5.-Transferencia de Calor

Esta operación se utiliza con mucha frecuencia en la industria de los alimentos tanto para aprovechar las acciones benéficas del calor en la cocción y textura de los alimentos como para la conservación de los mismos mediante la aplicación del frío o los tratamientos térmicos.

Es un fenómeno de transferencia de energía que frecuentemente está asociado con transferencias de materia.

Se analiza el método de cada transferencia, su estática y estado transitorio, las características que inciden en el diseño de los equipamientos y los procesamientos.

El conocimiento de la operación de transferencia de calor se fundamenta en el aprendizaje de las matemáticas, la física (termodinámica) y la tecnología de los materiales.

Los métodos de cálculo utilizan algunos principios y aplican leyes como las que se describen a continuación, aunque las aplicaciones industriales frecuentemente se apoyan en sistemas empíricos y relaciones tecnológicas.

Ley de Fourier (Conducción)

$$\frac{dQ}{dt} = -k\,\frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde" k" es el coeficiente de transmisión de calor llamado conductividad térmica.

Para convertir: $1\ [\frac{\text{Btu}}{\text{h ft °F}}] = 1{,}7\ [\frac{\text{W}}{\text{m°K}}]$

Ley de enfriamiento de Newton (Convección)

$$\frac{dQ}{dt} = h\,(T - T_0)$$

Donde "h" es el coeficiente de convección también conocido como de película.

Ley de Stefan Boltzmann (Radiación)

$$\mathbf{P = a\,\sigma T^4}$$

Donde "σ" es la constante de Stefan Boltzmann ($5{,}67\ 10^{-8}\ [\frac{w}{m^{2\circ}K^4}]$)

y "a" es el coeficiente de radiación del material en cuestión (1 para el cuerpo negro)

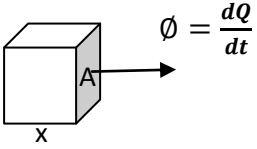
5.1.- Conducción:

Es una operación de transferencia de energía en el seno de un material que puede ser tanto sólido, como líquido o gaseoso. El movimiento browniano aumenta su intensidad con el incremento de la temperatura. Las moléculas cercanas interactúan transfiriendo cantidad de movimiento, hacia el equilibrio del sistema.

La ley de Fourier describe su comportamiento y proporciona la base para su cálculo.

Caso 1.- Transmisión de calor por conducción unidimensional en régimen estacionario a través de paredes planas.

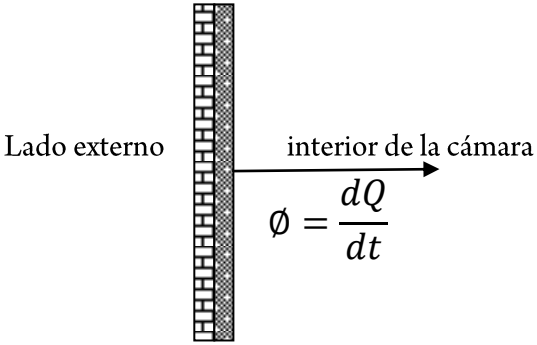
Modelo físico:



Modelo matemático:

$$\frac{dQ}{dt} = -k\,A\,\frac{dT}{dx}$$

Cálculo de transmisión a través de paredes:



material	Densidad $[\frac{Kg}{m^3}]$	Cp $[\frac{kJ}{ºC\ Kg}]$	K $[\frac{w}{ºC\ m}]$
cobre	8955	0,378	386
aluminio	2707	0,882	228
latón	7422	0,580	100
hierro	7898	0,462	73
acero	7802	0,462	43
inoxidable	7818	0,462	16

calor específico y conductividad de algunos materiales

Puede considerarse que se produce una pérdida de 2 $\left[\frac{KJ}{ºCm^2}\right]$ entre el acero inoxidable y el aire que rodea el equipo, y si es de cobre 145 $\left[\frac{KJ}{ºCm^2}\right]$

h	W/m°C
aire	20
aire forzado	250
agua forzada	10000
vapor forzado	4000
aceite forzado	1000

coeficientes de convección

combustible	KJ/Kg
gasoil	350000
nafta	325000
leña	11000
carbón	25000
GNC	214000
GN	75000

calores de combustión

Problema ejemplo:

Calcular las pérdidas en la pared de una cámara de exterior revocado grueso y fino rev = 3 [cm] (k_e = 0.8 [kcal/h m °C]; h_e = 20 kcal /h m^2 C)

Pared de ladrillo hueco lad = 15 [cm] (k_p = 0.6 [kcal/h m°C])

Aislación de poliestireno expandido ais = 15 [cm] (k_a = 0.03 [kcal/h m°C])

Interior de acero inoxidable, chapa 2 [mm] (k_i = 12 [kcal/h m°C]; h_i = 18 [kcal /h m^2 C])

Temperatura exterior T_e = 20 [°C]

Temperatura interior T_i = – 18 [°C]

Calculando el coeficiente global.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{0{,}03}{k_e} + \frac{0{,}15}{k_p} + \frac{0{,}15}{k_a} + \frac{0{,}002}{k_i} + \frac{1}{h_i}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{20} + \frac{0{,}03}{0{,}8} + \frac{0{,}15}{0{,}6} + \frac{0{,}15}{0{,}03} + \frac{0{,}002}{12} + \frac{1}{18}$$

$$\frac{1}{U} = 0{,}05 + 41{,}7 + 0{,}25 + \mathbf{5} + 0 + 0{,}05$$

$$U = 0{,}22\ [\text{Kcal/h}\ ^{o}\text{C}]$$

$$\emptyset = \frac{dQ}{dt} = U\ \Delta T = 8{,}4\ [\text{Kcal/h}] = 35\ [\text{kJ/h}] = 9{,}8\ [\text{w}]$$

Esta energía calórica se perdería por cada m^2 de superficie expuesta. Para una cámara de 100 $[m^2]$ y 4 [m] de altura A = 170 $[m^2]$ (descontando el suelo) => $\emptyset = \frac{dQ}{dt} = 1670\ [\text{w}]$

Para agilizar el cálculo es posible, sin cometer grandes errores, considerar despreciables las resistencias que oponen al flujo calórico los materiales que no son aislantes y obtener prácticos resultados conservadores.

Para el caso del ejemplo: $\frac{1}{U} = 5$ => U = 0,2

Los coeficientes globales de transmisión de calor son característicos del equipamiento de la industria y varían por lo general entre 5 y 7 $\left[\frac{kJ}{s\ m^2}\right]$

Se pueden considerar los siguientes coeficientes de convección para efectuar cálculos rápidos:

natural para aire h = 100 $\left[\frac{w}{^{o}C\ m^2}\right]$
forzada para aire 300 $\left[\frac{w}{^{o}C\ m^2}\right]$
forzada para aceite 1500 $\left[\frac{w}{^{o}C\ m^2}\right]$
vapor 4500 $\left[\frac{w}{^{o}C\ m^2}\right]$
agua 10000 $\left[\frac{w}{^{o}C\ m^2}\right]$

5.2.- Capacidad calorífica de los alimentos

El calor específico (como generalmente se conoce la capacidad calorífica) de los alimentos varía ligeramente en el orden de los 3,3 $\left[\frac{KJ}{Kg\ ^oC}\right]$, el cual resulta un valor bastante aceptable para la mayoría de los cálculos a nivel de la industria.

El modelo de Choi y Okos[12] (1983) permite una mejor aproximación en consideración de la composición general de cada alimento en términos de humedad, fibra y carbohidratos (expresadas en fracciones) y de la temperatura del sistema.

$$Cp_{carbohidratos} = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$$
$$Cp_{fibra} = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$$
$$Cp_{Humedad} = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$$
$$Cp = (X\,Cp)_{carbohidratos} + (X\,Cp)_{fibra} + (X\,Cp)_{Humedad}$$

Esta serie también admite el cálculo de los coeficientes de transmisión del calor por conductividad (k).

$$K_{carbohidratos} = 2.01 \times 10^{-1} + 1.39 \times 10^{-3}T - 4.33 \times 10^{-6}T^2$$
$$K_{fibra} = 1.83 \times 10^{-1} + 1.25 \times 10^{-3}T^{-3}.17 \times 10^{-6}T^2$$
$$K_{Humedad} = 5.71 \times 10^{-1} - 1.76 \times 10^{-3}T - 6.70 \times 10^{-6}T^2$$
$$k = (X\,k)_{carbohidratos} + (X\,k)_{fibra} + (X\,k)_{Humedad}$$

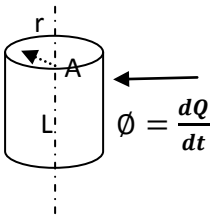
[12] Perry and Chilton, Chemical Engineers Handbook, 5ª ed.., McGraw_ Hill, N. Y., 1982.

y para las viscosidades:

$$\mu_{carbohidratos} = 0{,}201 + 0{,}00139T - 0{,}00000433T^2$$
$$\mu_{fibra} = 1{,}83 + 0{,}00125T - 0{,}00000317\,T^2$$
$$\mu_{Humedad} = 0{,}571 - 0{,}00176^{*}T - 0{,}0000067\,T^2$$
$$\mu = (X\,\mu)_{carbohidratos} + (X\,\mu)_{fibra} + (X\,\mu)_{Humedad}$$

El caso de la transmisión de calor por conducción unidimensional en régimen estacionario en sistemas radiales.

Modelo físico:



Modelo matemático:

$$\frac{dQ}{dt} = -k\,A\,\frac{dT}{dr}$$

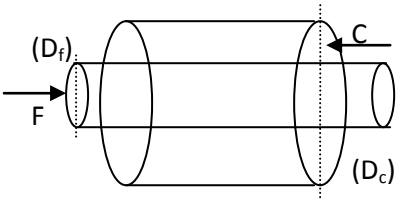
Cuando se tratan alimentos envasados, está claro que el contenido de los recipientes no resulta homogéneo en sus propiedades termodinámicas ni en su capacidad de movimiento, por lo tanto suponer un valor representativo para el coeficiente de transferencia de calor es una aproximación solo válida desde la practicidad. En trabajos científicos se propone considerar el material como poroso, los fluidos en movimiento y el intercambio compuesto por fenómenos convectivos y conductivos simultáneos.

Para una lata de L=10 [cm] y D=7 [cm], conteniendo 400 [g] de alimento, a una temperatura inicial de 33 [ºC] y tratada a 2 [$\frac{Kg}{cm^2}$]:

T_e= 133[ªC]; r=0,07[m]; Cp= 3,3 [$\frac{KJ}{ºC\ Kg}$]; A= 2πLr²= 0,00077[m²]; k=43[$\frac{KJ}{ºC\ Kg}$]

Q=mCpΔT= 132 [KJ] y $\boldsymbol{k\ A\ \frac{dT}{dr}}$= 47,3 [w]→ **t= 22 [min]**

5.3.- Calentamiento dentro de un intercambiador tubular.



El modelo presenta un intercambiador de tubos concéntricos. Por el de mayor diámetro (D_c) circula el fluido calefactor, y por el de menor (D_f) el fluido a calefaccionar. El calor cedido por el fluido caliente es adquirido por el fluido que se calienta, menos pérdidas.

$$Q = Cpc\frac{dmc}{dt}\,\Delta Tc = Cpf\frac{dmf}{dt}\,\Delta Tf$$

Considerando que se trata del alimento y el vapor de calefacción del problema anterior, el equilibrio para ΔT efectivo de 4ºC sería:

$$Q = Hc\frac{dmc}{dt} = Cpf\frac{dmf}{dt}\,\Delta Tf$$

$$\frac{vapor}{alimento} = \frac{Cp\Delta Tf}{H_c} = \frac{3{,}3\ [\frac{KJ}{ºC\ Kg}]\ 94\ [ºC]}{2735\ [\frac{KJ}{Kg}]} = 0{,}11$$

Entones se requiere en vapor el 11% de la masa de alimento. (en las condiciones supuestas 1,6 m^3 de vapor hacen un kilogramo).

5.4.- Calentamiento en un intercambiador a placas.

Este tipo de intercambiadores aprovecha la capacidad fluidodinámica que le otorga el diseño de su superficie interior ondulada en (frecuentemente en *chevrones*) para forzar turbulencias a velocidades de fluidos relativamente bajas (menores a $1[\frac{m}{s}]$) para alcanzar coeficientes de transferencia de calor muy elevados (hasta $25000[\frac{KJ}{hm^2ºC}]$.

$$\frac{dQ}{dt} = mAU\frac{dT}{dt}$$

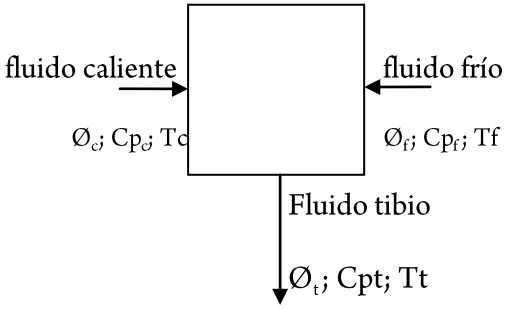
y aplica que:

$$Q = Cpc\frac{dmc}{dt}\Delta Tc = Cpf\frac{dmf}{dt}\Delta Tf$$

Entonces: $\frac{\emptyset_f}{\emptyset_c} = \frac{\Delta T_c\, C_{pc}}{\Delta T_f\, C_{pf}}$

5.5.- Calentamiento por mezcla de fluidos.

El principio de mezclar un litro de agua a 20°C con un litro de agua a 60°C para obtener dos litros de agua a 40°C (menos pérdidas) se utiliza frecuentemente. En la industria se obtiene agua caliente mezclando agua fría con vapor. Las cervecerías preparan el agua de la maceración calculando que colocarán las maltas frías.



$$Q = Cpc\frac{dmc}{dt}\,\Delta Tc = Cpf\frac{dmf}{dt}\,\Delta Tf$$

Se cumple que: $\frac{\emptyset_f}{\emptyset_c} = \frac{\Delta T_c\, C_{pc}}{\Delta T_f\, C_{pf}}$

Cálculo de caldera:

El vapor se produce calentando el agua a la temperatura de cambio de estado para la presión actuante en el sistema.

$$\boldsymbol{Q = m\, C_p \Delta T}$$

considerando la masa unitaria (1Kg de agua) y una temperatura inicial del agua de 90ºC ($\Delta \boldsymbol{T}$ 10ºK)

$$Q = 1\ [Kg].\ 4{,}2\ \left[\frac{KJ}{Kg}\right]\ 10[^{o}K] = 42\ [KJ]$$

Aunque aparentemente no se trate de un valor muy alto, en consideración a la gran cantidad de vapor que requiere la industria resulta económicamente imprescindible recuperar condensados y partir de temperaturas cercanas al punto de ebullición (por eso los 90º del ejemplo).

para el cambio de estado a presión atmosférica se requiere:

$$Q = \boldsymbol{\lambda m}$$

$$Q = 2260\ [KJ]$$

Entonces la energía total requerida para obtener vapor a una atmosfera por cada kilogramo de agua que se encuentra inicialmente a una temperatura de 90ºC es de 2302 KJ.

Se estima que el ahorro de recuperar el calor de los condesados es del orden del 12%.

Es muy común trabajar a 4 Kg/cm^2 en la industria alimentaria en los sistemas de cocción, pailas dulceras y líneas de alimentación de equipos de tratamiento térmico, esto permite obtener temperaturas superiores a los 100 ºC y requiere calores por unidad de masa ligeramente menores para producir la vaporización.

P [Kg/cm^2]	λ Kj/Kg	T [ºC]
1	2244	100
1,5	2234	111
2	2209	121
2,5	2192	127
3	2171	133
3,5	2159	138
4	2142	143
4,5	2129	147
5	2117	152

Calores latentes, temperaturas y presión barométrica