IQ46B - Operaciones de Transferencia I **Agosto 12, 2009**

Profesor: Tomás Vargas

Auxiliar: Melanie Colet

Tema N° 3: Intercambiadores de calor

PROBLEMA N° 1

Se va a calentar agua en un intercambiador de tubos concéntricos a contraflujo, desde 20°C hasta 80°C, a razón de 1.2 $^{kg}/_{s}$. El calentamiento se va a realizar por medio de agua geotérmica de la que se dispone a 160°C con un gasto de masa de 2 $^{kg}/_{s}$. El tubo interior es de pared delgada y tiene un diámetro de 1.5 cm. Si el coeficiente de transferencia de calor total del intercambiador, respecto al área externa del tubo, es de 640 $^{W}/_{m^2\text{-°C}}$, determine la longitud requerida de ese intercambiador para lograr el calentamiento deseado.

SOLUCIÓN PROBLEMA N° 1:

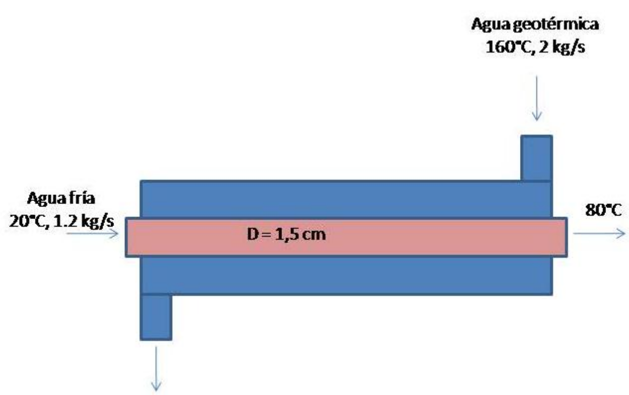
Se va a calentar agua en un intercambiador de tubos concéntricos a contraflujo por medio de agua geotérmica. Se debe determinar la longitud requerida de ese intercambiador de calor.

Consideremos que:

1. Existen condiciones estables de operación.
2. El intercambiador de calor está bien aislado de modo que la pérdida de calor hacia los alrededores es despreciable y, por consiguiente, la transferencia de calor desde el fluido caliente es igual a la transferencia de calor hacia el fluido frío.
3. Los cambios en las energías cinéticas y potenciales de las corrientes de los fluidos son despreciables.
4. No se tiene incrustaciones.
5. Las propiedades de los fluidos son constantes.

Tomamos los calores específicos del agua y del fluido geotérmico como 4.18 y 4.31 $^{kJ}/_{kg\text{-°C}}$, respectivamente (datos).

En la figura se observa un esquema del intercambiador de calor:



La velocidad de la transferencia de calor en este intercambiador puede ser determinada a partir de:

$$Q = [m \cdot c_p \cdot (T_{sal} - T_{ent})]_{agua} = (1.2\ kg/s) \cdot (4.18\ kJ/kg\text{-°C}) \cdot (80 - 20)\text{°C} = 301\ kW$$

Dado que todo este calor es suministrado por el agua geotérmica, se determina que la temperatura de salida de esta agua es:

$$Q = [m \cdot c_p \cdot (T_{ent} - T_{sal})]_{geotérmica} = (2\ kg/s) \cdot (4.31\ kJ/kg\text{-}°C) \cdot (160 - T_{sal})°C = 301\ kW$$

Entonces, **T_{sal}= 125°C**.

Conociendo las temperaturas de entrada y de salida de los dos fluidos, la diferencia de temperatura media logarítmica para este intercambiador a contraflujo será:

$$\Delta T_1 = T_{h,sal} - T_{c,ent} = (125 - 20)°C = 105°C$$
$$\Delta T_2 = T_{h,ent} - T_{c,sal} = (160 - 80)°C = 80°C$$

Luego,

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{80 - 105}{\ln \frac{80}{105}} = 92\ °C$$

Entonces se determina que el área superficial del intercambiador es:

$$Q = U_0 \cdot A_0 \cdot \Delta T_{ml} \rightarrow 301\ 000\ W = 640\ {}^{W}/_{m^2\text{-}°C} \cdot A_0 \cdot 92°C \rightarrow \mathbf{A_0 = 5.11\ m^2}$$

Para proporcionar esta gran área superficial de transferencia de calor la longitud del tubo debe ser:

$$A_0 = \pi \cdot D \cdot L \rightarrow 5.11\ m^2 = \pi \cdot 0.015 m \cdot L \rightarrow \boxed{L = 108\ m}$$

PROBLEMA N° 2

Para la producción de un cierto producto, se requiere ingresar a un reactor un flujo de agua de 1 800 ${}^{m3}/_{h}$ a 20°C. Sin embargo el agua se extrae desde la red pública a sólo 8°C. Se pretende instalar un intercambiador de calor de tubos concéntricos el cual utilizará un fluido de alta temperatura con un flujo de 1 000 ${}^{m3}/_{h}$ a 130°C. Se le solicita dimensionar el área A_0 del intercambiador de tubos concéntricos.

Datos: $C_{p,agua} = 1.0\ {}^{cal}/_{g\text{-}°C}$; $C_{p,fluido} = 0.5\ {}^{cal}/_{g\text{-}°C}$; $\rho_{agua} = 1\ 000\ {}^{kg}/_{m^3}$; $\rho_{fluído} = 2\ 500\ {}^{kg}/_{m^3}$
Coeficiente de transferencia de calor global $U_0 = 267.8\ {}^{W}/_{m^2\text{-}°C}$

SOLUCIÓN PROBLEMA N° 2:

Si se identifican las variables conocidas se tiene: $t_{h,in}$, $t_{c,in}$, $t_{c,out}$, flujo frío y flujo caliente.

Este tipo de problemas de dimensionamiento de intercambiadores de tubos concéntricos posee un algoritmo de solución clásico.

1. Calcular el calor transferido total.
2. Luego, bajo la hipótesis de inexistencia de pérdidas de calor, calcular $t_{h,out}$.
3. Finalmente, calcular el área del intercambiador a partir de las ecuaciones:

$$Q_T = U_0 \cdot A_0 \cdot \Delta T_L$$

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

El calor absorbido por el agua se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_C = \left(mc_p\right)_c \cdot \left(T_{c,out} - T_{c,in}\right)$$

Entonces,

$$Q_C = \left(1800\left[{m^3}/{hr}\right] \cdot 1000\left[{kg}/{m^3}\right] \cdot 1\left[{kcal}/{kg-{}^{\circ}C}\right]\right) \cdot \left(20^{\circ}C - 6^{\circ}C\right)$$

$$\boxed{Q_C = 2.52 \times 10^7 \left[{kcal}/{hr}\right]}$$

Bajo el supuesto de que no hay pérdidas de calor importantes podemos imponer que:

$$Q_C = Q_H = Q_T$$

Pero además se tiene que:

$$Q_H = \left(mc_p\right)_h \cdot \left(T_{h,out} - T_{h,in}\right)$$

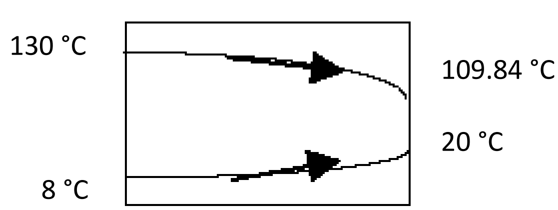
Luego,

$$-2.52 \times 10^7 \left[{kcal}/{hr}\right] = \left(1000\left[{m^3}/{hr}\right] \cdot 2500\left[{kg}/{m^3}\right] \cdot 0.5\left[{kcal}/{kg-{}^{\circ}C}\right]\right)_h \cdot \left(T_{h,out} - 130^{\circ}C\right)$$

Con lo cual se obtiene:

$$\boxed{T_{h,out} = 109.84^{\circ}C}$$

<u>Suponiendo el fluido en co - corriente o flujo paralelo.</u>



Entonces:

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,in}$$
$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,out}$$

Calculamos:

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \dfrac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(130^\circ C - 8^\circ C) - (109.84^\circ C - 20^\circ C)}{\ln\left(\dfrac{130^\circ C - 8^\circ C}{109.84^\circ C - 20^\circ C}\right)} = 105.10^\circ C$$

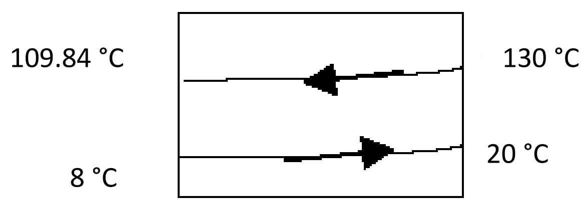
Luego se puede obtener el área del intercambiador como:

$$A_0 = \frac{Q_T}{U_0 \cdot \Delta T_L}$$

$$A_0 = \frac{2.52 \times 10^{10} \left[{cal}/{hr}\right] \times \dfrac{1[J]}{0.2389[cal]} \times \dfrac{1[hr]}{3600[s]}}{267.8 \left[{W}/{m^2 - {}^\circ C}\right] \cdot 105.10^\circ C}$$

$$\boxed{A_0 = 1\ 041.04 \left[m^2\right]}$$

<u>Suponiendo el fluido en contra - corriente.</u>



Entonces:

$$\Delta T_1 = T_{h,out} - T_{c,in}$$
$$\Delta T_2 = T_{h,in} - T_{c,out}$$

Calculamos:

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \dfrac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(109.84^\circ C - 8^\circ C) - (130^\circ C - 20^\circ C)}{\ln\left(\dfrac{109.84^\circ C - 8^\circ C}{130^\circ C - 20^\circ C}\right)} = 105.87^\circ C$$

Luego se puede obtener el área del intercambiador como:

$$A_0 = \frac{Q_T}{U_0 \cdot \Delta T_L}$$

$$A_0 = \frac{2.52\times 10^{10}\left[{}^{cal}\!/\!{}_{hr}\right]\times\frac{1[J]}{0.2389[cal]}\times\frac{1[hr]}{3600[s]}}{267.8\left[{}^{W}\!/\!{}_{m^2-{}^{o}C}\right]\cdot 105.87^{o}C}$$

$$\boxed{A_0 = 1\ 033.47\left[m^2\right]}$$

Se observa una pequeña disminución del área al utilizar los fluidos en contracorriente, **¿por qué?**

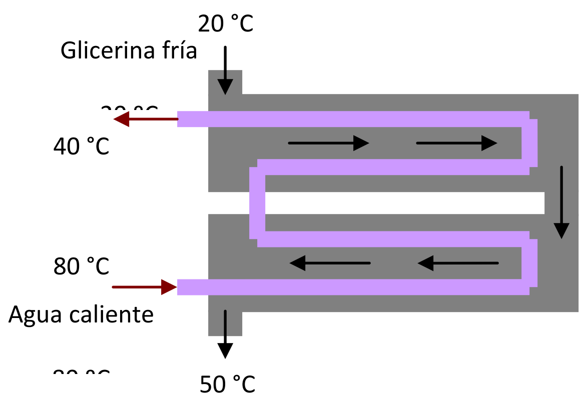
PROBLEMA N° 3

Se usa un intercambiador de dos pasos por el casco y cuatro pasos por los tubos para calentar glicerina desde 20°C hasta 50°C por medio de agua caliente, la cual entra en los tubos de pared delgada de 2 cm de diámetro a 80°C y sale a 40°C. La longitud total de los tubos en el intercambiador es de 60 m. El coeficiente de transferencia de calor por convección es de 25 $^{W}/_{m^2\text{-}°C}$ del lado de la glicerina (casco) y de 160 $^{W}/_{m^2\text{-}°C}$ del lado del agua (tubo). Determine la velocidad de la transferencia de calor en el intercambiador:

- Antes de que se tenga incrustación.
- Después de que se presenta ésta sobre las superficies exteriores de los tubos, con un factor de incrustación de 0.0006 $^{m^2\text{-}°C}/_{W}$.

SOLUCIÓN PROBLEMA N° 3:

Se tiene la siguiente situación:



Se calienta glicerina en un intercambiador de calor de dos pasos por el casco y cuatro pasos por los tubos por medio de agua caliente. Se debe determinar la velocidad de la transferencia de calor sin y con incrustaciones.

Suponemos que:

- Existen condiciones estables de operación.
- El intercambiador de calor está bien aislado de modo que la pérdida de calor hacia los alrededores es despreciable y, por consiguiente, la transferencia de calor desde el fluido caliente es igual a la transferencia de calor hacia el fluido frío.

- Los cambios en las energías cinéticas y potenciales de las corrientes de los fluidos son despreciables.
- Los coeficientes de transferencia de calor y los factores de incrustación son constantes y uniformes.
- La resistencia térmica del tubo interno es despreciable, puesto que dicho tubo es de pared delgada e intensamente conductor.

Se dice que los tubos son de pared delgada y, como consecuencia, resulta razonable suponer que sus áreas superficiales interior y exterior son iguales. Entonces, el área superficial de transferencia de calor queda:

$$A_s = \pi \cdot D \cdot L = \pi \cdot (0.02m) \cdot (60m) = 3.77m^2$$

Se puede determinar la velocidad de la transferencia de calor en este intercambiador a partir de:

$$\dot{Q} = U \cdot A_s \cdot F \cdot \Delta T_{ml,CF}$$

, en donde *F* es el factor de corrección y $\Delta T_{ml,CF}$ es la diferencia de temperatura media logarítmica para la disposición a contraflujo. Estas dos cantidades se determinan a partir de:

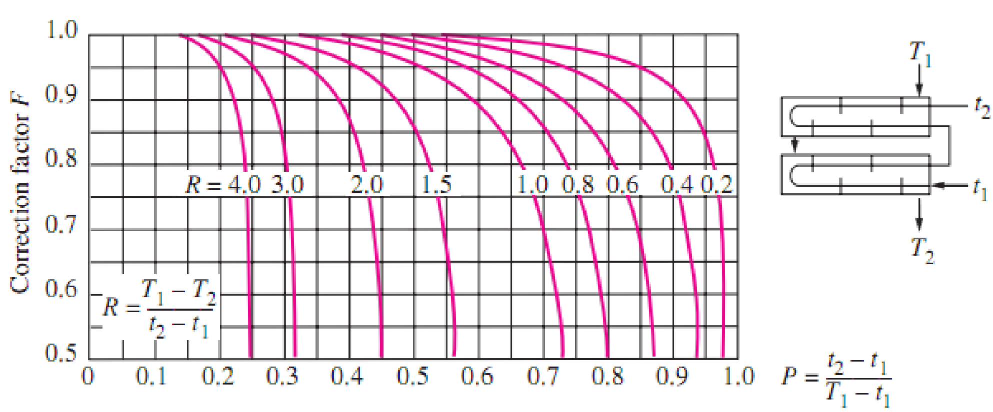
$$\Delta T_1 = T_{h,out} - T_{c,in} = 40^o C - 20^o C = 20^o C$$
$$\Delta T_2 = T_{h,in} - T_{c,out} = 80^o C - 50^o C = 30^o C$$

$$\Delta T_{ml,CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{20^o C - 30^o C}{\ln\left(\frac{20^o C}{30^o C}\right)} = 24.7^o C$$

y,

$$P = \frac{T_{h,out} - T_{h,in}}{T_{c.in} - T_{h,in}} = \frac{40^o C - 80^o C}{20^o C - 80^o C} = 0.67\,; \quad R = \frac{T_{c,in} - T_{c,out}}{T_{h.out} - T_{h,in}} = \frac{20^o C - 50^o C}{40^o C - 80^o C} = 0.75$$

Entonces, del gráfico: $F = 0.91$



(*b*) Two-shell passes and 4, 8, 12, etc. (any multiple of 4), tube passes

En el caso de que no se tenga incrustación, el coeficiente de transferencia de calor total U se determina a partir de (**pared delgada** por lo que la resistencia por conducción es despreciable):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i}+\frac{1}{h_0}} = \frac{1}{\frac{1}{160\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]}+\frac{1}{25\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]}} = 21.6\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]$$

Entonces la velocidad de la transferencia de calor queda:

$$\dot{Q} = U\cdot A_s\cdot F\cdot \Delta T_{ml,CF} = 21.6\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]\cdot 3.77\left[m^2\right]\cdot 0.91\cdot 24.7^{\circ}C$$

$$\boxed{\dot{Q} = 1\ 830[W]}$$

Cuando se tiene incrustación sobre una de las superficies, el coeficiente de transferencia de calor total U es:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i}+\frac{1}{h_0}+R_f} = \frac{1}{\frac{1}{160\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]}+\frac{1}{25\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]}+0.0006\left[m^2-{}^{\circ}C/W\right]} = 21.3\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]$$

Entonces la velocidad de la transferencia de calor queda:

$$\dot{Q} = U\cdot A_s\cdot F\cdot \Delta T_{ml,CF} = 21.3\left[W/m^2-{}^{\circ}C\right]\cdot 3.77\left[m^2\right]\cdot 0.91\cdot 24.7^{\circ}C$$

$$\boxed{\dot{Q} = 1\ 805[W]}$$

Nótese que la velocidad de la transferencia de calor decrece como resultado de la incrustación, como era de esperarse. Sin embargo, la disminución no es aplastante debido a los más o menos bajos coeficientes de transferencia de calor por convección que intervienen.

Consideremos ahora los siguientes datos para la glicerina y el agua:

$c_{p,glicerina}$ = 0.58 [kcal/kg - °C]
$c_{p,agua}$ = 0.999 [kcal/kg - °C]

Determinemos qué flujo de agua requerimos para transferir el calor deseado y qué flujo de glicerina podemos calentar:

Sabemos que: $\dot{Q} = 1\ 830[W]$

Y además:

$$Q_{agua} = \left(F\cdot c_p\right)_{agua}\cdot\left(T_{agua,out} - T_{agua,in}\right) \quad \left(Q_{agua} < 0\_(calor\_transferido)\right)$$

$$Q_{glicerina} = \left(F \cdot c_p\right)_{glicerina} \cdot \left(T_{glicerina,out} - T_{glicerina,in}\right) \quad \left(Q_{glicerina} > 0\_(calor\_absorbido)\right)$$

Luego,

$$F_{agua} = \frac{Q_{agua}}{c_{p,agua} \cdot \left(T_{agua,out} - T_{agua,in}\right)} = \frac{-1830[W]}{0.999\left[{cal}/{kg-°C}\right] \times \frac{1[J]}{0.2389[cal]} \times \left(40°C - 80°C\right)}$$

$$\boxed{F_{agua} = 10.94\left[{kg}/{s}\right]}$$

$$F_{glicerina} = \frac{Q_{glicerina}}{c_{p,glicerina} \cdot \left(T_{glicerina,out} - T_{glicerina,in}\right)} = \frac{1830[W]}{0.58\left[{cal}/{kg-°C}\right] \times \frac{1[J]}{0.2389[cal]} \times \left(50°C - 20°C\right)}$$

$$\boxed{F_{glicerina} = 25.13\left[{kg}/{s}\right]}$$

(b) Propuesto… ¿Qué pasa con los flujos? ¿Cambian? ¿Por qué?

PROBLEMA N°4 (Propuesto)

Dibuje los perfiles de temperatura a lo largo de un intercambiador para el fluido frío y el fluido caliente en los siguientes casos:

- Intercambiador de tubos concéntrico con flujo paralelo, sin cambio de fase. ¿Puede en este caso la temperatura de salida del fluido frío ser mayor que la de salida del fluido caliente? Explique.
- Intercambiador de tubos concéntricos en contracorriente (contraflujo), sin cambio de fase. ¿Puede en este caso la temperatura de salida del fluido frío ser mayor que la de salida del fluido caliente? Explique.