

Predicción de la conductividad y difusividad térmica de un alimento en base a su composición: Efecto de la estructura

Apellidos, nombre	Talens Oliag, Pau (pautalens@tal.upv.es)
Departamento	Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

La conductividad y difusividad térmica son propiedades térmicas relacionadas con el transporte de calor. Definen las características de la transferencia de calor a través de los materiales y por tanto influyen en lo rápidamente que el producto es calentado o enfriado durante un proceso térmico.

En este artículo vamos a presentar como podemos predecir los valores de conductividad y difusividad térmica de un alimento en base a su composición, y el efecto que tiene la estructura en el valor predicho.

2 Introducción

La conductividad y difusividad térmica son propiedades térmicas relacionadas con la resistencia que opone un material a la transferencia de calor.

La conductividad es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor ^[1]. Cuantifica la facilidad con que una sustancia transmite calor, y se define como el flujo de calor que tiene lugar a través de una unidad de área perpendicular a un gradiente de temperatura de 1K/m. Se asocia a materiales sólidos, y por lo tanto el mecanismo de transferencia de calor predominante es la conducción en estado estacionario (sin cambios de temperatura en el sistema). La conductividad se representa por el símbolo k , y tiene unidades de $\text{w/m}\cdot\text{K}$.

La difusividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la inercia térmica ^[2]. Mide la velocidad a la que cambia la temperatura cuando un material es calentado o enfriado. Materiales con valores altos de difusividad térmica indican que se calientan o enfrían rápidamente. Se asocia a materiales líquidos, y por lo tanto el mecanismo de transferencia de calor predominante será la convección en estado no estacionario (con cambios de temperatura en el sistema). La difusividad se representa por el símbolo α , y tiene unidades de m^2/s .

Ambas propiedades se relacionan a través de la ecuación 1, donde c hace referencia al calor específico y ρ hace referencia a la densidad. El calor específico podemos definirlo como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad, y tiene unidades de $\text{J/g}\cdot\text{K}$ ^[3]. La densidad podemos definirla como la cantidad de masa que hay en un volumen de una sustancia, y tiene unidades de kg/m^3 ^[4].

$$k = \alpha \cdot c \cdot \rho \quad (1)$$

3 Objetivo

Con la redacción de este artículo docente se persigue que los alumnos adquieran destreza en la predicción de propiedades térmicas como son la conductividad y difusividad térmica, en base a la composición y estructura del alimento.

4 Desarrollo

En el punto 4.1 vamos a describir como predecir la conductividad y difusividad térmica de un alimento en base a su composición.

En el punto 4.2 veremos la influencia que tiene la estructura en la predicción de la conductividad y difusividad de un alimento.

En el punto 4.3 veremos un ejemplo real de predicción de conductividad y difusividad en base a la composición y estructura de un alimento.

4.1 Predicción de la conductividad y difusividad térmica de un alimento

Si el alimento presenta una estructura homogénea, es decir no tiene elementos estructurales con diferente orientación en el sentido del flujo, y se conoce su composición, ambas propiedades pueden determinarse usando las ecuaciones 2 y 3. En ambas ecuaciones es necesario conocer por un lado la fracción másica de cada componente (x_i), así como el valor de conductividad (k_i) y difusividad (α_i) que presenta cada componente a la temperatura a la que se encuentra el alimento (tabla 1 y 2, respectivamente)^[5].

$$k = \sum x_i \cdot k_i \quad (2)$$

$$\alpha = \sum x_i \cdot \alpha_i \quad (3)$$

Tabla 1. Conductividad térmica de componentes alimentarios puros a diferentes temperaturas ^[5].

T (°C)	Conductividad térmica (W/m·K)				
	Agua	Proteínas	Grasa	Carbohidratos	Ceniza
20	0.6012	0.1993	0.1765	0.2039	0.1356
30	0.6191	0.2109	0.1759	0.2178	0.1402
40	0.6332	0.2182	0.1737	0.2285	0.1430
50	0.6464	0.2291	0.1724	0.2386	0.1480
60	0.6542	0.2349	0.1708	0.2463	0.1543
70	0.6643	0.2475	0.1686	0.2594	0.1577
80	0.6712	0.2528	0.1669	0.2632	0.1619
90	0.6768	0.2553	0.1656	0.2665	0.1642
100	0.6827	0.2622	0.1645	0.2723	0.1645

Tabla 2. Difusividad térmica de componentes alimentarios puros a diferentes temperaturas ^[5].

T (°C)	Difusividad térmica ($\times 10^6$ m ² /s)				
	Agua	Proteínas	Grasa	Carbohidratos	Cenizas
20	0.1439	0.0903	0.0999	0.0925	0.0852
30	0.1485	0.0939	0.0986	0.0972	0.0864
40	0.1527	0.0977	0.0967	0.1004	0.0878
50	0.1569	0.0998	0.0953	0.1050	0.0889
60	0.1592	0.1009	0.0938	0.1064	0.0903
70	0.1621	0.1057	0.0924	0.1101	0.0916
80	0.1648	0.1073	0.0903	0.1106	0.0928
90	0.1669	0.1077	0.0890	0.1115	0.0937
100	0.1685	0.1098	0.0878	0.1121	0.0942

4.2 Influencia de la estructura en la predicción de la conductividad y difusividad térmica

Cuando trabajamos con alimentos o productos homogéneos, es decir, sin elementos estructurales con diferente orientación al sentido del flujo de calor, podemos predecir la conductividad térmica haciendo uso de la ecuación 2. Sin embargo, en muchos casos los alimentos presentan elementos estructurales y por tanto, se debe tener en cuenta la dirección del flujo de calor en relación a dichos elementos. Se han propuesto 3 modelos: modelo paralelo, modelo perpendicular y modelo mixto. El modelo paralelo es aquel en el que el flujo de calor se aplica de forma longitudinal, o lo que es lo mismo, en el mismo sentido que las unidades estructurales del producto (ecuación 4). El modelo perpendicular es aquel en el que el flujo de calor se aplica de forma perpendicular, o lo que es lo mismo, transversalmente a los elementos estructurales del producto (ecuación 5). En ambos modelos, ecuación 4 y 5, v_i y k_i son la fracción volumétrica y conductividad de cada elemento estructural, respectivamente, dependientes de la composición y temperatura del producto.

$$k = \sum v_i \cdot k_i \quad (4)$$

$$\frac{1}{k} = \sum \frac{v_i}{k_i} \quad (5)$$

El modelo mixto es aquel en el que el flujo de calor se aplica tanto en paralelo como en perpendicular (ecuación 6). Aproximaciones empíricas permiten considerar una contribución simultánea de las dos disposiciones con una cierta proporción de elementos en perpendicular y otra de elementos en paralelo. En estos casos se calcula una conductividad térmica efectiva para cada disposición y una conductividad efectiva global. La Figura 1 presenta un modelo en este sentido, desarrollado para productos porosos, que contempla una fracción volumétrica del producto $(1-a)$ con los poros orientados en sentido paralelo al flujo de calor y con una conductividad efectiva $k_{ef Pa}$, calculada a partir de la k del aire (k_{aire}) y la del producto sin aire (k_{real}), y una fracción (a) de producto con los poros orientados perpendicularmente y con una conductividad efectiva $k_{ef Pe}$.

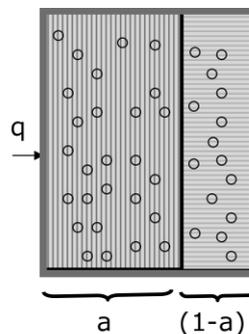


Figura 1. Modelo desarrollado para productos porosos, con una fracción volumétrica (a) del producto con poros orientados perpendicularmente y una fracción (1-a) de poros paralelos al flujo de calor.

$$\frac{1}{k_{ef}} = \frac{(1-a)}{\sum_i v_i k_i} + \frac{a}{\frac{1}{\sum_i \frac{v_i}{k_i}}} \quad (6)$$

Una vez se ha calculado la conductividad efectiva global, haciendo uso de la ecuación 1 puede determinarse la difusividad del producto. Para ello será necesario conocer el calor específico y la densidad del mismo.

4.3 Ejemplo práctico

Se tiene un alimento a 30°C, compuesto por un 20% de grasa, 6% de proteína, 20% de carbohidratos y 54% de agua.

a) Calcular la conductividad y difusividad térmica del alimento suponiendo que presenta una estructura homogénea.

Para calcular la conductividad y difusividad térmica del alimento en estas condiciones debemos aplicar las ecuaciones 2 y 3 respectivamente. Para ello primero debemos calcular las fracciones másicas de los componentes del alimento e identificar los valores de conductividad y difusividad térmica usando los valores que aparecen en las tablas 1 y 2, respectivamente, y a 20 °C.

$$k = \sum x_i \cdot k_i = 0.2 \cdot 0.1759 + 0.06 \cdot 0.2109 + 0.2 \cdot 0.2178 + 0.54 \cdot 0.6191 = 0.426 \text{ w/m} \cdot \text{K}$$

$$\alpha = \sum x_i \cdot \alpha_i = 0.2 \cdot 0.0986 + 0.06 \cdot 0.0939 + 0.2 \cdot 0.0972 + 0.54 \cdot 0.1485 = 0.125 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

b) Calcular la conductividad del alimento, suponiendo que tiene un 17% de porosidad y se aplica un flujo de calor paralelo a la estructura del producto. Se sabe que la conductividad del aire es 0.024 w/m K

Para calcular la conductividad del alimento en estas condiciones debemos aplicar la ecuación 4. Para ello primero debemos calcular las fracciones volumétricas de los distintos elementos estructurales e identificar los valores de conductividad para dichos elementos.

El alimento presentará dos elementos estructurales, aire y sustrato sólido. El 17% será el aire y el 98.3% será el sustrato sólido. Sabemos que la conductividad del aire es 0.024 w/m·K y la conductividad del sustrato sólido es 0.426 w/m·K (calculado en el apartado a)

$$k = \sum x_i \cdot v_i = 0.17 \cdot 0.024 + 0.983 \cdot 0.426 = 0.358 \text{ w/m} \cdot \text{K}$$

c) Calcular la conductividad del alimento, suponiendo que tiene un 16.9% de porosidad y se aplica un flujo de calor perpendicular a la estructura del producto. Se sabe que la conductividad del aire es 0.024 w/m K

Para calcular la conductividad del alimento en estas condiciones debemos aplicar la ecuación 5. Para ello primero debemos calcular las fracciones volumétricas de los distintos elementos estructurales e identificar los valores de conductividad para dichos elementos.

El alimento presentará dos elementos estructurales, aire y sustrato sólido. El 17% será el aire y el 98.3% será el sustrato sólido. Sabemos que la conductividad del aire es 0.024 w/m·K y la conductividad del sustrato sólido es 0.426 w/m·K (calculado en el apartado a)

$$\frac{1}{k} = \sum \frac{v_i}{k_i} = \frac{0.17}{0.024} + \frac{0.983}{0.426} = 0.112 \text{ w/m} \cdot \text{K}$$

d) Calcular la conductividad y difusividad térmica del pastel, si se considera que se comporta como si el 50% (v/v) de los poros es perpendicular al flujo de calor y el resto paralelo. Se sabe que el alimento presenta una densidad aparente de 875 kg/m³, un calor específico de 3067 J/kg·K y que la conductividad del aire es 0.024 w/m·K.

Para calcular la conductividad del alimento en estas condiciones debemos aplicar la ecuación 6. Sabemos que las fracciones volumétricas de los poros orientadas en paralelo y perpendicular son ambas 0.5. En el apartado b) hemos calculado la contribución en paralelo y en el apartado c) la contribución en perpendicular.

$$\frac{1}{k_{ef}} = \frac{0.5}{0.358} + \frac{0.5}{0.112} \quad k_{ef} = 0.171 \text{ w/m} \cdot \text{K}$$

Para calcular la difusividad del alimento en estas condiciones deberemos aplicar la ecuación 1.

$$k = \alpha \cdot c \cdot \rho \quad \alpha = \frac{k}{c \cdot \rho} \quad \alpha = \frac{0.171}{3067 \cdot 875} = 0.064 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

5 Cierre

En este objeto de aprendizaje se han expuesto los fundamentos para poder predecir la conductividad y la difusividad térmica de un alimento en base a su composición, analizando los valores de estas propiedades en función de la estructura que presentan los alimentos. Se han descrito las principales ecuaciones que permiten su cálculo y se han presentado distintos ejemplos de predicción.

6 Bibliografía

- [1] https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_térmica
- [2] https://es.wikipedia.org/wiki/Difusividad_térmica
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Calor_específico
- [4] <https://es.wikipedia.org/wiki/Densidad>
- [5] Choi, Y.; Okos, M.R. (1983). Thermal properties of liquid foods - review. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE), 83, 6516: 53-76.