

TÍNH TOÁN THỜI GIAN ĐÔNG LẠNH THỰC PHẨM

FOOD FREEZING TIME CALCULATION

NGUYỄN BÓN

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

TÓM TẮT

Trong công nghệ thực phẩm, mỗi khi thiết kế một sản phẩm mới thì yêu cầu đặt ra là phải xác định thời gian cấp đông cho sản phẩm. Bài viết sau đây sẽ đưa ra công thức tính thời gian cấp đông vật ẩm, có thể áp dụng cho các máy cấp đông kiểu đối lưu hoặc kiểu tiếp xúc trong sản xuất

ABSTRACT

In food processing technology, when a new product is engineering, humid product freezing time must be defined. The studying herein after is given the way to calculate humid product freezing time, maybe applying to airblast freezer or contact freezer.

1. Quá trình đông lạnh thực phẩm

Công nghệ chế biến thực phẩm đông lạnh thường gồm các khâu:

Thực phẩm → Chế biến → Đóng gói → Cấp đông → Bảo quản

Khâu cấp đông yêu cầu làm đông hết ẩm và hạ nhiệt độ tâm sản phẩm xuống tới trị số nhiệt độ t_k nào đó trước khi đưa vào kho lạnh.

Quá trình cấp đông gồm có 3 giai đoạn như hình 1 gồm: τ_1 là thời gian hạ nhiệt độ vật ẩm, từ nhiệt độ ban đầu t_1 đến nhiệt độ đóng băng $t_0 = 0^\circ\text{C}$, τ_2 là thời gian đông kết ẩm trong vật ở nhiệt độ $t_0 = \text{const}$, τ_3 là thời gian quá lạnh khối băng từ nhiệt độ t_0 đến nhiệt độ t_k yêu cầu.

Môi trường lạnh cần phải có nhiệt độ

$$t_f < t_k < t_0 < t_1.$$

Nếu cấp đông kiểu đối lưu thì vật ẩm có biên

loại 3 với hệ số toả nhiệt α hữu hạn. Nếu cấp đông kiểu tiếp xúc thì vật ẩm có biên loại 1

với $t_w = t_f$ và coi $\alpha \rightarrow \infty$.

Thời gian đông lạnh vật ẩm là:

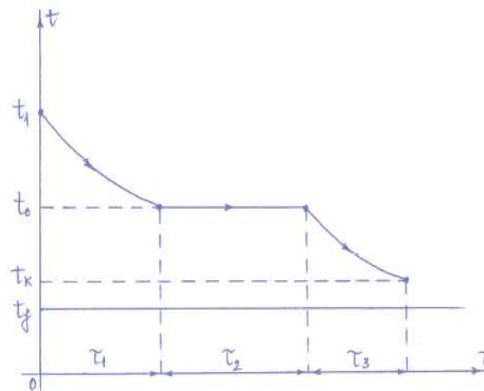
$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$$

2. Bài toán đông lạnh thực phẩm

Xét vật V dạng hình hộp có kích thước $2\delta \times R \times D$ với $2\delta < R < D$, có độ ẩm φ , khối lượng riêng ρ , nhiệt dung riêng C, hệ số dẫn nhiệt λ , nhiệt độ ban đầu t_1 , nhiệt độ đóng băng t_0 , nhiệt độ hoá rắn r, cần được đông kết và quá lạnh để nhiệt độ tại tâm của vật đạt t_k bằng cách cho bề mặt F xung quanh vật tiếp xúc với môi trường có nhiệt độ $t_f < t_k < t_0 < t_1$ với hệ số toả nhiệt α .

Tính toán thời gian cấp đông τ theo các thông số đã cho.

3. Tính thời gian làm lạnh vật ẩm τ_1



H 1: $t(\tau)$ của vật ẩm khi đông lạnh

3.1. Giả thiết

1) Tại mỗi thời điểm τ , coi nhiệt độ t trong vật ẩm là phân bố đều, bằng nhiệt độ trung bình trong thể tích V . Giả thiết này càng đúng khi độ ẩm ϕ tăng, và λ cũng tăng theo ϕ .

2) Các thông số đã cho không thay đổi trong thời gian khảo sát.

3.2. Thiết lập công thức tính τ_1

Phương trình cân bằng nhiệt cho vật V trong $d\tau$ là: $dU_v = \delta Q_\alpha$ hay là:

$$-\rho VCdt = \alpha F(t - t_f)d\tau$$

Suy ra:
$$\int_{t_1}^t \frac{dt}{t - t_f} = \frac{-\alpha F}{\rho VC} \int_0^\tau d\tau$$

$$\rightarrow t(\tau) = t_f + (t_1 - t_f) \exp\left(\frac{-\alpha F}{\rho VC} \tau\right)$$

Thời gian τ_1 để nhiệt độ t giảm từ $t_1 \rightarrow t_0$ là:

$$\tau_1 = \frac{\rho VC}{\alpha F} \ln \frac{t_1 - t_f}{t_0 - t_f}, \text{ [s]} \quad \text{với } V = 2\delta RD, \quad F = 2(2\delta R + 2\delta D + RD)$$

Khi cấp đông tiếp xúc, với sản phẩm V có biên loại 1, phương trình cân bằng nhiệt cho V là: $dU_v = \delta Q_\lambda$ hay là:

$$-\rho VCdt = \frac{t - t_f}{\frac{\delta}{\lambda}} F d\tau$$

$$\rightarrow t(\tau) = t_f + (t_1 - t_f) \exp\left(\frac{-\lambda F}{\delta \rho VC} \tau\right)$$

Suy ra:
$$\tau_1 = \frac{\delta \rho CV}{\lambda F} \ln \frac{t_1 - t_f}{t_0 - t_f}, \text{ [s]}$$

với $t_f = t_w$ là nhiệt độ bề mặt tiếp xúc của vật ẩm.

4. Tính thời gian đông kết ẩm τ_2

Gọi x là độ dày lớp băng đạt được lúc τ , dx là độ dày lớp băng mới tạo ra sau thời gian $d\tau$.

Phương trình cân bằng nhiệt cho lớp

băng mới tạo ra $dV = (1m^2 \cdot dx)$ là:

(nhiệt do lớp băng mới tỏa ra) = (nhiệt

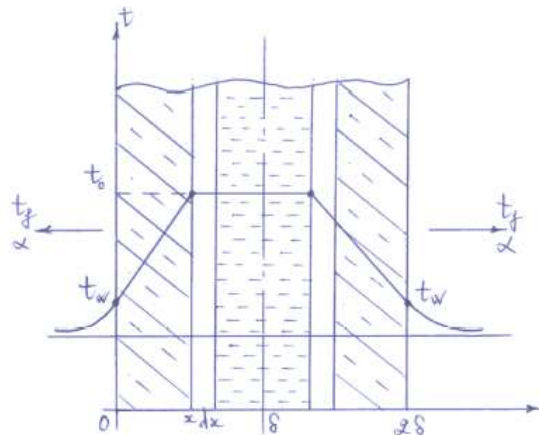
dẫn qua vách băng cũ có độ dày x)

$$\delta Q_\lambda = \delta Q_\alpha(x)$$

tức là:

$$\rho dx \cdot \phi_r = \frac{t_0 - t_f}{\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}\right)} \cdot d\tau$$

$$\rightarrow \int_0^x \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot dx = \int_0^\tau \frac{t_0 - t_f}{\rho \cdot \phi_r} \cdot d\tau$$



H2: Phân bố $t(x)$ trong V lúc τ

$$\rightarrow \tau(x) = \frac{\rho\varphi r}{(t_0 - t_f)} \left(\frac{x^2}{2\lambda} + \frac{x}{\alpha} \right) = \frac{\rho\varphi r}{2\lambda(t_0 - t_f)} \left(x^2 + 2\frac{\lambda}{\alpha}x \right)$$

Thời gian đông kết toàn bộ ẩm trong V, khi $x = \delta$ là:

$$\tau_2 = \frac{\rho\varphi r \delta^2}{2\lambda(t_0 - t_f)} \left(1 + 2\frac{\lambda}{\alpha\delta} \right), [s]$$

Tốc độ đóng băng là: $v = \frac{dx}{d\tau} = \frac{\lambda(t_0 - t_f)}{\rho\varphi r(\alpha x + \lambda)}, [m/s]$

Khi cấp đông tiếp xúc, thay $t_f = t_w$ và $\alpha \rightarrow \infty$, có:

$$\tau_2 = \frac{\rho\varphi r \delta^2}{2\lambda(t_0 - t_f)}, [s] \quad \text{và} \quad v = \frac{\lambda(t_0 - t_f)}{\rho\varphi r x}, [m/s]$$

5. Tính thời gian quá lạnh bằng τ_3 :

Thời gian τ_3 để tâm vật ẩm V đạt nhiệt độ t_k được tính theo công thức nghiệm của bài toán dẫn nhiệt không ổn định trong vách phẳng dày 2δ , có dạng:

$$\theta(x=0, \tau_3) = \frac{t_k - t_f}{t_0 - t_f} = C_1 \cdot \exp\left(-k_1^2 \frac{a \cdot \tau_3}{\delta^2}\right)$$

với: k_1 là nghiệm đầu của phương trình $\cotg k = \frac{k}{B} = \frac{\lambda}{\alpha\delta} k$

và $C_1 = \frac{4 \cdot \sin k_1}{2k_1 + \sin 2k_1}$

Từ đó suy ra: $\tau_3 = \frac{\delta^2}{a \cdot k_1^2} \ln \frac{C_1(t_0 - t_f)}{(t_k - t_f)}, [s]$

Khi cấp đông tiếp xúc, có $\alpha \rightarrow \infty$, lúc này phương trình $\cotg k = \frac{\lambda}{\alpha\delta} k = 0$ có nghiệm:

$$k_1 = \frac{\pi}{2} \rightarrow C_1 = \frac{4}{\pi}$$

$$\tau_3 = \frac{4\delta^2}{\pi^2 \cdot a} \ln \frac{4(t_0 - t_f)}{\pi(t_k - t_f)}, [s]$$

6. Kiểm tra các công thức tính toán bằng ví dụ thực tế

6.1. Bài toán:

Cần cấp đông cho một gói thực phẩm hình hộp kích thước $2\delta \times R \times D = 0,1 \times 0,2 \times 0,3 \text{ m}^3$ có các thông số $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$, $\varphi = 90\%$, $r = 334 \text{ kJ/kg}$, $C = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$, $\lambda = 2,21 \text{ W/m}$, $a = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, từ nhiệt độ $t_1 = 27^\circ\text{C}$ đến $t_0 = 0^\circ\text{C}$ và $t_k = -20^\circ\text{C}$ bằng đối lưu gió với $t_f = -30^\circ\text{C}$ và $\alpha = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ và bằng tiếp xúc bề mặt có $t_w = t_f = -30^\circ\text{C}$.

Tính các thời gian cần cấp đông cho sản phẩm.

6.2. Các thông số trung gian, gồm có:

$$V = 2\delta \times R \times D = 0,006 \text{ m}^3, \quad F = 2.(2.\delta.R+2.\delta.D+R.D) = 0,11 \text{ m}^2$$

Phương trình đặc trưng của biên toả nhiệt là: $\text{tg } k = \frac{B}{k} = \frac{\alpha.\delta}{\lambda.k} = \frac{0,4525}{k}$ có nghiệm $k_1 =$

$$0,626 \text{ do đó hệ số } C_1 = \frac{4.\sin k_1}{2k_1 + \sin 2k_1} = 1,064$$

6.3. Các khoảng thời gian đông lạnh được tính theo bảng sau đây:

| Thời gian | Cấp đông kiểu đối lưu | | Cấp đông kiểu tiếp xúc | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| | Công thức tính | Trị số (h) | Công thức tính | Trị số (h) |
| τ_1 | $\tau_1 = \frac{\rho VC}{\alpha F} \ln \frac{t_1 - t_f}{t_0 - t_f}$ | 2,44 | $\tau_1 = \frac{\delta \rho CV}{\lambda F} \ln \frac{t_1 - t_f}{t_0 - t_f}$ | 1,1 |
| τ_2 | $\tau_2 = \frac{\rho \phi r \delta^2}{2\lambda(t_0 - t_f)} \left(1 + 2 \frac{\lambda}{\alpha \delta}\right)$ | 10,24 | $\tau_2 = \frac{\rho \phi r \delta^2}{2\lambda(t_0 - t_f)}$ | 1,89 |
| τ_3 | $\tau_3 = \frac{\delta^2}{ak_1^2} \ln \frac{C_1(t_0 - t_f)}{(t_k - t_f)}$ | 4,57 | $\tau_3 = \frac{4\delta^2}{\pi^2 a} \ln \frac{4(t_0 - t_f)}{\pi(t_k - t_f)}$ | 0,84 |
| τ | $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ | 17,25 | $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ | 3,83 |

Các khoảng thời gian tính toán thu được khá phù hợp với thực tế sản xuất tại các xí nghiệp đông lạnh tại Đà Nẵng.

7. Các nhận xét và kết luận

7.1. Các công thức nêu trên cho kết quả khá phù hợp so với thực tế sản xuất, do đó có thể áp dụng để tính toán thời gian đông lạnh cho các khối thực phẩm dạng hộp bằng máy cấp đông đối lưu hoặc tiếp xúc với các thông số tùy ý chọn.

7.2. Khi dùng các công thức trên để tính toán thời gian sản xuất nước đá cây, chỉ cần thay $\phi = 1$, $\tau_3 = 0$.

7.3. Với các vật ẩm hình trụ hoặc hình cầu có bán kính R. Bằng phương pháp cân bằng nhiệt như trên, có thể thu được công thức tính thời gian đông kết là:

$$\tau_2 = \frac{\rho \phi r R^2}{4\lambda(t_0 - t_f)} \left(1 + 2 \frac{\lambda}{\alpha.R}\right), [\text{s}] \quad \text{với V là hình trụ.}$$

$$\tau_2 = \frac{\rho \phi r R^2}{6\lambda(t_0 - t_f)} \left(1 + 2 \frac{\lambda}{\alpha.R}\right), [\text{s}] \quad \text{với V là hình cầu.}$$

Thời gian τ_3 tính theo công thức mô tả nhiệt độ tâm của hình trụ hay cầu trong quan hệ với thời gian làm nguội sản phẩm.

7.4. Với các vật ẩm có dạng bất qui tắc, có thể quay về bài toán phẳng, trụ hoặc cầu để lấy gần đúng và áp dụng các công thức trên.