



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Ingeniería de Procesos

EXPERIMENTACIÓN EN INGENIERÍA
QUÍMICA

Juan Carlos Lozano Medina

PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

Guía docente práctica: DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN VIDRIO-AIRE.

Objetivo
Introducción
Procedimiento
Materiales
Cuestiones,...

JUAN CARLOS LOZANO MEDINA
INGENIERO INDUSTRIAL
PROFESOR ASOCIADO ULPGC

ISBN 978-84-16989-25-6
01 de SEPTIEMBRE 2013



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

PRÁCTICA Nº 1: DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN VIDRIO-AIRE.

1. OBJETIVO.

Aplicar los conocimientos teóricos en transmisión de calor por convección a un sistema vidrio-aire.

2. INTRODUCCIÓN.

En la transmisión del calor desde la superficie de un sólido que se encuentra a temperatura t_s hasta un fluido a temperatura t_f intervienen tanto la conducción como la convección del fluido. Se resuelve el problema por aplicación del coeficiente de convección superficial de transmisión del calor o coeficiente de convección h , definido por la ecuación:

$$\frac{dQ}{d\theta} = dq = h \cdot dA \cdot (t_s - t_f) \quad (1)$$

Este coeficiente de convección (h) viene expresado en $\frac{kcal}{m^2 h ^\circ C}$ (S.I. en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$),

depende de las propiedades físicas del fluido y de las características del movimiento natural o forzado de éste con respecto a la superficie. Cuando $h = cte$, o cuando represente un valor medio adecuado del coeficiente de convección, podemos escribir:

$$Q = h \cdot A \cdot (t_s - t_f) = h \cdot A \cdot \Delta t \quad (2)$$

Profundizando en el carácter del problema, sobre los factores que determinan el coeficiente, encontraremos que el calor transmitido es función directa del campo de temperaturas establecido en el fluido y que h variará en gran medida para el mismo sistema variando la velocidad del fluido.

Las ecuaciones dadas para el cálculo de los coeficientes de convección vienen referidas a superficies de forma geométrica determinada y de tamaño definido por una



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

dimensión lineal característica, que puede ser el diámetro para un tubo, o la altura para un plano vertical. En estas condiciones, los factores que pueden influir sobre el coeficiente de convección son:

- a) Dimensión lineal característica.
- b) Factores que condicionan el movimiento.
- c) Propiedades térmicas del fluido.

Los factores que condicionan el movimiento varían de unos casos a otros. En la convección forzada son los mismos estudiados en fluido-dinámica, y que agrupamos en el módulo de Reynolds. En la convección natural el movimiento está originado por el campo de temperaturas así pueden influir en aquel la diferencia total de temperaturas, la aceleración de la gravedad y el coeficiente de dilatación, además de otros factores como la dimensión lineal, la viscosidad y la densidad.

En las propiedades térmicas incluimos la conductividad calórica, el calor específico y, en el caso de ebullición de líquidos o condensación de vapores, el calor latente de vaporización. La influencia de los dos primeros factores puede reflejarse, en ocasiones por la conductividad de temperatura o difusividad térmica, “ a ”, que aparece en la transmisión de calor en estado no estacionario.

La conductividad de temperaturas definida por el cociente de la conductividad calorífica y el calor específico de la unidad de volumen mide la velocidad de propagación de la temperatura a lo largo de un conductor.

En la ecuación (1)



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

$$\frac{dQ}{d\theta} = dq = h \cdot dA \cdot (t_s - t) \quad (3)$$

θ = tiempo

h = coeficiente de convección

t_s = temperatura de la superficie sólida

t = temperatura ambiente ó del fluido

A = Área

En nuestro caso $dA = cte.$, es decir, $dA = A$ ya que el área del recipiente usado no varía.

Esta ecuación la podemos escribir:

$$dQ = h \cdot A \cdot (t_s - t) \cdot d\theta \quad (4)$$

Pero, por otra parte,

$$dQ = -m \cdot C_p \cdot dt \quad (5)$$

por lo que sustituyendo en (4) obtenemos:

$$-m \cdot C_p \cdot dt = h \cdot A \cdot (t_s - t) \cdot d\theta \quad (5)$$

$$\frac{dt}{t_s - t} = -\frac{h \cdot A}{m \cdot C_p} \cdot d\theta \quad (6)$$

Integrando entre las condiciones iniciales y finales obtenemos:

$$\ln(t_s - t) - \ln(t_{s_0} - t_0) = -\frac{h \cdot A}{m \cdot C_p} (\theta_f - \theta_i) = -\frac{h \cdot A}{m \cdot C_p} \cdot d\theta \quad (7)$$

donde:



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

t_s = temperatura de la superficie del sólido después del intercambio calorífico.

$t = t_0$ = temperatura ambiente ó fluido. El motivo de que $t = t_0$ es porque el aire de la habitación no varía sensiblemente con este aporte calorífico.

t_{s_0} = temperatura de la superficie del sólido antes del intercambio calorífico (es decir, $\theta = 0$ s.)

La última ecuación la podemos expresar como:

$$\log(t_s - t) = -\frac{h \cdot A}{2,3 \cdot m \cdot C_p} \Delta\theta + \log(t_{s_0} - t) \quad (8)$$

Si representamos $\log(t_s - t)$ frente a $\Delta\theta$ se obtendrá una recta de pendiente $\frac{h \cdot A}{2,3 m C_p}$ y

ordenada en el origen $\log(t_{s_0} - t)$.

3. MATERIAL.

- Vaso de precipitado.
- Termómetro.
- Ventilador



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

4. REACTIVOS

- Agua.

5. PROCEDIMIENTO.

Para realizar esta práctica usamos agua caliente que introducimos en un depósito. Antes de introducirlo en el recipiente la calentamos hasta una temperatura próxima al punto de ebullición del agua (aproximadamente 95 °C). Se puede usar como volumen 800 ml de agua.

Una vez que introducimos el agua caliente en vaso de precipitado y provisto de un termómetro, anotamos la temperatura cada 30 seg con lo que obtenemos una tabla.

T en ° C	T₁	T₂	T_n
θ en min	0	0,5	60

Hemos de considerar que tanto la temperatura interior (t_i) del vaso, como la temperatura ambiente (es decir, t , que supongamos es 18 °C) son medibles directamente mediante un termómetro. Sin embargo t_s y t_{s_0} (temperatura de la superficie exterior del sólido) no se pueden medir directamente para poder emplear la ecuación (2).

La superficie interior del sólido podemos suponerla igual en temperatura al líquido que tiene contacto (en nuestro caso agua).

Para la determinación de t_s vamos a considerar el paso por conducción del calor a través del vidrio. Para ello consideramos las ecuaciones:

$$dQ = m \cdot C_p \cdot dt$$



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

$$dq = \frac{dQ}{d\theta} = K \cdot A_m \cdot \frac{dt}{dx}$$

donde:

A_m = área media de la sección normal del flujo de calor,

x = espesor del vidrio.

K = coeficiente de conducción en Kcal/(m²·h·°C)

Combinando las ecuaciones obtenemos:

$$m \cdot C_p \cdot dt = K \cdot A_m \cdot \frac{dt}{dx} \cdot d\theta$$

y transformando las diferenciales en incrementos:

$$\Rightarrow m \cdot C_p \cdot dt = K \cdot A_m \cdot \frac{(t_i - t_s)}{\Delta x} \cdot \Delta\theta \qquad t_i - t_s = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta x}{K \cdot A_m \cdot \Delta\theta} \cdot \Delta t$$

donde:

t_i = temperatura interior del vidrio = temperatura del agua.

t_s = temperatura exterior del vidrio.

m = masa del agua a una temperatura media de operación.

C_p = calor específico.

Δx = espesor del vidrio.

K = coeficiente de conducción que vale para el vidrio al borosilicato = 0,94

Kcal/(m²·h·°C) \equiv 1,86 W/(m²·K)

A_m = área media de la sección normal al flujo de calor.

$\Delta\theta$ = intervalo de tiempo entre medida y medida, en segundos.

Δt = variación de la temperatura t_i en cada intervalo de tiempo.

Como $\frac{m \cdot C_p \cdot \Delta x}{K \cdot A_m \cdot \Delta\theta}$ es calculable, llegamos a una expresión del tipo: $t_i - t_s = C \cdot \Delta t$.



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

Para calcular este factor hallamos la temperatura media a la cuál operamos. Esta temperatura nos vendrá dada por:

$$T_m = \frac{T_1 + T_n}{2}$$

A esta temperatura hallamos el valor de C_p del agua ($1 \text{ Kcal}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \equiv 4,16 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$).

Una vez determinada la masa de agua (hemos añadido 800 ml. de agua) y el espesor del vidrio, añadimos un volumen extra de agua hasta que el nivel suba hasta h_2 .

Calculamos el diámetro interior del cilindro, que se corresponde con el diámetro interno del vaso:

$$V = \pi r_{int}^2 (h_2 - h_1).$$

Como $r = \frac{D}{2}$:

$$V = \pi \cdot \frac{D_{int}^2}{4} \cdot (h_2 - h_1);$$

despejando:

$$D_{int} = \sqrt{\frac{4V}{\pi \cdot (h_2 - h_1)}}$$

El diámetro externo del vaso lo hallamos calculando el valor del perímetro empleando una cuerda o un flexómetro. Si empleamos una cuerda necesitaremos una regla para determinar su longitud y calculamos el diámetro externo de la siguiente forma:

$$L_{ext} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{ext}}{2} \quad \Rightarrow \quad D_{ext} = \frac{L_{ext}}{\pi}$$

Luego el espesor del vidrio será:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot \Delta x.$$



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

Despejamos el espesor:

$$\Delta x = \frac{(D_{ext.} - D_{int.})}{2}$$

El área A_m la determinamos como área media de las superficies externa e interna, del modo siguiente. Este caso es el de un cuerpo sólido, limitado por dos superficies cilíndricas y concéntricas (no consideramos el fondo del vaso) y a temperaturas t_1 y t_2 .

Se presenta esto en la transmisión de calor a través de tubos y de los aislantes puestos sobre estos. Normalmente, la longitud del cilindro es grande en relación a su diámetro, y así puede deducirse que el flujo de calor es normal a las superficies externas en todos sus puntos. En nuestro caso también se cumple esta relación (longitud tubo/diámetro >1), aunque es más pequeña que para poderla considerar de longitud infinita. El área se calcula como la media logarítmica de las áreas:

$$A_m = \frac{r_2 - r_1}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot r}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{A_2 - A_1}{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)}$$

Siendo A_1 y A_2 el área exterior e interior del recipiente. El valor de A_m que se obtiene es la media logarítmica. Esta media es inferior a la aritmética y superior a la geométrica, pero tiende hacia ambas al disminuir A_2/A_1 . Cuando $A_2/A_1 < 2$ se toma por A_m la media aritmética con un error inferior a 4 %. En nuestro caso los radios están muy próximos ya que el espesor, Δx , es muy pequeño en relación a D_{int} y el D_{ext} , por lo que resolvemos el problema como media aritmética:

$$r_m = \frac{\frac{D_{ext}}{2} + \frac{D_{int}}{2}}{2} = \frac{D_{int} + D_{ext}}{4}$$



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

y el A_m vendrá dado como el área lateral del cilindro del vaso (ya se dijo que no se consideraba el fondo).

$$A_m = 2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot L$$

donde L = altura del agua en el recipiente. Como el vaso tiene menisco en su parte inferior, se toma como valor de L la altura del agua en la parte cilíndrica del vaso más la mitad de la altura de la parte con menisco.

Si las medidas las hacemos en fracciones de tiempo iguales, $\Delta\theta$, es cte. Así pues con todos estos datos hallamos el coeficiente, $\frac{m \cdot C_p \cdot \Delta x}{K \cdot A_m \cdot \Delta\theta}$. Así nos queda la ecuación $t_i -$

$$t_s = c \cdot \Delta t$$

Procedemos ahora a tabular los siguientes términos:

t, en °C	θ en min	$\Delta t = t_{i1} - t_{i2}$	$t_i - t_s = C \cdot \Delta t$	$t_s = t_i - \Delta t$	$t_s - t$	Log($t_s - t$)

El paso siguiente consiste en representar la ecuación (2):

$$\log(t_s - t) = \frac{h \cdot A}{2.3 \cdot m \cdot C_p} \cdot \Delta\theta + \log(t_{s_0} - t)$$

para lo cual ponemos en abscisas $\Delta\theta$ y en ordenadas $\log(t_s - t)$. Sale una línea recta ya que la ecuación es del tipo $y = m \cdot x + b$. Para poder obtener mejores resultados ajustamos esta recta por mínimos cuadrados. Con la ecuación ajustada la representamos de nuevo y leemos en la gráfica el valor de la pendiente (α), la cual será igual a:



PRÁCTICA nº 1: Determinación del coeficiente de convección vidrio-aire.

$$\alpha = \frac{h \cdot A}{2.3 \cdot m \cdot C_p},$$

por lo que si despejamos h nos queda: $h = \frac{\alpha \cdot 2.3 \cdot m \cdot C_p}{A}$,

donde A es el área de la superficie exterior, cuyo valor vendrá dado por

$$A = 2\pi \frac{D_{ext}}{2} \cdot L, \text{ siendo } L \text{ la altura del agua en el recipiente.}$$

Repetimos todo este proceso introduciendo el sistema en una caja provista de un ventilador en uno de sus extremos, con el que se provoca una corriente de aire. La repetición de este proceso nos lleva a la determinación de un nuevo valor del coeficiente de convección, h , mayor que el primer caso:

6. CUESTIONES.

- 1) Calcular el valor de h para los distintos sistemas a estudio.
- 2) Detallar todos los cálculos efectuados en la práctica.
- 3) Enumerar las posibles fuentes de error cometidas en la realización de las prácticas.