

Algunos Métodos de Estimación para Conductividad Térmica

k

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
NOTACIÓN	1
CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN	2
Teoría cinética de Chapman-Enskog	
Ecuación de Eucken modificada por Stiel y Thodos	
Método de Chung	
CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A ALTA PRESIÓN	2
Diagrama de conductividad reducida	
Método de Stiel y Thodos	
CONDUCTIVIDAD DE MEZCLAS DE GASES A BAJA PRESIÓN	3
Método de Wilke	
CONDUCTIVIDAD DE MEZCLAS DE GASES A ALTA PRESIÓN	3
Método de Stiel y Thodos	
CONDUCTIVIDAD DE LÍQUIDOS PUROS.....	3
Método del punto de ebullición de Sato y Riedel	
Método de Latini	
CONDUCTIVIDAD DE MEZCLAS DE LÍQUIDOS.....	4
Ecuación de Filipov	
Método de Li	
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS.....	4
Ecuación de Wiedemann-Franz-Lorentz	
Ecuación de Maxwell para sólidos compuestos	
Productos alimenticios	
FUENTES CONSULTADAS	5

INTRODUCCIÓN

La conductividad térmica es la constante de proporcionalidad que aparece en la ley de Fourier de la conducción, relacionando la densidad de flujo de calor con el gradiente de temperatura. En su forma más simple, la ley de Fourier se puede expresar como:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

Las unidades SI de la conductividad térmica son W/m·K. Algunos valores representativos de conductividad se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores representativos de conductividad térmica
(en W/m·K, aproximadamente a temperatura ambiente)

GASES		LÍQUIDOS	
Cl ₂	0.0089	Gasolina	0.116
CCl ₂ F ₂ (R-12)	0.0097	Ciclohexano	0.120
n-C ₄ H ₁₀	0.0160	Éter etílico	0.134
CO ₂	0.0166	Aceite mineral	0.138
Ar	0.0177	CS ₂	0.166
C ₃ H ₈	0.0183	Etanol	0.173
C ₂ H ₆	0.0214	Metanol	0.203
H ₂ O (vapor)	0.0247	Gas LP	0.23 ~ 0.26
Aire	0.0250	Etilénglicol	0.255
CH ₄	0.0343	Glicerina	0.29
He	0.150	H ₂ O	0.6
H ₂	0.182	Hg	8.3
SÓLIDOS			
Aerogel sílice	0.004 ~ 0.04	Uranio	28
Madera	0.03 ~ 0.2	Plomo	34.7
Hule	0.16	Acero al carbono	43
Acrílico	0.17 ~ 0.2	Hierro dulce	80
Polipropileno	0.25	Níquel	91
Poliétileno AD	0.33 ~ 0.52	Bronce (63% Cu)	125
Vidrio	1.1	Tungsteno	180
Cuarzo fundido	1.4	Aluminio	273
Suelo	1.5	Oro	318
Concreto/piedra	1.7	Cobre	401
Hielo	2.0	Plata	424
NaCl	7.1	Grafito ⁽¹⁾	10
Acero inoxidable	16.3 ~ 24	Grafito ⁽²⁾	2000
Titanio	26	Diamante	2300

⁽¹⁾ perpendicular al plano basal

⁽²⁾ paralelamente al plano basal

NOTACIÓN

La mayoría de los métodos usan correlaciones empíricas, por lo que se debe usar las unidades especificadas en esta lista excepto si se indica lo contrario en el método. Algunos símbolos empleados sólo en un método no se incluyen aquí pero se definen en el método.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
c_p	Capacidad calorífica a presión constante	J/mol·K
c_v	Capacidad calorífica a volumen constante $c_v = c_p - R$ (para gases ideales)	J/mol·K
k	Conductividad térmica	W/m·K
k_c	Conductividad térmica en el punto crítico	W/m·K
k_{ef}	Conductividad térmica efectiva	W/m·K
k_m	Conductividad térmica de la mezcla	W/m·K
k_r	Conductividad térmica reducida $k_r = k / k_c$	-
L	Número de Lorentz	W·Ω/K ²
M	Peso molecular	g/mol
M'	Peso molecular (unidades SI)	kg/mol
n	Número de componentes de la mezcla	-
P	Presión	bar
P_c	Presión crítica	bar
P_r	Presión reducida	-
R	Constante universal de los gases $R = 8.314$ J/mol·K	J/mol·K
T	Temperatura	K
T_b	Temperatura de ebullición normal (1 atm)	K
T_{br}	Temperatura de ebullición reducida $T_{br} = T_b / T_c$	-
T_c	Temperatura crítica	K
T_r	Temperatura reducida	-
\tilde{V}_b	Volumen molar de líquido saturado en el punto de ebullición normal	cm ³ /mol
\tilde{V}_c	Volumen molar en el punto crítico	cm ³ /mol
\tilde{V}_m	Volumen molar de sólido en el punto de fusión	cm ³ /mol
w	Fracción peso	-
x	Fracción mol (en fase líquida)	-
y	Fracción mol (en fase gaseosa)	-
Z_c	Compresibilidad en el punto crítico	-
Γ	Conductividad térmica inversa	m·K/W
ϵ	Energía característica	J
ϕ	Fracción volumen	-
Φ_{ij}	Parámetro de interacción, método de Wilke	-
κ	Constante de Boltzmann $\kappa = 1.38066 \times 10^{-23}$ J/K	J/K
μ	Viscosidad	Pa·s
ρ_r	Densidad reducida (ρ / ρ_c)	-
σ	Diámetro de colisión	Å
Ω_k	Integral de colisión para conductividad	-
ω	Factor acéntrico	-

CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN
TEORÍA CINÉTICA DE CHAPMAN-ENSKOG

La teoría cinética de los gases toma en cuenta únicamente la energía cinética de traslación de la molécula, pero no incluye las contribuciones energéticas debidas a vibraciones y rotaciones, por lo que este método sólo se puede recomendar para gases monoatómicos. La ecuación que se obtiene para la conductividad térmica es:

$$k = 0.08328 \frac{(T/M)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_k}$$

Se basa en el modelo de Lennard-Jones para la energía potencial de interacción (ϕ) entre dos moléculas del mismo gas:

$$\phi(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

donde ϵ (energía característica, que suele aparecer dividida entre la constante de Boltzmann κ) y σ (diámetro de colisión) son parámetros específicos del gas (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de Lennard-Jones y otras propiedades

sustancia	σ	ϵ/κ	sustancia	σ	ϵ/κ
	(Å)	(K)		(Å)	(K)
He	2.551	10.22	Kr	3.655	178.9
Ne	2.820	32.8	Xe	4.047	231.0
Ar	3.542	93.3	Hg	2.969	750.0

La integral de colisión Ω_k (Tabla 4) se puede consultar tabulada en función de la temperatura adimensional T^* , definida como:

$$T^* = \frac{\kappa T}{\epsilon} \quad \text{o bien} \quad T^* = \frac{T}{\epsilon/\kappa}$$

Tabla 4. Integral de colisión (Lennard-Jones)

T^*	Ω_k	T^*	Ω_k	T^*	Ω_k	T^*	Ω_k
0.25	3.0353	1.30	1.4000	2.7	1.0700	4.8	0.9326
0.30	2.8458	1.35	1.3760	2.8	1.0591	4.9	0.9288
0.35	2.6791	1.40	1.3538	2.9	1.0489	5.0	0.9252
0.40	2.5316	1.45	1.3331	3.0	1.0394	6.0	0.8948
0.45	2.4003	1.50	1.3139	3.1	1.0304	7.0	0.8719
0.50	2.2831	1.55	1.2959	3.2	1.0220	8.0	0.8535
0.55	2.1781	1.60	1.2791	3.3	1.0141	9.0	0.8382
0.60	2.0839	1.65	1.2633	3.4	1.0066	10	0.8249
0.65	1.9991	1.70	1.2486	3.5	0.9995	12	0.8026
0.70	1.9226	1.75	1.2347	3.6	0.9927	14	0.7844
0.75	1.8535	1.80	1.2216	3.7	0.9864	16	0.7690
0.80	1.7909	1.85	1.2092	3.8	0.9803	18	0.7556
0.85	1.7341	1.90	1.1975	3.9	0.9745	20	0.7439
0.90	1.6825	1.95	1.1865	4.0	0.9690	25	0.7196
0.95	1.6354	2.00	1.1760	4.1	0.9637	30	0.7003
1.00	1.5925	2.1	1.1565	4.2	0.9587	35	0.6844
1.05	1.5533	2.2	1.1388	4.3	0.9539	40	0.6710
1.10	1.5173	2.3	1.1227	4.4	0.9493	50	0.6491
1.15	1.4843	2.4	1.1079	4.5	0.9448	75	0.6111
1.20	1.4539	2.5	1.0943	4.6	0.9406	100	0.5855
1.25	1.4259	2.6	1.0817	4.7	0.9365	150	0.5512

Aunque la teoría cinética de Chapman-Enskog da razonablemente buenas predicciones para viscosidades y difusividades, no es muy confiable para conductividades térmicas de gases poliatómicos ya que únicamente toma en cuenta la energía traslacional de la molécula, pero ignora las contribuciones debidas a vibraciones y rotaciones. En estos casos es preferible usar un método como el de Stiel y Thodos o el de Chung (que sí toman en cuenta esas contribuciones al incorporar la capacidad calorífica en los cálculos).

CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN
ECUACIÓN DE EUCKEN MODIFICADA POR STIEL Y THODOS

La conductividad térmica ha sido analizada frecuentemente en forma de un grupo adimensional, llamado factor de Eucken:

$$\frac{kM'}{\mu c_v}$$

La ecuación originalmente propuesta por Eucken es:

$$\frac{kM'}{\mu c_v} = 1 + \frac{9/4}{c_v/R}$$

Stiel y Thodos han propuesto una forma ligeramente modificada que concuerda mejor con los datos experimentales:

$$\frac{kM'}{\mu c_v} = 1.15 + \frac{2.03}{c_v/R}$$

Esta ecuación no es muy confiable para el caso de compuestos polares.

CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN
MÉTODO DE CHUNG

$$\frac{kM'}{\mu c_v} = \frac{3.75\Psi}{c_v/R}$$

Ψ es una función de tres parámetros adimensionales, α , β y ζ :

$$\Psi = 1 + \alpha \frac{0.215 + 0.28288\alpha - 1.061\beta + 0.26665\zeta}{0.6366 + \beta\zeta + 1.061\alpha\beta}$$

$$\alpha = \frac{c_v}{R} - \frac{3}{2}$$

$$\beta = 0.7862 - 0.7109\omega + 1.3168\omega^2$$

$$\zeta = 2 + 10.5T_r^2$$

Este método es razonablemente preciso para compuestos no polares. En el caso de sustancias polares, β es diferente para cada compuesto. En el peor de los casos, usar el valor de $\beta = 0.7576$ para sustancias polares.

CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A ALTA PRESIÓN
INTRODUCCIÓN

No existe un valor específico de presión a partir del cual se considere "alta". Normalmente los métodos para gases a baja presión comienzan a mostrar desviaciones significativas a presiones de 10 atm o mayores.

CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A ALTA PRESIÓN
DIAGRAMA DE CONDUCTIVIDAD REDUCIDA

Con base en el principio de estados correspondientes, es posible relacionar la conductividad térmica reducida $k_r = k/k_c$ con la temperatura y presión reducidas. Pocas veces se cuenta con valores experimentales de la conductividad térmica en el punto crítico; algunos se muestran en la Tabla 5.

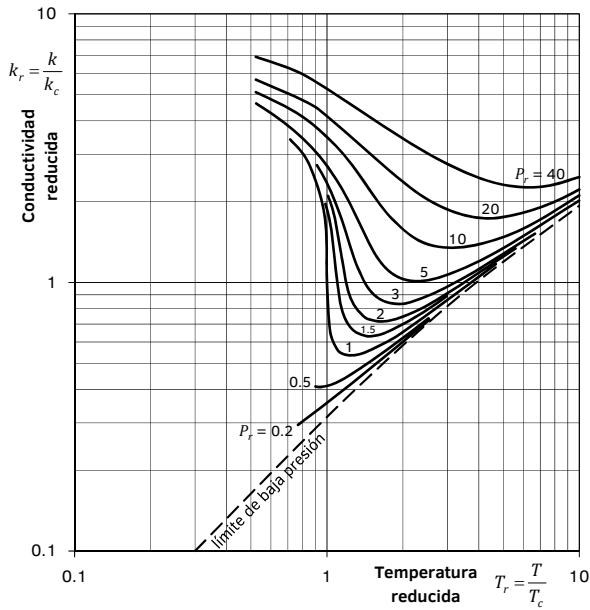
Tabla 5. Conductividad térmica en el punto crítico (W/m·K).

compuesto	k_c	compuesto	k_c	compuesto	k_c	compuesto	k_c
Ne	0.0332	Aire	0.0380	CO	0.0362	SO ₂	0.0413
Ar	0.0297	N ₂	0.0363	CO ₂	0.0511	Cl ₂	0.0406
Kr	0.0207	O ₂	0.0441	NO	0.0495	CH ₄	0.0662
Xe	0.0168	H ₂ O	0.2380	N ₂ O	0.0548	C ₂ H ₆	0.0850

Valores recopilados de Bird (2002) e Incropera (2006).

Para compuestos no incluidos en la Tabla 5, si se conoce un dato de conductividad a otra temperatura y presión, entonces la conductividad crítica se puede estimar a partir de la gráfica con $k_c = k/k_r$, donde k_r se obtiene de la gráfica empleando los valores correspondientes de T_r y P_r .

DIAGRAMA DE CONDUCTIVIDAD REDUCIDA



CONDUCTIVIDAD DE GASES PUROS A ALTA PRESIÓN MÉTODO DE STIEL Y THODOS

Este método correlaciona la conductividad térmica en exceso $(k - k^\circ)$ con la densidad reducida ρ_r y la compresibilidad en el punto crítico Z_c según el rango de valores de la densidad reducida.

$\rho_r < 0.5$	$(k - k^\circ) \Gamma Z_c^5 = 1.22 \times 10^{-2} (e^{0.535\rho_r} - 1)$
$0.5 < \rho_r < 2.0$	$(k - k^\circ) \Gamma Z_c^5 = 1.14 \times 10^{-2} (e^{0.67\rho_r} - 1.069)$
$2.0 < \rho_r < 2.8$	$(k - k^\circ) \Gamma Z_c^5 = 2.6 \times 10^{-3} (e^{1.155\rho_r} + 2.016)$

donde k° es la conductividad térmica del gas a baja presión (a la misma temperatura) y Γ es un parámetro llamado conductividad térmica inversa:

$$\Gamma = 210 \left(\frac{T_c M^3}{P^4} \right)^{1/6}$$

Este método no es muy preciso, los errores pueden estar en el rango de ± 10 a 20%, y no se debe emplear para hidrógeno, helio o para sustancias polares.

CONDUCTIVIDAD DE MEZCLAS DE GASES A BAJA PRESIÓN MÉTODO DE WILKE

Este método emplea las fracciones mol y las conductividades de los componentes puros a la misma temperatura. Para una mezcla binaria, este método se expresa como:

$$k_m = \frac{y_1 k_1}{y_1 + y_2 \Phi_{12}} + \frac{y_2 k_2}{y_2 + y_1 \Phi_{21}}$$

y para una mezcla multicomponentes, se generaliza a:

$$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i k_i}{\sum_{j=1}^n y_j \Phi_{ij}}$$

Φ_{ij} es un parámetro de interacción que depende de las viscosidades de los componentes puros a baja presión, dado por:

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2$$

y el correspondiente parámetro Φ_{ji} se puede encontrar con la fórmula simplificada:

$$\Phi_{ji} = \frac{\mu_j M_i}{\mu_i M_j} \Phi_{ij}$$

Cuando ambos subíndices son iguales, $\Phi = 1$.

CONDUCTIVIDAD DE MEZCLAS DE GASES A ALTA PRESIÓN MÉTODO DE STIEL Y THODOS

Emplea las mismas ecuaciones que el método de Stiel y Thodos para gases puros a alta presión, pero empleando propiedades pseudocríticas de la mezcla definidas de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$M_m = \sum_{i=1}^n y_i M_i$$

$$T_{c,ij} = (T_{c,i} T_{c,j})^{1/2} \quad T_{c,ii} = T_{c,i}$$

$$\tilde{V}_{c,ij} = \frac{1}{8} \left[(\tilde{V}_{c,i})^{1/3} + (\tilde{V}_{c,j})^{1/3} \right]^3 \quad \tilde{V}_{c,ii} = \tilde{V}_{c,i}$$

$$\omega_m = \sum_{i=1}^n y_i \omega_i$$

$$Z_{c,m} = 0.291 - 0.08 \omega_m$$

$$\tilde{V}_{c,m} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n y_i y_j \tilde{V}_{c,ij}$$

$$T_{c,m} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n y_i y_j \tilde{V}_{c,ij} T_{c,ij}}{\tilde{V}_{c,m}}$$

CONDUCTIVIDAD DE LÍQUIDOS PUROS INTRODUCCIÓN

Son pocos los modelos que permitan predecir de forma confiable la conductividad de un líquido a partir de otra información conocida, por lo que frecuentemente se emplean datos experimentales.

CONDUCTIVIDAD DE LÍQUIDOS PUROS MÉTODO DEL PUNTO DE EBULLICIÓN DE SATO Y RIEDEL

$$k = \frac{1.11}{M^{1/2}} \left[\frac{3 + 20(1 - T_r)^{2/3}}{3 + 20(1 - T_{br})^{2/3}} \right]$$

Para líquidos orgánicos a temperaturas por debajo del punto de ebullición, esta correlación da errores variables, aunque generalmente están por debajo del 15%. Este método es de exactitud limitada, pero tiene la ventaja de que sólo requiere información básica del compuesto.

CONDUCTIVIDAD DE LÍQUIDOS PUROS MÉTODO DE LATINI

$$k = A \frac{(1 - T_r)^{0.38}}{T_r^{1/6}} \quad \text{donde } A = \frac{A^* T_b^\alpha}{M^\beta T_c^\gamma}$$

y las constantes A^* , α , β y γ dependen del tipo de compuesto, de acuerdo a la Tabla 6.

Tabla 6. Constantes para el método de Latini

FAMILIA	A*	α	β	γ
hidrocarburos saturados	0.0035	1.2	0.5	0.167
olefinas	0.0361	1.2	1.0	0.167
cicloparafinas	0.0310	1.2	1.0	0.167
aromáticos	0.0346	1.2	1.0	0.167
alcoholes	0.00339	1.2	0.5	0.167
ácidos orgánicos	0.00319	1.2	0.5	0.167
cetonas	0.00383	1.2	0.5	0.167
ésteres	0.0415	1.2	1.0	0.167
éteres	0.0385	1.2	1.0	0.167
refrigerantes R20, R21, R22, R23	0.562	0.0	0.5	-0.167
otros refrigerantes	0.494	0.0	0.5	-0.167

Este método no es aplicable para otros tipos de compuestos no incluidos en la tabla y se presentan dificultades cuando un compuesto cae en más de una categoría. Los errores típicos están por debajo del 10%, pero se puede tener errores significativos si el peso molecular está fuera del rango de 50 a 250 g/mol.

CONDUCTIVIDAD DE MEZCLAS DE LÍQUIDOS

ECUACIÓN DE FILIPPOV

Esta ecuación sólo aplica para mezclas binarias y emplea la conductividad térmica de los líquidos puros y las fracciones peso:

$$k_m = w_1 k_1 + w_2 k_2 - 0.72 w_1 w_2 (k_2 - k_1)$$

Los componentes se asignan de tal forma que el componente 1 sea el de menor conductividad y el componente 2 sea el de mayor conductividad (es decir, se debe cumplir $k_2 \geq k_1$). La constante 0.72 se puede reemplazar por un parámetro ajustable por regresión si se tienen datos experimentales.

CONDUCTIVIDAD DE MEZCLAS DE LÍQUIDOS

MÉTODO DE LI

Para un sistema binario:

$$k_m = \alpha_1^2 k_1 + 2\alpha_1 \alpha_2 k_{12} + \alpha_2^2 k_2$$

y para un sistema multicomponente:

$$k_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j k_{ij}$$

donde k_{ij} es la media armónica de las conductividades térmicas de los componentes, tomados de par en par:

$$k_{ij} = 2(k_i^{-1} + k_j^{-1})^{-1} \quad k_{ii} = k_i$$

y las α son parámetros de interacción dados por:

$$\alpha_i = \frac{x_i \tilde{V}_i}{\sum_{j=1}^n x_j \tilde{V}_j}$$

donde \tilde{V} es el volumen molar (cm^3/mol) del líquido puro. Si no se dispone de los valores de \tilde{V} a la temperatura de interés, puede emplearse los volúmenes molares en el punto de ebullición (\tilde{V}_b). Para sistemas que no incluyen el agua, se puede emplear el volumen molar crítico V_c (cm^3/mol) en vez de \tilde{V} sin afectar el resultado significativamente.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS

INTRODUCCIÓN

En términos generales, la conductividad térmica de los metales disminuye con la temperatura; la de los no metales aumenta con la temperatura; y las aleaciones muestran comportamientos intermedios. De los metales, la plata es el mejor conductor del calor.

Los sólidos cristalinos son generalmente mejores conductores del calor que los sólidos amorfos. El diamante es uno de los mejores conductores de calor.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS

ECUACIÓN DE WIEDEMANN-FRANZ-LORENTZ (METALES PUROS)

Para metales y aleaciones, la conductividad térmica está relacionada estrechamente con la conductividad eléctrica, ya que la alta movilidad de los electrones de la banda de conducción hace que sean los principales agentes de transmisión de energía térmica.

La ecuación de Wiedemann-Franz-Lorentz relaciona ambas conductividades y la temperatura, en forma de un grupo dimensional denominado número de Lorentz:

$$\mathcal{L} \equiv \frac{k}{k_e T}$$

donde k_e es la conductividad eléctrica en siemens por metro (S/m, donde el siemen es el inverso del ohm, $S \equiv \Omega^{-1}$).

El número de Lorentz \mathcal{L} está entre 2.2 y $2.9 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega / \text{K}^2$ para la mayoría de los metales puros a 0°C y varía poco con la temperatura (típicamente 1 a 2% por cada 100°C), por lo que generalmente se le considera constante.

Esta ecuación es de limitada poca utilidad para aleaciones, ya que \mathcal{L} depende fuertemente de la composición y en ocasiones también de la temperatura.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS

ECUACIÓN DE MAXWELL PARA SÓLIDOS COMPUESTOS

En el caso de un sólido compuesto (compósito), se puede considerar que el material tiene una conductividad térmica efectiva k_{ef} que depende de las conductividades de los componentes. Maxwell fue el primero en analizar la conducción de calor en medios compuestos, cuando consideró un material formado por esferas de conductividad k_1 dispersas en una fase sólida continua de conductividad k_0 . Para una fracción volumen ϕ pequeña de la fase dispersa:

$$\frac{k_{ef}}{k_0} = 1 + \frac{3\phi}{\left(\frac{k_1 + 2k_0}{k_1 - k_0}\right) - \phi}$$

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SÓLIDOS

PRODUCTOS ALIMENTICIOS

Es importante mencionar que algunos productos alimenticios son anisotrópicos, por lo que la conductividad térmica puede variar dependiendo de la dirección de la transferencia de calor. Se han propuesto varios modelos para estimar la conductividad térmica de un alimento a partir de la conductividad térmica y la fracción volumen de los componentes individuales. Dos modelos populares, propuestos por analogía con los circuitos eléctricos, son el modelo paralelo y el modelo perpendicular.

$$k = \sum \phi_i k_i \quad (\text{paralelo})$$

$$k = \frac{1}{\sum (\phi_i / k_i)} \quad (\text{perpendicular})$$

Habitualmente, la conductividad térmica real de un alimento quedará entre los extremos dados por estos dos modelos, aunque el modelo paralelo es usado con mayor frecuencia.

La conductividad térmica de los componentes individuales está dada por las siguientes ecuaciones, donde la temperatura debe ser en grados Celsius y la conductividad térmica será en W/m·K:

$$\begin{aligned}
 k_{\text{agua}} &= 0.57109 + 1.7625 \times 10^{-3} T - 6.7306 \times 10^{-6} T^2 \\
 k_{\text{hielo}} &= 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3} T + 1.0154 \times 10^{-4} T^2 \\
 k_{\text{proteína}} &= 0.1788 + 1.1959 \times 10^{-3} T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2 \\
 k_{\text{grasa}} &= 0.1807 - 2.7604 \times 10^{-4} T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2 \\
 k_{\text{carbohidr}} &= 0.2014 + 1.3874 \times 10^{-3} T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2 \\
 k_{\text{fibra}} &= 0.1833 + 1.2497 \times 10^{-3} T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2 \\
 k_{\text{ceniza}} &= 0.3296 + 1.401 \times 10^{-3} T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2
 \end{aligned}$$

La fracción volumen de cada componente se estima a partir de la fracción masa y la densidad individual de cada componente:

$$\phi_i = \frac{w_i \rho}{\rho_i}$$

donde la densidad del alimento compuesto está dada por:

$$\rho = \frac{1}{\sum (w_i / \rho_i)}$$

y las densidades ρ_i de los componentes están dadas por:

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{agua}} &= 997.18 + 3.1439 \times 10^{-3} T - 3.7574 \times 10^{-3} T^2 \\
 \rho_{\text{hielo}} &= 916.89 - 0.13071 T \\
 \rho_{\text{proteína}} &= 1329.9 - 0.51814 T \\
 \rho_{\text{grasa}} &= 925.59 - 0.41757 T \\
 \rho_{\text{carbohidr}} &= 1599.1 - 0.31047 T \\
 \rho_{\text{fibra}} &= 1311.5 - 0.36589 T \\
 \rho_{\text{ceniza}} &= 2423.8 - 0.28063 T
 \end{aligned}$$

donde nuevamente la temperatura debe ser en °C y las densidades están dadas en kg/m³.

Para alimentos congelados, sólo una parte del agua se encuentra presente como hielo, mientras que el resto permanece en fase líquida. Para estimar la fracción masa de hielo se recomienda la ecuación empírica propuesta por Tchigeov (1979):

$$W_{\text{hielo}} = \frac{1.105 w_{\text{agua, inicial}}}{1 + \frac{0.7138}{\ln(T_{f0} - T + 1)}}$$

donde $w_{\text{agua, inicial}}$ es la fracción masa de agua antes del congelamiento (es decir, la fracción masa total del agua) y T_{f0} es la temperatura a la cual el alimento comienza a congelarse. También aquí las temperaturas deben ser en °C. Finalmente, la fracción masa de agua que permanece sin congelarse obtiene por diferencia:

$$W_{\text{agua}} = W_{\text{agua, inicial}} - W_{\text{hielo}}$$

FUENTES CONSULTADAS

- Bird, Stewart y Lightfoot (2002). "Transport Phenomena". 2ª edición, Wiley.
- Perry (2004). "Manual del Ingeniero Químico". 7ª edición, McGraw-Hill.
- Onita, et al. (2005). "Estimation of the specific heat and thermal conductivity of foods only by their classes of substances contents (water, proteins, fats, carbohydrates, fibers and ash)". Scientific Researches. Agroalimentary Processes and Technologies. XI(1), 217-222.
- Poling, Prausnitz y O'Connell (2000). "The Properties of Gases and Liquids". 5ª edición, McGraw-Hill
- Reid, Prausnitz y Sherwood (1987). "The Properties of Gases and Liquids". 4ª edición, McGraw-Hill.
- Welty, Wicks y Wilson (1997). "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa", Limusa.

LA LETRA PEQUEÑA

EL ÚNICO PROPÓSITO DE ESTE DOCUMENTO ES SERVIR COMO RECURSO DIDÁCTICO; SU USO DEBE SER EXCLUSIVAMENTE ACADÉMICO. PARTES DE ESTE DOCUMENTO PUEDEN ESTAR SUJETAS A RESTRICCIONES POR DERECHOS DE AUTOR EN ALGUNOS PAÍSES.

ALGUNOS DE LOS MÉTODOS HAN SIDO ADAPTADOS PARA EMPLEAR CONSISTENTEMENTE SIMBOLOGÍA Y/O SISTEMA DE UNIDADES, PARA FACILITAR LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS, O PARA CONCILIAR EN LO POSIBLE DISCREPANCIAS ENTRE LAS DIVERSAS FUENTES CONSULTADAS.

NO SE DA NINGUNA GARANTÍA, EXPLÍCITA O IMPLÍCITA, SOBRE LA EXACTITUD DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO, POR LO QUE NO SE RECOMIENDA SU USO EN LA PREPARACIÓN DE DISEÑOS FINALES DE EQUIPOS INDUSTRIALES, PROCESOS QUÍMICOS, O SISTEMAS DE VIAJE A TRAVÉS DEL TIEMPO. EN ESTOS CASOS, SE RECOMIENDA CONSULTAR LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS ORIGINALES.