

Ejemplo aplicado: Condensación y calentamiento transitorio en un pouch agroindustrial

Contexto del problema

En una planta de alimentos, un **pouch vertical** (bolsa plana tipo retorta) con **puré de tomate** se esteriliza en un autoclave con **vapor saturado a 121 °C**.

La bolsa puede modelarse como una **placa plana** de espesor total $2L = 30$ mm (mitad $L = 15$ mm), grande en extensión (efectos de borde despreciables).

El vapor condensa por película sobre la superficie externa del pouch, generando un coeficiente de convección h que se estima con la correlación de **Nusselt** para condensación laminar en superficie vertical.

Datos de diseño

- **Condiciones térmicas:**

$$T_{\text{sat}} = 121\text{ °C}, \quad T_i = 25\text{ °C}$$

Se desea determinar el tiempo para que la **temperatura en el centro** alcance $T_c = 100\text{ °C}$.

- **Geometría:** Altura característica para condensación $L_{\text{cond}} = 0.25$ m; espesor del alimento $2L = 0.03$ m.
- **Propiedades del condensado (agua) a temperatura de película $\approx (T_{\text{sat}} + T_s)/2$ con $T_s \approx 100\text{ °C}$:**

$$\rho_\ell = 958\text{ kg/m}^3, \quad \rho_v \approx 1\text{ kg/m}^3, \quad k_\ell = 0.68\text{ W/(m} \cdot \text{K)}, \quad \mu_\ell = 2.8 \times 10^{-4}\text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$h_{fg} = 2.2 \times 10^6\text{ J/kg}, \quad g = 9.81\text{ m/s}^2, \quad \Delta T = T_{\text{sat}} - T_s = 21\text{ K}$$

- **Propiedades térmicas del alimento (puré tipo agua espesa):**

$$k_s = 0.60\text{ W/(m} \cdot \text{K)}, \quad \rho_s = 1050\text{ kg/m}^3, \quad c_p = 4000\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$\alpha = \frac{k_s}{\rho_s c_p} = 1.43 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$$

Parte 1. Cálculo del coeficiente de convección h

Para condensación laminar sobre superficie vertical, Nusselt propone:

$$h = 0.943 \left[\frac{\rho_\ell(\rho_\ell - \rho_v)g h_{fg} k_\ell^3}{\mu_\ell L_{\text{cond}}(T_{\text{sat}} - T_s)} \right]^{1/4}$$

Sustituyendo los datos:

$$h = 0.943 \left[\frac{958(958 - 1) 9.81 (2.2 \times 10^6)(0.68)^3}{(2.8 \times 10^{-4})(0.25)(21)} \right]^{1/4}$$

$$\boxed{h = 7.6 \times 10^3\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}}$$

Parte 2. Número de Biot del alimento

$$\text{Bi} = \frac{hL}{k_s} = \frac{(7.6 \times 10^3)(0.015)}{0.60} = \boxed{1.9 \times 10^2}$$

Como $\text{Bi} \gg 1$, la superficie del alimento puede considerarse prácticamente a T_{sat} .

Parte 3. Calentamiento transitorio con la aproximación de Heisler (1 término)

La ecuación de Heisler (un solo término) para el centro de una placa con superficie a temperatura constante es:

$$\frac{T_{\text{sat}} - T(0, t)}{T_{\text{sat}} - T_i} = \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2 \alpha t}{4L^2}\right)$$

El cociente de exceso de temperatura:

$$R = \frac{T_{\text{sat}} - T_c}{T_{\text{sat}} - T_i} = \frac{121 - 100}{121 - 25} = \frac{21}{96} = 0.21875$$

Despejando el tiempo:

$$t = -\frac{4L^2}{\pi^2 \alpha} \ln\left(\frac{R\pi}{4}\right)$$

Sustituyendo $L = 0.015$ m y $\alpha = 1.43 \times 10^{-7}$ m²/s:

$$t = -\frac{4(0.015)^2}{\pi^2(1.43 \times 10^{-7})} \ln\left(\frac{0.21875\pi}{4}\right)$$

$$\boxed{t = 1.12 \times 10^3 \text{ s} \approx 18.7 \text{ min}}$$

Verificación del número de Fourier:

$$\text{Fo} = \frac{\alpha t}{L^2} = 0.714 \geq 0.2 \Rightarrow \text{válido para un término.}$$

Conclusiones y observaciones

- El coeficiente de condensación es elevado ($h \approx 7.6$ kW/m²K), lo que justifica la hipótesis de superficie casi isoterma.
- La transferencia de calor interna del alimento es controlada por la conducción transitoria.
- El tiempo estimado de esterilización térmica (para alcanzar el centro a 100 °C) es de aproximadamente **19 minutos**.

Extensiones sugeridas

1. Evaluar la sensibilidad al espesor del pouch ($2L = 20$ o 40 mm).
2. Incluir la resistencia térmica del material del envase.
3. Repetir el análisis suponiendo calentamiento por ebullición (usando la correlación de Rohsenow).