

TÍNH TOÁN THỜI GIAN CẤP ĐỒNG THỰC PHẨM DẠNG TRỤ VÔ HẠN VÀ CẦU

CALCULATION FREEZING TIME FOR INFINITE CYLINDER AND SPHERES SHAPED FOOD

Nguyễn Bôn¹, Võ Chí Chính¹, Hoàng Minh Tuấn²

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; vcchinh@dut.udn.vn

²Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế; hmtuan@hueic.edu.vn

Tóm tắt - Hiện nay, điện năng tiêu tốn cho các thiết bị lạnh đông chiếm trên 38% điện năng tiêu thụ trong các nhà máy chế biến thủy sản. Do đó, việc dự báo chính xác thời gian cấp đông thực phẩm có ý nghĩa quan trọng trong việc tiết kiệm năng lượng, giảm chi phí sản xuất, nâng cao chất lượng và tăng tính cạnh tranh của thực phẩm đông lạnh. Một phương pháp đơn giản để tính dự đoán thời gian cấp đông của thực phẩm dạng trụ vô hạn và cầu được đề xuất trong bài báo này. Phương pháp này dựa vào phương trình cân bằng nhiệt tức thời của vật cho các giai đoạn chuyển pha với quá trình truyền nhiệt không ổn định trong giai đoạn làm lạnh, chuyển pha và quá lạnh. Phương pháp này cho kết quả khá chính xác so với các phương pháp giải tích đã có từ trước đến nay. Tất cả các tính toán này dễ dàng được lập trình trên máy tính và dự đoán chính xác thời gian đông lạnh thực phẩm.

Từ khóa - trụ vô hạn; cầu; thời gian đông băng; thực phẩm; truyền nhiệt không ổn định.

Abstract - Nowadays, electrical power using for freezing equipment accounts for over 38% of total power of seafood processing factories. Therefore, the exact prediction of food freezing time plays an important role in saving energy, reducing production cost, improving quality and increasing competition of food freezing. A simple method used to calculate freezing time of infinite cylinders and spheres shape food was proposed in this article. This model is based on the energy balance equation of food products for transition phase with unsteady state heat transfer solutions in pre-cooling, phase change and tempering time. This method gave more accurate results than the previous methods, including the finite difference method and finite element. All calculations are easily programmable on computer and predict freezing time of food accurately.

Key words - infinite cylinders; spheres; freezing time; food product; transient heat transfer.

1. Đặt vấn đề

Nhiều phương pháp giải tích đã được đề xuất để dự đoán thời gian đông băng cho thực phẩm có hình dạng đơn giản. Hầu hết các phương pháp này được phát triển từ phương trình của Plank (1941). Những hạn chế trong phương trình Plank là nhiệt độ ban đầu của vật chính bằng nhiệt độ điểm đông, tính chất nhiệt vật lý không thay đổi, dẫn nhiệt trong lớp băng là ổn định, không có hai giai đoạn làm lạnh và quá lạnh.

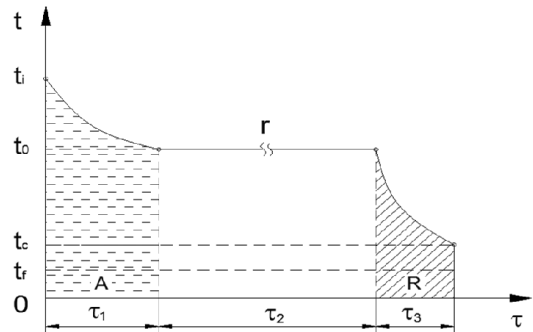
Các phương pháp khác của Nagaoka và cộng sự (1955); Plank (1963); Cleland và Earle (1977, 1982); Hung và Thompson (1983) đã được đề xuất để điều chỉnh phương trình Plank (1941). Bên cạnh đó, một số phương pháp của Mascheroni và Calvel (1982); De Michelis và Calveo (1982, 1983); Castaigne (1985a, b); Castaigne và Lacroix (1985) có kết hợp với phương trình cân bằng nhiệt trong quá trình làm lạnh và quá lạnh. Những phương pháp trên thường được dùng để dự đoán cho vật ẩm có hình dạng tấm phẳng. Dự đoán thời gian cấp đông cho vật có dạng hình trụ vô hạn hoặc hình cầu là tỷ số thời gian cấp đông của vật có dạng tấm phẳng trên hệ số quy đổi thời gian đông lạnh của vật hay còn gọi là kích thước truyền nhiệt tương đương. Hệ số này được phát triển bởi Cleland và cộng sự (1987a, b); McNabb (1990b); Hossain (1992b). Việc sử dụng hệ số quy đổi thời gian đông lạnh rất dễ dàng và nhanh chóng để dự đoán thời gian cấp đông cho các vật có hình dạng khác. Tuy nhiên, nó có thể mắc phải sai số trong quá trình quy đổi.

Trong khuôn khổ bài báo này, tác giả đề xuất phương pháp dự đoán thời gian đông băng cho thực phẩm có hình dạng trụ vô hạn và cầu mà không dùng hệ số quy đổi.

2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Mô tả quá trình đông lạnh thực phẩm

Quá trình đông lạnh thực phẩm được mô tả bởi đường đặc tính $t(\tau)$ theo thời gian τ như Hình 1, gồm ba giai đoạn phân biệt:



Hình 1. Đặc tính $t(\tau)$ của quá trình cấp đông thực phẩm

1. Hạ nhiệt độ của thực phẩm từ nhiệt độ ban đầu t_1 đến nhiệt độ bắt đầu đông băng t_0 ;

2. Chuyển pha từ lỏng sang rắn của phần ẩm trong thực phẩm, ở nhiệt độ $t_0 = \text{const}$, tỏa nhiệt t_c ;

3. Quá lạnh thực phẩm ở pha rắn. Lúc này, thực phẩm được tiếp tục làm lạnh từ nhiệt độ t_0 đến khi nhiệt độ tâm vật đạt t_c theo yêu cầu.

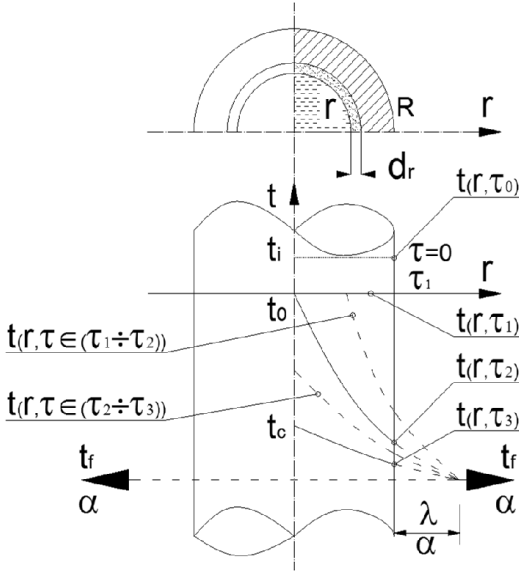
Thời gian cấp đông τ là tổng thời gian của ba giai đoạn trên $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$, [s]. Trong công nghiệp thực phẩm, việc giảm τ , nhất là τ_2 , sẽ làm giảm tiêu hao năng lượng khi cấp đông và thường làm tăng chất lượng của thực phẩm đông lạnh.

2.2. Phát biểu bài toán đông lạnh thực phẩm và các giả thuyết nghiên cứu

2.2.1. Phát biểu bài toán

Xét thực phẩm dạng trụ vô hạn hoặc cầu có kích thước như Hình 2. Khối lượng riêng và nhiệt dung riêng pha ẩm và pha rắn là ρ_l, c_l và ρ_s, c_s . Thực phẩm có độ ẩm φ , hệ số dẫn nhiệt λ_l và λ_s , nhiệt độ ban đầu t_i , nhiệt độ bắt đầu đóng băng t_0 nhiệt hóa rắn pha ẩm r_c và được quá lạnh để nhiệt độ tâm của vật đạt t_c bằng cách cho vật tiếp xúc với môi trường có nhiệt độ $t_f < t_c < t_0 < t_i$ với hệ số tỏa nhiệt α .

Cần tính thời gian cấp đông τ theo các thông số của bài toán.



Hình 2. Trường $t(r, \tau)$ trong vật ẩm dạng trụ vô hạn

2.2.2. Giả thiết nghiên cứu

1. Tại mỗi thời điểm τ coi nhiệt độ $t(\tau)$ và các thông số vật lý ρ, c, λ của vật ẩm là phân bố đều trong vật.

2. Quá trình đóng băng là quá trình chuyển pha, từ lỏng sang rắn của các thành phần ẩm φ trong thực phẩm, ở nhiệt độ bắt đầu đóng băng $t_0 = \text{const}$ và nhiệt hóa rắn pha ẩm $r_c = \text{const}$, lấy trung bình cho các thành phần ẩm của thực phẩm.

2.3. Tính toán thời gian cấp đông vật ẩm dạng trụ vô hạn

2.3.1. Tính thời gian làm lạnh vật ẩm τ_1

Thời gian làm lạnh vật ẩm τ_1 từ nhiệt độ ban đầu t_i đến nhiệt độ hóa rắn t_0 được tính theo phương trình cân bằng nhiệt tức thời lúc τ cho $V = \pi \cdot R^2 \cdot l$ sau thời gian vô cùng bé $d\tau \in (\tau \div \tau + d\tau)$ khi $t \downarrow \in (t \div \tau - dt)$ là:

$$V \cdot \rho_l \cdot c_l \cdot (-dt) = \alpha \cdot (t - t_f) \cdot F \cdot d\tau \quad (1)$$

$$\rightarrow \int_{t_i}^{t_0} \frac{dt}{(t - t_f)} = - \int_0^{\tau_1} \frac{\alpha \cdot F}{V \cdot \rho_l \cdot c_l} \cdot d\tau$$

$$\rightarrow t(\tau) = t_f - (t_i - t_f) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot F}{V \cdot \rho_l \cdot c_l} \cdot \tau} \quad (2)$$

$$\Rightarrow \tau_1 = \frac{V \cdot \rho_l \cdot c_l}{\alpha \cdot F} \cdot \ln \frac{t_i - t_f}{t_0 - t_f}, [s] \quad (3)$$

2.3.2. Tính thời gian chuyển pha τ_2

Gọi r là bán kính lớp băng đã tạo ra trước thời điểm τ , dr là lớp băng mới tạo ra sau thời gian $d\tau$. Phương trình cân bằng nhiệt tức thời lúc τ cho khối băng hình trụ mới tạo ra $dV = F \cdot dr = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot dr$ sau thời gian vô cùng bé $d\tau$ là:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot dr \cdot \rho_l \cdot \varphi \cdot r_c = - \frac{(t_0 - t_f)}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_l} \cdot \ln \frac{R}{r} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \alpha}} \cdot l \cdot d\tau \quad (4)$$

$$\rightarrow d\tau = - \frac{\rho_l \cdot \varphi \cdot r_c}{\lambda_l \cdot (t_0 - t_f)} \cdot \left[\ln R - \ln r + \frac{\lambda_l}{R \cdot \alpha} \right] \cdot r \cdot dr$$

$$\rightarrow \int_0^{\tau} d\tau = - \frac{\rho_l \cdot \varphi \cdot r_c}{\lambda_l \cdot (t_0 - t_f)} \cdot \int_R^r \left[\ln R - \ln r + \frac{\lambda_l}{R \cdot \alpha} \right] \cdot r \cdot dr$$

$$\rightarrow \tau(r) = -A \left[\left(\ln R + \frac{\lambda_l}{R \alpha} \right) \cdot \frac{r^2}{2} - \left(\ln R + \frac{\lambda_l}{R \alpha} \right) \cdot \frac{R^2}{2} - \int_R^r r \cdot \ln r \cdot dr \right] \quad (5)$$

$$\text{Với } A \triangleq \frac{\rho_l \cdot \varphi \cdot r_c}{\lambda_l \cdot (t_0 - t_f)}, [s \cdot m^{-2}]$$

$$\text{Đặt } I = \int_R^r r \cdot \ln r \cdot dr$$

(6)

Tích phân từng phần (6) với $u \triangleq \ln r$ và $dv \triangleq r \cdot dr$ có kết quả $I = \frac{1}{2} \cdot (r^2 \cdot \ln r - R^2 \cdot \ln R) - \frac{1}{4} \cdot (r^2 - R^2)$. Thay kết quả (6) vào (5) ta có:

$$\tau(r) = -\frac{A}{2} \cdot \left[\left(\ln R + \frac{\lambda_l}{R \alpha} + \frac{1}{2} \right) (r^2 - R^2) - (r^2 \ln r - R^2 \ln R) \right] \quad (7)$$

Khi kết thúc quá trình chuyển pha $\tau_2 = \tau(r = 0)$

$$\Rightarrow \tau_2 = \frac{\rho_l \cdot \varphi \cdot r_c \cdot R^2}{4 \cdot \lambda_l \cdot (t_0 - t_f)} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\lambda_l}{R \cdot \alpha} \right), [s] \quad (8)$$

2.3.3. Tính thời gian quá lạnh băng τ_3 theo trình tự sau

a. Mô tả trường nhiệt độ $t(r, \tau)$ như Hình 2 và quá trình quá lạnh τ_3

$$t(r, \tau) = \begin{cases} 1. \text{ Khi } \tau = 0, t(r, \tau = 0) = \tau_1 = \text{const}, \forall r \in (0, R) \\ 2. \text{ Khi } \tau \in (0, \tau_1), t(r, \tau) = t_f - (t_i - t_f) \cdot e^{-\frac{2 \cdot \alpha \cdot \tau}{R}} \\ 3. \text{ Khi } \tau = \tau_1 = \frac{\rho_l \cdot c_l \cdot R}{2 \cdot \alpha} \cdot \ln \frac{t_i - t_f}{t_0 - t_f} \text{ thì } t(r, \tau_1) = t_0, \forall r \\ 4. \text{ Khi } \tau \in (\tau_1, \tau_1 + \tau_2) \text{ thì } t(r, \tau) = \begin{cases} t_0, \forall r \in (0, r(\tau)) \\ C_1(\tau) \ln r + C_2(\tau), \forall r \in (r(\tau) \div R) \end{cases} \\ 5. \text{ Khi } \tau = \tau_1 + \tau_2 = \tau_2 \text{ thì } t(r, \tau) = \begin{cases} t_0 \text{ tại } r = 0 \\ C_1(\tau_2) \ln r + C_2(\tau_2), r(\tau) = \tau^{-1}(r) \end{cases} \\ 6. \text{ Khi } \tau \in (\tau_1 + \tau_2 = 0, (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)) \text{ thì } t(r, \tau) = C_1(\tau) \ln r + C_2(\tau) \\ 7. \text{ Khi } \tau = \sum_1^3 \tau_i = \tau_3, \text{ thì } t(r, \tau) = C_1(\tau_3) \ln r + C_2(\tau_3) \end{cases}$$

b. Lập công thức tính τ_3

Phương trình cân bằng nhiệt cho khối băng $V = \pi \cdot R^2 \cdot l$ trong khoảng thời gian quá lạnh $\Delta \tau \in [0 \div \tau_3]$ là:

$$\Delta U = U(0) - U(\tau_3) = \tau_3 \cdot \alpha \cdot (\overline{t_w(\tau)} - t_f) \cdot 2\pi \cdot r \cdot l \quad (9)$$

Suy ra $\tau_3 = \frac{U(0) - U(\tau_3)}{\alpha \cdot (\overline{t_w(\tau)} - t_f) \cdot F} \cdot [s]$, với các thông số $[U(0), U(\tau_3), \overline{t_w(\tau)}]$ xác định theo phân bố $t(r, \tau), \forall r \in (0, R), \forall \tau \in (\tau_2, \tau_2 + \tau_3) \triangleq (0 \div \tau_3)$ phân tiếp theo.

c. Xác định gần đúng phân bố $t(r, \tau)$ khi quá lạnh:

Trong quá trình quá lạnh, $\tau \in (0 \div \tau_3) \triangleq (\tau_1 + \tau_2, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3)$ thì phân bố chính xác của $t(r, \tau), t(r, \tau) = C_1(\tau) \cdot \ln r + C_2(\tau)$ đi qua hai điểm $0[0, t(0, \tau)]$ và $R_\alpha[R + \lambda_s / \alpha, t_f]$ với $t(0, \tau) = t_f - (t_0 - t_f) \cdot \exp \frac{-k\tau}{2\rho c R}$. Vì hàm $\ln r$ không khả vi tại $r = 0$ nên để tính gần đúng, có thể coi đoạn cong $C_1 \cdot \ln r + C_2 = C_1 \cdot r + C_2$, tức là tuyến tính hóa đường cong $t(r, \tau)$. Khi đó phân bố $t(r, \tau)$ trong quá trình quá lạnh có dạng: $t(r, \tau) = C_1(\tau) \cdot \ln r + C_2(\tau)$ đi qua hai điểm $[r=0, t=t(0, \tau)]$ và $R_\alpha[r = R + \lambda_s / \alpha, t = t_f]$ với $C_1(\tau)$ và $C_2(\tau)$ xác định theo:

$$\begin{cases} t_0(\tau) = C_1(\tau) \cdot 0 + C_2(\tau) \\ t_f = C_1(\tau) \cdot (R + \lambda_s / \alpha) + C_2(\tau) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} C_1(\tau) = [t_f - t_0(\tau)] / (R + \lambda_s / \alpha) \\ C_2(\tau) = t_0(\tau) \end{cases} \quad (10)$$

Trường $t(r, \tau)$ khi quá lạnh, gần đúng là:

$$t(r, \tau) = \frac{t_f - t_0(\tau)}{R + \lambda_s / \alpha} \cdot r + t_0(\tau) \quad (11)$$

d. Tính số gia nội năng của V trong quá trình quá lạnh τ_3

Nội năng tức thời lúc τ của $dV = 2\pi \cdot r \cdot l \cdot dr$ tại r khi $t = C_1 r + C_2$ là:

$$dU = \rho_s \cdot dV \cdot c_s \cdot t(r, \tau) = 2\pi \cdot r \cdot l \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot dr \cdot (C_1 r + C_2)$$

Tổng nội năng U của V = $\pi \cdot R^2 \cdot l$ lúc τ là:

$$U = 2\pi l \rho_s c_s \int_{r=0}^R (C_1 r + C_2) r \cdot dr = 2\pi r l \rho_s c_s [C_1(\tau) \cdot R^3 / 3 + C_2(\tau) \cdot R^2 / 2]$$

$$\rightarrow U(\tau) = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot \pi \cdot l \cdot R^2}{3} \cdot [2 \cdot C_1(\tau) + 3 \cdot C_2(\tau)]$$

Số gia ΔU của V trong quá trình quá lạnh τ_3 là:

$$\Delta U = U(0) - U(\tau_3)$$

$$\Delta U = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot \pi \cdot l \cdot R^2}{3} \cdot [2R(C_1(0) - C_1(\tau_3)) + 3(C_2(0) - C_2(\tau_3))] \quad (12)$$

Thay các trị số $C_1(0), C_1(\tau_3), C_2(0), C_2(\tau_3)$ từ (9) vào (11), sẽ có:

$$\Delta U = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot \pi \cdot l \cdot R^2 \cdot (3\lambda_s + R\alpha) \cdot (t_c - t_0)}{3} \cdot [J] \quad (13)$$

e. Tính nhiệt độ trung bình của mặt trụ $t_w(\tau)$ trong thời gian $\Delta\tau \in [0 \div \tau_3]$:

Nhiệt độ mặt trụ lúc τ khi quá lạnh là $t_w(\tau)$ xác định theo quan hệ:

$$\frac{t_0(\tau) - t_f}{t_w(\tau) + t_f} = \frac{R + \lambda_s / \alpha}{\lambda_s / \alpha} \rightarrow t_w(\tau) = t_f + (t_0(\tau) - t_f) / (1 + R\alpha / \lambda_s)$$

$$\text{Lấy trung bình theo } \Delta\tau \in [0 \div \tau_3] \text{ có } \overline{t_0(\tau)} = (t_0 + t_c) / 2 \text{ và } \overline{t_w(\tau)} = t_f + (t_0 + t_c - 2t_f) / [(\lambda_s + R\alpha) / 2\lambda_s] \quad (14)$$

f. Xác định công thức tính thời gian quá lạnh τ_3

Theo (8) ta có:

$$\Rightarrow \tau_3 = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot R \cdot (3\lambda_s + R\alpha) \cdot (t_0 - t_c)}{3 \cdot \alpha \cdot \lambda_s \cdot (t_c + t_0 - 2t_f)} \cdot [s] \quad (15)$$

2.4. Tính toán thời gian cấp đông vật ẩm dạng cầu

2.4.1. Tính thời gian làm lạnh vật ẩm τ_1

Thiết lập tương tự như mục 2.3.1 cho vật ẩm dạng cầu có thể tích $V_{cau} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_{cau}^3$ ta có biểu thức:

$$\Rightarrow \tau_1 = \frac{V_{cau} \cdot \rho_l \cdot c_l}{\alpha \cdot F_{cau}} \cdot \ln \frac{t_i - t_f}{t_0 - t_f} \cdot [s] \quad (16)$$

2.4.2. Tính thời gian chuyển pha τ_2

Gọi r là bán kính lớp băng đã tạo ra trước thời điểm τ , dr là lớp băng mới tạo ra sau thời gian $d\tau$. Phương trình cân bằng nhiệt tức thời lúc τ cho khối cầu băng mới tạo ra $dV = F_{cau} \cdot dr = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr$ sau thời gian vô cùng bé $d\tau$ là:

$$4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr \cdot \rho_l \cdot \varphi r_c = - \frac{(t_0 - t_f)}{\frac{1}{\alpha \cdot R_{cau}^2} + \frac{1}{\lambda_l} \cdot \left(\frac{1}{r_{cau}} - \frac{1}{R_{cau}} \right)} \cdot 4\pi \cdot d\tau \quad (17)$$

$$\rightarrow d\tau = - \frac{\rho_l \cdot r_c \cdot \varphi}{(t_0 - t_f)} \cdot \left[\frac{1}{\alpha \cdot R_{cau}^2} + \frac{1}{\lambda_l} \cdot \left(\frac{1}{r_{cau}} - \frac{1}{R_{cau}} \right) \right] \cdot r_{cau}^2 \cdot dr$$

$$\rightarrow \int_0^{\tau} d\tau = - \int_{R_{cau}}^{r_{cau}=0} \frac{\rho_l \cdot r_c \cdot \varphi}{(t_0 - t_f)} \cdot \left[\frac{1}{\alpha \cdot R_{cau}^2} + \frac{1}{\lambda_l} \cdot \left(\frac{1}{r_{cau}} - \frac{1}{R_{cau}} \right) \right] \cdot r_{cau}^2 \cdot dr$$

$$\Rightarrow \tau_2 = \frac{\rho_l \cdot r_c \cdot \varphi \cdot R_{cau}^2}{6 \cdot \lambda_l \cdot (t_0 - t_f)} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\lambda_l}{\alpha \cdot R_{cau}} \right) \cdot [s] \quad (18)$$

2.4.3. Tính thời gian quá lạnh băng τ_3

Thiết lập tương tự như mục 2.3.3 cho vật ẩm dạng cầu có thể tích $V_{cau} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_{cau}^3$ và diện tích $F_{cau} = 4 \cdot \pi \cdot R_{cau}^2$, ta có công thức tính thời gian quá lạnh τ_3 :

$$\Rightarrow \tau_3 = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot R_{cau} \cdot (4\lambda_s + R_{cau} \alpha) \cdot (t_0 - t_c)}{6 \cdot \alpha \cdot \lambda_s \cdot (t_c + t_0 - 2t_f)} \cdot [s] \quad (19)$$

2.5. Khảo sát bài toán cấp đông thực phẩm và so sánh với kết quả thực nghiệm

2.5.1. Xác định hệ số tỏa nhiệt bề mặt α

Hệ số tỏa nhiệt bề mặt giữa thực phẩm và không khí làm lạnh đối với vật ẩm dạng trụ không bao gói có thể xác định bằng công thức [4]:

$$\alpha = 12,5 \cdot v_{tb}^{0,6} \cdot [W / m^2 \cdot K] \quad (20)$$

Để đảm bảo độ chính xác của nghiên cứu thực nghiệm, tác giả đã tiến hành đo tốc độ gió của buồng cấp đông IQF

tại các vị trí khác nhau. Kết quả tốc độ gió trung bình được sử dụng trong tính toán $v_{tb} = 2,8m/s$.

2.5.2. Khảo sát bài toán cấp đông thực phẩm

Cần cấp đông cho khối xúc xích dạng hình trụ có $D=0,015m$ và $l=0,15m$ bằng tủ đông IQF thẳng. Nhiệt độ ban đầu của xúc xích $t_i = 31^{\circ}C$ được làm lạnh đến nhiệt độ tâm theo yêu cầu $t_c = -9,5^{\circ}C$. Nhiệt độ của không khí lạnh là $t_f = -38^{\circ}C$. Tính toán thời gian cấp đông.

Bảng 1. Thành phần khối lượng của xúc xích heo hầm hạt sen Bé Khỏe Công ty Thực phẩm Gia đình Anco

STT	Thành phần	Ký hiệu	Giá trị và đơn vị
1	Nước	W	62,9%
2	Béo	F	10,45%
3	Rắn	S	26,65%

(Phân tích mẫu xúc xích tại TT kiểm nghiệm thuốc Mỹ phẩm và Thực phẩm, Sở Y Tế tỉnh Thừa Thiên Huế)

Bảng 2. Các thông số vật lý của xúc xích heo hầm hạt sen Bé Khỏe được tính toán theo thành phần khối lượng

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị và đơn vị			Chú thích
			Pha ẩm (l)	Chuyển pha (l)	Pha rắn (s)	
1	Khối lượng riêng	ρ	1045kg/m ³	1045kg/m ³	1045kg/m ³	[4]
2	Nhiệt độ bắt đầu đóng băng	t_0		-1,171 °C		[4]
3	Nhiệt ẩn hóa rắn	r_c			228kJ/kg	[2]
4	Nhiệt dung riêng	c	3200,9J/kg.K		2014,9J/kg.K	[4]
5	Hệ số dẫn nhiệt	λ	0,4634W/m.K		1,1195W/m.K	[4]

Bảng 3. Kết quả tính toán thời gian đông băng

Thời gian	Công thức tính cho vật dạng trụ	Trị số, [s]	Công thức tính cho vật dạng cầu	Trị số, [s]
τ_1	$\tau_1 = \frac{V \cdot \rho_l \cdot c_l}{\alpha \cdot F} \cdot \ln \frac{t_i - t_f}{t_0 - t_f}$	340	$\tau_1 = \frac{V_{cau} \cdot \rho_l \cdot c_l}{\alpha \cdot F_{cau}} \cdot \ln \frac{t_i - t_f}{t_0 - t_f}$	227
τ_2	$\tau_2 = \frac{\rho_l \cdot \varphi \cdot r_c \cdot R^2}{4 \cdot \lambda_l \cdot (t_0 - t_f)} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\lambda_l}{R \cdot \alpha}\right)$	782	$\tau_2 = \frac{\rho_l \cdot r_c \cdot \varphi \cdot R_{cau}^2}{6 \cdot \lambda_l \cdot (t_0 - t_f)} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\lambda_l}{\alpha \cdot R_{cau}}\right)$	521
τ_3	$\tau_3 = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot R \cdot (3\lambda_s + R\alpha) \cdot (t_0 - t_c)}{3 \cdot \alpha \cdot \lambda_s \cdot (t_c + t_0 - 2t_f)}$	91	$\tau_3 = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot R_{cau} \cdot (4\lambda_s + R_{cau}\alpha) \cdot (t_0 - t_c)}{6 \cdot \alpha \cdot \lambda_s \cdot (t_c + t_0 - 2t_f)}$	60
τ_{lt}	$\tau_{lt} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$	1213	$\tau_{lt} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$	808

2.5.3. Thực nghiệm kiểm chứng

Để so sánh kết quả lý thuyết với thực nghiệm tác giả đã tiến hành.

a. Chọn vật ẩm, thiết bị đo và hệ thống lạnh

+ Vật ẩm là xúc xích heo hầm hạt sen Bé Khỏe có các thông số vật lý như Bảng 2.

+ Thiết bị đo gồm: đồng hồ đo thời gian có độ chính xác 0,01s, nhiệt kế thermo scientific với độ chính xác 0,1°C và máy đo tốc độ gió Prova AVM 03 sai số $\pm 3\%$.

+ Hệ thống lạnh: IQF thẳng tại Công ty cổ phần Thủy sản Sông Hương - Thừa Thiên Huế.

b. So sánh thời gian cấp đông thực nghiệm và thời gian lý thuyết cho vật ẩm dạng trụ với cách tính sai số (ε_r) theo công thức $\varepsilon_r = \left| (\tau_m - \tau_{lt}) / \tau_m \right| \cdot 100\%$

Bảng 4. Kết quả thực nghiệm thời gian cấp đông

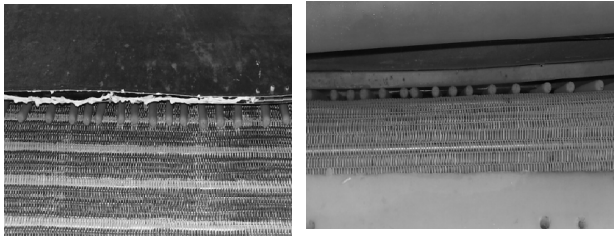
TT	$t_i, [^{\circ}C]$	$t_f, [^{\circ}C]$	$t_c, [^{\circ}C]$	$\tau_{lt}, [p]$	$\tau_m, [p]$	$\varepsilon_r, [\%]$
1	31	-38	-9,5	20,22	21,90	7,67
2	31	-38	-12,5	20,86	23,10	9,67
3	12	-38	-18	19,32	21,30	9,29

4	31,2	-36	-12,8	22,10	24,20	8,68
5	18	-36	-13,3	20,25	22,10	8,37
Sai số trung bình thực nghiệm						8,74

c. Một số hình ảnh thực nghiệm



Hình 3. Đo nhiệt độ ban đầu và tâm của thực phẩm



Hình 4. Thực phẩm đi vào và ra hệ thống IQF



Hình 5. Thiết bị đo tốc độ gió trong tủ IQF

3. Kết luận và kiến nghị

- Đây là phương pháp đơn giản để dự đoán thời gian đóng băng cho vật ẩm có dạng hình trụ vô hạn và cầu. Mô hình này cho phép tính toán đơn giản và nhanh chóng dựa trên phương trình cân bằng nhiệt;

- So sánh (τ_1, τ_2, τ_3) của vật ẩm dạng trụ vô hạn và cầu thì thời gian làm lạnh, chuyển pha và quá lạnh cho vật ẩm dạng trụ vô hạn nhiều hơn khoảng 1,5 lần;

- Sai số giữa lý thuyết và thực nghiệm trung bình không quá 10%, cho thấy: các công thức đưa ra trong phương pháp này khá chính xác và có thể ứng dụng để dự đoán quá trình đóng băng thực phẩm trong thực tế;

- Các sai số gây ra chủ yếu trong phương pháp này do: các thông số vật lý ($\lambda, c, \rho...$) chưa có số liệu chính xác, ảnh hưởng của thiết bị và điều kiện môi trường thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Bốn, Tính toán thời gian đông lạnh thực phẩm, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt*, số 7/2004.
[2] Becker, B.R. and B.A. Fricke. (1999). Food thermophysical property models. *International Communications in Heat & Mass Transfer* 26(5):627-636.

[3] Castaigne, F. (1985b). Calcul des temps de congélation d'aliments ayant la forme d'un cylindre infini, d'un cylindre fini ou d'une sphere. *Lebensm. Wiss. u. Technol.* 18:137.
[4] Cleland, D.J., Cleland, A.C., White, S.D., Love, R.J., Merts, I., East, A., Paterson, A.H.J. (2010). *Cost-Effective Refrigeration*. Palmerston North, New Zealand: Massey University.
[5] Cleland, A.C. and Earle, R.L. (1977a). A comparison of analytical and numerical methods for predicting the freezing times of foods. 1. *Food Sci.* 42:1390.
[6] Cleland, A.C. and Earle, R.L. (1977b). The third kind of boundary condition in numerical freezing calculations. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 20: 1029.
[7] Cleland, A.C. and Earle, R.L. (1982). A simple method for prediction of heating and cooling rates in solids of various shapes. *Rev. Int. du Froid*, 5:98.
[8] Cleland, A.C. and Earle, R.L. (1987a). Prediction of freezing & thawing times for multidimensional shapes by simple formulae. Part 1: Regular shapes. *International Journal of Refrigeration*, 10, 157-164.
[9] Cleland, A.C. and Earle, R.L. (1987b). Prediction of freezing & thawing times for multidimensional shapes by simple formulae. Part 2: Irregular shapes. *International Journal of Refrigeration*, 10, 234-240.
[10] De Michelis, A. and Calvelo, A. (1982). Mathematical models for symmetric freezing of beef. *J. Food Sci.* 47:1211.
[11] De Michelis, A. and Calvelo, A. (1983). Freezing time predictions for brick and cylindrical shaped foods. *J. Food Sci.* 48:909.
[12] Hossain, Md.M., Cleland, D.J., Cleland, A.C. (1992b). Prediction of freezing and thawing times for foods of two-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *International Journal of Refrigeration*, 15, 235-240.
[13] Hung, Y.C. and Thompson, D.R. (1983). Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by an improved analytical method. *J. Food Sci.* 48:555.
[14] McNabb, A., Wake, G.C., Hossain, Md.M., Lambourne, R.D. (1990b) Transition times between steady states for heat conduction, Part II: Approximate solutions and examples. *Occasional Pubs in Maths & Statistics* No.21, Massey University.
[15] Nagaoka, J., Takaji, S., and Hohani, S. (1955). Experiments on the Freezing of fish in air blast freezer, *Proc. IX Int. Congo Refrig.* 4: 105.

(BBT nhận bài: 17/08/2015, phản biện xong: 10/09/2015)