

NGHIÊN CỨU SỰ BIẾN ĐỔI CÁC TÍNH CHẤT NHIỆT VẬT LÝ CỦA CÁ THU FILLET TRONG QUÁ TRÌNH SẤY THĂNG HOA

EVOLUTION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MACKEREL FILLETS DURING FREEZE-DRYING

Nguyễn Văn Phúc^{1*}, Lê Như Chính¹, Đoàn Nguyễn Thùy Linh²,
Lê Trung Kiệt³, Nguyễn Văn Trường⁴, Nguyễn Minh Trung⁵

1. Trường Đại học Nha Trang,

2. Học viện cao học Trường Đại học Nha Trang,

3. Trường Cao đẳng Tiền Giang,

4. Viện Vắc xin và Sinh phẩm Y tế,

5. Trường Cao đẳng nghề Vĩnh Long

Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Phúc, Email: phucnv@ntu.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/05/2026; Ngày phản biện thông qua: 01/07/2026 ; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát sự biến đổi các tính chất nhiệt vật lý của cá thu fillet trong giai đoạn cấp đông và sấy thăng hoa. Các thông số được xem xét bao gồm khối lượng riêng, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán nhiệt, enthalpy và nhiệt độ đóng băng của nước trong khoảng nhiệt độ từ $-40,0$ đến $25,0^{\circ}\text{C}$. Kết hợp mô hình toán với thực nghiệm cho thấy nhiệt độ đóng băng của nước trong cá thu khoảng $-1,1^{\circ}\text{C}$ và tỷ lệ nước đóng băng đạt xấp xỉ 0,93 tại $-40,0^{\circ}\text{C}$. Trong giai đoạn cấp đông, các tính chất nhiệt vật lý biến đổi mạnh, đặc biệt trong vùng lân cận điểm đóng băng do ảnh hưởng của quá trình chuyển pha. Khi chuyển sang giai đoạn sấy thăng hoa, sự hình thành lớp khô xốp làm thay đổi đáng kể tính chất vật liệu. Độ ẩm giảm từ 74,86% xuống 7,00% sau 14 giờ, kéo theo khối lượng riêng giảm từ 1087,0 xuống 371,56 kg/m^3 và độ xốp tăng lên 0,726. Hệ số dẫn nhiệt và hệ số khuếch tán nhiệt của lớp khô giảm xuống trung bình khoảng 0,052 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ và $7,286 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, phản ánh khả năng truyền nhiệt thấp của cấu trúc sau sấy. Đồng thời, enthalpy của lớp khô biến thiên trong khoảng 216,815–288,131 kJ/kg theo nhiệt độ vật liệu và trạng thái ẩm còn lại. Kết quả nghiên cứu cung cấp bộ dữ liệu nhiệt vật lý phục vụ mô hình hóa và tối ưu hóa quá trình sấy thăng hoa cá thu fillet.

Từ khóa: sấy thăng hoa; cá thu fillet; thông số nhiệt vật lý; nhiệt độ đóng băng; hệ số dẫn nhiệt; nhiệt dung riêng.

ABSTRACT

This study investigates the variation in the thermophysical properties of mackerel fillets during the freezing and freeze-drying processes. The investigated properties include density, specific heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity, enthalpy, and initial freezing point over a temperature range from $-40,0$ to $25,0^{\circ}\text{C}$. The combination of mathematical modeling and experimental measurements indicated that the initial freezing point of mackerel was approximately $-1,1^{\circ}\text{C}$, while the fraction of frozen water reached about 0,93 at $-40,0^{\circ}\text{C}$. During the freezing stage, the thermophysical properties changed significantly, particularly in the vicinity of the freezing point due to phase transition effects. Upon entering the freeze-drying stage, the formation of a porous dried layer substantially altered the material properties. The moisture content decreased from 74,86% to 7,00% after 14 h, accompanied by a reduction in density from 1087,00 to 371,56 kg/m^3 and an increase in porosity to 0,726. The thermal conductivity and thermal diffusivity of the dried layer decreased to average values of approximately 0,052 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ and $7,286 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively, indicating poor heat transfer capability of the dried porous structure. Meanwhile, the enthalpy of the dried layer varied within the range of 216,815–288,131 kJ/kg depending on material temperature and residual moisture conditions. The obtained results provide essential thermophysical data for modeling and optimization of the freeze-drying process of mackerel fillets.

Keywords: freeze-drying; mackerel fillet; thermophysical properties; freezing point; thermal conductivity; specific heat capacity.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sấy thăng hoa là một trong những phương pháp làm khô thực phẩm tiên tiến, trong đó nước được loại bỏ khỏi vật liệu thông qua quá trình thăng hoa trực tiếp từ pha rắn sang pha hơi dưới điều kiện nhiệt độ và áp suất thấp. Nhờ nhiệt độ xử lý thấp và tránh được sự tồn tại của pha lỏng, phương pháp này giúp hạn chế các biến đổi hóa sinh bất lợi, đồng thời duy trì tốt cấu trúc, màu sắc, hương vị và giá trị dinh dưỡng của sản phẩm [1-7]. Do đó, sấy thăng hoa được ứng dụng rộng rãi đối với các sản phẩm có giá trị cao và nhạy cảm với nhiệt, đặc biệt là các sản phẩm thủy sản.

Quá trình sấy thăng hoa là sự kết hợp phức tạp của truyền nhiệt, truyền chất và chuyển pha, trong đó các tính chất nhiệt vật lý của vật liệu đóng vai trò quyết định đến động học quá trình và chất lượng sản phẩm cuối cùng. Các thông số như khối lượng riêng, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt và hệ số khuếch tán nhiệt phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ, độ ẩm và trạng thái cấu trúc của vật liệu [2, 3], [7-9]. Sấy thăng hoa là phương pháp sấy phức tạp, gồm 3 giai đoạn: làm đông, thăng hoa và chân không. Trong giai đoạn làm đông, sự hình thành băng và sự thay đổi tỷ lệ pha lỏng-rắn làm biến đổi đáng kể các tính chất nhiệt vật lý này. Trong giai đoạn sấy thăng hoa, sự phát triển của cấu trúc xốp trong lớp khô tiếp tục làm giảm khả năng dẫn nhiệt và ảnh hưởng đến quá trình khuếch tán hơi nước [2, 3, 6-9]. Vì vậy, việc xác định chính xác sự biến đổi của các tính chất nhiệt vật lý theo nhiệt độ và trạng thái vật liệu là cơ sở quan trọng để xây dựng các mô hình truyền nhiệt – truyền chất có độ tin cậy cao.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm, dữ liệu trong điều kiện nhiệt độ thấp và trong quá trình sấy thăng hoa vẫn còn hạn chế. Phần lớn các công bố tập trung vào các vật liệu

như rau quả hoặc sản phẩm sữa, trong khi các nghiên cứu đối với thực phẩm giàu protein, đặc biệt là thủy sản, còn tương đối ít. Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu chỉ dừng lại ở đo đạc thực nghiệm hoặc sử dụng các quan hệ kinh nghiệm đơn giản, chưa xem xét đầy đủ ảnh hưởng đồng thời của thành phần hóa học, trạng thái pha và cấu trúc vật liệu đến sự biến đổi tính chất nhiệt vật lý [10-16].

Cá thu là một trong những loài thủy sản có giá trị dinh dưỡng cao, giàu protein và được tiêu thụ rộng rãi. Tuy nhiên, do hàm lượng nước lớn và cấu trúc mô cơ mềm, cá thu dễ bị suy giảm chất lượng trong quá trình bảo quản bằng các phương pháp truyền thống. Sấy thăng hoa được xem là giải pháp tiềm năng nhằm nâng cao giá trị gia tăng và kéo dài thời gian bảo quản của sản phẩm cá thu. Mặc dù vậy, các nghiên cứu về đặc trưng nhiệt vật lý của cá thu trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa vẫn còn hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu xem xét đồng thời ảnh hưởng của thành phần hóa học, quá trình đóng băng và sự hình thành cấu trúc xốp.

Trong lĩnh vực mô hình hóa, các tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm có thể được xác định thông qua các mô hình dựa trên thành phần hóa học (composition-based models), cho phép ước tính các thông số như nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt và enthalpy từ tỷ lệ nước, protein, chất béo và khoáng [17-20]. Đối với vùng nhiệt độ thấp, việc mô tả sự đóng băng của nước và xác định tỷ lệ nước đóng băng theo nhiệt độ là yếu tố quan trọng để phản ánh chính xác sự biến đổi của các tính chất nhiệt vật lý [8, 21]. Ngoài ra, các nghiên cứu về sấy thăng hoa thủy sản cũng cho thấy cấu trúc xốp và đặc tính mao dẫn của vật liệu có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình truyền nhiệt – truyền khối [9, 22]. Tuy nhiên, việc kết hợp các mô hình này với sự biến đổi cấu trúc vật liệu trong giai đoạn sấy

thăng hoa, đặc biệt đối với vật liệu dạng lát mỏng như cá thu fillet, vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này tập trung khảo sát sự biến đổi các tính chất nhiệt vật lý của cá thu fillet trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa. Trên cơ sở thành phần hóa học của vật liệu, kết hợp với các mô hình toán phù hợp, các thông số như khối lượng riêng, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán nhiệt và enthalpy được xác định theo nhiệt độ và trạng thái vật liệu. Trong giai đoạn sấy thăng hoa, vật liệu được xem xét dưới dạng hai lớp gồm lớp khô và lớp ướt, trong đó lớp khô có cấu trúc như một môi trường xốp. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở dữ liệu nhiệt vật lý cần thiết cho việc xây dựng các mô hình truyền nhiệt – truyền chất với biên thăng hoa di động, đồng thời góp phần định hướng tối ưu hóa quá trình sấy thăng hoa đối với sản phẩm thủy sản.

II. ĐỐI TƯỢNG, VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

1. Vật liệu và đối tượng nghiên cứu

Vật liệu nghiên cứu là cá thu dạng lát (fillet), được thu mua tại khu vực cảng Hòn Rớ, phường Nam Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa. Sau khi vận chuyển về phòng thí nghiệm, mẫu được xử lý sơ bộ bằng cách loại bỏ da và xương, chỉ giữ lại phần thịt cá để tiến hành thí nghiệm. Các mẫu được cắt và chuẩn hóa kích thước với chiều dài 30 mm, chiều rộng 25 mm và chiều dày 16 mm nhằm đảm bảo tính đồng nhất trong quá trình nghiên cứu.

Đối tượng nghiên cứu là sự biến đổi các tính chất nhiệt vật lý của thịt cá thu trong khoảng nhiệt độ từ -40°C đến 25°C . Các thông số được khảo sát bao gồm: nhiệt độ đóng băng, tỷ lệ nước đóng băng, khối lượng riêng (ρ), nhiệt dung riêng (c_p), hệ số dẫn nhiệt (λ), hệ số khuếch tán nhiệt (α) và

enthalpy (h).

Các thông số này được xác định trên cơ sở thành phần hóa học của vật liệu kết hợp với các mô hình toán phù hợp, nhằm phục vụ cho việc mô tả các quá trình truyền nhiệt và truyền khối trong giai đoạn cấp đông và sấy thăng hoa.

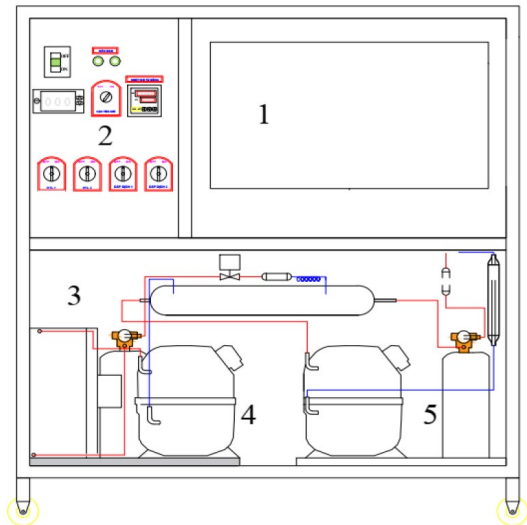
2. Thiết bị nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Kỹ thuật nhiệt, Trường Đại học Nha Trang, sử dụng tủ cấp đông gió và máy sấy thăng hoa.

Tủ cấp đông gió có thể tích buồng làm đông 50 L, nhiệt độ làm việc thấp nhất đạt -50°C và tốc độ gió có thể điều chỉnh trong khoảng từ 1 đến 5 m/s (Hình 1a). Thiết bị này được sử dụng để thực hiện quá trình cấp đông mẫu đến nhiệt độ yêu cầu trước khi tiến hành sấy thăng hoa [23].

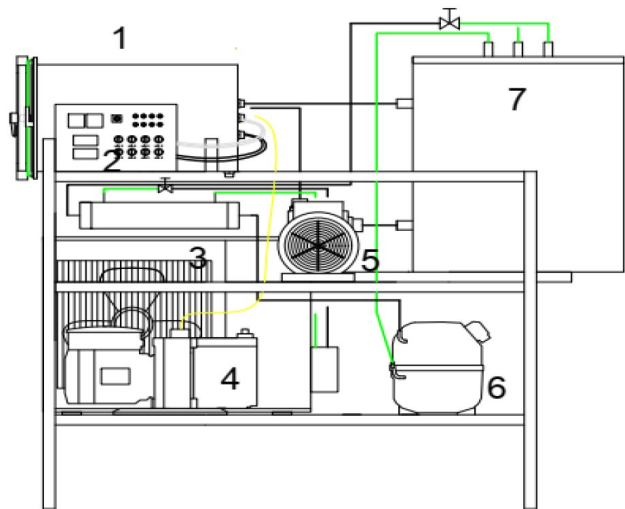
Máy sấy thăng hoa được trang bị buồng sấy có thể tích 30 L, với hệ thống tấm gia nhiệt có khả năng điều chỉnh nhiệt độ trong khoảng từ -30°C đến 70°C . Áp suất buồng sấy có thể đạt mức thấp nhất 30 Pa, bề mặt tấm ngưng kết ẩm có thể đạt nhiệt độ đến -35°C (Hình 1b). Thiết bị này cho phép thực hiện quá trình sấy thăng hoa trong điều kiện kiểm soát nhiệt độ và áp suất [24].

Ngoài ra, một số thiết bị đo lường được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: cân sấy ẩm Ohaus MB120 để xác định độ ẩm và khối lượng mẫu; thiết bị đo nhiệt độ đa kênh EXTECH TM500 kết hợp với cảm biến nhiệt loại K để theo dõi nhiệt độ tại tâm và bề mặt mẫu; thiết bị đo áp suất Testo 552 để giám sát áp suất trong buồng sấy; và cân điện tử có độ chính xác cao ($\pm 0,01$ g) để xác định khối lượng mẫu trong quá trình thí nghiệm. Các thông số vận hành được ghi nhận liên tục trong suốt quá trình thí nghiệm nhằm phục vụ phân tích và mô hình hóa.



1- Buồng đông; 2- Tủ điện điều khiển; 3- Dàn ngưng; 4- Máy nén tầng trên; 5- Máy nén tầng dưới.

(a)



1- Buồng sấy thăng hoa; 2- Tủ điện điều khiển; 3- Dàn ngưng; 4- Bơm chân không; 5- Bơm chất tải lạnh; 6- Máy nén; 7- Bình chứa chất tải lạnh.

(b)

Hình 1. a) Tủ cấp đông và b) Máy sấy thăng hoa

3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện theo hướng kết hợp giữa phương pháp lý thuyết và thực nghiệm nhằm xác định các tính chất nhiệt vật lý của cá thu fillet trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa.

Phương pháp lý thuyết bao gồm tổng quan tài liệu và xây dựng mô hình tính toán các tính chất nhiệt vật lý của vật liệu. Các thông số như nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, khối lượng riêng và enthalpy được xác định gián tiếp dựa trên thành phần hóa học của mẫu, kết hợp với các quan hệ thực nghiệm và mô hình dự đoán phù hợp.

Phương pháp thực nghiệm được sử dụng để xác định các thông số đầu vào và kiểm chứng mô hình, bao gồm: xác định thành phần hóa học cơ bản của mẫu, đo lường các đại lượng đặc trưng như nhiệt độ, độ ẩm, khối lượng và thể tích trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa.

3.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

3.1.1. Phương pháp xác định nhiệt độ đóng băng và tỉ lệ đóng băng của nước trong cá thu

Nhiệt độ đóng băng của nước trong cá thu được xác định thông qua phân tích đường cong đóng băng dựa trên nguyên lý hạ thấp nhiệt độ đóng băng của dung dịch theo định luật Raoult [8,12, 26-28]. Cụ thể, nhiệt độ đóng băng của nước được xác định tại điểm bắt đầu xuất hiện đoạn “nền nhiệt độ gần như không đổi” trên đường cong nhiệt độ theo thời gian trong quá trình cấp đông.

Thành phần nước đóng băng trong lát cá được xác định theo mô hình của Tchigeov [29, 30], biểu diễn mối quan hệ giữa lượng nước đóng băng và nhiệt độ như sau:

$$x_{ice} = \frac{1.105x_{w0}}{1 + \frac{0.7138}{\ln(t_f - t + 1)}} \quad (1)$$

Trong đó: x_{ice} là thành phần nước đóng băng; x_{w0} là độ ẩm ban đầu của vật liệu; t_f là nhiệt độ đóng băng của nước trong vật liệu; t là nhiệt độ của sản phẩm ($t < t_f$).

Tỷ lệ nước đóng băng theo phần khối lượng nước ban đầu được xác định theo biểu thức:

$$\omega = \frac{x_{ice}}{x_{w0}} \quad (2)$$

3.1.2. Phương pháp xác định các tính chất nhiệt vật lý

Các tính chất nhiệt vật lý của cá thu được xác định trên cơ sở số liệu thực nghiệm kết hợp với các mô hình tính toán phù hợp đã được công bố.

a) Khối lượng riêng

Khối lượng riêng biểu kiến của mẫu cá thu được xác định dựa trên tỷ số giữa khối lượng và thể tích của mẫu (bao gồm chất rắn, nước và khí bên trong cá thu) [9, 31, 32]:

$$\rho = \frac{m_t}{V_t}, \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (3)$$

Trong đó: m_t là khối lượng, [kg] và V_t là thể tích của lát cá thu fillet, [m^3].

Thực nghiệm được tiến hành để xác định khối lượng và thể tích của mẫu cá thu ở trạng thái tươi và sau sấy. Khối lượng mẫu được đo bằng cân điện tử có độ chính xác cao, trong khi thể tích được xác định bằng phương pháp thể chỗ (với cá tươi dùng nước, với mẫu khô dùng hạt inox đường kính 0,1mm) và ống đong thể tích. Kết quả thu được được sử dụng để tính toán khối lượng riêng của mẫu trong các trạng thái khác nhau.

b) Độ xốp

Đối với mẫu cá thu tươi, do cấu trúc vật liệu còn đặc và chưa hình thành lỗ rỗng, độ xốp có thể xem xấp xỉ bằng 0.

Độ xốp của vật liệu sau sấy được xác định dựa trên mối quan hệ giữa khối lượng riêng biểu kiến và khối lượng riêng của các chất thành phần [9, 17, 29, 33, 34]:

$$\varepsilon = 1 - \rho \sum \left(\frac{x_i}{\rho_i} \right) \quad (4)$$

c) Nhiệt dung riêng

Nhiệt dung riêng của cá thu được xác định khác nhau theo các vùng nhiệt độ, phụ thuộc vào trạng thái của nước trong vật liệu.

Ở trên nhiệt độ đóng băng của nước trong vật liệu ($t > t_f$), nhiệt dung riêng được xác định theo mô hình cộng thành phần [17, 29, 33, 34]:

$$c_p = \sum x_i c_{p,i}, \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (5)$$

Trong đó: x_i và c_i lần lượt là phần khối lượng và nhiệt dung riêng của thành phần thứ i .

Ở dưới nhiệt độ đóng băng của nước, nhiệt dung riêng biểu kiến của cá thu được xác định theo mô hình Schwartzberg [17, 29, 33, 34], có xét đến ảnh hưởng của ẩn nhiệt đóng băng:

$$c_p = c_f + (x_{w0} - x_b) \left[\frac{L_0 (t_0 - t_f)}{(t_0 - t)^2} \right], [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (6)$$

Trong đó: c_p là nhiệt dung riêng biểu kiến; c_f là nhiệt dung riêng của vật liệu khi đã đóng băng hoàn toàn; x_b là phần nước liên kết; L_0 là nhiệt ẩn đóng băng của nước; $t_0 = 0^\circ\text{C}$; t_f là nhiệt độ đóng băng của nước trong vật liệu; t là nhiệt độ của vật liệu.

Trong giai đoạn sấy thăng hoa, vật liệu được xem là môi trường xốp gồm pha rắn và pha khí. Nhiệt dung riêng hiệu dụng được xác định theo mô hình của Capozzi [35]:

$$c_p = c_{p,gas} \varepsilon + c_{p,sol} (1 - \varepsilon), \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (7)$$

Trong đó: ε là độ xốp của vật liệu; $c_{p,sol}$ là nhiệt dung riêng của phần rắn; $c_{p,gas}$ là nhiệt dung riêng của pha khí trong lỗ rỗng.

d) Hệ số dẫn nhiệt

Hệ số dẫn nhiệt của cá thu trong giai đoạn cấp đông được xác định dựa trên mô hình vật liệu nhiều thành phần của Murakami và Okos

[33, 34, 36], với hai trường hợp giới hạn là phân bố song song và vuông góc của các pha cấu tạo.

Trong mô hình song song, hệ số dẫn nhiệt được xác định theo quy tắc cộng theo thành phần thể tích:

$$\lambda_{||} = \sum x_i^v k_i, \quad [W/(m \cdot K)] \quad (8)$$

Trong đó: x_i^v là phần thể tích của thành phần thứ i, được xác định theo:

$$x_i^v = \frac{x_i / \rho_i}{\sum (x_i / \rho_i)}, \quad [W/(m \cdot K)] \quad (9)$$

Với x_i , ρ_i là thành phần khối lượng và khối lượng riêng của thành phần thứ i trong cá thu.

Trong mô hình vuông góc, hệ số dẫn nhiệt được xác định theo:

$$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\sum (x_i^v / k_i)}, \quad [W/(m \cdot K)] \quad (10)$$

Giá trị hiệu dụng của hệ số dẫn nhiệt được xác định bằng trung bình số học của hai giá trị giới hạn:

$$\lambda_{av} = \frac{\lambda_{||} + \lambda_{\perp}}{2}, \quad [W/(m \cdot K)] \quad (11)$$

Trong giai đoạn sấy thăng hoa, lớp vật liệu khô được xem là môi trường xốp gồm pha rắn và pha khí. Hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng được xác định theo mô hình của Capozzi [35]:

$$\lambda_k = \lambda_r \cdot \frac{2\lambda_r + \lambda_h - 2\varepsilon(\lambda_r - \lambda_h)}{2\lambda_r + \lambda_h + \varepsilon(\lambda_r - \lambda_h)}, [W/(m \cdot K)] \quad (12)$$

Trong đó: λ_h là hệ số dẫn nhiệt của hơi trong lớp khô, $[W/(m \cdot K)]$; λ_r là hệ số dẫn nhiệt của thành phần chất rắn trong lớp khô, $[W/(m \cdot K)]$ và ε là độ xốp của lớp khô.

Hệ số dẫn nhiệt của hơi trong vùng khô, λ_h $[W/(m \cdot K)]$, phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất hay nồng độ của hơi ẩm. Trong nghiên cứu

này, λ_h được tra bởi phần mềm EES.

Hệ số dẫn nhiệt của thành phần chất rắn trong lát cá thu, λ_r được xác định theo:

$$\lambda_r = \sum \lambda_i \cdot x_i^v, \quad [W/(m \cdot K)] \quad (13)$$

Trong đó: λ_i là hệ số dẫn nhiệt của của thành phần thứ i trong cá thu, $[W/(m \cdot K)]$; x_i^v là thành phần thể tích của thành phần thứ i trong cá thu, được xác định theo công thức (9).

e) Hệ số khuếch tán nhiệt

Hệ số khuếch tán nhiệt của cá thu được xác định từ mối quan hệ giữa hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng và khối lượng riêng [17, 29]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (14)$$

Trong đó: α là hệ số khuếch tán nhiệt; λ là hệ số dẫn nhiệt; c là nhiệt dung riêng; ρ là khối lượng riêng của vật liệu.

f) Enthalpy

Enthalpy của cá thu được xác định theo phương pháp của Chen [37], có xét đến ảnh hưởng của trạng thái nước trong vật liệu.

Ở vùng nhiệt độ trên điểm đóng băng ($t > t_p$), enthalpy được xác định theo:

$$h = h_f + (t - t_f) \left(4.19 - 2.30x_s - 0.628x_s^3 \right) \quad (15)$$

Trong đó: h là enthalpy của vật liệu tại nhiệt độ t ; h_f là enthalpy tại nhiệt độ đóng băng của nước; x_s là hàm lượng chất rắn hòa tan trong vật liệu. Ở vùng kết tinh hoàn toàn và sau kết tinh, enthalpy của vật liệu được xác định theo:

$$h = (t - t_r) \left[1.55 + 1.26x_s - \frac{(x_{w0} - x_b)L_0 f}{t \cdot t_r} \right] \quad (16)$$

Trong đó: t_r là nhiệt độ tham chiếu; f là tỷ lệ nước đóng băng; x_b là phần nước liên kết trong vật liệu.

3.2. Phương pháp thực nghiệm

3.2.1. Phương pháp xác định thành phần hóa học cơ bản của cá thu fillet

Mẫu cá thu fillet sau khi sơ chế được đưa đi phân tích thành phần hóa học cơ bản dựa trên các tiêu chuẩn hiện hành. Các tiêu chuẩn bao gồm: TCVN 3705:1990, TCVN 3703:2009, TCVN 4594:1988, TCVN 5253:1990, TCVN 3700:1990 [8].

3.2.2. Phương pháp thực nghiệm sấy

Mẫu cá thu sau khi sơ chế được cắt thành các lát có kích thước ($30 \times 25 \times 16$) mm. Các cảm biến nhiệt độ loại K được gắn tại tâm và bề mặt mẫu nhằm theo dõi sự biến đổi nhiệt độ trong suốt quá trình thí nghiệm.

Quá trình cấp đông được thực hiện trong môi trường lạnh đông có nhiệt độ khoảng -45°C với tốc độ gió 5 m/s nhằm bảo đảm nhiệt độ tâm mẫu đạt -40°C trước khi chuyển sang giai đoạn sấy thăng hoa. Theo các nghiên cứu trước đây, nhiệt độ cuối cấp đông trong sấy thăng hoa thực phẩm có thể nằm trong khoảng từ -14°C đến -43°C tùy thuộc vào đặc tính của vật liệu [6]. Trong nghiên cứu này, nhiệt độ tâm -40°C được lựa chọn nhằm bảo đảm sản phẩm ở trạng thái đông lạnh sâu trước khi tiến hành tạo chân không và gia nhiệt. Đây cũng là mức nhiệt độ thường được sử dụng trong nhiều nghiên cứu sấy thăng hoa đối với thực phẩm nhằm tăng tỷ lệ nước đóng băng và duy trì trạng thái ổn định của vật liệu trong giai đoạn đầu của quá trình sấy [1, 2, 6, 37].

Sau khi cấp đông, mẫu được nhanh chóng chuyển sang máy sấy thăng hoa (thời gian di chuyển khoảng 1 phút) nhằm hạn chế hiện tượng tăng nhiệt độ bề mặt. Trước khi đưa mẫu vào, máy sấy thăng hoa được vận hành trước để làm lạnh không gian buồng sấy, tắt ngưng kết đến điều kiện làm việc. Do thời gian chuyển mẫu ngắn và nhiệt độ vật liệu thấp, sự thay đổi trạng thái nhiệt của vật liệu trong giai đoạn chuyển tiếp được xem là không đáng kể, do đó ít ảnh hưởng đến điều kiện nhiệt ban đầu và các kết quả khảo sát trong quá trình sấy. Giai đoạn sau đó, máy sấy thăng hoa

được vận hành và duy trì ở chế độ làm việc: nhiệt độ tẩm gia nhiệt 20°C , nhiệt độ bề mặt ngưng tụ -35°C và áp suất buồng sấy 80Pa. Nhiệt độ tại các vị trí đo được ghi nhận liên tục với chu kỳ 1 s cho đến khi kết thúc quá trình sấy.

Để xác định sự biến đổi độ ẩm theo thời gian, nghiên cứu sử dụng phương pháp thực nghiệm gián đoạn theo mẻ. Trước tiên, một mẻ sấy cơ sở được thực hiện nhằm xác định tổng thời gian cần thiết để đưa mẫu về độ ẩm yêu cầu. Trên cơ sở đó, các mẻ sấy tiếp theo được tiến hành và dừng tại các thời điểm khác nhau để thu mẫu phân tích độ ẩm, từ đó xây dựng đường cong sấy của vật liệu. Phương pháp này cho phép xác định sự thay đổi độ ẩm của cá thu theo thời gian trong cùng một chế độ sấy [26].

Quá trình cấp đông và sấy thăng hoa được lặp lại 3 lần trong cùng điều kiện công nghệ nhằm đánh giá độ lặp lại của kết quả thực nghiệm. Các thông số được xác định theo giá trị trung bình của các lần đo và được xử lý thống kê trước khi phân tích.

3.3. Phương pháp xử lý số liệu

Dữ liệu thực nghiệm được xử lý và phân tích bằng phần mềm MATLAB kết hợp với Microsoft Excel. Các phương pháp hồi quy được sử dụng để xây dựng các hàm quan hệ giữa các tính chất nhiệt vật lý với nhiệt độ và độ ẩm. Mức độ phù hợp của các mô hình hồi quy được đánh giá thông qua hệ số xác định (R^2). Kết quả được biểu diễn dưới dạng bảng và đồ thị nhằm phân tích quy luật biến đổi của vật liệu trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

1. Thành phần hóa học cơ bản của cá thu

Việc xác định các thành phần hóa học cơ bản của cá thu fillet được thực hiện bởi Trung tâm nghiên cứu, thí nghiệm thực hành, Trường Đại học Nha Trang. Kết quả phân tích được thể hiện trong bảng 1 cho thấy cá thu tươi chứa 74,86% nước, 24,13% protein, 0,57% chất béo, 0,43% tro và 0,01% carbohydrate.

Với thành phần nước (~75%) tương đương với

hiều loài cá biển như cá ngừ và cá hồi, thường nằm trong khoảng 70–78% [21]. Hàm lượng nước cao này là yếu tố chi phối mạnh các quá trình truyền nhiệt và chuyển pha trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa. Đồng thời, hàm lượng

protein cao (~24%) làm tăng khả năng giữ nước liên kết, ảnh hưởng đến động học quá trình sấy. Các giá trị thành phần thu được được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho việc tính toán các thông số nhiệt vật lý của cá thu.

Bảng 1. Thành phần các chất cơ bản trong lát cá thu tươi fillet

STT	Tên thành phần	Đơn vị	Phương pháp kiểm nghiệm	Kết quả
1	Chất đạm (Protein)	%	TCVN 3705:1990	24,13
2	Chất béo (Fat)	%	TCVN 3703:2009	0,57
3	Cacbohydrat (Carbohydrate)	%	TCVN 4594:1988	0,01
4	Tro (Ash)	%	TCVN 5253:1990	0,43
5	Nước (Water)	%	TCVN 3700:1990	74,86

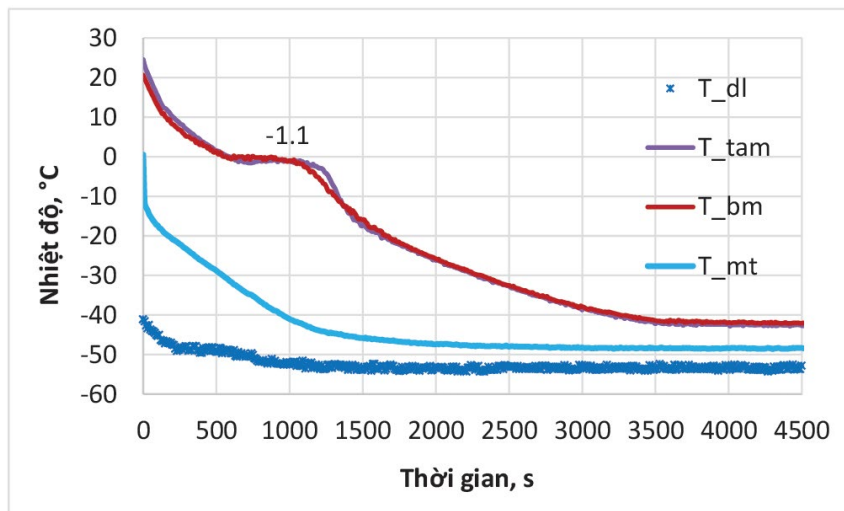
2. Kết quả thực nghiệm

2.1. Kết quả thực nghiệm quá trình cấp đông

Đường cong đóng băng biến đổi nhiệt độ của cá thu trong quá trình cấp đông cho thấy nhiệt độ tâm mẫu giảm liên tục từ 23,5°C xuống -40°C sau khoảng 76 phút (Hình 2). Ở giai đoạn đầu, nhiệt độ giảm nhanh do chênh lệch nhiệt độ lớn giữa mẫu và môi trường lạnh. Khi tiến gần vùng đóng băng, tốc độ giảm nhiệt chậm lại do xuất hiện chuyển pha của nước trong mô cá. Sau khi kết tinh diễn ra, nhiệt độ tiếp tục giảm dần đến giá

trị cuối của quá trình cấp đông. Đường cong đóng băng thu được phản ánh rõ ba giai đoạn đặc trưng gồm hạ nhiệt ban đầu, chuyển pha và làm lạnh sâu sau kết tinh.

Kết quả thu được phù hợp với lý thuyết truyền nhiệt trong quá trình cấp đông thực phẩm, trong đó giai đoạn chuyển pha chiếm phần lớn thời gian do cần cung cấp năng lượng để giải phóng ẩn nhiệt kết tinh [38]. Hiện tượng quá lạnh quan sát được là đặc trưng của các hệ sinh học chứa dung dịch đa cấu tử, trong đó sự hình thành mầm tinh thể bị kéo dài thời gian.



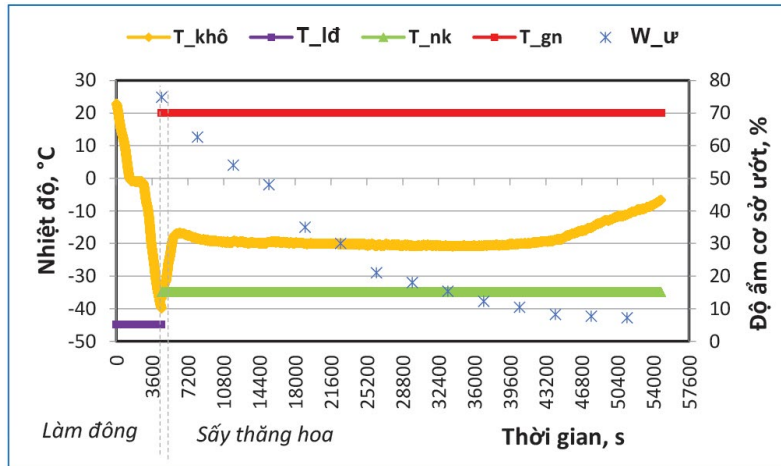
Hình 2. Sự biến đổi nhiệt độ của lát cá thu trong quá trình cấp đông

Trong đó: T_{dl} : nhiệt độ dàn lạnh, T_{tam} : nhiệt độ tâm lát cá, T_{bm} : nhiệt độ bề mặt lát cá, T_{mt} : nhiệt độ môi trường làm đông.

2.2. Kết quả thực nghiệm sấy thăng hoa

Kết quả thực nghiệm cho thấy trong điều kiện sấy khảo sát, độ ẩm của cá thu giảm từ 74,86% xuống 7,00%, nhiệt độ của lớp khô tăng lên đến khoảng -5°C sau 14h (Hình 3). Độ ẩm giảm nhanh ở giai đoạn đầu do nước đá tự do thăng hoa mạnh khỏi vật liệu, sau đó giảm chậm hơn khi phần ẩm

còn lại chủ yếu là ẩm liên kết. Sự thay đổi nhiệt độ của mẫu trong suốt quá trình sấy cũng cho thấy ở giai đoạn đầu nhiệt độ tăng chậm, còn ở giai đoạn cuối nhiệt độ tăng nhanh hơn khi quá trình chuyển dần sang sấy thứ cấp. Kết quả này phù hợp với đặc trưng động học của quá trình sấy thăng hoa đối với vật liệu có hàm lượng ẩm cao.



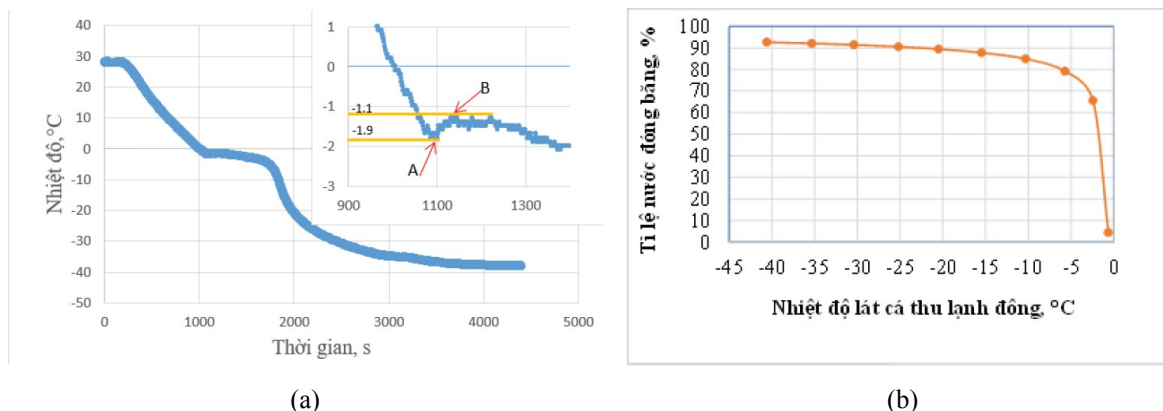
Hình 3. Biến đổi nhiệt độ của cá thu trong quá trình sấy thăng hoa

Trong đó: T_{kh} : nhiệt độ lớp khô, T_{ld} : nhiệt độ môi trường làm đông, T_{nk} : nhiệt độ tẩm ngưng kết hơi, T_{gn} : nhiệt độ tẩm gia nhiệt, W_u : độ ẩm (cơ sở ướt).

3. Nhiệt độ đóng băng của nước trong cá thu

Nhiệt độ đóng băng của nước trong cá thu được xác định bằng phương pháp phân tích đường cong đóng băng. Kết quả cho thấy nhiệt độ đóng băng của nước trong cá thu là $-1,1^{\circ}\text{C}$. Trước thời điểm này, mẫu xuất hiện trạng thái quá lạnh; sau đó nhiệt độ tăng nhẹ do nhiệt kết tinh được giải phóng, rồi tiếp tục giảm khi quá trình đóng băng

diễn ra hoàn toàn (Hình 4 a). Giá trị này phù hợp với đặc tính của nguyên liệu thủy sản có hàm lượng nước cao và được sử dụng làm cơ sở để xác định tỷ lệ nước đóng băng trong vật liệu. Bên cạnh đó, giá trị này nằm trong khoảng $-0,8^{\circ}\text{C}$ đến $-2,0^{\circ}\text{C}$ được báo cáo cho các sản phẩm thủy sản [37, 39], phản ánh ảnh hưởng của các chất hòa tan như Protein và muối làm hạ thấp điểm đóng băng.



Hình 4. Đường cong đóng băng (a) và tỷ lệ nước đóng băng theo nhiệt độ (b) của cá thu

Xác định tỉ lệ nước đóng băng trong cá thu

Tỷ lệ nước đóng băng trong cá thu được xác định theo mô hình toán của Tchigeov, sử dụng công thức (1) và (2). Kết quả tính toán cho thấy ở nhiệt độ -40°C , tỷ lệ nước đóng băng trong mẫu đạt khoảng 0,93 (Hình 4 b), tương tự các nghiên cứu trên cá và thịt [20]. Điều này cho thấy phần lớn lượng nước tự do trong cá thu đã chuyển sang trạng thái rắn trước khi bước vào giai đoạn sấy thăng hoa, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình thăng hoa diễn ra trong môi trường chân không.

4. Tính chất nhiệt vật lý của cá thu

4.1. Sự biến đổi tính chất nhiệt vật lý của cá thu fillet trong giai đoạn làm đông

Trong giai đoạn làm đông, các tính chất nhiệt vật lý của cá thu thay đổi rõ rệt theo nhiệt độ, đặc biệt ở vùng lân cận điểm đóng băng. Sự thay đổi này gắn liền với quá trình hạ nhiệt, kết tinh nước và chuyển vật liệu từ trạng thái chưa đông sang trạng thái đông lạnh sâu. Các thông số khối lượng riêng, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán nhiệt và enthalpy đều thể hiện xu hướng biến đổi khác nhau giữa vùng trên điểm băng và vùng dưới điểm băng.

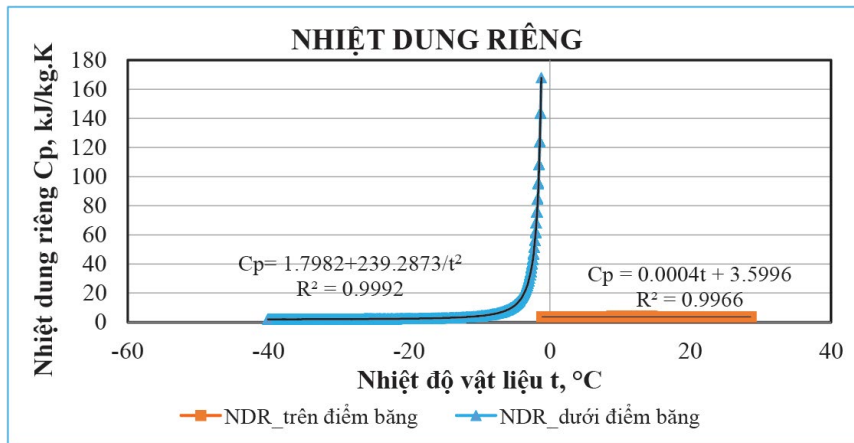
4.1.1. Khối lượng riêng của cá thu trong giai đoạn làm đông

Khối lượng riêng biểu kiến của cá thu trước khi làm đông được xác định bằng thực nghiệm, dựa trên khối lượng và thể tích của mẫu cá. Kết quả cho thấy khối lượng riêng trung bình của mẫu cá thu fillet là $1087,00 \text{ kg/m}^3$. Kết quả này là phù hợp với khoảng giá trị khối lượng riêng của thủy sản tươi

được công bố trong tài liệu ($1042\text{--}1093 \text{ kg/m}^3$) [40]. Trong khi đó, Rahman cũng đã xác định khối lượng riêng của cá ngừ tươi là 1098 kg/m^3 [41].

4.1.2. Biến đổi nhiệt dung riêng của cá thu trong giai đoạn làm đông

Nhiệt dung riêng của cá thu ở vùng nhiệt độ trên điểm băng được xác định theo công thức (5) dựa trên nhiệt dung riêng và thành phần các chất. Kết quả cho thấy nhiệt dung riêng ở dải nhiệt độ trên điểm đóng băng gần như ít thay đổi và nằm trong khoảng từ 3,601 đến 3,592 kJ/kg.K. Điều này phản ánh ảnh hưởng lớn của hàm lượng nước trong nguyên liệu tươi đối với khả năng tích lũy nhiệt của vật liệu. Trong dải nhiệt độ dưới điểm đóng băng, nhiệt dung riêng biểu kiến của cá thu được xác định theo công thức (6). Kết quả cho thấy giá trị này tăng mạnh ở vùng cận điểm băng do ảnh hưởng của nhiệt ẩn chuyển pha, đạt khoảng 167,97 kJ/kg.K tại $-1,2^{\circ}\text{C}$, sau đó giảm nhanh và ổn định ở mức xấp xỉ 1,950 kJ/kg.K ở giai đoạn cuối quá trình cấp đông (Hình 5). Sự tăng đột biến của nhiệt dung riêng biểu kiến gần điểm đóng băng là do đóng góp của ẩn nhiệt chuyển pha, dẫn đến giá trị c_p đạt cực đại [8, 37]. Hiện tượng này đã được mô tả trong mô hình Schwartzberg và là đặc trưng chung của vật liệu thực phẩm chứa nước [37]. Giá trị lớn của nhiệt dung riêng biểu kiến trong vùng lân cận điểm đóng băng là do sự phân bố ẩn nhiệt chuyển pha trong khoảng nhiệt độ hẹp, do đó không phản ánh nhiệt dung thực mà là giá trị hiệu dụng của hệ.

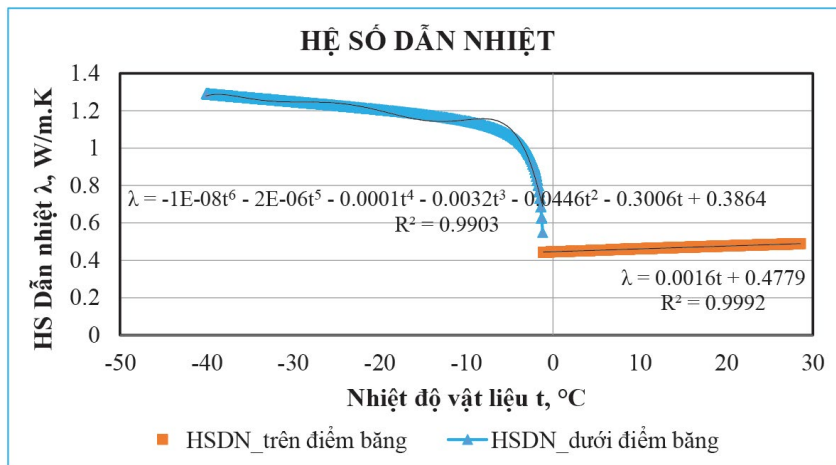


Hình 5. Biến đổi nhiệt dung riêng của cá thu fillet trong giai đoạn làm đông

4.1.3. Biến đổi hệ số dẫn nhiệt của cá thu trong giai đoạn làm đông

Hệ số dẫn nhiệt của cá thu trong giai đoạn làm đông được xác định là hệ số dẫn nhiệt trung bình song song và vuông góc dựa trên các công thức (8) đến (11). Kết quả cho thấy, ở dải nhiệt độ trên điểm đóng băng thì hệ số dẫn nhiệt giảm nhẹ từ 0,488 xuống 0,443 W/m.K. Ở dải nhiệt

độ dưới điểm đóng băng, hệ số dẫn nhiệt tăng từ 0,549 W/m.K đến 1,290 W/m.K khi nhiệt độ giảm từ -1,1°C xuống -40,0°C (Hình 6). Sự gia tăng hệ số dẫn nhiệt trong vùng đông lạnh phù hợp với thực tế rằng băng có hệ số dẫn nhiệt (khoảng 2,200 W/m.K) cao hơn nước (khoảng 0,600 W/m.K), do đó trong giai đoạn làm đông khi tỷ lệ nước đóng băng tăng, khả năng dẫn nhiệt của vật liệu cũng tăng [37].



Hình 6. Biến đổi hệ số dẫn nhiệt của cá thu fillet trong giai đoạn làm đông

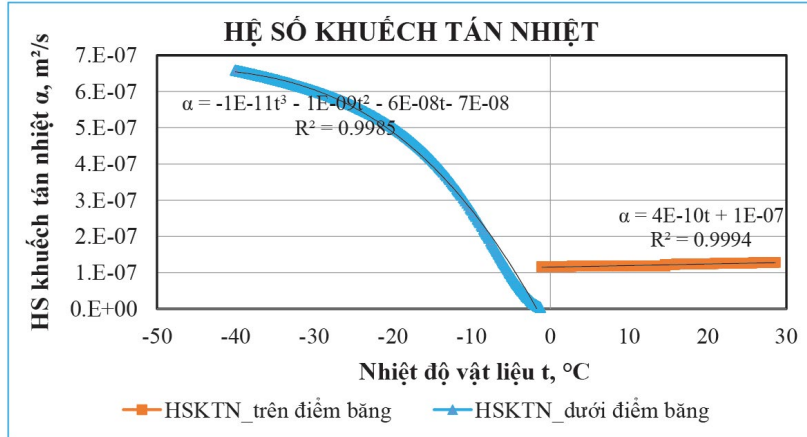
4.1.4. Biến đổi hệ số khuếch tán nhiệt của cá thu trong giai đoạn làm đông

Hệ số khuếch tán nhiệt xác định theo công thức (14) trong dải nhiệt độ trên điểm đóng băng giảm nhẹ trong khoảng từ $1,279 \times 10^{-7}$ đến $1,159 \times 10^{-7}$ m²/s. Sau đó giảm đột ngột ở khu vực nhiệt độ xung quanh điểm đóng băng, xuống

đến $3,099 \times 10^{-9}$ m²/s. Sự suy giảm đột ngột này chủ yếu xuất phát từ sự gia tăng mạnh của nhiệt dung riêng biểu kiến trong vùng chuyển pha do xuất hiện thành phần nhiệt ẩn kết tinh của nước. Mặc dù hệ số dẫn nhiệt có xu hướng tăng khi băng hình thành, sự gia tăng của nhiệt dung riêng biểu kiến lớn hơn nhiều nên làm hệ số khuếch

tán nhiệt giảm xuống giá trị cực tiểu tại vùng lân cận điểm đóng băng. Sau đó, ở dải nhiệt độ dưới điểm đóng băng thì hệ số này có xu hướng tăng mạnh từ $3,099 \times 10^{-9}$ đến $6,584 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Hình 7). Sự tăng mạnh của hệ số khuếch tán

nhiệt dưới điểm đóng băng là kết quả tổng hợp của việc tăng hệ số dẫn nhiệt và giảm nhiệt dung riêng, làm tăng khả năng lan truyền nhiệt trong vật liệu đông lạnh [8, 37].

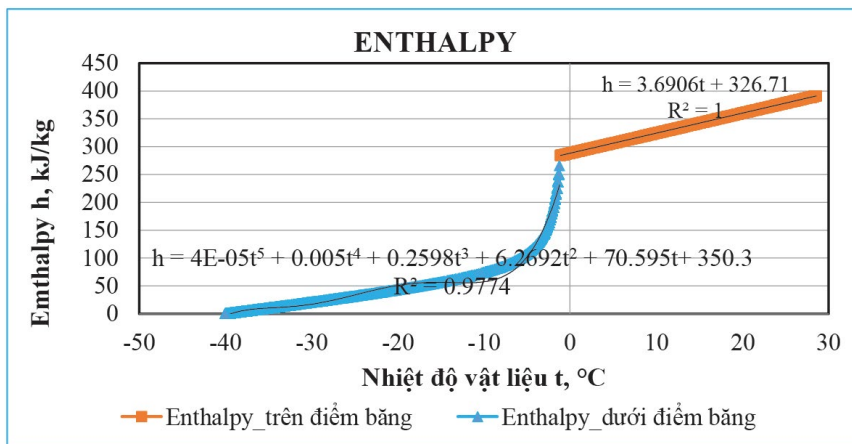


Hình 7. Biến đổi hệ số khuếch tán nhiệt của cá thu fillet trong giai đoạn làm đông

4.1.5. Biến đổi enthalpy của cá thu trong giai đoạn làm đông

Ở dải nhiệt độ trên điểm đóng băng, enthalpy tính theo công thức (15) giảm từ khoảng từ 388,981 xuống 284,169 kJ/kg khi nhiệt độ giảm. Nhìn chung, ở vùng trên điểm băng, các tính chất nhiệt vật lý biến đổi tương đối đều và chủ yếu chịu ảnh hưởng của quá trình hạ nhiệt độ của vật liệu chưa kết tinh.

Ngược lại, trong dải nhiệt độ dưới điểm đóng băng, enthalpy xác định theo công thức (16) giảm mạnh từ 265,854 kJ/kg xuống tiệm cận mức thấp nhất (gần 0 kJ/kg) ở cuối giai đoạn cấp đông (Hình 8). Kết quả này cho thấy vùng dưới điểm băng là vùng biến đổi mạnh nhất của vật liệu do tác động của quá trình chuyển pha nước thành băng. Xu hướng biến đổi enthalpy này cũng đã được nhiều nghiên cứu trước đây nhận định [8, 37].



Hình 8. Biến đổi Enthalpy của cá thu fillet trong giai đoạn làm đông

4.2. Sự biến đổi tính chất nhiệt vật lý của cá thu fillet trong giai đoạn sấy thăng hoa

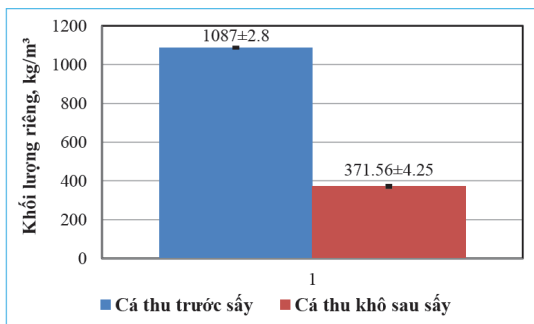
Trong giai đoạn sấy thăng hoa, ẩm được loại bỏ thông qua quá trình thăng hoa từ bề mặt ngoài của vật liệu, dẫn đến sự hình thành và phát triển của lớp khô từ ngoài vào trong, đồng thời phân chia vật liệu thành hai vùng riêng biệt gồm lớp khô và lớp đóng băng (lớp ẩm chưa thăng hoa) [7, 9, 19]. Quá trình này được đặc trưng bởi sự tồn tại của biên thăng hoa di động, di chuyển dần vào bên trong vật liệu theo thời gian, tương tự bài toán biên chuyển động trong truyền nhiệt Stefan problem [9, 42]. Bên cạnh đó, trong hầu hết các nghiên cứu về sấy thăng hoa, lớp đóng băng thường được giả thiết có nhiệt độ và độ ẩm gần như không đổi, do đó các tính chất nhiệt vật lý của vùng này được xem tương đương với trạng thái ban đầu sau quá trình cấp đông [9, 17, 19]. Ngược lại, lớp khô được xem là môi trường xốp, trong đó nhiệt độ và độ ẩm biến đổi theo thời gian và không gian, dẫn đến sự thay đổi đáng kể các tính chất nhiệt vật lý [9, 17]. Lớp khô hình thành có độ ẩm xấp xỉ độ ẩm cuối của giai đoạn sấy thăng hoa và đóng vai trò là môi trường truyền nhiệt – truyền khối chính trong suốt quá trình sấy. Sự phát triển của lớp này làm tăng diện tích truyền nhiệt và khuếch tán hơi nước, đồng thời tạo ra cấu

trúc xốp đặc trưng của vật liệu sau sấy thăng hoa [7, 9, 17]. Do đó, việc xác định sự biến đổi các tính chất nhiệt vật lý của lớp khô là cần thiết để mô tả chính xác cơ chế truyền nhiệt – truyền ẩm trong giai đoạn sấy thăng hoa.

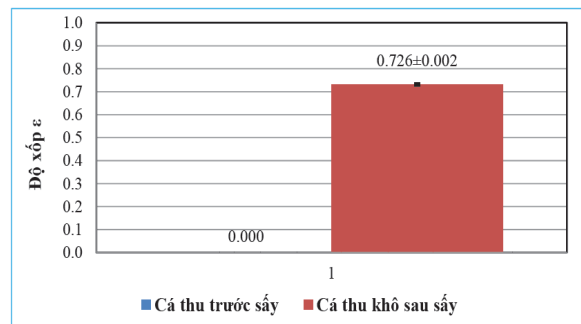
4.2.1. Khối lượng riêng của cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa

Bằng phương pháp thực nghiệm, nghiên cứu đã xác định được khối lượng riêng biểu kiến của thu khô sau giai đoạn sấy thăng hoa trung bình là $371,560 \text{ kg/m}^3$. Điều này liên quan đến độ xốp của vật liệu đã tăng lên rất nhiều, từ mức không đáng kể trước khi sấy đã tăng lên đến 0,726 (Hình 9).

Sự giảm mạnh khối lượng riêng từ $1087,000 \text{ kg/m}^3$ xuống $371,560 \text{ kg/m}^3$ và tăng độ xốp là hệ quả trực tiếp của quá trình thăng hoa, trong đó pha băng chuyển trực tiếp sang hơi, để lại cấu trúc mao quản. Hiện tượng này đã được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu về sấy thăng hoa thực phẩm [7, 9], đây cũng là một trong những ưu điểm lớn mà chỉ có phương pháp sấy thăng hoa có. Với một số phương pháp sấy khô khác, kèm theo quá trình tách ẩm, vật liệu sấy bị co ngót thể tích rất lớn, điều này dẫn đến khối lượng riêng của vật liệu có xu hướng tăng lên trong quá trình sấy.



(a)



(b)

Hình 9. Biến đổi khối lượng riêng (a) và độ xốp (b) của cá thu fillet (lớp khô) trong giai đoạn sấy thăng hoa

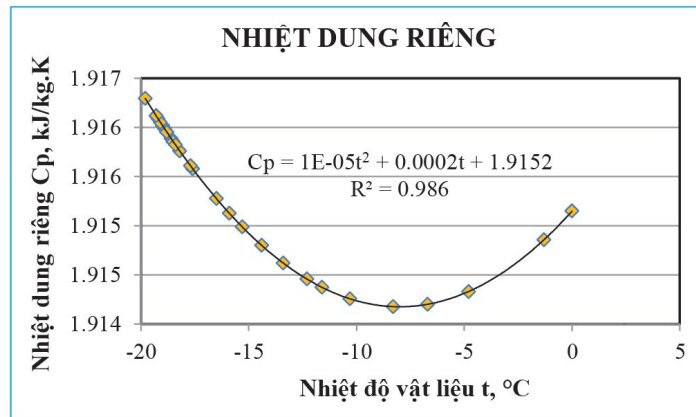
4.2.2. Biến đổi nhiệt dung riêng của cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa

Nhiệt dung riêng của cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa được xác định theo mô hình nhiệt dung riêng hiệu dụng của vật liệu xốp (công thức

(7)). Kết quả cho thấy nhiệt dung riêng của lớp khô dao động trong phạm vi hẹp, với giá trị trung bình khoảng $1,915 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (Hình 10). Trong đó, nhiệt dung riêng của các thành phần chất rắn đều tăng theo nhiệt độ, trong khi thành phần ẩm còn

lại trong lớp khô (chủ yếu là nước không đóng băng và không tham gia quá trình thăng hoa, tồn tại dưới dạng nước liên kết với cấu trúc vật liệu) có nhiệt dung riêng giảm. Do độ ẩm còn lại trong lớp khô chỉ khoảng 7,00%, trong khi protein là thành phần chất rắn chiếm tỷ lệ lớn nhất nên ảnh

hưởng của pha rắn trở nên chi phối đối với nhiệt dung riêng hiệu dụng của vật liệu. Vì vậy, nhiệt dung riêng của lớp khô chỉ tăng nhẹ theo nhiệt độ. So với giai đoạn cấp đông, sự biến đổi nhiệt dung riêng trong giai đoạn sấy thăng hoa nhỏ hơn đáng kể.

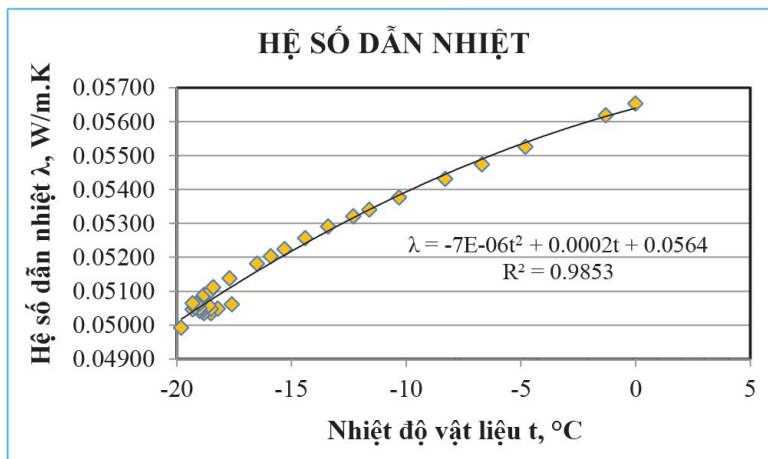


Hình 10. Biến đổi nhiệt dung riêng của cá thu fillet (lớp khô) trong giai đoạn sấy thăng hoa

4.2.3. Biến đổi hệ số dẫn nhiệt của cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa

Hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng của lớp khô cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa có giá trị thấp và tăng nhẹ theo nhiệt độ vật liệu, dao động trong khoảng từ 0,049 đến 0,057 W/m·K, với giá trị trung bình khoảng 0,052 W/m·K (Hình 11). So với trạng thái trước sấy, hệ số dẫn nhiệt giảm rất mạnh do sự chuyển biến từ vật liệu ẩm (chứa pha băng) sang cấu trúc khô xốp sau quá trình

thăng hoa băng. Sự hình thành hệ mao quản và các khoảng rỗng chứa khí trong lớp khô làm giảm đáng kể khả năng truyền nhiệt của vật liệu, bởi pha khí có hệ số dẫn nhiệt rất thấp, thường chỉ khoảng 0,020–0,030 W/m·K, thấp hơn nhiều so với pha băng của vật liệu trước khi thăng hoa [43]. Ngoài ảnh hưởng của độ xốp, điều kiện áp suất thấp trong buồng sấy (80 Pa) cũng có thể góp phần làm giảm đóng góp của pha khí vào quá trình dẫn nhiệt trong hệ mao quản của lớp khô.



Hình 11. Biến đổi hệ số dẫn nhiệt của cá thu fillet (lớp khô) trong giai đoạn sấy thăng hoa

Mặc dù hệ số dẫn nhiệt của lớp khô có xu hướng tăng nhẹ theo nhiệt độ, mức độ biến đổi không lớn. Xu hướng này chủ yếu liên quan đến sự gia tăng hệ số dẫn nhiệt của pha khí và khung vật liệu theo nhiệt độ, trong khi độ xốp và độ ẩm còn lại của lớp khô hầu như không thay đổi.

So với giai đoạn cấp đông, hệ số dẫn nhiệt trong giai đoạn sấy thăng hoa nhỏ hơn rất nhiều do không còn sự hiện diện của pha băng – thành phần có khả năng dẫn nhiệt cao. Sự suy giảm hệ số dẫn nhiệt làm gia tăng nhiệt trở của lớp khô. Trong quá trình sấy thăng hoa, biên thăng hoa phân chia vật liệu thành hai vùng: vùng khô (băng đã thăng hoa) và vùng ướt (băng chưa thăng hoa). Khi quá trình sấy diễn ra, biên thăng hoa dịch chuyển dần từ bề mặt vào tâm sản phẩm, làm chiều dày lớp khô tăng lên theo thời gian. Do lớp khô có hệ số dẫn nhiệt thấp, nhiệt trở truyền nhiệt của lớp này ngày càng tăng và trở thành yếu tố chi phối quá trình cấp nhiệt từ tấm gia nhiệt đến mặt thăng hoa. Kết quả là tốc độ cung cấp nhiệt cho quá trình thăng hoa giảm dần, làm giảm tốc độ sấy và kéo dài thời gian sấy ở giai đoạn cuối của quá trình sấy thăng hoa.

4.2.4. Biến đổi hệ số khuếch tán nhiệt của cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa

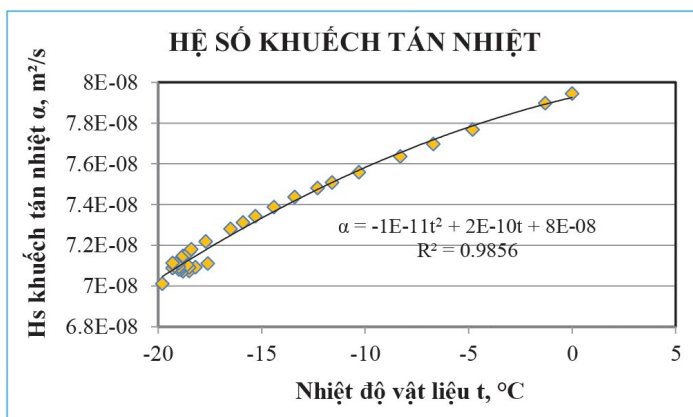
Tương tự hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán nhiệt cũng giảm mạnh từ $6,584 \times 10^{-7}$ xuống $8,390 \times 10^{-8}$ m²/s, cho thấy khả năng lan truyền nhiệt trong vật liệu sau sấy thấp hơn nhiều so với trạng thái ban đầu [43]. Điều này cho thấy quá

trình truyền nhiệt trong vật liệu sau sấy trở nên kém hiệu quả hơn, do vật liệu đã trở nên khô và xốp.

Hệ số khuếch tán nhiệt của lớp khô cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa có xu hướng tăng nhẹ theo nhiệt độ vật liệu, dao động trong khoảng từ $7,011 \times 10^{-8}$ đến $7,944 \times 10^{-8}$ m²/s đạt trung bình $7,286 \times 10^{-8}$ m²/s (Hình 12). Tuy nhiên, so với trạng thái trước sấy (khoảng $6,584 \times 10^{-7}$ m²/s), hệ số khuếch tán nhiệt của lớp khô giảm đáng kể, phản ánh khả năng lan truyền nhiệt trong vật liệu sau sấy thấp hơn nhiều so với vật liệu ban đầu.

Sự thay đổi của hệ số khuếch tán nhiệt có thể được giải thích thông qua mối quan hệ giữa hệ số khuếch tán nhiệt với hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng và khối lượng riêng của vật liệu. Trong đó, hệ số dẫn nhiệt của lớp khô tăng nhẹ theo nhiệt độ, trong khi nhiệt dung riêng chỉ biến đổi nhỏ và khối lượng riêng gần như không đổi do cấu trúc lớp khô đã được hình thành ổn định. Vì vậy, xu hướng tăng của hệ số khuếch tán nhiệt chủ yếu bị chi phối bởi sự gia tăng của hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng.

Mặc dù tăng nhẹ theo nhiệt độ, giá trị hệ số khuếch tán nhiệt của lớp khô vẫn thấp hơn nhiều so với vật liệu trước sấy do sự hình thành cấu trúc xốp chứa khí và sự suy giảm đáng kể khả năng dẫn nhiệt của vật liệu sau thăng hoa. Điều này có thể làm gia tăng nhiệt trở truyền nhiệt nội tại của lớp khô và ảnh hưởng đến quá trình cung cấp nhiệt cho mặt thăng hoa trong suốt quá trình sấy.



Hình 12. Biến đổi hệ số khuếch tán nhiệt của cá thu fillet (lớp khô) trong giai đoạn sấy thăng hoa

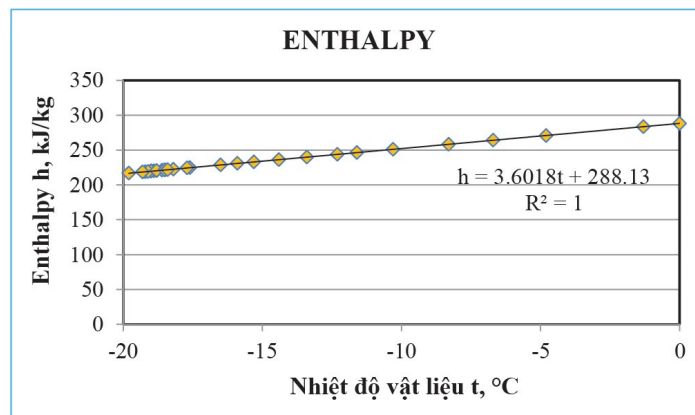
4.2.5. Biến đổi enthalpy của cá thu trong giai đoạn sấy thăng hoa

Kết quả xác định enthalpy của lớp khô cá thu theo công thức (16) cho thấy giá trị enthalpy tăng gần tuyến tính theo nhiệt độ vật liệu, dao động trong khoảng từ 216,815 đến 288,131 kJ/kg trong khoảng nhiệt độ khảo sát (Hình 13). Sự gia tăng này phản ánh xu hướng tăng trạng thái năng lượng của vật liệu khi nhiệt độ tăng trong giai đoạn sấy thăng hoa.

Trong giai đoạn này, lớp khô của vật liệu có hàm lượng ẩm thấp (khoảng 7%), trong đó phần ẩm còn lại chủ yếu là nước không đóng băng và không tham gia quá trình thăng hoa. Do đó, không còn xảy ra quá trình chuyển pha đáng kể như trong giai đoạn cấp đông. Vì vậy, sự thay đổi enthalpy của vật liệu chủ yếu liên

quan đến sự gia tăng nhiệt hiện dưới tác động của nhiệt độ.

Mối quan hệ giữa enthalpy và nhiệt độ được mô tả tốt bằng phương trình hồi quy tuyến tính: $h=3,602t+288,130$ với $R^2 \approx 1$ cho thấy enthalpy của lớp khô tăng gần tuyến tính theo nhiệt độ. Xu hướng này phù hợp với sự biến đổi nhỏ của nhiệt dung riêng trong vùng nhiệt độ khảo sát, theo quan hệ nhiệt động học $dh = cp.dT$. Do nhiệt dung riêng của lớp khô gần như ổn định, enthalpy thay đổi chủ yếu theo nhiệt độ và ít chịu ảnh hưởng của quá trình chuyển pha. So với giai đoạn cấp đông, enthalpy của vật liệu trong giai đoạn sấy thăng hoa biến đổi ổn định hơn do phần lớn nước tự do đã được loại bỏ dưới dạng băng, làm giảm ảnh hưởng của ẩn nhiệt chuyển pha đến trạng thái năng lượng của vật liệu.



Hình 13. Biến đổi Enthalpy của cá thu fillet (lớp khô) trong giai đoạn sấy thăng hoa

IV. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Nghiên cứu đã xác định được sự biến đổi các tính chất nhiệt vật lý của cá thu fillet trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa thông qua sự kết hợp giữa thực nghiệm và mô hình toán dựa trên thành phần hóa học của vật liệu. Kết quả cho thấy cá thu fillet có hàm lượng nước cao (74,86%), protein chiếm tỷ lệ đáng kể (24,13%) và hàm lượng lipid thấp, tạo cơ sở

quan trọng cho việc xác định các tính chất nhiệt vật lý phụ thuộc nhiệt độ và trạng thái pha của vật liệu.

Nhiệt độ đóng băng của nước trong cá thu được xác định khoảng $-1,1^{\circ}\text{C}$, trong khi tỷ lệ nước đóng băng đạt khoảng 0,93 tại $-40,0^{\circ}\text{C}$, cho thấy phần lớn nước tự do đã chuyển sang trạng thái rắn trước khi bước vào quá trình sấy thăng hoa. Trong giai đoạn cấp đông, các tính chất nhiệt vật lý của lát cá biến đổi mạnh, đặc

biệt tại vùng lân cận điểm đóng băng do ảnh hưởng của quá trình chuyển pha của nước. Nhiệt dung riêng đạt cực đại gần nhiệt độ đóng băng, hệ số dẫn nhiệt và hệ số khuếch tán nhiệt tăng trong vùng đông lạnh do sự hình thành pha băng, trong khi enthalpy giảm đáng kể do giải phóng nhiệt trong quá trình kết tinh nước. Sự thay đổi đột ngột của nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán nhiệt và enthalpy trong vùng nhiệt độ này cho thấy việc xác định chính xác nhiệt độ đóng băng có ý nghĩa quan trọng đối với tính toán thời gian cấp đông, tải lạnh và mô phỏng quá trình truyền nhiệt của sản phẩm.

Trong giai đoạn sấy thăng hoa, sự hình thành lớp khô có cấu trúc xốp làm thay đổi đáng kể các tính chất nhiệt vật lý của vật liệu. Khối lượng riêng giảm mạnh từ khoảng 1087,000 xuống 371,560 kg/m³, đồng thời độ xốp tăng lên khoảng 0,726, phản ánh sự hình thành hệ mao quản sau quá trình thăng hoa. Sự gia tăng độ xốp kéo theo hệ số dẫn nhiệt giảm xuống trung bình khoảng 0,052 W/m·K, thấp hơn nhiều so với trạng thái ban đầu. Sự hình thành và phát triển của lớp khô làm hạn chế khả năng truyền nhiệt từ tâm gia nhiệt đến biên thăng hoa, làm giảm tốc độ sấy. Do đó, thời gian sấy có xu hướng gia tăng khi chiều dày lớp khô hay chiều dày lát cá lớn hơn. Đồng thời, sự suy giảm hệ số khuếch tán nhiệt phản ánh khả năng lan truyền nhiệt trong vật liệu ngày càng kém hiệu quả hơn theo tiến trình sấy.

Nhìn chung, các kết quả thu được phù hợp

với quy luật biến đổi nhiệt vật lý của vật liệu thực phẩm trong quá trình cấp đông và sấy thăng hoa, đồng thời bổ sung bộ dữ liệu nhiệt vật lý cho cá thu fillet, một đối tượng hiện còn hạn chế trong các công bố trước đây. Kết quả nghiên cứu cung cấp dữ liệu đầu vào cần thiết cho việc xây dựng các mô hình truyền nhiệt – truyền chất có xét biên thăng hoa di động trong các nghiên cứu tiếp theo, hỗ trợ phân tích và tối ưu hóa quá trình sấy thăng hoa đối với cá thu fillet.

2. Kiến nghị

Từ các kết quả nghiên cứu, có thể đề xuất một số hướng nghiên cứu và ứng dụng tiếp theo như sau:

- Cần thực hiện các nghiên cứu đo trực tiếp nhằm kiểm chứng và hiệu chỉnh bộ dữ liệu dự báo hiện tại.

- Nghiên cứu xác định hệ số truyền khối và điện trở khuếch tán hơi nước của lớp khô nhằm xây dựng mô hình truyền nhiệt – truyền chất hoàn chỉnh cho cá thu fillet.

- Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ sấy thăng hoa (nhiệt độ gia nhiệt, áp suất buồng sấy, nhiệt độ ngưng tụ) đến sự biến đổi tính chất nhiệt vật lý, động học thăng hoa và chất lượng sản phẩm cá thu fillet sau sấy.

- Xây dựng mô hình truyền nhiệt – truyền chất có xét sự dịch chuyển biên thăng hoa nhằm mô phỏng và xác định chế độ sấy tối ưu cho cá thu fillet dựa trên bộ dữ liệu nhiệt vật lý thu được từ nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N. V. Cong Chinh *et al.*, “Nghiên cứu thực nghiệm sấy một số trái cây giàu dinh dưỡng bằng phương pháp sấy thăng hoa và sấy chân không,” *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, no. 12, 2020.
- [2]. N. T. Dung, “Nghiên cứu sấy thăng hoa sữa ong chúa nhằm xác lập chế độ công nghệ sấy thăng hoa sữa ong chúa thích hợp,” Ph.D. dissertation, Viện Công nghiệp Thực phẩm, Vietnam, 2015.
- [3]. N. T. Dung, *Quá trình và Thiết bị trong CNHH&TP – Kỹ thuật và Công nghệ Sấy thăng hoa*. Ho Chi Minh City, Vietnam: Vietnam National Univ. Ho Chi Minh City Press, 2021.
- [4]. H. B. Long and N. T. H. Minh, “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ sấy thăng hoa để nâng cao chất lượng sản phẩm sầu riêng sấy,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ*, 2015.

- [5]. S. Bhatta, T. Stevanovic Janezic, and C. Ratti, “Freeze-drying of plant-based foods,” *Foods*, vol. 9, no. 1, p. 87, 2020.
- [6]. T. C. Hua, B. L. Liu, and H. Zhang, *Freeze-Drying of Pharmaceutical and Food Products*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2010.
- [7]. D. Nowak and E. Jakubczyk, “The freeze-drying of foods—The characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials,” *Foods*, vol. 9, no. 10, p. 1488, 2020.
- [8]. N. V. Phuc, N. N. An and L. D. Vu, “Thermophysical properties of *Cordyceps militaris* change during the freezing process,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1278, no. 1, p. 012034, 2023.
- [9]. N. V. Phuc, N. N. An, “Thermophysical characterization of *Cordyceps militaris* in the freeze-drying process: Focus on primary drying stage,” *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 3516–3525, 2025, doi: 10.38124/ijisrt/25may1798.
- [10]. L. A. Duc, N. Hay, and T. D. Khai, “Nghiên cứu xác định các tính chất nhiệt vật lý của lá chùm ngây,” *Tạp chí Năng lượng Nhiệt*, no. 151, Jan. 2020.
- [11]. M. T. T. Nga, L. T. Sa, D. V. Luong, and L. V. Luan, “Thành phần hóa học cơ bản và một số tính chất vật lý của cá ngừ đại dương đánh bắt tại Việt Nam,” *Tạp chí Khoa học - Công nghệ Thủy sản*, no. 2, 2020.
- [12]. N. V. Minh and L. D. Vu, “Thermophysical properties of snakehead fish (*Channa striata*) muscle change during chilling process,” *Agriculture and Rural Development*, vol. 1, no. 1, Aug. 2022.
- [13]. M. S. Rahman *et al.*, “Moisture sorption isotherm and thermal characteristics of freeze-dried tuna,” *International Journal of Food Studies*, vol. 8, no. 2, pp. 189–202, 2019.
- [14]. M. S. Rahman, N. Guizani, M. Al-Khaseibi, S. A. Al-Hinai, S. S. Al-Maskri, and K. Al-Hamhami, “Pore formation in foods during drying,” *Journal of Food Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 329–336, 2002.
- [15]. N. T. Dung, T. V. Dung, and T. D. Ba, “Khảo sát các tính chất nhiệt - vật lý nhóm giáp xác (tôm sú, tôm bạc, tôm thẻ) ảnh hưởng đến quá trình cấp nhiệt và tách ẩm trong sấy thăng hoa,” *Tạp chí Khoa học - Công nghệ Thủy sản*, no. 3, 2008.
- [16]. H. M. Tuan, “Xác định tính chất nhiệt vật lý và thời gian cấp đông mực ống (*Loligo chinensis*) bằng phương pháp giải tích,” *HUAF Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 1490–1499, 2019.
- [17]. ASHRAE, “Thermal Properties of Foods,” in *ASHRAE Handbook—Refrigeration*. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2018.
- [18]. V. E. Sweat, “Thermal properties of foods,” in *Engineering Properties of Foods*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 1986.
- [19]. Y. Choi and M. R. Okos, “Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods,” in *Food Engineering and Process Applications*, vol. 1. London, U.K.: Elsevier Applied Science, 1986, pp. 93–101.
- [20]. Q. T. Pham, “Prediction of enthalpy and thermal conductivity of frozen meat and fish products from composition data,” *Journal of Food Engineering*, vol. 84, no. 4, pp. 620–628, 2008.
- [21]. M. A. Rahman, *Food Properties Handbook*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [22]. T. K. Govindan, “Freeze drying of fishery products,” *Fishery Technology*, vol. 12, pp. 1–10, 1975.
- [23]. N. V. Phuc, N. N. An, and T. T. Binh, “Thiết kế, chế tạo tủ cấp đông phục vụ sấy thăng hoa đông trùng hạ thảo và thủy sản,” *Tạp chí Khoa học - Công nghệ Thủy sản*, no. 4, pp. 59–69, 2024.
- [24]. N. V. Phuc, N. N. An, and N. C. Le, “Thiết kế, chế tạo thiết bị sấy thăng hoa để sấy đông trùng hạ thảo và thủy sản,” *Tạp chí Khoa học - Công nghệ Thủy sản*, no. 1, pp. 59–68, 2023.
- [25]. N. V. Phuc, N. N. An, “An experimental study on the freeze-drying process for *Cordyceps militaris*,” *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, vol. 15, no. 3, pp. 975–987, 2025, doi: 10.30574/

wjaets.2025.15.3.0951.

- [26]. M. S. Rahman, N. Guizani, M. Al-Khaseibi, S. A. Al-Hinai, S. S. Al-Maskri, and K. Al-Hamhami, "Analysis of cooling curve to determine the end point of freezing," *Food Hydrocolloids*, vol. 16, no. 6, pp. 653–659, 2002.
- [27]. G. A. Marini, E. M. Bainy, M. K. Lenzi, and M. L. Corazza, "Freezing and thawing of processed meat in an industrial freezing tunnel," *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 361–368, 2014.
- [28]. X. Shao and Y. Li, "Quality control of fresh sweet corn in controlled freezing-point storage," *African Journal of Biotechnology*, vol. 10, no. 65, pp. 14534–14542, 2011.
- [29]. M. A. Rao, S. S. H. Rizvi, and A. K. Datta, *Engineering Properties of Foods*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis, 2005.
- [30]. G. Tchigeov, *Thermophysical Processes in Food Refrigeration Technology*. Moscow, Russia: Food Industry Publishing House, 1979.
- [31]. S. Sablani and M. S. Rahman, "Pore formation in selected foods as a function of shelf temperature during freeze drying," *Drying Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1379–1391, 2002.
- [32]. B. Koc, I. Eren, and F. K. Ertekin, "Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method," *Journal of Food Engineering*, vol. 85, no. 3, pp. 340–349, 2008.
- [33]. D. R. Heldman, D. B. Lund, and C. M. Sabliov, *Handbook of Food Engineering*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis, 2019.
- [34]. D. R. Heldman and R. P. Singh, "Thermal properties of frozen foods," in *Physical and Chemical Properties of Foods*, M. R. Okos, Ed. St. Joseph, MI, USA: ASAE, pp. 120–137.
- [35]. L. C. Capozzi, A. A. Barresi, and R. Pisano, "Supporting data and methods for the multi-scale modelling of freeze-drying of microparticles in packed-beds," *Data in Brief*, vol. 25, p. 104173, 2019.
- [36]. E. Murakami and M. Okos, "Measurement and prediction of thermal properties of foods," in *Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1989, pp. 3–48.
- [37]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *ASHRAE Handbook: Refrigeration, SI Edition*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2018.
- [38]. Q. T. Pham, "Freezing time formulas for foods," *Food Technology*, vol. 68, no. 3, pp. 56–62, 2014.
- [39]. R. P. Singh and D. R. Heldman, *Introduction to Food Engineering*, 5th ed. Amsterdam, The Netherlands: Academic Press, 2014.
- [40]. M. S. Rahman and R. H. Driscoll, "Density of fresh and frozen seafood," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 121–140, 1994, doi: 10.1111/j.1745-4530.1994.tb00331.x.
- [41]. M. S. Rahman, O. S. Al-Amri, and I. M. Al-Bulushi, "Pores and physico-chemical characteristics of dried tuna produced by different methods of drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 301–313, 2002, doi: 10.1016/S0260-8774(01)00169-8.
- [42]. H. G. Schwartzberg, "Effective heat capacity for freezing and thawing of food," *Journal of Food Science*, vol. 41, no. 1, pp. 152–156, 1976.
- [43]. M. D. Krokida and Z. B. Maroulis, "Quality changes during drying of food materials," *Drying Technology*, vol. 18, no. 4–5, pp. 903–933, 2000.