

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH SẤY CÁ ĐÙ BẰNG BỨC XẠ HỒNG NGOẠI KẾT HỢP NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI GIÁN TIẾP

OPTIMIZATION STUDY OF SCIAENIDAE FISH DRYING BY INFRARED RADIATION COMBINED WITH INDIRECT SOLAR DRYING

Lê Như Chính¹, Trần Đình Khoa², Khổng Trung Thắng¹,
Lê Thanh Chí³, Nguyễn Duy Thành Nhân, Dương Trân An Châu

1. Khoa Cơ khí, Trường Đại học Nha Trang

2. Khoa Nhiệt Lạnh, Trường Cao đẳng Lý Tự Trọng Tp.HCM

3. Trường Cao đẳng nghề Trà Vinh

Tác giả liên hệ: Lê Như Chính (Email: chinhln@ntu.edu.vn)

Ngày nhận bài: 06/07/2025; Ngày phản biện thông qua: 02/08/2025; Ngày duyệt đăng: 20/09/2025

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình nghiên cứu thực nghiệm xác định các thông số sấy tối ưu cá ù trên hệ thống bức xạ hồng ngoại kết hợp năng lượng mặt trời gián tiếp (IR-ISD). Thông qua phương pháp bố trí thí nghiệm ma trận trực giao Taguchi kết hợp với phương pháp phân tích mặt đáp ứng (RSM) để khảo sát ảnh hưởng các yếu tố (nhiệt độ sấy, vận tốc gió, khoảng cách và công suất hồng ngoại) đến ba yếu tố đầu ra (thời gian sấy, suất năng lượng tiêu hao và tỉ lệ tái hấp thụ nước). Kết quả cho thấy phương trình hồi quy có độ tương thích cao với dữ liệu thực nghiệm. Thông số tối ưu đạt được: nhiệt độ sấy 59.5°C, vận tốc gió 2.11 m/s, khoảng cách hồng ngoại 0.26 m, công suất hồng ngoại 1980 W; tương ứng kết quả mục tiêu: thời gian sấy 6,93 giờ, suất năng lượng tiêu hao 9,84 kWh/kg_{H₂O}, tỉ lệ tái hấp thụ nước phục hồi đạt 1.6 g_{VLA}/g_{VLK}. Điều kiện hoạt động hệ thống sấy đánh giá chế độ tối ưu: nhiệt độ nước trung bình vào và ra khỏi bộ calorifer là 40.5°C và 35°C, nhiệt độ không khí vào và ra khỏi bộ calorifer lần lượt là 31.1°C và 35.1°C. Từ kết quả trên ta có thể thấy được tiềm năng của việc ứng dụng hệ thống sấy IR-ISD trong việc nâng cao hiệu quả sấy cá, đồng thời góp phần vào việc tận dụng nguồn năng lượng tái tạo bền vững.

Từ khóa: Cá ù fillet, sấy hồng ngoại, năng lượng mặt trời, sấy hồng ngoại kết hợp năng lượng mặt trời gián tiếp, tối ưu hóa, RSM, Taguchi.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study aimed at optimizing the drying parameters for Sciaenidae fish using a combined infrared radiation and indirect solar drying (IR-ISD) system. The Taguchi orthogonal array design method combined with response surface methodology (RSM) was employed to investigate the effects of four key factors (drying temperature, air velocity, infrared distance and infrared power) on three output responses (drying time, specific energy consumption and moisture reabsorption ratio). The results indicated that the regression models exhibited a high degree of fit with the experimental data. The optimal drying parameters were determined as follows: drying temperature of 59.5°C, air velocity of 2.11 m/s, infrared distance of 0.26 m, and infrared power of 1980 W. Under these conditions, the corresponding output responses were: drying time of 6,93 hours, specific energy consumption of 9.84 kWh/kg_{H₂O}, and moisture reabsorption ratio of 1.6 g_{VLA}/g_{VLK}. The system's thermal operating conditions under the optimal mode were as follows: the average water temperature entering and leaving the calorifer was 40.5°C and 35°C, respectively; the air temperature entering and leaving the calorifer was 31.1°C and 35.1°C, respectively. These findings highlight the potential of the IR-ISD system in enhancing the drying efficiency of fish products while promoting the sustainable utilization of renewable energy sources.

Keywords: Sciaenidae fillet, infrared drying, solar energy, infrared-indirect solar drying, optimization, RSM, Taguchi.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh nhu cầu tiêu thụ thủy sản khô ngày càng tăng cao, công nghệ sấy đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao chất lượng, kéo dài thời gian bảo quản và giá trị sản phẩm. Theo Nguyễn Thị Vàng et al. 2020 [8] cá đù (*Sciaenidae*) - một họ cá phổ biến ở Việt Nam với hơn 53 loài [5] là một trong những họ cá có giá trị kinh tế cao và nguồn lợi lớn được dùng để làm thực phẩm dưới dạng cá tươi, cá khô hay một nắng.

Hiện nay, xuất khẩu cá khô tiếp tục tăng, tính đến tháng 4 năm 2025, kim ngạch đạt 26 triệu USD, tăng 65% so với cùng kỳ năm trước [19]. Tuy nhiên, công nghệ sản xuất cá khô, đặc biệt là cá đù, vẫn chủ yếu dựa vào phương pháp phơi nắng truyền thống. Cách làm này tồn tại nhiều hạn chế như khó đảm bảo an toàn vệ sinh thực phẩm, nhiệt độ không đồng đều, tốc độ thoát ẩm chậm và độ ẩm cuối không kiểm soát được, dẫn đến suy giảm chất lượng sản phẩm và kéo dài thời gian sấy [9]. Do đó, nhiều nghiên cứu đã đề xuất các công nghệ sấy tiên tiến như vi sóng, bơm nhiệt, bức xạ hồng ngoại (IR) hoặc tích hợp nhằm cải thiện hiệu quả sấy và chất lượng sản phẩm [4, 6]. Trong đó, sấy hồng ngoại được đánh giá cao hơn vì theo Salehi. 2020 [16] cho rằng phương pháp sấy bằng IR có nhiều ưu điểm như nhờ khả năng đâm xuyên của các tia bức xạ vào thực phẩm, truyền nhiệt trực tiếp cho sản phẩm nóng từ bên trong, tăng tốc độ sấy. Tuy nhiên, theo Huang et al. 2021 [13] lại cho thấy sấy bằng IR cũng còn nhược điểm cần phải cải thiện đặc biệt là mức độ tiêu hao năng lượng. Vì vậy, việc kết hợp năng lượng mặt trời (NLMT) vào hệ thống sấy bức xạ hồng ngoại để khắc phục những nhược điểm của nó đã được nhiều nhà khoa học nghiên cứu và cho ra kết quả khả thi về chất lượng sản phẩm cũng như năng lượng tiêu hao như Aktaş et al. 2016 khi sấy dưa [11] và Şevik et al. 2019 khi sấy táo và lá bạc hà [20].

Đối với thủy sản đặc biệt là cá đù vẫn còn thiếu các nghiên cứu chuyên sâu về tối ưu hóa

quy trình sấy cho hệ thống IR-ISD. Xuất phát từ thực tiễn đó nhóm tác giả đã nghiên cứu thực nghiệm tối ưu hóa quá trình sấy cá đù bằng IR-ISD với mục tiêu đề xuất được các thông số sấy tối ưu (nhiệt độ sấy, vận tốc gió, khoảng cách và công suất hồng ngoại) nhằm rút ngắn thời gian sấy, giảm năng lượng tiêu hao và tăng tỉ lệ tái hấp thụ nước cá đù sau sấy. Đồng thời trong nghiên cứu còn đánh giá chất lượng cảm quan, biến đổi thành phần hóa học và chỉ tiêu vi sinh cá sau khi sấy.

II. ĐỐI TƯỢNG, THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

1. Đối tượng và vật liệu nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là chế độ sấy tối ưu cho cá đù bằng IR-ISD.

Vật liệu nghiên cứu là cá đù tươi, được thu mua tại các chợ Vĩnh Hải trên địa bàn Nha Trang, Khánh Hòa. Sau đó, cá được vận chuyển về phòng thí nghiệm Trường Đại học Nha Trang bằng thùng cách nhiệt nhằm đảm bảo điều kiện bảo quản. Tại phòng thí nghiệm, cá được sơ chế bỏ đầu, tách xương, với khối lượng còn lại khoảng 150 ± 5 gam, sau đó được đưa vào thực nghiệm trên máy sấy IR-ISD. Nhằm loại bỏ một phần nước tự do trong cá, đồng thời đảm bảo cá sau khi sấy có màu sắc tự nhiên, vị ngọt, cấu trúc xốp, không quá dai, phù hợp với yêu cầu thực tế hiện nay khi sử dụng cá đù sấy khô một nắng, hai nắng,...Theo đó, nghiên cứu đã lựa chọn độ ẩm của cá đù sau khi sấy đạt $W = 40 \pm 1\%$. Mức độ ẩm này cũng phù hợp với nghiên cứu của Kim et al. (2020) [14], khi sấy cá đù vàng với độ ẩm cuối đạt từ 38.56% đến 47.38%.

2. Máy và thiết bị nghiên cứu

2.1. Thông số, cấu tạo máy sấy IR-ISD

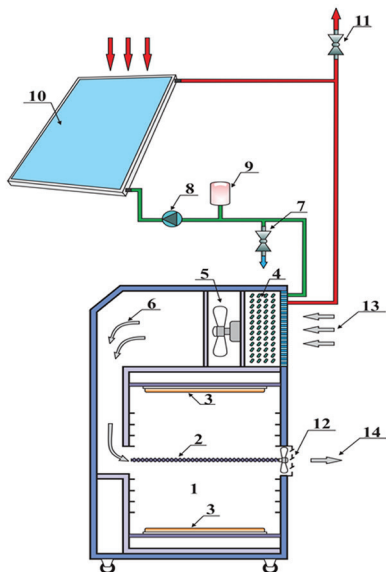
Máy sấy IR-ISD có thông số như sau: công suất mỗi mẻ 3kg, tổng công suất đèn hồng ngoại là 2 kW, công suất quạt gió cấp 0,1 kW. Thông số vận hành: công suất hồng ngoại từ 200÷2000 W, nhiệt độ sấy từ 25÷70°C, tốc độ gió trong tủ sấy từ 0.5÷5 m/s, độ ẩm tương đối của tác nhân sấy (TNS) từ 20÷25%, khoảng cách từ đèn hồng ngoại đến vật liệu sấy (VLS) 0.1÷0.5 m. Ngoài ra, máy sấy còn

có dàn trao đổi nhiệt calorifer dùng nước nóng từ tấm thu NLMT (công suất 2500W, diện tích bề mặt hấp thụ 2.5 m², hiệu suất hấp thụ > 95%) để gia nhiệt cho TNS trước khi

vào buồng sấy với lưu lượng bơm nước nóng 2 m³/h. Cấu tạo máy sấy IR-ISC được trình bày trên Hình 1.

Chú thích:

1. Buồng sấy
2. Khay sấy
3. Đèn hồng ngoại
4. Dàn calorifer
5. Quạt gió cấp
6. Ống gió cấp
7. Van xả cạn
8. Bơm nước nóng
9. Bình giãn nở
10. Tấm thu năng lượng mặt trời
11. Van xả khí
12. Quạt gió thải
13. Không khí vào
14. Không khí thải



(a)



(b)

(a) – Hình ảnh cấu tạo máy sấy IR-ISC, (b) – Hình ảnh máy sấy IR-ISC thực tế

Hình 1: Cấu tạo và nguyên lý làm việc của máy sấy IR-ISC

2.2. Thiết bị đo sử dụng trong nghiên cứu

Trong quá trình thí nghiệm, một số thiết bị đo được sử dụng để đảm bảo độ chính xác và kiểm soát các thông số kỹ thuật, cụ thể gồm:

Dùng nhiệt kế Ewelly EW-285 (độ chính xác $\pm 1^\circ\text{C}$, Trung Quốc) để đo nhiệt độ buồng sấy;

Dùng nhiệt kế tự ghi 4 kênh Tenmars-747D (độ chính xác $\pm 0.05\%$ giá trị đọc + 0.7°C , Đài Loan) để đo nhiệt độ tâm và bề mặt;

Dùng ẩm kế STC-3028 (độ chính xác $\pm 1^\circ\text{C}$, 0.1% RH, Trung Quốc) để đo độ ẩm tương đối tại buồng sấy;

Dùng cân điện tử AND603 (cấp chính xác 2, Đài Loan) để cân khối lượng cá đù;

Dùng đồng hồ vạn năng Keweisi KWS-AC300 (Trung Quốc) để đo tiêu thụ điện năng của mẻ sấy;

Dùng cân sấy ẩm Ohaus MB120 (độ chính

xác 0.05%, Trung Quốc) để đo hàm lượng ẩm ban đầu cá đù;

Dùng lưu tốc kế LM81AT (độ chính xác $\pm 3\%$, Đài Loan) để đo vận tốc tác TNS buồng sấy.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Phương pháp bố trí thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, với mục tiêu đánh giá ảnh hưởng của các thông số sấy đến thời gian sấy τ , tỉ lệ tái hấp thụ nước R, suất năng lượng tiêu hao SEC. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng phương án quy hoạch thực nghiệm ma trận trực giao của Taguchi [7] để bố trí thí nghiệm cho việc sấy cá đù fillet. Các tham số đầu vào và khoảng biến thiên ảnh hưởng chính đến quá trình sấy cá đù bằng bức xạ hồng ngoại kết hợp NLMT gián tiếp được kế thừa và chọn lựa từ kết quả nghiên cứu của những nhà khoa học nghiên cứu trước [1, 2, 4, 6] được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1: Khoảng biến thiên thực nghiệm của tham số đầu vào [1-3]

Biến thực	Nhiệt độ t [°C]	Vận tốc TNS ω [m/s]	Công suất hồng ngoại P [W]	Khoảng cách hồng ngoại H [m]
Biến mã hóa	X_1	X_2	X_3	X_4
Mức cao	60	3	2000	0.35
Mức cơ sở	55	2	1500	0.30
Mức thấp	50	1	1000	0.25
Khoảng biến thiên	5	1	500	0.05

3.2. Phương pháp phân tích dữ liệu thực nghiệm

Nhóm đã sử dụng phương pháp mặt đáp ứng Response Surface Methodology (RSM) để phân tích dữ liệu thực nghiệm. Với X là biến mã hóa của các tham số đầu vào $X_1 = t$, $X_2 = \omega$, $X_3 = P$, $X_4 = H$; Y là kết quả đầu ra được mã hóa $Y_1 = \tau$, $Y_2 = R$, $Y_3 = \text{SEC}$. Từ đó, xây dựng được phương trình hồi quy (PTHQ) bậc 2 thể hiện theo công thức (1) [7].

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Sau khi xây dựng được các PTHQ ta dùng phương pháp phân tích phương sai ANOVA để đánh giá mức độ tương thích và mức ý nghĩa của các cơ sở. Dùng đại lượng R_{sq} để đánh giá độ tương thích phương trình với dữ liệu thực nghiệm, dùng đại lượng P_{value} với mức ý nghĩa $\alpha = 0.05$ để đánh giá các hệ số b_{ij} trước biến [7].

Để đánh giá ảnh hưởng của các thông số đầu vào (t, ω , P, H) đến kết quả thực nghiệm là các hàm mục tiêu (τ , R, SEC) nhóm tác giả dùng cách vẽ đồ thị bề mặt đáp ứng Response Surface Plot.

Cuối cùng dùng công cụ Response Optimizer của RSM để xác định giá trị tối ưu và thực nghiệm kiểm chứng.

4. Phương pháp xác định các thông số

4.1. Phương pháp xác định hàm lượng ẩm

Độ ẩm tức thời cá đù được xác định theo công thức (2). Trong đó, G_0 , G_i - khối lượng cá đù ban đầu và tại thời điểm i; W_0 , W_i - độ ẩm tương đối cá đù tại thời điểm ban đầu và thời điểm i [9, 10].

$$W_i = 100 - \frac{G_0 \cdot (100 - W_0)}{G_i} \quad [\%] \quad (2)$$

4.2. Xác định tỉ lệ tái hấp thụ nước

Trong nghiên cứu này tỉ lệ tái hấp thụ nước R cho cá đù fillet được áp dụng phương pháp tương tự như Le et al. 2024 [15], Chakraborty et al. 2011 [12] khi sấy tôm. Cá đù sau sấy được ngâm trong nước cất ở nhiệt độ môi trường ($25 \div 27$)°C. Mẫu được mang ra cân sau 30 phút/lần, thí nghiệm được lặp lại cho đến khi khối lượng của 2 mẫu liên tục như nhau. Tỉ lệ tái hấp thụ nước R được tính theo công thức (3), với G_{PH} - khối lượng cá đù sau khi hấp thụ nước phục hồi [gam]; G_s - khối lượng cá đù sau sấy [gam].

$$R = \frac{G_{PH}}{G_s} \quad [g_{VLA} / g_{VLK}] \quad (3)$$

4.3. Xác định suất năng lượng tiêu hao cho mẻ cá đù fillet sấy bằng IR-ISD

Suất năng lượng tiêu hao cho mẻ sấy cá đù fillet bằng IR-ISD SEC theo Xiaoyong et al. 2015 [18] được tính theo công thức (4).

$$\text{SEC} = \frac{\sum E}{m_{H_2O}} \quad [kWh / kg_{H_2O}] \quad (4)$$

Trong đó: $\sum E$ là tổng tiêu hao điện năng của máy sấy IR-ISD trên mẻ [kWh]; m_{H_2O} là lượng ẩm thoát khỏi cá đù trong mẻ sấy [kg_{H_2O}].

4.4 Phương pháp xác định sai lệch giữa kết quả tối ưu và thực nghiệm

Công thức (5) được dùng để tính toán sai số giữa kết quả mô hình tối ưu với kết quả thực nghiệm E% [15].

$$E\% = \frac{100}{n} \sum \frac{|\hat{Y}_{i,MH} - Y_{i,TN}|}{\hat{Y}_{i,MH}} \quad (5)$$

Trong đó: $\hat{Y}_{i,MH}$ là giá trị tối ưu; $Y_{i,TN}$ là giá trị thực nghiệm; n là số lần thí nghiệm.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

1. Kết quả bố trí thí nghiệm và kết quả thực nghiệm

Thí nghiệm được tiến hành tại Nha Trang trong khoảng thời gian từ tháng 4 đến tháng 6. Nhiệt độ nước và không khí trước và sau dàn trao đổi nhiệt (calorifer) đo định kỳ 30 phút một lần theo thời gian sấy. Kết quả cho thấy: nhiệt độ trung bình của nước vào là 40.5°C, nước ra là 35°C; nhiệt độ không khí vào là 31.1°C và không khí ra là 35.1°C. Điều này chứng tỏ rằng việc sử dụng nước được gia nhiệt bằng năng

lượng mặt trời giúp nâng nhiệt độ không khí cấp vào buồng sấy thêm 4°C, từ đó góp phần giảm tiêu hao năng lượng trong quá trình sấy.

Nguyên liệu cá đù fillet được phân tích thành phần để xác định độ ẩm ban đầu, ghi nhận ở mức 76.16%. Độ ẩm sau sấy được xác định bằng phương pháp cân cho đến khi đạt mức $40 \pm 1\%$. Mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần và lấy giá trị trung bình nhằm đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Kết quả chi tiết cùng ma trận bố trí thí nghiệm theo phương pháp Taguchi được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2: Bố trí và kết quả thực nghiệm

Biến mã hóa				Biến thực				Kết quả		
X_1	X_2	X_3	X_4	t [°C]	ω [m/s]	H [m]	P [W]	τ [h]	SEC [kWh/kg _{H2O}]	R [g _{VLA} /g _{VLK}]
1	1	1	1	50	1	0.25	1000	8.0	10.0000	1.32000
1	1	1	1	50	1	0.25	1000	8.2	9.9333	1.27000
1	1	1	1	50	1	0.25	1000	8.0	9.8267	1.32000
1	2	2	2	50	2	0.30	1500	7.5	9.2267	1.43000
1	2	2	2	50	2	0.30	1500	7.4	9.4667	1.41000
1	2	2	2	50	2	0.30	1500	7.6	9.8000	1.45000
1	3	3	3	50	3	0.35	2000	8.0	10.9467	1.46000
1	3	3	3	50	3	0.35	2000	8.1	11.1200	1.50000
1	3	3	3	50	3	0.35	2000	8.2	11.0000	1.55000
2	1	2	3	55	1	0.30	2000	7.6	11.5733	1.39073
2	1	2	3	55	1	0.30	2000	7.5	10.5333	1.35305
2	1	2	3	55	1	0.30	2000	7.7	10.6533	1.38724
2	2	3	1	55	2	0.35	1000	8.2	11.5867	1.19812
2	2	3	1	55	2	0.35	1000	8.5	11.8133	1.14273
2	2	3	1	55	2	0.35	1000	8.3	11.9333	1.09059
2	3	1	2	55	3	0.25	1500	7.0	11.0533	1.53000
2	3	1	2	55	3	0.25	1500	7.5	11.3733	1.49000
2	3	1	2	55	3	0.25	1500	7.6	11.5333	1.71000
3	1	3	2	60	1	0.35	1500	7.2	9.8133	1.14273
3	1	3	2	60	1	0.35	1500	7.1	9.8000	1.17000
3	1	3	2	60	1	0.35	1500	7.3	10.0667	1.19812
3	2	1	3	60	2	0.25	2000	6.8	9.6333	1.60000
3	2	1	3	60	2	0.25	2000	6.9	9.6667	1.58000

Biến mã hóa				Biến thực				Kết quả		
3	2	1	3	60	2	0.25	2000	6.9	9.6400	1.57000
3	3	2	1	60	3	0.30	1000	7.5	10.1867	1.56512
3	3	2	1	60	3	0.30	1000	7.5	10.2533	1.59000
3	3	2	1	60	3	0.30	1000	7.6	10.3333	1.53667

2. Kết quả xây dựng các phương trình hồi quy (PTHQ)

Từ kết quả thực nghiệm trình bày ở Bảng 2, bằng phương pháp nghiên cứu mặt đáp ứng (RSM) ta xây dựng được các PTHQ dự đoán thời gian sấy (6), tỉ lệ tái hấp thụ nước (7) và suất năng lượng tiêu hao (8). Theo Nguyễn Hữu Lộc 2021 [7] dựa vào đại lượng R_{sq} để đánh giá sự tương thích của PTHQ với dữ liệu thí nghiệm; còn để đánh giá ý nghĩa về mặt

thống kê của các cơ số trước biến ta dùng đại lượng P_{value} với mức ý nghĩa $\alpha = 0.05$. Ngoài ra, mối quan hệ giữa các biến với kết quả đầu ra thông qua PTHQ còn thể hiện như sau: dấu trừ, dấu cộng của hệ số trước biến thể hiện mối quan hệ tỉ lệ nghịch, tỉ lệ thuận với hàm mục tiêu; cơ số trước biến càng lớn thể hiện mức độ tác động đến mục tiêu càng cao và ngược lại. Bảng 3 và Hình 2 trình bày tóm tắt kết quả phân tích ANOVA và những phân tích trên.

Bảng 3. Kết quả phân tích ANOVA hàm mục tiêu sấy cá dừ fillet bằng IR-ISD

Nguồn	Thời gian sấy τ [h]		Suất năng lượng tiêu hao SEC [kWh/kg _{H2O}]		Tỉ lệ tái hấp thụ nước R [g _{VLA} /g _{VLK}]	
	F-Value	P-Value	F- Value	P-Value	F- Value	P-Value
Hồi quy	31.99	0.000	32.70	0.000	35.41	0.000
Bậc nhất	47.82	0.000	15.17	0.000	64.21	0.000
t	102.96	0.000	3.43	0.081	1.34	0.263
ω	0.43	0.521	28.97	0.000	128.50	0.000
H	42.86	0.000	27.14	0.000	85.19	0.000
P	45.03	0.000	1.12	0.304	41.83	0.000
Bậc hai	16.15	0.000	50.23	0.000	6.62	0.002
t^2	14.29	0.001	168.54	0.000	8.78	0.008
ω^2	1.75	0.202	6.14	0.023	2.21	0.154
H^2	3.57	0.075	13.77	0.002	14.47	0.001
P^2	45.01	0.000	12.48	0.002	0.99	0.332
$R^2(eq)$ (%)	93.43		93.56		94.03	
$R^2(Adj)$ (%)	90.51		90.70		91.37	
$R^2(Pred)$ (%)	85.21		85.52		86.56	

2.1. Kết quả xây dựng PTHQ dự đoán thời gian sấy

$$\tau[h] = -8.56 + 0.909t - 0.289\omega - 22.2H - 0.005189P - 0.00889t^2 + 0.0778\omega^2 + 44.4H^2 + 0.000002P^2 \quad (6)$$

Kết quả phân tích ANOVA (Bảng 3) cho thấy PTHQ dự đoán thời gian sấy τ (6) có $R_{sq} \geq 93.43\%$ thể hiện sự tương thích cao giữa mô hình hồi quy với thực nghiệm. Các cơ số trước

biến t , H , P , t^2 , P^2 đều có ý nghĩa về mặt thống kê vì $P_{value} < 0.05$ (F_{value} lớn), điều này cho thấy các thông số sấy đều ảnh hưởng đáng kể đến thời gian sấy cá dừ bằng IR-ISD. Riêng với

vận tốc TNS có $P_{\text{value}}^{\omega} = 0.521$, $P_{\text{value}}^{\omega^2} = 0.202$ (F_{value} nhỏ) nhưng cơ số nhỏ so với các cơ số khác nên không ảnh hưởng nhiều đến thời gian sấy, Hình 2b cũng cho thấy được vận tốc gió trong miền từ 1-3m/s ảnh hưởng không nhiều đến thời gian sấy. Hơn nữa, kết quả nghiên cứu trên Hình 2a, 2b còn cho ta thấy rằng khi tăng

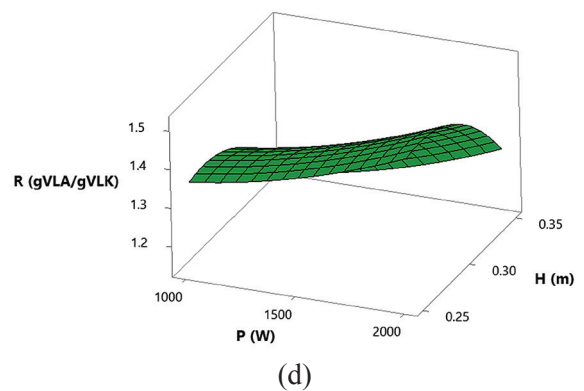
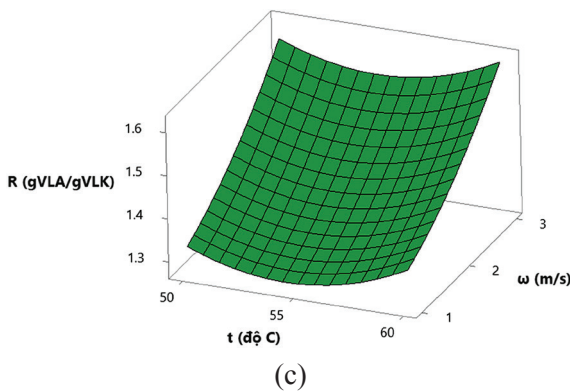
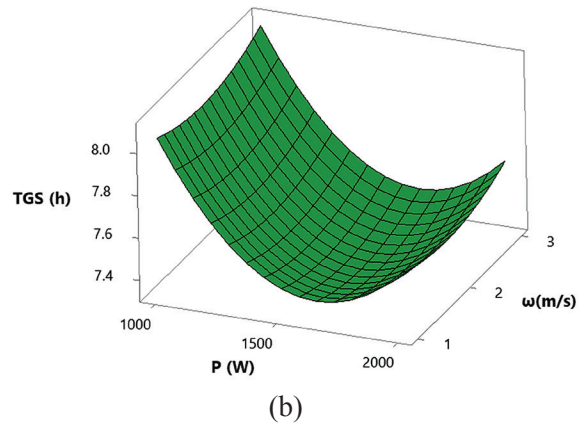
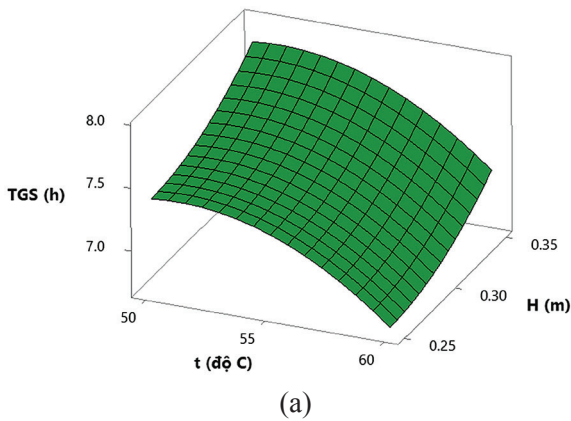
hiệt độ, giảm khoảng cách IR đều góp phần rút ngắn thời gian sấy. Điều này phù hợp với các nghiên cứu Huang, D et al [13], Şevik, S et al [17], Lê Như Chính. 2022 [3]. Còn công suất IR có mối quan hệ tuyến tính với thời gian sấy.

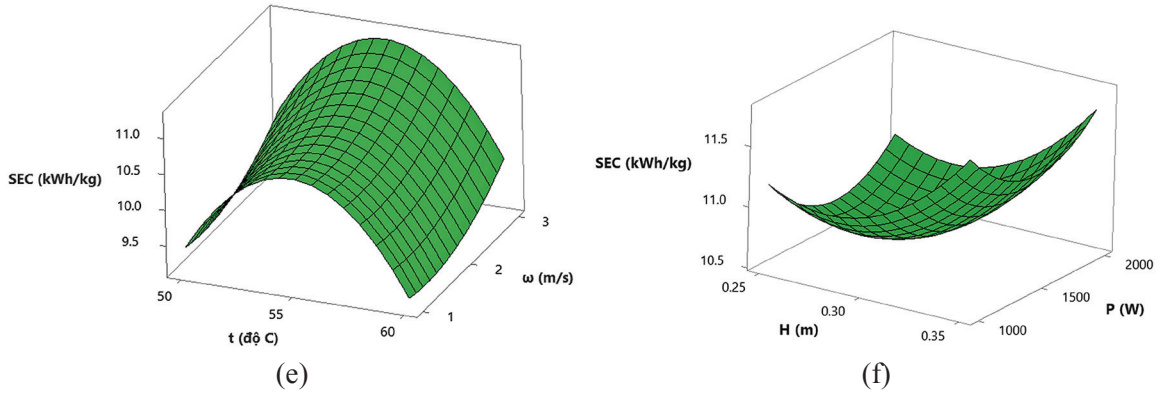
2.2. Kết quả xây dựng PTHQ dự đoán tỉ lệ tái hấp thụ nước

$$R[g_{\text{VLA}}/g_{\text{VLK}}] = 6.17 - 0.2607t + 0.012\omega + 16.29H - 9.08 \cdot 10^{-5}P + 0.00239t^2 + 0.030\omega^2 - 30.74H^2 + 8.056 \cdot 10^{-8}P^2 \quad (7)$$

Kết quả phân tích ANOVA (Bảng 3) và PTHQ dự đoán tỉ lệ tái hấp thụ nước R (7) có $R_{\text{sq}} \geq 94.04\%$ thể hiện sự tương thích cao giữa mô hình hồi quy với thực nghiệm. Trong đó, các cơ số trước biến ω , H, P, t^2 , H^2 đều có ý nghĩa về mặt thống kê và ảnh hưởng nhiều đến R ($P_{\text{value}} < 0.05$) và F_{value} lớn, riêng nhiệt độ sấy có $P_{\text{value}}^t = 0.263$, bậc hai của các biến $P_{\text{value}}^{\omega^2} = 0.154$, $P_{\text{value}}^{P^2} = 0.332$ có $P_{\text{value}} > 0.05$ (F_{value}

bé) nên không ảnh hưởng đến tỉ lệ tái hấp thụ nước của cá. Tương tự, kết quả trên Hình 2c, 2d cũng cho thấy rằng tăng giá trị các thông số như vận tốc gió, công suất IR sẽ tăng R; còn khoảng cách IR và nhiệt độ sấy làm thay đổi R tuyến tính. Do các thông số t, P, ω , H đã được khảo sát trước cho phù hợp cá đủ nên tăng P, ω trong phạm vi miền nghiên cứu R tăng nhưng ngoài miền nghiên cứu R sẽ giảm.





Hình 2: Ảnh hưởng các thông số sấy đầu vào đến hàm mục tiêu (τ , R , SEC)

(a) (b) - Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến TGS; (c) (d) - Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến R ; (e) (f) - Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến SEC

2.3. Kết quả xây dựng PTHQ dự đoán suất năng lượng tiêu hao cho mẻ cá đù fillet sấy bằng IR-ISD

$$SEC[kWh/kg_{H_2O}] = -130.1 + 5.697t - 0.681\omega - 83.1H - 0.00437P - 0.05199t^2 + 0.248\omega^2 + 148.6H^2 + 0.000001P^2 \quad (8)$$

Kết quả phân tích ANOVA (Bảng 3) cho thấy PTHQ dự đoán suất năng lượng tiêu hao SEC (8) có $R_{sq} \geq 93.56\%$ thể hiện sự tương thích cao giữa mô hình hồi quy với thực nghiệm. Các cơ sở trước biến t , ω , H , t^2 , ω^2 , H^2 , P^2 đều có ý nghĩa về mặt thống kê và ảnh hưởng đến suất tiêu hao năng lượng SEC ($P_{value} < 0.05$), riêng $P_{value}^P = 0.304$ ($P_{value} > 0.05$) nên có ý nghĩa thống kê thấp. Thông qua Hình 2e, 2f được xây dựng từ phương trình số (8) ta có thể thấy rằng SEC có mối quan hệ phi tuyến với nhiệt độ sấy, vận tốc gió, khoảng cách và công suất IR.

3. Kết quả chế độ tối ưu cá đù fillet sấy bằng hệ thống IR-ISD

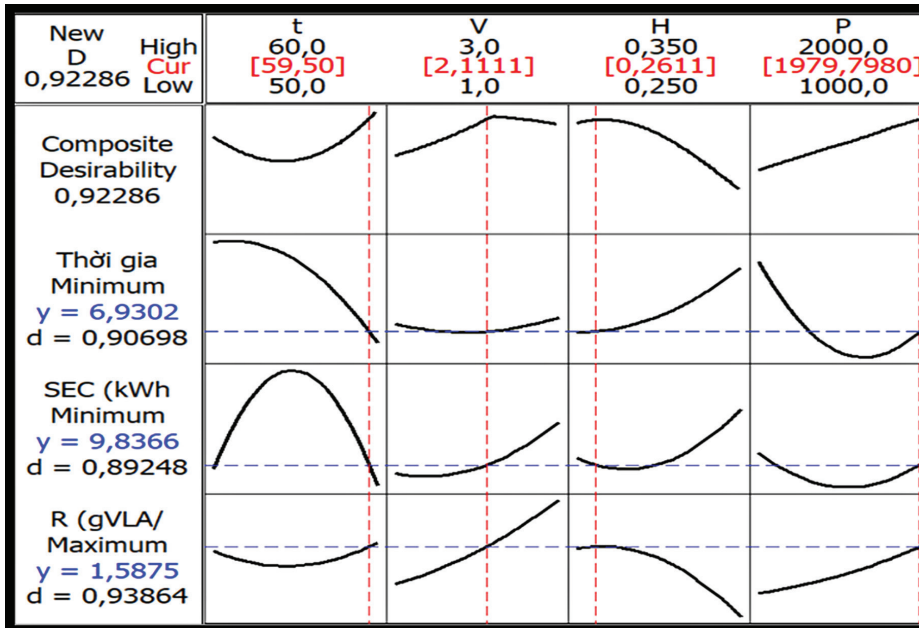
Sau khi xác định được PTHQ (6 - 8) ta dùng phương pháp Response Optimization của RSM để xác định chế độ sấy tối ưu cá đù fillet trên hệ thống sấy IR-ISD với mục tiêu như sau: thời gian sấy cá, suất năng lượng tiêu hao quá trình sấy là bé nhất, tỉ lệ tái hấp thụ nước là lớn nhất; ưu tiên cho mục tiêu chất lượng là khả năng tái hút nước phục hồi của cá, nên chọn hệ số quan trọng là 3, các mục tiêu còn lại là 1, cụ thể được trình bày ở Bảng 4.

Bảng 4: Mục tiêu tối ưu và miền ràng buộc

STT	Thông số	Ký hiệu	Mục tiêu	Giới hạn trên	Giới hạn dưới	Trọng số
1	Nhiệt độ	t [°C]	Trong khoảng	60	50	
2	Vận tốc gió	ω [m/s]	Trong khoảng	3	1	
3	Khoảng cách hồng ngoại	H [m]	Trong khoảng	0.35	0.25	
4	Công suất hồng ngoại	P [W]	Trong khoảng	2000	1000	
5	Thời gian sấy	τ [h]	Nhỏ nhất	8.5	6.8	1
6	Suất năng lượng tiêu hao	SEC [kWh/kg _{H₂O}]	Nhỏ nhất	11.93	9.22	1
7	Tỉ lệ tái hấp thụ nước	R [g _{VLA} /g _{VLK}]	Lớn nhất	1.6	1.10	3

Kết quả tối ưu nhiều mục tiêu trên Hình 3 cho thấy giá trị kỳ vọng tổng là 0.923. Giá trị này gần 100%, điều này cho thấy kết quả tối ưu cho các mục tiêu như τ , R và SEC là phù hợp [7]. Như vậy, thông số sấy tối ưu cho cá đù sấy bằng IR-ISD như sau: nhiệt độ sấy $t =$

59.5°C; công suất hồng ngoại $P = 1980$ W; vận tốc tác nhân sấy $\omega = 2.11$ m/s; khoảng cách hồng ngoại $H = 0.26$ m. Kết quả thời gian sấy ngắn nhất là 6.93 giờ, tỷ lệ R cao nhất đạt 1.6 g_{VLA}/g_{VLK} và suất năng lượng tiêu hao SEC thấp nhất là 9.84 kWh/kg_{H₂O}.



Hình 3. Đồ thị tối ưu hóa bằng phương pháp RSM

4. Đánh giá kết quả mô hình hồi quy với thực nghiệm ở chế độ tối ưu

Kết quả nghiên cứu trên Bảng 5 ta thấy sự khác biệt giữa giá trị dự đoán từ các PTHQ so với giá trị thực nghiệm là rất nhỏ $6.1 \div 8.1\%$, điều này cho thấy sự phù hợp giữa PTHQ

với thực nghiệm. Kết luận trên tương tự với Nguyễn Đức Khuyến 2018 [6] khi sấy cá đù và Lê Như Chính 2020 [3] khi sấy tôm. Như vậy, ta có thể áp dụng các phương trình (6) (7) (8) trên để dự đoán các mục tiêu như τ , R, SEC vào nghiên cứu lý thuyết sấy cá đù bằng IR-ISD.

Bảng 5: Đánh giá kết quả mô hình hồi quy và thực nghiệm ở chế độ tối ưu

STT	Mục tiêu đầu ra	Kết quả dự đoán từ các PTHQ	Kết quả thực nghiệm	Sai lệch [%]
1	Thời gian sấy τ [h]	6.93	6.5	6.2
2	Suất năng lượng tiêu hao SEC [kWh/kg _{H₂O}]	9.84	10.44	6.1
3	Tỉ lệ tái hấp thụ nước R [g_{VLA}/g_{VLK}]	1.6	1.47	8.1

5. Đánh giá chất lượng cá đù fillet sấy ở chế độ tối ưu

5.1. Đánh giá màu sắc và tỉ lệ tái hấp thụ nước

Bảng 6: Đánh giá chất lượng cảm quan và tỉ lệ tái hấp thụ nước cá dù sấy

STT	Sản phẩm	Chất lượng cảm quan (điểm)	Tỉ lệ tái hấp thụ nước R [g_{VLA}/g_{VLK}]
1	Cá dù fillet sấy bằng IR-ISD	18.35	1.47

Kết quả nghiên cứu trên bảng 6 và Hình 4 cho thấy sản phẩm cá dù khô có màu sắc sáng, đồng đều, không bị cháy xém ít bị biến dạng so với sản phẩm tươi với điểm chất lượng cảm quan đạt 18,35 điểm. Cá sau khi sấy đến độ ẩm sau cùng 40% có tỉ lệ hút nước phục hồi cao đạt

$1.47 g_{VLA}/g_{VLK}$. Điều này cho thấy ở chế độ sấy tối ưu quá trình truyền nhiệt truyền chất diễn ra hiệu quả, bề mặt cá không hình thành lớp màng, cấu trúc bên trong khô xốp, thuận lợi cho quá trình thoát ẩm.



Hình 4: Cá dù fillet sau khi sấy ở chế độ sấy tối ưu

5.2. Đánh giá biến đổi thành phần hóa học cá dù trước và sau sấy

Bảng 7: Biến đổi thành phần hóa học cá dù trước và sau khi sấy

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Tên mẫu	
			Mẫu cá dù tươi	Mẫu cá dù khô
1	Độ ẩm	%	76.10	42.67
2	Tro	%	1.52	2.46
3	Lipid	%	3.17	2.48
4	Protein	%	19.13	51.36
5	Carbonhydrate	%	0.015	0.10

Kết quả phân tích trên Bảng 7 cho thấy hàm lượng ẩm và protein chiếm phần lớn hàm lượng của cá kể cả khô và tươi, các thành phần khác như tro, lipid, carbonhydrate chiếm hàm lượng nhỏ. Độ ẩm cá sau sấy 42.67% nên thời gian bảo quản không lâu nhưng bù lại chất lượng cá lại tăng cao, thời gian sấy ngắn, tiêu hao năng lượng ít.

Khi so sánh hàm lượng các thành phần hóa

học của cá trước và sau khi sấy ta thấy có thay đổi đáng kể. Cụ thể hàm lượng ẩm và lipid giảm mạnh còn tro, protein và carbonhydrate tăng mạnh. Protein sau sấy tăng 63% thể hiện quá trình sấy phù hợp nên giữ lại được giá trị dinh dưỡng của cá, còn lipid giảm 22% thể hiện quá trình sấy chất béo thoát theo ẩm ra khỏi cá. Hàm lượng carbonhydrate và tro tăng rất mạnh 85% và 62%, tuy nhiên các thành

phần này chiếm hàm lượng rất nhỏ nên không ảnh hưởng nhiều đến chất lượng cá sau sấy, chủ yếu tăng là do ẩm giảm nên tỉ trọng tăng lên.

5.3. Đánh giá chỉ tiêu vi sinh và an toàn

Bảng 8: Kết quả chỉ tiêu kiểm nghiệm vi sinh và an toàn thực phẩm cá đù fillet sấy

STT	Chỉ tiêu kiểm nghiệm	Phương pháp kiểm nghiệm	Kết quả	Đánh giá
1	Coliforms	ISO 4832:2006(*)	< 10 CFU/g	Bình thường
2	Escherichia coli	ISO 16649 – 2:2001(*)	< 10 CFU/g	Bình thường
3	Salmonella	TCVN 10780 – 1:2017(*)	Âm tính/25g	Bình thường
4	Tổng số vi sinh vật hiếu khí	TCVN 4884 – 1:2015(*)	3,6.103 CFU/g	Bình thường
5	Tổng số bào tử nấm men – mốc	ISO 21527 – 2:2008(*)	< 10 CFU/g	Bình thường

Kết quả kiểm nghiệm (Bảng 8) cho thấy các chỉ tiêu vi sinh nguy hại cho sức khỏe con người như Coliforms vi khuẩn gây tiêu chảy, nhiễm trùng; E. Coli là vi khuẩn gây ngộ độc thực phẩm; Salmonella đều ở mức an toàn. Các chỉ tiêu còn lại như tổng số vi sinh vật hiếu khí, nấm mốc gây hư hỏng sản phẩm đều nằm trong giới hạn an toàn theo TCVN và ISO [1]. Từ đó ta có thể thấy rằng cá đù fillet sấy đạt yêu cầu an toàn thực phẩm, không có vi sinh vật nguy hiểm, không có dấu hiệu ô nhiễm.

6. Đánh giá quá trình sấy

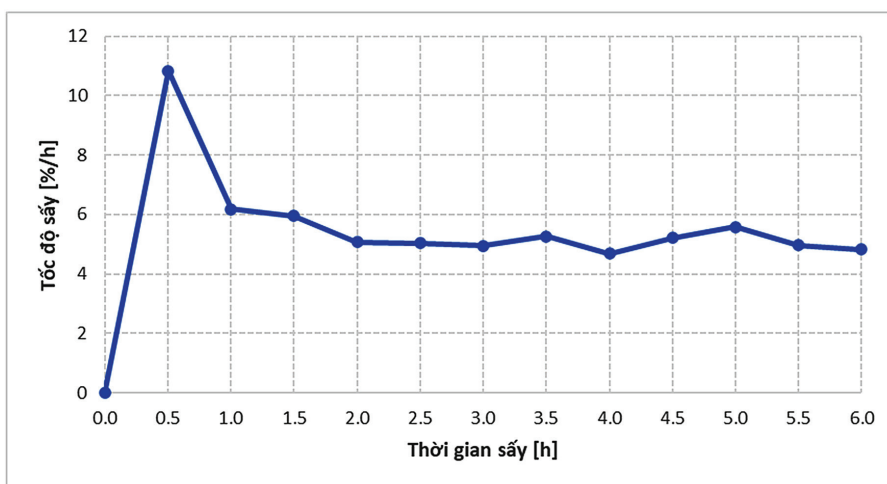
6.1. Đánh giá tốc độ sấy

Hình 5 thể hiện tốc độ sấy thực nghiệm cá

thực phẩm cá đù fillet sấy

Sau khi mang đi phân tích vi sinh và an toàn thực phẩm có kết quả phân tích như Bảng 8

đù ở chế độ tối ưu. Trong đó, tốc độ sấy tăng mạnh trong 0,5 h đầu tiên 10.83 %/h; từ khoảng thời gian (0.5 ÷ 2) h tốc độ sấy giảm dần sau đó ổn định dần với tốc độ 6 %/h. Điều này thể hiện quá trình sấy phù hợp và hiệu quả, giai đoạn đầu vật liệu còn ẩm nhiều bề mặt dễ bốc hơi nên tốc độ sấy nhanh, giai đoạn sau ẩm bề mặt ít nên ẩm trong vật liệu bắt đầu dịch chuyển dần từ tâm ra bề mặt nên tốc độ sấy giảm, cuối cùng tốc độ sấy chậm do vật liệu bề mặt cá bắt đầu co rút dẫn đến khó thoát ẩm, tuy nhiên sự co rút bề mặt vật liệu không đáng kể nên tốc độ sấy giảm rất nhẹ.

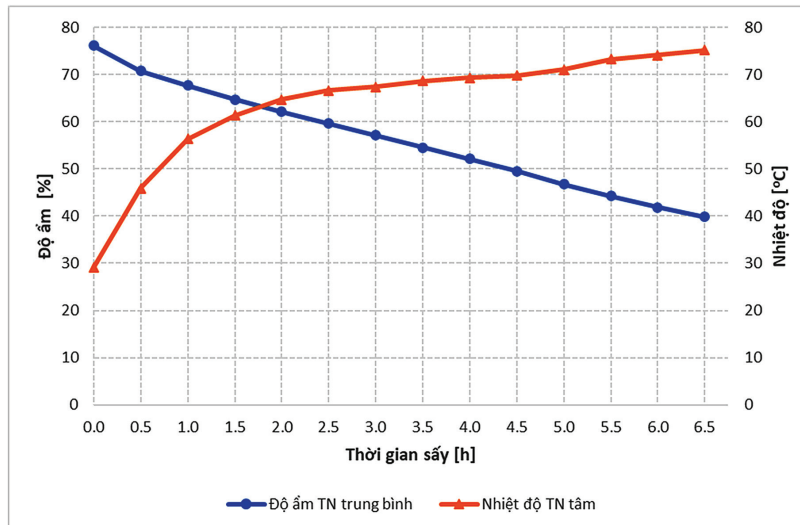


Hình 5: Tốc độ sấy cá đù fillet ở chế độ tối ưu

6.2. Xây dựng đường cong sấy và đường cong nhiệt độ sấy

Kết quả trên Hình 5, Hình 6 cho thấy hai giai đoạn đặc trưng của quá trình sấy cá bằng IR-ISD. Trong đó, giai đoạn đầu nâng nhiệt là từ $(0 \div 2)$ h, nhiệt độ tâm mẫu tăng nhanh từ 30°C lên 65°C , trong khi độ ẩm giảm mạnh từ 75% xuống khoảng 60%. Đây là giai đoạn bốc hơi nước tự do, với tốc độ truyền nhiệt và

bay hơi ẩm cao. Giai đoạn tiếp theo $(2 \div 6.5)$ h đặc trưng bởi tốc độ giảm dần giảm dần. Nhiệt độ tiệt cận ổn định $(68 \div 74)^{\circ}\text{C}$, trong khi độ ẩm giảm chậm do quá trình bay hơi nước mao quản và liên kết. Sự giảm tốc độ sấy ở giai đoạn này phản ánh hiệu quả truyền ẩm thấp hơn, đồng thời gợi ý cần tối ưu hóa năng lượng nhằm nâng cao hiệu suất và chất lượng sản phẩm.



Hình 6: Đường cong sấy và nhiệt độ sấy

IV. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Nghiên cứu đa mục tiêu sấy cá đù fillet bằng hệ thống IR-ISD theo phương pháp bố trí thí nghiệm Taguchi và phân tích dữ liệu RSM cho ra PTHQ $(6 \div 8)$ tương thích cao với thực nghiệm. Các phương trình này cho phép dự đoán chính xác thời gian sấy, suất năng lượng tiêu hao, tỉ lệ tái hấp thụ nước phục hồi của cá đù. Nó là cơ sở quan trọng khi tính toán thiết kế hệ thống sấy IR-ISD với quy mô công nghiệp. Thông số sấy tối ưu $t = 59.5^{\circ}\text{C}$, $\omega = 2.11 \text{ m/s}$, $H = 0.26 \text{ m}$, $P = 1979 \text{ W}$ với thời gian sấy $\tau = 6.938 \text{ h}$, suất tiêu hao năng lượng $\text{SEC} = 9.84 \text{ kWh/kg}$, tỷ lệ tái hấp thụ nước $R = 1.58 \text{ g}_{\text{VLA}}/\text{g}_{\text{VLK}}$. Bên cạnh hiệu quả về mặt năng lượng và thời gian, sấy bằng

hệ thống IR-ISD còn đảm bảo chất lượng vi sinh, an toàn thực phẩm, chất lượng cảm quan và tỉ lệ tái hấp thụ nước phục hồi tốt của sản phẩm. Ngoài ra, nó còn chứng tỏ rằng hệ thống trên có tốc độ sấy cao, phù hợp với đặc tính truyền nhiệt truyền chất cho cá đù, đáp ứng yêu cầu chế biến và bảo quản.

2. Kiến nghị

Như ta đã biết, thông số nhiệt vật lý cá đù phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó ảnh hưởng nhiều nhất là độ ẩm và nhiệt độ của cá. Kiến nghị nghiên cứu và xác định thông số nhiệt cá đù theo nhiệt độ và thành phần hóa học. Từ đó xác định trường nhiệt trường ẩm cá theo mô phỏng rồi so sánh với thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2015), *TCVN 10734:2015 – Yêu cầu kỹ thuật của thủy sản khô*, NXB Khoa học Kỹ thuật.
2. Lê Anh Đức, Nguyễn Văn Lành và Nguyễn Hay (2018), “Nghiên cứu sấy cá lù đù theo nguyên lý sấy bơm nhiệt kết hợp vi sóng”, *Tạp chí Năng lượng Nhiệt*.
3. Lê Như Chính (2020), *Nghiên cứu quá trình truyền nhiệt, truyền chất và xác định chế độ sấy tôm thẻ chân trắng Việt Nam bằng bơm nhiệt kết hợp với hồng ngoại*, Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
4. Lê Thị Hồng Ánh, Hoàng Thái Hà, Đặng Xuân Cường và Nguyễn Thị Thảo Minh (2021), “Nghiên cứu tối ưu hóa công nghệ sấy cá đù bằng phương pháp sấy phối hợp bơm nhiệt và bức xạ hồng ngoại”, *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn*.
5. Lê Thị Thu Thảo, Nguyễn Phi Uy Vũ, Trần Công Thịnh, Trần Thị Hồng Hoa, Võ Văn Quang và Nguyễn Thị Tường Vi (2022), “Thành phần loài họ cá Đù (Sciaenidae) (Bộ cá Vược Perciformes) ở vùng biển Việt Nam”, *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế Biển Đông*, Viện Hải dương học, Nha Trang, tr. 114–128.
6. Nguyễn Đức Khuyến, Nguyễn Huy Bích và Nguyễn Hữu Hòa (2018), “Nghiên cứu ứng dụng NLMT với gia nhiệt bằng điện trở để sấy cá lù đù”, *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*.
7. Nguyễn Hữu Lộc (2021), *Giáo trình quy hoạch và phân tích thực nghiệm*, NXB Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
8. Nguyễn Thị Vàng, Dương Trí Dũng và Trần Đắc Định (2020), “Thành phần loài và đặc điểm phân bố theo mùa của họ cá Đù (Sciaenidae) ở vùng cửa sông ven biển Tây tỉnh Cà Mau”, *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 56, tr. 139–148.
9. Trần Đại Tiến, Lê Như Chính và Nguyễn Văn Hoàng (2022), *Kỹ thuật sấy thủy sản*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
10. Trần Văn Phú (2009), *Tính toán và thiết kế hệ thống sấy*, NXB Giáo dục.

Tiếng Anh

11. Aktaş, M., Şevik, S., Amini, A. và Khanlari, A. (2016), “Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer”, *Solar Energy*, 137, pp. 500–515. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.036>
12. Chakraborty, R., P., M., M., B. và Suman, S. (2011), “Infrared-Assisted Freeze Drying of Tiger Prawn: Parameter Optimization and Quality Assessment”, *Drying Technology*, 29(5), pp. 508–519. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.513214>
13. Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L. và Sunden, B. (2021), “Application of infrared radiation in the drying of food products”, *Trends in Food Science and Technology*, 110, pp. 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>
14. Kim, B.-S., Oh, B.-J., Lee, J.-H., Yoon, Y. S. và Lee, H.-I. (2020), “Effects of Various Drying Methods on Physicochemical Characteristics and Textural Features of Yellow Croaker (*Larimichthys polyactis*)”, *Foods*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/foods9020196>
15. Lê Như Chính, Trần Thị Bảo Tiên và Lê Văn Hợp (2024), “Heat-pump-assisted microwaves drying of white-leg shrimp: Parameter optimization and quality assessment”, *Brazilian Journal of Food Technology*, 27, e2024039.
16. Salehi, F. (2020), “Recent Applications and Potential of Infrared Dryer Systems for Drying Various Agricultural Products: A Review”, *International Journal of Fruit Science*, 20(3), pp. 586–602. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1616243>
17. Şevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E. C., Arslan, E. và Tuncer, A. D. (2019), “Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology”, *Solar Energy*, 180, pp.

537–549. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.049>

18. Xiaoyong, S. và Luming, C. (2015), “Study of iron yam-chip (*Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun) dehydration using far-infrared radiation assisted heat pump drying”, *Journal of Food and Nutrition Research*, 3(1), pp. 20–25.

Các trang Web

19. https://vieglobal.com/an-introduction-to-vietnam-seafood-market/?utm_source=chatgpt.com. Truy cập ngày 29/7/2025.