UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA

CURSO: TRANSFERENCIA DE CALOR

Profesor: Dr. W. Loyola

Objetivos del curso

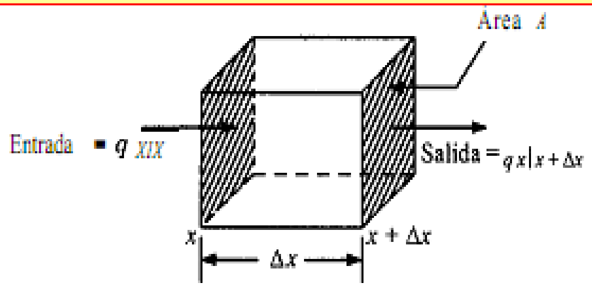
- Comprender los principios básicos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación.
- Aplicar los principios básicos a la transferencia de calor en intercambiadores de calor en doble tubo, casco y tubos, placas.
- Aplicar los fundamentos de transferencia de calor a la evaporación. En etapa simple y múltiple etapa.

SEMANA-1

- Introducción y mecanismos de la transferencia de calor. Transferencia de calor en estado estacionario.
- Mecanismos básicos de transferencia de calor. Ley de Fourier para la conducción de calor; conductividad térmica - Tablas. Ejemplos de cálculo.
- Coeficiente convectivo de transferencia de calor. Tablas
- Transferencia de calor por conducción a través de una placa plana o una pared plana simple y compuesta. Ejemplos y ejercicios.
- Conducción a través de un cilindro hueco, una capa y capa mùltiple. Ejemplos y ejercicios.

Mecanismos básicos de transferencia de calor

1. Conducción.



Ley de Fourier

(W)

$$\frac{q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx}$$

W/m · K

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x/kA} = \frac{T_1 - T_2}{R} = \frac{\text{fuerza impulsora}}{\text{resistencia}}$$

2. Convección-Ley Newton

$$q = hA\,(T_w - T_f)$$

W, W/m^2 . K, K,

$$\frac{q_x}{A}\int_{x_1}^{x_2} dx = -k\int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\frac{q}{A} = \frac{k}{x_2 - x_1}(T_1 - T_2)$$

3. Radiación.

Stefan–Boltzmann law

$$E_b = \sigma T_s^4$$

$(\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2 \cdot K^4})$

Para superficie real:

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4$$

$$\text{velocidad de un proceso de transferencia} = \frac{\text{fuerza impulsora}}{\text{resistencia}}$$

1 btu/h . pie . ºF = 1.73073 W/m . K

Dr. W. Loyola
www.miprofeloyola.blogspot.com

TABLA 4.1-1. *Conductividades térmicas de algunos materiales a 101.325 kPa (1 atm) de presión (k se da en W/m K)*

Sustancia	Temp. (K)	k	Ref.	Sustancias	Temp. (K)	k	Ref.
Gases				Sólidos			
Aire	273	0.0242	(K2)	Hielo	273	2.25	(C1)
	373	0.0316		Ladrillo de arcilla	473	1.00	(P1)
H_2	273	0.167	(K2)	Papel	–	0.130	(M1)
n-Butano	273	0.0135	(P2)	Caucho duro	273	0.151	(M1)
Líquidos				Corcho prensado	303	0.043	(M1)
Agua	273	0.569	(P1)	Asbesto	311	0.168	(M1)
	366	0.680		Lana mineral	266	0.029	(K1)
Benceno	303	0.159	(P1)	Acero	291	45.3	(P1)
	333	0.151			373	45	
Materiales biológicos y alimentos				Cobre	273	388	(P1)
					373	377	
Aceite de Oliva	293	0.168	(P1)	Aluminio	273	202	(P1)
	373	0.164					
Carne de res magra	263	1.35	(C1)				
Leche descremada	275	0.538	(C1)				
Puré de manzana	296	0.692	(C1)				
Salmón	277	0.502	(C1)				
	248	1.30					

Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	k ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Vapor de agua	0.025
Aire	0.026
Agua líquida	0.61
Mercurio	8.4
Espuma de poliestireno	0.036
Papel	0.13
Vidrio	0.35-1.3
Hielo	2.2
Plomo	34
Acero	45
Aluminio	204
Cobre	380

Malos conductores

Buenos conductores

La conductividad térmica cambia con el estado de agregación

... pero la capacidad de transporte de calor no depende sólo de la conducción

$$1 \text{ btu/h} \cdot \text{pie}^2 \cdot {}^\circ\text{F} = 5.6783 \text{ w / m}^2 \text{. K}$$

TABLA 4.1-2. *Magnitudes aproximadas de algunos coeficientes de transferencia de calor*

Mecanismos	*Intervalo de valores de h*	
	btu/h pie² °F	*W/m² K*
Condensación de vapor	1000-5000	5700-28000
Condensación de líquidos orgánicos	200-500	1100-2800
Líquidosen ebullición	300-5000	1700-28000
Agua en movimiento	50-3000	280-1 7000
Hidrocarburos en movimiento	1 O-300	055-1 700
Aire en reposo	0.5-4	02.8-23
Corrientes de aire	2-10	ll .3-55

EJEMPLO 4.1-1. ***Pérdida de calor a través de una pared con aislamiento***

Calcule la pérdida de calor por m^2 de área de superficie para una pared constituida por una plancha de fibra aislante de 25.4 mm de espesor, cuya temperatura interior es de 352.7 K y la exterior de 297.1 K.

Solución: Con base en el apéndice A.3, laconductividad térmica de la fibra aislante es 0.048 W/m . K. El espesor es $x_2 - x_1 = 0.0254$ m. Sustituyendo en la ecuación (4.1-10),

$$\frac{q}{A} = \frac{k}{x_2 - x_1}(T_1 - T_2) = \frac{0.048}{0.0254}(352-297.1)$$

$$= 105.1 \text{ W/m}^2$$

$$= \frac{1}{(3.1546 \text{W/m}^2)(\text{btu/h} \cdot \text{pie}^2)} = 33.30 \text{ btu/h} \cdot \text{pie}^2$$

a) Conducción a través de una placa plana o una pared

$$\boxed{\frac{q}{A} = \frac{k}{x_2 - x_1}(T_1 - T_2) = \frac{k}{\Delta x}(T_1 - T_2)}$$

$$\boxed{\frac{q}{A} = \frac{a + b\frac{T_1 + T_2}{2}}{\Delta x}(T_1 - T_2) = \frac{km}{\Delta x}(T_1 - T_2)}$$

$$\boxed{k_m = a + b\frac{T_1 + T_2}{2}}$$

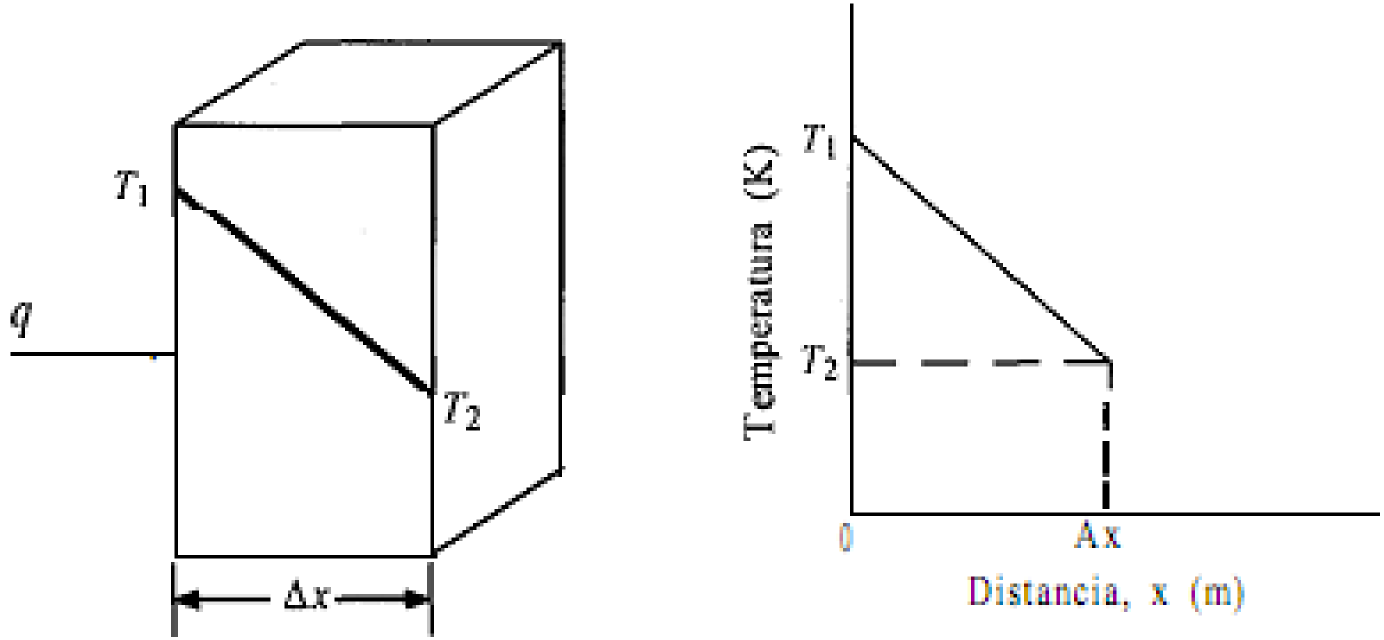


FIGURA 4.2-1. *Conducción de calor en una pared plana: a) geometría de la pared, b) gráfica de la temperatura.*

b) Conducción a través de un cilindro hueco

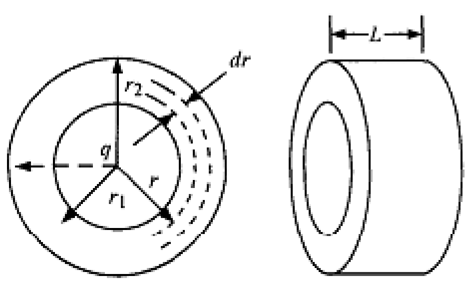


FIGURA 4.2-2. *Conducción de calor en un cilindro*

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dr}$$

$$A = 2\pi r L$$

$$\frac{q}{2\pi L}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dT}{dr} = -k\int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$q = k\,\frac{2\pi L}{\ln\left(r_2/r_1\right)}\,(T_1 - T_2)$$

Multiplicando el numerador y el denominador por $(r_2 - r_1)$

$$q = kA_{1\,m}\frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} = \frac{T_1 - T_2}{(r_2 - r_1)/(kA_{1\,m})} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$A_{1\,m} = \frac{(2\pi L r_2) - (2\pi L r_1)}{\ln(2\pi L r_2 / 2\pi L r_1)} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)}$$

$$R = \frac{r_2 - r_1}{kA_{1\,m}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L}$$

Ejemplo: Longitud de tubo para un serpentín de enfriamiento

Un tubo cilíndrico de caucho duro y paredes gruesas, cuyo radio interior mide 5 mm y el exterior 20 mm, se usa como serpentín de enfriamiento provisional en un baño. Por su interior fluye una corriente rápida de agua fría y la temperatura de la pared interna alcanza 274.9 K, y la temperatura de la superficie exterior es 297.1 K. El serpentín debe extraer del baño un total de 14.65 W (50 btu/h). ¿Cuántos metros de tubo se necesitan?

Solución: De acuerdo con el apéndice A.3, la conductividad térmica a 0 °C (273 K) es k = 0.15 1 W/m . K. Puesto que no se dispone de datos a otras temperaturas, se usará este valor para el intervalo de 274.9 a 297.1 K.

$$r_1 = \frac{5}{1000} = 0.005 \text{ m} \qquad r_2 = \frac{20}{1000} = 0.02 \text{ m}$$

$$A_1 = 2\pi L r_1 = 2\pi(1.0)(0.005) = 0.0314 \text{ m}^2 \qquad A_2 = 0.1257 \text{ m}^2$$

$$A_{1\,m} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)} = \frac{0.1257 - 0.0314}{2303 \log(01257/00314)} = 0.0680 \text{ m}^2$$

$$q = kA_{1m}\frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} = 0.151(0.0682)\left(\frac{2?49 - 297.1}{002 - 0005}\right)$$
$$= -15.2 \text{ W } (51.9 \text{ btu/h})$$

El signo negativo indica que el flujo de calor va de r_2 en el exterior a r_1 en el interior. Puesto que una longitud de 1 m elimina 15.2 W, la longitud necesaria es

$$\text{longitud} = \frac{14.65 \text{ W}}{152 \text{ W/m}} = 0.964 \text{ m}$$

c) Conducción a través de una esfera hueca

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dr}$$

$$A = 4\pi r^2$$

$$\frac{q}{4\pi}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = -k\int_{T_1}^{T_2} dt$$

$$q = \frac{4\pi k(T_1 - T_2)}{1/r_1 - 1/r_2} = \frac{T_1 - T_2}{(1/r_1 - 1/r_2)4\pi k}$$

CONDUCCIÓN A TRAVÉS DE SÓLIDOS EN SERIE

a) Paredes planas en serie

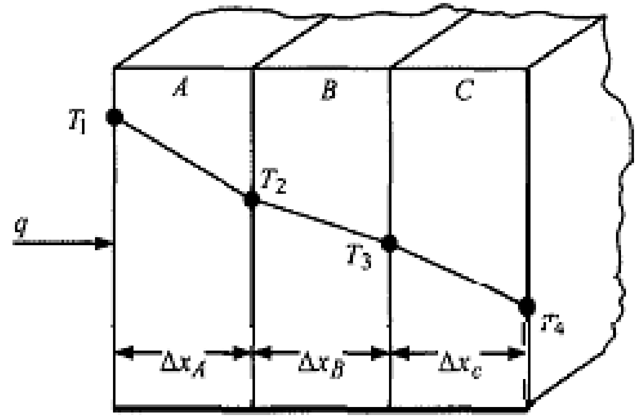


FIGURA 4.3-1. *Flujo de calor a través de una pared de placas múltiples.*

$$q = \frac{k_A A}{\Delta x_A}(T_1 - T_2) = \frac{k_B A}{\Delta x_B}(T_2 - T_3) = \frac{k_C A}{\Delta x_C}(T_3 - T_4)$$

Despejando ΔT de estas ecuaciones

$$T_1 - T_2 = q\frac{\Delta x_A}{k_A A} \qquad T_2 - T_3 = q\frac{\Delta x_B}{k_B A} \qquad T_3 - T_4 = q\frac{\Delta x_C}{k_C A}$$

Al sumar las ecuaciones para T_l - T_2, T_2 - T_3 y T_3 - T_4 se eliminan las temperaturas internas T_2 y T_3 y la ecuación ya reordenada es

$$q \quad \frac{T_1 - T_4}{\Delta x_A/(k_A A) + \Delta x_B/(k_B A) + \Delta x_C/(k_C A)} = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C}$$

Por consiguiente, la ecuación final está en términos de la caída total de temperatura $T_1 - T_4$ y de la resistencia total, $R_A + R_B + R_C$.

Ejemplo: Flujo de calor a través de la pared aislada de un cuarto frío

Un cuarto de almacenamiento refrigerado se construye con una plancha interna de 12.7 mm de pino, una plancha intermedia de 101.6 mm de corcho prensado y una plancha externa de 76.2 mm de concreto. La temperatura superficial de la pared interna es de 255.4 K y la exterior del concreto es de 297.1 K.

Empleando las conductividades del apéndice A.3 en unidades SI: 0.15 1 para el pino; 0.0433 para el corcho prensado; y 0.762 para el concreto, todas en W/m . K. Calcúlese la pérdida de calor en W para 1 m^2, así como la temperatura en la interfaz de la madera y el corcho prensado.

Solución: Si $T_1 = 255.4$, $T_4 = 297.1$ K, *A* al pino, *B* al corcho y C al concreto, se obtiene la siguiente tabulación de propiedades y dimensiones:

$k_A = 0.151$ $\quad k_B = 0.0433$ $\quad k_C = 0.762$

$\Delta x_A = 0.0127\text{m}$

$\Delta x_B = 0.1016$ m

$\Delta x_A = 0.0762$ m

$$R_A = \frac{\Delta x_A}{k_A A} = \frac{0.127}{0.15\,1(1)} = 0.0841 \text{ K/W}$$

$$R_B = \frac{\Delta x_B}{k_B A} = \frac{0.1016}{0.0433(1)} = 2.346$$

$$R_A = \frac{\Delta x_C}{k_C A} = \frac{0.0762}{0.762(1)} = 0.100$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C} = \frac{255.4 - 297.1}{00841 + 2346 + 0.100}$$

$$= \frac{-4L7}{2530} = -16.48 \text{ W } (-56.23 \text{ btu/h})$$

Puesto que la respuesta es negativa, el calor fluye del el exterior al interior.

Para calcular la temperatura T_2 en la interfaz entre el pino y el corcho,

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_A}$$

T_2= 256.79 K en la interfase

b) Cilindros de capas múltiples

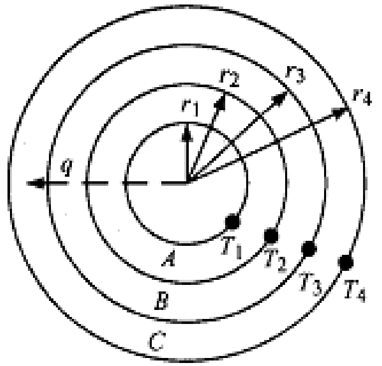


FIGURA 4.3-2. Flujo radial de calor a través de cilindros múltiples en serie.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{(r_2 - r_1)/(k_A A_{A\,1m})} = \frac{T_2 - T_3}{(r_3 - r_2)/(k_B A_{B\,1m})} = \frac{T_3 - T_4}{(r_4 - r_3)/(k_C A_{C\,1m})}$$

$$A_{A\,1m} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)} \quad A_{B\,1m} = \frac{A_3 - A_2}{\ln(A_3/A_2)} \quad A_{C\,1m} = \frac{A_4 - A_3}{\ln(A_4/A_3)}$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{(r_2 - r_1)/(k_A A_{A\,1m}) + (r_3 - r_2)/(k_B A_{B\,1m}) + (r_4 - r_3)/(k_C A_{C\,1m})}$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C} = \frac{T_1 - T_4}{\sum R}$$