

## XÁC ĐỊNH TÍNH CHẤT NHIỆT VẬT LÝ VÀ THỜI GIAN CẤP ĐÔNG MỰC ỚNG (*Loligo chinensis*) BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH

Hoàng Minh Tuấn

### Tác giả liên hệ:

**Hoàng Minh Tuấn**

### Email:

hmtuan@hueic.edu.vn

Trường Cao đẳng Công nghiệp  
Huế

*Nhận bài:* 03/03/2019

*Chấp nhận bài:* 07/04/2019

**Từ khóa:** Hình dạng bất kỳ, Không đối xứng, Thời gian cấp đông, Thực phẩm, Truyền nhiệt không ổn định

### TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một mô hình giải tích đơn giản để tính toán tính chất nhiệt vật lý và thời gian cấp đông mực ống bằng hai biên đối lưu không đối xứng. Mô hình 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 các phương pháp đã có từ trước đến nay, kể cả phương pháp sai phân và phần tử hữu hạn. Nhờ các phép tính này dễ dàng lập trình trên máy tính, cho phép dự đoán đơn giản, nhanh chóng và chính xác thời gian cấp đông thực phẩm. Kết quả nghiên cứu chứng minh thời gian cấp đông của phương pháp này so với thực nghiệm và các phương pháp số không quá 10%.

### 1. MỞ ĐẦU

Mực ống là động vật thuộc ngành thân mềm của lớp nhuyễn thể chân đầu, có giá trị dinh dưỡng và kinh tế cao. Tuy nhiên, do đặc tính cấu tạo của cơ thể nên mực ống rất dễ bị hư hỏng ngay sau khi đánh bắt. Để duy trì được chất lượng của mực tươi, bảo quản mực bằng cách đông lạnh là phương pháp được sử dụng phổ biến và có hiệu quả.

Đối với quá trình đông lạnh thực phẩm, tính chất nhiệt vật lý quyết định đến sự vận chuyển năng lượng, lưu trữ năng lượng và chuyển pha trong thực phẩm. Đối với kỹ thuật đông lạnh, tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm được sử dụng để ước tính tốc độ truyền nhiệt và để tính toán tải nhiệt trong các quá trình như đóng băng và tan băng. Trong đó, tính toán thời gian cấp đông là yếu tố quan trọng quyết định đến chất lượng thực phẩm. Để giải được bằng giải tích, người ta phải có nhiều giả thiết để đơn giản hóa bài toán nên hiện nay chưa có một phương pháp giải nào đủ độ tin cậy và chính xác. Hầu hết các phương pháp giải tích để tính toán thời gian đóng băng được phát

triển từ phương trình của Plank (1941). Hạn chế của phương pháp này là coi nhiệt độ ban đầu của vật bằng nhiệt độ điểm đông, tính chất nhiệt vật lý không thay đổi, dẫn nhiệt trong lớp băng là ổn định, không tách riêng quá trình chuyển pha đẳng nhiệt khỏi hai quá trình đơn pha có nhiệt độ giảm.

Các phương pháp khác của Nagaoka và cs. (1955), Cleland và Earle (1977a, 1977b và 1982) đã được đề xuất để điều chỉnh phương trình Plank (1941). Ngoài ra, Mascheroni và Calvel (1982), De Michelis và Calveo (1983), Castaigne (1985b) và Pham (2014) đã kết hợp với phương trình cân bằng nhiệt với phương trình Plank để cải tiến việc tính toán thời gian cấp đông. Ví dụ, Mascheroni và Calvelo (1982) đã đề xuất một phương pháp tính toán thời gian cấp đông thực phẩm với điều kiện biên loại ba đối xứng. Phương pháp này khá chính xác. Thời gian đóng băng là tổng của thời gian làm lạnh, chuyển pha và quá lạnh. Thời gian chuyển pha sử dụng phương trình Plank (1941) để tính toán. Tuy nhiên, phương pháp này sử dụng đồ thị trong quá trình tính

toán, có thể mắc phải sai số của các đồ thị.

Trong khuôn khổ bài báo này, chúng tôi đề xuất phương pháp mới xác định tính chất nhiệt vật lý và thời gian đóng băng cho mực ống với biên đối lưu không đối xứng. Đây là bài toán cơ sở để xác định thời gian cấp đông cho thực phẩm có hình dạng khác nhau và có thể ứng dụng vào trong sản xuất.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

- Phương pháp giải tích: dựa trên các tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm và lý



Hình 1. Đo chiều dài và độ dày của mực ống



Hình 3. Thiết bị đo tốc độ gió

## 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### 3.1. Tính toán tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm

Tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm được xác định khá chính xác với thực tế bằng mối quan hệ đơn giản nếu biết được thành phần khối lượng nước, chất béo và rắn trong thực phẩm (Cleland và cs., 2010):  $W+F+S=1$  (1)

Ở đây W là thành phần khối lượng nước, F là thành phần khối lượng chất béo, S là thành phần khối lượng chất rắn.

#### 3.1.1. Nhiệt độ bắt đầu đóng băng

Nhiệt độ bắt đầu đóng băng của thực

thuyết về truyền nhiệt.

- Phương pháp thực nghiệm:

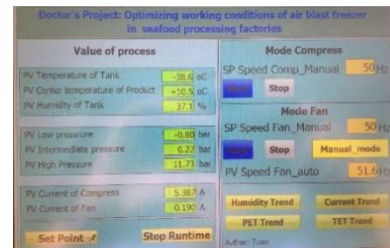
+ Vật ẩm là mực ống có các thông số vật lý như bảng 3;

+ Thiết bị đo gồm: nhiệt kế Thermo Scientific với độ chính xác  $0,1^{\circ}\text{C}$  và máy đo tốc độ gió Prova AVM 03 sai số;

+ Hệ thống lạnh: tủ đông gió tại Xưởng thực hành của Khoa Nhiệt lạnh - Xây dựng, Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế.



Hình 2. Đo nhiệt độ ban đầu và tâm của thực phẩm



Hình 4. Phần mềm tối ưu hóa chế độ làm việc tủ đông gió

phẩm được xác định bởi công thức (Cleland, 2012):  $t_0 = -1,8 + W, [^{\circ}\text{C}]$  (2)

#### 3.1.2. Hàm lượng băng

Hàm lượng băng được tính bởi biểu thức:

$$I = (W - 0,25S) \left( 1 - \frac{t_0}{-20} \right) (3)$$

Trong đó I là hàm lượng băng khi đông lạnh hoàn toàn (Lovatt, 2009).

#### 3.1.3. Khối lượng riêng

Khối lượng riêng thực phẩm phụ thuộc vào vật ẩm đó đã đóng băng hay chưa. Tuy nhiên, nó thay đổi khá nhỏ nên có thể xác định bởi giá trị trung bình (Cleland, 2012):

$$\rho = \frac{1}{\frac{W}{1000} + \frac{S}{1300} + \frac{F}{850}}, [\text{kg}/\text{m}^3] (4)$$

3.1.4. Hệ số dẫn nhiệt

Đối với thực phẩm chưa đóng băng (Lovatt, 2009):

$$\lambda_1 = \rho \left( \frac{W}{1695} + \frac{S}{5306} + \frac{F}{4722} \right), [W/mK] \quad (5)$$

Đối với thực phẩm đóng băng (Lovatt, 2009):

$$\lambda_s = 2,4 \left[ \frac{4,8+k_p - 2(2,4-k_p)C}{4,8+k_p + (2,4-k_p)C} \right], [W/mK] \quad (6)$$

Với C, k<sub>p</sub> là các hệ số và được xác định cụ thể bởi (Cleland, 2012).

3.1.5. Nhiệt dung riêng

Đối với thực phẩm chưa đóng băng (Cleland và cs., 2010):

$$c_1 = 4180W + 1400S + 1900F, [J/kgK] \quad (7)$$

Đối với thực phẩm đóng băng (Cleland và cs., 2010)

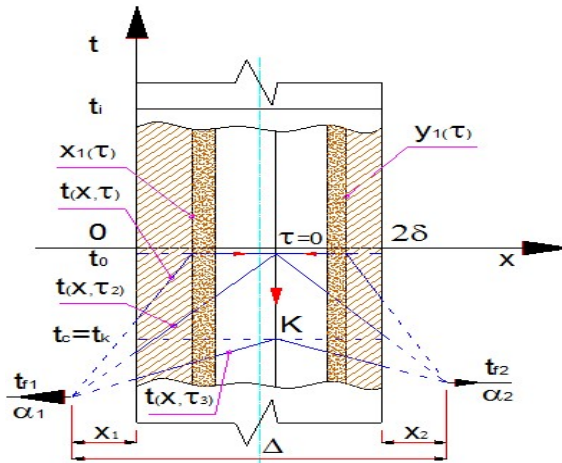
$$c_s = 4180(W-I) + 1940I + 1400S + 1900F, [J/kgK] \quad (8)$$

3.2. Phát biểu bài toán cấp đông thực phẩm và các giả thuyết nghiên cứu

3.2.1. Phát biểu bài toán

Xét thực phẩm dạng tấm phẳng rộng vô hạn có chiều dày 2δ như hình 5. Khối lượng riêng và nhiệt dung riêng pha ẩm và pha rắn là ρ<sub>1</sub>, c<sub>1</sub> và ρ<sub>s</sub>, c<sub>s</sub>. Thực phẩm có độ ẩm φ, hệ số dẫn nhiệt pha ẩm λ<sub>1</sub> và rắn λ<sub>s</sub>, nhiệt độ ban đầu t<sub>1</sub>, nhiệt độ bắt đầu đóng băng t<sub>0</sub>, nhiệt hóa rắn pha ẩm r<sub>c</sub> và nhiệt độ lớn nhất của vật đạt được sau khi cấp đông t<sub>c</sub> bằng cách cho vật tiếp xúc với hai môi trường có nhiệt độ t<sub>f1</sub> < t<sub>f2</sub> < t<sub>c</sub> < t<sub>1</sub>.

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



Hình 5. Phân bố t(x,τ) trong vật trong quá trình đóng băng và quá lạnh

3.2.2. Giả thiết nghiên cứu:

1. Tại mỗi thời điểm τ coi nhiệt độ t (τ) trong vật đơn pha (ẩm hoặc băng) là phân bố đều trong thể tích của vật.
2. Các thông số vật lý ρ, c, λ của vật ẩm hoặc băng là không đổi và phân bố đều trong vật.
3. 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 hóa

rắn t = t<sub>0</sub> = const và tỏa ra lượng nhiệt bằng nhiệt hóa rắn r.

3.3. Tính toán thời gian cấp đông

3.3.1. Tính thời gian làm lạnh vật ẩm τ<sub>1</sub>

Thời gian làm lạnh vật ẩm τ<sub>1</sub> từ nhiệt độ ban đầu t<sub>1</sub> đến nhiệt độ bắt đầu hóa rắn t<sub>0</sub> được tính theo phương trình cân bằng nhiệt lúc τ cho V = 2δf sau thời gian vô cùng bé dτ khi nhiệt độ giảm một lượng dτ là du = δQ<sub>k1</sub> + δQ<sub>k2</sub> hay:

$$2\delta f \rho c_1 (-dt) = [k_1 f(t-t_{f1}) + k_2 f(t-t_{f2})] dt \quad (9)$$

$$\rightarrow \frac{dt}{dt} + \frac{k_1 + k_2}{2\delta \rho c_1} t = \frac{k_1 t_{f1} + k_2 t_{f2}}{2\delta \rho c_1}$$

$$\rightarrow t(\tau) = t_{m1} - (t_1 - t_{m1}) \cdot e^{-a\tau}$$

Trong đó:

$$a = \frac{k_1 + k_2}{2\delta \rho c_1}, [s^{-1}] \quad t_{m1} = \frac{b}{a} = \frac{k_1 t_{f1} + k_2 t_{f2}}{k_1 + k_2}, [K]$$

$$\Rightarrow \tau_1 = \frac{2\delta \rho c_1}{k_1 + k_2} \ln \frac{t_1 - t_{m1}}{t_0 - t_{m1}}, [s] \quad (10)$$

$$\text{Với } k_1 = \left( \frac{\delta}{2\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1} \right)^{-1}, \left[ \frac{W}{m^2 K} \right],$$

$$k_2 = \left( \frac{\delta}{2\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Khi  $t_{f1} = t_{f2} = t_f$  và  $\alpha_1 = \alpha_2$  đây là bài toán cấp đông với hai biên đối lưu đối xứng, thời gian  $\tau_1$  được tính bằng công thức:

$$\tau_{1, dx} = \frac{\delta \rho c_1}{k} \ln \frac{t_1 - t_f}{t_0 - t_f}, [s] \quad (11)$$

### 3.3.2. Tính thời gian chuyển pha $\tau_2$

a. Tính thời gian chuyển pha mặt tiếp xúc ( $t_{f1}$  và  $\alpha_1$ ) với  $x \in [0 \div x_K]$  là  $\tau_{2\alpha_1}$ :

Gọi  $x$  là độ dày lớp băng đã tạo ra trước thời điểm  $\tau$ ,  $dx$  là độ dày lớp băng mới tạo ra sau thời gian vô cùng bé  $d\tau$ . Phương trình cân bằng nhiệt là:

$$\rho \varphi r dx = \frac{t_0 - t_{f1}}{\left( \frac{x}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1} \right)} f d\tau, [J] \quad (12)$$

+ Luật đóng băng  $\tau(x)$ , là dạng tích phân của phương trình (12):

$$\int_0^\tau d\tau = \frac{\rho \varphi r}{t_0 - t_{f1}} \int_0^x \left( \frac{x}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1} \right) dx$$

$$\rightarrow \tau(x) = \frac{\rho \varphi r}{2\lambda_1(t_0 - t_{f1})} \left( x^2 + \frac{2\lambda_1 x}{\alpha_1} \right), [s] \quad (13)$$

Hàm ngược của  $\tau(x)$  cũng gọi là luật đóng băng, có dạng:

$$x(\tau) = \sqrt{\frac{2\lambda_1(t_0 - t_{f1})}{\rho \varphi r} \tau + \frac{\lambda_1^2}{\alpha_1^2}} - \frac{\lambda_1}{\alpha_1}, [m]$$

$$\rightarrow x(\tau) = \sqrt{A_1 \tau + x_1^2} - x_1, [m] \quad (14)$$

Trong đó:

$$A_1 = \frac{2\lambda_1(t_0 - t_{f1})}{\rho \varphi r}, [m^2 s^{-1}], \quad x_1 = \frac{\lambda_1}{\alpha_1}, [m]$$

+ Vận tốc đóng băng là vận tốc chuyển động của mặt băng ra xa môi trường lạnh:

$$v = \frac{dx}{d\tau} = \frac{A_1}{2[x(\tau) + x_1]} = \frac{A_1}{2(\sqrt{A_1 \tau + x_1^2})}, [ms^{-1}] \quad (15)$$

Biểu thức (15) cho biết vận tốc đóng băng tỷ lệ nghịch với  $\sqrt{\tau}$ .

+ Gia tốc đóng băng (hay gia tốc của mặt băng) là:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{d\tau} = -\frac{A_1^2}{4[\sqrt{A_1 \tau + x_1^2}]^3}, [ms^{-2}] \quad (16)$$

Biểu thức (16) cho biết gia tốc đóng băng giảm khi  $x$  và  $\tau$  tăng.

b. Tính thời gian chuyển pha mặt tiếp xúc ( $t_{f2}$  và  $\alpha_2$ ) với  $y \in [0 \div y_K]$  là  $\tau_{2\alpha_2}$ :

Thiết lập tương tự như mục 2.3.2.a ta có các biểu thức của luật đóng băng, vận tốc và gia tốc đóng băng như sau:

$$y(\tau) = \sqrt{A_2 \tau + x_2^2} - x_2, [m] \quad (17)$$

$$v = \frac{dy}{d\tau} = \frac{A_2}{2(\sqrt{A_2 \tau + x_2^2})}, [ms^{-1}] \quad (18)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} \frac{dy}{d\tau} = -\frac{A_2^2}{4[\sqrt{A_2 \tau + x_2^2}]^3}, [ms^{-2}] \quad (19)$$

$$\text{Với: } A_2 = \frac{2\lambda_1(t_0 - t_{f2})}{\rho \varphi r}, [m^2 s^{-1}], \quad x_2 = \frac{\lambda_1}{\alpha_2}, [m]$$

c. Tính thời gian chuyển pha  $\tau_2$

Vì sau thời gian  $\tau_2$ , hai mặt băng tiến

sát nhau, làm cho toàn bộ bề dày  $2\delta$  của thực phẩm được đóng băng hoàn toàn, nên ta có  $x(\tau_2) + y(\tau_2) = 2\delta$ , hay là:

$$\sqrt{A_1\tau_2 + x_1^2} - x_1 + \sqrt{A_2\tau_2 + x_2^2} - x_2 = 2\delta \quad (20)$$

Phương trình (21) sau phép biến đổi tương đương có dạng:

$$a_1\tau_2^2 + b_1\tau_2 + c_1 = 0 \quad (21)$$

Với:

$$a_1 = (A_1 - A_2)^2, [m^4 s^{-2}], B = x_1^2 + x_2^2 - \Delta^2, [m^2]$$

$$b_1 = 2B(A_1 + A_2) - 4A_1x_2^2 - 4x_1^2A_2, [m^4 s^{-1}]$$

Ở đây:

$$\Delta = 2\delta + x_1 + x_2, [m], c_1 = 4x_1^2x_2^2 - B^2, [m^4]$$

Nghiệm của phương trình (21) là

$$\tau_2 = \frac{-b_1}{2a_1} + \frac{1}{2a_1} \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}, [s]$$

$$\Rightarrow x_K = x(\tau_2) = \sqrt{A_1\tau_2 + x_1^2} - x_1, [m]$$

$$\text{và } y_K = y(\tau_2) = \sqrt{A_2\tau_2 + x_2^2} - x_2, [m]$$

Khi cấp đông với hai biên đối lưu đối xứng ( $t_{f1} = t_{f2}$  và  $\alpha_1 = \alpha_2$ ) thì:

$$\tau_{2dx} = \frac{\rho\phi r}{(t_0 - t_f)} \left( \frac{\delta^2}{2\lambda_1} + \frac{\delta}{\alpha} \right), [s] \quad (22)$$

### 3.4. Tính thời gian quá lạnh bằng $\tau_3$

Phương trình cân bằng nhiệt cho khối băng  $V = 2\delta f$  đang quá lạnh lúc  $\tau$  sau  $d\tau$  là  $du = \delta Q_{k1} + \delta Q_{k2}$  hay:

$$2\delta f \rho c_s (-d\tau) = [k_1(t - t_{f1})f + k_2(t - t_{f2})f] d\tau \quad (23)$$

$$\rightarrow \frac{dt}{d\tau} + \frac{k_1 + k_2}{2\delta \rho c_s} t = \frac{k_1 t_{f1} + k_2 t_{f2}}{2\delta \rho c_s}$$

$$\rightarrow t(\tau) = t_{m2} - (t_0 - t_{m2}) e^{-a\tau} \quad (24)$$

$$\Rightarrow \tau_3 = \frac{2\delta \rho c_s}{k_1 + k_2} \ln \frac{t_0 - t_{m2}}{t_c - t_{m2}}, [s]$$

(25)

Với:

$$k_1 = \left[ \frac{x_k}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_1} \right]^{-1}, \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \text{ và } k_2 = \left[ \frac{y_k}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1}, \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$t_{m2} = \frac{\sum_{i=1}^2 k_i t_{fi}}{\sum_{i=1}^2 k_i}, [K]$$

Trong trường hợp cấp đông với hai biên đối lưu đối xứng ( $t_{f1} = t_{f2} = t_f$  và  $\alpha_1 = \alpha_2$ ) thì:

$$\tau_{3dx} = \frac{\delta \rho c_s}{k} \ln \frac{t_0 - t_f}{t_c - t_f}, [s] \quad (26)$$

### 3.5. Hệ số hình học quy đổi của vật ẩm

Cleland và Earle (1982) đã tính toán thời gian đông lạnh cho thực phẩm có hình dạng phi tiêu chuẩn như sau:

$$\tau_{ptc} = \frac{\tau}{E}, [s] \quad (27)$$

Với  $\tau_{tp}$  là thời gian cấp đông cho sản phẩm có hình dạng tấm phẳng rộng vô hạn và  $E$  là kích thước truyền nhiệt tương đương.

3.5.1. Hệ số hình học quy đổi cho vật ẩm có dạng hộp, thanh chữ nhật dài vô hạn, trụ hữu hạn, tấm phẳng rộng vô hạn, trụ dài vô hạn và cầu.

Cleland và cs. (2010) đã xây dựng biểu thức tổng quát để xác định  $E$  như sau:

$$E = G_1 + G_2 E_1 + G_3 E_2 \quad (28)$$

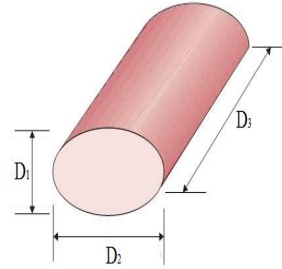
$$E_1 = \frac{X \left( \frac{2,32}{\beta_1^{1,77}} \right) + \left[ 1 - X \left( \frac{2,32}{\beta_1^{1,77}} \right) \right] \beta_1^{0,73}}{\beta_1^{2,50}}$$

$$E_2 = \frac{X \left( \frac{2,32}{\beta_1^{1,77}} \right) + \left[ 1 - X \left( \frac{2,32}{\beta_1^{1,77}} \right) \right] 0,50}{\beta_1^{3,69}}$$

$$X(x) = x / (Bi^{1,34} + x), Bi = \alpha R / \lambda,$$

$$\beta_1 = D_2 / D_1, \beta_2 = D_3 / D_1$$

Trong đó  $R$  là bán kính hoặc một nửa kích thước nhỏ nhất của sản phẩm;  $D_1$ ,  $D_2$  và  $D_3$  là kích thước ngắn nhất, thứ hai và dài nhất của sản phẩm;  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  là các hằng số hình học được xác định theo bảng 1.



Hình 6. Xác định kích thước sản phẩm

Bảng 1. Hằng số hình học cho tính toán E (Cleland và cs., 2010, 2012)

Hình dạng	$G_1$	$G_2$	$G_3$
Hộp ( $\beta_1 > 1, \beta_2 > \beta_1$ )	1	1	1
Thanh chữ nhật dài vô hạn ( $\beta_1 > 1, \beta_2 = \infty$ )	1	1	0
Trụ hữu hạn $D > H$ ( $\beta_1 = \beta_2, \beta_1 \geq 1$ )	1	2	0
Trụ hữu hạn $D < H$ ( $\beta_1 = 1, \beta_2 \geq 1$ )	2	0	1
Tấm phẳng rộng vô hạn ( $\beta_1 = \beta_2 = \infty$ )	1	0	0
Trụ dài vô hạn ( $\beta_1 = 1, \beta_2 = \infty$ )	2	0	0
Cầu ( $\beta_1 = \beta_2 = 1$ )	3	0	0
Hai chiều bất kỳ ( $\beta_1 > 1, \beta_2 = \infty$ )	1	1	0
Ba chiều bất kỳ ( $\beta_1 > 1, \beta_2 > \beta_1$ )	1	1	1

### 3.5.2. Hệ số hình học quy đổi cho vật ẩm có dạng trụ elip

Pham và cs. (2014) xác định gần như chính xác khi:  $\beta = D_3 / D_1 \leq 10$  là:

$$E = 1 + (1 + 2 / Bi) / (\beta^2 + 2\beta / Bi) \quad (30)$$

### 3.5.3. Hệ số hình học quy đổi cho vật ẩm có dạng ellipsoid

Pham và cs. (2014) đã đề xuất công thức tính dựa trên mối quan hệ giữa ellipsoid và bán kính  $R \times R\beta_1 \times R\beta_2$ :

$$E = 1 + \left[ (AR / V_s - 1) / (\beta_1^{-1} + \beta_2^{-1}) \right]^p (\beta_1^{-q} + \beta_2^{-q}) \quad (31)$$

### 3.5.4. Hệ số hình học quy đổi cho vật ẩm có dạng không xác định

Cleland và cs. (2010) đề nghị dùng biểu thức (30) với:

$$\beta_1 = A_1 / \pi R^2 \text{ và } \beta_2 = A_2 / \pi R^2 \quad (33)$$

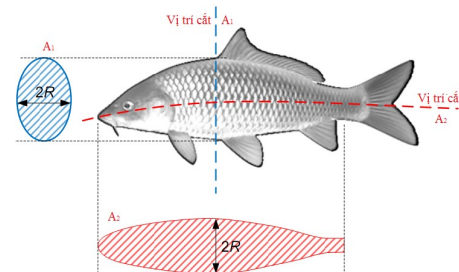
Ở đây  $A_1$ ,  $A_2$  là diện tích mặt cắt ngang được xác định như hình sau: với những vật hình dạng không xác định hai chiều,  $A_1$  là diện tích mặt cắt ngang và  $R$  là bán kính nhỏ nhất; với những vật hình dạng

không xác định ba chiều,  $A_1$  là diện tích mặt cắt ngang nhỏ nhất,  $A_2$  là diện tích mặt cắt ngang trực giao với bán kính nhỏ nhất.

## 3.6. Khảo sát bài toán cấp đông thực phẩm và so sánh kết quả với các phương pháp khác

### 3.6.1. Xác định hệ số tỏa nhiệt bề mặt $\alpha$

Hệ số tỏa nhiệt bề mặt giữa thực phẩm và không khí làm lạnh đối với vật ẩm không bao giờ có thể xác định bằng công thức (Cleland, 2012):



Hình 7. Vị trí xác định diện tích mặt cắt ngang  $A_1$  và  $A_2$  (Pham, 2014)

+Thực phẩm có dạng phẳng

$$\alpha = 7,3v_a^{0,8}, [W/m^2K]$$

+Thực phẩm có dạng oval

$$\alpha = 12,5v_a^{0,6}, [W/m^2K]$$

Ở đây  $v_a$  là tốc độ không khí, (m/s).

3.6.2. *Khảo sát bài toán cấp đông thực phẩm*

Cần cấp đông cho 20 kg mực ống được đặt trong khay dạng hình hộp có  $D_1 = 0,018$  m,  $D_2 = 0,200$  m và  $D_3 = 0,280$  m

bằng tủ đông gió. Nhiệt độ ban đầu của mực ống  $t_i = 25,1^\circ C$ , mực được làm lạnh đến nhiệt độ tâm theo yêu cầu  $t_c = -18^\circ C$ . Nhiệt độ của không khí lạnh trung bình là  $t_f = -39^\circ C$ , vận tốc không khí trung bình trong tủ đông  $v_a = 1,3$  m/s. Tính toán thời gian cấp đông.

Tỷ lệ khối lượng các thành phần dinh dưỡng của mực ống dùng trong bài báo này (Bảng 2) được xác định tại Khoa Cơ khí Công nghệ, trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.

**Bảng 2.** Thành phần khối lượng của mực ống

Thành phần	Ký hiệu	Giá trị và đơn vị
Nước	W	85%
Chất béo	F	1,35%
Chất rắn	S	13,65%

Dựa vào các công thức tính toán nhiệt vật lý thực phẩm ở mục 2.1 và kết quả xác

định các thông số nhiệt vật lý của mực ống được trình bày ở Bảng 3.

**Bảng 3.** Các thông số vật lý của mực ống được tính toán theo thành phần khối lượng

Thông số	Ký hiệu	Giá trị		
		Pha âm (l)	Chuyển pha (l)	Pha rắn (s)
Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	1030	1030	1030
Nhiệt độ bắt đầu đóng băng, °C	$t_0$		-0,95	
Nhiệt ẩn hóa rắn (kJ/kg)	$r$			259,24
Nhiệt dung riêng (J/kg.K)	$c$	3769,75		2028,99
Hệ số dẫn nhiệt (W/mK)	$\lambda$	0,5459		1,7815

Dựa trên các thông số ở bảng 3 và các công thức ở mục 3.3, 3.4, 3.5, thời gian đóng băng từ nhiệt độ ban đầu đến nhiệt độ đóng

băng yêu cầu được tính toán và thể hiện trên Bảng 4.

**Bảng 4.** Kết quả tính toán thời gian cấp đông

Thời gian	Công thức tính	Giá trị, [s]	Tỷ số $\tau_i/\tau$ , %
$\tau_1$	$\tau_1 = \frac{2\delta\rho c_1}{k_1 + k_2} \ln \frac{t_i - t_{m1}}{t_0 - t_{m1}}, [s]$	1972	21,38
$\tau_2$	$\tau_2 = \frac{-b_1}{2a_1} + \frac{1}{2a_1} \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}$	6027	65,34
$\tau_3$	$\tau_3 = \frac{2\delta\rho c_s}{k_1 + k_2} \ln \frac{t_0 - t_{m2}}{t_c - t_{m2}}, [s]$	1225	13,28
$\tau$	$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$	9224	100
E	Công thức (28)	1,16	
$\tau_{ptc}$	Công thức (27)	7952	

Bảng 4 cho thấy, thời gian chuyển pha cho mực chiếm tỷ lệ hơn 65% thời gian cấp đông. Các công thức tính  $\tau$  cho từng giai đoạn rất đơn giản, lập trình trên máy tính một cách dễ dàng.

Chúng tôi đã so sánh kết quả của việc sử dụng phương pháp này và các phương pháp giải tích khác để tính toán thời gian

**Bảng 5.** So sánh kết quả của phương pháp này với một số phương pháp giải tích khác trên thế giới

Tác giả	Giá trị $\tau$ , [s]	Sai số	
		Sai số tương đối, %	Sai số trung bình, %
		$\varepsilon_{td} =  1 - \tau/\tau_i $	$\varepsilon_i =  1 - \tau_i/\bar{\tau} $
Phương pháp của tác giả	7,952	0	3,10
Plank (1941)	6,187	28,52	24,60
Cleland và Earle (1977, 1979a, 1979b)	7,880	0,91	9,60
Pham (1986)	10,285	22,68	25,32
Castaigne và Lacroix (1987a, 1987a, 1988)	8,729	8,90	6,36

Như vậy, kết quả thể hiện trên Bảng 5 cho thấy phương pháp đề xuất trong bài

cấp đông cho mực. Để so sánh, giả sử thời gian cấp đông chính xác của cả 5 phương

pháp là trị trung bình thời gian  $\bar{\tau} = \frac{1}{5} \sum_1^5 \tau_i$  [s]

Khi đó sai số của từng phương pháp so với trị trung bình thời gian  $\bar{\tau}$ , sẽ được ghi trong Bảng 5.

báo này có sai số trung bình thời gian là thấp so với bốn phương pháp còn lại.

**Bảng 6.** So sánh kết quả của phương pháp này với phương pháp số (PTHH) và thực nghiệm (Đỗ Hữu Hoàng, 2014)

Tác giả	Giá trị $\tau$ , [s]	Sai số tương đối, %
Phương pháp của tác giả	472	0
Lý thuyết	524	+ 9,92
Thực nghiệm	509	+ 7,27

Phương pháp giải tích này có sai số với phương pháp phần tử hữu hạn khi tính toán thời gian cấp đông cho mực ống là 9,92 %, so với thực nghiệm là 7,27 %.

### 3.6.3. So sánh kết quả thực nghiệm

So sánh thời gian cấp đông thực nghiệm và thời gian lý thuyết

Các kết quả thực nghiệm thời gian cấp đông thực tế được thể hiện trong bảng 7. Để đánh giá độ chính xác giữa mô hình toán và thực nghiệm, chúng tôi đã sử dụng cách tính sai số ( $\varepsilon_\tau$ ) theo công thức

$$\varepsilon_\tau = |(\tau_m - \tau_{lt}) / \tau_m|, [\%].$$

**Bảng 7.** Kết quả thực nghiệm thời gian cấp đông

Mê	$t_i, [^{\circ}C]$	$t_f, [^{\circ}C]$	$t_c, [^{\circ}C]$	$\tau_{lt}, [p]$	$\tau_m, [p]$	$\varepsilon_\tau, [\%]$
1	25,1	-39	-18	132,52	141,67	6,46
2	18,2	-38	-18	128,76	140,83	8,57
3	23,6	-39	-18	131,26	142,10	8,73
Sai số trung bình thực nghiệm						7,92



Từ Bảng 7, sai số giữa lý thuyết và thực nghiệm dao động từ 6,46% đến 8,73%. Do đó, đây chính là cơ sở khoa học đáng tin cậy để ứng dụng mô hình toán vào trong sản xuất.

#### 4. KẾT LUẬN

Đây là phương pháp đơn giản để dự đoán thời gian đóng băng cho vật ẩm có hình dạng bất kỳ. Mô hình này cho phép tính toán dễ dàng và nhanh chóng dựa trên phương trình cân bằng nhiệt. Sai số phương pháp này so với phương pháp phần tử hữu hạn và thực nghiệm 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 là do các thông số vật lý ( $\lambda, c, \rho, \dots$ ) chưa có số liệu chính xác, ảnh hưởng của thiết bị và điều kiện môi trường thực nghiệm.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

##### 1. Tài liệu tiếng Việt

Đỗ Hữu Hoàng. (2014). *Nghiên cứu mô phỏng và xác định chế độ cấp đông hợp lý cho cá tra Việt Nam*. Luận văn Tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Bách khoa Hà Nội.

Nguyễn Bốn, Võ Chí Chính và Hoàng Minh Tuấn. (2015). Tính toán thời gian cấp đông thực phẩm dạng trụ vô hạn và cầu. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đà Nẵng*, 11, 11-15.

##### 2. Tài liệu tiếng nước ngoài

Castaigne, F. (1985a). Calcul des temps de congélation d'aliments ayant la forme d'une tranche infinie ou d'un parallépipède rectangle. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 18, 212-216.

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. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 18, 137-141.

Cleland, A. C., & Earle, R. L. (1977a). A comparison of analytical and numerical methods for predicting the freezing times of foods. *Food Science*, 42, 1390-1395.

Cleland, A. C., & Earle, R. L. (1977b). The third kind of boundary condition in numerical freezing calculations. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 20, 1020-1029.

Cleland, A. C., & Earle, R. L. (1982). A simple method for prediction of heating and cooling rates in solids of various shapes. *International Journal of Refrigeration*, 5, 98-106.

Cleland, D. J., Cleland, A. C., White, S. D., Love, R. J., Merts, I., East, A., . . . & Paterson, A. H. J. (2010). *Cost-Effective Refrigeration*. Paper presented at the workshop of University of New Zealand.

Cleland, D. J., Love, R. J., Merts, L., & Bronlund, J. E. (2005). *Minimising product weight loss*. Paper presented at the New Zealand technical conference of Institute of refrigeration, heating and air conditioning engineering, Auckland, New Zealand.

Cleland, D. J. (2012). *Food chilling and chilling time prediction, Principles of moisture loss from products*. Paper presented at the workshop of Wisconsin, USA.

De Michelis, A. & Calvelo, A. (1983). Freezing time predictions for brick and cylindrical shaped foods. *Journal of Food Science*, 48, 909-913.

Lovatt, S. J. (2009). *Refrigeration and Energy*. Hamilton: Meat Industry Research Institute, New Zealand.

Mascheroni, R. H., & Calvelo, A. (1982). A simplified model for freezing time calculations in foods. *Journal of Food Science*, 47, 1201-1207.

Nagaoka, J., Takaji, S., & Hohani, S. (1955). Experiments on the freezing of fish in air blast freezer. *Proceeding IX International Congo Refrigeration*, 4, 105-110.

Pham, Q. T. (2014). *Food freezing and thawing calculations*. New York: Springer Briefs in

Food, Health, and Nutrition.  
Plank, R. (1941). Beitrage zur Berechnung und  
Bewertung der Gefrieresch Windikeit von

Lebensmitteln. *Beiheft zur Zeitschrift für die  
gesamte Kalte-Industrie, Reihe 3 Heft, 10, 1-  
16.*

## DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES AND FREEZING TIME OF SQUID (*Loligo chinensis*) BY USING A SIMPLE METHOD

Hoang Minh Tuan

**Corresponding Author:**

**Hoang Minh Tuan**

**Email:** hmtuan@hueic.edu.vn

Hue Industrial College

*Received:* March 3<sup>rd</sup>, 2019

*Accepted:* April 7<sup>th</sup>, 2019

**Keywords:** Multidimensional shape,  
Nonsymmetric, Freezing time, Food  
product, Transient heat transfer

**ABSTRACT**

This article presents a simple method to calculate thermal properties and freezing time of squid by two nonsymmetrical convection boundaries. This model was 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 provided more accurate results than the previous methods, including the finite difference and element methods. Based on these calculations, it was easy to program on computer and allowed to predict fast, simple and accurate freezing time of food. Compared with the finite element method, this method indicated that freezing time should not exceed 10%.