

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN TRUYỀN NHIỆT LẠNH ĐÔNG XÁC ĐỊNH TỈ LỆ NƯỚC ĐÓNG BĂNG VÀ NHIỆT ĐỘ LẠNH ĐÔNG TỐI ƯU CỦA VẬT LIỆU ẨM DẠNG HÌNH TRỤ HỮU HẠN Ở GIAI ĐOẠN 1 TRONG SẤY THĂNG HOA

Nguyễn Tấn Dũng⁽¹⁾, Trịnh Văn Dũng⁽²⁾, Trần Đức Ba⁽²⁾

(1)Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

(2)Trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM

(Bài nhận ngày 08 tháng 11 năm 2009, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 22 tháng 10 năm 2010)

TÓM TẮT: Khi lạnh đông thực phẩm để bảo quản cũng như thực hiện giai đoạn 1 trong điều kiện sấy thăng hoa thì việc xác định nhiệt độ lạnh đông tối ưu là vấn đề phức tạp. Ở bài viết này, sẽ công bố xây dựng một mô hình toán truyền nhiệt lạnh đông, xác định tỉ lệ nước đóng băng theo nhiệt độ lạnh đông của vật liệu ẩm (VLA) dạng hình trụ hữu hạn, kết quả nhận làm cơ sở xác định nhiệt độ lạnh đông tối ưu, xác định chế độ công nghệ giai đoạn 1 trong điều kiện sấy thăng hoa và ứng dụng trong tính toán thiết kế hệ thống lạnh cũng như hệ thống sấy thăng hoa.

Từ khóa: mô hình toán truyền nhiệt lạnh đông, xác định tỉ lệ nước đóng băng, vật liệu ẩm (VLA), dạng hình trụ hữu hạn, hệ thống sấy thăng hoa.

1. GIỚI THIỆU

Khi nghiên cứu xây dựng mô hình toán truyền nhiệt lạnh đông, truyền nhiệt tách ẩm để xác định chế độ công nghệ sấy thăng hoa (STH) thì cần giải quyết các bài toán cho từng giai đoạn 1, 2 và 3 trong điều kiện STH. Ở giai đoạn 1 là giai đoạn lạnh đông VLA để chuyển ẩm từ trạng thái lỏng sang trạng thái rắn. Bài toán đặt ra ở đây, làm thế nào để xác định được nhiệt độ lạnh đông tối ưu. Nếu không xác định được thì khi lạnh đông ở nhiệt độ lớn hơn nhiệt độ lạnh đông tối ưu thì ẩm trong VLA không đóng băng hết, khi đó giai đoạn sấy thăng hoa chỉ thăng hoa phần ẩm đã đóng băng, phần ẩm chưa đóng băng bốc hơi trong giai đoạn sấy chân không và sẽ tổn kém nhiều năng lượng, nhiệt độ sấy cao làm giảm chất lượng sản

phẩm, còn nếu khi lạnh đông ở nhiệt độ nhỏ hơn nhiệt độ lạnh đông tối ưu thì hệ thống lạnh tiêu tốn nhiều năng lượng do thời gian lạnh đông kéo dài, như vậy không hiệu quả kinh tế.

Theo nghiên cứu của *Plank R* (1913) đã đưa ra mô hình xác định thời gian lạnh đông đối với VLA, thịt gia súc dạng tấm phẳng, *Lame, Clapeiron, Shijov G.B* (1931) đã đưa ra mô hình xác định tốc độ nước đóng băng trong VLA, cá và thịt fillet dạng tấm phẳng, *Plank, Veinik* (1937), *Raoult* (1958), *Sbijov G.B* (1967), *Golovkin N.A* (1972), *Luikov, A.V* (1974), [2, 3], *Dennis R. Hledman* (1999) đưa ra mô hình xác định tỉ lệ nước đóng băng đối với VLA dạng tấm phẳng [2, 3, 8, 9, 10]. Tuy nhiên chưa có một mô hình nào thích hợp để có thể áp dụng xác định tỉ lệ nước đóng băng

trong VLA dạng trụ hữu hạn. Chẳng hạn như VLA thủy hải sản nhóm giáp xác: *tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ*.

Vì vậy, việc nghiên cứu xây dựng mô hình toán truyền nhiệt lạnh đông xác định tỉ lệ nước

Một số thuật ngữ

<ul style="list-style-type: none"> • $\bar{\omega}_M(T) \in [0,1]$: tỉ lệ ẩm đóng băng trung bình theo nhiệt độ lạnh đông của vật liệu ẩm (VLA). • $\omega = G_i/G_w \in [0,1]$: tỉ lệ ẩm đóng băng bên trong vật liệu ẩm. • G_i [kg]: khối lượng ẩm đóng băng. • G_w [kg]: khối lượng ẩm có trong vật liệu. • G [kg]: khối lượng vật liệu ẩm. • $W = G_w/G \in (0,1)$: độ ẩm của vật liệu ẩm. • W_0: là độ ẩm ban đầu của VLA. • $D = 2R$ [m]: đường kính VLA • $H = 2h$ [m]: chiều cao của VLA. • r, z [m]: phương bán kính và chiều cao. • T_0 [$^{\circ}\text{C}$]: nhiệt độ tâm của VLA • T_s [$^{\circ}\text{C}$]: nhiệt độ bề mặt của VLA • T_{kt} [$^{\circ}\text{C}$]: nhiệt độ kết tinh của ẩm • T_{er} [$^{\circ}\text{C}$]: nhiệt độ môi trường lạnh đông. • T_f [$^{\circ}\text{C}$]: nhiệt độ ban đầu của VLA. • T_c [$^{\circ}\text{C}$]: nhiệt độ cuối của VLA. • T_{ar} [$^{\circ}\text{C}$]: nhiệt độ trung bình của VLA. • $t_1(r, z, \tau); t_2(r, z, \tau)$: nhiệt độ vùng (I) và (II). • ρ [kgm^{-3}]: khối lượng riêng trung bình của VLA. 	<ul style="list-style-type: none"> • L [kJkg^{-1}]: ẩn nhiệt đóng băng của nước trong VLA. • c [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]: nhiệt dung riêng của chất khô của VLA. • c_1, c_2 [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]: nhiệt dung riêng trung bình của VLA ở vùng (I) ẩm đã đóng băng và ở vùng (II) ẩm chưa đóng băng.. • ρ_1, ρ_2 [kgm^{-3}]: khối lượng riêng trung bình của VLA ở vùng (I) ẩm đã đóng băng và ở vùng (II) ẩm chưa đóng băng. • λ_1, λ_2 [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]: hệ số dẫn nhiệt trung bình của VLA ở vùng (I) đã đóng băng và ở vùng (II) ẩm chưa đóng băng. • a_1, a_2 [m^2s^{-1}]: hệ số dẫn nhiệt độ trung bình của VLA ở vùng (I) ẩm đã đóng băng, VLA ở vùng (II) ẩm chưa đóng băng). • $Bi_{1R}, Bi_{2R}, Bi_{1h}, Bi_{2h}$: chuẩn số Bio theo phương bán kính và chiều cao. • $FO_{1R}, FO_{2R}, FO_{1h}, FO_{2h}$: chuẩn số Fourier theo phương bán kính và chiều cao • α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]: hệ số tỏa nhiệt môi trường lạnh đông.
---	---

2. MÔ HÌNH TOÁN TRUYỀN NHIỆT LẠNH ĐÔNG

2.1. Các giả thiết xây dựng mô hình toán

- Bài toán làm lạnh đông VLA luôn trải qua 3 giai đoạn, xem hình 1

a) Giai đoạn 1: Làm lạnh VLA từ nhiệt độ ban đầu $T_f = T_{VLA} = \text{const}$, xuống nhiệt độ kết tinh ẩm ở bề mặt VLA $T_s = T_{kt} = \text{const}$.

đóng băng và nhiệt độ lạnh đông tối ưu của VLA là cần thiết.

b) Giai đoạn 2: kết tinh ẩm bên trong VLA.

c) Giai đoạn 3: Cân bằng nhiệt, làm giảm nhiệt độ VLA sau khi kết tinh hoàn toàn, xuống nhiệt độ cuối cùng T_c . Vì giai đoạn 1 và giai đoạn 3 chỉ là những bài toán truyền nhiệt trong một pha, vì vậy thời gian thực hiện quá trình tuân định luật Plank, [3, 5, 6, 9, 10].

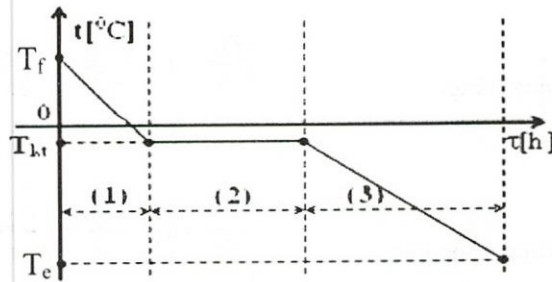
- Vấn đề mà quan tâm ở đây chính là tỉ lệ ẩm đóng băng theo nhiệt độ lạnh đông của VLA, từ đó xác định nhiệt độ lạnh đông tối ưu. Đây là vấn đề phức tạp có nhiều thông số tham gia như: trường nhiệt độ, bề mặt VLA, bề dày lớp kết tinh, bề mặt phân pha, bản chất VLA, phương thức và môi trường thực hiện quá trình kết tinh, ... Chính vì vậy, cần phải xem xét bài toán ở giai đoạn 2 để làm rõ vấn đề đặt ra.

- Các giả thiết đặt ra cần nghiên cứu như sau:

i) VLA nghiên cứu là thực phẩm thủy hải sản nhóm giáp xác là tôm sú

ii) VLA cắt đầu, cắt đuôi được xem là vật liệu rắn đồng nhất gần đúng với hình trụ có kích thước hữu hạn: $D = 2R$, $H = 2h$, xem hình

$$\bar{\omega}_M(\tau) = \bar{\omega}(r, z, \tau) = \frac{1}{V} \iiint_V \omega(r, z, \tau) dV = \frac{1}{\pi R^2 H} \int_0^R \int_{-h}^h \omega(r, z, \tau) 2\pi r dr dz = \frac{2}{\pi R^2 H} \int_0^R \int_0^h \omega(r, z, \tau) 2\pi r dr dz \quad (1)$$



Hình 1. Các giai đoạn làm lạnh đông VLA
 (1): giai đoạn làm lạnh; (2): giai đoạn kết tinh;
 (3): giai đoạn cân bằng nhiệt

2, ẩm phân bố đều, có các mặt đẳng nhiệt đồng tâm.

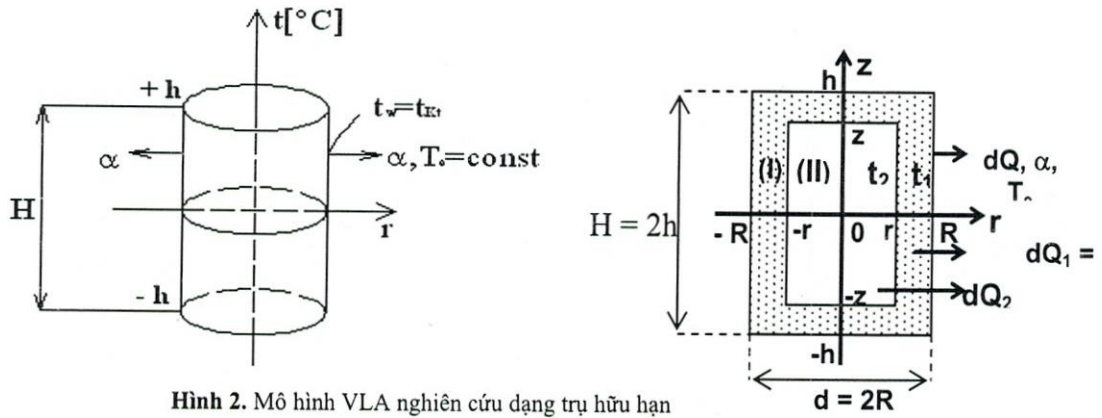
iii) Các thông số nhiệt vật lý: $\rho_i, c_{pi}, a_i, \lambda_i, \dots$ lấy trung bình theo thể tích là hằng số.

iv) Hệ số tỏa nhiệt của môi trường lạnh đông xem như không đổi: $\alpha = \text{const}$.

v) Phương trình cân bằng nhiệt tại bề mặt phân pha tuân theo định luật Leibenzon LS.

- Bài toán đặt ra ở đây là phải xây dựng hàm:

2.2. Mô hình toán



Hình 2. Mô hình VLA nghiên cứu dạng trụ hữu hạn

Phương trình vi phân dẫn nhiệt viết cho vật thể rắn bất kỳ mô tả ở dạng tổng quát:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{w} \text{grad} t = \frac{q_v}{c_p \rho} + a \nabla^2 t \quad (2)$$

Vì lạnh đông vật liệu rắn nên $\alpha_p = 0$ và $\vec{w} = 0$ và không có nguồn nhiệt bên trong nên $q_v = \alpha_p \Delta t + R(-\Delta H) = 0$, VLA là dạng hình

trụ hữu hạn, đồng nhất có các mặt đẳng nhiệt là các mặt trụ đồng tâm. Do đó phương trình (2) được viết như sau:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Phương trình (3) được viết cho 2 vùng, vùng (I) lớp ẩm đóng băng và vùng (II) lớp ẩm chưa đóng băng, xem hình 2, [4].

▪ Vùng (I), lớp ẩm đóng băng:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) \\ r^- \leq r \leq R, z^- \leq z \leq h, \tau \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

▪ Vùng (II), lớp ẩm chưa đóng băng:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 t_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial z^2} \right) \\ 0 \leq r \leq r^+, 0 \leq z \leq z^+, \tau \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

▪ Các điều kiện đơn trị để giải bài toán (4) và (5):

a) Điều kiện đầu: $\tau = 0$ thì $t_1(r, z, 0) = t_1(R, h, 0) = T_s = T_{kt} = \text{const} \quad (6)$

$$t_2(r, z, 0) = t_2(0, 0, 0) = T_0 = \text{const} \quad (7)$$

$$T_{ef} = \text{const} \quad (8)$$

b) Điều kiện biên: $\left. \frac{\partial t_1(r, z, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{\alpha}{\lambda_1} (t_1(R, z, \tau) - T_{ef}); \quad \left. \frac{\partial t_2(r, z, \tau)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (9)$

$$\left. \frac{\partial t_1(r, z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=h} = -\frac{\alpha}{\lambda_1} (t_1(r, h, \tau) - T_{ef}); \quad \left. \frac{\partial t_2(r, z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (10)$$

Với: nhiệt độ thừa ở vùng (I) và (II) như sau:

$$\vartheta_1(r, z, \tau) = t_1(r, z, \tau) - T_{ef} = \vartheta_{r1} \vartheta_{z1} = (t_{r1}(r, \tau) - T_{ef})(t_{z1}(z, \tau) - T_{ef}) \quad (11)$$

$$\vartheta_2(r, z, \tau) = t_2(r, z, \tau) - T_{ef} = \vartheta_{r2} \vartheta_{z2} = (t_{r2}(r, \tau) - T_{ef})(t_{z2}(z, \tau) - T_{ef}) \quad (12)$$

c) Tại bề mặt phân pha:

▪ Theo phương bán kính: $t_1(r^-, z, \tau) = t_2(r^+, z, \tau) = T_{Kt}$ (13)

▪ Theo phương chiều cao: $t_1(r, z^-, \tau) = t_2(r, z^+, \tau) = T_{Kt}$ (14)

▪ Mật độ dòng nhiệt theo r: $q_R = -\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial r} \right)_{r=r^-} = -\lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial r} \right)_{r=r^+} = \alpha \Delta t_R$ (15)

▪ Mật độ dòng nhiệt theo z: $q_h = -\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial z} \right)_{z=z^-} = -\lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial z} \right)_{z=z^+} = \alpha \Delta t_h$ (16)

d) Phương trình cân bằng nhiệt tại bề mặt tiếp xúc vùng (I) và (II):

$$dQ_F = dQ_1 + dQ_2 \quad (17)$$

Trong đó: dQ_F [kJ]: tổng lượng nhiệt trao đổi cần lấy ra khi làm lạnh đông VLA; dQ_1 [kJ]: lượng nhiệt cần lấy ra khi làm kết tinh âm vùng (I); dQ_2 [kJ]: lượng nhiệt từ vùng (II) truyền qua vùng (I) trao đổi với môi trường lạnh đông để làm giảm nhiệt độ ở vùng (II).

$$dQ_1 = LdG_{ndb} = Ld(GW_0\omega) = LGW_0d\omega = LW_0\rho\pi R^2 Hd\omega_M \quad (18)$$

$$dQ_2 = -\lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial r} \right)_{r=r^+} 2\pi r Hd\tau - \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial z} \right)_{z=z^+} \pi r^2 d\tau \quad (19)$$

$$dQ_F = -\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial r} \right)_{r=r^-} 2\pi r Hd\tau - \lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial z} \right)_{z=z^-} \pi r^2 d\tau \quad (20)$$

Từ phương trình (18), (19) và (20) thay vào (17) sẽ thu được:

$$\frac{d\omega_M}{d\tau} = \frac{1}{LW_0H\rho R^2} \left[-\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial r} \right)_{r=r^-} + \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial r} \right)_{r=r^+} \right] 2rH + \left[-\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial z} \right)_{z=z^-} + \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial z} \right)_{z=z^+} \right] r^2 \quad (21)$$

Phương trình (21) là cơ sở xác định xác định tỉ lệ nước đóng băng trong quá trình lạnh đông cũng như ở giai đoạn 1 trong STH.

2.3. Giải mô hình toán

Giải phương trình (4): bằng phương pháp phân ly biến số Fourier, các hằng số tích phân được xác định từ điều kiện biên, qua biến đổi sẽ được nghiệm như sau:

$$t_1(r, z, \tau) = T_{ef} + (T_{kt} - T_{ef}) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_m A_n J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \cos\left(\mu_m \frac{z}{h}\right) \exp\left[-\left(\frac{a_1 \tau}{\eta_1}\right)\right] \quad (22)$$

$$\text{Với: } A_n = \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]}; \quad A_m = \frac{2 \sin \mu_m}{[\mu_m + \sin \mu_m \cos \mu_m]}; \quad \frac{1}{\eta_1} = \frac{\mu_n^2}{R^2} + \frac{\mu_m^2}{h^2}$$

$$r^- \leq r \leq R, \quad z^- \leq z \leq h, \quad \tau \geq 0$$

$$\mu_n : \text{ là nghiệm của phương trình đặc trưng: } \frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi_{1R}} \quad (23)$$

$$\mu_m : \text{ là nghiệm của phương trình đặc trưng: } \cot g \mu_m = \frac{\mu_m}{Bi_{1h}} \quad (24)$$

$$Bi_{1h} : \text{ chuẩn số Bio vùng I theo phương z: } Bi_{1h} = \frac{\alpha h}{\lambda_1} \quad (25)$$

$$Fo_{1h} : \text{ chuẩn số Fourier vùng I theo phương z: } Fo_{1h} = \frac{a_1 \tau}{h^2} \quad (26)$$

$$Bi_{1R} : \text{ chuẩn số Bio vùng I theo phương r: } Bi_{1R} = \frac{\alpha R}{\lambda_1} \quad (27)$$

$$Fo_{1R} : \text{ chuẩn số Fourier vùng I theo phương r: } Fo_{1R} = \frac{a_1 \tau}{R^2} \quad (28)$$

$J_0(\mu_n), J_1(\mu_n)$: là các hàm Bessel loại 1 bậc 0, 1. [7]

$$J_0(x) = 1 - \left(\frac{1}{2}x\right)^2 + \frac{\left(\frac{1}{2}x\right)^4}{1^2 2^2} - \frac{\left(\frac{1}{2}x\right)^6}{1^2 2^2 3^2} + \frac{\left(\frac{1}{2}x\right)^8}{1^2 2^2 3^2 4^2} - \dots; \quad (29)$$

$$J_1(x) = -J'_0(x) = \frac{1}{2}x - \frac{\left(\frac{1}{2}x\right)^3}{1^2 2} + \frac{\left(\frac{1}{2}x\right)^5}{1^2 2^2 3} - \frac{\left(\frac{1}{2}x\right)^7}{1^2 2^2 3^2 4} + \dots \quad (30)$$

Giải phương trình (5): Tương tự như đơn trị, cuối cùng thu được công thức nghiệm trên, tìm các hệ số tích phân bằng các điều kiện như sau:

$$t_2(r, z, \tau) = T_{kt} + (T_0 - T_{kt}) \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A_p A_q J_0\left(\mu_p \frac{r}{R}\right) \cos\left(\mu_q \frac{z}{h}\right) \exp\left[-\left(\frac{a_2 \tau}{\eta_2}\right)\right] \quad (31)$$

$$\text{Với: } A_p = \frac{2J_1(\mu_p)}{\mu_p [J_0^2(\mu_p) + J_1^2(\mu_p)]}; \quad A_q = \frac{2 \sin \mu_q}{[\mu_q + \sin \mu_q \cos \mu_q]}; \quad \frac{1}{\eta_2} = \frac{\mu_p^2}{R^2} + \frac{\mu_q^2}{h^2}$$

$$0 \leq r \leq r^+, 0 \leq z \leq z^+, \tau \geq 0$$

$$\mu_p, : \text{ là nghiệm của phương trình đặc trưng: } \frac{J_0(\mu_p)}{J_1(\mu_p)} = \frac{\mu_p}{Bi_{2R}} \quad (32)$$

$$\mu_q : \text{ là nghiệm của phương trình đặc trưng: } \cot g \mu_q = \frac{\mu_q}{Bi_{2h}} \quad (33)$$

$$Bi_{2h} : \text{ chuẩn số Bio vùng I theo phương } z: Bi_{2h} = \frac{\alpha h}{\lambda_2} \quad (34)$$

$$Fo_{2h} : \text{ chuẩn số Fourier vùng I theo phương } z: Fo_{2h} = \frac{a_2 \tau}{h^2} \quad (35)$$

$$Bi_{2R} : \text{ chuẩn số Bio vùng II theo phương } r: Bi_{2R} = \frac{\alpha R}{\lambda_2} \quad (36)$$

$$Fo_{2R} : \text{ chuẩn số Fourier vùng II theo phương } r: Fo_{2R} = \frac{a_2 \tau}{R^2} \quad (37)$$

- **Nhiệt độ trung bình của VLA** (kể cả 2 vùng (I), (II)): theo *Luikov A.V.* et al. (1961) được xác định theo công thức sau [10, 11].

Thay phương trình (22), (31) vào phương trình (21) sẽ nhận được:

$$\bar{T}(\tau) = \frac{1}{2R^2 h} \int_0^R \int_0^h (t_1(r, z, \tau) + t_2(r, z, \tau)) 2r dr dz \quad (38)$$

2.4. Mô hình toán xác định tỉ lệ nước đóng băng

$$\begin{aligned} \omega_M(r, z, \tau) = & \frac{1}{\rho R^2 H W_0 L} \left(\left[c_1 \rho_1 (T_{Kt} - T_{ef}) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m \frac{\mu_n \eta_l}{R} J_1 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \cos \left(\mu_m \frac{z}{h} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_1 \tau}{\eta_l} \right) \right] \right. \right. \\ & \left. \left. - c_2 \rho_2 (T_0 - T_{Kt}) \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A_p A_q \frac{\mu_p \eta_2}{R} J_1 \left(\mu_p \frac{r}{R} \right) \cos \left(\mu_q \frac{z}{h} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_2 \tau}{\eta_2} \right) \right] \right] 2Hr + \right. \\ & \left. \left[c_1 \rho_1 (T_{Kt} - T_{ef}) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m \frac{\mu_n \eta_l}{h} J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \sin \left(\mu_m \frac{z}{h} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_1 \tau}{\eta_l} \right) \right] \right. \right. \\ & \left. \left. - c_2 \rho_2 (T_0 - T_{Kt}) \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A_p A_q \frac{\mu_q \eta_2}{h} J_0 \left(\mu_p \frac{r}{R} \right) \sin \left(\mu_q \frac{z}{h} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_2 \tau}{\eta_2} \right) \right] \right] r^2 \right) \end{aligned} \quad (39)$$

Như vậy, từ phương trình (39) thay vào (1) sẽ xác định được tỉ lệ nước đóng băng trung bình của ẩm bên trong VLA theo thể tích:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_M(\tau) = & \frac{4}{\rho R^5 W_0 L} \left[c_1 \rho_1 (T_{kt} - T_{ef}) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m \frac{\mu_n \eta_1}{\mu_m} \left(\int_0^R r^2 J_1 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr \right) \sin(\mu_m) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_1 \tau}{\eta_1} \right) \right] \right. \\ & \left. - c_2 \rho_2 (T_0 - T_{kt}) \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A_p A_q \frac{\mu_p \eta_2}{\mu_q} \left(\int_0^R r^2 J_1 \left(\mu_p \frac{r}{R} \right) dr \right) \sin(\mu_q) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_2 \tau}{\eta_2} \right) \right] \right] \\ & + \frac{1}{\rho R^4 h^2 W_0 L} \left[c_1 \rho_1 (T_{kt} - T_{ef}) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m \eta_1 \left(\int_0^R r^3 J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) dr \right) (1 - \cos(\mu_m)) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_1 \tau}{\eta_1} \right) \right] \right. \\ & \left. - c_2 \rho_2 (T_0 - T_{kt}) \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A_p A_q \eta_2 \left(\int_0^R r^3 J_0 \left(\mu_p \frac{r}{R} \right) dr \right) (1 - \cos(\mu_q)) \left[1 - \exp \left(-\frac{a_2 \tau}{\eta_2} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (40)$$

Trong đó: $\tau = f(T) \Leftrightarrow T = g(\tau)$: nhiệt độ lạnh đông trung bình của VLA là một hàm thời gian làm lạnh đông của theo phương trình (38).

2.5.. Xác định tỉ lệ nước đóng băng bằng thực nghiệm

Nước trong VLA đóng băng khi nhiệt độ VLA nhỏ hơn nhiệt độ kết tinh ($T \leq T_{kt} [^{\circ}C]$).

Để xác định tỉ lệ nước đóng băng bằng thực nghiệm thì phải sử dụng phương pháp gián tiếp, xác định nhiệt dung riêng của VLA sau đó thay vào phương trình (41) xác định tỉ lệ nước đóng băng [13, 14]:

$$\bar{\omega}_E(\tau) = \frac{c_n W_a + c_{ck} (1 - W_a) - c}{W_a (c_n - c_{nd})} = \phi_1 - \frac{UI\tau}{\phi_2 G(T_c - T_d)} \quad (41)$$

Trong đó:

$$\phi_1 = \frac{c_n W_a + c_{ck} (1 - W_a)}{W_a (c_n - c_{nd})};$$

$$\phi_2 = W_a (c_n - c_{nd}) [Jkg^{-1}K^{-1}]$$

Với: $c_n = 4184.7 + 2.74T$, $[Jkg^{-1}K^{-1}]$: nhiệt dung riêng của nước ở $T [^{\circ}C]$; $c_{nd} = 2090 + 7.79T$, $[Jkg^{-1}K^{-1}]$: nhiệt dung riêng của nước đá ở $T [^{\circ}C]$; $c_{ck} [Jkg^{-1}K^{-1}]$: nhiệt dung riêng của chất khô trong VLA; $W_a [%]$: độ ẩm tự nhiên của VLA; $c [Jkg^{-1}K^{-1}]$: nhiệt dung riêng của VLA, xác định bằng thực nghiệm, [1], $U [V]$: điện áp vôn kế, $I [A]$: dòng điện âm pe kế, $\tau =$

$\tau_2 - \tau_1 [s]$: thời gian đốt nóng điện trở, $T_d = T_1 = T_2 = T_3$ tại thời điểm τ_1 , $T_c = T_1 = T_2 = T_3$ tại thời điểm τ_2 , xem **hình 3**.

3. DỤNG CỤ - THIẾT BỊ, VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Dụng cụ và thiết bị khảo sát

Dụng cụ và thiết bị xác định tỉ lệ nước đóng băng tôm sú gồm các thiết bị sau, xem hình 3.

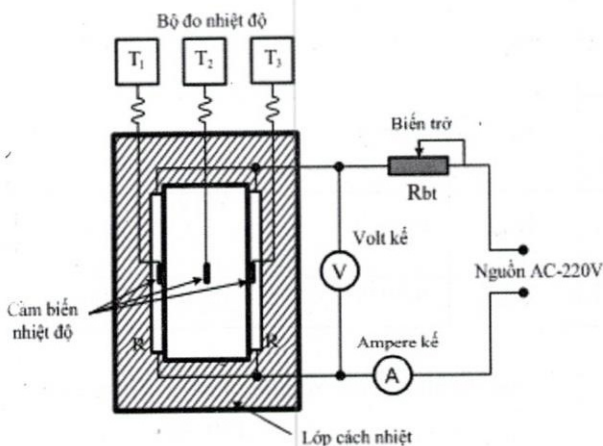
1. Cân khối lượng, cân điện tử (Satoriusbasic Type BA310S), có thang đo (0 ÷ 350)g, sai số của cân khối lượng cho phép $\pm 0.1g = \pm 0.0001 kg$.

2. Dụng cụ đo nhiệt độ: dùng các bộ cảm biến hiển thị đo nhiệt độ (Dual Digital Thermometer), có thang đo $(-50 \div 70)^{\circ}\text{C}$, sai số nhiệt độ cho phép $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$.

3. Hệ thống STH DS-3 có giai đoạn lạnh đông ngay trong buồng thăng hoa, nhiệt độ lạnh đông $(-50 \div -45)$, xem hình 4.

4. Ngoài ra, còn có các dụng cụ và thiết bị kèm theo.

➤ Súng bắn nhiệt độ (Smart sensor, infrared thermometer: $-55^{\circ}\text{C} \div 180^{\circ}\text{C}$) và ba bộ cảm biến hiển thị đo nhiệt độ VLA, sai số cho phép $\pm 0.008^{\circ}\text{C}$ và $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$.



Hình 3. Sơ đồ mạch điện của thiết bị xác định nhiệt dung riêng VLA

3.2. Vật liệu nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là tôm sú, có thành phần hóa học cơ bản của nguyên liệu, [1, 4, 8, 9].

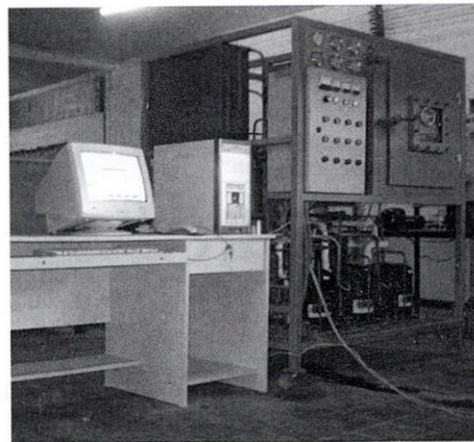
3.3. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu là phương pháp tiếp cận hệ thống xây dựng mô hình toán và thực nghiệm kiểm tra mô hình toán.

➤ Hai điện trở dạng tấm lá dùng để đốt nóng cung cấp nhiệt lượng cho quá trình đo.

➤ Một biến trở thay đổi điện áp rơi trên hai điện trở đốt nóng.

➤ Một Volt kế đo điện áp rơi trên hai điện trở cấp nhiệt, có thang đo $(0 \div 110)\text{V}$, sai số của Volt kế cho phép $\pm 1\text{V}$. Một Ampe kế đo dòng điện qua hai điện trở đốt nóng, có thang đo $(0 \div 2)\text{A}$, sai số của Ampe kế cho phép $\pm 10\text{mA}$. Một đồng hồ đo thời gian, sai số cho phép $\pm 0.001\text{s}$



Hình 4. Hệ thống sấy thăng hoa DS-3 tự lạnh đông $(-50 \div -45)^{\circ}\text{C}$

Để tính toán phương trình (40) công cụ sử dụng là phương pháp số, đồng thời viết chương trình tính toán trên máy tính bằng ngôn ngữ Visual Basic 6.0 [8, 9]

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

4.1. Kết quả nghiên cứu

Các thông số nhiệt – vật lý của tôm sú dùng trong tính toán mô hình truyền nhiệt –

lạnh đông, xác định tỉ lệ nước đóng băng tham khảo [8, 9], xem *bảng 1*.

Bảng 1. Các thông số nhiệt – vật lý của tôm sú dùng trong truyền nhiệt – lạnh đông

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Tham khảo	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Tham khảo
W_0	74.67	%	Data 2007, [1]	ρ_1	838.48	kgm^{-3}	Data 2007, [1]
R	4.5E-03	m	Data 2007, [1]	ρ_2	839.34	kgm^{-3}	Data 2007, [1]
h	37.5E-03	m	Data 2007, [1]	λ_1	1.084	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Data 2007, [1]
T_{kt}	-1.21	$^{\circ}\text{C}$	Data 2007, [1]	λ_2	0.562	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Data 2007, [1]
T_0	5.12	$^{\circ}\text{C}$	Data 2007, [1]	c_1	2.574	$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	Data 2007, [1]
T_{ef}	-45	$^{\circ}\text{C}$	Data 2007, [1]	c_2	3.570	$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	Data 2007, [1]
L	333.6	kJkg^{-1}	Perry et al. 1992	α	7.612	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	Data 2007, [2]
a_1	5.0226E-07	m^2s^{-1}	Calculation [2]	Bi_{1R}	0.0316		Calculation [2]
a_2	1.8756E-07	m^2s^{-1}	Calculation [2]	Bi_{1h}	0.2633		Calculation [2]
c_{ek}	1.7454	$\frac{\text{kJkg}^{-1}}{\text{K}^{-1}}$	Data 2007, [1]	Bi_{2R}	0.0610		Calculation [2]
ρ	838.91	kgm^{-3}	Data 2007, [1]	Bi_{2h}	0.5079		Calculation [2]

4.1.1. Giải phương trình đặc trưng (23), (24), (32) và (33) [8, 9]

- Thay giá trị các giá trị thông số nhiệt - vật lý ở bảng 1 vào phương trình đặc trưng (23), (24), (32), (33) xác định được nghiệm của phương trình đặc trưng $\mu_n, \mu_m, \mu_p, \mu_q$, chọn các giá trị n, m, p, q sao cho chuỗi số (21) và (31)

hội tụ nhanh, các số hạng kế tiếp khi $n = n + 1, m = m + 1, p = p + 1, q = q + 1$ có giá trị vô cùng bé, khi loại bỏ thì sai số không đáng kể (giải các phương trình đặc trưng này bằng chương trình được viết trên máy tính). Kết quả nhận được như sau, xem bảng 2:

Bảng 2. Nghiệm phương trình đặc trưng (23), (24), (32) và (33)

j	1	2	3	4	5	6	Số nghiệm	
μ_{nj}	0.2504	3.8399	7.0201	13.3261			n = 4	j = 1 ÷ n
μ_{mj}	0.4917	3.2231	6.3248	9.4526	12.5873		m = 5	j = 1 ÷ m
μ_{pj}	0.3465	3.8476	7.0243	13.3283			p = 4	j = 1 ÷ p

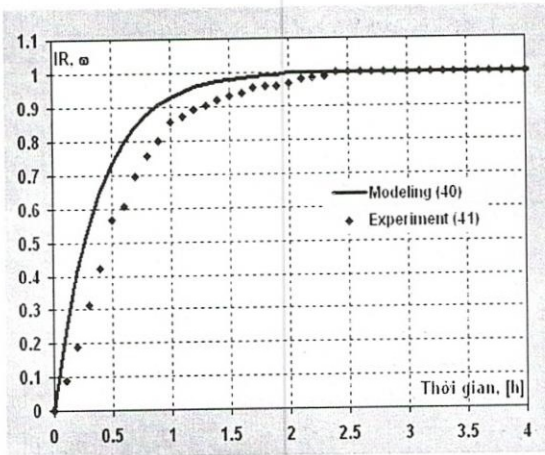
μ_{qj}	0.6576	3.2946	6.3628	9.4783	12.6066	15.7402	$q = 6$	$j = 1 \div q$
------------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	----------------

4.1.2. Kiểm tra mô hình toán

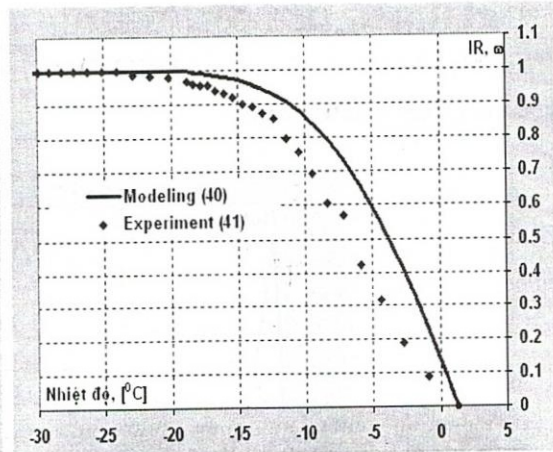
- Thực nghiệm xác định U [V], I [A], τ [s] và giá trị c_{ck} ở bảng 1, tất cả thay vào phương trình (41) xác định tỉ lệ nước đóng băng bằng thực nghiệm, rồi mô phỏng trên đồ thị, xem hình 5, 6.

- Thay giá trị các thông số nhiệt - vật lý ở bảng 1 và nghiệm phương trình đặc trưng của

các phương trình (23), (24), (32), (33) ở bảng 2 vào mô hình toán (40), sau đó tính toán bằng chương trình, kết quả tính toán được mô phỏng trên đồ thị như sau, xem hình 5, 6. (IR (Ice ratio): tỉ lệ nước đóng băng; Time, Temperature: thời gian và nhiệt độ lạnh đông).



Hình 5. Quan hệ giữa tỉ lệ nước đóng băng và thời gian lạnh đông



Hình 6. Quan hệ giữa tỉ lệ nước đóng băng và nhiệt độ lạnh đông

Ở hình 5, 6 có thể thấy rằng, tỉ lệ nước đóng băng theo thời gian lạnh đông hoặc theo nhiệt độ lạnh đông tính toán từ mô hình (40) (*Modeling*) và xác định bằng thực nghiệm (41) (*Experiment*) có dạng gần giống nhau, có thể chấp nhận được. Tuy nhiên, để mô hình có thể sử dụng được thì cần phải hiệu chỉnh mô hình cho phù hợp với thực nghiệm.

4.1.3. Xác định sai số và hệ số hiệu chỉnh mô hình

4.1.3.1. Xác định sai số của mô hình

- Sai số tương đối giữa số liệu tính toán từ mô hình ($\bar{\omega}_M(T)$ hay $\bar{\omega}_M(\tau)$) với số liệu thực nghiệm ($\bar{\omega}_E(T)$ hay $\bar{\omega}_E(\tau)$) xác định tỉ lệ nước đóng băng có thể xác định theo phương trình sau, [8, 9, 10, 11, 12]:

$$SS(\bar{\omega}(T)) = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{\omega}_E(T) - \bar{\omega}_M(T)| \Delta T}{\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_M(T) \Delta T} \cdot 100\% = \frac{\left| \int_{T_{i=1}}^{T_{i=n}} \bar{\omega}_E(T) dT - \int_{T_{i=1}}^{T_{i=n}} \bar{\omega}_M(T) dT \right|}{\int_{T_{i=1}}^{T_{i=n}} \bar{\omega}_M(T) dT} \cdot 100\% \quad (42)$$

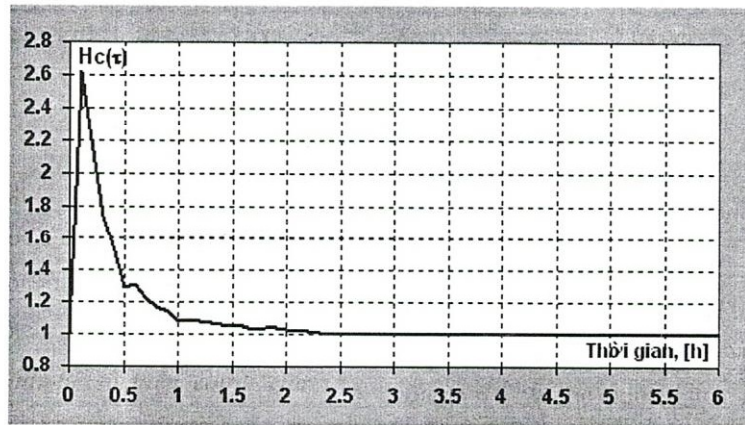
Từ phương trình (42) thay số liệu đã được tính toán theo chương trình viết bằng Visual Basic 6.0 và mô phỏng trên máy tính, hình 5, 6 xác định được sai số của mô hình ở bảng 3.

4.1.3.2. Xác định hệ số hiệu chỉnh của mô hình

- Hệ số hiệu chỉnh của mô hình là A = const được xác định như sau:

$$Hc(\tau) = \frac{\bar{\omega}_M(\tau)}{\bar{\omega}_E(\tau)} \quad (43)$$

Từ phương trình (43) thay số liệu đã được tính toán theo chương trình viết bằng Visual Basic 6.0 và mô phỏng trên máy tính, nhận được kết quả hình 7.



Hình 7. Biểu diễn hàm Hc(τ) theo thời gian τ [h]

Nếu Hc(□) = 1 có nghĩa là đường biểu diễn tỉ lệ nước đóng băng tính toán từ mô hình trùng với thực nghiệm, điều này chúng ta luôn mong muốn và mô hình toán thiết lập chính xác, trên đồ thị hình 7 ta thấy Hc(□) biến thiên nằm phía trên đường Hc(□) = 1, do đó mô hình

toán được thiết lập chưa đúng với thực thực nghiệm. Vì vậy, cần phải nhân thêm hệ số hiệu chỉnh và mô hình (40), giá trị hệ số hiệu chỉnh chính là diện tích trung bình của hình thang cong biểu diễn ở hình 7, được xác định như sau, [8, 9, 11]:

$$A = \frac{1}{B} : \text{hệ số hiệu chỉnh của mô hình.} \quad (44)$$

Như vậy:
$$\bar{\omega}_E(\tau) = A \bar{\omega}_M(\tau) = \frac{1}{B} \bar{\omega}_M(\tau) \Leftrightarrow \bar{\omega}_E(T) = A \bar{\omega}_M(T) = \frac{1}{B} \bar{\omega}_M(T) \quad (45)$$

Hệ số B được xác định như sau:

$$B = \sum_{i=0}^n \frac{1}{\tau_{i+1} - \tau_i} \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} Hc(\tau) d\tau = \sum_{i=0}^n \frac{1}{\tau_{i+1} - \tau_i} \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \frac{\bar{\omega}_M(\tau)}{\bar{\omega}_E(\tau)} d\tau \quad (46)$$

Từ phương trình (44) và (46) thay số liệu đã được tính toán ở hình 7 sẽ xác định được hệ số hiệu chỉnh ở bảng 3.

Bảng 3. Sai số và hệ số hiệu chỉnh của mô hình toán

Sai số	SS($\bar{\omega}(T)$) [%]	A	B
Hệ số hiệu chỉnh	15.61	0.8439	1.185

4.1.4. Nhiệt độ lạnh đông tối ưu của VLA ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa

Từ kết quả tính toán và mô phỏng tỉ lệ nước đóng băng trung bình theo nhiệt độ của VLA tóm sù ở hình 5, 6 làm cơ sở xác định được nhiệt độ lạnh đông tối ưu của VLA ở giai

đoạn 1 trong sấy thăng hoa. Nhiệt độ lạnh đông tối ưu của quá trình lạnh đông là nhiệt độ mà tại đó nước trong VLA đóng băng hoàn toàn, có nghĩa: khi $T_{ar} = T_{opt}$ thì $\bar{\omega}_M(T) = \bar{\omega}_E(T) = 1$ (hay 100%), sau khi tính toán sẽ nhận được kết quả ở bảng 4, [8, 9].

Bảng 4. Nhiệt độ lạnh đông tối ưu của VLA ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa

Nhiệt độ bề T_s [$^{\circ}C$]	Nhiệt độ tâm T_0 [$^{\circ}C$]	Nhiệt độ trung bình T_{ar} [$^{\circ}C$]	Tỉ lệ nước đóng băng $\bar{\omega}_M(T) = \bar{\omega}_E(T)$
-34.57	-11.83	-25.32	1.0000 (100%)

4.2. Bàn luận

▪ Từ kết quả nghiên cứu ở hình 5, 6 cho thấy rằng, đường biểu diễn tỉ lệ nước đóng băng trung bình (theo thể tích) thay đổi theo nhiệt độ tính toán từ mô hình (40) và thực nghiệm (41) có dạng giống nhau và sai số của mô hình (40) so với thực nghiệm (41) là 15.61% tương đối lớn nhưng hoàn toàn có thể chấp nhận được và có thể ứng dụng vào thực tế khi mô hình đã được hiệu chỉnh. Sai số này là do các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt lạnh đông như sau:

✓ Các thông số nhiệt - vật lý và vật lý của tóm sù như: $\lambda_j, \rho_j, c_j, \dots$ lấy theo trung bình thể tích và xem nó không thay đổi để thuận lợi cho việc giải bài toán truyền nhiệt lạnh đông, nhưng thực tế các thông số này luôn thay đổi theo nhiệt.

✓ Ẩn nhiệt đóng băng của ẩm khi tính toán xem như là ẩn nhiệt đóng băng của nước nguyên chất và không thay đổi theo nhiệt độ, nhưng thực tế ẩn nhiệt đóng băng của ẩm trong tóm sù không phải là ẩn nhiệt đóng băng của nước nguyên chất, và ẩn nhiệt đóng băng luôn

thay đổi theo nhiệt độ, đây là một trong những yếu tố dẫn đến sai số của mô hình

✓ Mô hình toán xây dựng được xem gần đúng với hình trụ hữu hạn có: $D = 2R = 9 \times 10^{-3}$ [m]; $H = 2h = 75 \times 10^{-3}$ [m], thực tế kích thước của tôm sú không phải là hình trụ. Vì vậy điều kiện đối xứng khi giải bài toán không đảm bảo, đây là những yếu tố cơ bản dẫn đến sai số của mô hình.

✓ Mặt khác ẩm (nước) bên trong VLA không phải là nước nguyên chất mà nó ở dạng dung dịch (gồm các chất tan là các khoáng chất, vitamine, axit amine,...v.v) và khi ẩm kết tinh ẩm tách ra khỏi dung dịch thì làm nồng độ chất tan tăng, điểm kết tinh ẩm càng lúc càng giảm. Điều đó chứng tỏ rằng khi nhiệt độ tâm đạt tới nhiệt độ kết tinh ($T_0 = T_{kt}$) thì tỉ lệ ẩm đóng băng $\bar{\omega}(T)$ không thể đạt 100%.

▪ Nếu sử dụng mô hình dạng trụ dài vô hạn hay dạng tấm phẳng [2, 3, 8, 9, 10] để tính toán tỉ lệ nước đóng băng trung bình theo nhiệt độ lạnh đông của tôm sú thì sai số của mô hình dạng trụ dài vô hạn là $SS(\bar{\omega}(T)) = 29.41\%$, còn đối với mô hình dạng tấm phẳng là $SS(\bar{\omega}(T)) = 36.14\%$, với sai số quá lớn nên khi sử dụng hai loại mô hình dạng dạng trụ dài vô hạn và dạng tấm phẳng là không thể phù hợp.

▪ Việc giải mô hình truyền nhiệt lạnh đông cho phép xác định được nhiệt độ lạnh đông tối ưu, xem **bảng 4**, từ kết quả nhận được ở bảng 4 cho thấy rằng, nhiệt độ lạnh đông tối ưu của tôm sú hoàn toàn phù hợp với thực tế sản xuất (nhiệt độ môi trường lạnh đông -45°C ;

nhiệt độ bề mặt -35°C , nhiệt độ tâm -12°C), [8, 9, 14]

▪ Do sai số giữa mô hình toán (40) và thực nghiệm (41), vì vậy để mô hình có thể sử dụng được trong thực tế sản xuất chính xác hơn thì cần phải hiệu chỉnh mô hình toán (40), từ kết quả tính toán xác định được hệ số hiệu chỉnh của mô hình ở **bảng 3** [9, 10, 12].

5. KẾT LUẬN

▪ Từ kết quả nghiên cứu cho thấy rằng, mô hình toán (40) đã được thiết lập hoàn toàn có thể áp dụng được trong thực tế sản xuất.

▪ Mô hình toán (40) xác định tỉ lệ nước đóng băng của tôm sú có tính gợi mở, nó có thể áp dụng cho tôm bạc, tôm thẻ nói riêng cũng như các loại thực phẩm có kích hình học là dạng hình trụ hữu hạn nói chung, khi áp dụng chỉ cần xác định các thông số nhiệt vật lý của chúng rồi thay vào phương trình (40) để tính toán và nhận được kết quả, tuy nhiên sai số mô hình tương đối lớn nhưng có thể chấp nhận được.

▪ Hiện nay, các nhà máy, xí nghiệp chế biến lạnh đông thực phẩm thông thường ở nhiệt độ khoảng $(-45 \div -30)^{\circ}\text{C}$ tùy theo loại sản phẩm, sau đó lấy mẫu và kiểm tra vi sinh, thấy vi sinh vật bị giết chết hoặc mất khả năng sinh trưởng và phát triển là đạt, [1, 2, 5, 6] và không biết khoảng nhiệt độ lạnh đông nào là thích hợp. Vì thế việc nghiên cứu đưa ra mô hình toán xác định tỉ lệ ẩm đóng băng và nhiệt độ lạnh đông tối ưu là một giải pháp về mặt công nghệ thiết thực, qua đó cho phép xác định chế độ công nghệ ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa.

**BUILDING MATHEMATICAL MODEL OF FREEZING HEAT TRANSFER TO
DETERMINE ICE RATIO AND OPTIMAL FREEZING TEMPERATURE OF
HUMID MATERIALS IN THE FIRST STAGE IN CONDITION OF FREEZE
DRYING**

Nguyen Tan Dzung⁽¹⁾, Trinh Van Dzung⁽²⁾, Tran Duc Ba⁽²⁾

(1) University of Technical Education Ho Chi Minh City VN

(2) University of Technology, VNU-HCM

ABSTRACT: Determine optimal freezing temperature for freeze drying and preservation of foods is a complicated process. In this article, we present research results of a mathematical model in describing freezing heat transfer to determine ice ratio of humid material following freezing temperature, the calculated results was used in dertermining optimal frezing temperature, finding technical regime for the first stage of freeze drying and designing of freeze drying system.

Keys word: Freezing model, freezing heat transfer model, ice ratio.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Tấn Dũng - Trịnh Văn Dũng - Trần Đức Ba, *Nghiên cứu khảo sát các tính chất nhiệt - vật lý của nhóm giáp xác (tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ) ảnh hưởng đến quá trình cấp nhiệt và tách ẩm trong sấy thăng hoa*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ thủy sản, số 2, (2008).
- [2]. Nguyễn Tấn Dũng - Trần Đức Ba, *Công nghệ lạnh*, Tập 1, NXB ĐHQG Tp.HCM, (2007).
- [3]. Phạm Văn Bôn, *Truyền nhiệt và thiết bị truyền nhiệt*, Tập 5, Quyển 1, 2, NXB ĐHQG Tp.HCM, (2004).
- [4]. Nguyễn Tấn Dũng, *Chuyên đề 2 CDTS*, Đại học Bách Khoa, (2009).
- [5]. Gebhart B., *Heat Conduction and Mass Diffusion*, McGraw – Hill, New York (1992).
- [6]. Holman J., *Heat Transfer*, McGraw – Hill, New York (1992).
- [7]. Murray R. Spiegel, *Các công thức và các bảng toán học cao cấp* (người dịch: Ngô Ánh Tuyết), NXB Giáo dục, (1997).
- [8]. Nguyễn Tấn Dũng, *Chuyên đề 1 CDTS*, Đại học Bách Khoa, (2008).
- [9]. Luikov, A.V. *Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies*. International Journal of Heat and mass transfer, (1975).
- [10]. Luikov, A.V. *Equations applicable to Sublimation drying*, Journal of Food Engineering, (1972).
- [11]. Pikal, M.J.; M.L.; Shah, S. *Mass and Heat transfer in vial freeze drying of*

- pharmaceuticals: role of the vial. J. Pharm. Sci. Journal of Food Engineering, (1984).*
- [12].Liapis, A.I., Bruttini, R. and Pikal, M.J. *Research and development needs and opportunities in freeze drying. Drying Technology, Journal of Food Engineering, (1996).*
- [13].Haugvalstad.G.H - Skipnes.D - Sivertsvik.M, *Food free from preservative, Journal of Food Engineering, (2005).*
- [14].Ludger O. Figura, Arthur A. Teixeira, *Physical properties – Measurement and Applications (in Freeze – Drying), Journal of Food Engineering, Germany (2007).*