

Tối ưu điều kiện sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại cho cá dứa *Pangasius krempfi*

Hoàng Thái Hà^{1*}, Đặng Xuân Cường¹, Vũ Quang Vinh², Trần Tuấn Kiệt², Lê Thành Đạt¹, Đoàn Hoàng Thái¹,
Trần Duy Thuận¹, Nguyễn Thúy Nga¹, Trần Đình Toàn Anh¹

¹Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh, 140 Lê Trọng Tấn, phường Tây Thạnh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh, 12 Nguyễn Văn Bào, phường Hạnh Thông, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ngày nhận bài 14/4/2025; ngày chuyển phân biện 15/4/2025; ngày nhận phân biện 28/4/2025; ngày chấp nhận đăng 5/5/2025

Tóm tắt:

Cá dứa (*Pangasius krempfi*) là loài thủy sản có giá trị cao, nhưng các phương pháp sấy truyền thống như phơi nắng và sấy lò thông thường có một số hạn chế, bao gồm thời gian sấy kéo dài, chất lượng sản phẩm không đồng đều và kiểm soát quy trình hạn chế. Nghiên cứu này nhằm tối ưu hóa quá trình sấy cá dứa bằng công nghệ sấy kết hợp bơm nhiệt và bức xạ hồng ngoại. Thí nghiệm được thiết kế theo phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) với bốn yếu tố khảo sát: nhiệt độ sấy (40-60°C), vận tốc gió (1-3 m/s), chiều dày nguyên liệu (1-2 cm) và nồng độ dung dịch sorbitol (5-25%). Các chỉ tiêu đánh giá gồm: thời gian sấy, tỷ lệ hoàn nguyên, điểm cảm quan và hoạt độ nước. Dữ liệu được xử lý bằng phương pháp hồi quy bậc hai và phân tích phương sai (ANOVA). Kết quả cho thấy, nhiệt độ sấy và nồng độ sorbitol có ảnh hưởng đáng kể đến các chỉ tiêu chất lượng sản phẩm ($p < 0,01$). Điều kiện tối ưu gồm: nhiệt độ 60°C, vận tốc gió 1,4 m/s, chiều dày nguyên liệu 1,0 cm, nồng độ sorbitol 5%, giúp đạt thời gian sấy 5,2 giờ, tỷ lệ hoàn nguyên 63%, cảm quan 18,34/20 và hoạt độ nước 0,57. Kết quả góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho ứng dụng công nghệ sấy kết hợp trong chế biến cá dứa và các sản phẩm thủy sản tương tự.

Từ khóa: bức xạ hồng ngoại, cá dứa (*Pangasius krempfi*), chỉ tiêu chất lượng sản phẩm, sấy bơm nhiệt, tối ưu hóa.

Chỉ số phân loại: 2.10, 4.5

Optimisation of infrared radiation-assisted heat pump drying for *Pangasius krempfi*

Thai Ha Hoang^{1*}, Xuan Cuong Dang¹, Quang Vinh Vu², Tuan Kiet Tran², Thanh Dat Le¹, Hoang Thai Doan¹,
Duy Thuan Tran¹, Thuy Nga Nguyen¹, Dinh Toan Anh Tran¹

¹Ho Chi Minh City University of Industry and Trade, 140 Le Trong Tan Street, Tay Thanh Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Industrial University of Ho Chi Minh City, 12 Nguyen Van Bao Street, Hanh Thong Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

Received 14 April 2025; revised 28 April 2025; accepted 5 May 2025

Abstract:

Pangasius krempfi is a high-value aquatic species; however, traditional drying methods such as sun drying and conventional kiln drying present several limitations, including extended drying time, inconsistent product quality, and limited process control. This study aimed to optimise the drying process of *P. krempfi* using a hybrid drying technology combining a heat pump and infrared radiation. The experimental design followed response surface methodology (RSM) with four independent variables: drying temperature (40-60°C), air velocity (1-3 m/s), material thickness (1-2 cm), and sorbitol concentration (5-25%). Evaluation criteria included drying time, rehydration rate, sensory score, and water activity. Experimental data were analysed using second-order regression and analysis of variance (ANOVA). The results indicate that drying temperature and sorbitol concentration had a significant impact on product quality parameters ($p < 0.01$). The optimal conditions were determined as a drying temperature of 60°C, an air velocity of 1.4 m/s, a sample thickness of 1.0 cm, and a sorbitol concentration of 5%, yielding a drying time of 5.2 h, a rehydration rate of 63%, a sensory score of 18.34/20, and a water activity of 0.57. These findings contribute to strengthening the scientific basis for the adoption of combined drying technologies in the processing of *P. krempfi* and similar aquatic products.

Keywords: heat pump drying, infrared radiation, optimisation, *Pangasius krempfi*, product quality parameters.

Classification numbers: 2.10, 4.5

*Tác giả liên hệ: Email: hoangha.huit@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Cá dứa, một loài cá đồng có kích thước trung bình, nổi bật với tốc độ sinh trưởng nhanh và giá trị kinh tế cao nhờ vào thịt cá tươi ngon và dễ chế biến. Cá dứa trưởng thành có thể đạt kích thước 38-45 cm sau 2 năm nuôi và có thể sống đến 4-5 năm hoặc lâu hơn trong môi trường tự nhiên. Hiện nay, sản phẩm cá dứa chủ yếu được chế biến dưới dạng tươi (đông lạnh, ướp muối) và khô, trong đó cá dứa khô ngày càng được ưa chuộng vì khả năng bảo quản lâu dài và tính linh hoạt trong chế biến thành các món ăn hấp dẫn.

Tuy nhiên, việc sấy khô cá dứa hiện nay vẫn chủ yếu áp dụng các phương pháp truyền thống như phơi nắng hoặc sấy bằng lò thủ công. Những phương pháp này có nhiều nhược điểm như: phụ thuộc vào điều kiện thời tiết, chất lượng sản phẩm không đồng đều, tốn diện tích và công lao động phụ, đồng thời khó có thể cơ giới hóa hay tự động hóa quy trình. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, việc sử dụng các công nghệ sấy hiện đại như sấy lạnh kết hợp với bức xạ hồng ngoại và bơm nhiệt có thể khắc phục những nhược điểm này và mang lại nhiều lợi ích vượt trội trong chế biến thực phẩm thủy sản [1-3]. Trong khi phương pháp sấy truyền thống như phơi nắng hoặc sấy bằng lò thủ công thường mất nhiều thời gian và có chất lượng sản phẩm không đồng đều [4], phương pháp sấy lạnh kết hợp bức xạ hồng ngoại giúp giảm thời gian sấy và đảm bảo chất lượng sản phẩm được bảo toàn. Sấy bằng bức xạ hồng ngoại đặc biệt hữu ích trong việc gia nhiệt nhanh chóng mà không làm giảm chất lượng của các thành phần hóa học và dinh dưỡng trong cá dứa. Hơn nữa, khi kết hợp với bơm nhiệt, phương pháp này giúp duy trì nhiệt độ ổn định, giảm thiểu sự biến tính của nguyên liệu, đồng thời tiết kiệm năng lượng và tăng hiệu quả sản xuất [5-7]. Trong chế biến thủy sản, đặc biệt với các loài cá có hàm lượng đạm cao như cá dứa, công đoạn sấy đóng vai trò quan trọng trong việc kéo dài thời hạn bảo quản và nâng cao giá trị sử dụng. Tuy nhiên, các phương pháp sấy truyền thống như phơi nắng hoặc sấy nhiệt cưỡng bức thường kéo dài 10-18 giờ, gây tổn thất cảm quan, giảm khả năng hoàn nguyên và tiêu tốn nhiều năng lượng. Điều này đặt ra nhu cầu cấp thiết về các giải pháp sấy tiên tiến, có khả năng rút ngắn thời gian xử lý, tiết kiệm năng lượng và duy trì chất lượng sản phẩm sau sấy.

Trong bối cảnh đó, công nghệ sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại đang nhận được nhiều sự quan tâm nhờ khả năng kiểm soát nhiệt độ ổn định, giảm tổn hao nhiệt và dễ triển khai ở quy mô vừa và nhỏ. Việc nghiên cứu và ứng

dụng công nghệ này cho cá dứa - một loài cá có giá trị kinh tế cao nhưng chưa được nghiên cứu chuyên sâu về tối ưu quy trình sấy là hết sức cần thiết. Khác với các nghiên cứu trước đây, chỉ chủ yếu tập trung vào các đối tượng như cá cơm hoặc mực, nghiên cứu này là công bố đầu tiên áp dụng đồng thời công nghệ sấy bơm nhiệt và bức xạ hồng ngoại cho cá dứa. Kết quả không chỉ chứng minh hiệu quả công nghệ mới trong việc giảm thời gian sấy hơn 50%, mà còn đảm bảo chất lượng cảm quan và an toàn thực phẩm, đáp ứng yêu cầu của thị trường hiện đại.

Về mặt học thuật, nghiên cứu đóng góp bằng cách xây dựng mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu thông qua phương pháp RSM kết hợp thiết kế trung tâm xoay (CCD), phân tích tương quan, hồi quy và kiểm định thống kê. Những kết quả đạt được tạo tiền đề khoa học vững chắc cho việc mở rộng ứng dụng công nghệ sấy kết hợp trong ngành thủy sản, đồng thời làm rõ định hướng chuyển giao công nghệ cho các doanh nghiệp chế biến trong nước, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu chất lượng cảm quan và vệ sinh an toàn thực phẩm ngày càng tăng.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Cá dứa tươi sử dụng trong nghiên cứu có khối lượng 300-500 g/con, được thu mua khi còn sống từ huyện Cần Giờ, TP. Hồ Chí Minh, với độ ẩm ban đầu 75,30%. Cá được sơ chế cùng quy trình và thực hiện trong cùng ngày nhằm đảm bảo tính đồng nhất về nguyên liệu và giảm sai số ngẫu nhiên giữa các nghiệm thức. Cá được gây mê nhẹ bằng cách ngâm đá, sau đó bảo quản bằng đá lạnh trong thùng xốp cách nhiệt và chuyển về phòng thí nghiệm Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh. Tại phòng thí nghiệm, cá được rửa bằng dung dịch nước muối 1% trong 5 phút để loại bỏ tạp chất, sau đó ngâm trong dung dịch sorbitol (5-25%) tùy theo từng thí nghiệm trong 30 phút nhằm tăng khả năng tái hydrat hóa (hoàn nguyên) và giữ màu tự nhiên. Tiếp theo, cá được chần nhanh trong nước sôi 90°C trong 15 giây, để ráo, rồi sấy bằng thiết bị bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại đến khi đạt độ ẩm $22 \pm 0,3\%$. Quá trình sấy được theo dõi liên tục và kết thúc khi khối lượng mẫu ổn định trong 2 lần cân liên tiếp cách nhau 30 phút, tương ứng độ ẩm xác định đạt $22 \pm 0,3\%$ theo phương pháp sấy đến khối lượng không đổi ở 105°C. Trong quá trình xử lý sơ bộ, cá dứa được rửa bằng dung dịch nước muối 1% trong 5 phút theo tỷ lệ 1:5 (w/v) để loại bỏ nhớt và vi sinh vật bám ngoài, phù hợp với quy trình xử lý cá biển đã được công bố [2, 5].

Sau đó, cá được ngâm trong dung dịch sorbitol 2-12% với tỷ lệ nguyên liệu: dung dịch 1:4 (w/v) trong 30 phút, đảm bảo ngập mẫu hoàn toàn khi sử dụng khay chứa phù hợp. Tiếp theo, mẫu được chần nhanh ở 90°C trong 15 giây, với tỷ lệ nước chần 1:4 (w/w), nhằm bất hoạt enzyme, ổn định màu và chuẩn hóa điều kiện trước sấy. Các thông số này được xác lập từ tài liệu tham khảo và điều chỉnh qua khảo sát sơ bộ để phù hợp với đặc điểm mô cơ mềm và hàm lượng nước cao của cá dứa [2, 3].

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

Thí nghiệm được thiết kế theo phương pháp RSM, cụ thể là sử dụng mô hình CCD nhằm đánh giá ảnh hưởng đồng thời của bốn yếu tố: nồng độ sorbitol (Z_1 , %), nhiệt độ sấy (Z_2 , °C), vận tốc gió (Z_3 , m/s) và chiều dày nguyên liệu (Z_4 , cm)

đến thời gian sấy (Y_1 , h) và các chỉ tiêu chất lượng sản phẩm. Trong đó, Y_1 : Thời gian sấy (giờ) - phản ánh hiệu suất quá trình sấy, Y_2 : Tỷ lệ hoàn nguyên (%) - khả năng hút nước trở lại của sản phẩm sau sấy, Y_3 : Điểm chất lượng cảm quan (thang điểm 20) - đánh giá cảm quan tổng hợp (màu, mùi, vị, trạng thái), Y_4 : Hoạt độ nước (a_w) - chỉ số liên quan đến khả năng bảo quản và ổn định vi sinh. Mục tiêu của nghiên cứu là xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào và các biến đầu ra, từ đó tối ưu hóa điều kiện sấy để đạt được chất lượng sản phẩm cao nhất trong thời gian sấy ngắn nhất. Số lượng thí nghiệm được xác định dựa trên mô hình CCD, bao gồm các điểm tâm, điểm góc và điểm sao, với tổng số 20 thí nghiệm. Dữ liệu được mã hóa theo hệ tọa độ không thứ nguyên để chuẩn hóa giá trị thực nghiệm, giúp xây dựng mô hình hồi quy bậc hai (bảng 1).

Bảng 1. Thiết kế thí nghiệm công đoạn sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại cá dứa.

TN	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	X_1	X_2	X_3	X_4	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{23}	X_{24}	X_{34}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	50,0	2,0	1,5	15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
2	40,0	1,0	2,0	25,0	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1				
3	60,0	1,0	1,0	25,0	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1				
4	50,0	2,0	1,5	15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
5	60,0	3,0	1,0	25,0	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1				
6	60,0	3,0	2,0	25,0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1				
7	40,0	3,0	1,0	25,0	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1				
8	40,0	3,0	1,0	5,0	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1				
9	60,0	1,0	2,0	5,0	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1				
10	60,0	3,0	2,0	5,0	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1				
11	40,0	1,0	2,0	5,0	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1				
12	50,0	2,0	1,5	15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
13	60,0	3,0	1,0	5,0	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1				
14	40,0	1,0	1,0	25,0	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1				
15	50,0	2,0	1,5	15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
16	40,0	1,0	1,0	5,0	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1				
17	60,0	1,0	2,0	25,0	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1				
18	40,0	3,0	2,0	25,0	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1				
19	40,0	3,0	2,0	5,0	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1				
20	60,0	1,0	1,0	5,0	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1				

Z_1 : nhiệt độ sấy (°C); Z_2 : vận tốc gió (m/s); Z_3 : chiều dày nguyên liệu sấy (cm); Z_4 : nồng độ sorbitol ngâm nguyên liệu (%); Y_1 : thời gian sấy khô sản phẩm (giờ); Y_2 : tỷ lệ hoàn nguyên của sản phẩm (%); Y_3 : tổng điểm chất lượng cảm quan (điểm); Y_4 : hoạt độ nước sản phẩm.

Các yếu tố đầu vào được mã hóa theo hệ tọa độ không thứ nguyên nhằm chuẩn hóa giá trị thực nghiệm, giúp so sánh và xây dựng mô hình hồi quy bậc hai. Công thức mã hóa được áp dụng như sau:

$$X_i = \frac{Z_i - Z_0}{\Delta Z} \quad (1)$$

trong đó: X_i là giá trị mã hóa của biến; Z_i là giá trị thực nghiệm; Z_0 là giá trị trung tâm; ΔZ là khoảng biến thiên của biến đó. Mã hóa theo công thức này giúp mô hình hồi quy đạt tính đồng nhất về đơn vị và thuận lợi trong xử lý thống kê.

Mô hình hồi quy bậc hai có dạng tổng quát:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2)$$

trong đó: X_i là các yếu tố đầu vào đã mã hóa; β là các hệ số hồi quy; ε là sai số ngẫu nhiên.

Mô hình này được kiểm tra độ phù hợp thông qua ANOVA, với các tiêu chí: (1) Hệ số xác định, (R^2): Kiểm tra mức độ phù hợp của mô hình; (2) Giá trị p-value: Nếu $p < 0,05$, yếu tố có ảnh hưởng đáng kể; (3) Kiểm tra Lack of Fit: Nếu $p > 0,05$, mô hình được xem là phù hợp; (4) Đánh giá tương tác các yếu tố qua biểu đồ Contour Plot và Surface Plot.

Tối ưu hóa được thực hiện bằng hàm mong muốn (Desirability function) trong Statgraphics Centurion XVI, nhằm tìm điều kiện tối ưu cho thời gian sấy ngắn nhất, tỷ lệ hoàn nguyên cao nhất, điểm chất lượng cảm quan cao nhất và hoạt độ nước thấp nhất. Tối ưu hóa không được thực hiện riêng lẻ từng mục tiêu mà sử dụng hàm mong muốn tổng hợp, kết hợp đồng thời bốn mục tiêu đầu ra. Mỗi biến đầu ra Y_i được chuyển thành một hàm con mong muốn d_i trong khoảng $[0,1]$, phản ánh mức độ hài lòng theo hướng tối ưu: d_1 là tối thiểu hóa Y_1 (thời gian sấy), d_2 là tối đa hóa Y_2 (tỷ lệ hoàn nguyên), d_3 là tối đa hóa Y_3 (cảm quan), d_4 là tối thiểu hóa Y_4 (hoạt độ nước). Hàm tổng hợp D được tính theo công thức:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4)^{1/4} \quad (3)$$

Giá trị D càng gần 1 cho thấy mức độ tối ưu tổng thể càng cao. Phần mềm Statgraphics Centurion XVI (phiên bản 16.1.11 - StatPoint Technologies, Inc., Hoa Kỳ) được sử dụng để xác định tổ hợp điều kiện đầu vào tương ứng với giá trị D cực đại.

Tỷ lệ hoàn nguyên (rehydration ratio) được tính theo công thức:

$$\text{Tỷ lệ hoàn nguyên (\%)} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad (4)$$

trong đó: m_1 là khối lượng mẫu sau sấy; m_2 là khối lượng sau khi ngâm trong nước cất ở nhiệt độ phòng trong 10 phút và để ráo nước. Chỉ số này phản ánh khả năng hút ẩm trở lại của sản phẩm sấy, là một tiêu chí quan trọng trong đánh giá chất lượng kết cấu và khả năng phục hồi hình dạng thực phẩm khô.

Dữ liệu thí nghiệm cho thấy, nhiệt độ sấy (Z_1) dao động từ 40 đến 60°C với giá trị trung bình 50°C, trong khi vận tốc gió (Z_2) thay đổi từ 1,0 đến 3,0 m/s với trung bình 2,0 m/s. Chiều dày nguyên liệu (Z_3) dao động từ 1,0 đến 2,0 cm, còn nồng độ sorbitol (Z_4) có khoảng giá trị từ 5 đến 25%. Mỗi tổ hợp thí nghiệm được thực hiện với ba lần lặp lại độc lập ($n=3$) (bảng 1). Hình ảnh trong bài chỉ mang tính minh họa một phần quy trình, không đại diện cho toàn bộ số lượng mẫu thực nghiệm.

2.2.2. Phương pháp xác định các thông số công nghệ

Nhiệt độ sấy đo bằng thiết bị SGK-MF-904 (Hồng Kông, sai số $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Vận tốc gió đo bằng Testo 405 - V1 (Đức). Nồng độ sorbitol sử dụng dung dịch tinh khiết từ Merck (Đức). Độ ẩm vật liệu sấy xác định bằng phương pháp sấy đến khối lượng không đổi ở 105°C. Hoạt độ nước (a_w) được xác định bằng máy đo hoạt độ nước LabMaster-aw (Novasina, Thụy Sĩ) theo phương pháp điện trở/điện dung ở nhiệt độ phòng ($25 \pm 1^\circ\text{C}$). Mỗi mẫu được đo 3 lần và lấy trung bình. Tỷ lệ hoàn nguyên (H_w , %) xác định bằng cách ngâm mẫu sấy khô trong nước cất, cân khối lượng trước (m_1) và sau ngâm (m_2) để tính toán.

$$H_w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} (\%) \quad (5)$$

Chất lượng cảm quan (Q, điểm) đánh giá theo TCVN 3215:1979 trên thang điểm 20. Xác định vi sinh vật theo các tiêu chuẩn TCVN: tổng số vi sinh vật hiếu khí (5367:1991), *E. coli* (7924:2008), *Coliforms* (4882:2007), *Salmonella* (4829:2005), *Vibrio cholerae* (7905-1:2008), *Staphylococcus aureus* (4830-1:2005).

2.2.3. Phương pháp xử lý số liệu

Mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần. Dữ liệu được phân tích bằng phương pháp thống kê, kiểm định ANOVA, mô hình hồi quy bậc hai và tối ưu hóa bằng phần mềm Statgraphics Centurion XVI, phiên bản 16.1.11 (StatPoint

Technologies, Inc., Hoa Kỳ) và Excel. Biểu đồ Contour Plot và Surface Plot được sử dụng để trực quan hóa xu hướng dữ liệu và tìm điểm tối ưu nhất. Vẽ đồ thị bằng Python. Mặc dù nghiên cứu chưa triển khai phân tích độ nhạy riêng biệt cho từng biến, nhưng độ tin cậy của mô hình được đánh giá gián tiếp thông qua ANOVA. Các khoảng tin cậy 95% và sai số chuẩn của hệ số hồi quy đều được kiểm tra trong mô hình, đảm bảo độ chính xác khi dự đoán và xác định điểm tối ưu.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Tối ưu thực nghiệm sấy cá dứa

3.1.1. Phân tích thống kê, tương quan và ANOVA

Kết quả tối ưu hóa thực nghiệm sấy cá dứa được thể hiện ở bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm theo ma trận thí nghiệm công đoạn sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại cá dứa.

TN	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
1	50,0	2,0	1,5	15,0	6,2	60	18	0,71
2	40,0	1,0	2,0	25,0	7,8	56,5	16,88	0,88
3	60,0	1,0	1,0	25,0	5,5	61,8	18,08	0,63
4	50,0	2,0	1,5	15,0	6,2	60	18	0,71
5	60,0	3,0	1,0	25,0	5,3	62,2	18,28	0,61
6	60,0	3,0	2,0	25,0	5,8	62	18,15	0,71
7	40,0	3,0	1,0	25,0	6,8	57,9	17,68	0,87
8	40,0	3,0	1,0	5,0	5,5	58,5	17,88	0,65
9	60,0	1,0	2,0	5,0	6,4	62,4	18,18	0,67
10	60,0	3,0	2,0	5,0	6,2	62,3	18,16	0,68
11	40,0	1,0	2,0	5,0	6,8	57,9	17,82	0,85
12	50,0	2,0	1,5	15,0	6,2	60	18	0,69
13	60,0	3,0	1,0	5,0	5,2	62,8	18,28	0,51
14	40,0	1,0	1,0	25,0	7,6	57,1	16,98	0,86
15	50,0	2,0	1,5	15,0	6,2	60	18	0,71
16	40,0	1,0	1,0	5,0	6,6	58,8	17,97	0,78
17	60,0	1,0	2,0	25,0	6,1	61,5	18,05	0,66
18	40,0	3,0	2,0	25,0	6,5	57,5	17,32	0,84
19	40,0	3,0	2,0	5,0	5,3	58	17,78	0,73
20	60,0	1,0	1,0	5,0	5,0	63	18,38	0,56

Z₁: nhiệt độ sấy (°C); Z₂: vận tốc gió (m/s); Z₃: chiều dày nguyên liệu sấy (cm); Z₄: nồng độ sorbitol ngâm nguyên liệu (%); Y₁: thời gian sấy khô sản phẩm (giờ); Y₂: tỷ lệ hoàn nguyên của sản phẩm (%); Y₃: tổng điểm chất lượng cảm quan (điểm); Y₄: hoạt độ nước sản phẩm.

Về các biến đầu ra, thời gian sấy trung bình là 6,16 giờ, tỷ lệ hoàn nguyên trung bình đạt 60,01%, chất lượng cảm quan đạt mức 17,89 điểm và hoạt độ nước trung bình là 0,715 (bảng 2). Nhiệt độ sấy (Z₁) có mối tương quan mạnh với tỷ lệ hoàn nguyên (Y₂, R=0,967) và chất lượng cảm quan (Y₃, R=0,743), điều này cho thấy nhiệt độ có ảnh hưởng quan trọng đến khả năng tái hydrat hóa (hoàn nguyên) và đặc tính cảm quan của sản phẩm. Hoạt độ nước (Y₄) có tương quan nghịch với nhiệt độ sấy (Z₁, R=-0,787), nghĩa là khi nhiệt độ tăng, hoạt độ nước giảm, giúp bảo quản sản phẩm tốt hơn. Trong khi đó, vận tốc gió (Z₂) và chiều dày nguyên liệu (Z₃) có tương quan yếu với các biến đầu ra, cho thấy chúng có ảnh hưởng nhưng không đáng kể. Phân tích phương sai cho thấy, thời gian sấy (Y₁) chịu ảnh hưởng mạnh nhất từ nhiệt độ sấy (F=14,02, p=0,002), tốc độ gió và nồng độ sorbitol cũng có ảnh hưởng đáng kể (p<0,05), tỷ lệ hoàn nguyên (Y₂) chịu ảnh hưởng rất mạnh từ nhiệt độ sấy (F=12,10, p≈0), trong khi nồng độ sorbitol cũng có tác động đáng kể (F=48,94, p<0,0001), chất lượng cảm quan (Y₃) bị ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ sấy (F=40,00, p<0,001) và nồng độ sorbitol (F=13,32, p=0,003), hoạt độ nước (Y₄) phụ thuộc chủ yếu vào nhiệt độ sấy (F=65,39, p≈0), với một mức ảnh hưởng đáng kể từ chiều dày nguyên liệu và nồng độ sorbitol.

3.1.2. Phân tích hồi quy, tối ưu hóa và độ chính xác của mô hình

Từ dữ liệu thực nghiệm, các phương trình hồi quy bậc hai được xây dựng để mô tả ảnh hưởng của các biến đầu vào (X₁-X₄) và các tương tác đến các biến đầu ra (Y₁-Y₄). Các mô hình hồi quy cho độ phù hợp từ trung bình đến cao (R² dao động 0,683-0,988), trong đó mô hình dự đoán tỷ lệ hoàn nguyên (Y₂) có độ phù hợp rất cao. ANOVA cho bốn phương trình hồi quy bậc hai mô tả ảnh hưởng của các yếu tố đến thời gian sấy (Y₁), tỷ lệ hoàn nguyên (Y₂), cảm quan (Y₃) và hoạt độ nước (Y₄) được trình bày trong bảng 2. Kết quả cho thấy, các yếu tố X₁ (nhiệt độ sấy) và X₄ (nồng độ sorbitol) có ảnh hưởng đáng kể đến Y₂ và Y₃ với p<0,01. X₁ ảnh hưởng rất mạnh đến Y₂ (p=2,36×10⁻⁹), khẳng định vai trò quyết định của nhiệt độ đối với chất lượng phục hồi sau sấy. Yếu tố tương tác X₁×X₂ cũng có ảnh hưởng đáng kể đến cảm quan (p=0,0247). Các giá trị p nhỏ cho thấy, các mô hình xây dựng là có ý nghĩa thống kê và phù hợp với dữ liệu thực nghiệm. Phân tích mối tương quan giữa các biến và hàm mục tiêu cho kết quả như sau:

Thời gian sấy khô sản phẩm (giờ):

$$Y_1 = 10,99 - 0,123X_1 - 1,37X_2 - 1,21X_3 + 0,197X_4 + 0,026X_1X_2 + 0,045X_1X_3 - 0,0029X_1X_4 - 0,175X_2X_3 - 0,018X_3X_4 \quad (6)$$

Khả năng hoàn nguyên của sản phẩm (%):

$$Y_2 = 60,01 + 4,475X_1 + 0,275X_2 - 0,5X_3 - 0,9X_4 - 0,125X_1X_2 + 0,1X_1X_3 + 0,15X_1X_4 + 0,1X_2X_3 + 0,4X_2X_4 + 0,125X_3X_4 \quad (7)$$

Chất lượng cảm quan (điểm):

$$Y_3 = 17,00 + 0,035X_1 + 0,55X_2 - 0,376X_3 - 0,107X_4 - 0,011X_1X_2 + 0,001X_1X_4 + 0,009X_2X_4 + 0,013X_3X_4 \quad (8)$$

Hoạt độ nước sản phẩm:

$$Y_4 = 0,7155 - 0,17875X_1 - 0,03625X_2 + 0,06875X_3 + 0,07875X_4 + 0,03375X_1X_2 - 0,03375X_1X_3 - 0,03125X_1X_4 + 0,03625X_2X_4 - 0,03875X_3X_4 \quad (9)$$

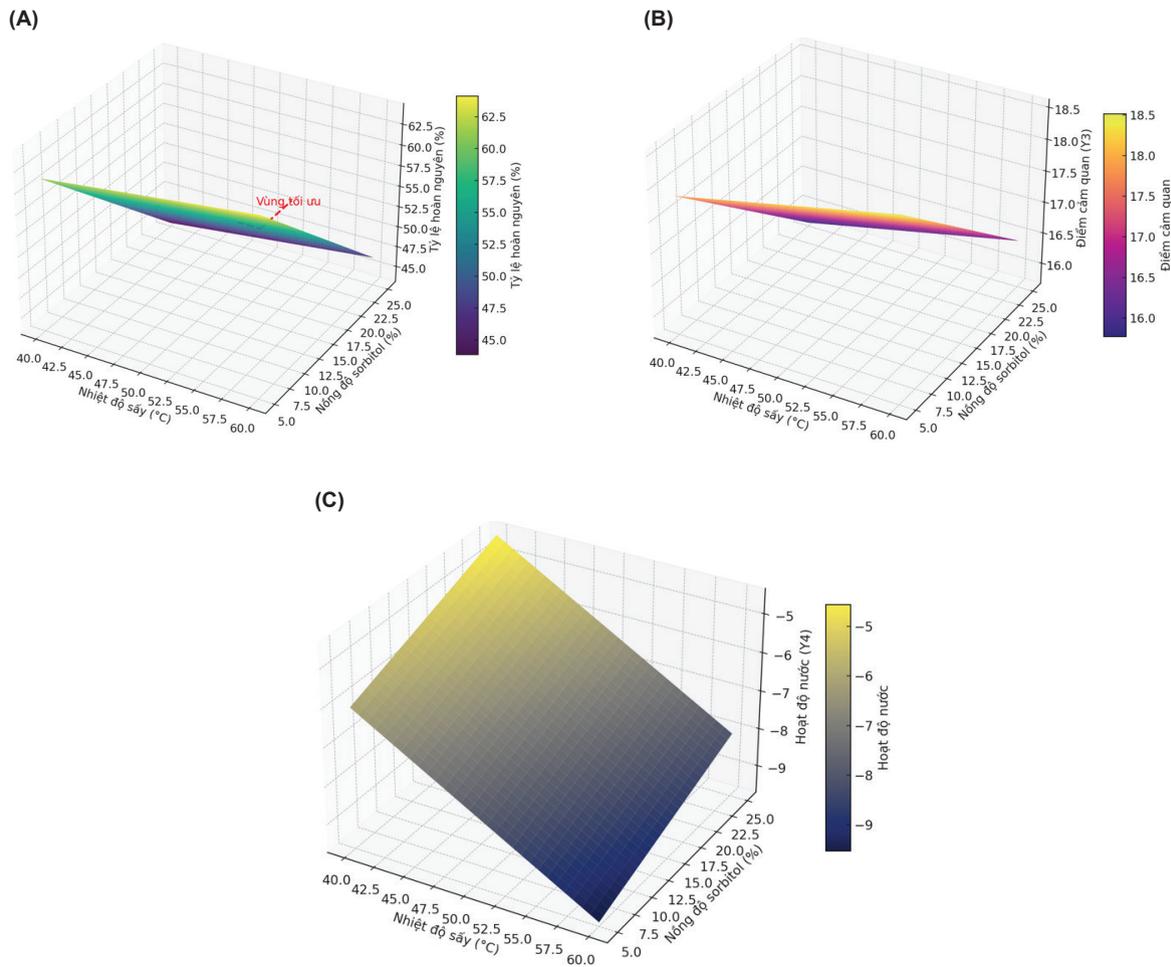
Phương trình (6) cho thấy, nhiệt độ sấy có hệ số âm (-0,123) dẫn đến khi nhiệt độ tăng, thời gian sấy giảm nhẹ. Tốc độ gió và chiều dày nguyên liệu có ảnh hưởng mạnh (-1,37 và -1,21), nên khi tốc độ gió tăng hoặc chiều dày giảm, thời gian sấy ngắn hơn. Nồng độ sorbitol có hệ số dương (+0,197) nên khi nồng độ sorbitol tăng, thời gian sấy dài hơn. Các tương tác X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 có ảnh hưởng nhỏ, nên sự kết hợp của các yếu tố có thể tối ưu hóa hoặc làm chậm quá trình sấy. Phương trình (7), thấy nhiệt độ sấy có hệ số dương lớn (+4,475), nên nhiệt độ cao giúp tăng khả năng hoàn nguyên. Chiều dày nguyên liệu và nồng độ sorbitol có hệ số âm (-0,5; -0,9), nên khi nguyên liệu dày hoặc nồng độ sorbitol cao, tỷ lệ hoàn nguyên giảm. Tốc độ gió có ảnh hưởng rất nhỏ (+0,275) nên ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng hoàn nguyên. Các tương tác như X_1X_4 (+0,15) và X_2X_4 (+0,4) có ý nghĩa, do vậy sự kết hợp của nhiệt độ, tốc độ gió và sorbitol ảnh hưởng đến tỷ lệ hoàn nguyên. Phân tích phương trình (8) thấy, tốc độ gió có hệ số dương lớn (+0,55), do đó tốc độ gió cao giúp sản phẩm có chất lượng cảm quan tốt hơn. Chiều dày nguyên liệu và nồng độ sorbitol có hệ số âm (-0,376; -0,107), dẫn đến nguyên liệu dày và nồng độ sorbitol cao có thể làm giảm chất lượng cảm quan. Nhiệt độ sấy có ảnh hưởng rất nhỏ (+0,035), nên nhiệt độ không ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng cảm quan. Tương tác X_3X_4 (+0,013) có ảnh hưởng, nên cần tối ưu hóa chiều dày nguyên liệu và nồng độ sorbitol để đạt chất lượng cảm quan tốt nhất. Phân tích phương trình (9) thấy, nhiệt độ

sấy có hệ số âm lớn (-0,17875), nên nhiệt độ cao làm giảm hoạt độ nước, giúp bảo quản tốt hơn. Chiều dày nguyên liệu và nồng độ sorbitol có hệ số dương (+0,06875, +0,07875), do đó nguyên liệu dày và nhiều sorbitol giữ nước nhiều hơn. Tốc độ gió có hệ số nhỏ (-0,03625), nên tốc độ gió cao giúp giảm hoạt độ nước nhẹ. Tương tác X_1X_2 và X_1X_3 có ảnh hưởng nhỏ, do vậy ảnh hưởng không đáng kể đến hoạt độ nước.

Bảng 3. Giá trị p từ phân tích phương sai cho các yếu tố và tương tác trong mô hình hồi quy bậc hai.

Yếu tố	Y ₁ (Thời gian sấy)	Y ₂ (Tỷ lệ hoàn nguyên)	Y ₃ (Cảm quan)	Y ₄ (Hoạt độ nước)
X ₁	0,1312	2,36E-09	0,00032	0,00082
X ₂	0,1022	0,3266	0,3836	0,1940
X ₃	0,6033	0,1377	0,9411	0,1713
X ₄	0,1807	0,00527	0,00592	0,1399
X ₁ ×X ₂	0,1441	0,0816	0,02470	0,1391

Kết quả bảng 3 cho thấy, nhiệt độ sấy (X₁) là yếu tố ảnh hưởng chủ đạo đến cả bốn chỉ tiêu đầu ra, đặc biệt đối với tỷ lệ hoàn nguyên và hoạt độ nước. Trong khi đó, nồng độ sorbitol (X₄) cũng góp phần đáng kể trong cải thiện chất lượng cảm quan và phục hồi độ ẩm. Một số tương tác như $X_1 \times X_2$ có ảnh hưởng đáng kể đến cảm quan, cho thấy vai trò phối hợp giữa yếu tố nhiệt và tốc độ gió cần được xem xét khi tối ưu hóa công nghệ sấy. Phân tích mối tương quan giữa các hàm mục tiêu cho thấy, tỷ lệ hoàn nguyên (Y₂) phụ thuộc vào thời gian sấy (Y₁) và hoạt độ nước (Y₄): $Y_2 = 64,12 - 3,15Y_1 - 8,42Y_4$; chất lượng cảm quan (Y₃) có quan hệ tuyến tính với thời gian sấy (Y₁) và hoạt độ nước (Y₄): $Y_3 = 18,75 - 0,62Y_1 - 1,2Y_4$; hoạt độ nước (Y₄) phụ thuộc vào thời gian sấy (Y₁): $Y_4 = 0,85 - 0,05Y_1$. Điều này đồng nghĩa, thời gian sấy dài hơn (Y₁ tăng) làm giảm tỷ lệ hoàn nguyên (Y₂) và điểm cảm quan (Y₃). Hoạt độ nước (Y₄) thấp có lợi cho chất lượng cảm quan (Y₃), nhưng nếu quá thấp sẽ ảnh hưởng đến tỷ lệ hoàn nguyên (Y₂), cần tối ưu Y₁ để đảm bảo Y₂ và Y₃ đạt giá trị tốt nhất, đồng thời kiểm soát Y₄ ở mức phù hợp. Ứng với các điều kiện này, chất lượng sản phẩm đạt mức tốt nhất với thời gian sấy ngắn (5,2 giờ), hoạt độ nước thấp (0,57), tỷ lệ hoàn nguyên cao (63%) và điểm cảm quan tối đa (18,34 điểm).

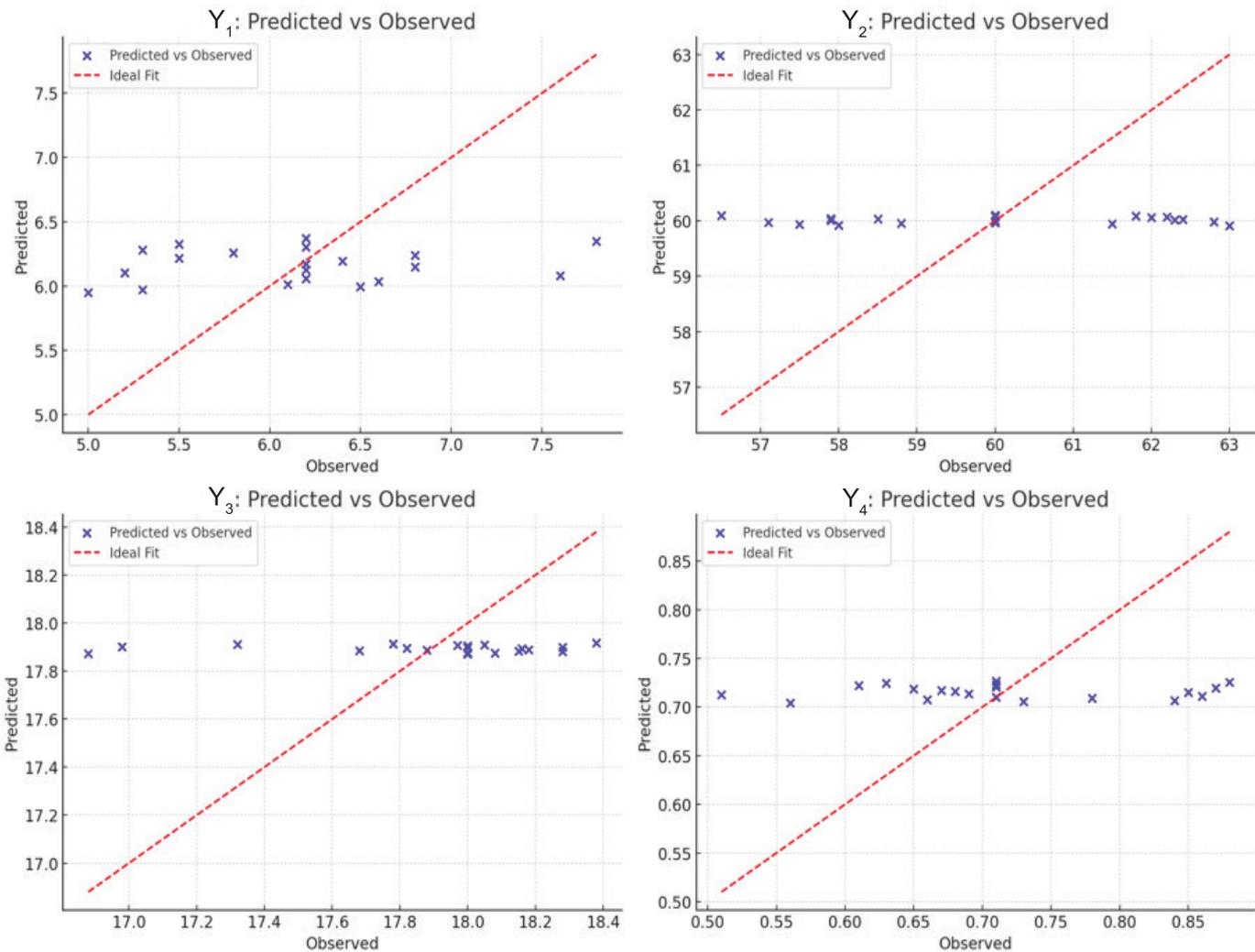


Hình 1. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy và nồng độ sorbitol đến tỷ lệ hoàn nguyên của sản phẩm cá dứa (A); điểm cảm quan (B); hoạt độ nước (C).

Phân tích độ chính xác của mô hình thấy được, R^2 của Y_1 , Y_2 , Y_3 , và Y_4 tương ứng 0,683, 0,988, 0,801, và 0,862 với độ sai số trung bình bình phương tương ứng 0,412, 0,222, 0,176, và 0,038. Mô hình dự đoán Y_2 có độ phù hợp rất cao ($R^2=0,988$). Các mô hình dự đoán Y_3 và Y_4 cũng có độ chính xác tốt ($R^2>0,8$). Mô hình dự đoán Y_1 có độ phù hợp thấp hơn ($R^2=0,683$), nghĩa là còn nhiều yếu tố chưa được mô hình giải thích. Kiểm tra Lack of Fit của mô hình thấy rằng, khi kiểm tra phân phối chuẩn của phần dư (Shapiro-Wilk test) có Y_3 ($p=0,007$), nghĩa là phần dư không tuân theo phân phối chuẩn, có thể gây ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình. Y_1 , Y_2 , và Y_4 tương ứng 0,780, 0,935, và 0,830, nghĩa là $p>0,05$ (phần dư có phân phối chuẩn - tốt). Kiểm tra phương sai phần dư có thay đổi không - heteroscedasticity (Breusch-Pagan test) thấy $p>0,05$ (phương sai phần dư không thay đổi - tốt). Phân tích tối ưu được thực hiện bằng

phương pháp chấp mục tiêu, trong đó mỗi hàm mục tiêu Y_1 - Y_4 được gán một mức độ mong muốn theo phạm vi lý tưởng đã xác định trước: Y_1 (thời gian sấy) càng thấp càng tốt, với mong muốn đạt giá trị 1 khi $Y_1 \leq 5,5$ và giảm về 0 khi $Y_1 \geq 7,5$, Y_2 (tỷ lệ hoàn nguyên) càng cao càng tốt, với mức mong đợi bằng 1 khi $Y_2 \geq 63\%$ và bằng 0 khi $Y_2 \leq 55\%$, Y_3 (chất lượng cảm quan) mong muốn cao nhất khi $Y_3 \geq 18$, điểm mong đợi bằng 0 nếu $Y_3 \leq 16,5$, Y_4 (hoạt độ nước): càng thấp càng tốt, mong đợi bằng 1 khi $Y_4 \leq 0,57$ và bằng 0 khi $Y_4 \geq 0,75$ (hình 1).

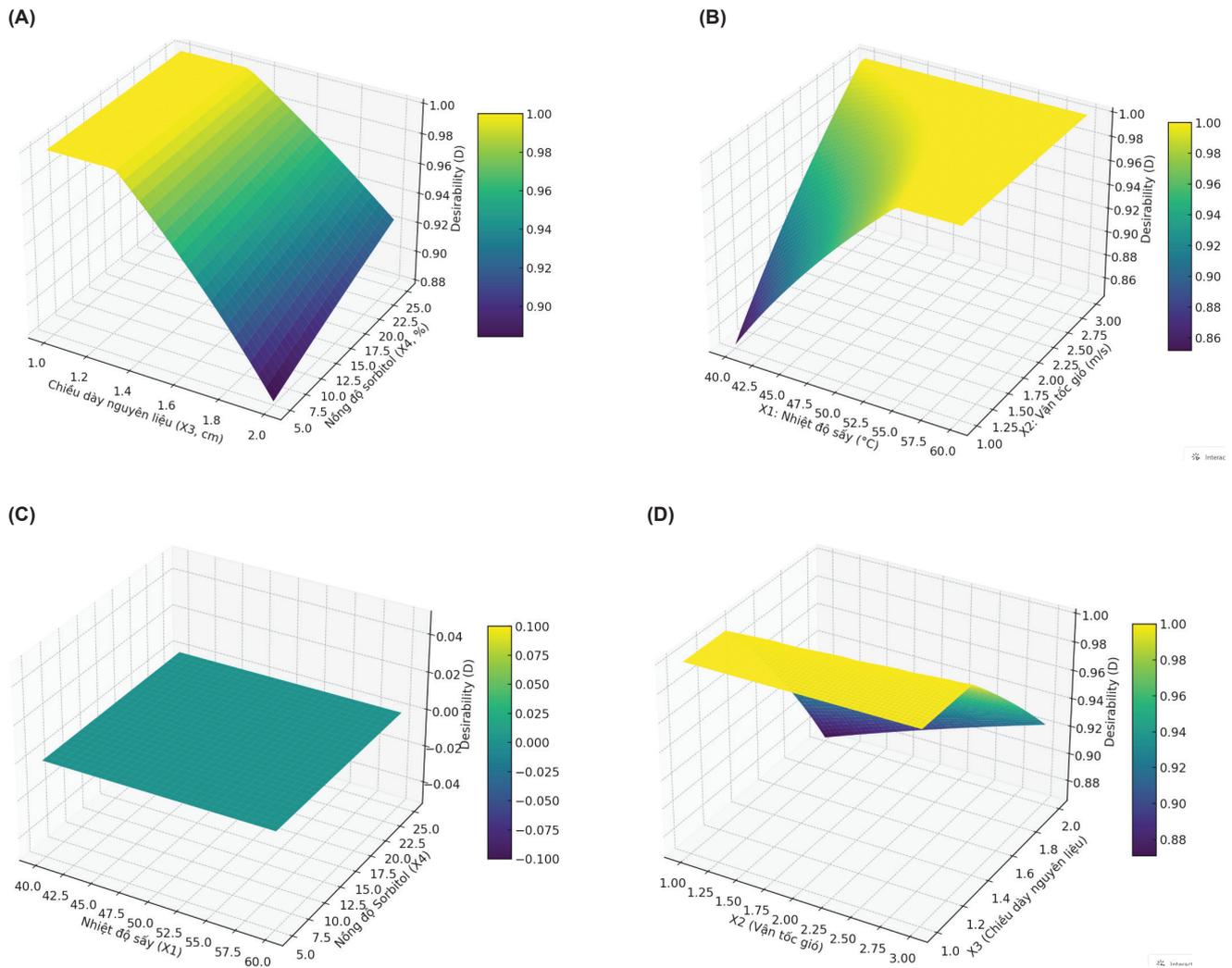
Hàm desirability tổng hợp D được tính theo công thức hình học trung bình của từng hàm mục tiêu con: $D=(d_1, d_2, d_3, d_4)^{1/4}$. Giá trị D tối đa đạt được là 0,97, tại điều kiện tối ưu gồm: nhiệt độ sấy 60°C , vận tốc gió 1,4 m/s, chiều dày nguyên liệu 1,0 cm và nồng độ sorbitol 5%, với các biến đầu ra có ràng buộc: $40 \leq X_1 \leq 60$; $1,0 \leq X_2 \leq 3,0$;



Hình 2. Biểu đồ so sánh giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán từ mô hình hồi quy bậc hai đối với các biến đầu ra Y₁-Y₄.

$1,0 \leq X_3 \leq 2,0$; $5 \leq X_4 \leq 25$. Giải hệ phương trình cho thấy, điều kiện tối ưu của quá trình sấy cá dứa như sau: nhiệt độ sấy (X_1) 60°C; vận tốc gió (X_2) 1,4 m/s; chiều dày nguyên liệu (X_3) 1,0 cm và nồng độ sorbitol (X_4) 5%. Ứng với các điều kiện này, chất lượng sản phẩm đạt mức tốt nhất với thời gian sấy ngắn (5,2 giờ), hoạt độ nước thấp (0,57), tỷ lệ hoàn nguyên cao (63%) và điểm cảm quan tối đa (18,34 điểm). Các điều kiện tối ưu xác định được nằm ở biên trên của X_1 (60°C) và biên dưới của X_3 (1,0 cm) và X_4 (5%). Điều này cho thấy khoảng khảo sát ban đầu của các biến này có thể chưa bao phủ toàn bộ vùng tối ưu thực sự. Tuy nhiên, việc giới hạn X_1 không vượt quá 60°C nhằm tránh biến tính protein trong cá [2, 3], trong khi mức thấp nhất của X_3 và X_4 là giới hạn an toàn để duy trì cấu trúc và cảm quan sản phẩm. Mặc dù tối ưu rơi vào biên, ANOVA, Lack of Fit đều cho thấy độ phù hợp tốt, do đó có thể tạm chấp nhận điều kiện này là điểm tối ưu cục bộ hợp lý trong khoảng khảo sát hiện tại.

So với nghiên cứu sấy cá cơm khô bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại [2], nghiên cứu này đã tối ưu hóa quá trình sấy cá dứa, giúp giảm thời gian sấy từ 11 giờ (sấy không khí nóng) xuống còn 5,2 giờ, qua đó tiết kiệm năng lượng đáng kể. So với nghiên cứu sấy cá cơm khô bằng bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại [2], sấy cá dứa cho thấy hiệu quả cải tiến: thời gian sấy rút ngắn từ 11 giờ (sấy không khí nóng) xuống còn 5,2 giờ, đồng thời duy trì tỷ lệ hoàn nguyên và cảm quan cao hơn đáng kể. Hình 2 thể hiện mối tương quan giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm của các biến Y_1 (thời gian sấy), Y_2 (tỷ lệ hoàn nguyên), Y_3 (cảm quan) và Y_4 (hoạt độ nước). Các điểm quan sát nằm gần đường chéo lý tưởng ($y=x$) cho thấy, mô hình dự đoán có độ chính xác tốt, đặc biệt với Y_2 và Y_4 . Điều này phù hợp với hệ số R^2 cao đã tính toán và kết quả kiểm định Lack of Fit trong phân tích ANOVA. Hình 3 thể hiện bề mặt chấp đáp ứng mong đợi dưới sự tác động của các yếu tố.



Hình 3. Bề mặt chập 3D của mô hình: theo chiều dày nguyên liệu (X_3) và nồng độ sorbitol (X_4) (A); nhiệt độ sấy (X_1) và vận tốc gió (X_2) (B); nhiệt độ sấy (X_1) và nồng độ sorbitol (X_4) (C); vận tốc gió (X_2) và chiều dày nguyên liệu (X_3) (D).

3.2. So sánh chất lượng cá dứa khô sấy bằng các phương pháp khác nhau

Cá dứa sau khi sấy bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại được đánh giá chất lượng theo các tiêu chí cảm quan, vật lý, hóa học và vi sinh. Đồng thời, sản phẩm cá dứa sấy bằng không khí nóng và phơi nắng cũng được phân tích với quy trình xử lý nguyên liệu tương tự (bảng 4).

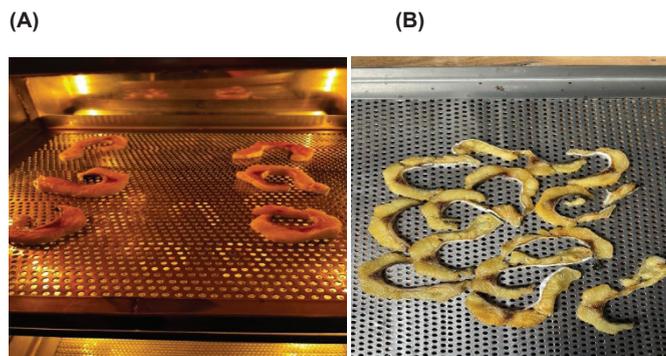
Mặc dù độ ẩm cuối của ba mẫu cá dứa đều đạt khoảng $22 \pm 0,3\%$, song hoạt độ nước (a_w) giữa các phương pháp sấy lại có sự khác biệt rõ rệt: 0,57 đối với phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, 0,67 với sấy không khí nóng và 0,83 với phơi nắng. Sự khác biệt này xuất phát từ bản chất hoạt độ nước không chỉ phụ thuộc vào độ ẩm tổng,

mà còn liên quan đến trạng thái liên kết của nước trong vật liệu thực phẩm. Phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có cơ chế gia nhiệt đồng đều và ổn định, làm bay hơi nước tự do hiệu quả hơn, đồng thời hạn chế hiện tượng vỡ tế bào và giữ lại cấu trúc protein ổn định, từ đó làm tăng tỷ lệ nước liên kết và giảm lượng nước tự do - yếu tố trực tiếp ảnh hưởng đến giá trị a_w . Ngược lại, các phương pháp sấy truyền thống như phơi nắng hay sấy khí nóng không kiểm soát tốt tốc độ sấy và nhiệt độ, dễ gây hiện tượng co rút bề mặt, vỡ mô, tạo nên các túi hơi và giữ lại nước tự do cao hơn, dẫn đến hoạt độ nước tăng. Do đó, dù độ ẩm tổng gần như tương đương, nhưng sự khác biệt trong cấu trúc mô sau sấy và tỷ lệ nước tự do - nước liên kết chính là nguyên nhân giải thích cho sự khác biệt về hoạt độ nước giữa các mẫu.

Bảng 4. Chất lượng cá dứa sấy khô bằng các phương pháp khác nhau.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả sấy		
		Sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại	Sấy bằng không khí nóng	Sấy dưới ánh nắng mặt trời
Nhiệt độ sấy	°C	60	55÷70	33-36
Vận tốc gió	m/s	1,5	1,2	
Chiều dày nguyên liệu sấy	cm	1,0	1,0	1,0
Nồng độ sorbitol	%	5	5	5
Độ ẩm cá ban đầu	%	75,30	75,30	75,30
Độ ẩm cá sau khi sấy	%	22±0,3	22±0,3	22±0,3
Chỉ tiêu cảm quan				
Màu sắc		Màu cánh gián đặc trưng của cá khô, không lên dầu, bề mặt không có vết đen.	Màu cánh gián đặc trưng của cá khô, không lên dầu, bề mặt không có vết đen.	Thịt cá màu vàng sậm, ít sáng bóng, bề mặt không có vết đen.
Mùi		Mùi thơm đặc trưng của cá khô, không có mùi của hiện tượng phân hủy.	Mùi thơm đặc trưng của cá khô, không có mùi của hiện tượng phân hủy, hơi có mùi hôi khét.	Mùi thơm đặc trưng của cá khô, không có mùi của hiện tượng phân hủy, có mùi hôi khét.
Vị		Vị ngọt đậm.	Mặn dịu, ngọt thịt.	Mặn dịu, ngọt thịt.
Trạng thái		Khô đều, thịt dai, không lẫn tạp chất.	Khô hơi đều, thịt dai, không lẫn tạp chất.	Ít khô đều, thịt dai, không lẫn tạp chất.
Chỉ tiêu vật lý				
Tỷ lệ hoàn nguyên	%	62,70±2,3	53,2±2,12	47,25±2,4
Lượng tạp chất	%	0	0	0
Hoạt độ nước		0,57±0,05	0,67±0,05	0,83±0,05
Thời gian	Giờ	5,2	11	18
Chỉ tiêu hóa học				
Lipid	%	34,3±0,04	34,3±0,04	34,3±0,04
Protein	%	34,2±0,08	34,2±0,08	34,2±0,08
Tổng số vi sinh vật hiếu khí	Cfu/g	2,7×10 ²	2,9×10 ²	3,31×10 ²
<i>E. coli</i>	Cfu/g	Âm tính	Âm tính	Âm tính
<i>Coliforms</i>	Cfu/g	Âm tính	Âm tính	Âm tính
<i>Salmonella</i>	Cfu/g	Âm tính	Âm tính	Âm tính
<i>S. aureus</i>	Cfu/g	Âm tính	Âm tính	Âm tính

Kết quả cho thấy, sản phẩm cá dứa sấy bằng công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại đạt chất lượng cảm quan rất cao (18,28±0,1 điểm trên thang 20 điểm), tỷ lệ hoàn nguyên cao (62,8±2,3%), hoạt độ nước thấp (0,51±0,05). Những chỉ số này nằm trong ngưỡng được đánh giá là tốt đến rất tốt theo phân loại của C.L. Hii và cs (2012) [6] đối với sản phẩm cá sấy. So với các phương pháp sấy truyền thống như phơi nắng hoặc sấy không khí nóng, công nghệ kết hợp cho thấy hiệu quả cải thiện vượt trội về chất lượng tổng thể. Sản phẩm đảm bảo tiêu chuẩn vệ sinh an toàn thực phẩm theo quy định hiện hành của Bộ Y tế.



Hình 4. (A) Cá dứa trong thiết bị sấy phối hợp bơm nhiệt và bức xạ hồng ngoại; **(B)** Cá dứa khô (hình minh họa một khay mẫu cá dứa trong quá trình sấy bằng công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại).

Sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại cho tỷ lệ hoàn nguyên cao nhất (62,7%) và hoạt độ nước thấp nhất (0,57), chứng tỏ sản phẩm giữ được cấu trúc tốt nhất. Sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại giúp cá có màu cánh gián đặc trưng, không lên dầu, không có vết đen, trong khi cá sấy nóng có thể bị hôi khét nhẹ và cá phơi nắng có màu vàng sậm, ít sáng bóng (hình 4). Sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có thời gian sấy ngắn nhất (5,2 giờ), trong khi sấy không khí nóng mất 11 giờ và phơi nắng mất 18 giờ. Cả ba phương pháp đều đáp ứng yêu cầu an toàn thực phẩm, không phát hiện *E. coli*, *Salmonella* hay *Coliforms*. Tuy nhiên, tổng số vi sinh vật hiếu khí của cá sấy bức xạ hồng ngoại thấp hơn ($2,7 \times 10^2$ CFU/g) so với cá sấy không khí nóng ($2,9 \times 10^2$ CFU/g) và cá phơi nắng ($3,31 \times 10^2$ CFU/g), chứng tỏ phương pháp bức xạ hồng ngoại giúp kiểm soát vi sinh tốt hơn. Dựa trên mức hoạt độ nước thấp ($a_w = 0,57 \pm 0,05$) - dưới ngưỡng 0,60 được xem là giới hạn phát triển của phần lớn vi sinh vật gây hư hỏng thực phẩm và kết quả vi sinh đạt tiêu chuẩn an toàn (tổng số vi sinh vật hiếu khí thấp, không phát hiện *E. coli*, *Coliforms*, *Salmonella* và *Staphylococcus aureus*), có cơ sở khoa học để dự báo rằng sản phẩm cá dứa sấy theo công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có thể được bảo quản ổn định trong thời gian tối thiểu 3 tháng ở điều kiện nhiệt độ phòng (25-30°C), khi sử dụng bao bì phù hợp như hút chân không và kháng ẩm. Nhận định này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, trong đó thực phẩm sấy khô có hoạt độ nước dưới 0,60 thường bảo quản được 3-6 tháng mà không cần bổ sung chất bảo quản, nếu quy trình đóng gói và bảo quản đáp ứng yêu cầu chống ẩm và cản oxy [8].

4. Kết luận

Nghiên cứu đã tối ưu thành công quy trình sấy cá dứa bằng công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, với các yếu tố đầu vào gồm: nhiệt độ sấy (40-60°C), vận tốc gió (1,0-3,0 m/s), chiều dày nguyên liệu (1,0-2,0 cm) và nồng độ dung dịch sorbitol (5-25%). Trong đó, nhiệt độ sấy (X_1) là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến chất lượng sản phẩm, đặc biệt là thời gian sấy, tỷ lệ hoàn nguyên, cảm quan và hoạt độ nước ($p < 0,001$). Nồng độ sorbitol (X_4) cũng tác động đáng kể đến khả năng hoàn nguyên và cảm quan. Điều kiện tối ưu

xác định được là: 60°C, 1,4 m/s, 1,0 cm và 5% sorbitol, giúp rút ngắn thời gian sấy còn 5,2 giờ, nâng tỷ lệ hoàn nguyên lên 63%, đạt cảm quan 18,34/20 và $a_w = 0,57 \pm 0,05$. So với sấy truyền thống, công nghệ sấy kết hợp cho thấy hiệu quả vượt trội cả về chất lượng và bảo quản. Mô hình hồi quy có độ phù hợp cao ($R^2 > 0,90$), không có sai số thiếu độ phù hợp đáng kể. Kết quả góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho ứng dụng sấy kết hợp trong chế biến thủy sản và mở rộng sang các đối tượng có cấu trúc tương tự.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này do Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh bảo trợ và cấp kinh phí theo Hợp đồng số 3999/QĐ-DCT ngày 29/12/2023. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H.T. Ha (2018), *Study on Drying of Seaweed (Caulerpa lentillifera J. Agardh) by Freeze-drying Method Combined with Infrared Radiation*, PhD Thesis, Nha Trang University, 182pp (in Vietnamese).
- [2] D.T. Hieu, N.D. Nghia (2005), "Research on optimal drying mode for dried anchovy products using combined infrared and thermal drying method", *Journal of Fisheries Science and Technology*, **2**, pp.8-11 (in Vietnamese).
- [3] D.T. Hieu (2013), *Research on Changes in Chemical Composition, Physical Properties and Proposed Measures to Improve The Quality of Infrared-dried Anchovies (Spratelloides Gracilis) for Export*, PhD Thesis, Nha Trang University, 151pp (in Vietnamese).
- [4] D.T. Hieu, N.D. Nghia (2007), "Some research results on the application of infrared drying equipment combined with cold for exporting essential oils from leather tubes", *Research Institute for Fisheries*, **6**, pp.24-26 (in Vietnamese).
- [5] D. Prusky, M.L. Gullino (2009), *Post-harvest Pathology*, Springer, DOI: 10.1007/978-1-4020-8930-5.
- [6] C.L. Hii, S.V. Jangam, S.P. Ong, et al. (2012), *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations*, TPR Group Publication, 176pp.
- [7] V.R. Sagar, K.P. Suresh (2010), "Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review", *J. Food Sci. Technol.*, **47(1)**, pp.15-26, DOI: 10.1007/s13197-010-0010-8.
- [8] M.S. Rahman (2007), *Handbook of Food Preservation*, CRC Press, 1088pp.