

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH TỈ LỆ NƯỚC ĐÓNG BĂNG VÀ NHIỆT ĐỘ LẠNH ĐÔNG THÍCH HỢP CỦA VẬT LIỆU ẨM Ở GIAI ĐOẠN 1 TRONG SẤY THĂNG HOA

Nguyễn Tấn Dũng⁽¹⁾, Trịnh Văn Dũng⁽²⁾, Trần Đức Ba⁽³⁾

(1) Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM, (2) Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

(3) Trường Đại học Công Nghiệp Tp.HCM

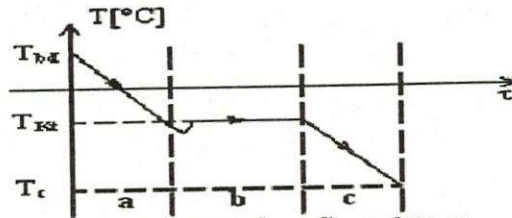
(Bài nhận ngày 12 tháng 05 năm 2008, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 07 tháng 08 năm 2008)

TÓM TẮT: Sấy thăng hoa là một quá trình kỹ thuật khá phức tạp bao gồm ba giai đoạn: **giai đoạn 1:** làm lạnh đông vật liệu ẩm (VLA) chuyển toàn bộ ẩm tự do trong VLA từ trạng thái lỏng sang trạng thái rắn; **giai đoạn 2:** sấy thăng hoa tạo ra môi trường sấy có nhiệt độ và áp suất thấp hơn trạng thái ba thể (0.0098°C ; 4.58mmHg) để ẩm trong vật liệu từ trạng thái rắn thăng hoa sang trạng thái hơi, kết thúc giai đoạn này ẩm đóng băng trong vật liệu sấy thăng hoa hoàn toàn, nhiệt độ vật liệu sấy 0.0098°C ; **giai đoạn 3:** sấy chân không làm bay hơi ẩm liên kết ở trạng thái lỏng còn lại trong vật liệu sấy, kết thúc giai đoạn này khi có sự cân bằng nhiệt xảy ra. Với 1 quá trình trải qua 3 giai đoạn như vậy thì việc xác định chế độ công nghệ gặp rất nhiều khó khăn và phức tạp.

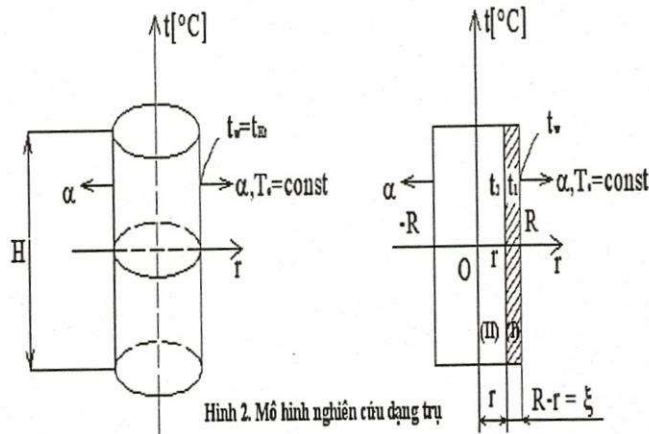
Ở bài viết này, chúng tôi nghiên cứu phương pháp xác định nhiệt độ lạnh đông thích hợp của VLA thông qua việc xác định tỉ lệ nước đóng băng trong VLA (nhóm giáp xác: tôm sú, tôm bạc, tôm thẻ) theo nhiệt độ lạnh đông của chúng, kết quả thu được góp phần giải quyết bài toán lạnh đông ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa, đồng thời làm cơ sở khoa học cho việc xác định chế độ công nghệ sấy thăng hoa các sản phẩm thực phẩm cao cấp nói chung và thủy sản hải nhóm giáp xác có giá trị kinh tế nói riêng.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi nghiên cứu xây dựng mô hình toán để xác định chế độ công nghệ sấy thăng hoa thì cần giải quyết các bài toán cho từng giai đoạn (giai đoạn 1, 2 và 3) và 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 của VLA lạnh đông nằm trong khoảng nào là thích hợp. Nếu không xác định được thì khi lạnh đông ở nhiệt độ âm cao ẩm tự do không đóng băng hết dẫn đến giai đoạn sấy thăng hoa chỉ thăng hoa phần ẩm tự do đã đóng băng, phần ẩm tự do chưa đóng băng bốc hơi trong giai đoạn sấy chân không và tiêu tốn rất nhiều năng lượng, đồng thời do nhiệt độ sấy cao làm giảm chất lượng sản phẩm, còn nếu khi lạnh đông ở nhiệt độ âm sâu hệ thống lạnh tiêu tốn nhiều năng lượng kéo dài thời gian lạnh đông, kéo dài thời gian sấy dẫn đến không kinh tế. Vì vậy, việc nghiên cứu phương pháp xác định nhiệt độ lạnh đông thích hợp của VLA thông qua xác định tỉ lệ nước đóng băng là rất cần thiết để giải quyết bài toán lạnh đông ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa. Đối với nhóm giáp xác (tôm sú, tôm bạc, tôm thẻ) nghiên cứu thì ẩm tổng cộng chiếm từ $(72.22 \div 77.34)\%$ trong đó ẩm tự do chiếm $(65.57 \div 68.21)\%$ còn lại ẩm liên kết chiếm $(6.65 \div 9.13)\%$, vì thế cần phải hạ đến một khoảng nhiệt độ nào đó sao cho tổng lượng ẩm trong VLA đóng băng $(65.57 \div 68.21)\%$, lúc đó tỉ lệ ẩm đóng băng phải từ $(0.8 \div 0.95)$ là đạt.



Hình 1. Đồ thị biểu diễn $T[^\circ\text{C}]$ thay đổi theo $\tau[\text{s}]$ của 3 giai đoạn



Hình 2. Mô hình nghiên cứu dạng trụ

2. NỘI DUNG

2.1. Cơ sở khoa học xác định tỉ lệ nước đóng băng theo nhiệt độ lạnh đông của VLA và nhiệt độ lạnh đông thích hợp

2.1.1. Xây dựng mô hình toán

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

$$\bar{\omega}(T) = \bar{\omega}(r, \tau) = f(R, \tau, T_0, T_w, T_{Kt}, L, W, \dots) \quad (1)$$

Với:

- $\bar{\omega}(T) \in [0, 1]$: tỷ lệ ẩm đóng băng trung bình theo nhiệt độ lạnh đông của vật liệu ẩm.
- $\omega = G_{nb}/G_n \in [0, 1]$: tỷ lệ ẩm đóng băng bên trong vật liệu ẩm.
- G_{nb}, G_n, G [kg]: khối lượng ẩm đóng băng; khối lượng ẩm có trong vật liệu ẩm; khối lượng vật liệu ẩm.
- $W = G_n/G \in (0, 1)$: tỷ lệ ẩm (hay độ ẩm tương đối) có trong vật liệu ẩm, với giả thiết là ẩm phân bố đều.

- Bài toán làm lạnh đông VLA luôn trải qua 3 giai đoạn:

a) **Giai đoạn 1 (a)**: Làm lạnh VLA từ nhiệt độ ban đầu $T_{bd} = T_{VLA} = \text{const}$, xuống nhiệt độ kết tinh ẩm ở bề mặt VLA $T_{w(VLA)} = T_{Kt} = \text{const}$.

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

c) **Giai đoạn 3 (c):** 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, tài liệu tham khảo (TLTK) [3], [5], [6].

- Vấn đề mà chúng ta quan tâm ở đây chính là tỉ lệ ẩm đóng băng bên trong VLA theo nhiệt độ lạnh đông của VLA, từ đó xác định khoảng nhiệt độ lạnh đông thích hợp. Đây là vấn đề rất phức tạp có nhiều thông số tham gia như: trường nhiệt độ, bề mặt VLA, bề dày lớp kết tinh, bề mặt tuyến phân pha, bản chất VLA, cách thức và môi trường thực hiện quá trình kết tinh, ... Chính vì vậy, chúng tôi sẽ tập trung nghiên cứu xem xét bài toán ở giai đoạn 2 để làm rõ vấn đề đặt ra.

- Trước khi đi xây dựng mô hình toán thì các giả thiết đặt ra cần nghiên cứu như sau :

i) VLA là nhóm giáp xác như: tôm sú, tôm bạc, tôm thẻ, ... và xem VLA cần nghiên cứu gần đúng với hình trụ có kích thước: $D = 2R$, $H = 2h \gg 2R$, vì thế xem hình trụ dài vô hạn.

ii) Xem các thông số nhiệt vật lý: $\rho_i, C_{pi}, a_i, \lambda_i, \dots$ là hằng số lấy trung bình theo thể tích.

iii) Hệ số cấp nhiệt (tỏa nhiệt) của môi trường xem như không đổi: $\alpha = \text{const}$.

iv) Phương trình cân bằng nhiệt tại tuyến phân pha tuân theo định luật Leibenzon LS.

- Từ giả thiết đặt ra, có thể xây dựng mô hình toán như sau:

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

Vì VLA nghiên cứu dạng hình trụ có $R \ll H$, không có nguồn nhiệt bên trong ($q_v = 0$), không có dòng cấp, tốc độ tương đối giữa VLA và môi trường lạnh đông bằng 0, đồng thời xem các mặt đẳng nhiệt là các mặt trụ đồng tâm, do đó phương trình vi phân dẫn nhiệt ở dạng

cơ bản được viết như sau:
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (3)$$

Đối với vùng (I), lớp ẩm đóng băng:

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

Đối với vùng (II), lớp ẩm chưa đóng băng:

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

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

a) Điều kiện đầu: $\tau = 0$ thì $t_w|_{\tau=0} = t_1(R, 0) = T_{Kt} = \text{const}$ (6)

$t_0 = t_2(0, 0) = T_0 = \text{const}$: nhiệt độ tâm tại thời điểm $\tau = 0$ (7)

$T_c = \text{const}$: nhiệt độ môi trường (8)

b) Điều kiện biên: $\frac{\partial t_1(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\alpha}{\lambda_1} [t_1(R, \tau) - T_e]$ (9); $\frac{\partial t_2(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$ (10)

c) Tại bề mặt phân pha: $t_1(r, \tau) = t_2(r, \tau) = T_{Kt}$ (11)

d) Phương trình cân bằng nhiệt tại bề mặt phân pha:

$$\rho_1 \omega w L \frac{d\xi}{d\tau} = \rho_1 \omega w L \frac{d(R-r)}{d\tau} = -\rho_1 \omega w L \frac{dr}{d\tau} = -\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial r} \right)_{r=r^-} + \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial r} \right)_{r=r^+}$$
 (12)

Với: λ_1, λ_2 : hệ số dẫn nhiệt của lớp đóng băng của âm và lớp âm chưa đóng băng [W/(mK)]; ρ_1 : khối lượng riêng của VLA ở lớp âm đóng băng ở vùng I [kg/m³]; ω : tỷ lệ âm đã kết tinh (đóng băng); w : độ ẩm của VLA; $(R-r) = \xi$: bề dày của lớp đóng băng [m]; L : ẩn nhiệt đóng băng của nước [kJ/kg]; a_1, a_2 : hệ số dẫn nhiệt độ của vùng (I) và vùng (II), [m²/s].

Giải phương trình (4): bằng phương pháp phân ly biến số Fourier. Đặt: $t_1(r, \tau) = \psi_1(r)\varphi_1(\tau)$, các hằng số tích phân được xác định từ điều kiện biên, qua biến đổi sẽ được nghiệm như sau:

$$t_1(r, \tau) = T_e + (T_{Kt} - T_e) \sum_{n=1}^{\infty} 2 \frac{J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp(-\mu_n^2 Fo_1)$$
 (13)

Với: $T_e = \text{const}$: nhiệt độ môi trường lạnh đông; $r \leq r \leq R, \tau \geq 0$

T_{Kt} : nhiệt độ kết tinh của âm trong VLA

μ_n : là nghiệm của phương trình đặc trưng: $\frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi_1}$ (14)

Bi_1 : chuẩn số Bio của trường nhiệt độ vùng I: $Bi_1 = \alpha R / \lambda_1$ (15)

Fo_1 : chuẩn số Fourier của trường nhiệt độ vùng I: $Fo_1 = a_1 \tau / R^2$ (16)

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

$$J_0(x) = 1 - \frac{(\frac{1}{2}x)^2}{2} + \frac{(\frac{1}{2}x)^4}{2^2 \cdot 2^2} - \frac{(\frac{1}{2}x)^6}{2^2 \cdot 2^2 \cdot 3^2} + \frac{(\frac{1}{2}x)^8}{2^2 \cdot 2^2 \cdot 3^2 \cdot 4^2} - \dots; J_1(x) = -J_0'(x) = \frac{1}{2}x - \frac{(\frac{1}{2}x)^3}{1^2 \cdot 2} + \frac{(\frac{1}{2}x)^5}{1^2 \cdot 2^2 \cdot 3} - \frac{(\frac{1}{2}x)^7}{1^2 \cdot 2^2 \cdot 3^2 \cdot 4} + \dots$$

Giải phương trình (5): Tương tự như trên, đặt: $t_2(r, \tau) = \psi_2(r)\varphi_2(\tau)$ tìm các hệ số tích phân bằng các điều kiện đơn trị, cuối cùng thu được công thức nghiệm như sau:

$$t_2(r, \tau) = T_{Kt} + (T_0 - T_{Kt}) \sum_{m=1}^{\infty} 2 \frac{J_1(\mu_m)}{\mu_m [J_0^2(\mu_m) + J_1^2(\mu_m)]} J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) \exp(-\mu_m^2 Fo_2)$$
 (17)

Với: T_0 : nhiệt độ tâm VLA [°C], xác định tại thời điểm $\tau = 0$ và $T_w = T_{Kt}$

T_{Kt} : nhiệt độ kết tinh của âm trong VLA; $0 \leq r \leq R, \tau \geq 0$

μ_m : là nghiệm của phương trình đặc trưng: $\frac{J_0(\mu_m)}{J_1(\mu_m)} = \frac{\mu_m}{Bi_2}$ (18)

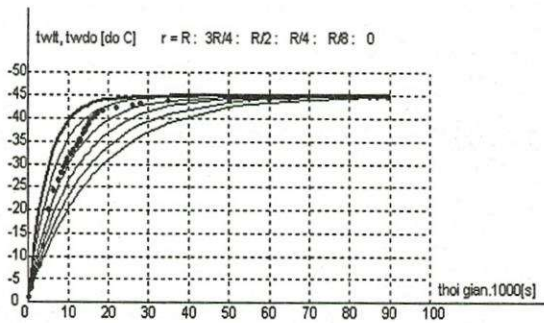
$$Bi_2: \text{ chuẩn số Biot của trường nhiệt độ vùng II: } Bi_2 = \alpha R / \lambda_2 \quad (19)$$

$$Fo_2: \text{ chuẩn số Fourier của trường nhiệt độ vùng II: } Fo_2 = a_2 \tau / R^2 \quad (20)$$

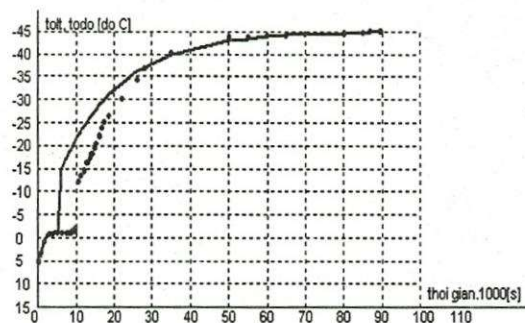
$J_0(\mu_m), J_1(\mu_m)$: là các hàm Bessel loại 1 bậc 0, 1

2.1.2. Thực nghiệm kiểm tra mô hình toán

Việc thực nghiệm kiểm tra mô hình như đã giả thiết của tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ hoàn toàn tương tự. Do đó trong bài báo này nhóm nghiên cứu chỉ kiểm tra tính phù hợp của loại tôm sú mà thôi. Ở đồ thị hình 3a và 3b, đường liền là đường $t_1(r, \tau)$ và $t_2(r, \tau)$ lý thuyết và đường chấm là đường t_1 và t_2 đo đạc thực tế, rõ ràng đường thực tế gần trùng với đường lý thuyết điều này khẳng định mô hình mà nhóm nghiên cứu giả thiết là phù hợp và chấp nhận được. Tuy nhiên có sự khác biệt đó là sai số do tôm không tuyệt đối là hình trụ mà gần đúng với hình trụ mà thôi. Để có sự tương đồng với lý thuyết thì kết quả đo đạc thực tế cần phải nhân hệ số hiệu chỉnh.



Hình 3a. Trường nhiệt độ bề mặt hình trụ giữa tính toán lý thuyết và đo thực tế



Hình 3b. Trường nhiệt độ tâm hình trụ giữa tính toán lý thuyết và đo thực tế

2.1.3. Xác định hàm tỉ lệ nước đóng băng

$$\omega(r, \tau) = \omega(T) \text{ vì } T = T(r, \tau) \quad (21)$$

Giải phương trình cân bằng nhiệt (12) với điều kiện biên của lớp đóng băng dịch chuyển: Khi $\tau = 0$ thì $r = R$ tại bề mặt trụ: $\rightarrow \xi = 0$; $\tau = \tau$ thì $r = r$ tại bề mặt phân pha: $\rightarrow \xi = R - r$; Để có thể giải được phương trình (12) ở bề mặt phân pha thì cần phải lấy hàm Bessel ở dạng gần

$$\text{đúng: } J_1(x) = -J'_0(x) \approx \frac{1}{2}x; 0 \leq |x| \ll 1 \Leftrightarrow \begin{cases} J_1(\mu_n \frac{r}{R}) \approx \mu_n \frac{r}{2R}; & 0 \leq \left| \mu_n \frac{r}{2R} \right| \ll 1 \\ J_1(\mu_m \frac{r}{R}) \approx \mu_m \frac{r}{2R}; & 0 \leq \left| \mu_m \frac{r}{2R} \right| \ll 1 \end{cases} \quad (22)$$

Thay phương trình (22) vào (13) và (17), biến đổi sau đó thay vào (12), lấy tích phân hai vế; biên r chạy từ $R \rightarrow r$; biên τ chạy $0 \rightarrow \tau$ ta được:

$$\omega(r, \tau) = \frac{1}{\rho_1 w L \ln(\frac{r}{R})} \left\{ -C_1 \rho_1 (T_{Kt} - T_e) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} [1 - \exp(-\mu_n^2 Fo_1)] \right. \\ \left. + C_2 \rho_2 (T_0 - T_{Kt}) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_m)}{\mu_m [J_0^2(\mu_m) + J_1^2(\mu_m)]} [1 - \exp(-\mu_m^2 Fo_2)] \right\} \quad (23)$$

Phương trình (23), đại lượng $1/\ln(r/R)$ là đại lượng suy biến ở 2 biên khi $r = R$; $r = 0$ đến đây cần phải tìm cách khử đại lượng suy biến này, bằng cách lấy tỉ lệ nước đóng băng trung bình theo bề dày r .

Thay $\tau = f(T)$: thời gian làm lạnh đông là một hàm của nhiệt độ lạnh đông, nhiệt độ lạnh đông được lấy là nhiệt độ trung bình theo thể tích của vật liệu lạnh đông sẽ thu được.

$$\omega(\bar{r}, \tau) = -\frac{9,2877}{\rho_1 w L} \left\{ -C_1 \rho_1 (T_{Kt} - T_e) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} (1 - \exp[-\mu_n^2 \frac{a_1 f(T)}{R^2}]) \right. \\ \left. + C_2 \rho_2 (T_0 - T_{Kt}) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_m)}{\mu_m [J_0^2(\mu_m) + J_1^2(\mu_m)]} (1 - \exp[-\mu_m^2 \frac{a_2 f(T)}{R^2}]) \right\} \quad (24)$$

Vậy tỉ lệ nước đóng băng được lấy theo trung bình của nhiệt độ lạnh đông được xác định:

$$\bar{\omega}(T) = \frac{1}{T_{01} - T_w} \int_{T_w}^{T_{01}} \frac{9,2877}{\rho_1 w L} \left\{ -C_1 \rho_1 (T_{Kt} - T_e) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} (1 - \exp[-\mu_n^2 \frac{a_1 f(T)}{R^2}]) \right. \\ \left. + C_2 \rho_2 (T_0 - T_{Kt}) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_1(\mu_m)}{\mu_m [J_0^2(\mu_m) + J_1^2(\mu_m)]} (1 - \exp[-\mu_m^2 \frac{a_2 f(T)}{R^2}]) \right\} dT \quad (25)$$

Với: $T_w, T_{01}[^{\circ}C]$: là nhiệt độ bề mặt và nhiệt độ tâm cùng xác định tại một thời điểm τ nào đó.

Nhiệm vụ bây giờ là phải tiến hành thực nghiệm để xác định các thông số vật lý, nhiệt - vật lý và hàm quan hệ giữa thời gian lạnh đông với nhiệt độ trung bình lạnh đông của VLA $\tau = f(T)$, sau đó thay vào phương trình (25) để xác định tỉ lệ nước đóng băng trung bình theo nhiệt độ, từ đó xác định nhiệt độ lạnh đông thích hợp của vật liệu sấy ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa.

$$T = \frac{1}{2R} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \int_0^R [t_1(r, \tau) dr + \int_0^R t_2(r, \tau) dr] d\tau \quad (26)$$

$T [^{\circ}C]$ nhiệt độ trung bình của vật liệu theo thể tích xác định theo công thức PlanK (26).

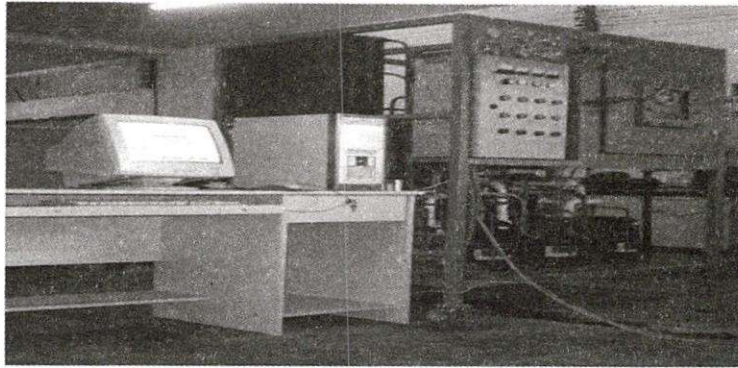
2.2. Đối tượng và thiết bị dụng cụ nghiên cứu

2.2.1. Thiết bị dụng cụ thí nghiệm

Thiết bị, dụng cụ thí nghiệm để thực nghiệm: Hệ thống sấy thăng hoa DS-3 có giai đoạn lạnh đông do chúng tôi tự thiết kế, chế tạo, xem hình 3c, trên đó gắn các cảm biến để xác định: nhiệt độ môi trường lạnh đông T_e , nhiệt độ tâm vật liệu T_{01} , nhiệt độ bề mặt vật liệu T_w , thời gian thực hiện quá trình lạnh đông τ [s], độ ẩm vật liệu W [%], áp suất buồng thăng hoa P_{th} [mmHg].

2.2.2. Nguyên vật liệu nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là loại thực phẩm thủy hải sản nhóm giáp xác có giá trị kinh tế, chủ yếu là: tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ. Thành phần cơ bản của nguyên liệu, xem bảng 1 TLTk [4].



Hình 3c. Hệ thống sấy thăng hoa DS-3 tự lạnh đông (-50 | -45)⁰C

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu là xây dựng mô hình toán và phương pháp thực nghiệm

Để tính toán phương trình (26) chúng tôi sử dụng phương pháp số, đồng thời lập trình trên máy tính bằng ngôn ngữ Visual Basic 6.0.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

3.1. Kết quả nghiên cứu

3.1.1. Số liệu thực nghiệm các thông số vật lý, nhiệt - vật lý của vật liệu nghiên cứu

Bảng thực nghiệm chúng tôi đã xác định được các thông số vật lý và nhiệt vật lý của đối tượng nghiên cứu nhóm giáp xác (tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ), phương pháp và thiết bị dụng cụ thực nghiệm để xác định các thông số này TLTk [8].

Bảng 1. Các thông số nhiệt vật lý của vật liệu nghiên cứu

TSNVL NVL	Khối lượng riêng [kg/m ³]		Hệ số dẫn nhiệt [W/(mK)]		Nhiệt dung riêng [kJ/(kgK)]	
	ρ_1	ρ_2	λ_1	λ_2	C_1	C_2
Tôm sú	838,48	839,34	1,084	0,562	2,574	3,570
Tôm bạc	839,23	840,64	0,996	0,566	2,799	3,593
Tôm thẻ	843,52	844,77	1,052	0,565	2,590	3,591

Chú ý:- ρ_1, λ_1, C_1 : các thông số ở vùng (I) ẩm đã đóng băng; ρ_2, λ_2, C_2 : các thông số ở vùng (II) ẩm chưa đóng băng; TSNVL: thông số nhiệt vật lý; NVL: nguyên vật liệu nghiên cứu.

Bảng 2. Các thông số nhiệt vật lý của vật liệu nghiên cứu

TSNVL NVL	Kích thước hình học	Hệ số tỏa nhiệt	Chuẩn số Bio Bi		Hệ số dẫn nhiệt độ a [m ² /s]	
	R [m]	α [W/(m ² K)]	$Bi_1 = \alpha R / \lambda_1$	$Bi_2 = \alpha R / \lambda_2$	$a_1 = \lambda_1 / (C_1 \rho_1)$	$a_2 = \lambda_2 / (C_2 \rho_2)$
Tôm sú	4.10^{-3}	8.12	0.02996	0.05779	5.021×10^{-7}	1.875×10^{-7}
Tôm bạc	4.10^{-3}	8.12	0.03261	0.05738	4.232×10^{-7}	1.8739×10^{-7}
Tôm thẻ	4.10^{-3}	8.12	0.03087	0.05748	4.811×10^{-7}	1.863×10^{-7}

Bảng 3. Các thông số nhiệt vật lý của vật liệu nghiên cứu

TSNVL	Độ ẩm của vật liệu	Nhiệt độ kết tinh của ẩm	Ấn nhiệt đông băng của ẩm	Nhiệt độ môi trường lạnh đông = const	Nhiệt độ tâm vật liệu tại thời điểm $\tau = 0$ và $T_w _{r=0} = t_1(R,0) = T_{kt}$
NVL	W [%]	T_{kt} [°C]	L [KJ/kg]	T_e [°C]	T_0 [°C]
Tôm sú	74.67	-1.21	333.6	-45	5.12
Tôm bạc	74.21	-1.18	333.6	-45	4.97
Tôm thẻ	74.23	-1.17	333.6	-45	5.01

Xác định nghiệm phương trình (14) và (18): Khi $0 \leq \text{Abs}(x) \ll 1$ (*) thì các hàm Bessel được lấy gần đúng như sau: $J_0(x) \approx 1 - (\frac{1}{2}x)^2$; $J_1(x) = -J'_0(x) \approx \frac{1}{2}x$.

Từ phương trình (14) và (18) viết lại:

$$\frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi_1} \Leftrightarrow \frac{4 - \mu_n^2}{2\mu_n} = \frac{\mu_n}{Bi_1} \Rightarrow \mu_n = \pm \sqrt{\frac{4Bi_1}{2 + Bi_1}} \quad (27)$$

$$\frac{J_0(\mu_m)}{J_1(\mu_m)} = \frac{\mu_m}{Bi_2} \Leftrightarrow \frac{4 - \mu_m^2}{2\mu_m} = \frac{\mu_m}{Bi_2} \Rightarrow \mu_m = \pm \sqrt{\frac{4Bi_2}{2 + Bi_2}} \quad (28)$$

Thay giá trị Bi_1, Bi_2 ở bảng 2 vào (27) và (28) sẽ xác định được nghiệm của phương trình đặc trưng (14), (18) và các giá trị của hàm Bessel, xem bảng 4, 5.

Bảng 4. Các nghiệm phương trình đặc trưng (14) và giá trị các hàm Bessel

NVL	Nghiệm của phương (14)		Giá trị của các hàm Bessel $J_0(\mu_n)$ và $J_1(\mu_n)$; $n = 1, 2$			
	μ_1	μ_2	$J_0(\mu_1)$	$J_1(\mu_1)$	$J_0(\mu_2)$	$J_1(\mu_2)$
Tôm sú	0.24297	-0.24297	0.98524	0.12148	0.98524	-0.12148
Tôm bạc	0.25333	-0.25333	0.98396	0.12666	0.98396	-0.12666
Tôm thẻ	0.24658	-0.24658	0.98480	0.12329	0.98480	-0.12329

Bảng 5. Các nghiệm phương trình đặc trưng (18) và giá trị các hàm Bessel

NVL	Nghiệm của phương (18)		Giá trị của các hàm Bessel $J_0(\mu_m)$ và $J_1(\mu_m)$; $m = 1, 2$			
	μ_1	μ_2	$J_0(\mu_1)$	$J_1(\mu_1)$	$J_0(\mu_2)$	$J_1(\mu_2)$
Tôm sú	0.33516	-0.33516	0.97192	0.16758	0.97192	-0.16758
Tôm bạc	0.33407	-0.33407	0.97211	0.16702	0.97211	-0.16702
Tôm thẻ	0.33432	-0.33432	0.97206	0.16716	0.97206	-0.16716

Từ nghiệm của phương trình đặc trưng (14) và (18) tìm được ở bảng 4, 5 rõ ràng nó thỏa điều kiện (*). Vì vậy, việc lấy gần đúng của hàm Bessel là phù hợp. Bây giờ phải kiểm tra lại việc lấy gần đúng các phương trình Bessel ở hệ (22) có được thỏa mãn hay không? Vì: $0 \leq r \ll 2R$ nên $0 \leq r/2R \ll 1$, mặt khác: $0 \leq \text{Abs}(\mu_n) \ll 1$; $0 \leq \text{Abs}(\mu_m) \ll 1$. Cho nên: $0 \leq \text{Abs}(\mu_n r/2R) \ll 1$; $0 \leq \text{Abs}(\mu_m r/2R) \ll 1 \rightarrow$ việc lấy các hàm Bessel dạng gần đúng ở hệ (22) cũng thỏa mãn.

Thay các thông số vật lý, nhiệt - vật lý ở bảng 1, 2, 3 và nghiệm phương trình đặc trưng (14), (18), giá trị các hàm Bessel tìm được ở bảng 4, 5 vào phương trình (25) để xác định lại công thức hàm tỉ lệ nước đông băng bên trong VLA theo nhiệt độ của vật liệu lạnh đông:

$$\bar{\omega}(T) = 0.09597 \frac{T_{Kt} - T_e}{T_{01} - T_w} \int_{T_w}^{T_{01}} (1 - \exp[-2.73268 \times 10^{-5} f(T)]) dT -$$

Đối với tôm sú:

$$0.13324 \frac{T_0 - T_{Kt}}{T_{01} - T_w} \int_{T_w}^{T_{01}} (1 - \exp[-3.69726 \times 10^{-5} f(T)]) dT$$

$$\bar{\omega}(T) = 0.10501 \frac{T_{Kt} - T_e}{T_{01} - T_w} \int_{T_w}^{T_{01}} (1 - \exp[-2.721705 \times 10^{-5} f(T)]) dT -$$

Đối với tôm bạc:

$$0.13502 \frac{T_0 - T_{Kt}}{T_{01} - T_w} \int_{T_w}^{T_{01}} (1 - \exp[-3 \times 643564 \times 10^{-5} f(T)]) dT$$

$$\bar{\omega}(T) = 0.09715 \frac{T_{Kt} - T_e}{T_{01} - T_w} \int_{T_w}^{T_{01}} (1 - \exp[-2.77835 \times 10^{-5} f(T)]) dT -$$

Đối với tôm thẻ:

$$0.13489 \frac{T_0 - T_{Kt}}{T_{01} - T_w} \int_{T_w}^{T_{01}} (1 - \exp[-3.634014 \times 10^{-5} f(T)]) dT$$

3.1.2. Thực nghiệm xác định hàm quan hệ $\tau = f(T)$

Đến đây cần phải tiến hành thực nghiệm để xác định quan hệ giữa thời gian lạnh đông với nhiệt độ lạnh đông trung bình của VLA $\tau = f(T) = a_0 + a_1T + \dots + a_nT^n$, thay vào phương trình (29), (30) và (31) rồi tính tích phân gần đúng bằng phương pháp số, cho phép sai số 10^{-4} .

Bảng 6. Số liệu thực nghiệm và tính toán cho tôm sú

T_w [°C]	T_{01} [°C]	T [°C]	τ [s]	$\bar{\omega}(T)$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
-1.21	5.12	2.778	0	0
-3.23	3.26	0.859	720	0.0880
-6.13	0.73	-1.808	1500	0.1850
-8.07	-0.64	-3.389	2760	0.3210
-12.15	-0.85	-5.031	3840	0.4296
-20.24	-0.98	-8.106	5040	0.5613
-24.19	-1.04	-9.605	6120	0.6599
-26.53	-1.15	-10.541	7380	0.7521
-28.21	-1.18	-11.181	8220	0.8089
-29.41	-1.21	-11.644	8700	0.8423
-30.22	-1.56	-12.164	9480	0.8886
-31.17	-2.07	-12.837	9720	0.9167

Bảng 7. Số liệu thực nghiệm và tính toán cho tôm bạc

T_w [°C]	T_{01} [°C]	T [°C]	τ [s]	$\bar{\omega}(T)$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
-1.18	4.97	2.695	0	0
-4.14	1.61	-0.517	720	0.0915
-6.16	0.17	-2.172	1200	0.1531
-8.12	-0.67	-3.426	2520	0.3024
-12.01	-0.93	-5.03	3720	0.4285
-20.28	-1.09	-8.19	4680	0.5499
-24.39	-1.11	-9.724	5880	0.6683
-26.68	-1.13	-10.584	7080	0.7663
-28.49	-1.15	-11.266	7620	0.8147
-29.55	-1.18	-11.677	8280	0.8620
-30.39	-1.38	-12.114	8520	0.8863
-31.23	-1.85	-12.721	9420	0.9482

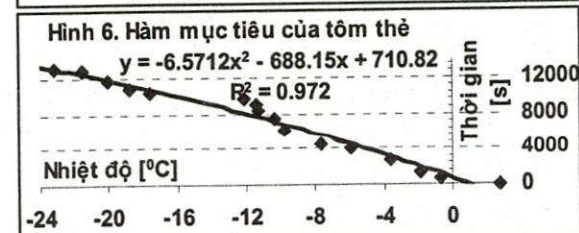
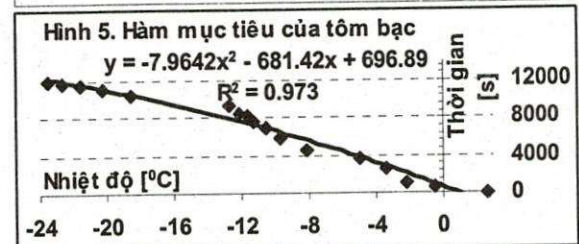
-32.29	-12.16	-19.608	10500	1.0000
-33.08	-13.37	-20.663	11100	1.0000
-34.11	-14.53	-21.775	12060	1.0000
-35.24	-16.37	-23.352	12900	1.0000
-36.73	-17.21	-24.432	13740	1.0000

-32.09	-10.57	-18.532	10500	1.0000
-32.67	-12.87	-20.196	11100	1.0000
-33.23	-14.67	-21.537	11580	1.0000
-33.87	-16.11	-22.681	11880	1.0000
-34.45	-17.09	-23.513	12120	1.0000

Xem bảng 6, 7, 8 số liệu thực nghiệm và tính toán của tôm sú, tôm bạc, tôm thẻ. Trong đó: (a) nhiệt bề mặt vật liệu, (b) nhiệt độ tâm của vật liệu, (c) nhiệt độ trung bình của vật liệu xác định bằng công thức (26) theo T_w , T_{01} và τ (có nghĩa thay cột (a), (b) và (d) vào công thức (26) sẽ tính toán ra giá trị ở cột (c)), (d) thời gian thực hiện quá trình làm lạnh, (e) tỉ lệ nước đóng băng trung bình theo nhiệt độ trung bình.

Bảng 8. Số liệu thực nghiệm, tính toán cho tôm thẻ

T_w [°C]	T_{01} [°C]	T [°C]	τ [s]	$\bar{\omega}(T)$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
-1.17	5.01	2.723	0	0
-3.79	1.16	-0.672	720	0.0934
-5.19	0.09	-1.864	1260	0.1613
-8.56	-0.74	-3.633	2640	0.3179
-14.35	-1.09	-5.996	4020	0.4651
-18.86	-1.11	-7.677	4620	0.5356
-24.54	-1.12	-9.785	6120	0.6792
-26.02	-1.13	-10.339	7380	0.7665
-28.73	-1.15	-11.355	8280	0.8369
-29.03	-1.17	-11.478	9000	0.8733
-30.57	-1.34	-12.155	9600	0.9168
-31.03	-9.68	-17.579	10320	1.0000
-32.07	-10.98	-18.783	10860	1.0000
-33.19	-12.33	-20.048	11760	1.0000
-34.34	-14.04	-21.551	12900	1.0000
-35.16	-16.22	-23.228	13200	1.0000
-36.41	-17.98	-24.799	13380	1.0000



Từ số liệu ở cột (c) và (d) cho phép xử lý số liệu và xây dựng phương trình hồi quy quan hệ giữa thời gian với nhiệt độ lạnh đông trung bình của VLA $\tau = f(T)$ bằng phương pháp độ lệch bình phương cực tiểu, hoặc cũng có thể xây dựng hàm thực nghiệm $\tau = f(T)$ trên phần mềm Excel.

Xem hình 4, 5, 6. Rõ ràng quan hệ thời gian τ [s] và nhiệt độ lạnh đông trung bình theo thể tích T [°C] trong quá trình lạnh đông thay đổi theo quy luật parabol, xem bảng 9. Sau đó thay hàm $\tau = f(T)$ và các số liệu ở cột (a), (b), T_{kt} và T_e ở bảng (3) vào phương trình (29), (30), (31) để tính tỉ lệ ẩm đóng băng trung bình theo nhiệt độ $\bar{\omega}(T)$.

3.1.3. Tính toán xác định tỉ lệ nước đóng băng trung bình theo nhiệt độ lạnh đông của VLA

Viết chương trình cho phương trình (29), (30) và (31) trên ngôn ngữ Visual Basic 6.0 với thuật giải: chia đoạn $[T_w, T_{01}] = [a, b]$ thành k đoạn nhỏ bằng nhau, với bước chia: $h = (b - a)/k$; các

điểm chia: $x_0 = a$; $x_i = x_0 + ih$; $x_k = b$; $y_i = f(x_i)$; với: $i = 1, 0, \dots, k$; với sai số cho phép 10^{-4} thì bước chia và số điểm chia được xác định theo công thức Newton-Cotes:

$$h = \sqrt{\frac{12 \cdot 10^{-4}}{(b-a)M_2}} \Rightarrow k = (b-a) \sqrt{\frac{(b-a)M_2}{12 \cdot 10^{-4}}}; M_2 = \max_{x \in [a,b]} |f''(x)| \quad (32)$$

Như vậy tích phân (32), (33) và (34) được tính gần đúng một cách dễ dàng theo công thức sau:

$$I = \int_a^b f(x)dx \approx h \left(\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{k-1} + \frac{y_k}{2} \right) \quad (33)$$

Chạy chương trình đã viết trên máy tính sẽ cho kết quả rất nhanh chóng ở cột (e) ở bảng 6 (tôm sú), 7 (tôm bạc) và 8 (tôm thẻ).

Bảng 9. Hàm thực nghiệm $\tau = f(T)$ của tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ

Vật liệu	Hàm thực nghiệm $\tau = f(T)$	R^2
Tôm sú	$\tau = f(T) = -7.0215T^2 - 665.15T + 1120.1$	0.9692
Tôm bạc	$\tau = f(T) = -7.9642T^2 - 681.42T + 696.89$	0.9730
Tôm thẻ	$\tau = f(T) = -6.5712T^2 - 688.15T + 710.82$	0.9720

3.1.4. Nhiệt độ lạnh đông thích hợp của VLA ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa

Từ kết quả tính toán tỉ lệ nước đóng băng trung bình theo nhiệt độ của VLA ở bảng 6, 7 và 8 cho phép chúng ta xác định được nhiệt độ lạnh đông thích hợp của VLA cần lạnh đông ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa. Xem bảng 10.

Bảng 10. Nhiệt độ lạnh đông thích hợp của VLA trong sấy thăng hoa

Vật liệu nghiên cứu	Khoảng nhiệt độ thích hợp			
	T_w [°C]	T_{01} [°C]	T [°C]	$\bar{\omega}(T)$
Tôm sú	-32.29	-12.16	-19.608	1.0000
Tôm bạc	-32.09	-10.57	-18.532	1.0000
Tôm thẻ	-31.03	-9.68	-17.579	1.0000

3.2. Bàn luận

▪ Về mặt cơ sở khoa học, trong quá trình lạnh đông chuẩn bị cho sấy thăng hoa nó riêng và chế biến lạnh đông thực phẩm nói chung, khi nhiệt độ tâm sản phẩm đạt tới nhiệt độ kết tinh của ẩm có bên trong vật liệu thì lượng ẩm kết tinh phải là $\bar{\omega}(T) = 1$ (100%), TLTK [3].

▪ Nhưng khi thực nghiệm và tính toán thì kết quả cho thấy là khác biệt so với lý thuyết là do có yếu tố ảnh hưởng đến quá trình như sau:

✓ Các thông số nhiệt - vật lý và vật lý như: λ , ρ , C , ...v.v lấy theo trung bình thể tích và xem nó không thay đổi để thuận lợi cho việc giải bài toán truyền nhiệt có chuyển pha, nhưng thực tế các thông số này luôn thay đổi theo nhiệt.

✓ Mô hình toán xây dựng được xem gần đúng với hình trụ $D = 2R = 8 \times 10^{-3}$ [m] dài vô hạn, nhưng thực tế nó không đúng với hình trụ, mặt khác chiều dài của tôm sú, tôm bạc, tôm thẻ $H = 2h = 74 \times 10^{-3}$ [m] lớn hơn gấp 18 lần so với bán kính R , vì vậy hình trụ này vẫn xem là hình trụ có kích thước hữu hạn và đây là những yếu tố cơ bản dẫn đến sự khác biệt.

✓ 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 lý thuyết thì tỉ lệ ẩm đóng băng $\bar{\omega}(T)$ không thể đạt 100% được.

▪ Qua kết quả tính toán để xác định khoảng nhiệt độ lạnh đông thích hợp của vật liệu ẩm, xem bảng 10, cho thấy rằng kết quả này phù hợp với thực tế sản xuất. Khi nhiệt độ tâm VLA nhỏ hơn -10°C lúc đó nhiệt độ trung bình VLA nhỏ hơn -21°C thì lượng ẩm kết tinh lớn hơn 80%

▪ Một số công trình nghiên cứu Heiss đã công bố: đối với vật liệu dạng keo xốp như loại giáp xác (tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ,...) ẩm chiếm (75÷79.5)% trong đó có 6,1% ẩm tự do qua lại màng tế bào thì kết tinh ở nhiệt độ $t = -1 \div -1.5^{\circ}\text{C}$; 65.5% ẩm tự do nằm trong tế bào thì kết tinh ở nhiệt độ $t = -1.5 \div -20^{\circ}\text{C}$; 7.5% ẩm liên kết thì kết tinh ở $t = -20 \div -65^{\circ}\text{C}$ TLTK [2], [3] điều đó chứng tỏ phương pháp xác định tỉ lệ ẩm đóng băng và nhiệt độ lạnh đông thích hợp ở trên có độ tin cậy rất cao.

4. KẾT LUẬN

▪ Qua việc thực nghiệm kiểm tra mô hình toán. Mô hình mà nhóm nghiên cứu giả thiết rất phù hợp với kết quả thực nghiệm, vì vậy chúng ta có thể sử dụng mô hình này để tính toán tỉ lệ nước đóng băng theo nhiệt độ lạnh đông đối với VLA: tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ.

▪ 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, TLTK [1], [2], [5], [6] và không biết khoảng nhiệt độ lạnh đông nào là thích hợp. Vì thế việc nghiên cứu đưa ra phương pháp xác định tỉ lệ ẩm đóng băng và khoảng nhiệt độ lạnh đông thích hợp là một giải pháp về mặt công nghệ rất thiết thực, qua đó cho phép xác định chế độ công nghệ ở giai đoạn 1 trong sấy thăng hoa có cơ sở khoa học. Xem bảng 10.

RESEARCHED THE METHOD TO DETERMINE ICE RATIO IN MATERIALS FREEZE AND OPTIMAL TEMPERATURE OF FREEZE IN STAGE 1 OF PROCESSING FREEZE - DRYING

Nguyen Tan Dung⁽¹⁾, Trinh Van Dung⁽²⁾, Tran Duc Ba⁽³⁾

(1)University Technical Education Ho Chi Minh City

(2)University of Technology, VNU-HCM (3)University of Industry Ho Chi Minh City

ABSTRACT: In the fact that Stage 1 freeze humidity materials of processing Freeze – Drying will be the most effect, when temperature of materials comes up to the optimal temperature of freeze, at that time free water of materials will be completely crystallized, therefore when finished on stage 2 of processing Freeze – Drying free humidity of materials be crystallized to completely sublimated. Like this, how to determine free water of materials completely crystallized and optimal temperature of freeze in stage 1 of processing Freeze – Drying. For this reason, We researched the method to determine the ice ratio and optimal temperature in stage 1 freeze of processing freeze - Drying.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Trọng Căn - Đỗ Minh Phụng, *Công nghệ chế biến thủy hải sản*, Tập 1, 2, NXB Nông nghiệp, (1997).
- [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, *Nghiên cứu tính toán thiết kế, chế tạo hệ thống sấy thăng hoa công nghiệp DS-3 phục vụ cho sản xuất các loại thực phẩm cao cấp (Đề tài NCKH cấp bộ)*, Tạp chí Giáo dục khoa học kỹ thuật, số 3(1), (2007).
- [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 - 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, (2008).