

TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH SẤY CÁ NUC BẰNG CÔNG NGHỆ BƠM NHIỆT KẾT HỢP BỨC XẠ HỒNG NGOẠI

OPTIMIZATION OF DRYING CONDITIONS FOR ROUND SCAD (DECAPTERUS MARUADSI) USING A HEAT PUMP-INFRARED RADIATION

Lê Như Chính¹, Nguyễn Văn Phúc¹, Huỳnh Văn Thọ¹, Nguyễn Công tạo²

1. Trường Đại học Nha Trang

2. Trường trung cấp nghề Cù Chi Thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: Lê Như Chính, Email: chinhn@ntu.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/06/2026; Ngày phản biện thông qua: 15/07/2026 ; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm xác định các thông số sấy tối ưu cho cá nục (*Decapterus maruadsi*) bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (IR-HP). Bốn thông số công nghệ chính được khảo sát gồm nhiệt độ sấy (45–55°C), vận tốc gió (1–3 m/s), khoảng cách đèn hồng ngoại (24–36 cm) và công suất hồng ngoại (1600–2000 W), theo thiết kế thí nghiệm Taguchi L27. Các mô hình hồi quy bậc hai được xây dựng bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM), với hệ số xác định R^2 đạt 96.74 – 98.43% và có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0.001$). Nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp RSM để tối ưu hóa các chỉ tiêu về thời gian sấy, suất tiêu hao năng lượng riêng và tỷ lệ hút nước phục hồi, đồng thời xây dựng các mô hình dự đoán phục vụ thiết kế và tối ưu hóa hệ thống sấy IR-HP. Kết quả đã xác định chế độ sấy tối ưu tại nhiệt độ sấy là 51.77°C, vận tốc gió 2.05 m/s, khoảng cách đèn hồng ngoại là 36 cm và công suất hồng ngoại 2000 W. Ở điều kiện này, thời gian sấy là 104.16 phút, suất tiêu hao năng lượng riêng là 8.58 kWh/kg H_2O và tỷ lệ hút nước phục hồi đạt 1.81 g/g. So với các phương pháp sấy hồng ngoại và sấy bơm nhiệt, hệ thống IR-HP tại chế độ tối ưu giúp giảm thời gian sấy lần lượt 23.33% và 83.33%, đồng thời vẫn đảm bảo chất lượng cảm quan của sản phẩm. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc thiết kế, tối ưu hóa và vận hành hệ thống sấy IR-HP trong chế biến thủy sản, góp phần giảm tiêu hao năng lượng, nâng cao năng suất và chất lượng sản phẩm, đồng thời tạo tiền đề cho việc ứng dụng công nghệ này ở quy mô sản xuất.

Từ khóa: Cá nục, sấy bơm nhiệt, bức xạ hồng ngoại, tối ưu hóa RSM, Taguchi.

ABSTRACT

This study aimed to determine the optimal drying parameters for Pacific mackerel (*Decapterus maruadsi*) using a combined heat pump and infrared drying system (IR-HP). Four key process parameters were investigated, including drying temperature (45–55°C), air velocity (1–3 m/s), infrared lamp distance (24–36 cm), and infrared power (1600–2000 W), based on a Taguchi L27 experimental design. Second-order regression models were developed using Response Surface Methodology (RSM), with coefficients of determination (R^2) ranging from 96.74% to 98.43% and showing high statistical significance ($p < 0.001$). RSM was further applied for multi-response optimization of drying time, specific energy consumption, and rehydration ratio, while also developing predictive models for the design and optimization of the IR-HP drying system. The optimal drying conditions were determined to be 51.77°C drying temperature, 2.05 m/s air velocity, 36 cm infrared lamp distance, and 2000 W infrared power. Under these conditions, the drying time, specific energy consumption, and rehydration ratio were 104.16 min, 8.58 kWh/kg H_2O , and 1.81 g/g, respectively. Compared with conventional infrared drying and heat pump drying, the IR-HP system at optimal conditions reduced drying time by 23.33% and 83.33%, respectively, while maintaining good sensory quality. The results provide a scientific and practical basis for the design, optimization, and operation of IR-HP drying systems in seafood processing, contributing to reduced energy consumption, improved productivity, and enhanced product quality, and offering potential for industrial-scale application.

Keywords: *Decapterus maruadsi*, heat pump drying, infrared radiation, RSM optimization, Taguchi.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo Hiệp hội Chế biến và Xuất khẩu Thủy sản Việt Nam (VASEP), xuất khẩu thủy sản Việt Nam được dự báo sẽ tiếp tục duy trì đà tăng trưởng tích cực trong giai đoạn 2025–2026, trong đó giá trị xuất khẩu các sản phẩm cá biển ngày càng gia tăng. Đáng chú ý, xuất khẩu thủy sản Việt Nam đã khởi đầu năm 2026 với mức tăng trưởng ấn tượng 30.6% trong tháng 1, đạt hơn 1,01 tỷ USD, so với 774 triệu USD cùng kỳ năm 2025 [2, 20]. Báo cáo của VASEP cho thấy sự tăng trưởng này chủ yếu do nhu cầu ngày càng cao đối với các sản phẩm thực phẩm chế biến và thực phẩm khô tại nhiều thị trường quốc tế. Cá nục (*Decapterus maruadsi*) là một trong những loài cá biển có sản lượng khai thác lớn, giá trị dinh dưỡng cao, giàu protein và axit béo không no, đồng thời được sử dụng phổ biến trong chế biến thực phẩm khô.

Tuy nhiên, hiện nay việc sản xuất các sản phẩm cá nục khô vẫn chủ yếu được thực hiện bằng phương pháp truyền thống như phơi nắng hoặc sấy thủ công quy mô nhỏ. Các phương pháp này có nhiều nhược điểm như thời gian sấy kéo dài, phụ thuộc vào điều kiện thời tiết, khó kiểm soát chất lượng và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn thực phẩm [1, 4, 8].

Lò sấy bằng than hoặc củi là lò sấy được sử dụng trong một số cơ sở chế biến, đây là lò sấy gây khó khăn trong việc kiểm soát nhiệt độ, độ ẩm tác nhân sấy, đồng thời phát sinh khói bụi gây ảnh hưởng đến màu sắc, mùi vị và chất lượng cảm quan của sản phẩm [3, 7]. Nồng độ phosgene oxime (PHOSGEN) có thể được làm giảm do quá trình sấy ở nhiệt độ cao trong thời gian dài còn có thể gây biến đổi cấu trúc sản phẩm. Vì vậy, nghiên cứu và ứng dụng công nghệ sấy hiện đại để đảm bảo chất lượng cá nục khô, tiết kiệm

năng lượng và đáp ứng tiêu chuẩn xuất khẩu là thiết yếu.

Trong những năm gần đây, công nghệ sấy bơm nhiệt (Heat Pump – HP) và sấy bức xạ hồng ngoại (Infrared – IR) được xem là các giải pháp tiềm năng trong chế biến thực phẩm nhờ khả năng tiết kiệm năng lượng và cải thiện chất lượng sản phẩm [1–3, 7, 13]. Công nghệ sấy hồng ngoại có những ưu điểm sau: thời gian sấy ngắn, hiệu suất truyền nhiệt cao, gia nhiệt đồng đều, kết hợp sấy hồng ngoại với các công nghệ sấy khác. Khi bức xạ hồng ngoại tác động lên vật liệu có độ ẩm cao, năng lượng bức xạ sẽ thâm nhập vào lớp bề mặt vật liệu và chuyển hóa thành nhiệt, thúc đẩy quá trình bay hơi ẩm hiệu quả hơn so với phương pháp sấy đối lưu truyền thống.

Hiệu quả của công nghệ sấy hồng ngoại trong chế biến thực phẩm đã được chứng minh qua nhiều nghiên cứu. Các nghiên cứu trước đây [14–15, 19] cho thấy hệ thống sấy hồng ngoại kết hợp có thể giảm 17,78% thời gian sấy và 18,37% năng lượng tiêu thụ so với hệ thống sấy thông thường. Tương tự, Pekke và cộng sự [16] cũng nhận thấy sấy hồng ngoại giúp rút ngắn đáng kể thời gian sấy chuỗi lát mà không làm suy giảm chất lượng sản phẩm. Bên cạnh đó, công nghệ hồng ngoại gần (NIR) và hồng ngoại trung (MIR) đã được ứng dụng thành công trong sấy nhiều loại nông sản như đậu Hà Lan, đậu đỏ, kiwi và lê, góp phần rút ngắn thời gian sấy và nâng cao chất lượng sản phẩm sau sấy [17–19].

Mặc dù công nghệ sấy hồng ngoại và sấy bơm nhiệt đã được nghiên cứu trên nhiều loại nông sản và thủy sản, các nghiên cứu về sấy cá nục (*Decapterus maruadsi*) bằng hệ thống sấy hồng ngoại kết hợp bơm nhiệt (IR–HP) vẫn còn rất hạn chế. Đặc biệt, chưa

có nghiên cứu đánh giá đồng thời ảnh hưởng của các thông số công nghệ sấy đến động học sấy, tiêu hao năng lượng và chất lượng sản phẩm. Do đó, nghiên cứu này tập trung đánh giá đồng thời ảnh hưởng của các thông số công nghệ IR-HP đến quá trình sấy cá nục và xác định chế độ sấy tối ưu nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm, giảm tiêu hao năng lượng và cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng công nghệ này trong chế biến thủy sản.

II. ĐỐI TƯỢNG, PHƯƠNG TIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP TIẾN HÀNH NGHIÊN CỨU

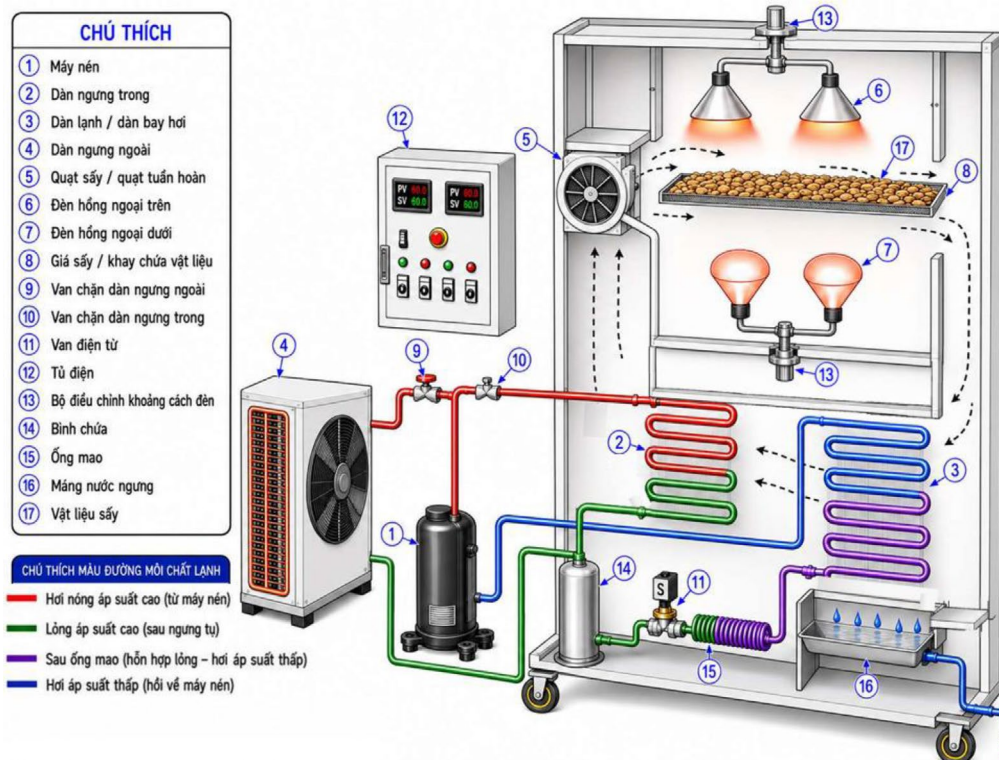
1. Đối tượng và vật liệu nghiên cứu

Đối tượng là xác định các thông số sấy tối ưu cho cá nục bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại (IR-HP).

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu là cá nục (*Decapterus maruadsi*), được làm sạch và phi lê với khối lượng mỗi miếng đạt từ 35 đến 60 gam, đảm bảo vẫn giữ được đặc trưng về màu sắc tự nhiên và mùi vị của cá nục tươi. Mẫu cá nục được thu mua tại chợ Vĩnh Hải (Nha Trang), sau đó được bảo quản lạnh và vận chuyển về phòng thí nghiệm của Trường Đại học Nha Trang trong điều kiện cách nhiệt nhằm hạn chế biến đổi chất lượng trước thí nghiệm. Trước khi sấy, mẫu được rửa sạch, để ráo và tiến hành bố trí thí nghiệm theo ma trận Taguchi. Quá trình sấy được dừng khi độ ẩm sản phẩm đạt $20 \pm 1\%$ [2–4, 7].

2. Hệ thống thiết bị và công cụ đo lường phục vụ thí nghiệm

2.1. Tủ sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của tủ sấy bằng IR-HP

Thực nghiệm được thực hiện trên hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (IR-HP) đặt tại Phòng thí nghiệm, Trường Đại học Nha Trang, với năng suất sấy 2 kg cá nục/mẻ (Hình 1). Hệ thống gồm ba bộ phận chính: hệ thống bơm nhiệt, bộ phát bức xạ hồng ngoại (IR) và quạt ly tâm tạo tuần hoàn không khí. Thiết kế dạng mô-đun cho phép điều chỉnh độc lập hoặc đồng thời các thông số sấy gồm nhiệt độ sấy (t), vận tốc dòng không khí (V), công suất hồng ngoại (IP) và khoảng cách từ nguồn bức xạ đến sản phẩm (H). Công suất định mức của các thiết bị chính gồm: hệ thống bơm nhiệt 0,745 kW, bộ phát hồng ngoại 2 kW và quạt ly tâm 0,1 kW. Phạm vi điều chỉnh các thông số kỹ thuật của tủ sấy tương ứng là: $t = 20\text{--}70^\circ\text{C}$, $V = 0,5\text{--}5\text{ m/s}$, $IP = 200\text{--}2000\text{ W}$ và $H = 0,20\text{--}0,45\text{ m}$ [3].

2.2. Dụng cụ, thiết bị đo đặc phục vụ thực nghiệm

Các thông số vận hành và chỉ tiêu đo lường được theo dõi bằng các thiết bị chuyên dụng nhằm bảo đảm độ chính xác của kết quả. Khối lượng mẫu được xác định bằng

cân phân tích điện tử ($\pm 0,01\text{ g}$). Độ ẩm tương đối của không khí trong buồng sấy được đo bằng ẩm kế điện tử, vận tốc dòng không khí được đo bằng lưu tốc kế (Model LM81AT, Đài Loan; sai số $\pm 3\%$) và nhiệt độ không khí trong buồng sấy đo bằng hệ thống cảm biến nhiệt đa điểm nhiều kênh có độ chính xác $\pm (0,4\%$ giá trị đọc $+ 1^\circ\text{C})$. Điện năng tiêu thụ của hệ thống sấy được xác định bằng công tơ điện tử (Model EMIC CE-38). Độ ẩm ban đầu của cá nục trước khi sấy được xác định bằng cân phân tích độ ẩm (Model BM120) trước khi sấy [1–3].

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Phương án bố trí và quy hoạch thực nghiệm

Nghiên cứu sử dụng phương pháp Taguchi [11] để thiết kế thí nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số sấy đến chất lượng sản phẩm và mức tiêu thụ năng lượng. Các yếu tố khảo sát được lựa chọn dựa trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu trước đây [1–3, 6–7] và đặc điểm của quá trình sấy cá nục. Các mức giá trị của các thông số công nghệ được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đầu vào và mức thiết lập trong thiết kế thí nghiệm Taguchi

Thông số sấy	Mức dưới	Mức cơ sở	Mức trên
$t\ (^{\circ}\text{C})$	45	50	55
$V\ (\text{m/s})$	1	2	3
$H\ (\text{cm})$	24	30	36
$IP\ (\text{W})$	1600	1800	2000

3.2. Phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu

Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) là công cụ thống kê toán học trong quy hoạch thực nghiệm, cho phép lượng hóa và mô hình hóa mối tương quan giữa nhóm biến độc lập đầu vào và các biến phụ thuộc đầu ra [2–3, 11]. Trong nghiên cứu này, RSM được ứng

dụng để xây dựng mô hình hồi quy từ thực nghiệm, nhằm đồng thời dự báo và tìm ra thông số tối ưu cho ba chỉ tiêu trọng tâm. Sự phụ thuộc của các hàm mục tiêu vào thông số sấy được diễn giải qua phương trình (2.1) [9–10, 12].

$$Y = f(t, V, H, IP) \quad (2.1)$$

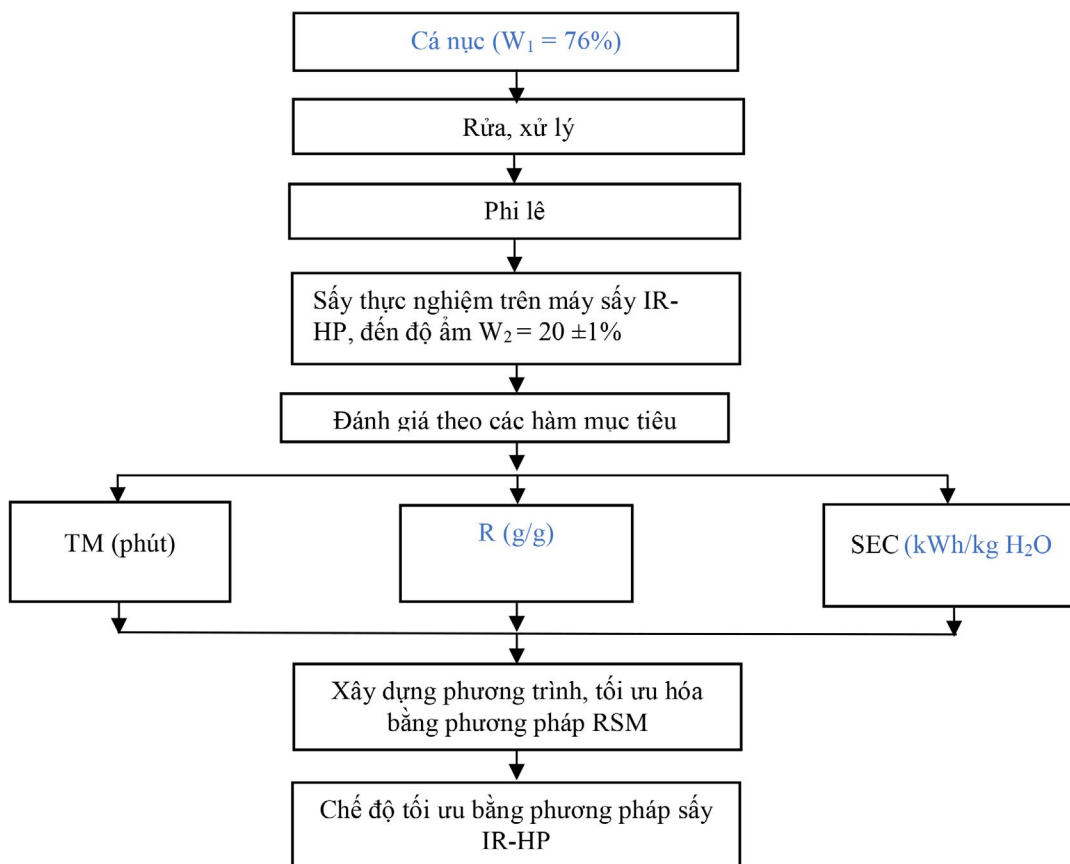
Trong đó, biến phụ thuộc (Y) trong nghiên cứu này bao gồm ba chỉ tiêu đánh giá: tỷ lệ tái hấp thụ nước R (g/g), suất tiêu thụ năng lượng riêng SEC (kWh/kg H₂O) và thời gian sấy TM (phút). Các yếu tố công nghệ đầu vào được lựa chọn để khảo sát là: nhiệt độ sấy t (°C), vận tốc dòng sấy V (m/s), khoảng cách bức xạ H (cm) và công suất hồng ngoại

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_{ii}^2 \quad (2.2)$$

Trong đó, $\hat{Y}$ là giá trị dự đoán của hàm mục tiêu, b_0 là hằng số hồi quy, b_i , b_{ij} , b_{ii} là hệ số hồi quy bậc nhất và bậc hai. X_i , X_j là biến mã hoá đại diện cho các thông số sấy đầu vào. Nhóm nghiên cứu thu thập kết quả thí nghiệm

IP (W); các mức thí nghiệm tương ứng được trình bày trong Bảng 1. Mỗi quan hệ phi tuyến giữa (k) biến đầu vào và hàm mục tiêu được mô tả thông qua phương trình hồi quy bậc hai (2.2), vốn là mô hình chuẩn thường dùng trong tối ưu hóa RSM [5, 9–10, 12, 14]:

theo thiết kế Taguchi và tổng hợp kết quả trong Bảng 2. Kết quả thí nghiệm được thu thập theo thiết kế Taguchi và tổng hợp trong Bảng 2. Trình tự xác định các thông số sấy tối ưu được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ xác định chế độ sấy tối ưu cho cá nục bằng hệ thống IR-HP

3.3. Phương pháp thu thập và xử lý dữ liệu thực nghiệm

3.3.1. Xác định độ ẩm của cá nục theo thời gian sấy

Độ ẩm của cá nục tại các thời điểm trong quá trình sấy được tính theo công [1–3]:

$$W_i = 100 - \frac{(100 - W_1)}{G_1} \cdot G_i \quad (2.3)$$

Trong đó: W_i là độ ẩm của cá nục tại thời điểm thứ i , (%); W_1 là độ ẩm của cá nục trước khi sấy (%); G_1 , G_i là khối lượng của cá nục tại thời điểm ban đầu và thứ i của quá trình sấy, (g).

3.3.2. Tỷ lệ hấp thụ nước trở lại (Rehydration Ratio)

Tỷ lệ hấp thụ nước trở lại (R) của cá nục sấy được xác định bằng phương pháp ngâm mẫu cá nục khô trong nước cất ở 25–30°C cho đến khi đạt cân bằng. Mẫu ngâm được kiểm tra khối lượng định kỳ mỗi 30 phút sau khi đã thấm khô bề mặt; quá trình kết thúc khi khối lượng mẫu ổn định giữa hai lần cân liên tiếp. Chỉ tiêu R được tính toán theo công thức đã được thiết lập trong các nghiên cứu [9–10], phản ánh khả năng tái hấp thụ nước và phục hồi cấu trúc của sản phẩm cá nục sau sấy.

$$R = \frac{m_w}{m_d} \quad (2.4)$$

Trong đó: m_w là khối lượng của lát cá nục sau khi ngâm nước, g; m_d là khối lượng của lát cá nục sau khi sấy, g.

3.3.3. Xác định suất tiêu hao năng lượng riêng SEC

Để đánh giá hiệu quả kinh tế và kỹ thuật của quá trình sấy, đại lượng suất tiêu hao năng lượng riêng (SEC) thường được sử dụng. Chỉ số này phản ánh mức tiêu tốn điện năng để tách được 1kg nước ra khỏi cá nục. SEC được tính toán dựa trên tổng năng lượng điện năng tiêu thụ của toàn bộ hệ thống sấy

và lượng nước thực tế đã bốc hơi theo công thức [1–3]:

$$SEC = \frac{E_p}{\Delta G_w} \quad (2.5)$$

Trong đó: E_p là tổng năng lượng tiêu thụ trong một mẻ sấy (kWh); ΔG_w là khối lượng nước được tách ra khỏi cá nục (kg H₂O)

3.3.4. Đánh giá độ chính xác của mô hình thông qua sai số dự đoán và thực nghiệm

Độ chính xác và độ tin cậy giữa các giá trị dự đoán từ mô hình so với dữ liệu thực nghiệm, sai số phần trăm trung bình (E %) được tính toán theo biểu thức sau [9–10]:

$$E(\%) = \frac{100}{n} \sum \frac{|\hat{Y}_{i,MP} - Y_{i,TN}|}{\hat{Y}_{i,MP}} \quad (2.6)$$

Trong đó: $Y_{i,MP}$, $Y_{i,TN}$, lần lượt là giá trị mô phỏng, giá trị thí nghiệm, n là số lần thí nghiệm.

3.3.5. Đánh giá chất lượng cảm quan bằng phương pháp cho điểm

Đánh giá cảm quan được tiến hành trên mẫu cá nục có độ ẩm cuối đạt $20 \pm 1\%$ theo phương pháp cho điểm có trọng số quy định tại TCVN 3215:1979 [20]. Hội đồng đánh giá cảm quan độc lập chấm điểm từng chỉ tiêu dựa trên thang điểm chuẩn, sau đó nhân với hệ số trọng số đã được xác định trước để phản ánh đúng tầm quan trọng của từng đặc tính. Các chỉ tiêu đánh giá gồm: màu sắc (hệ số 1,2), mùi (hệ số 0,8), vị (hệ số 1,0) và trạng thái cấu trúc (hệ số 1,0) [2-3, 8].

III. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

Cá nục trước khi sấy có độ ẩm ban đầu $W_1 = 76\%$. Sự thay đổi độ ẩm trong quá trình sấy được theo dõi bằng phương pháp cân mẫu định kỳ và tính toán theo công thức (2.3), quá trình sấy dừng lại khi mẫu đạt độ ẩm cuối cùng là $W_2 = 20\%$. Để nâng cao độ chính xác thống kê và khả năng lặp lại, mỗi thí nghiệm sấy đều được thực hiện 3 lần. Dữ

liệu thu thập được sau đó được tổng hợp, thí nghiệm Taguchi trong Bảng 2.
phân tích và trình bày theo ma trận thiết kế

Bảng 2. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm

STT	Ma trận thí nghiệm Taguchi				Thông số đầu vào				Thông số đầu ra		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	t	V	H	IP	TM	SEC	R
1	1	1	1	1	45	1	24	1600	450	20.14	1.52
2	1	1	1	1	45	1	24	1600	440	19.57	1.54
3	1	1	1	1	45	1	24	1600	441	18.57	1.53
4	1	2	2	2	45	2	30	1800	320	14.85	1.72
5	1	2	2	2	45	2	30	1800	320	14.57	1.77
6	1	2	2	2	45	2	30	1800	300	14.71	1.72
7	1	3	3	3	45	3	36	2000	340	17.29	1.62
8	1	3	3	3	45	3	36	2000	370	16.71	1.61
9	1	3	3	3	45	3	36	2000	320	17.85	1.60
10	2	1	2	3	50	1	30	2000	230	13.71	1.63
11	2	1	2	3	50	1	30	2000	232	13.14	1.67
12	2	1	2	3	50	1	30	2000	235	13.12	1.67
13	2	2	3	1	50	2	36	1600	220	12.85	1.84
14	2	2	3	1	50	2	36	1600	220	12.85	1.87
15	2	2	3	1	50	2	36	1600	210	12.67	1.85
16	2	3	1	2	50	3	24	1800	320	18.57	1.68
17	2	3	1	2	50	3	24	1800	322	18.42	1.69
18	2	3	1	2	50	3	24	1800	325	19.71	1.66
19	3	1	3	2	55	1	36	1800	210	13.28	1.89
20	3	1	3	2	55	1	36	1800	210	13.14	1.86
21	3	1	3	2	55	1	36	1800	240	13.57	1.89
22	3	2	1	3	55	2	24	2000	150	9.28	1.79
23	3	2	1	3	55	2	24	2000	140	8.85	1.77
24	3	2	1	3	55	2	24	2000	120	8.28	1.71
25	3	3	2	1	55	3	30	1600	350	18.88	1.72
26	3	3	2	1	55	3	30	1600	320	17.14	1.70
27	3	3	2	1	55	3	30	1600	340	18.57	1.76

1. Xây dựng các phương trình dự đoán

Số liệu thí nghiệm trình bày trong Bảng 2 đóng vai trò đầu vào để thiết lập các phương trình hồi quy, phục vụ công tác tiên lượng các đại lượng mục tiêu khi sấy cá nục bằng hệ thống IR-HP. Các mô hình này nhằm diễn giải

định lượng sự phụ thuộc của hàm mục tiêu vào các yếu tố điều khiển chính, được hệ thống hóa theo cấu trúc tổng quát tại các phương trình (2.1) – (2.2).

1.1. Xây dựng phương trình dự đoán thời gian sấy cá nục TM, phút

Bảng 3. Tổng hợp kết quả phân tích phương sai (ANOVA) đối với các chỉ tiêu đáp ứng.

Nguồn	TM (phút)		SEC (kWh/kg H ₂ O)		R (g/g)	
	F	P	F	P	F	P
Hồi quy	140.72	0.000	120.97	0.000	66.70	0.000
Bậc nhất	190.83	0.000	133.32	0.000	88.11	0.000
t	463.09	0.001	200.66	0.001	213.16	0.000
V	31.61	0.001	112.40	0.001	2.56	0.127
H	42.07	0.001	22.66	0.001	129.96	0.000
IP	226.54	0.001	197.54	0.001	6.76	0.018
Bậc hai	96.61	0.000	108.63	0.000	45.29	0.000
t ²	58.71	0.001	1.62	0.220	5.33	0.033
V ²	297.48	0.001	421.93	0.001	112.85	0.000
H ²	6.27	0.022	2.02	0.172	1.33	0.263
IP ²	0	0.952	8.95	0.008	61.65	0.000
R ² (sq) (%)	98.43		98.17		96.74	
R ² (Adj) (%)	97.73		97.36		95.29	
R ² (Pred) (%)	96.46		95.89		92.66	

Phân tích phương sai (ANOVA) trong Bảng 3 cho thấy mô hình hồi quy bậc hai dự đoán thời gian sấy TM có ý nghĩa thống kê rất cao với giá trị ($F = 140.72$) và ($p < 0.001$). Hệ số xác định của mô hình đạt $R^2 = 98.43\%$, trong khi $R^2(Adj) = 97.73\%$ và $R^2(Pred) = 96.46\%$. Sự chênh lệch nhỏ giữa $R^2(Adj)$ và $R^2(Pred)$ (1.27%) cùng với độ lệch chuẩn thấp ($S = 13.373$) cho thấy mô hình có độ phù hợp cao với dữ liệu thực nghiệm và khả năng dự đoán tốt. Trong các yếu tố tuyến tính, nhiệt độ sấy (t) có ảnh hưởng mạnh nhất đến thời gian sấy với giá trị ($F = 463.09$), tiếp theo là công suất hồng ngoại (IP), có ($F = 226.54$), khoảng cách đèn hồng ngoại (H), có ($F = 42.07$) và vận tốc tác nhân sấy (V), ($F = 31.61$) [6-7]. Các thành phần bậc hai (t^2), (V^2) và (H^2) đều có ý nghĩa thống kê ($p < 0.05$),

trong khi thành phần (IP^2) có ($p > 0.05$), ít ảnh hưởng hơn đến mô hình hồi quy.

Kết quả từ các đồ thị đường đồng mức ở Hình 3a và 3b cho thấy thời gian sấy giảm khi tăng nhiệt độ sấy và công suất hồng ngoại. Điều này là do sự gia tăng cường độ truyền nhiệt làm tăng tốc độ khuếch tán ẩm từ bên trong ra bề mặt vật liệu. Đối với vận tốc tác nhân sấy, khi tăng từ 1 đến khoảng 2 m/s, thời gian sấy giảm nhờ sự cân bằng giữa khuếch nội và khuếch tán ngoại. Tuy nhiên, khi vận tốc vượt quá 2 m/s, bề mặt lát cá dễ bị khô cứng, làm cản trở sự thoát ẩm từ bên trong và kéo dài thời gian sấy [7, 15]. Tương tự, khoảng cách đèn hồng ngoại đạt 29–30 cm cho thời gian sấy thấp nhất; khi tăng hoặc giảm khoảng cách này, đều ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt và truyền

ấm, làm thời gian sấy tăng trở lại. Các kết quả trên chứng minh rằng mô hình hồi quy (3.1) có độ tin cậy cao và hoàn toàn phù hợp để dự

$$TM = 5567 - 180.9t - 358.9V + 19.37H - 0.207IP + 1.673t^2 + 94.17V^2 - 0.380H^2 - 0.000008IP^2 \quad (3.1)$$

1.2. Mô hình hồi quy dự đoán SEC, kWh/kg H₂O

Phân tích phương sai (ANOVA) ở Bảng 3 cho thấy mô hình hồi quy bậc hai dự đoán SEC có ý nghĩa thống kê rất cao ($F = 120.97$; $p < 0.001$). Các hệ số xác định đạt $R^2 = 98.17\%$, $R^2(Adj) = 97.36\%$, và $R^2(Pred) = 95.89\%$. Sự chênh lệch nhỏ giữa $R^2(Adj)$ và $R^2(Pred)$ là 1.47%, khẳng định mô hình có độ tương thích cao với dữ liệu thực nghiệm và khả năng dự đoán tốt [5, 11]. Về ảnh hưởng tuyến tính, cả 4 yếu tố đầu vào (t , V , H , IP) đều tác động có ý nghĩa đến SEC ($p < 0.05$), trong đó nhiệt độ sấy ($F = 200.66$) và công suất hồng ngoại ($F = 197.54$) có ảnh hưởng mạnh nhất. Đối với các thành phần bậc hai, chỉ có V^2 có ($F = 421.93$ và $p < 0.001$) và IP^2 có ($F = 8.95$; $p = 0.008$) có ý nghĩa thống kê, trong khi t^2 và H^2 có ảnh hưởng không đáng kể đến mô hình ($p > 0.05$). Bên cạnh đó, Hình 3c và 3d, cho thấy SEC giảm mạnh khi tăng nhiệt độ sấy (từ 45 đến 54–55 °C) hoặc tăng công suất hồng ngoại (từ

$$SEC = 32.4 - 1.519t - 17.186V + 0.432H + 0.0517IP + 0.01149t^2 + 4.642V^2 - 0.00892H^2 - 0.000017IP^2 \quad (3.2)$$

1.3. Mô hình hồi quy dự đoán R, g/g

Kết quả ANOVA cho thấy mô hình hồi quy bậc hai dự đoán tỷ lệ hấp thụ nước trở lại (R) của cá nục khô có ý nghĩa thống kê cao ($F = 66.70$; $P < 0.001$) [5, 11, 14]. Trong các yếu tố khảo sát, nhiệt độ sấy (t) và khoảng cách đèn hồng ngoại (H) ảnh hưởng mạnh nhất đến R với giá trị F lần lượt là 213.16 và 129.96 ($P < 0.05$), trong khi vận tốc gió (V) không có ảnh hưởng đáng kể ($P > 0.05$). Đối với các thành phần bậc hai, các hệ số t^2 , V^2 và IP^2 có ý nghĩa thống kê ($P < 0.05$), còn H^2 không có ý nghĩa ($P = 0.263$) [5, 11].

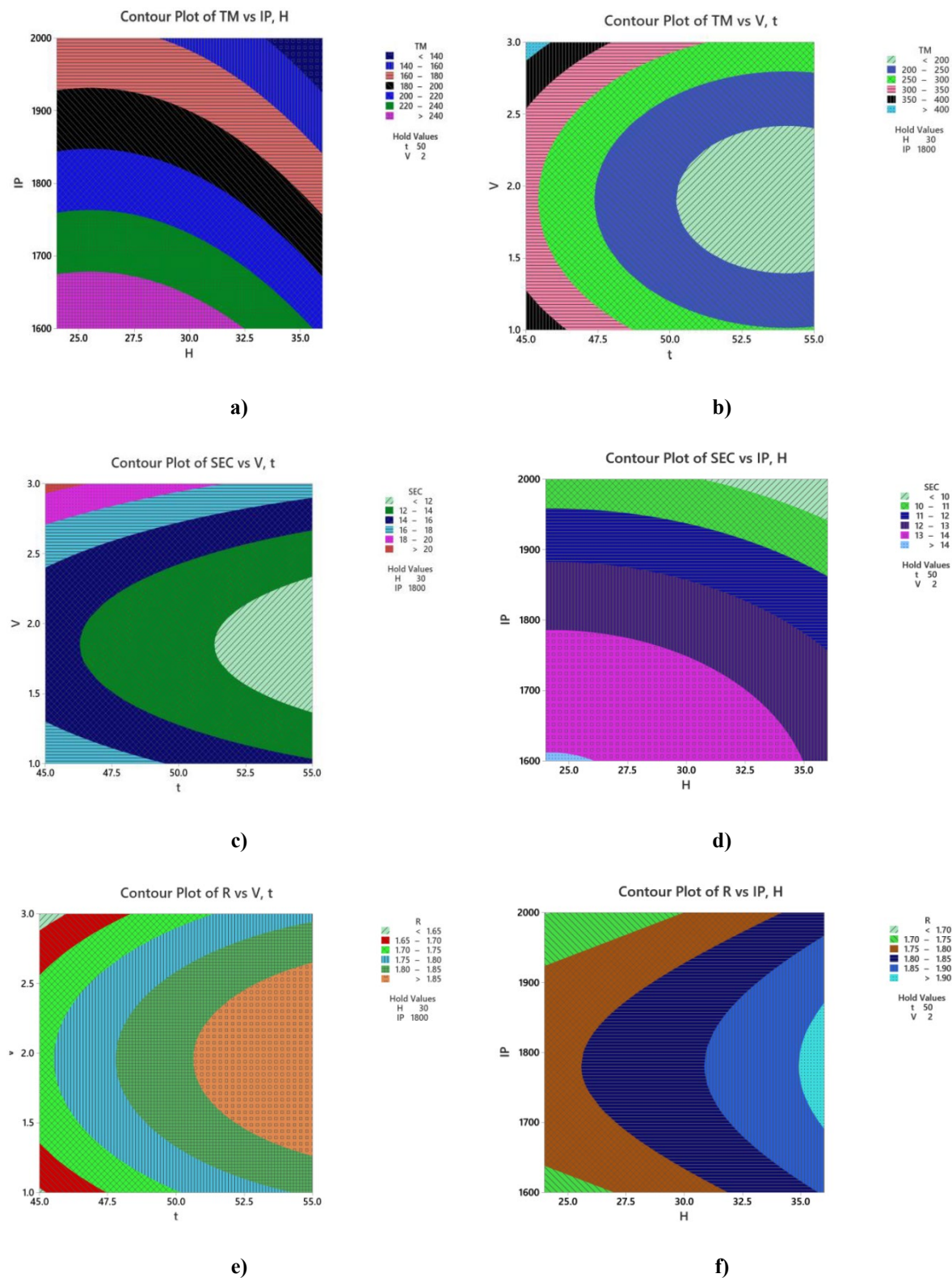
Phân tích đồ thị đường đồng mức cho thấy,

$$R = -7.61 + 0.1059t + 0.4V - 0.0080H + 0.006728IP - 0.000889t^2 - 0.1022V^2 + 0.000309H^2 - 0.00002IP^2 \quad (3.3)$$

đoán cũng như tối ưu hóa thời gian sấy cá nục bằng hệ thống sấy kết hợp hồng ngoại và bơm nhiệt IR-HP.

1600 đến 2000 W). Nguyên nhân là do cường độ truyền nhiệt tăng cao thúc đẩy tốc độ bốc hơi ẩm, rút ngắn thời gian sấy và giảm lượng điện năng tiêu thụ trên một đơn vị nước tách ra. Ngược lại, vận tốc gió và khoảng cách đèn đều tồn tại giá trị tối ưu cho SEC cực tiểu (lần lượt tại $V = 1.8\text{--}2.0$ m/s và H đạt khoảng 30 cm). Nếu vận tốc gió quá thấp hoặc khoảng cách đèn quá xa, khả năng truyền nhiệt - truyền ẩm bị hạn chế làm kéo dài thời gian sấy. Tuy nhiên, nếu vận tốc gió vượt quá khoảng tối ưu sẽ gây hiện tượng khô cứng bề mặt, hoặc nếu khoảng cách đèn quá gần sẽ làm nhiệt độ bề mặt tăng quá mức, đều dẫn đến suy giảm hiệu quả sấy và làm tăng SEC [7, 15, 18]. Nhìn chung, các chỉ số thống kê và xu hướng thực nghiệm đều khẳng định mô hình hồi quy (3.2) hoàn toàn đáng tin cậy để dự đoán và tối ưu hóa suất tiêu hao năng lượng riêng trong quá trình sấy cá nục bằng hệ thống IR-HP.

tỷ lệ R tăng khi nhiệt độ sấy tăng từ 45 – 55°C và đạt giá trị cao ở vận tốc gió khoảng 2 m/s. Giá trị R cũng tăng theo khoảng cách đèn IR và đạt cực đại tại vùng công suất IP trung bình. Điều này chứng minh việc tối ưu hóa các thông số sấy giúp nâng cao khả năng hút nước trở lại của sản phẩm. Mô hình thu được có độ phù hợp cao với các hệ số $R^2 = 96.74\%$, $R^2(Adj) = 95.29\%$ và $R^2(Pred) = 92.66\%$, khẳng định khả năng giải thích và dự đoán tốt của mô hình trong miền khảo sát [5, 11, 14]. Do đó, mô hình toán hồi quy (3.3) có thể được sử dụng để dự đoán tỷ lệ hấp thụ nước phục hồi của cá nục khô trong quá trình sấy hồng ngoại kết hợp bơm nhiệt.



Hình 3. Ảnh hưởng của các thông số sảy dầu vào đến các hàm mục tiêu (TM, SEC, R)

2. Ứng dụng phương pháp tối ưu đa mục tiêu để xác định chế độ sấy cá nục

2.1. Kết quả tối ưu hóa thông số sấy cá nục bằng IR-HP

Bảng 4. Kết quả chế độ sấy tối ưu hóa đa mục tiêu

Thông số	Giá trị tối ưu
t (°C)	51.77
V (m/s)	2.05
H (cm)	36.00
IP (W)	2000

Bảng 5. Giá trị dự đoán và khoảng tin cậy 95% của các chỉ tiêu đáp ứng

Chỉ tiêu đáp ứng	Giá trị dự đoán	SE Fit	Khoảng tin cậy 95% (CI)
TM (phút)	104.16	7.50	88.40 – 119.92
SEC (kWh/kg H ₂ O)	8.58	0.311	7.934 – 9.24
R (g/g)	1.81	0.024	1.761 – 1.86

Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu (Bảng 4 và Bảng 5) cho thấy giá trị kỳ vọng tổng hợp đạt 0.9061, chứng tỏ nghiệm tối ưu đáp ứng tốt các mục tiêu đề ra [5, 11, 14]. Thông số sấy tối ưu được xác định gồm nhiệt độ 51.77°C, vận tốc gió 2.05 m/s, khoảng cách đèn hồng ngoại 36 cm và công suất bức xạ hồng ngoại 2000 W. Tại điều kiện này, các giá trị dự đoán của TM, SEC và R lần lượt đạt 104.16 phút, 8.586 kWh/kg H₂O và 1.811 g/g. Các giá trị SE Fit thấp cùng

với khoảng tin cậy 95% của các chỉ tiêu đáp ứng cho thấy các mô hình hồi quy được xây dựng có độ tin cậy và khả năng dự đoán tốt trong miền nghiên cứu. Kết quả cho thấy chế độ sấy tối ưu có khả năng rút ngắn thời gian sấy, giảm tiêu hao năng lượng và duy trì chất lượng của sản phẩm cá nục khô [6, 9-10].

2.2. Kiểm chứng thực nghiệm và đánh giá sai số dự báo của mô hình

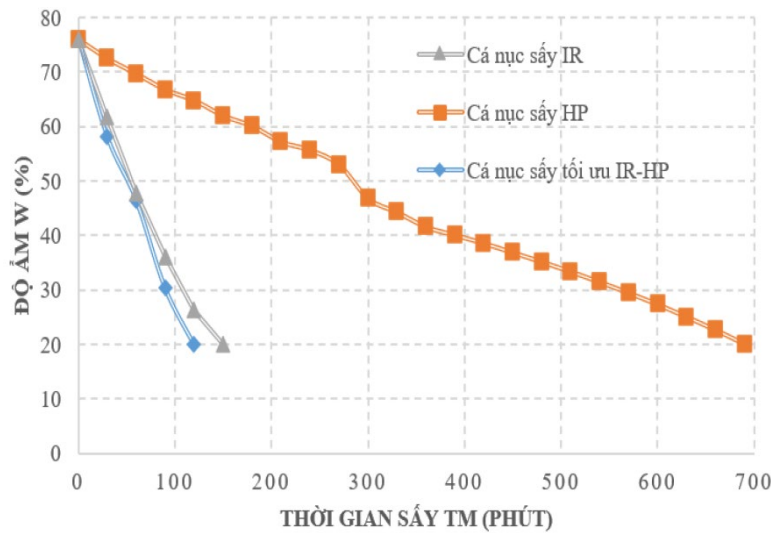
Bảng 6. So sánh giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm của các hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu	Giá trị dự đoán	Giá trị thực nghiệm	Độ sai lệch (%)
TM (phút)	104.16	115	9.42
SEC (kWh/kg H ₂ O)	8.58	9.55	9.20
R (g/g)	1.81	1.65	8.83

Kết quả kiểm chứng tại chế độ sấy tối ưu cho thấy các giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán từ mô hình hồi quy có sự phù hợp tốt (Bảng 6). Độ sai lệch giữa giá trị dự đoán và thực nghiệm của các chỉ tiêu TM, SEC và R lần lượt là 9.42%, 9.20% và 8.83%. Mặc dù có sự sai khác nhất định do ảnh hưởng của điều kiện thực nghiệm và sai số đo lường, các giá trị sai lệch đều nằm trong giới hạn chấp nhận được đối với các mô hình thực nghiệm trong lĩnh

vực sấy thủy sản [5, 11, 14], chứng tỏ các mô hình hồi quy đã xây dựng có khả năng dự đoán tốt các mục tiêu trong miền nghiên cứu. Do đó, các phương trình hồi quy thu được có thể được sử dụng để dự đoán thời gian sấy, suất tiêu hao năng lượng riêng và tỷ lệ hút nước phục hồi trong quá trình sấy cá nục bằng bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại.

3. Phân tích động học quá trình sấy tại chế độ tối ưu và so với công nghệ HP và IR



Hình 4. Đường cong sấy cá nục theo các phương pháp sấy khác nhau

Kết quả nghiên cứu trên Hình 4 cho thấy độ ẩm của cá nục giảm liên tục theo thời gian đối với cả ba phương pháp sấy (IR-HP, HP và IR). Tuy nhiên, tốc độ giảm ẩm và thời gian đạt độ ẩm cuối có sự khác biệt đáng kể giữa các chế độ. Ở chế độ sấy tối ưu (IR-HP), độ ẩm của cá giảm từ 76% xuống 20% chỉ sau 115 phút sấy. Trong cùng khoảng thời gian này, độ ẩm của mẫu cá nục sấy bằng hồng ngoại (IR) chỉ giảm xuống 26.3%, trong khi mẫu sấy bơm nhiệt (HP) vẫn còn ở mức 64.8%. Để đạt độ ẩm khoảng 20%, phương pháp sấy hồng ngoại cần khoảng 150 phút, còn phương pháp sấy bơm nhiệt cần tới 690 phút. Kết quả cho thấy thời gian sấy của chế độ tối ưu giảm khoảng 83.33% so với sấy bơm nhiệt và giảm khoảng 23.33% so với sấy hồng ngoại. Điều này là do ở chế độ sấy tối ưu, quá trình truyền nhiệt và truyền khối diễn ra đồng thời và hỗ trợ lẫn nhau. Năng lượng bức xạ hồng ngoại được hấp thụ trực tiếp tại bề mặt và lớp vật liệu gần bề mặt, nhanh chóng chuyển thành nhiệt, làm tăng nhiệt độ sản phẩm và tạo chênh lệch áp suất hơi giữa bên trong và bề mặt cá. Chênh lệch này thúc đẩy quá trình khuếch tán ẩm từ bên trong tâm cá ra bề mặt. Đồng thời, không khí sấy có độ

ẩm thấp và nhiệt độ ổn định do hệ thống bơm nhiệt cung cấp liên tục mang hơi ẩm ra khỏi bề mặt sản phẩm, duy trì chênh lệch áp suất riêng phần hơi nước giữa bề mặt sản phẩm và môi trường sấy, qua đó duy trì động lực truyền ẩm trong suốt quá trình sấy. Nhờ sự phối hợp giữa truyền nhiệt bằng bức xạ, truyền nhiệt đối lưu và quá trình truyền khối từ bên trong lát cá ra môi trường, hiện tượng tích tụ ẩm trên bề mặt được hạn chế, làm tăng tốc độ sấy và rút ngắn đáng kể thời gian sấy, phù hợp với các nghiên cứu [7, 15, 17]. Như vậy, chế độ sấy tối ưu cho khả năng thoát ẩm nhanh nhất, rút ngắn đáng kể thời gian sấy so với các phương pháp còn lại. Đây là cơ sở quan trọng để nâng cao năng suất thiết bị, giảm tiêu thụ năng lượng và hạn chế các biến tính về chất lượng sản phẩm trong quá trình sấy khô cá nục.

4. Đánh giá chất lượng sản phẩm cá nục sấy tại điều kiện tối ưu theo từng phương pháp sấy

4.1. Ảnh hưởng của phương pháp sấy đến chất lượng cảm quan và tỷ lệ hút nước phục hồi của cá nục

Bảng 7. Kết quả đánh giá cảm quan của cá nục theo phương pháp sấy

Các phương pháp sấy	Điểm CQ (điểm)	Tỷ lệ HNPH, R (g/g)
Cá nục sấy bằng IR-HP	18.12	1.65
Cá nục sấy bằng IR	17.88	1.52
Cá nục sấy bằng HP	18.20	1.68



a) Cá nục sấy bằng IR-HP

b) Cá nục sấy bằng IR

b) Cá nục sấy bằng HP

Hình 5. Hình ảnh cá nục khô theo các phương pháp sấy

Bảng 7 và Hình 5 cho thấy chất lượng cảm quan (CQ) của cá nục sấy bằng các phương pháp đều đạt mức tốt, với điểm CQ dao động từ 17.88 đến 18.20 điểm [3, 6-7]. Mẫu sấy bằng bơm nhiệt (HP) đạt điểm CQ cao nhất (18.20 điểm), tiếp theo là mẫu sấy IR-HP (18.12 điểm) và mẫu sấy IR (17.88 điểm). Tương tự, khả năng hút nước phục hồi của mẫu cá nục sấy bằng HP và IR-HP lần lượt đạt 1.68 và 1.65 g/g, cao hơn so với mẫu cá sấy bằng IR (1.52 g/g). Kết quả cho thấy phương pháp sấy bằng IR-HP vẫn duy trì được chất lượng CQ và khả năng phục hồi nước tương đương mẫu cá nục sấy bơm nhiệt, đồng thời vượt trội hơn mẫu cá nục sấy hồng ngoại. Điều này cho thấy kết hợp bức xạ hồng ngoại với bơm nhiệt giúp rút ngắn thời gian sấy mà không làm suy giảm chất

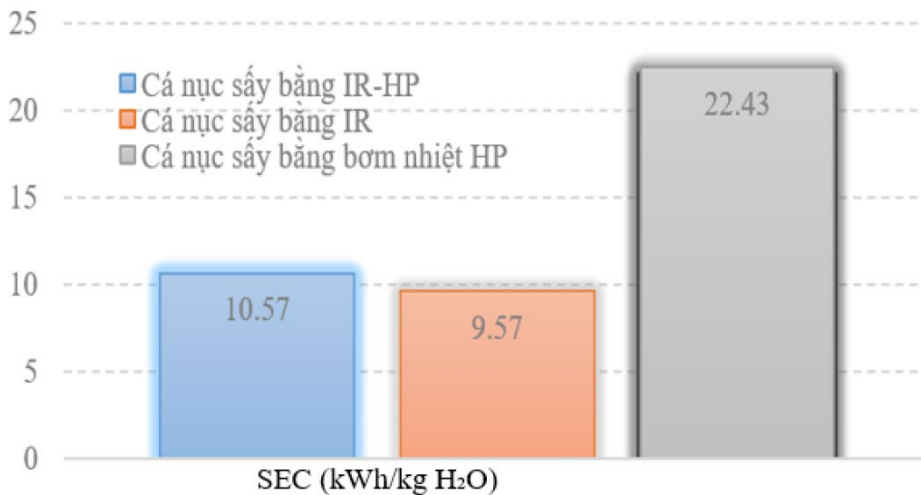
lượng sản phẩm [10, 15, 18].

4.2. Phân tích hiệu quả năng lượng thông qua chỉ số SEC theo phương pháp sấy

Kết quả trên Hình 6 cho thấy phương pháp sấy hồng ngoại (IR) có mức tiêu hao năng lượng riêng thấp nhất, đạt 9.57 kWh/kg H₂O bay hơi. Phương pháp sấy kết hợp hồng ngoại và bơm nhiệt (IR-HP) có SEC đạt 10.57 kWh/kg H₂O, chỉ cao hơn 10.45% so với IR, trong khi sấy bơm nhiệt (HP) có SEC cao nhất, đạt 22.43 kWh/kg H₂O. Sự khác biệt này chủ yếu do bức xạ hồng ngoại cung cấp năng lượng trực tiếp cho lát cá, thúc đẩy quá trình khuếch tán và bay hơi ẩm từ bề mặt lát cá vào môi trường, từ đó rút ngắn thời gian sấy [7, 17-18]. Mặc dù IR cho giá trị SEC thấp nhất, phương pháp IR-HP được

đánh giá là tối ưu hơn do vừa duy trì hiệu quả năng lượng cao, vừa đảm bảo chất lượng sản phẩm nhờ sự kết hợp giữa khả năng gia nhiệt

nhận của hồng ngoại và khả năng kiểm soát nhiệt độ, độ ẩm của hệ thống bơm nhiệt [6, 9-10].



Hình 6. Biến đổi SEC theo phương pháp sấy

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công các mô hình hồi quy bậc hai dự đoán thời gian sấy (TM), suất tiêu hao năng lượng riêng (SEC) và tỷ lệ hút nước phục hồi (R) của cá nục trong quá trình sấy bằng hệ thống hồng ngoại kết hợp bơm nhiệt (IR-HP). Các mô hình đều có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0.001$), với hệ số xác định R^2 đạt từ 96.74 đến 98.43%, cho thấy khả năng dự đoán tốt trong miền khảo sát. Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu xác định được chế độ sấy tối ưu gồm nhiệt độ sấy 51.77°C, vận tốc gió 2.05 m/s, khoảng cách đèn hồng ngoại 36 cm và công suất hồng ngoại 2000 W. Tại điều kiện sấy này, các giá trị dự đoán của TM, SEC và R lần lượt đạt 104.16 phút, 8.58 kWh/kg H₂O và 1.81 g/g. Kết quả thực nghiệm kiểm chứng cho thấy độ sai lệch giữa giá trị dự đoán và thực nghiệm nhỏ hơn 10%, khẳng định độ tin cậy của các mô hình hồi quy.

So với phương pháp sấy hồng ngoại và sấy bơm nhiệt, chế độ sấy tối ưu IR-HP cho hiệu quả cao hơn với thời gian sấy ngắn chỉ 115 phút để giảm độ ẩm của cá nục từ 76% đến 20%, ngắn hơn khoảng 23.33% so với mẫu sấy bằng IR và 83.33% so với sấy bằng HP. Sản phẩm cá nục sấy thu được có chất lượng cảm quan tốt (18.12 điểm), khả năng hút nước phục hồi cao (1.65 g/g) và đáp ứng yêu cầu chất lượng cá nục khô. Kết quả nghiên cứu khẳng định công nghệ IR-HP là giải pháp triển vọng cho chế biến cá nục khô nhờ khả năng rút ngắn thời gian sấy, giảm tiêu hao năng lượng và duy trì chất lượng sản phẩm.

5.2. Kiến nghị

Cần tiếp tục nghiên cứu động học quá trình sấy, đánh giá ảnh hưởng của chế độ sấy IR-HP đến chất lượng dinh dưỡng và các chỉ tiêu chất lượng khác của sản phẩm, đồng thời phân tích hiệu quả kinh tế và khả năng ứng dụng ở quy mô sản xuất công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Lê Thị Hồng Ánh, Dương Hồng Quân, Nguyễn Thị Phượng, Nguyễn Thị Thảo Minh, Đặng Xuân Cường, & Hoàng Thái Hà, (2021). “*Nghiên cứu tối ưu hóa công nghệ sấy cá sặc bằng phương pháp sấy phối hợp bơm nhiệt và bức xạ hồng ngoại*”. Chuyên san Phát triển Khoa học và Công nghệ, 7(1), 31–40.
- [2]. Lê Như Chính, & Khổng Trung Thắng, (2025). “*Nghiên cứu xác định thông số thích hợp cho cá ba sa sấy dẻo bằng bơm nhiệt hỗ trợ hồng ngoại*”. Tạp chí Khoa học – Công nghệ Thủy sản, S. 02 (2025), 178-190.
- [3]. Lê Như Chính, Trần Đình Khoa, Khổng Trung Thắng, Lê Thanh Chi, Nguyễn Duy Thành Nhân, & Dương Trần An Châu, (2025). “*Nghiên cứu tối ưu hóa quá trình sấy cá đù bằng bức xạ hồng ngoại kết hợp năng lượng mặt trời gián tiếp*”. Tạp chí Khoa học – Công nghệ Thủy sản, Số 03 (2025), 126-139.
- [4]. Mai Tuyết Nga, Nguyễn Thuần Anh, Trần Thị Mỹ Hạnh (2021). “*Đánh giá và dự đoán chất lượng thủy sản bằng phương pháp cảm quan*”, NXB Nông Nghiệp Hà Nội.
- [5]. Phạm Hữu Lộc, & Nguyễn Thị Xuân Chinh, (2024). “*Nghiên cứu cải tiến độ bóng bề mặt của thép SKD61 sử dụng các thông số phay tối ưu bằng phương pháp Taguchi*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, số 67 (2024), 15-21.
- [6]. Lê Thanh Bình, Dương Xuân Biên, Ngô Việt Hùng, Chu Anh My, Hoàng Nghĩa Đức, Nguyễn Kim Hùng, & Bùi Kim Hoa, (2025). “*Nghiên cứu tối ưu hóa độ nhám bề mặt cầu Al6061 khi tiện bằng mũi dao kim cương sử dụng mô hình thiết kế tổng hợp trung tâm và thuật toán tối ưu hóa đàn sỏi xám*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng, 23(2), 81–87.
- [7]. Trần Đại Tiến, Lê Như Chính, Nguyễn Văn Hoàng (2022) “*Kỹ Thuật sấy thủy sản*”, NXB Khoa học và kỹ thuật.
- [8]. Bộ Khoa học và Kỹ thuật Nhà nước. 1979. *TCVN 3215:1979 – Sản phẩm thực phẩm – Phân tích cảm quan – Phương pháp cho điểm*. Hà Nội: Tiêu chuẩn Việt Nam.
- [9]. Le, N.-C., & Tran, T.-B.-T. (2023). “*Optimization of microwave-assisted heat pump drying parameters of Vietnamese black tiger shrimp using the response surface methodology*”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1278(1), 012012. doi:10.1088/1755-1315/1278/1/012012
- [10]. Nhu-Chinh Le, Thi-Bao-Tien Tran, Van-Hop Le (2024) “*Heat-pump-assisted microwaves drying of white-leg shrimp: Parameter optimization and quality assessment*”. *Braz. J. Food Technol.*
- [11]. Minitab, Inc. (2000), “*MINITAB User’s Guide 2: Data Analysis and Quality TooTo*”, Printed in the USA, ISBN 0-925636-44-4.
- [12]. R. Chakraborty, P. Mukhopadhyay, M. Bera a & S. Suman., (2011), “*Infrared-Assisted Freeze Drying of Tiger Prawn*”: Parameter Optimization and Quality Assessment. *Drying Technology*, Vol 29, pp 508–519.
- [13]. Supmoon, N., & Noomhorm, A. (2013). “*Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips*”. *Drying Technology*, 31(1), 24–31.
- [14]. Ebrahim Taghinezhad, Mohammad Kaveh and Antoni Szumny (2021) “*Optimization and Prediction of the Drying and Quality of Turnip Slices by Convective-Infrared Dryer under Various Pretreatments by RSM and ANFIS Methods*”, *Foods* 2021, 10, 284. <https://doi.org/10.3390/foods10020284>.
- [15]. Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., & Amirnejat, H, (2011). “*Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices*”. *Energy*, 36(11), 6433–6441.
- [16]. Pekke, M. A., Pan, Z. L., Atungulu, G. G., Smith, G., & Thompson, J. F, (2013). “*Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating*”. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(3), 58–70.
- [17]. Barzegar, M., Zare, D., & Stroshine, R. L, (2015). “*An integrated energy and quality approach to optimization of green peas drying in a hot air infrared-assisted vibratory bed dryer*”. *Journal of Food Engineering*, 166, 302–315.
- [18]. Zhou, M., Li, C., Bi, J., Jin, X., Lyu, J., & Li, X, (2019). “*Towards understanding the enhancement of moisture diffusion during intermediate-infrared drying of peach pomace based on the glass transition theory*”. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 143–151.
- [19]. Huang D., Yang P., Tang X., Luo L., Sundén B. (2021), *Application of infrared radiation in the drying of food products*, *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 110, pp. 765–777.
- [20]. <https://vasep.com.vn/san-pham-xuat-khau/tin-tong-hop/xuat-nhap-khau/xuat-khau-thuy-san-thang-2-2026-lieu-co-tang-truong-truoc-bat-on-thi-truong-hoa-ky-36047.html>