimentalmente el coeficiente global de transferencia de calor en los dos arreglos de flujo de intercambiadores de calor instalados en el LEM de I.Q. (paralelo y contracorriente), tomando en cuenta los materiales de construcción para comparar la eficiencia en la transferencia de calor.

Material

- Probeta de 4 L
- Cronómetro

Servicios

- Agua caliente
- Agua fría
- Energía eléctrica

Equipo

- Intercambiador de calor de tubos de acero inoxidable y coraza de vidrio (el cual se puede operar en arreglo en contracorriente y en paralelo).
- Intercambiador de calor de tubos y coraza de vidrio, que sólo puede ser utilizado en paralelo.

Para ambos:

13 tubos
De = 0.5625 in
Di = 0.5312 in
Arreglo Δ
Pt = 2 cm
Long. 1 m
3 mamparas 25 % de corte
Coraza = Di = 3.5781 in

Conocimientos y/o actividades previas

1. Mencione los tipos de aleaciones más empleadas en la construcción de los tubos en los intercambiadores de calor.
2. En qué casos se utiliza acero inoxidable y cuáles son las diversas aleaciones que se recomiendan para construir un intercambiador de calor con este material.
3. Describa qué diferencia hay entre un intercambiador de calor de un paso y uno de pasos múltiples.
4. Explique el significado del arreglo cuando se dice que el intercambiador trabaja a contracorriente y en paralelo; así como las ventajas y desventajas que se presentan en cada caso.
5. Elabore y explique un esquema sencillo que muestre las variaciones de la temperatura que experimenta cada una de las corrientes de flujo
   - En paralelo
   - En contracorriente
6. Escriba las ecuaciones que utilizará para calcular el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador para los casos donde las corrientes se encuentren:
   - En paralelo
   - En contracorriente
7. Especifique los datos que deberá tomar durante la experimentación:
   - En paralelo
   - En contracorriente

Indicaciones experimentales

- Verificar que los servicios estén disponibles.
- Revisar que el calentador esté vacío y alimentar el agua (cuidar que no se inunde).
- Abrir las válvulas de agua de servicio que alimenta el calentador de agua y calentar.
- Abrir la válvula de agua fría. Y fijar el flujo de alimentación.
- Alimentar el agua caliente y fijar su flujo.
- Tomar lectura de las temperaturas de entrada y salida de ambas corrientes.
- Repetir el experimento modificando el flujo de alimentación de agua fría.
- Una vez concluido el experimento, apagar el calentador eléctrico, cerrar la alimentación de agua caliente y posteriormente, la del agua fría una vez que ésta salga del equipo a temperatura ambiente.
- Cerrar las válvulas de los servicios.
- Vaciar el equipo. Si se presuriza alguno de los intercambiadores abrir la válvula de alivio.
- Revisar constantemente el calentador eléctrico para que no se inunde y que se mantenga la temperatura deseada, utilizar el paro de emergencia si es necesario.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Elaborar los diagramas de temperatura en las dos formas de flujo.
- Obtener los coeficientes de calor teóricos y experimentales.
- Comparar los resultados obtenidos en cuanto al material del intercambiador (de tubos de vidrio y acero inoxidable).
- Comparar los resultados obtenidos en cuanto al tipo de corriente (paralelo y a contracorriente).
- Gráficar los coeficientes de calor vs Re para los dos tipos de corrientes.
- Comparar los resultados obtenidos y concluir cuál de los dos tipos de flujo es más eficientey en cuál de los materiales de tubos.

Bibliografía

- Alfa-Laval., *Manual de industrias lácteas.* 2ª Edición, México, (1990).
- Casp, A,. *Procesos de conservación de alimentos*, 2ª Edición, Ediciones Mundi-Prensa, España, (2003).
- Incropera, F.P., F*undamentos de transferencia de calor,* Prentice Hall/Pearson, México, (2006).
- Kern, D. Q. *Procesos de transferencia de calor.*,Editorial Patría, México, (2009).
- Perry, R. H., *Manual del Ingeniero Químico*, 7ª Edición, McGraw-Hill, NewYork, (2010).

Banco de intercambiadores de calor
Intercambiador de placas

Introducción

Los intercambiadores de calor de placas se desarrollaron a principios de siglo XX (1920) para atender las necesidades de la industria agroalimentaria. Hoy en día se fabrican estos intercambiadores con tecnologías muy diferentes para dar servicio a industrias muy distintas.

Son utilizados generalmente en la industria alimenticia, vitivinícola y farmacéutica para la esterilización y pasteurización de productos; así mismo, son empleados en la industria química en la elaboración de goma sintética, elaboración de papel y en las plantas petroquímicas.

El intercambiador de placas (figura 1) para su designación se utiliza con frecuencia la abreviatura inglesa de Plate Heat Exchanger, PHE; consiste en varias placas metálicas que sirven como superficies de transferencia de calor y que están montadas sobre un bastidor (entre un cabezal fijo y otro móvil); formado por una barra riel y dos placas gruesas que sirven de extremos al paquete.

Las principales ventajas de los intercambiadores de calor de placas son:

- Coeficientes de transferencia de calor muy altos en ambos lados del intercambiador.
- Facilidad de inspección de ambos lados del intercambiador.
- Facilidad de limpieza.
- Facilidad para disminuir o incrementar el área de transferencia de calor.
- Ocupan poco espacio en relación a otros tipos de intercambiadores.
- Bajo costo, especialmente cuando se tienen que construir de metales caros.

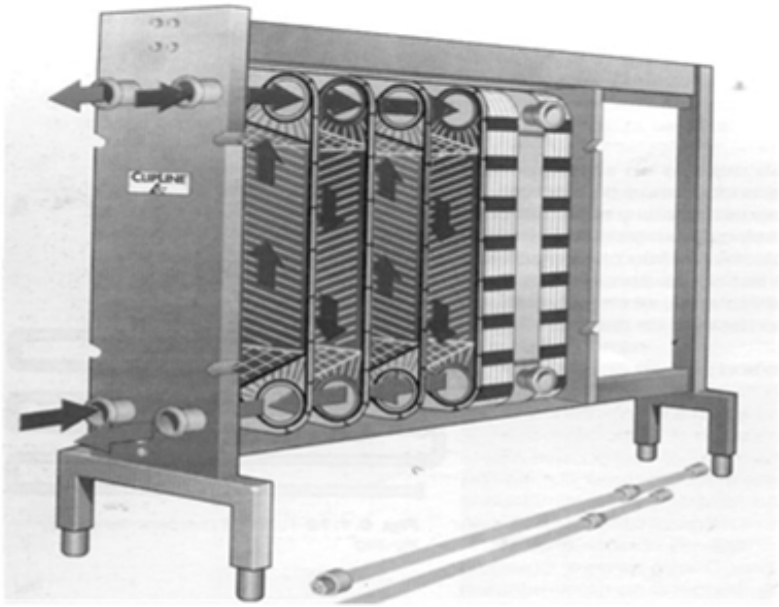


Figura 1. Intercambiador de placas Alfa-laval

La eficiencia de la transferencia de calor en estos intercambiadores se debe a la turbulencia que presentan los fluidos a velocidades bajas. Esta turbulencia inducida se produce porque los fluidos, fluyen en corrientes de pequeño espesor (3-5 mm) con cambios abruptos en su dirección y velocidad. Lo anterior reduce la resistencia al intercambio de calor de la película del líquido, con mayor eficiencia que la turbulencia originada por velocidades y presiones altas que ocurren en los intercambiadores tubulares.

Objetivos

- Aplicar los conceptos de transferencia de calor para resolver el problema experimental planteado para el intercambiador de placas y adquirir una mejor comprensión en la obtención de los coeficientes de transferencia de calor y sus mecanismos.
- Conocer el uso de los intercambiadores de calor de placas.

Problema experimental

Obtener los coeficientes globales de transferencia de calor en intercambiadores de calor de placas, haciendo las modificaciones adecuadas a las ecuaciones empleadas en los intercambiadores de horquilla, tubos y coraza y comparando los resultados con los obtenidos.

Servicios

- Agua fría
- Agua caliente

Equipo

- 29 placas
- 25 acanaladuras
- 10. 5 in altura
- 30 cm largo

Conocimientos y/o actividades previas

1. Hacer el diagrama de flujo del intercambiador de placas identificando todos sus componentes.
2. ¿Cuáles son los diferentes tipos de acanaladuras de las placas y cuál es su función?
3. ¿Cuál es la función de las juntas y de qué material se fabrican?
4. ¿Qué correlación utilizará para calcular el coeficiente individual y global de transferencia de calor en el equipo?
5. Hacer una tabla indicando los datos experimentales que debe tomar.
6. ¿Cuáles son las desventajas de utilizar un intercambiador de placas y por qué?
7. En que operaciones unitarias se utiliza más frecuentemente el intercambiador de placas.

Indicaciones experimentales

- Verificar que los servicios estén disponibles.
- Revisar que el calentador eléctrico esté vació y alimentar el agua (cuidar que no se inunde).
- Abrir las válvulas de agua de servicio que alimenta el calentador de agua y calentar.
- Abrir la válvula de agua fría y fijar el flujo de alimentación.
- Alimentar el agua caliente y fijar su flujo.
- Tomar lectura de las temperaturas de entrada y salida de ambas corrientes y porcentaje de alimentación de flujo de las corrientes hasta alcanzar el régimen permanente.
- Repetir el experimento modificando el flujo de alimentación de agua fría.
- Una vez concluido el experimento, apagar el calentador eléctrico, cerrar la alimentación de agua caliente y posteriormente la del agua fría, una vez que ésta salga del equipo a temperatura ambiente.
- Cerrar las válvulas de los servicios.
- Vaciar el equipo. Si se presuriza alguno de los intercambiadores abrir la válvula de alivio.
- Revisar constantemente el calentador eléctrico para que no se inunde y que se mantenga la temperatura deseada, utilizar el paro de emergencia si es necesario.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Tablas de datos experimentales.
- Calcular los coeficientes global experimental y teórico e individuales.
- Graficar los coeficientes globales (teórico y experimental) contra Re.
- Concluir la importancia y uso particular de cada cambiador de acuerdo a los valores experimentales y teóricos obtenidos.
- Graficar los coeficientes obtenidos en el intercambiador de placas y los obtenidos para el intercambiador de tubos y coraza (agua-vapor).

Bibliografía

- Alfa-Laval., *Manual de industrias lácteas*, 2ª Edición, México, (1990).
- Bylund M.Gösta, *Manual de industrias lácteas*, Traducido por López Gómez Antonio y Madrid Vicente Antonio, Ediciones A. Madrid Vicente y Mundi-Pensa Libros, S.A., Madrid, España, (2003).
- Casp, A., *Procesos de conservación de alimentos*, 2ª Edición, Ediciones Mundi-Prensa, España, (2003).
- Kern, D. Q. *Procesos de transferencia de calor,* Editorial Patría, México, (2009).
- Perry, R. H., *Manual del Ingeniero Químico*, 7ª Edición, McGraw-Hill, NewYork, (2010).

Transferencia de calor en recipientes enchaquetados

Introducción

Transferir calor desde o hacia un recipiente es una operación común en la industria química. Una manera de hacerlo es mediante el uso de chaquetas por donde circula el fluido de enfriamiento o calentamiento, como se muestra en la figura 1. Los equipos pueden ser cristalizadores, evaporadores, reactores, entre otros. En el diseño de dichos equipos es necesario considerar la velocidad de calentamiento o enfriamiento necesaria para llevar a cabo la operación deseada y, por lo tanto, se requiere saber la forma como se modifica la velocidad de transferencia de calor con las variables de diseño y operación.

Dentro de las variables de diseño que influyen directamente sobre la velocidad de transferencia de calor están, para el caso de la chaqueta: la geometría, las dimensiones del espacio anular, el uso de deflectores u otros medios para promover altas velocidades de flujo, uso de boquillas de agitación, entre otras variables; y para el caso del interior del recipiente las variables de diseño son: geometría y dimensiones del tanque, sistema de agitación, tipo de agitador, uso de deflectores, dimensiones, geometría y potencia del sistema de agitación. Por otra parte, dentro de las variables de operación que influyen en la velocidad de transferencia de calor se tienen: los flujos de los fluidos, presión y temperatura. Estos equipos pueden trabajar de forma continua o por lotes. En este último caso, la velocidad de transferencia de calor y las temperaturas en el recipiente y la chaqueta cambian con el tiempo.

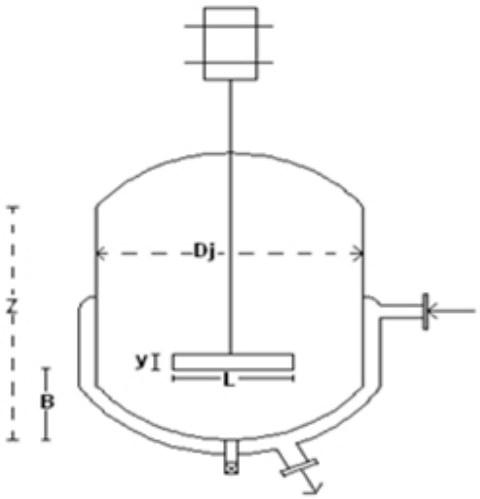


Figura 1. Diagrama de un recipiente enchaquetado con agitación

Objetivo

Aplicar los conceptos de transferencia de calor en recipientes enchaquetados. Adquirir una mayor comprensión de las variables de operación y diseño que afectan la velocidad de transferencia de calor.

Problema experimental

- Determinar los coeficientes globales de transferencia de calor para el sistema vapor-agua y agua-agua. Resolver los modelos matemáticos de calentamiento y enfriamiento en estado transitorio y comparar los resultados del modelo con los experimentales.

Material y equipo

- Reactor enchaquetado de tanque agitado
- Guantes de asbesto

Servicios

- Agua fría
- Energía eléctrica
- Vapor

Descripción del equipo

Reactor enchaquetado fabricado por Pfaudler S.A. de C.V., construido en acero inoxidable con capacidad de 19 litros. El recipiente cuenta con tres deflectores en su interior, el diseño del fondo es del tipo torisférico. El agitador es tipo turbina de tres hojas curvas de 17 cm de diámetro, es impulsado por un motor trifásico y opera a una velocidad fija de 87 rpm. La chaqueta es del tipo convencional sin boquillas de agitación ni deflectores y tiene un volumen de 5.5 litros. El diámetro del recipiente es de 305 mm, la altura sin incluir la tapa torisférica es de 254 mm y la altura de la concavidad del fondo es de 0.049 mm.

Conocimientos y/o actividades previas

1. Describa brevemente los componentes internos y externos de los recipientes enchaquetados.
2. Dibuje al menos tres tipos de agitadores y mencione sus aplicaciones.
3. Para una operación por lotes en la que se carga un líquido en el recipiente a una temperatura dada y se calienta con vapor o se enfría con agua que circula continuamente por la chaqueta, establezca el balance de energía considerando los siguientes sistemas: a) el líquido en el recipiente y b) la chaqueta y su contenido.
4. Considerando un coeficiente global de transferencia de calor constante, escriba la ecuación que describe el perfil de temperatura con el tiempo para una operación por lotes.
5. Escriba alguna correlación empírica para el coeficiente de transferencia de calor en la chaqueta y otra para el coeficiente de transferencia de calor dentro del recipiente, que sean aplicables al equipo que se utilizará.
6. Proponga paso a paso el procedimiento experimental.
7. Revise el equipo y las líneas de alimentación, salida y servicios auxiliares. Elabore un esquema del equipo y un diagrama de flujo

Indicaciones experimentales

- El nivel del lubricante debe estar en la marca del vidrio de nivel; no se debe usar la bomba para presurizar el lubricante; en el caso de detectar un alto o bajo nivel se debe informar al profesor.
- Si se tiene que alimentar vapor a la chaqueta purgue la línea de condensado y alimente lentamente el vapor. Se recomienda no encender el motor del agitador durante la purga ni durante el periodo de aumento de presión del vapor. Una vez alcanzada la presión del vapor deseada encender el agitador y comenzar a tomar las lecturas de tiempo y temperatura.
- Si se requiere cambiar de calentamiento con vapor a enfriamiento con agua se tiene que eliminar el vapor de la chaqueta y alimentar el agua muy lentamente para evitar el choque térmico. Durante el periodo de cambio del fluido de la chaqueta y hasta que se alcance el flujo de agua deseado se debe mantener apagado el agitador.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Procedimiento experimental.
- Tabla de registro de datos durante la experimentación.
- Gráficas de temperatura interna (experimental y calculada con la ecuación del punto 4 de la sección de conocimientos y actividades previas) contra tiempo .
- Gráficas de temperatura de salida de agua de enfriamiento contra tiempo.
- Coeficientes experimentales de transferencia calor.
- Comparación de los coeficientes del punto anterior y los coeficientes calculados a partir de las correlaciones del punto 5 y 6 de la sección de conocimientos y actividades previas.

Bibliografía

- Kern D. Q., *Procesos de transferencia de calor*, Editorial Patría, México, (2009).
- Ludwing, N. Ludwing´s *Applied process design for chemical and petrochemical plants*, Gulf Professional Publishing, 4th. Ed., New York, (2007).
- Thomson, W.J., *Introduction to transport phenomena,* Prentice Hall PTR, USA, (2000).
- Tosun, I. *Modeling in transport phenomena a conceptual approach*, 2th Ed., Elsevier, USA, (2007).

Evaporación

Introducción

En general se entiende por evaporación aquella operación que tiene por objeto concentrar una solución "evaporando" parte del líquido en recipientes calentados con vapor de agua. En la tecnología de los procesos convencionales se consideran los evaporadores como secadores o concentradores de líquidos, ideados para separar disolventes de las sustancias disueltas por evaporación. Siendo que en la mayor parte de las aplicaciones el disolvente es agua.

Normalmente en casi todos los casos la sustancia disuelta es el producto más valioso. Consideramos como una excepción importante la desalinización del agua. La evaporación, como operación unitaria de Ingeniería química, es diferente de la destilación porque la sustancia disuelta no es volátil y se puede lograr la separación completa.

Entre los ejemplos típicos de evaporación están: la concentración de soluciones acuosas de sosa, azúcar, sal, glicerina, gomas, leche y jugo de naranja; una aplicación importante de la evaporación es para la obtención de agua potable, a partir de agua de mar. El tipo de equipo empleado depende tanto de las características de la superficie para la transferencia de calor, de los medios utilizados para lograr la agitación o circulación del líquido; además de las propiedades de la solución y la eficiencia del equipo. En nuestro caso se emplearan el evaporador de tipo calandria y el evaporador vertical de tubos largos.

El evaporador vertical de tubos largos, consiste en un intercambiador de calor de tubo y coraza vertical que descarga en un cabezal de vapor relativamente pequeño. Este tipo de evaporador es empleado para la concentración de licores negros en las industrias papeleras y para la obtención de pulpa de madera. Debido a los tubos largos y los coeficientes relativamente elevados de transferencia de calor, es posible lograr capacidades más altas de unidad simple que en otros evaporadores. Este tipo de evaporadores presenta un alto rendimiento energético. El diseño independiente para cada caso en particular reduce necesidades de superficie y costos de instalación.

Sus características hacen que sea idóneo para la concentración de productos termo sensibles, así como una operación con bajas diferencias de temperatura, obteniendo altas eficiencias térmicas.

El evaporador de calandria o de tubos cortos, es compacto, relativamente barato y eficiente. Tiene buena eficiencia con líquidos de baja viscosidad. Es de servicio fiel en la industria de la refinación de azúcar. En un proceso de evaporación la capacidad se determina por la velocidad del suministro de calor. Como el calor se transmite por conducción y convección, la capacidad se determina por la ecuación 1:

$$\frac{Q}{\theta} = UA\,\Delta T \quad .....(1)$$

Donde:

$\frac{Q}{\theta}$ = Kilocalorías transmitidas por hora
A = Área transmisora del calor m^2
ΔT = Diferencia de temperaturas (Tv - Te), ^0C
Tv = Temperatura del medio caliente (generalmente vapor)
Te = Temperatura de ebullición o de vaporización de la solución
U = Coeficiente g obal de transferencia de calor

También se puede calcular la capacidad de evaporación (ecuación 2) que se define como la relación del gasto de vapores producidos al área de transmisión de calor.

$$\text{Capacidad de evaporación} = \frac{Ge}{A} \quad .....(2)$$

Donde:
Ge = líquido evaporado Kg/h
A = área de transferencia m^2

Economía del evaporador (Ecuación 3). Es la relación del gasto de las vaporizaciones entre el gasto de vapor de calentamiento:

$$\text{Economía} = \frac{Ge}{GV} \quad .....(3)$$

Donde:
Ge = Líquido evaporado kg/hr
Gv = Vapor de calentamiento empleado kg/hr

Objetivo

Conocer el funcionamiento básico de los evaporadores (calandria y vertical de tubos largos), y comprender las ventajas y desventajas de cada uno de ellos a ciertas condiciones dadas.

Problema experimental

Determinar experimentalmente el coeficiente global de transferencia de calor y la eficiencia de los equipos empleados, a diferentes condiciones de operación.

Material

- Guantes
- 1 termómetro de bulbo

Servicios

- Agua (helada y de servicio)
- Vapor
- Vacio

Equipo

1. Evaporador de calandria instalado en el LEM.

2. Evaporador vertical de tubos largos instalado en el LEM con:

- Arreglo Δ
- np 2
- nt = 8
- BWG = 16
- De = 3/4 in
- LT = 2.104 m

Conocimientos y/o actividades previas

1. ¿Qué tipo de evaporadores son los más empleados en la industria química? Explique cuál es la diferencia.
2. ¿Qué entiende por evaporación a simple efecto e indique las diferencias entre efecto simple intermitente y continuo?
3. Enumere el equipo principal y auxiliar en un sistema de evaporación continuo a simple efecto (como el que empleara).
4. Indique los medios más usuales para llevar la evaporación a vacío y que ventajas se obtienen.
5. Mencione los factores que intervienen para hacer una buena selección de equipos para evaporación a simple efecto.
6. ¿Qué variables debe controlar cuando se opera un evaporador?
7. Elabore el diagrama de flujo de los evaporadores instalados en el LEM.
8. Explique cómo calcularía experimentalmente el coeficiente global de transferencia de calor.
9. ¿Qué es la economía de un evaporador y cómo se cuantifica?
10. ¿Qué correlación (es) utilizará para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor teórico en los evaporadores?

Indicaciones experimentales

Tubos largos:

1. Verificar que los servicios estén disponibles.
2. Cerrar todas las válvulas del equipo.
3. Es importante que alimente el agua helada a los condensadores y verifique que esté circulando constantemente.
4. Verifique que la temperatura de entrada del agua fría a los condensadores se mantenga lo más frío posible, menor a 16°C a la entrada y 25°C a la salida; de no ser así dé aviso a su asesor de inmediato.
5. Abrir la válvula que se encuentra en la parte superior del intercambiador de calor y abrir el suministro de vapor para purgar el equipo.
6. Verificar que las presiones de vacío del evaporador y que los dos tanques de recepción sean iguales.
7. Verificar que la presión de vapor no exceda de 2 kg_f/cm^2.
8. Cuidar que el evaporador no se inunde (ver por la mirilla si alguno de los tanques se llena muy rápido).

9. Esperar que el equipo se estabilice.
10. Tomar lecturas de las variables que requiera para realizar sus cálculos.
11. Si el equipo se inunda, cerrar servicios y vaciar el equipo.

Calandria:

1. Verificar los servicios estén disponibles.
2. Cerrar todas las válvulas del equipo.
3. Es importante que alimente el agua helada al condensador y verifique que esté circulando constantemente. Verificar constantemente que la temperatura sea menor a 16°C a la entrada y 25°C a la salida; de no ser así, dé aviso a su asesor de inmediato.
4. Cuando suministre el vapor es importante que la presión no exceda a 1.5 kg/cm^2.
5. Dejar que el equipo se estabilice.
6. Tomar lecturas de las variables que requiera para realizar sus cálculos.
7. Si el equipo se inunda, cerrar servicios, vaciar el equipo y reiniciar la operación.

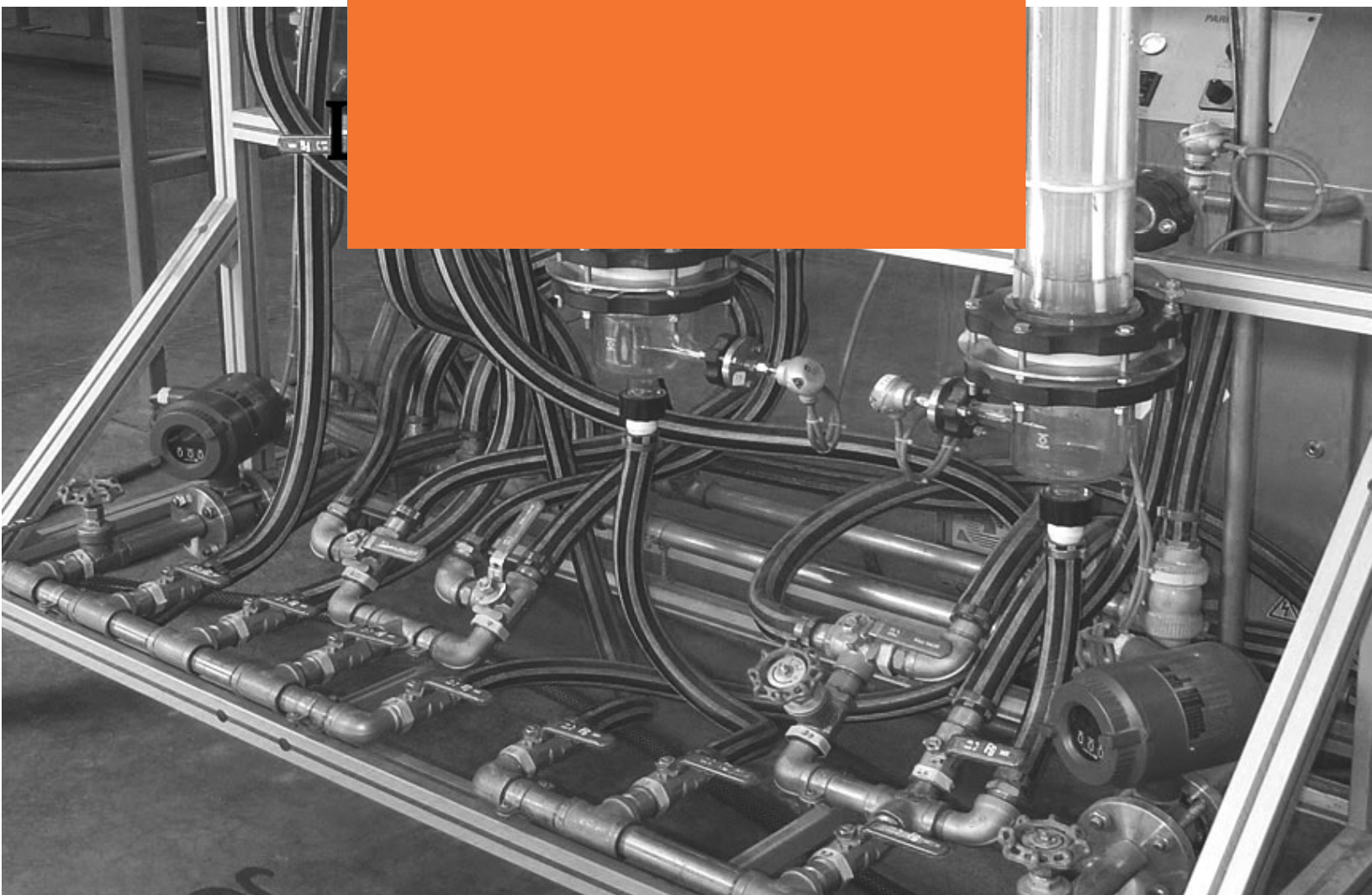
Puntos importantes que debe contener el informe

- Tabular los datos obtenidos en las diferentes corridas experimentales realizadas.
- Calcular el coeficiente global de transferencia de calor experimental y la economía para cada corrida de cada evaporador.

Bibliografía

- Geankoplis C. J., *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, CECSA, 3ª Edición, México, (1998).
- Griskey, J.R.C., *Transport phenomena and unit operations: a combined approach*, Wiley & Sons Inc. USA, (2002)
- Kern D. Q., *Procesos de transferencia de calor*, Editorial Patría, México, (2009).
- Perry R.H., *Manual del Ingeniero Químico,* Uteha, 7ª Edición, México, (2010).

LEM IV



Presentación

La presente asignatura (LEM IV) del laboratorio de Ingeniería química representa un nivel de integración de los conocimientos adquiridos en cursos teóricos y experimentales de semestres anteriores. De esta manera, los conceptos de presión de vapor, equilibrio de fases, potencial químico, entre otros del campo de la fisicoquímica y los conocimientos sobre caídas de presión por fricción, medidores de flujo, transferencia de calor, etc. del campo de la ingeniería, estarán presentes explícita o implícitamente en los fenómenos y operaciones que se estudiarán en esta materia. Estos conocimientos sumados a los conceptos propiamente de transferencia de masa, permitirán resolver la serie de problemas experimentales que se plantean.

Es importante señalar la innegable necesidad de los cursos de laboratorio en el área de transferencia de masa. Es difícil entender el significado de la turbulencia y la relación que guarda con la velocidad de transferencia de masa y más aun, entender el alcance y las limitaciones de nuestros modelos y métodos sin una experiencia directa con la realidad. Las asignaturas del laboratorio de Ingeniería química proporcionan ese contacto directo con un equipo o un dispositivo experimental, para observar el efecto de las condiciones del experimento sobre la velocidad de transferencia de masa. Este paso del "pizarrón" al equipo del laboratorio permite ajustar criterios y concretar conceptos teóricos, con el fin de lograr un aprendizaje significativo.

El presente material de apoyo está destinado a servir de guía en el estudio experimental de los fenómenos de transferencia de masa. Pero conviene resaltar que solamente es eso, una guía; y que el verdadero trabajo experimental no se reduce solamente a contestar los cuestionarios, realizar las prácticas y estar presentes en las discusiones. Sino, que se debe cuestionar a cada paso el fenómeno en sí y la metodología empleada. Es conveniente aclarar que el objetivo de esta asignatura no consiste sólo en abrir y cerrar válvulas o en tomar lecturas de temperatura, presión y flujo; sino en modificar variables y en relacionar las condiciones de operación, la geometría y las dimensiones del equipo.

La asignatura está dividida en tres partes. En la primera parte, los temas de difusión molecular y psicrometría, serán estudiados mediante experimentos estructurados, en los cuales se le plantea al

alumno el procedimiento que debe de seguir y las mediciones que debe realizar. En la segunda parte, los temas de relleno de columnas, caídas de presión en torres empacadas, humidificación adiabática ytorres de enfriamiento se plantean con mayores grados de libertad. Esto significa que el estudiante podrá elaborar un procedimiento y especificar las condiciones experimentales para dar una respuesta al problema planteado. Sin embargo, estos grados de libertad se encuentran acotados mediante la guía que marca el camino para el planteamiento y solución del problema. En la tercera y última parte del curso, ya no existe este acotamiento y el alumno podrá generar su propio proyecto en un determinado tema experimental a su elección.

Esta división de la asignatura tiene la finalidad de, por un lado, cubrir algunos de los temas más representativos del curso de transferencia de masa, y por otro lado, desarrollar las actitudes y habilidades necesarias para enfrentar el tipo de problemas que se presentan en la realidad.

Objetivo general

Al finalizar el curso el alumno deberá ser capaz de: explicar los conceptos y modelos matemáticos básicos de transferencia de masa, para la comprensión, explicación y caracterización de fenómenos en operaciones industriales ensayadas experimentalmente a nivel planta.

Contenido del curso

- Difusión molecular
- Psicrometría
- Relleno de columnas
- Caídas de presión en torres empacadas
- Humidificación adiabática
- Torres de enfriamiento
- Proyecto

Difusión molecular

Introducción

La difusión de materia es uno de los fenómenos de transporte en el cual una o varias especies químicas se desplazan de una región a otra en virtud de un gradiente de potencial químico. El proceso se lleva a cabo en la dirección que tienda a igualar el potencial químico de cada componente en todas las regiones del sistema. En el caso de un sistema compuesto de una fase homogénea, a temperatura y presión constantes, la tendencia a igualar el potencial químico equivale a igualar las concentraciones. Llevar un sistema, en fase líquida o gas, a una composición uniforme, puede hacerse mediante mezclado mecánico, en cuyo caso el proceso de transferencia se conoce como difusión turbulenta. En ausencia del movimiento convectivo producido por la agitación mecánica, la difusión de materia o transferencia de masa se conoce como difusión molecular.

Una forma de visualizar la difusión molecular es considerar el movimiento aleatorio de las moléculas, de acuerdo a la teoría cinética de los gases. De acuerdo con esta teoría, las moléculas se mueven con una velocidad promedio que depende de la temperatura; en su movimiento, chocan unas con otras. En cada colisión la velocidad cambia de dirección y magnitud. Imaginemos una región dividida en dos compartimientos, como se muestra en la figura 1; el primer compartimiento contiene moléculas del gas A y el segundo compartimiento moléculas del gas B. Al retirar la barrera, el movimiento aleatorio de las moléculas ocasiona que algunas moléculas de A se desplacen a la región de las moléculas B; de forma similar algunas moléculas de B se desplazan en dirección inversa. Si este proceso continua por un tiempo suficientemente largo, finalmente se alcanza una distribución uniforme de ambos tipos de moléculas en todo el sistema. Aun cuando las moléculas se mueven en forma aleatoria en todas direcciones y chocan unas con otras, el efecto neto es el movimiento global de cada componente en la dirección de mayor a menor concentración.

De manera similar, la teoría cinética proporciona una base para entender el efecto de la temperatura y presión. Al aumentar la temperatura, la velocidad media de las moléculas se incrementa, por

lo que la velocidad de difusión aumenta. Por otro lado, al aumentar la presión el número de moléculas por unidad de volumen también aumenta, por lo que el número de colisiones se incrementa retardando de esta manera, el proceso de difusión.

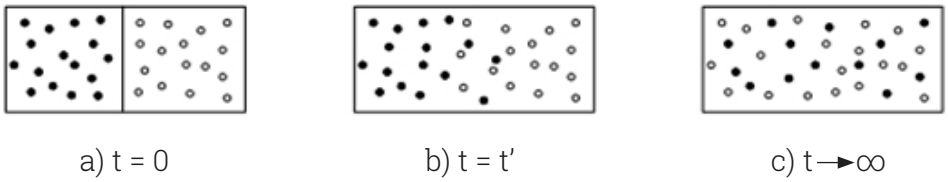


Figura 1. Difusión molecular de A en B y B en A en fase gas; a) estado inicial con las moléculas de A y B separadas por una barrera, b) algunas moléculas se han desplazado de una región a otra al eliminar la barrera, c) después de un tiempo muy largo las moléculas de A y B se distribuyen en todo el volumen

El flujo neto de materia en la dirección x por unidad de área de sección transversal puede ser expresado mediante la 1ª ley de Fick:

$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x}$$

Donde D_{AB} es el coeficiente de difusión y C_A es la concentración del componente A. En esta ecuación se ha utilizado el gradiente de concentración como fuerza impulsora, lo cual puede ser incorrecto en ciertas situaciones; sin embargo, su uso es generalizado y la mayoría de los valores reportados del coeficiente de difusión se basan en esta ecuación o en alguna otra forma equivalente, por lo que para efectos de cálculo de ingenería, es bastante aceptable. Para comprender el fenómeno de difusión molecular y la aplicación de la ecuación (1), en el presente trabajo experimental, se determinará el coeficiente de difusión de un vapor en aire, en una celda de Arnold y el coeficiente de difusión en líquidos. Estos coeficientes son propiedades muy importantes que impactan en el diseño de equipos utilizados en transferencia de masa.

Objetivo

Comprender el fenómeno de difusión molecular. Aplicar la ley de Fick y analizar las condiciones experimentales que afectan el valor del coeficiente de difusión para gases y líquidos.

Problema experimental

Determinar el coeficiente de difusión de vapor de acetona en aire a diferentes temperaturas. Determinar el coeficiente de difusión de cloruro de sodio en agua utilizando una solución 2M de cloruro de sodio.

Material

- Celda de difusión de Arnold
- Bomba de aire
- Mangueras de látex
- Baño de temperatura constante
- Soporet universal
- Pinzas para bureta
- Termómetro
- Cronómetro
- Celda de difusión para líquidos
- Agitador magnético

Conocimientos y/o actividades previas

1. ¿Cómo varía el coeficiente de difusión en gases con respecto a la temperatura y la presión?
2. Investigue en la literatura la forma de estimar el coeficiente de difusión en gases.
3. Escriba las ecuaciones necesarias y describa cada uno de los términos.
4. Escriba la ecuación de difusión de A en B estacionario y explique cada uno de los términos.
5. Investigue en qué consiste la celda de Arnold y sus principales características.
6. Investigue en la literatura la ecuación para determinar el coeficiente de difusión en una celda de Arnold.
7. Indique las variables que debe medir para determinar el coeficiente de difusión mediante la ecuación del punto anterior.
8. ¿Cómo varía en magnitud el coeficiente de difusión en líquidos con respecto al de los gases?
9. Investigue en la literatura la forma de estimar el coeficiente de difusión para soluciones. Escriba las ecuaciones necesarias y describa cada uno de los términos.

10. Investigue el funcionamiento de una celda de tubos capilares para la determinación de coeficientes de difusión en líquidos.
11. Escriba la ecuación que describe el cambio de concentración en función del tiempo en la celda de tubos capilares.
12. ¿Qué datos deberá tomar durante el experimento de difusión en líquidos en la celda de tubos capilares?

Indicaciones experimentales

Celda de difusión de Arnold

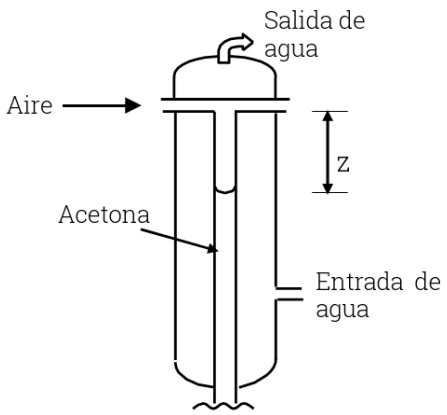


Figura 2. Dispositivo experimental (celda de Arnold)

La celda de Arnold para determinar el coeficiente de difusión se muestra en la figura 2. El dispositivo consiste en un tubo capilar en el cual se coloca un líquido volátil a una altura z del tope del capilar. Una suave corriente de aire se hace circular por la parte superior para eliminar el vapor que asciende por difusión. El capilar y su contenido se deben mantener a temperatura constante para evitar los errores ocasionados por la expansión térmica del líquido, los cambios en las propiedades de los fluidos y la variación en la difusividad. En el experimento que se llevará a cabo en el laboratorio, se deben considerar las siguientes indicaciones:

1. Antes del experimento, verificar que la celda esté limpia y seca.
2. Calentar el baño hasta la temperatura deseada (no mayor ni cercana al punto de ebullición de la acetona).
3. Introducir una cantidad de acetona de tal manera que la altura z del nivel del líquido al tope del capilar sea aproximadamente 2 cm.
4. Después de montar el dispositivo, hacer circular el agua proveniente del baño de temperatura constante y encender la bomba de aire.

5. Esperar por lo menos 15 minutos para registrar la primera altura z_1 y comenzar a tomar el tiempo.
6. Al finalizar el experimento lavar cuidadosamente la celda.

Celda de difusión de Arnold.

1. Preparar una solución de 117 g de sal/litro.
2. Llenar el tubo en "U" hasta el tope de los capilares con la solución preparada.
3. Llenar el recipiente con agua desionizada.
4. Conectar el medidor de conductividad a los electrodos de la celda y verificar que la lectura sea de 10^{-4} mho o menos.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Datos experimentales.
- Gráfica conductividad contra tiempo.
- Determinación del coeficiente de difusión de vapor de acetona en aire y cloruro de sodio en agua.
- Los valores esperados del coeficiente de difusión de acuerdo a las preguntas 2 y 7 de la sección de conocimientos y actividades previas.
- Datos de difusividad de vapor de acetona en aire y de la solución de cloruro de sodio reportados en la literatura.
- Tabla comparativa de los valores de los coeficientes de difusión (reportados en la literatura, los valores estimados y los obtenidos experimentalmente).
- Discusión sobre las posibles fuentes de error en los experimentos y la validez de los métodos empleados.

Bibliografía

- Bird, S. L. *Fenómenos de transporte*. 2ª ed. Limusa Noriega. México. 2010.
- Jaime, B. *Principles and modern applications of mass transfer operations*. Wiley Interscience. 2nd ed. USA. 2009.
- Koichi, A. *Mass transfer: from fundamentals to modern industrial applications*. Wiley-VCH. Germany. 2006.
- Ludwig, N. *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants.* Gulf Professional Publishing, 4th ed. New York. 2007.
- Treybal, R. E., *Mass transfer operations*. 3a ed. Mc Graw Hill. 1982

Psicrometría

Introducción

La psicrometría se ocupa de la determinación de las propiedades (temperatura de saturación, calor húmedo, volumen húmedo, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, etc.) de las mezclas de un gas y un vapor. El sistema aire-vapor de agua es el más común de las mezclas. Los principios para determinar sus propiedades son los mismos que rigen la determinación de las propiedades de las mezclas gas-vapor. Los fluidos aire y agua (vapor de agua) son de gran importancia en la industria de proceso. En particular están presentes en algunas operaciones extensamente utilizadas, como son: humidificación, secado, acondicionamiento de aire, enfriamiento de agua y algunos casos de absorción. En estas operaciones se presenta la transferencia de masa acompañada de transferencia de calor, esta última se debe a que el vapor de agua al condensarse (o el agua líquida al evaporarse) lleva asociado un calor latente de cambio de fase que se obtiene mediante ganancia o pérdida de calor sensible de una o de ambas fases. Esto ocasiona diferencias de temperatura en el sistema.

La transferencia simultanea de masa y calor que se produce por la evaporación de un líquido en una masa de gas, puede ser ejemplificada mediante algunos fenómenos cotidianos: la sensación familiar de frío, al salir de una alberca, producida por la evaporación del agua que se encuentra sobre la superficie de la piel; o lo que ocurre con la costumbre, cada vez menos usual, practicada en ciertas regiones calurosas, de mantener agua en un jarrón de barro poroso donde el agua se evapora en la superficie del jarrón, con el fin de mantener el agua relativamente fría. En estos ejemplos, la magnitud del efecto de enfriamiento (diferencia de temperatura entre el medio y la superficie del líquido) depende de la velocidad de evaporación, la cual está en función de un número de factores que están determinados por las condiciones de humedad y temperatura ambiental. Cuanto menor sea la humedad relativa, la velocidad de evaporación será mayor.

En muchas de las operaciones en Ingeniería química, el control de las propiedades de las mezclas aire-vapor son determinantes para lograr un funcionamiento satisfactorio del equipo.

En el caso de torres de enfriamiento, por ejemplo, las propiedades ambientales de temperatura y humedad determinan el diseño

y operación del equipo. En otras aplicaciones, las condiciones del aire se deben modificarpara su utilización, por ejemplo, en el secado de sólidos,el aire se calienta para aumentar la velocidad de transferencia de calor hacia el sólido y mejorar la velocidad de evaporación o velocidad de secado. En cualquier caso es necesario conocer las propiedades del aire.

En el presente desarrollo experimental se determinarán las propiedades de la mezcla aire-vapor de agua ambiental dentro y fuera de la nave de Ingeniería química y se estudiará el comportamiento del termómetro de bulbo húmedo. En este sencillo sistema (termómetro de bulbo húmedo) se envuelve el bulbo de un termómetro con una gasa mojada y se pone en contacto con una corriente de aire; una forma útil para realizar mediciones ambientales de temperatura de bulbo húmedo es mediante el uso de un psicrómetro de honda, el cual consiste de dos termómetros de bulbo, uno de ellos cubierto con la tela húmeda, montados sobre un dispositivo que permite girar los termómetros en el aire. La evaporación del líquido del bulbo húmedo produce una disminución de la temperatura, por lo que se establece un flujo de calor del bulbo al gas; la temperatura de estado estacionario alcanzada cuando se equilibra este flujo de calor sensible con el calor latente asociado a la velocidad de evaporación, se conoce como temperatura de bulbo húmedo.

Objetivos

- Comprender el significado de la temperatura de bulbo húmedo y las condiciones necesarias para su medición. Familiarizarse con las propiedades más importantes de las mezclas aire-vapor de agua y el uso de la carta psicrométrica.
- Comprender la importancia de la temperatura de bulbo húmedo en el diseño y operación de torres de enfriamiento.

Problema experimental

- Determinar experimentalmente las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente. Con esta información calcular las siguientes propiedades del aire: humedad absoluta (Y´), humedad relativa (HR), porcentaje de humedad (PH), entalpía de aire saturado (H´), temperatura de rocío (tR), volumen húmedo (VH), calor húmedo (Cs).

Conocimientos y/o actividades previas

1. Defina los siguientes conceptos.
    A. Presión de vapor.
    B. Presión parcial.
    C. Fracción masa y fracción mol.
    D. Humedad absoluta.
    E. Humedad relativa.
    F. Porciento de humedad.
    G. Entalpía de mezclas aire-agua en base seca.
    H. Calor húmedo.
    I. Volumen húmedo.
    J. Temperatura de rocío.

2. Escriba las ecuaciones para los cálculos de: humedad (Y´), volumen húmedo (VH), calor húmedo (Cs), humedad relativa (HR), porcentaje de humedad (PH), entalpía (H´).
3. Escriba la ecuación de bulbo húmedo y describa cada uno de los términos.
4. Escriba la ecuación de enfriamiento y humidificación adiabática y describa cada uno de los términos.
5. ¿En qué casos y bajo qué condiciones se cumple la relación de Lewis?
6. ¿Qué es un higrómetro, cómo está constituido y para qué se utiliza?
7. Investigue que otros instrumentos existen para medir humedad de mezclas aire-agua.

Indicaciones experimentales

1. Hacer mediciones de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo con el psicrómetro todos los días durante dos semanas, por la mañana y por la tarde, registrando la hora y el lugar de las lecturas. Las mediciones se deben efectuar dentro y fuera de la nave 1000.
2. Cálcular las propiedades psicométricas y construir la carta de humedad aire-vapor de agua a la presión existente en Cuautitlán (p = 585 mmHg, intervalo de temperatura de 0 a 80° C).

Puntos importantes que debe contener el informe

- Carta de humedad (psicrométrica) y los valores numéricos obtenidos y tabulados para una presión (p = 585 mmHg) y una temperatura de referencia (t0 = 0°C). El tamaño minimo de la carta psicométrica debe ser "doble carta". La carta psicrométrica debe contener las líneas de:

    A. Porcentaje de humedad.
    B. Humidificación y enfriamiento adiabático.
    C. Volumen húmedo de aire saturado.
    D. Volumen específico del aire seco.
    E. Entalpía de aire saturado.
    F. Calor húmedo.

- Una tabla de propiedades ambientales para cada punto de medición que realizó durante el semestre.
- Con las lecturas de tw (temperatura de bulbo húmedo) que tomó diariamente, seleccione las del mes más cálido y húmedo, y estime la temperatura de bulbo húmedo (tw) de diseño a esas condiciones para una torre de enfriamiento.

Bibliografía

- Bird, S. L. *Fenómenos de transporte.* 2ª ed. Limusa Noriega. México. 2010.
- Jaime, B. *Principles and modern applications of mass transfer operations.* Wiley Interscience. 2nd ed. USA. 2009.
- Himmelblau D. M., *Principios y cálculos básicos en Ingeniería química*, Pearson Educación, México D.F., (1996).
- Koichi, A. *Mass transfer: from fundamentals to modern industrial applications*. Wiley-VCH. Germany. 2006.
- Treybal, R. E., *Mass transfer operations*. 3a ed. Mc Graw Hill. 1982.

Relleno de columnas

Introducción

En la transferencia de masa entre dos fases fluidas, ambas fases se ponen en contacto y los componentes se difunden con un flux de difusión NA (masa/tiempo área) que depende de la fuerza impulsora y el coeficiente de transferencia de masa. Para que exista una gran cantidad de masa total transferida se requiere proveer la suficiente área de contacto entre las fases. Una manera de proporcionar el área de contacto, en operaciones continuas de transferencia de masa, es mediante el uso de empaques dentro de una torre. Estas torres rellenas de empaque, ampliamente utilizadas en absorción, destilación y extracción líquida, consisten de un cuerpo generalmente cilíndrico, el relleno o empaque y una serie de internos necesarios para un desempeño satisfactorio. En estos equipos el líquido o el fluido más denso se introduce por la parte superior de la columna, donde un distribuidor de líquido es utilizado para lograr una adecuada irrigación del empaque. Por la parte inferior, el fluido menos denso, líquido, gas o vapor, se alimenta y asciende por la torre. En el caso específico de operaciones gas-líquido, el líquido desciende sobre el empaque, lo que retarda su caída, y el gas asciende por los huecos dejados por el empaque y el líquido. De esta manera la geometría y las características de humectación del empaque influyen de manera determinante en el área de transferencia formada.

El relleno de las torres empacadas pueden ser, en principio, de cualquier material sólido fácilmente accesible que proporcione el área de transferencia de masa, por ejemplo: piedras, grava, pedacería de vidrio o plástico, etc. Sin embargo, las propiedades que deben tener los empaques hacen necesario que la forma geométrica, las dimensiones y los materiales empleados se definan con mayor precisión. Un gran número de tipos de empaques han sido diseñados a lo largo de la historia de las plantas químicas, desde el simple anillo raschig hasta empaques de formas complejas. El diseño de estos empaques es un procedimiento empírico, en el cual la forma y las dimensiones del empaque son ideadas con la finalidad de lograr una gran área de contacto con bajas caídas de presión, y posteriormente son probados para verificar su comportamiento. Alcanzar grandes áreas de transferencia conduce generalmente a altas caídas de presión. El parámetro que caracteriza el desempeño es el factor de empaque, el cual se define como el área superficial entre la fracción de espacios huecos al cubo.

De acuerdo a la forma como se instalan los empaques, éstos pueden ser regulares o aleatorios. En el primer caso el empaque puede consistir de piezas sueltas ordenadas dentro de la torre en un arreglo determinado o consistir de un tipo de empaque estructurado. Los fabricantes de empaques han desarrollado una gran variedad de empaques sueltos y estructurados construidos en diferentes materiales. En una aplicación particular, se selecciona el tipo de empaque y los materiales de construcción de acuerdo a las necesidades del proceso de separación y se determina la altura de empaque requerida. Es necesario el conocimiento de las propiedades más importantes de los empaques con el fin de estimar el comportamiento del empaque en operación. En el presente trabajo experimental se determinarán dichas propiedades y se destacará la importancia de cada una.

Objetivos

Identificar diferentes tipos de empaques y conocer las propiedades más importantes que se deben considerar en su selección. Proponer un procedimiento experimental para determinar estas propiedades.

Problema experimental

Determinar las características físicas de dos o más tipos de empaques (diámetro interior y exterior, longitud, espesor, peso por pieza, piezas por unidad de volumen, área superficial por unidad de volumen de empaque, peso por unidad de volumen, densidad y fracción de espacios vacíos).

Material

En función del procedimiento experimental establecido.

Conocimientos y/o actividades previas

1. Describa de manera general las características físicas que debe tener el empaque a tratar.
2. Elabore una lista de al menos 5 tipos diferentes de empaque, dibújelos y mencione sus características más sobresalientes. Se sugiere, además de consultar la bibliografía, observar el muestrario de empaques del laboratorio.

3. Describa las ventajas y desventajas del empacamiento regular y del aleatorio.
4. Mencione algunas aplicaciones de los diferentes materiales usados en los empaques.
5. ¿Qué es y cuál es la diferencia entre área superficial del empaque y área húmeda de empaque en operación?
6. Describa el procedimiento experimental que seguirá para determinar las características de los empaques que se establecen en el problema experimental.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Tabla de datos experimentales.
- Tabla comparativa de las propiedades más importantes a considerar en la selección de un tipo de empaque.
- Comparación de los resultados de la práctica con los reportados en la bibliografía o los proporcionados por los fabricantes.
- Costo de los tipos de empaques utilizados.
- Cálculo del área superficial por unidad de volumen y fracción de espacios vacíos de los empaques de tipo anillo raschig, si éstos fueran ordenados en forma de triángulo.
- Tabla comparativa de las propiedades de los empaques: piezas por unidad de volumen, área por unidad de volumen, fracción de espacios vacíos, factor de empaque y peso por unidad de volumen.
- Comparar los resultados obtenidos para cada tipo de empaque utilizado en la práctica con los valores de la bibliografía o los reportados por los fabricantes y el caso del empaque ordenado de la pregunta anterior.

Bibliografía

- Ludwig, N. *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants*. Gulf Professional Publishing, 4th ed. New York. 2007.
- Strigle Jr R. F., *Random packings and packed towers. Design and applications*, Gulf Publishing Co., Texas, (1987).
- Treybal, R. E., *Mass transfer operations*. 3a ed. Mc Graw Hill. 1982.

Caídas de presión en torres empacadas

Introducción

Las torres empacadas son un tipo de equipo de contacto entre fases de gran importancia en los procesos de la industria química; debido a sus ventajas han ganado terreno en diversas aplicaciones de transferencia de masa. Algunas columnas equipadas originalmente con platos han sido modificadas para usarse con empaque de alta eficiencia con el fin de aumentar el número equivalente de platos y/o la capacidad. Por supuesto, existen ciertas clases de sistemas donde las torres de platos siguen predominando.

Las torres empacadas se emplean en las operaciones de absorción, enfriamiento de líquidos, destilación y extracción líquido-líquido. Una de las principales ventajas de las torres empacadas es su baja caída de presión, característica muy apreciada en operaciones al vacío. Debido a la forma como se distribuye el líquido en la torre, no se requiere dispersar el gas dentro del líquido en forma de burbujas, como ocurre en las torres de platos, lo que permite trabajar con bajas relaciones de líquido a gas y la posibilidad de manejar líquidos con tendencia a formar espuma.

El dispositivo mostrado esquemáticamente en la figura 1, consiste en una columna cilíndrica equipada con los internos necesarios: distribuidor de líquido, empaque, soporte de empaque, redistribuidores de líquido, eliminadores de arrastre de líquido y sujetadores de empaque. La columna dispone de las boquillas de alimentación y salida para cada una de las corrientes de líquido y gas y un espacio de distribución en la parte inferior. En el caso de absorción, el líquido fresco o regenerado se introduce por la parte superior de la torre donde el distribuidor de líquido debe irrigar el empaque. El gas que contiene el soluto, entra en el espacio de distribución situado debajo del relleno y asciende a través de los sitios internos del empaque en contracorriente con el flujo de líquidos. El relleno proporciona el área de contacto entre el líquido y el gas favoreciendo un íntimo contacto entre las fases.

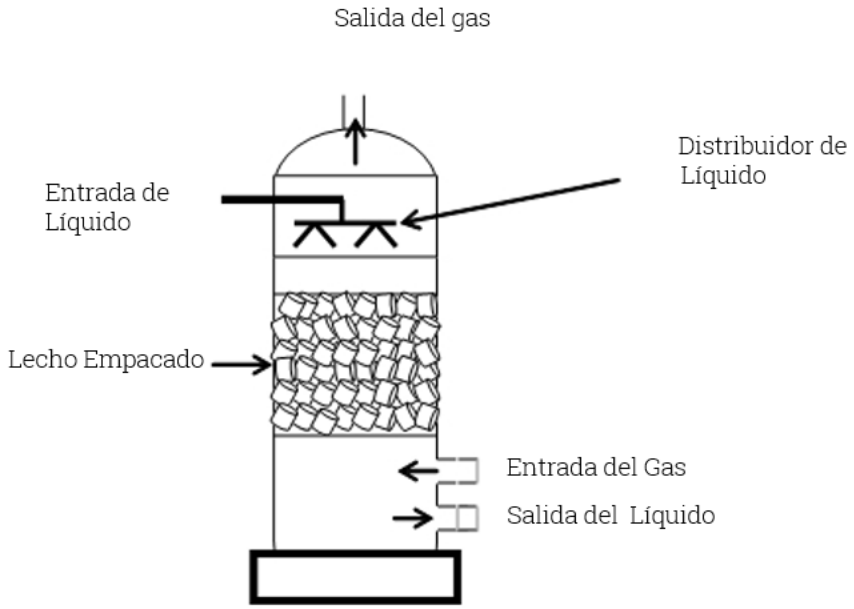


Figura 1. Diagrama esquemático de una torre empacada

La caída de presión del gas, en ausencia de líquido, puede ser descrita mediante la ecuación de Ergun. Bajo condiciones de régimen turbulento, y para un tipo particular de empaque, la ecuación de Ergun puede simplificarse a la siguiente relación:

$$\frac{\Delta P}{z} = C D \frac{G'^2}{\rho_G} \quad .....(1)$$

Donde el lado izquierdo representa la caída de presión por unidad de altura de empaque, CD es un factor característico del empaque, G' es la velocidad física del gas y P_G es la densidad del gas. De acuerdo a esta ecuación, una gráfica del logaritmo de la caída de presión contra el logaritmo de G' produce una línea recta con pendiente 2. Los valores de la pendiente observados experimentalmente varían entre 1.8 y 2.

Por otro lado, la caída de presión en presencia de flujo de líquido es mayor, debido a la menor área libre para el flujo de gas. No obstante, a bajas velocidades del gas, la caída de presión con respecto a la velocidad del gas varía de una forma similar al caso de empaque seco, produciendo nuevamente pendientes de las líneas de log (ΔP) contra log (G') cercanas a 2; sin embargo, a grandes velocidades del gas estas líneas aumentan de pendiente progresivamente.

El mayor incremento en la caída de presión puede ser atribuido a la retención del líquido en el empaque, ocasionada por la dificultad que tiene el líquido para descender. Eventualmente se alcanza un punto donde la alta velocidad del gas provoca una caída de presión excesiva y el líquido inunda la torre. Las caídas de presión del gas y los puntos de inundación en presencia de flujo de líquido se han correlacionado frecuentemente en forma gráfica. Existen gráficas generalizadas que pueden ser de utilidad para estimaciones aproximadas de la caída de presión. Los fabricantes de empaque disponen de correlaciones específicas para sus empaques.

En el diseño de una columna empacada, se deben considerar dos aspectos básicos: la transferencia de masa y la hidráulica de la torre. El primero determina la altura de la torre, la cual está en función del cambio de concentración deseado, la fuerza impulsora disponible y los coeficientes volumétricos de transferencia de masa. El segundo determina el diámetro de la columna necesario para poder manejar los flujos y operar la torre en condiciones estables sin detrimento de la eficiencia del empaque. Este último aspecto es el motivo del presente estudio experimental. El estudio de la hidráulica de una torre empacada permite obtener información acerca de la relación entre caídas de presión y las velocidades de los fluidos; asimismo, ubicar la zona de carga y los puntos de inundación. El material transparente de la torre del laboratorio, donde se llevará a cabo el estudio, ofrece la ventaja de observar el comportamiento de los fluidos al variar el flujo de gas. Es posible observar el aumento en la retención del líquido al aumentar el flujo de gas en la zona de carga y el fenómeno de inversión en el punto de inundación, en el cual la fase dispersa (el líquido) se convierte en la fase continua en cierta región de la torre.

Objetivos

- Elaborar (el alumno por sí mismo) un procedimiento para resolver el problema experimental que se plantea, en el que especifique las variables independientes, el número de corridas experimentales y las variables que debe medir.
- Comprender el comportamiento hidráulico de una torre empacada y destacar su importancia en la operación del equipo.
- Obtener una visión clara del comportamiento de los fluidos en la zona de carga y los puntos de inundación.

- Entender los alcances y limitaciones de las correlaciones generalizadas para ΔP y puntos de inundación al comparar sus resultados experimentales con los obtenidos a partir de estas correlaciones.

Problema experimental

Efectuar un estudio hidráulico en la torre empacada del laboratorio para determinar:

A. Las caídas de presión en función de las velocidades másicas del líquido y gas.
B. La zona de carga y los puntos de inundación.
C. La constante CD (ecuación 1) y el factor de empaque.

Servicios

- Aire comprimido
- Energía eléctrica
- Agua de servicio

Equipo

Torre de inundación instalada en LEM de I. Q

Descripción del equipo

Torre de 6 in de diámetro con anillos raschig de PVC y una altura de lecho empacado de 55.2 in. Las características del empaque se determinaron en la práctica de "Relleno de columnas".

Conocimientos y/o actividades previas

1. Describa los constituyentes de una torre empacada.
2. ¿Qué es la zona de carga?
3. Describa la inundación y cómo se produce
4. Proporcione una gráfica generalizada de ΔP e inundación y describa cada uno de los términos de las coordenadas.
5. Explique cómo se usa la gráfica anterior para seleccionar un diámetro apropiado de una torre empacada.
6. Elabore un diagrama de flujo de la torre de inundación del laboratorio de I. Q.

7. ¿Cómo determinará experimentalmente la gráfica P/z contra velocidad másica del gas?
8. ¿Cómo determinará en la gráfica anterior la zona de carga y los puntos de inundación?
9. Elabore una tabla de corridas experimentales en la que se incluya número de corridas, variables independientes y variables dependientes.

Indicaciones experimentales

1. Verificar la posición inicial de las válvulas y el nivel de líquido en el tanque.
2. Verificar que los manómetros estén en cero.
3. No encender la bomba de alimentación de agua con las válvulas cerradas, utilice el "by pass" para permitir el flujo.
4. La apertura de la válvula de alimentación de aire debe hacerse con cuidado y lentamente, tratando de evitar la entrada excesiva de agua en las trampas y movimientos bruscos del líquido manométrico.
5. Durante la práctica cuidar que las lecturas de los manómetros no sobrepasen la escala.
6. Al finalizar la práctica, eliminar toda el agua contenida en la torre y verificar que ninguna válvula quede abierta.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Tabla de datos experimentales.
- Gráfica de ΔP/z contra velocidad másica del gas (G´) a diferentes velocidades de líquido (L) en escala log-log.
- Determinación de la constante CD (ecuación 1).
- Determinación del factor de empaque promedio (Cf).
- Comparaciones entre los resultados experimentales y los esperados.

Bibliografía

- Ludwig, N. *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants*. Gulf Professional Publishing, 4th ed. New York. 2007.
- Strigle Jr R. F., *Random packings and packed towers. Design and applications*, Gulf Publishing Co., Texas, 1987.
- Treybal, R. E., *Mass transfer operations*. 3a ed. Mc Graw Hill. 1982.

Humidificación adiabática

Introducción

La humidificación adiabática es una operación empleada para modificar el contenido de humedad de un gas y simultáneamente cambiar su temperatura. Esta operación puede ser útil en el control de la humedad del aire para acondicionamiento o para enfriar gases calientes. En el caso del sistema aire-agua, el aire no saturado con un contenido de humedad Y y temperatura T se pone en contacto con agua líquida. El agua se evapora en la superficie del líquido y se difunde hacia el seno de la fase gas. La velocidad de difusión por unidad de área del líquido, está dada por la siguiente ecuación de transferencia de masa.

$$N_A = k_Y (Y_S - Y) \text{.....} (1)$$

Donde k_Y es el coeficiente de transferencia de masa y Y_s es la humedad de la película de aire adyacente a la superficie del líquido. Se puede suponer que la humedad Ys corresponde a la humedad de saturación del aire a la temperatura de la película. La energía necesaria para la evaporación o calor latente de evaporación, ocasiona una disminución de la temperatura en la región de la interfase, por lo que se establece un flujo de calor entre el seno de ambos fluidos y la región de la interfase. Si el líquido se recircula continuamente dentro del dispositivo de contacto, eventualmente el líquido alcanza una temperatura uniforme T_s a la cual el flujo de calor que llega a la interfase es igual a la energía necesaria para evaporar el agua. El calor por unidad de área que fluye desde el seno del gas de temperatura T hacia la superficie del líquido de temperatura T_s está dado por:

$$q_S = h_G (T - T_S) \text{.....} (2)$$

Donde h_G es el coeficiente de transferencia de calor. En esta ecuación se ha despreciado la transferencia de calor por concepto de la transferencia de masa. La temperatura del líquido alcanzada en el estado estable en ausencia de transferencia de calor por radiación es:

$$h_G (T - T_S) = \lambda_S k_Y (Y_S - Y) \ldots\ldots\ldots (3)$$

Donde λ_S es el calor latente de evaporación del agua a la temperatura T_S. Para el sistema aire vapor de agua T_S es prácticamente igual a la temperatura de saturación adiabática del aire T_{as} y la humedad Ys igual a la humedad de saturación adiabática Yas. La figura 1 ilustra los fenómenos de transferencia de masa y calor que se presentan en la superficie del líquido.

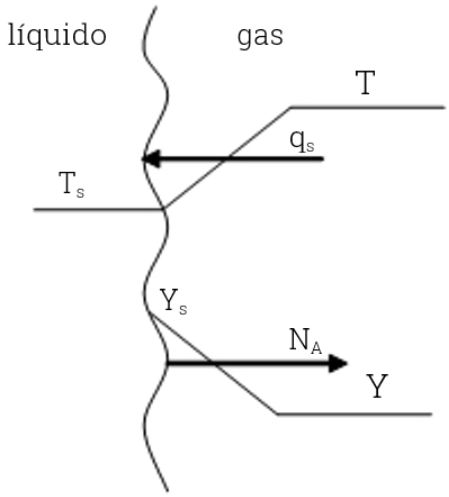


Figura 1. Transferencia de calor y masa en la superficie del líquido

La operación de humidificación se efectúa generalmente en columnas empacadas, siendo también posible el empleo de torres de platos y tanques de burbujeo. La elección depende de la cantidad de flujo de aire y del cambio de humedad deseado. Debido a la transferencia de masa y calor, la corriente de aire aumenta su contenido de vapor de agua y se enfría. Como se estudió en la práctica de propiedades de mezclas aire-vapor, la trayectoria del aire sigue una línea de saturación adiabática en la carta psicrométrica. En el presente estudio se analizarán los cambios de humedad y temperatura en relación con las características del equipo de contacto.

Para lograr lo anterior se trabajará la torre de enfriamiento instalada en el laboratorio, recirculando el agua continuamente, para que en el estado estacionario alcanzado después de un lapso de tiempo, se proceda a evaluar la efectividad de la torre para humidificar.

Objetivo

Aplicar los conocimientos de transferencia de masa para resolver el problema experimental planteado a continuación. Asimismo, establecer las condiciones de operación de la torre e identificar las variables que se deben medir.

Problema experimental

Llevar a cabo la humidificación de aire en el equipo instalado en el laboratorio, determinar en dos diferentes flujos de líquido: el número de unidades de transferencia, la altura de la unidad de transferencia, los coeficientes de transferencia de masa y calor y la eficiencia de Murphree.

Material

- 1 psicrómetro
- 1 anemómetro
- 1 termómetro

Equipo

Torre de enfriamiento de flujo cruzado instalada en LEM I.Q.

Descripción del equipo

Torre de enfriamiento de flujo cruzado, con una altura de lecho empacado de 84 cm y 53 cm de ancho, la cual será utilizada con recirculación continua de agua, sin calentamiento alguno.

Conocimientos y/o actividades previas

1. Elabore una gráfica de humedad de saturación contra temperatura para el sistema aire-agua a 585 mmHg (en el intervalo de temperaturas apropiado para la práctica).
2. ¿Qué es el arrastre de agua?
3. ¿Para qué se requiere reponer el agua en estos sistemas?

4. Suponiendo que una vez alcanzado el estado estacionario la temperatura del agua es uniforme e igual a la temperatura de saturación adiabática, ¿existirá alguna diferencia entre la humidificación en un equipo con un arreglo de flujos en contracorriente y uno en flujo cruzado?
5. Escriba las ecuaciones que utilizará para resolver el problema experimental y explique cada uno de sus términos.
6. Haga un diagrama de flujo de la torre de enfriamiento instalada en el laboratorio.
7. Indique las variables a medir para calcular: número de unidades de transferencia (N_{tG}), la altura de la unidad de transferencia (H_{tG}), coeficiente volumétrico de transferencia de masa (K_{Ya}), coeficiente global de transferencia de calor (hGa)?

Indicaciones experimentales

1. Identificar la línea de servicio de agua.
2. Verificar la posición inicial de las válvulas.
3. No encender la bomba con las válvulas cerradas, utilizar el "by pass" para permitir el flujo.
4. Tomar las lecturas correspondientes hasta que se alcance el estado estacionario.
5. Al final de la sesión, desechar el agua de la piscina y cargar agua fresca.

Puntos importantes que debe contener el informe

- Tabla de datos experimentales.
- Gráficas que muest en las líneas de operación y equilibrio.
- Memorias de cálculo y resultados de:
    A. Cantidad de agua evaporada
    B. Fuerza impulsora promedio
    C. Número de unidades de transferencia
    D. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa
    E. Coeficiente volumétrico de transferencia de calor
    F. Eficiencia de Murphree
    G. Entalpías de entrada y salida

- Discusión del comportamiento observado y el esperado; en cuanto a líneas de operación, cambio de entalpía del aire y diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo del aire y la temperatura final del agua.

Bibliografía

- Bird, S. L. *Fenómenos de transporte.* 2ª ed. Limusa Noriega. México. 2010.
- Himmelblau D. M., *Principios y cálculos básicos en ingeniería química*, Pearson Educación, México D.F., (1996).
- Jaime, B. *Principles and modern applications of mass transfer operations* . Wiley Interscience. 2nd ed. USA. 2009.
- Koichi, A. *Mass transfer: from fundamentals to modern industrial applications.* Wiley-VCH. Germany. 2006.
- Ludwig, N. *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants* . Gulf Professional Publishing, 4th ed. New York. 2007.
- Treybal, R. E., *Mass transfer operations*. 3a ed. Mc Graw Hill. 1982.

Torres de enfriamiento

Introducción

En las plantas químicas, petroquímicas, o de generación de electricidad, existe la necesidad de enfriar o condensar corrientes de proceso. Esto se logra frecuentemente por medio del intercambio de calor con agua fría, la cual al pasar por estos equipos incrementa su temperatura. Los grandes volúmenes de agua caliente que se generan no podrían desecharse por obvias razones económicas y ambientales, por lo que deben volverse a enfriar para su reutilización en el proceso.

El enfriamiento del agua se realiza, predominantemente, por medio del contacto directo del agua con una corriente de aire no saturado en un equipo conocido como torre de enfriamiento. En términos simples el enfriamiento del agua ocurre debido a la evaporación de una pequeña parte del líquido. En un análisis más detallado de los fenómenos que suceden durante el contacto del líquido y el gas, el enfriamiento del agua ocurre por un complejo mecanismo de transferencia simultánea de masa y calor. El contacto directo entre el agua y el aire no es la única posibilidad para enfriar el agua.

Alternativamente, es posible usar intercambiadores de calor de superficie extendida, en los cuales el enfriamiento del agua se logra exclusivamente por transferencia de calor a través de la pared que separa ambos fluidos. Esta opción presenta la ventaja de no tener pérdidas de agua debido a la evaporación y arrastre, pero resulta generalmente más costosa, especialmente cuando se requieren altas cargas de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento son equipos que comúnmente destacan en las plantas de proceso por sus grandes dimensiones, por ejemplo, en las plantas termoeléctricas se pueden observar con facilidad torres de enfriamiento que sobrepasan los 70 m de longitud cada una. Las torres de enfriamiento se distinguen por la presencia de niebla en la zona de la descarga del aire, especialmente en climas fríos. La niebla se forma debido a que el aire saliente de la torre se encuentra caliente y con un alto contenido de vapor de agua que al ponerse en contacto con el aire frío del medio ambiente se condensa parcialmente.

Las típicas torres rellenas con empaque aleatorio pueden ser usadas como torres de enfriamiento. Sin embargo, para satisfacer las grandes necesidades de enfriamiento y poder manejar los altos volúmenes requeridos de líquido y gas, estos equipos se diseñan con características especiales.

El contacto entre las fases en las torres de enfriamiento se lleva a cabo sobre el material de relleno. El aire debe pasar sobre esta zona en cantidad suficiente y a un costo reducido. Hacerlo de esta manera requiere de aprovechar al máximo la energía disponible para mover el aire. Con este fin se han ideado diferentes tipos de torres. En las torres atmosféricas la circulación de aire a través del relleno se logra por medio de los vientos naturales. Una segunda opción es aprovechar el movimiento natural que se produce por la diferencia entre la densidad del aire dentro de la torre y el aire del medio ambiente. El aire dentro de la torre más caliente, tiende a subir en un patrón de circulación natural. Estas torres se construyen con una chimenea o tiro bastante voluminoso que permite descargar el aire húmedo caliente a una altura considerable para evitar problemas de recirculación. El tiro se diseña de tal manera que se pueda mantener un flujo alto de aire. Evidentemente, el costo de estas torres es alto pero se compensa con el ahorro en los costos de electricidad, lo que resulta muy atractivo en lugares donde la electricidad es escasa y cara. Finalmente se puede utilizar un ventilador accionado por un motor para mover el aire; el ventilador puede estar dispuesto en la descarga del aire o en la entrada.

En cualquiera de los tres casos mencionados, la torre debe trabajar con una muy baja caída de presión, de aproximadamente 0.33 pulgadas de agua. Para lograrlo, el relleno de las columnas consiste, generalmente, de rejillas de madera u otros materiales compatibles con agua. Las rejillas son arregladas de tal forma que exista una gran área de sección transversal para el flujo de aire, con el fin de mantener una baja caída de presión. En la parte superior de la torre el distribuidor de líquido irriga las primeras hileras de tablillas. El líquido, en su camino descendente por la torre, cae de una tablilla a otra, retardando de esta forma la caída y aumentado el tiempo de contacto entre las fases.

A continuación se presenta un desarrollo simplificado de las ecuaciones de diseño para el enfriamiento de agua en torres empacadas, con un arreglo de flujos en contracorriente. El propósito es proporcionar una introducción que sirva de base para entender la operación y mostrar la forma como se calculan estos equipos. Se recomienda al estudiante consultar la bibliografía sugerida al final, para revisar con mayor detenimiento las suposiciones y simplificaciones utilizadas en la deducción de las ecuaciones.

En la zona del empaque de la torre de enfriamiento se ponen en contacto el agua caliente y la corriente de aire. En la superficie del líquido se lleva a cabo la evaporación. El vapor formado se difunde hacia el seno de la fase gaseosa, lo que incrementa el contenido de humedad del aire. Realizando un balance de materia en una altura diferencial dZ, considerando bajas velocidades de transferencia de masa, se tiene:

$$G_s dY = k_Y a_M (Y_i - Y)\, dZ \text{.....(1)}$$

Donde G_s es el flujo de aire seco por unidad de área de sección transversal de la torre, dY es el cambio diferencial de humedad del aire, k_Y es el coeficiente de transferencia de masa, a_M es el área de transferencia de masa por unidad de volumen de empaque, Y_i es la humedad de la película de aire adyacente a la superficie del líquido y Y es la humedad del aire. Debido a la diferencia de temperatura entre el líquido y el gas se establece un flujo de calor entre ambas fases, lo que ocasiona un cambio de temperatura del gas. Se puede plantear, para este cambio de temperatura, la siguiente ecuación para la transferencia de calor en la fase gas en el elemento diferencial de altura dZ:

$$G_s C_s dt_G = h_G a_H (t_i - t_G)\, dZ \text{.....(2)}$$

Donde C_s es el calor húmedo, dt_G es el cambio diferencial de temperatura del gas, h_G es el coeficiente de transferencia de calor, a_H es el área de transferencia de calor por unidad de volumen de empaque, t_i es la temperatura de la interfase y t_G la temperatura del gas. En la ecuación anterior se ha despreciado la transferencia de calor por concepto de la difusión del vapor. El cambio de temperatura y contenido de humedad del gas produce un aumento en la entalpía. Considerando que la entalpía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, con respecto a la entalpía de los componentes, aire y agua líquida, a la temperatura de referencia t_0, está dada por la siguiente expresión:

$$H = C_B (t_G - t_0)\, Y\, [\lambda_0 + C_A (t_G - t_0)] \text{.....(3)}$$

Donde C_B y C_A son las capacidades caloríficas de aire y vapor respectivamente y λ_0 es el calor latente de evaporación del agua a la temperatura t_0 . El cambio diferencial de entalpía del gas es, por consiguiente:

$$G_s\, dH = G_s\, C_s\, dt_G + [\lambda_0 + C_A\, (t_G - t_0)]\, G_s\, dY \text{.....}(4)$$

Despreciando el término de calor sensible del vapor frente al calor latente, en la expresión dentro de los corchetes, y sustituyendo las ecuaciones (1) y (2), se obtiene:

$$G_s\, dH = h_G\, a_H\, (t_i - t_G)\, dZ + k_{Ya}\, M\lambda_0\, (Y_i - Y)\, dZ \text{.....}(5)$$

Para el sistema aire-agua se puede considerar que se cumple la relación empírica de Lewis, es decir $h_G/k_Y = C_s$.

Adicionalmente, suponiendo que el empaque está completamente mojado, el área de transferencia de masa es igual al área de transferencia de calor, por lo que la ecuación (5) se puede arreglar de la siguiente forma, en la que se ha utilizado la expresión para la entalpía (3):

$$G_s\, dH = k_{Ya}\, [C_s\, (t_i - t_G) + \lambda_0 (Y_i - Y)]\, dZ = k_Y a\, (H_i - H)\, dZ \text{ .....}(6)$$

Debido a la dificultad para determinar la entalpía en la interfase (ésta puede ser obtenida si se dispone de los coeficientes individuales de transferencia de calor en la fase de líquido y de transferencia de masa en la fase gas, k_Y) se utiliza frecuentemente una diferencia de entalpía (H*-H), proporcional a la fuerza impulsora (H_i-H) y un coeficiente global de transferencia de masa, $K_Y a$. La entalpía H* representa la entalpía que tendría el gas si alcanzara el equilibrio con el líquido de temperatura tL, en el elemento diferencial de altura de la torre. A partir de la ecuación (6) se obtiene final ente la ecuación de diseño:

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{(H^* - H)} = \frac{K_Y a Z}{G_s} \text{.....}(7)$$

La integral del lado izquierdo se conoce como número de unidades globales de transferencia y puede ser determinada numéricamente con la ayuda de un diagrama de entalpía temperatura, en el cual se dibuja la curva de saturación del aire y la línea de operación. Esta última se obtiene del siguiente balance de energía en la torre, considerando un flujo promedio de líquido.

$$LC_{A,L}\ (t_{L,2} - t_{L,1}) = G_s\,(H_2 - H_1) \quad \text{.....(8)}$$

Donde $C_{A,L}$ es la capacidad calorífica del agua líquida. De acuerdo a esta ecuación, la pendiente de la línea de operación es LCA,L/Gs. La figura 1 muestra la construcción del diagrama, donde se observa la forma de trazar la línea de operación y se ilustra, en un punto cualquiera de la torre, la fuerza impulsora (H*-H). Las temperaturas del líquido a la entrada tL2 y salida tL1, así como la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada twG1 constituyen las condiciones más importantes para el diseño de la torre. La pendiente de la línea de operación está dada por la relación de flujos internos L/Gs, considerando la capacidad calorífica del agua igual a 1. Para un requerimiento de enfriamiento dado, una pendiente muy grande significa fuerzas impulsoras pequeñas y por consiguiente se necesita una mayor altura de empaque. El límite de la pendiente de la línea operación es cuando ocurre, en algún punto de la torre, una fuerza impulsora de cero; en este caso, la altura requerida de empaque es infinita. Por otro lado, una pendiente muy pequeña significa un flujo de aire muy grande y mayores fuerzas impulsoras, por lo que la altura de empaque resulta menor, pero los costos para hacer fluir el aire se incrementan. Un valor conveniente y frecuentemente usado para la relación L/G_s es alrededor de 1.

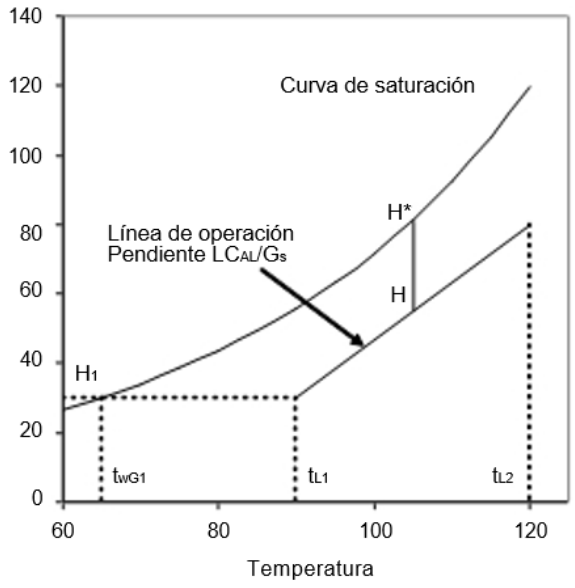


Figura 1. Líneas de operación y equilibrio para una torre de enfriamiento en contracorriente

En algunas ocasiones se utilizan torres de enfriamiento de flujo cruzado. En este arreglo, el aprovechamiento de las fuerzas impulsoras de transferencia de masa y calor es menor, en comparación con el arreglo en contracorriente. Estas torres presentan la ventaja de poderse diseñar con diferentes áreas de sección transversal y diferentes longitudes de recorrido para cada fluido. De hecho, las torres de flujo cruzado se diseñan con mayores áreas de sección transversal y menores longitudes de recorrido para el flujo de gas que para el flujo de líquido, esto permite mantener una muy baja caída de presión.

El cálculo de las torres de flujo cruzado es más complicado, debido a la distribución bidimensional de la temperatura del líquido y entalpía del gas. Una solución aproximada

puede obtenerse mediante un procedimiento similar al utilizado en intercambiadores de calor de flujo cruzado. Suponiendo que es posible usar un promedio logarítmico de la fuerza impulsora en un arreglo en contracorriente $(H^*-H)_{lm}$, la fuerza impulsora promedio para el proceso en flujo cruzado puede obtenerse con el mismo factor de corrección F(P,R) utilizado en transferencia de calor. La integración de la ecuación (7) con estas consideraciones es:

$$G_S (H_2 - H_1) = k_Y a F(P,R) (H^* - H)_{lm} Z \quad \text{.....(9)}$$

La solución gráfica del factor de corrección del promedio logarítmico de la fuerza impulsora se puede encontrar en cualquier libro de transferencia de calor. Este factor depende de las cantidades R=T/t y $P = t/(T - t)_{max}$, donde T es la temperatura del fluido caliente, t la temperatura del fluido frío y $(T - t)_{max}$ es la fuerza impulsora máxima dentro del intercambiador. Para poder aplicar el mismo factor correctivo a las torres de enfriamiento se utilizan las siguientes expresiones análogas de R y P.

$$R = \frac{m G_s A_G}{L A_L} \qquad P = \frac{m \Delta t_L}{(H^* - H)_{max}} \quad \text{.....(10)}$$

Donde A_G y A_L son las áreas de sección transversal para el gas y líquido, respectivamente y $(H^* - H)_{max}$ es la fuerza impulsora máxima

en la torre, la cual corresponde a la diferencia entre la entalpía de saturación a la temperatura de entrada del líquido y la entalpía de entrada del gas.

En el presente estudio experimental sobre torres de enfriamiento se aplicarán las ecuaciones desarrolladas anteriormente para analizar el funcionamiento de la torre de enfriamiento del laboratorio. En los temas previos de propiedades de mezclas aire-agua y humidificación adiabática se estudió el comportamiento del bulbo húmedo y el proceso de saturación adiabática; se analizó, asimismo, la relación entre el grado de humidificación alcanzado en un equipo de contacto con las condiciones de operación y características de diseño del equipo.

En este trabajo experimental se analizarán los mismos fenómenos de transferencia simultanea de calor y masa pero con mayor profundidad y en situaciones que requieren un tratamiento más complejo.

El propósito es ganar una mayor comprensión de lo que ocurre dentro de la torre, con base en los conceptos de trasferencia de calor y masa, e interpretar los resultados experimentales mediante las ecuaciones presentadas en esta introducción.

Objetivos

- Aplicar los conceptos y métodos de cálculo de transferencia simultanea de calor y masa en torres de enfriamiento.
- Interpretar los resultados experimentales en función de las condiciones de operación y las características de la torre de enfriamiento.
- Desarrollar un plan de trabajo experimental para resolver el problema que se plantea, en el cual se incluya un diseño experimental para analizar el efecto de las variables independientes.

Problema experimental

Determinar los siguientes parámetros (globales) de la torre de enfriamiento a diferentes condiciones de operación: número de unidades de transferencia, altura de la unidad de transferencia y coeficiente de transferencia de masa. Seleccionar diferentes condiciones de operación de tal manera que se modifique la pendiente de la línea de operación y la fuerza impulsora.

Material

Definido por el alumno

Servicios

- Vapor
- Electricidad
- Agua de servicio

Equipo

Torre de enfriamiento de flujo cruzado

Conocimientos y/o actividades previas

1. Elabore una gráfica de entalpía de saturación contra temperatura a 585 mm Hg en el intervalo de temperatura a utilizar en la experimentación.
2. ¿Qué variables debe medir para obtener el número de unidades de transferencia, (Nto_G), la altura de la unidad de transferencia, (Hto_G) y el coeficiente volumétrico de transferencia de masa, (K_{Ya})?
3. Describa el procedimiento de cálculo para determinar Nto_G, Hto_G y K_{Ya}.
4. Un par de términos comúnmente utilizados en torres de enfriamiento son: "rango" de temperatura del líquido y "acercamiento" al bulbo húmedo. Investigue a qué se refieren estos términos y muestre en un diagrama entalpía contra temperatura (como el de la figura 1) la importancia de éstos en la determinación de la altura de una torre de enfriamiento.
5. Elabore un diagrama de flujo de la torre de enfriamiento instalada en el laboratorio.
6. Elabore un plan de trabajo en el cual se incluya un diseño experimental para resolver el problema planteado en la práctica.

Indicaciones experimentales

Una vez elaborado y aprobado el plan de trabajo lleve a cabo los experimentos de enfriamiento de agua en la torre, considerando los siguientes puntos:

1. Verifique la posición inicial de las válvulas, incluyendo las instaladas en las líneas para servicio a los condensadores de las torres de destilación.
2. Verifique que la alberca esté llena de agua y abra completamente la válvula de agua de reposición.
3. Accione el arrancador del ventilador. Si requiere medir la velocidad del aire, hágalo con el empaque seco.
4. Haga circular el agua por la torre. No encienda la bomba con las válvulas cerradas, utilice el "by pass" para permitir el flujo del líquido.
5. Purgue la línea de condensado del intercambiador de calor y alimente el vapor de calentamiento. Hágalo lentamente para evitar golpes de ariete. Ajuste la presión para obtener la temperatura deseada de agua caliente. No sobrepase una presión de 2.5 kg/cm2.
6. Espere hasta que se estabilice el equipo y se alcance el estado estacionario para tomar las lecturas correspondientes.
7. La torre puede trabajar con purga si se desea de acuerdo al procedimiento establecido en el plan de trabajo. Si las corridas se efectúan sin purga, al final de la sesión se debe cambiar el agua de la alberca.

Puntos importantes que debe contener el informe

1. Tabla de datos experimentales.
2. Gráficas de las líneas de operación y equilibrio.
3. Cálculo y tabla de resultados de:
    A. Cantidad de agua evaporada
    B. Número de unidades de transferencia
    C. Altura de la unidad de transferencia
    D. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa
4. Discusión del efecto sobre Nto_G, Hto_G y K_{Ya} al variar las condiciones.

Bibliografía

- Bird, S. L. *Fenómenos de transporte.* 2ª ed. Limusa Noriega. México. 2010.
- Himmelblau D. M., *Principios y cálculos básicos en ingeniería química*, Pearson Educación, México D.F., (1996).
- Jaime, B. *Principles and modern applications of mass transfer operations.* Wiley Interscience. 2nd ed. USA. 2009.
- Koichi, A. *Mass transfer: from fundamentals to modern industrial applications*. Wiley-VCH. Germany. 2006.
- Ludwig, N. *Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants.* Gulf Professional Publishing, 4th ed. New York. 2007.
- Treybal, R. E., *Mass transfer operations.* 3a ed. Mc Graw Hill. 1982.

Proyecto

Plasmar una idea sobre un tema de proyecto y llevarla a cabo, requiere de un planteamiento de varias alternativas en donde se toman en cuenta circunstancias y parámetros involucrados. El proyecto inicia con una revisión bibliográfica y se desarrolla hasta llevarlo a la experimentación. Esta labor es multidisciplinaria y requiere de una metodología de investigación para el análisis de los diferentes pasos que toda evaluación de proyectos exige, con el objeto de no simplemente improvisar o suponer. Por lo tanto, realizar un proyecto implica contar con toda la creatividad del alumno en un trabajo individual y colectivo; llevando a cabo un trabajo coordinado en donde pueda reunir los datos necesarios, cuestionarlos y analizarlos para luego elaborar un informe de trabajo con ideas y soluciones prácticas. También es importante que el alumno utilice la intuición y la imaginación, permitiéndole un conocimiento más amplio del problema y alcanzar los objetivos propuestos.

A continuación se propone al alumno cuatro temas generales para elaborar y desarrollar su plan de trabajo en un determinado problema relacionado con las operaciones de transferencia de masa. En estos temas se da una breve descripción de las operaciones sugeridas y de esta manera el alumno puede seleccionar algún problema que sea de interés para su proyecto. Es importante mencionar que los temas propuestos no son los únicos para trabajar en el laboratorio; los mismos alumnos pueden sugerir temas a desarrollar que sean de su interés en el área de transferencia de masa siempre y cuando se tomen en cuenta los recursos y equipos disponibles en el LEM de la nave 1000 de Ingeniería química. Se pretende que los alumnos tengan iniciativa para seleccionar un determinado problema.

Temas para proyecto

I. Secado
II. Operaciones gas-líquido
III. Lechos fluidizados
IV. Absorción de CO_2 en una torre empacada

I. Secado

El objetivo del secado es eliminar líquido de una masa de sólido. Al respecto, se pueden usar muchos métodos; por ejemplo, si la sustancia está muy húmeda, el líquido se puede decantar, filtrar o extraer del sólido. El tipo de secado de que se habla en ingeniería es el producido al evaporar agua de una sustancia cuando se aplica calor al material. El sólido puede estar en forma de tortas, lodos, hojas, cristales, gránulos, etcétera, o las soluciones concentradas se pueden llevar a polvo seco.

En ciertos tipos de secadores el calor se aplica directamente al sólido. Los tipos más comunes son los secadores con aire o gases calientes, que pueden pasar sobre el sólido o estar separados de ellos por la superficie de transferencia de calor. Debido a la gran cantidad de formas, contenido de humedad del sólido, tamaño, etcétera, la variedad de secadores es grande, llevándose a cabo la operación de secado en forma continua o por lotes. La operación de secado por lotes, por lo regular es un proceso en semilotes, en donde una cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye a contracorriente, evaporándose el agua. En el secado continuo, tanto la sustancia que se va a secar, como el gas, pasan continuamente a través del equipo. Generalmente en todas las operaciones de secado ocurre el contacto continuo entre el gas y la sustancia que se seca.

Secadores por lotes

En este tipo de secadores el material se introduce en planchas, carritos, bandejas u otros dispositivos; se cierra el secador y se pasa vapor sobrecalentado, aire o gases de combustión por el secador. El material permanece en el secador hasta que alcanza la humedad final deseada. Para el cálculo de estos equipos el dato más importante es el tiempo de residencia del material.

El tiempo de secado se divide en dos partes:

$$\theta_S = \theta_C + \theta_d$$

Donde:
θ_C = tiempo de secado a velocidad de secado constante
θ_d = tiempo de secado a velocidad de secado decreciente

Durante el periodo de velocidad de secado constante, la velocidad de evaporación de la humedad bajo ciertas condiciones del aire es independiente del tipo de sólido y de hecho, casi igual a la velocidad de evaporación de una superficie de líquido puro bajo idénticas condiciones. Sin embargo, las irregularidades de la superficie pueden aumentar la velocidad de evaporación.

Secadores rotatorios

Son secadores continuos y se les emplean para secar sólidos granulares o cristalinos. La operación de secado en estos equipos, se divide en tres partes.

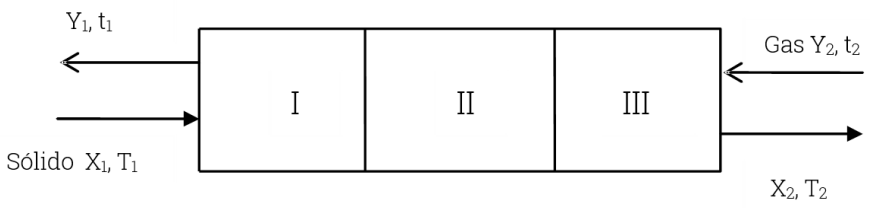


Figura 1. Secador rotatorio

En la primera sección el sólido se calienta hasta la temperatura de saturación adiabática, mientras que en la segunda se elimina casi toda la humedad, por lo que supone que el secado se confina a la sección central en donde solamente hay transferencia de calor en las secciones finales de la segunda etapa. Para que la transferencia de masa (el secado) se lleve a cabo a la temperatura de saturación adiabática, la conducción y la radiación deben ser despreciables y finalmente en la tercera sección el sólido alcanza una temperatura mayor de recalentamiento.

Algunos de los proyectos que los alumnos pueden desarrollar sobre esta operación de secado son los siguientes:

- Cálculo de los coeficientes de transferencia de masa en un secador rotatorio a diferentes condiciones de operación (flujos, temperatura).
- Obtención de las condiciones óptimas para secar diferentes materiales sólidos orgánicos (granos, chiles, mole etc.) e inorgánicos (sulfato de amonio, sulfato de calcio, etc.).
- Efecto del aumento de la temperatura de secado de un sólido sobre el flux (velocidad de secado por unidad de área, NC).

II. Operaciones gas-líquido

Dentro del estudio de la transferencia de masa se pueden incluir las operaciones mecánicas de dispersión de una fase en otra, ya que por efecto de una fuente externa de energía, se imprime velocidad a dos fases a fin de favorecer una diferencia de concentración de un componente, preferentemente de una fase a otra, por lo tanto se incluyen en esta categoría los tanques de burbujeo y los tanques agitados.

a) Tanques de burbujeo (Transferencia de masa gas-líquido)

Un burbujeador es un sistema en el cual una corriente de gas, en forma de pequeñas burbujas, es introducida en un líquido. Si el diámetro del tanque es pequeño, el burbujeador, localizado en el fondo del tanque, puede ser un simple tubo abierto a través del cual el gas llegue hasta el líquido.

El propósito del burbujeo puede ser poner en contacto el gas burbujeado con el líquido.

Los parámetros que influyen en este tipo de operación son:

- Velocidad de flujo
- Velocidad de ascensión de burbujas
- Retención del gas
- Área específica
- Transferencia de masa (coeficientes)
- Potencia eléctrica

b) Tanques agitados

La agitación mecánica de un líquido, efectuada por lo general mediante un equipo giratorio, es adecuada en especial para dispersar sólidos, líquidos o gases en líquidos, y se utiliza para diversas operaciones de transferencia de masa.

Los agitadores pueden producir intensidades de turbulencias muy elevadas, dichas intensidades no sólo producen buenos coeficientes de transferencia de masa, sino que también son necesarios para obtener una dispersión efectiva de líquidos y gases, así como para sólidos en suspensión.

Algunos factores a considerar son:

- Diámetro y tipo del impulsor
- Formación de vórtices
- Mecánica de fluidos
- Potencia eléctrica

Algunos proyectos a realizar vinculados con las operaciones mecánicas son:

- Cálculo de coeficientes de transferencia de masa gas-líquido en tanques de agitación mecánica.
- Estudio de la mecánica de fluidos en tanques agitados.
- Mezclado de un gas en un líquido como una operación continua.

III. Lechos fluidizados

Cuando un fluido, gas o líquido, atraviesa un lecho de partículas sólidas con suficiente velocidad, las partículas pueden quedar suspendidas en la corriente de fluido. En esta situación el lecho se comporta como si fuera un fluido, de ahí el nombre de lecho fluidizado.

Las partículas sólidas en un lecho fluidizado se encuentran en constante movimiento produciendo una intensa agitación lo que sumado a las grandes áreas superficiales de las partículas, conduce a altas velocidades de transferencia de calor y masa entre el sólido y el fluido. Estas características resultan muy atractivas en algunas aplicaciones como son las de reacción y secado de sólidos.

La primera gran aplicación de los lechos fluidizados ocurrió durante la segunda guerra mundial en los procesos de cracking catalítico de fracciones pesadas del petróleo para la obtención de gasolinas. En los procesos de craking catalítico en reactores de lecho fijo, el catalizador debe ser regenerado después de un periodo de operación debido a los depósitos de carbono que se forman. Para manejar los altos volúmenes de producción de gasolinas la técnica de lechos fluidizados ofreció la ventaja de poder regenerar el catalizador y devolverlo al reactor continuamente, esta opción pronto desplazó a los lechos fijos. A partir del éxito obtenido se desarrollaron numerosas aplicaciones de los lechos fluidizados en otras reacciones catalíticas y en otras operaciones como el secado de sólidos.

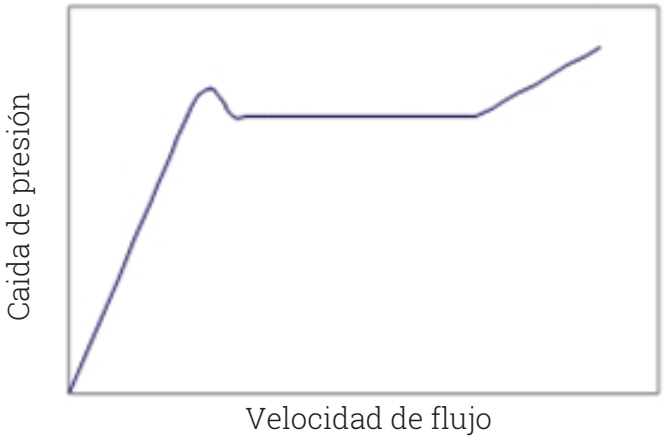


Figura 1. Representación de la fluidización en un lecho de partículas sólidas.

La formación de los lechos fluidizados puede describirse considerando un lecho de partículas sólidas en las que se aumenta progresivamente la velocidad del fluido y se mide la caída de presión. La figura 1 muestra la forma típica de la curva de ΔP contra velocidad. A muy bajas velocidades del fluido el lecho se encuentra fijo y la caída de presión puede ser representada por el mismo tipo de correlaciones empíricas aplicables a torres empacadas o flujo a través de lechos fijos como la correlación de Ergun. A medida que la velocidad crece, la fuerza de arrastre que ejerce el fluido sobre las partículas crece y tiende a causar que las partículas se reacomoden para presentar la menor resistencia al paso del fluido. Si las partículas son pequeñas (diámetro menor a 1 mm) el lecho comienza a expandirse. Eventualmente se alcanza una velocidad a la cual las fuerzas de arrastre serán suficientes para soportar el peso de las partículas. En este punto la caída de presión del gas es

igual al peso del sólido por unidad de área transversal. En algunos sistemas esta igualdad se presenta antes del punto de fluidización debido a fuerzas residuales de empacamiento que se deben vencer. Con posteriores incrementos en la velocidad, la caída de presión permanece básicamente constante y la altura del lecho fluidizado aumenta. En sistemas con diferencias grandes de densidad entre el sólido y el fluido, como en el caso de sistemas gas-sólido, se puede presentar burbujas ascendentes. Finalmente, a velocidades mayores del fluido, el sólido es transportado por éste.

La breve descripción anterior es solamente un bosquejo del comportamiento de los lechos fluidizados. Una descripción detallada de lo que ocurre puede ser bastante compleja y depende grandemente de las condiciones particulares como son: densidad, distribución de tamaños y forma geométrica de las partículas, así como del fluido que se utiliza y del diseño (dimensiones, forma geométrica, distribuidor, etc.) del recipiente de fluidización. Debido a esta complejidad y a la necesidad de poder evaluar las velocidades de transferencia de calor y masa se requiere comúnmente llevar a cabo pruebas experimentales antes de que una determinada aplicación pueda ser usada.

Bajo este tema de lechos fluidizados se pretende acercar a los alumnos de Ingeniería Química a esta importante técnica para comprender sus características. Diferentes clases de estudios pueden ser realizados. Estos pueden considerar algún aspecto particular, tal como: la dinámica de fluidización o los fenómenos de transferencia de masa o de calor. Un enfoque interesante desde el punto de vista tecnológico es el de realizar estudios acerca de una determinada aplicación. El tema está abierto para que los alumnos puedan plantear el tipo de estudio y el enfoque. Algunos de los proyectos que los alumnos pueden desarrollar son los siguientes:

- Diseño, construcción y prueba de un prototipo para estudiar el comportamiento de los lechos fluidizados.
- Caracterización de un lecho fluidizado de partículas con diferentes distribuciones de tamaños.
- Determinación de condiciones para el secado de sal de mesa.
- Estudio comparativo de las características de fluidización para diferentes factores de esfericidad de partículas sólidas.

IV. Absorción

La operación de absorción consiste en poner en contacto una fase líquida con una fase gaseosa a fin de transferir un componente en mayor proporción en una de las fases, para llevar a cabo la separación del mismo, empleando un equilibrio de solubilidad de dicho componente en ambas fases a una presión y una temperatura determinada.

Dentro de los aspectos más importantes a considerar en una operación de absorción se tienen los siguientes:

1. Características físicas del equipo
2. Variables de operación
3. Fluidos de proceso (absorbente y gas absorbido)
4. Dimensiones de la torre (L y D)
5. Coeficiente de transferencia de masa
6. Transferencia de calor
7. Etapas ideales y reales
8. Eficiencia

La rapidez del proceso de absorción depende de la desviación con respecto al equilibrio de solubilidad del componente a separar; a una temperatura dada, la solubilidad de cada componente en la fase gaseosa aumenta con la presión.

Para diversas sustancias existen diferentes curvas de solubilidad, las cuales por lo regular, se deben determinar experimentalmente para cada sistema. Si a una concentración dada de líquido, la presión en el equilibrio es alta, se dice que el gas es relativamente insoluble en el líquido; por el contrario, si es baja se dice que la solubilidad es elevada. La solubilidad de cualquier gas depende de la temperatura de acuerdo con la ley de van't Hoff.

La elección del disolvente es muy importante para definir el equilibrio y las posibilidades de llevar a cabo la absorción o desorción en forma exitosa; algunos de los parámetros más importantes de selección del disolvente son:

1. Solubilidad del gas
2. Volatilidad
3. Corrosión
4. Costo
5. Viscosidad

Algunos proyectos sugeridos a realizar para el estudio de esta operación son:

- Estudio del equilibrio de fases para la solubilidad de un sistema gas-líquido dado.
- Determinación de coeficientes globales de transferencia de masa.
- Operación continua de absorción para el sistema Agua-CO_2-Aire.

Metodología para el proyecto de investigación

La investigación es la herramienta para conocer lo que nos rodea y su carácter es universal. Tradicionalmente se presentan tres tipos de investigación:

- Investigación Histórica: describe lo que era.
- Investigación descriptiva: interpreta lo que es.
- Investigación experimental: describe lo que será, se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular.

La investigación científica es un proceso compuesto por una serie de etapas o procesos específicos, los cuales se derivan unos de otros. Para llevarla a cabo hay que realizar numerosas actividades, unas en forma secuencial, otras en forma simultánea y tomar varias decisiones en diferentes etapas o procesos específicos de la investigación. Se debe planear todo el proceso de la investigación, o sea elaborar un proyecto que indique claramente las etapas por realizar, definir qué es lo que se pretende hacer, qué tipo de datos se recopilarán y cómo, qué metodología se utilizará para analizar los datos, etc. Además, se debe aclarar el tiempo necesario para cada etapa.

A continuación se describen brevemente las etapas más importantes para la planificación de un proyecto de investigación en el LEM.

1. Elección del tema

Es el primer paso en la realización de una investigación. Consiste en determinar con claridad y precisión el área o campo de trabajo de un problema investigable. Para la elección de un tema se recomienda revisar los tópicos propuestos en el LEM y con la asesoria del profesor estructurar más formalmente la idea de investigación.

Además, dado que en el curso se trabaja con tiempos limitados para realizar la investigación, se requiere diseñar un cronograma que permita tener una idea del tiempo que comprenderá cada una de las etapas, con el fin de fijar la fecha aproximada en que se concluirá el estudio.

2. Planteamiento del problema

Consiste en afinar y estructurar más formalmente la idea de investigación. Los elementos para plantear un problema son tres y están relacionados entre sí: los objetivos que persigue la investigación, las preguntas de investigación y la justificación del estudio.

Los objetivos de investigación son los puntos o señalamientos que guían el desarrollo de una investigación y a cuyo logro se dirigen todos los esfuerzos. Deben expresarse con claridad para evitar posibles desviaciones y deben ser susceptibles de alcanzarse. Los objetivos que se especifiquen han de ser congruentes entre sí, con la justificación del estudio y con los elementos que conforman la problemática que se investiga.

En la justificación tiene que exponerse en forma clara y precisa el por qué y para qué se va a llevar a cabo el estudio.

3. Fundamentos teóricos

Simultáneamente al planteamiento del problema y a la formulación de los objetivos, se inicia la fundamentación teórica y empírica del estudio. Esto implica analizar y exponer aquellos elementos teóricos generales y particulares que se consideren válidos para guiar el proceso de investigación. La elaboración de los fundamentos teóricos comprende la revisión de la literatura correspondiente.

La revisión de la literatura consiste en detectar, obtener y consultar la bibliografía y otros materiales que pueden ser útiles para los propósitos del estudio, de donde se debe extraer y recopilar la información relevante y necesaria que atañe al problema de investigación.

Dado que en el curso de LEM, el tiempo destinado para el planteamiento del proyecto de investigación es relativamente corto, es recomendable que se realice una revisión de la literatura selectiva con la ayuda del profesor.

4. Formulación de hipótesis

Puede decirse que una hipótesis científica es aquella formulación que se apoya en un sistema de conocimientos organizados y sistematizados (fundamentos teóricos empíricos), en la que se es-

tablece una relación entre dos o más variables para explicar y predecir, en la medida de lo posible, los fenómenos que le interesan en caso de que se compruebe la relación establecida.

En una investigación podemos tener una, dos o varias hipótesis, y a veces no se tienen hipótesis. Las hipótesis indican lo que estamos buscando o tratando de probar y pueden definirse como explicaciones tentativas del fenómeno investigado formuladas a manera de proposiciones.

La hipótesis surgen normalmente del planteamiento del problema y la revisión de la literatura, y algunas veces de teorías. Deben referirse a una situación real. Las variables contenidas deben ser precisas, concretas y poder observarse en la realidad; la relación entre las variables debe ser clara, verosímil y medible. Asimismo, las hipótesis deben estar vinculadas con técnicas disponibles para probarse.

5. Selección del diseño de investigación apropiado

El "diseño" es una estrategia para responder a las preguntas de investigación. El diseño señala al investigador lo que debe hacer para alcanzar sus objetivos de estudio, contestar las interrogantes y analizar la certeza de las hipótesis formuladas en un contexto en particular. Debe considerarse como la organización racional y congruente de las actividades correspondientes al alcance de los objetivos.

El diseño de la investigación se usa como una guía para recopilar y analizar los datos. Se lleva a cabo mediante uno o más experimentos, en donde se puede manipular deliberadamente al menos una variable independiente.

En el curso de LEM, el alumno deberá plantear el o los experimento(s) necesarios para la resolución de su problema de investigación, así como determinar las variables dependientes e independientes que intervienen en el(los) mismo(s).

6. Recolección de datos

Una vez que se tiene el diseño experimental de acuerdo con el problema de estudio y la hipótesis, se tienen que realizar los experimentos planteados para recolectar los datos pertinentes sobre las variables involucradas en la investigación.

7. Análisis de los datos

Es la manipulación de los datos recopilados para lograr ciertas afirmaciones y/o la comprobación de las hipótesis de trabajo. En esta etapa de ser necesaro se requiere realizar un análisis estadístico de los datos.

El análisis depende de tres factores: a) el nivel de medición de las variables, b) la manera como se hayan formulado las hipótesis, c) el interés del investigador.

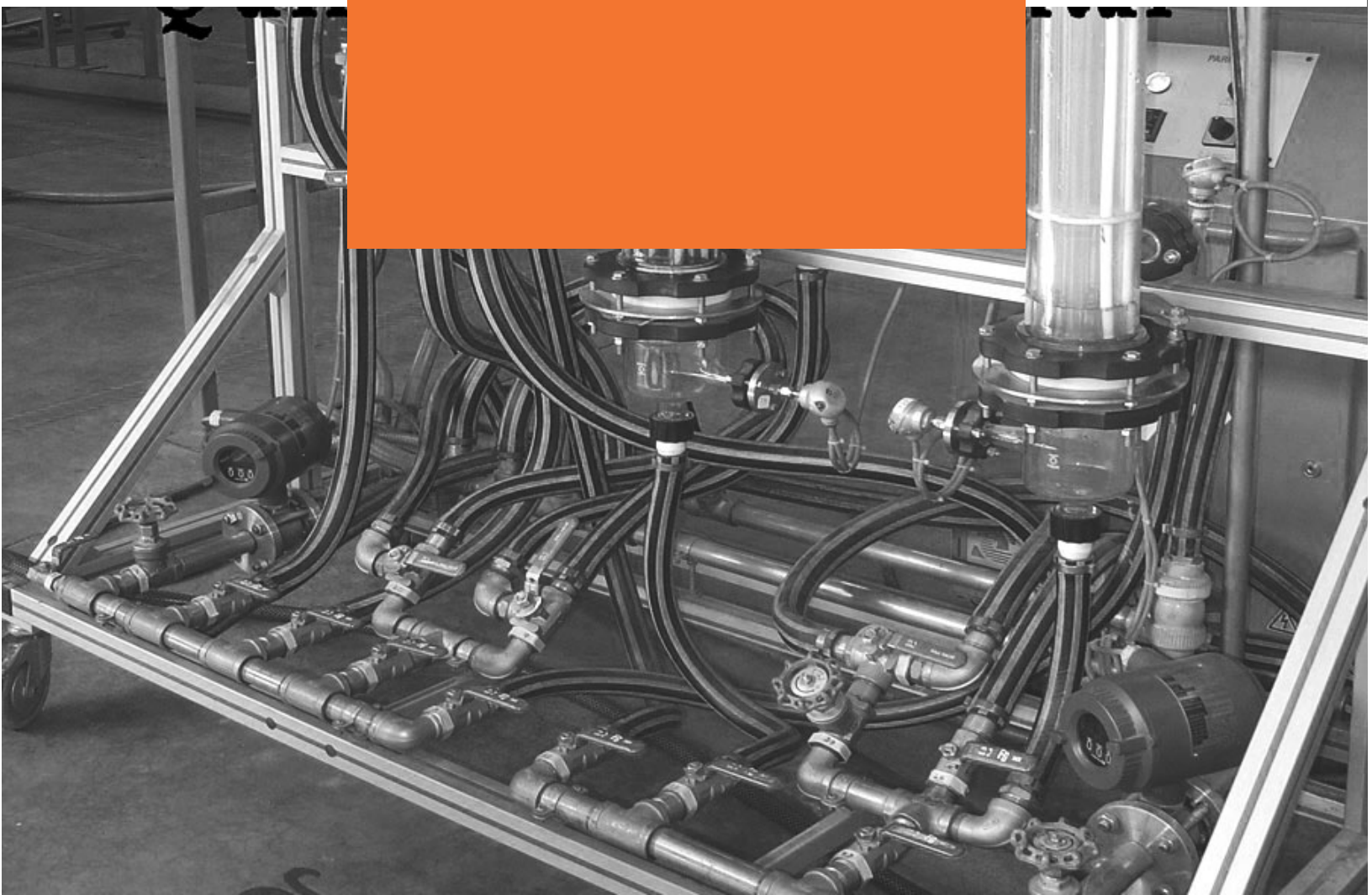
El análisis de los resultados debe llevar a la elaboración de conclusiones respecto al proyecto de investigación, con posibles recomendaciones.

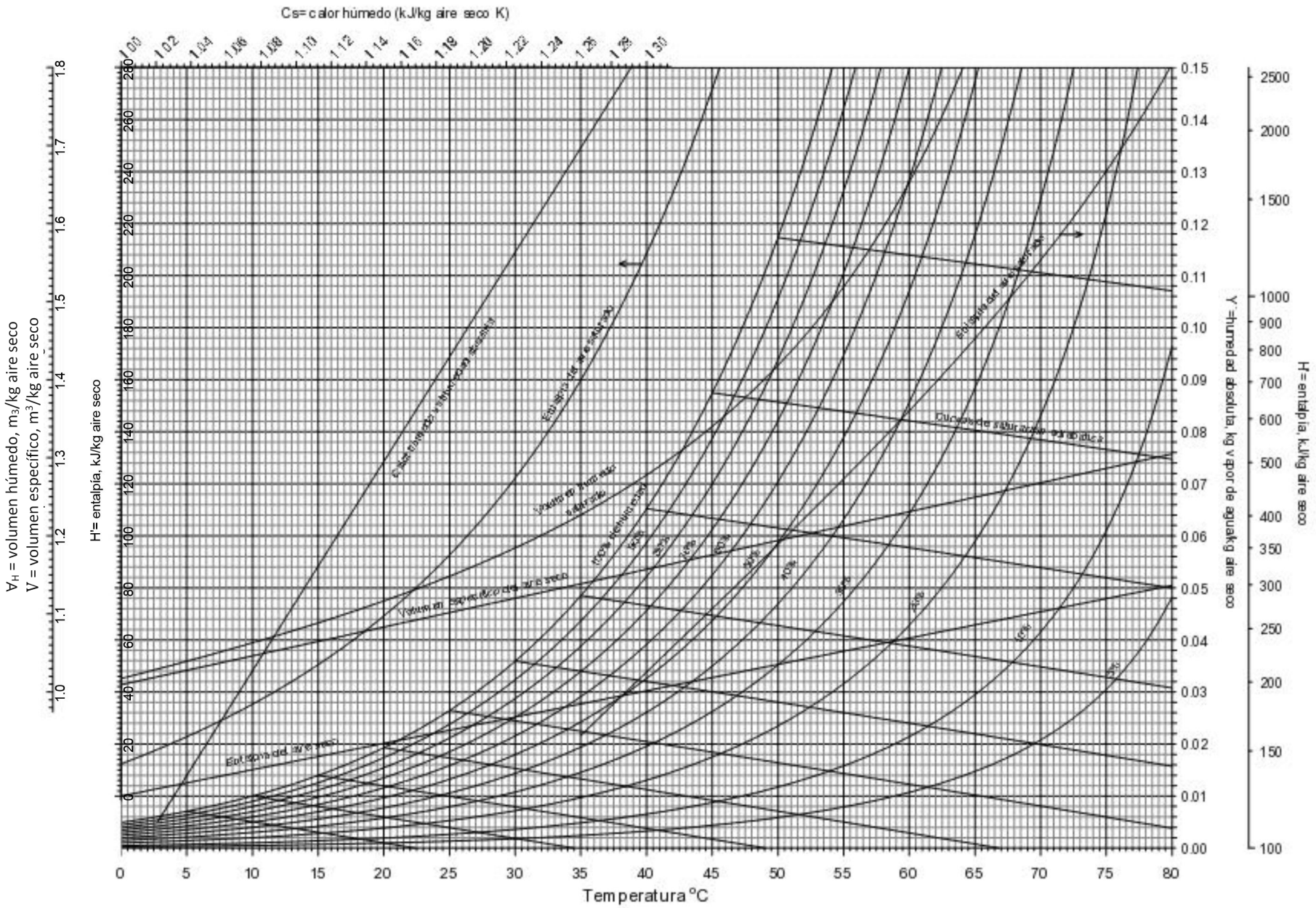
8. Elaboración del reporte de investigación

La investigación termina con la comunicación de los resultados. El reporte de investigación es un documento donde se describe el estudio realizado (qué investigación se llevo a cabo, cómo se realizó, qué resultados y conclusiones se obtuvieron). Los elementos más comunes de un reporte de investigación son: portada, índice, resumen, introducción, fundamentos teóricos, métodos, resultados, conclusiones, bibliografía y apéndices.
Si se desea consultar más información sobre el tema se sugieren las siguientes referencias:

1. Hernández S. R., *Metodología de la investigación*, Editorial McGraw-Hill, Segunda edición, México, (1998).
2. Méndez I., *Monografía: estadística y método científico*, Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, UNAM. México, (1991).
3. Namakforoosh N.M., *Metodología de la investigación*, Editorial Limusa. Primera edición, México, (1998).
4. Pardinas F., *Metodología y técnicas de investigación en ciencias sociales (introducción elemental)*, Editorial Siglo XXI, Primera edición, México, (1969).
5. Rojas S. R., *Guía para realizar investigaciones sociales*, Editorial Plaza y Vlades, Vigésima primera edición, México, (1998).
6. Tamayo y T. M., *El proceso de la investigación científica*, Editorial Limusa, Cuarta edición, México, (2001).

Anexo





Carta psicrométrica para el aire-vapor de agua, a 585 mmHg abs, en unidades SI

Ingeniería Química Experimental LEM III y LEM IV

Siguiendo la estructura de organización del manual que antecede a éste (LEM I y LEM II), las prácticas contenidas en LEM III y LEM IV abordan los temas referentes a transferencia de calor y transferencia de masa, respectivamente. En la parte correspondiente al primer tema, el alumno debe resolver de forma teórico práctico una serie de problemas que se presentan en forma estructurada; el segundo tema se divide en dos partes: la primera se aborda como sesiones experimentales estructuradas y la segunda introduce al alumno a trabajar por proyectos.

colección: manuales de ciencias biológicas, químicas y de la salud