NGHIÊN CỨU CHẾ ĐỘ SẤY TÔM THẺ XẺ BỤNG BẰNG THIẾT BỊ SẤY BỨC XẠ HỒNG NGOẠI KẾT HỢP NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

RESEARCH ON SUITABLE PARAMETERS FOR DRYING BELLY SPLIT SHRIMP BY INFRARED RADIATION COMBINED WITH INDIRECT SOLAR ENERGY

Trần Thị Bảo Tiên[1], Lê Như Chính[1]*, Nguyễn Văn Duy[2]

1. Bộ môn Kỹ thuật nhiệt lạnh, Khoa Cơ khí Trường Đại học Nha Trang

2. Khoa Điện tử, Trường Cao đẳng Việt Nam-Hàn Quốc Bình Dương

Tác giả liên hệ: Lê Như Chính; Email:

Ngày nhận bài: 10/09/2025; Ngày phản biện thông qua: 14/11/2025 ; Ngày duyệt đăng: 25/12/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm xác định chế độ sấy tối ưu nhằm nâng cao giá trị sản phẩm tôm thẻ chân trắng xẻ bụng sấy khô, sử dụng thiết bị sấy kết hợp giữa bức xạ hồng ngoại và năng lượng mặt trời gián tiếp (IR-SE). Quá trình thực nghiệm được thiết kế theo phương pháp Taguchi, với bốn thông số ảnh hưởng chính được khảo sát bao gồm: nhiệt độ buồng sấy (t), khoảng cách từ nguồn bức xạ đến sản phẩm sấy (H), vận tốc không khí sấy (V), và công suất đèn hồng ngoại (IP). Sau khi thu thập dữ liệu thực nghiệm, phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) được áp dụng để tối ưu hóa đồng thời các hàm mục tiêu, nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm sấy, rút ngắn thời gian chế biến, giảm chi phí năng lượng và đảm bảo các đặc tính cảm quan mong muốn của tôm sấy xẻ bụng. Kết quả thu được chế độ sấy tối ưu: nhiệt độ sấy đạt 60°C, công suất đèn hồng ngoại là 1800 W, vận tốc gió là 1,88 m/s và khoảng cách từ nguồn bức xạ đến bề mặt sản phẩm là 34,15 cm. Trong suốt quá trình sấy, độ ẩm của không khí dao động từ 20% đến 25%. Mẫu tôm có độ ẩm ban đầu khoảng 70% và sau khi sấy đạt độ ẩm còn lại khoảng 20 ± 1%, với tổng thời gian sấy tương ứng là 4,03 giờ.

Từ khóa: tôm thẻ xẻ bụng sấy khô, sấy tôm thẻ xẻ bụng bằng bức xạ hồng ngoại kết hợp năng lượng mặt trời gián tiếp, phương pháp bề mặt đáp ứng.

ABSTRACT

This study aimed to identify the optimal drying conditions for enhancing the quality and processing efficiency of belly-split whiteleg shrimp (Litopenaeus vannamei) using a hybrid drying system that integrates infrared radiation and indirect solar energy (IR-SE). The experimental design was based on the Taguchi method, investigating four key technological parameters: drying chamber temperature (T), distance from the infrared source to the product surface (H), drying air velocity (V), and infrared lamp power (IP). Following data collection, Response Surface Methodology (RSM) was employed to simultaneously optimize multiple performance objectives, including reducing drying time, minimizing energy consumption, and maintaining desirable sensory attributes of the final product. The optimal drying parameters were determined as follows: a drying temperature of 60 °C, infrared power of 1800 W, air velocity of 1.88 m/s, and a source-to-product distance of 34.15 cm. During the drying process, the relative humidity of the drying air ranged from 20% to 25%. The initial moisture content of the belly-split shrimp was approximately 70%, which was reduced to 20 ± 1% after drying, corresponding to a total drying duration of 4.03 hours.

Keywords: Belly-split shrimp; Infrared and solar drying; Hybrid drying system (IR-SE); Drying optimization; Response Surface Methodology (RSM); Energy-efficient drying

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việt Nam có nhiều lợi thế tự nhiên để phát triển nuôi trồng thủy sản, bao gồm đường bờ biển dài, hệ thống sông ngòi dày đặc và nhiều cửa sông lớn. Các điều kiện địa lý và thủy văn này tạo điều kiện thuận lợi cho việc nuôi trồng thủy sản đa dạng, từ môi trường nước

mặn, nước lợ đến nước ngọt. Bên cạnh đó, sự phân bố của hàng nghìn đảo ven bờ còn mở ra tiềm năng phát triển các mô hình nuôi trồng quanh năm [18].

Theo số liệu từ Cục Thủy sản (2024), diện tích nuôi tôm trên cả nước đạt khoảng 749.000 ha, với sản lượng ước tính khoảng 1,29 triệu tấn. Trong đó, tôm thẻ chân trắng (*Litopenaeus vannamei*) chiếm hơn 951.000 tấn, mang lại giá trị xuất khẩu gần 4 tỷ USD [19]. Tuy nhiên, chất lượng sản phẩm tôm khô xuất khẩu hiện vẫn còn nhiều hạn chế. Phần lớn hoạt động chế biến vẫn mang tính thủ công, quy mô nhỏ, tập trung chủ yếu tại các làng nghề truyền thống và chủ yếu sử dụng phương pháp phơi nắng. Cách làm này phụ thuộc nhiều vào điều kiện thời tiết, thời gian phơi kéo dài và khó kiểm soát chất lượng sản phẩm. Một số cơ sở còn sử dụng các thiết bị sấy tự chế như lò đốt than, củi hoặc điện trở, vốn thường tạo ra nhiệt độ cao gây biến tính protein, làm thay đổi màu sắc, hương vị và cấu trúc của sản phẩm tôm [1,20]. Ngoài ra, việc tuân thủ các tiêu chuẩn an toàn thực phẩm còn chưa được đảm bảo, khiến sản phẩm khó đáp ứng yêu cầu xuất khẩu [20].

Trước những hạn chế nêu trên, công nghệ sấy kết hợp bức xạ hồng ngoại và năng lượng mặt trời gián tiếp (IR-SE) đã được nghiên cứu như một giải pháp hiện đại nhằm cải thiện hiệu quả và chất lượng sản phẩm. Hệ thống IR-SE cho phép truyền nhiệt nhanh và đồng đều hơn, nhờ đó rút ngắn đáng kể thời gian sấy so với các phương pháp truyền thống [15–16]. Quá trình sấy diễn ra trong buồng kín, hạn chế bụi bẩn, côn trùng và các yếu tố môi trường bên ngoài, từ đó nâng cao mức độ an toàn vệ sinh thực phẩm [17]. Sự kết hợp hai nguồn năng lượng vừa tận dụng được nhiệt thu hồi gián tiếp từ năng lượng mặt trời để giảm nhu cầu dùng điện lưới, giúp tiết kiệm chi phí vận hành, đồng thời vẫn duy trì màu sắc, hương vị và cấu trúc cơ thịt tự nhiên của tôm sau sấy [15]. Tuy nhiên, để khai thác hiệu quả công nghệ này, việc xác định các thông số vận hành tối ưu như nhiệt độ sấy, công suất bức xạ, vận tốc gió và khoảng cách từ nguồn nhiệt đến sản phẩm là vô cùng cần thiết [16]. Việc xây dựng mô hình dự đoán và tối ưu hóa quy trình dựa trên các thông số này sẽ góp phần kiểm soát chất lượng sản phẩm đầu ra, nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng và thúc đẩy ứng dụng thực tiễn của hệ thống sấy IR-SE.

Hướng tiếp cận của nghiên cứu này là xác định tổ hợp thông số tối ưu như nhiệt độ (t), vận tốc gió (V), khoảng cách nguồn nhiệt (H), công suất đèn hồng ngoại (IP) cho quá trình sấy tôm bằng hệ thống IR-SE, nhằm rút ngắn thời gian sấy (τ), giảm tiêu thụ năng lượng (SEC) và tăng khả năng hút nước phục hồi của tôm khô (R) đảm bảo chất lượng của sản phẩm. Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung xác định các thông số tối ưu và khảo sát ảnh hưởng của chúng đến chất lượng sản phẩm tôm. Cụ thể, Lê Như Chính và cộng sự (2022) [2] đã nghiên cứu thực nghiệm xác định thông số sấy tối ưu cho tôm thẻ chân trắng bằng hệ thống bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại. Kết quả tối ưu đa mục tiêu bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) cho thấy thông số sấy tối ưu gồm: t = 59,5 °C, V = 1,98 m/s, H = 35,23 cm, IP = 1750 W, độ ẩm tương đối của tác nhân sấy φ = 15–17%, thời gian sấy τ = 165 phút. Nguyễn Văn Phúc và cộng sự (2018) [6] đã chế tạo thiết bị sấy thủy sản sử dụng thanh gốm hồng ngoại kết hợp với đối lưu cưỡng bức. Quá trình sấy tôm đất trong điều kiện nhiệt độ t = 45°C, vận tốc gió V = 2 m/s, khoảng cách nguồn H = 20 cm cho thấy sản phẩm đạt độ ẩm 18–20% sau 6 giờ sấy, với chất lượng dinh dưỡng và tiêu chuẩn

vi sinh vượt trội so với phương pháp phơi nắng. Prashob K và Sirisomboon P (2022) đã nghiên cứu quá trình sấy liên tục có hỗ trợ khí nóng kết hợp với bức xạ hồng ngoại. Nghiên cứu sử dụng phương pháp RSM để tối ưu hóa các yếu tố t, V, IP, H nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm, rút ngắn thời gian sấy và tối ưu hiệu quả năng lượng.

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

1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là các thông số sấy tối ưu cho quá trình sấy tôm thẻ chân trắng xẻ bụng bằng hệ thống sấy kết hợp bức xạ hồng ngoại và năng lượng mặt trời gián tiếp (IR-SE), nhằm giảm chi phí năng lượng và đảm bảo chất lượng sản phẩm tôm khô sau khi sấy.

Vật liệu nghiên cứu là tôm thẻ chân trắng (*Litopenaeus vannamei*) có kích thước đồng đều, dao động từ 30–35 con/kg.

2. Thiết bị nghiên cứu

2.1. Thiết bị sấy bằng bức xạ hồng ngoại kết hợp năng lượng mặt trời IR-SE

Các thí nghiệm sấy tôm thẻ chân trắng xẻ bụng được thực hiện trên hệ thống sấy kết hợp bức xạ hồng ngoại và năng lượng mặt trời gián tiếp (IR-SE), như minh họa trên Hình 1. Mỗi mẻ sấy xử lý khoảng 1 kg tôm xẻ bụng, được bố trí thành một lớp mỏng trên khay trong buồng sấy. Thông số kỹ thuật của thiết bị sấy IR-SE bao gồm các thiết bị chính sau: Cụm đèn hồng ngoại (3) với tổng công suất điều chỉnh linh hoạt từ 200 đến 2000 W (tối đa 2000 W), cung cấp năng lượng bức xạ trực tiếp đến bề mặt vật liệu; Quạt ly tâm (5) có công suất 0,1 kW, dùng để điều khiển lưu lượng không khí trong buồng sấy; Buồng sấy kín được thiết kế cho phép điều chỉnh các thông số vận hành bao gồm: nhiệt độ trong khoảng 20–70 °C, tốc độ dòng không khí từ 0,5 đến 5 m/s và khoảng cách từ nguồn bức xạ đến bề mặt sản phẩm trong khoảng 20–40 cm. Ngoài ra, hệ thống còn tích hợp bộ trao đổi nhiệt (calorifer) (4) sử dụng nước nóng được gia nhiệt từ tấm thu năng lượng mặt trời. Tấm thu có diện tích bề mặt hấp thụ 2,5 m², công suất nhiệt 2.500 W và hiệu suất hấp thụ trên 95%. Nước nóng được tuần hoàn trong hệ thống với lưu lượng 2 m³/h nhờ bơm tuần hoàn và đóng vai trò làm nóng không khí sấy trước khi được đưa vào buồng sấy.

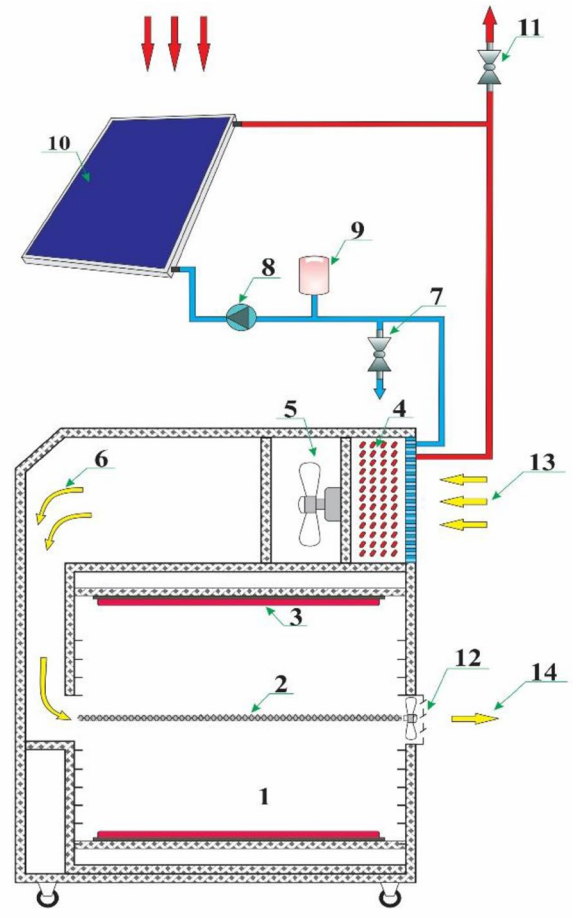
Nguyên lý hoạt động của hệ thống sấy IR-SE: Năng lượng mặt trời được tấm thu nhiệt (10) hấp thụ và truyền vào môi chất tải nhiệt là nước. Dòng nước nóng được bơm tuần hoàn (8) qua hệ thống trao đổi nhiệt calorifer (4) có tích hợp các thiết bị phụ trợ như bình giãn nở (9) để bù sự thay đổi thể tích, van nạp nước (7) và van xả khí (11) nhằm đảm bảo vận hành ổn định. Tại calorifer, nước nóng trao đổi nhiệt với không khí sấy, tạo thành dòng khí nóng được quạt cấp (5) thổi vào buồng sấy (1) thông qua hệ thống ống dẫn (6). Dòng khí này đi qua vật liệu sấy được đặt trên giá sấy (2), đồng thời bề mặt tôm nhận thêm năng lượng bức xạ từ cụm đèn hồng ngoại (3).

Quá trình gia nhiệt diễn ra theo cơ chế kết hợp gồm: (i) Bức xạ hồng ngoại làm nóng trực tiếp lớp biên bề mặt của sản phẩm, dẫn đến sự bốc hơi nhanh chóng của hơi ẩm gần bề mặt. (ii) Đối lưu cưỡng bức từ dòng khí nóng duy trì gradient nhiệt - ẩm cao, góp phần giảm áp suất hơi tại bề mặt, tăng hệ số truyền khối và thúc đẩy quá trình di chuyển ẩm từ bên trong ra bề mặt ngoài. Hơi ẩm phát sinh trong quá trình sấy được loại bỏ liên tục nhờ quạt hút (12), đưa ra môi trường qua lối thoát khí (14). Đồng thời, một phần không khí tươi (13) được bổ sung để duy trì cân bằng nhiệt–ẩm trong buồng sấy, góp phần nâng cao hiệu suất và chất lượng sấy.

2.2. Thiết bị đo lường dùng trong thực nghiệm

Trong đó:

1. Tủ sấy
2. Giá sấy
3. Đèn hồng ngoại
4. Dàn trao đổi nhiệt (calorifer)
5. Quạt cấp gió
6. Ống gió dẫn không khí vào
7. Van nạp chất tải nhiệt
8. Bơm nước nóng
9. Bình giãn nở
10. Tấm năng lượng mặt trời (collector)
11. Van xả khí
12. Quạt hút gió thải
13. Không khí vào
14. Không khí ra



Hình 1. Sơ đồ thiết bị sấy bằng IR-SE

Để đảm bảo độ chính xác và kiểm soát chặt chẽ các thông số kỹ thuật trong quá trình thực nghiệm, hệ thống thiết bị đo lường chuyên dụng được áp dụng bao gồm:

Thiết bị đo nhiệt độ không khí trong buồng sấy: Nhiệt kế điện tử Dixell XR-60C được sử dụng để giám sát và điều chỉnh nhiệt độ buồng sấy với dải đo từ -50 đến 100°C và sai số ±0,1°C, đảm bảo kiểm soát nhiệt độ ổn định trong suốt quá trình sấy.

Thiết bị đo độ ẩm không khí: Ẩm kế XT110C dùng để xác định độ ẩm tương đối trong không khí buồng sấy, với dải đo từ 0 đến 99% và sai số ±3%.

Thiết bị đo vận tốc gió: Sử dụng đồng hồ đo ANEMOMETER model LM-81AT với dải đo từ 0 đến 20 m/s và sai số ±3%.

Cân phân tích điện tử: Model XT2200C được dùng để ghi nhận sự thay đổi khối lượng mẫu tôm trong quá trình sấy, với dải đo từ 0 đến 2200 g và sai số ±0,01 g.

Hệ thống đo điện năng tiêu thụ: Thiết bị điện tử một pha Model EMIC CE-38, sản xuất tại Việt Nam, vận hành ở điện áp 220 V – 50 Hz với cấp chính xác 1, được sử dụng để đo lường mức tiêu thụ điện năng trong suốt quá trình sấy, nhằm đánh giá hiệu quả năng lượng của hệ thống.

Cân phân tích độ ẩm: Model MB120 của hãng OHAUS được dùng để xác định hàm lượng nước ban đầu trong mẫu tôm trước khi sấy, với dải đo từ 0,01% đến 100% và sai số ±0,01%/0,001 g.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Phương pháp chuẩn bị mẫu

Mẫu tôm được lựa chọn là tôm tươi sống, có màu sắc sáng tự nhiên, không bị tổn thương cơ học, được thu mua trực tiếp từ Chợ Vĩnh Hải, Phường Bắc, Nha Trang và vận chuyển ngay đến phòng thí nghiệm Nhiệt Lạnh, Trường Đại học Nha Trang để tiến hành xử lý và thực nghiệm. Trong suốt quá trình vận chuyển và lưu giữ, mẫu tôm được bảo quản lạnh trong thùng xốp cách nhiệt theo đúng quy trình kỹ thuật nhằm hạn chế biến đổi sinh hóa, duy trì chất lượng nguyên liệu trước khi sấy.

Trước khi tiến hành sấy, mẫu tôm thẻ chân trắng tươi được xử lý sơ bộ qua các bước rửa sạch bằng nước lạnh, sau đó luộc trong nước sôi với thời gian 5 phút [2], tôm được tách vỏ, bỏ đầu và xẻ dọc theo bụng (Hình 2). Mỗi mẻ sấy, mẫu tôm có khối lượng khoảng 1 kg. Tôm sau sơ chế được trải đều thành một lớp duy nhất trên khay sấy, tôm được sắp xếp dọc theo hướng gió, nhằm đảm bảo tất cả các mẫu tôm đều được tiếp xúc đồng đều với nguồn bức xạ hồng ngoại và luồng không khí nóng trong buồng sấy.

3.2. Phương pháp Taguchi trong thiết kế thí nghiệm

Phương pháp Taguchi được áp dụng để thiết kế thí nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số kỹ thuật đến quá trình sấy tôm thẻ chân trắng xẻ bụng. Ma trận trực giao được sử dụng để bố trí thí nghiệm một cách hệ thống, giảm số lượng thí nghiệm nhưng vẫn đảm bảo xem xét đồng thời nhiều yếu tố và mức khảo sát. Nghiên cứu sử dụng ma trận gồm 9 thí nghiệm, mỗi thí nghiệm lặp 3 lần (tổng 27 thí nghiệm). Các thông số đầu vào được chọn dựa trên các nghiên cứu có độ tin cậy cao [2- 4,8-9], với các mức khảo sát tương ứng điều kiện vận hành của hệ thống sấy kết hợp bức xạ hồng ngoại và năng lượng mặt trời gián tiếp (IR-SE) được trình bày ở Bảng 1. Thiết kế này là cơ sở để phân tích yếu tố ảnh hưởng chính và xác định các thông số tối ưu.

Bảng 1 liệt kê các thông số vận hành chính cùng với các giá trị điều chỉnh trong thiết kế thực nghiệm. Cụ thể, nhiệt độ buồng sấy được khảo sát trong khoảng từ 40°C đến 60°C, với bước điều chỉnh 10°C. Vận tốc dòng khí sấy dao động từ 1,5 đến 2,5 m/s, bước điều chỉnh 0,5 m/s. Khoảng cách từ nguồn bức xạ hồng ngoại đến bề mặt mẫu được khảo sát trong khoảng 30 đến 40 cm, với bước 5 cm. Công suất đèn hồng ngoại được điều chỉnh từ 1400 W đến 1800 W, với bước điều chỉnh 200 W. Những phạm vi và bước điều chỉnh này được lựa chọn nhằm đảm bảo sự đa dạng và độ chính xác trong quá trình thực nghiệm từ đó tối ưu hóa tìm ra tổ hợp thông số hiệu quả nhất cho quá trình sấy tôm thẻ xẻ bụng.

Bảng 1. Các thông số vận hành và các giá trị khảo sát trong thiết kế thực nghiệm

STT	Thông số vận hành	Giá trị dưới	Giá trị cơ sở	Giá trị trên	Khoảng điều chỉnh
1	Nhiệt độ buồng sấy, t (°C)	40	50	60	10
2	Vận tốc không khí sấy, V (m/s)	1,5	2	2,5	0,5
3	Khoảng cách hồng ngoại, H (cm)	30	35	40	5
4	Công suất bức xạ đèn hồng ngoại, IP (W)	1400	1600	1800	200

3.3. Phương pháp tối ưu bề mặt đáp ứng RSM

Phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology – RSM) là công cụ kết hợp giữa toán học và thống kê, dùng để phân tích và tối ưu các quá trình có nhiều biến đầu vào tác động đồng thời đến một hoặc nhiều biến đầu ra. Mục tiêu chính của RSM là xây dựng mô hình hồi quy và đánh giá sự tương tác giữa các yếu tố nhằm xác định điều kiện vận

hành tối ưu [2,4,8,12].

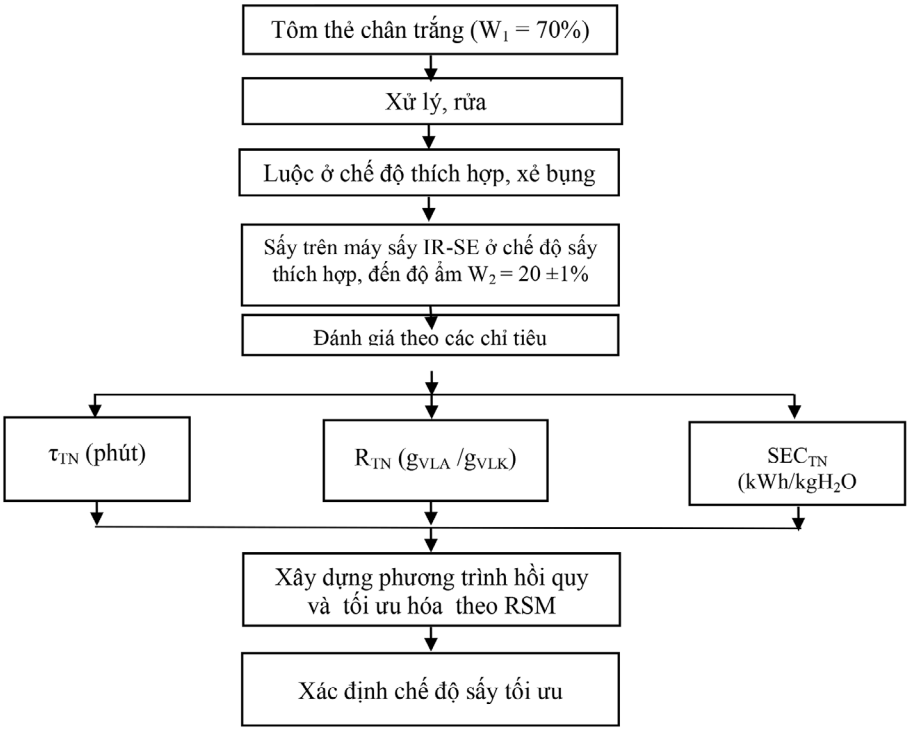
Trong nghiên cứu này, mô hình hồi quy được phát triển từ dữ liệu thực nghiệm để dự đoán ba biến mục tiêu gồm: tỷ lệ phục hồi ẩm (R_{TN}, gVLA/gVLK), thời gian sấy (τ_{TN}, giờ) và mức tiêu thụ năng lượng riêng (SEC_{TN}, kWh/kgH_2O). Mô hình được xây dựng nhằm mô tả ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến kết quả đầu ra của quá trình sấy, trên cơ sở cách tiếp cận từ các nghiên cứu trước [2,8,10-11,13].

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

Các biến đầu vào nghiên cứu bao gồm: nhiệt độ buồng sấy *t*(°C), khoảng cách từ nguồn bức xạ hồng ngoại đến mẫu tôm *H*(cm), vận tốc dòng không khí sấy *V*(m/s) và công suất bức xạ hồng ngoại IP(W), chi tiết các thông số được trình bày trong Bảng 1. Mô hình hồi quy bậc hai, một dạng phổ biến trong phương pháp mặt đáp ứng (RSM), được sử dụng để xây dựng phương trình hồi quy như sau [2-3,9,11-12]:

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

Trong đó, Ŷ là hàm mục tiêu; b_0 là hệ số hằng số trong mô hình; b_i và b_{ii} lần lượt là các hệ số biểu thị ảnh hưởng tuyến tính và phi tuyến của từng biến đầu vào; còn b_{ij} phản ánh sự tương tác giữa các cặp biến X_i và X_j, trong đó các biến này được mã hóa từ các thông số kỹ thuật ban đầu. Quá trình thiết kế thí nghiệm được thực hiện theo phương pháp Taguchi, với kết quả chi tiết được trình bày trong Bảng 2. Để kiểm chứng độ tin cậy của *các thông số tối ưu* trong quá trình sấy tôm, nhóm nghiên cứu đã tiến hành các thí nghiệm theo quy trình được minh họa tại Hình 2.



Hình 2. Quy trình thí nghiệm xác định chế độ sấy tối ưu cho tôm thẻ chân trắng xẻ bụng

3.3. Phương pháp tính các số liệu từ thí nghiệm

3.3.1. Độ ẩm của tôm thay đổi theo thời gian sấy

Để xác định hàm lượng ẩm của tôm tại từng giai đoạn trong quá trình sấy theo công thức sau [2-4]:

$$W_i = 100 - \frac{(100 - W_1)}{G_i}.G_1 \qquad (2.3)$$

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

Trong quá trình sấy, mẫu tôm được cân định kỳ mỗi 10 phút bằng cân điện tử có độ chính xác 0,01 g để thu thập dữ liệu khối lượng tại từng thời điểm. Khối lượng tôm tại thời điểm i, G_i, được sử dụng để xác định hàm lượng ẩm tương ứng tại thời điểm đó. Quá trình này tiếp tục cho đến khi hàm lượng ẩm trung bình cuối cùng của sản phẩm tôm khô đạt khoảng 20%. Mỗi thí nghiệm được tiến hành với ba lần lặp lại, và giá trị hàm lượng ẩm cuối cùng được tính bằng trung bình khối lượng của các mẫu thử theo từng khoảng thời gian sấy.

3.3.2. Xác định tỷ lệ phục hồi ẩm của tôm thẻ xẻ bụng sau khi sấy

Để đánh giá tỷ lệ phục hồi ẩm của tôm thẻ chân trắng xẻ bụng sau quá trình sấy khô, các mẫu thử được ngâm trong nước cất ở nhiệt độ ổn định, duy trì trong khoảng 25–30°C. Trong suốt quá trình ngâm, mẫu tôm khô được giữ ngập hoàn toàn trong nước nhằm đảm bảo bề mặt luôn tiếp xúc với nước. Tại các khoảng thời gian xác định, mẫu được lấy ra, lau nhẹ bề mặt bằng khăn giấy sạch để loại bỏ lượng nước dư bên ngoài, sau đó tiến hành cân lại khối lượng. Quá trình này được lặp lại liên tục cho đến khi sự thay đổi khối lượng giữa hai lần cân liên tiếp không còn đáng kể, cho thấy mẫu đã đạt trạng thái hấp thụ ẩm tối đa. Chỉ số tỷ lệ phục hồi ẩm được tính toán theo công thức đã được sử dụng trong các nghiên cứu trước đây [2, 10–11].

$$R_{TN} = \frac{m_w}{m_d} \qquad (2.4)$$

Trong đó: m_w là khối lượng của tôm thẻ chân trắng xẻ bụng sau khi ngâm nước, g_{VLA}; m_d là khối lượng của tôm thẻ chân trắng xẻ bụng trước khi ngâm nước, g_{VLK}.

3.3.3. Xác định mức tiêu thụ năng lượng riêng (SEC) khi sấy tôm thẻ chân trắng bằng IR-SE

Chỉ số tiêu thụ năng lượng riêng (*SEC – Specific Energy Consumption*) là một thông số kỹ thuật quan trọng dùng để đánh giá hiệu quả sử dụng năng lượng trong quá trình sấy. Chỉ số này biểu thị lượng điện năng tiêu hao để loại bỏ 1 kg nước ra khỏi vật liệu sấy. Việc xác định SEC cho phép đánh giá mức độ tối ưu trong vận hành hệ thống sấy và khả năng tiết kiệm năng lượng. Giá trị SEC được tính toán dựa trên tổng năng lượng điện tiêu thụ trong suốt chu trình sấy và khối lượng hơi ẩm thực tế đã được tách ra khỏi vật liệu, theo công thức sau [2,10-11]:

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

Trong đó: E_p: Tổng lượng điện năng tiêu thụ trong toàn bộ quá trình sấy của một mẻ (kWh); ΔG_w: Khối lượng hơi ẩm được loại bỏ khỏi mẫu tôm thẻ chân trắng trong suốt quá trình sấy (kg).

3.3.4. Đánh giá độ phù hợp giữa phương trình hồi quy dự đoán và kết quả thực nghiệm

Sai số trung bình theo phần trăm E [%] được xác định bằng công thức [2,10-11]:

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

Trong đó: $\hat{Y}_{i,MP}$ là kết quả dự đoán, $Y_{i,TN}$ là kết quả thực nghiệm, n là số lượng thí nghiệm.

3.3.5. Đánh giá chất lượng cảm quan mẫu tôm sấy thông qua thang điểm định sẵn

Chất lượng cảm quan của sản phẩm tôm thẻ chân trắng sau sấy được đánh giá theo phương pháp cho điểm cảm quan, dựa trên tiêu chuẩn quốc gia TCVN 3215–79. Các mẫu được lựa chọn để đánh giá là những sản phẩm có độ ẩm cuối trong khoảng 20 ± 1%, nhằm đảm bảo độ ổn định về đặc tính cảm quan. Quá trình đánh giá tập trung vào bốn tiêu chí chính: màu sắc, mùi, vị và cấu trúc cơ thịt. Mỗi tiêu chí được gán một hệ số trọng số khác nhau, phản ánh mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố đến chất lượng cảm quan tổng thể. Cụ thể: màu sắc (1,2), mùi (0,8), vị (1,0) và độ săn chắc của thịt (1,0) [2, 6].

III. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

Trong nghiên cứu này, độ ẩm ban đầu của tôm thẻ xẻ bụng được xác định là W_1 = 70%. Hàm lượng ẩm của mẫu tôm trong quá trình sấy được xác định bằng phương pháp cân khối lượng, áp dụng công thức (2.3), cho đến khi độ ẩm cuối cùng của tôm đạt khoảng 20 ± 1%. Kết quả ở Bảng 2 cho thấy nhiệt độ là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến quá trình sấy. Cụ thể, tại 40°C, thời gian sấy kéo dài 7,5–8,0 giờ, SEC_{TN} nằm trong khoảng 16,66 –24,74 kWh/kg H_2O và R_{TN} trung bình khoảng 1,35. Khi tăng lên 60°C, thời gian sấy giảm còn 3,5–5,2 giờ, SEC_{TN} giảm xuống mức thấp nhất 13,61–14,98 kWh/kg H_2O, trong khi R_{TN} tăng lên 1,87–2,29. Các số liệu này cho thấy việc tăng nhiệt độ vừa rút ngắn thời gian sấy, vừa giảm tiêu thụ năng lượng riêng và nâng cao khả năng hút ẩm phục hồi của tôm khô. Nhìn chung, các thông số đầu vào như nhiệt độ 50–60°C kết hợp với V = 1,5–2,0 m/s, H = 30–35 cm và IP ≥ 1600 W cho hiệu quả tổng thể tối ưu.

Bảng 2. Dữ liệu nghiên cứu thí nghiệm

TN	Biến thực đầu vào				Kết quả		
	t [°C]	V [m/s]	H [cm]	IP [W]	τ_{TN} [giờ]	SEC_{TN} [kWh/kg H_2O]	R_{TN} [g VLA/g VLK]
1	40	1,5	30	1400	8,0	19,89	1,257
2	40	1,5	30	1400	8,0	20,05	1,287
3	40	1,5	30	1400	8,0	19,63	1,188
4	40	2	35	1600	7,7	16,66	1,491
5	40	2	35	1600	8,0	17,04	1,579
6	40	2	35	1600	8,0	16,84	1,489
7	40	2,5	40	1800	7,5	24,74	1,287
8	40	2,5	40	1800	8,0	24,60	1,287
9	40	2,5	40	1800	8,0	23,71	1,287
10	50	2	40	1400	5,5	16,76	1,759
11	50	2	40	1400	5,5	16,57	1,786
12	50	2	40	1400	5,5	16,68	1,792
13	50	2,5	30	1600	5,5	16,01	1,577
14	50	2,5	30	1600	5,7	16,14	1,655
15	50	2,5	30	1600	5,5	16,08	1,829

TN	Biến thực đầu vào				Kết quả		
	t [°C]	V [m/s]	H [cm]	IP [W]	τ_{TN} [giờ]	SEC_{TN} [kWh/kg H_2O]	R_{TN} [g VLA/g VLK]
16	50	1,5	35	1800	5,7	15,53	1,877
17	50	1,5	35	1800	5,7	15,68	1,839
18	50	1,5	35	1800	5,5	15,58	1,894
19	60	2,5	35	1400	5,0	14,15	1,874
20	60	2,5	35	1400	5,0	14,25	1,967
21	60	2,5	35	1400	5,2	14,18	1,967
22	60	1,5	40	1600	4,5	13,61	2,092
23	60	1,5	40	1600	4,5	13,64	2,286
24	60	1,5	40	1600	4,7	13,79	2,265
25	60	2	30	1800	3,5	14,81	2,175
26	60	2	30	1800	3,7	14,98	2,273
27	60	2	30	1800	3,5	14,97	2,125

1. Thiết lập các phương trình hồi quy dự đoán từ kết quả thực nghiệm

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm thu được từ các tổ hợp thông số sấy trong Bảng 2, các phương trình hồi quy (PTHQ) tuyến tính đã được xây dựng nhằm mô tả mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và các biến đầu ra trong quá trình sấy tôm thẻ xẻ bụng bằng thiết bị sấy IR-SE. Các phương trình này cho phép dự đoán chính xác các chỉ tiêu đầu ra của quá trình, đồng thời góp phần làm rõ mức độ ảnh hưởng và xu hướng biến thiên của từng thông số vận hành đối với các hàm mục tiêu.

1.1. Thiết lập phương trình hồi quy dự đoán thời gian sấy τ_{TN}, giờ

Kết quả phân tích cho thấy PTHQ được xây dựng để dự đoán thời gian sấy tôm có mức độ phù hợp rất cao, thể hiện qua các chỉ số thống kê: hệ số R^2(eq) là 99,41%, hệ số R^2(Adj) đạt 98,15% và hệ số R^2(Pred) ở mức 98,68%. Sự chênh lệch nhỏ giữa R^2(Adj) và R^2(Pred) (khoảng 0,8%) cho thấy mô hình có tính ổn định và độ tin cậy cao trong việc dự báo.

Bảng 3. Bảng kết quả phân tích ANOVA thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến từng hàm mục tiêu

Nguồn	τ_{TN} (giờ)		SEC_{TN} (kWh/kgH_2O)		R_{TN} (g VLA/gVLK)	
	Giá trị F	*Giá trị P*	*Giá trị F*	*Giá trị P*	*Giá trị F*	*Giá trị P*
Hồi quy	382,03	0,000	689,13	0,000	184,44	0,000
Bậc nhất	712,26	0,000	1028,87	0,000	350,77	0,000
t(^{0}C)	2773,78	0,000	3470,05	0,000	1287,10	0,000
V(m/s)	1,78	0,199	313,04	0,000	64,03	0,000
H(cm)	14,69	0,001	153,86	0,000	15,90	0,001
IP(W)	58,78	0,000	178,53	0,000	36,06	0,000
Bậc hai	51,81	0,000	349,40	0,000	18,10	0,000
t^2	104,04	0,000	177,92	0,000	1,02	0,326

Nguồn	τ_{TN} (giờ)		SEC_{TN} (kWh/kgH_2O)		R_{TN} (g VLA/gVLK)	
	Giá trị F	*Giá trị P*	*Giá trị F*	*Giá trị P*	*Giá trị F*	*Giá trị P*
V^2	62,26	0,000	164,95	0,000	47,63	0,000
H^2	0,7824	0,000	523,12	0,000	6,33	0,022
IP^2	0,0363	0,195	531,60	0,000	17,42	0,001
R^2(eq) (%)	*99,41*		*99,67*		*98,79*	
R^2 (Adj) (%)	*98,15*		*99,53*		*98,26*	
R^2(Pred) (%)	*98,68*		*99,27*		*92,29*	
S	*0,14*		*0,21*		*0,046*	

Phân tích phương sai (ANOVA) trong Bảng 3 xác nhận rằng PTHQ bậc hai thiết lập từ thực nghiệm có ý nghĩa thống kê cao, với các biến đầu vào gồm nhiệt độ sấy (t), khoảng cách đèn (H), công suất hồng ngoại (IP), cùng các thành phần bậc hai tương ứng (t^2, V^2, H^2) đều có giá trị $p < 0,05$. Điều này khẳng định các yếu tố trên có ảnh hưởng đáng kể đến thời gian sấy. Cụ thể, khi nhiệt độ và công suất đèn hồng ngoại tăng, thời gian sấy giảm, trong khi tăng cao vận tốc gió lại làm thời gian sấy kéo dài. Nguyên nhân là khi tốc độ gió tăng sẽ làm tăng cường trao đổi nhiệt đối lưu, tăng hệ số bay hơi và thúc đẩy khuếch tán ẩm ra bên ngoài. Quá trình khuếch tán ngoại mạnh ở giai đoạn đầu có thể khiến bề mặt tôm nhanh chóng hình thành lớp màng, từ đó cản trở sự thoát ẩm ở các giai đoạn sau và làm kéo dài thời gian sấy. Những quan sát này được minh chứng rõ qua các đồ thị tương tác tại Hình 3a và 3b. Ngược lại, các yếu tố như vận tốc không khí sấy (V) và bình phương công suất hồng ngoại (IP^2) có giá trị *p* lần lượt là 0,199 và 0,195 (đều lớn hơn 0,05), cho thấy ảnh hưởng của chúng đến mô hình là không đáng kể. Đồng thời, độ lệch chuẩn thấp (0,14) cùng hệ số R^2 gần bằng 1 khẳng định phương trình hồi quy được xây dựng phản ánh chính xác mối quan hệ giữa các biến trong quá trình sấy. Kết quả này, có thể kết luận rằng mô hình hồi quy bậc hai (3.1) là công cụ định lượng đáng tin cậy và hiệu quả để tối ưu hóa thời gian sấy khi ứng dụng công nghệ sấy (IR-SE) cho tôm thẻ chân trắng xẻ bụng.

$$\tau_{TN} = 14,64 - 0,7644.t - 7,2.V + 1,03.H + 0,00494.IP + 0,005889.t^2 + 1,822.V^2 - 0,01444.H^2 - 2.10^{-6}.IP^2 \quad (3.1)$$

1.2. Thiết lập PTHQ dự đoán mức tiêu thụ năng lượng riêng SEC_{TN}, kWh/kgH_2O

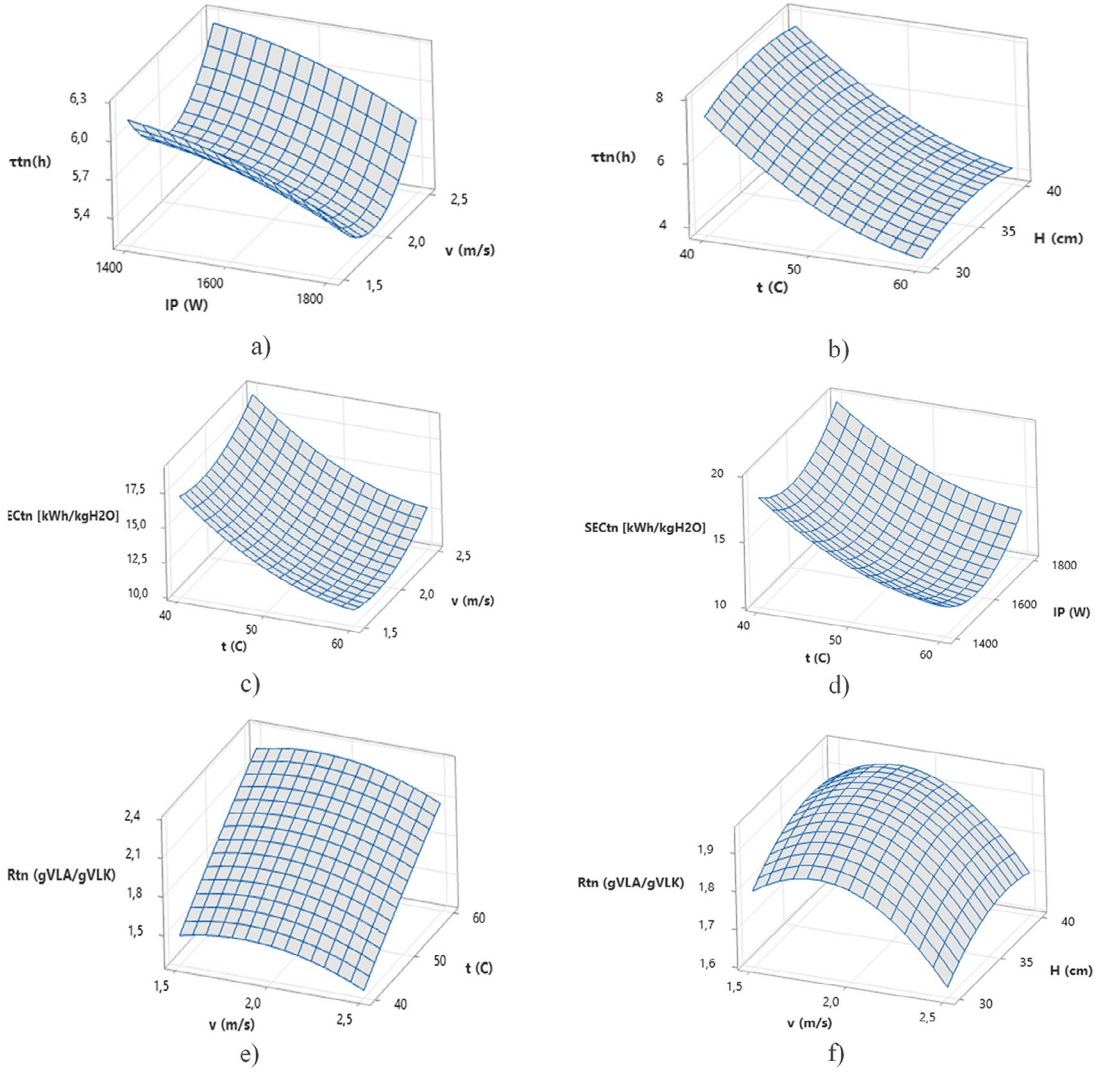
Phân tích ANOVA (Bảng 3) cho thấy phương trình hồi quy dự đoán mức tiêu thụ năng lượng riêng (SEC) có ý nghĩa thống kê cao, với giá trị p của mô hình nhỏ hơn 0,05. Các biến đầu vào gồm nhiệt độ (t), tốc độ dòng khí (V), khoảng cách đèn (H), công suất hồng ngoại (IP) và các thành phần bậc hai (t^2, V^2, H^2, IP^2) đều ảnh hưởng đáng kể đến SEC. Kết quả ở Hình 3c và 3d cho thấy SEC giảm khi nhiệt độ hoặc công suất IR tăng, thể hiện mối quan hệ tỷ lệ nghịch giữa các yếu tố này với năng lượng tiêu thụ. Ngược lại, khi vận tốc gió tăng, SEC có xu hướng tăng. Điều này có thể do tốc độ gió cao ban đầu thúc đẩy thoát ẩm và truyền nhiệt đối lưu, nhưng đồng thời làm bề mặt nhanh khô, tạo lớp màng cản trở khuếch tán ẩm bên trong, kéo dài thời gian sấy và làm tăng tổng năng lượng sử dụng. Các chỉ số thống kê R^2 = 99,67%, R^2(adj) = 99,27% và R^2(pred) = 99,53% đều rất cao, khẳng định độ chính xác và khả năng dự đoán của mô hình. Do đó, phương trình hồi quy bậc hai (3.2) là công cụ đáng tin cậy để tối ưu hóa SEC trong công nghệ sấy IR-SE cho tôm thẻ chân trắng xẻ bụng.

$$SEC_{TN} = 294,78 - 1,4983.t - 16,56.V - 5,604.H - 0,16164.IP + 0,011939.t^2 + 4,598.V^2 - 0,08189.H^2 - 5.10^{-5}.IP^2 \quad (3.2)$$

1.3 Thiết lập PTHQ dự đoán tỷ lệ phục hồi ẩm R_{TN}, gVLA/gVLK.

Kết quả ANOVA (Bảng 3) cho thấy phương trình hồi quy dự đoán tỷ lệ phục hồi ẩm (R_{TN}) có ý nghĩa thống kê cao, với giá trị p của mô hình nhỏ hơn 0,05. Điều này khẳng định mô hình phù hợp với dữ liệu thực nghiệm và đáng tin cậy. Các biến t, V, H, IP và các thành phần bình phương V^2, H^2, IP^2 đều ảnh hưởng đáng kể đến RTN. Riêng thành phần bình phương nhiệt độ (t^2) có p = 0,326 (p>0,05), chứng tỏ không tác động rõ rệt đến mô hình. Nguyên nhân có thể do ở mức nhiệt độ quá cao, bề mặt tôm dễ hình thành lớp màng khô, hạn chế khả năng phục hồi ẩm. Các đồ thị tại Hình 3e và 3f cho thấy khi nhiệt độ buồng sấy tăng từ 40°C lên 60°C, (R_{TN}) tăng dần, phản ánh tác động tích cực của nhiệt độ cao đến khả năng tái hấp thụ nước sau sấy. Ngược lại, khi vận tốc gió tăng từ 1,5 lên 2,5 m/s, (R_{TN}) có xu hướng giảm nhẹ, đặc biệt ở mức vận tốc cao. Điều này có thể do lớp bề mặt khô nhanh và cứng, cản trở quá trình hút ẩm trở lại. Các chỉ số R^2 = 98,79%, R^2(adj) = 98,27% và R^2(pred) = 92,29% đều đạt giá trị cao, khẳng định phương trình hồi quy bậc hai (3.3) là công cụ định lượng tin cậy để tối ưu hóa (R_{TN}) khi áp dụng công nghệ sấy IR-SE cho tôm thẻ chân trắng xẻ bụng.

$$R_{TN} = -10,32 + 0,0576.t + 1,892.V + 0,1404.H + 0,00657.IP - 0,000189.t^2 - 0,5162.V^2 - 0,001882.H^2 - 2.10^{-6}.IP^2 \quad (3.3)$$



Hình 3. Ảnh hưởng của các thông số sấy đầu vào đến các hàm mục tiêu (τ_{TN}, SEC_{TN}, R_{TN})

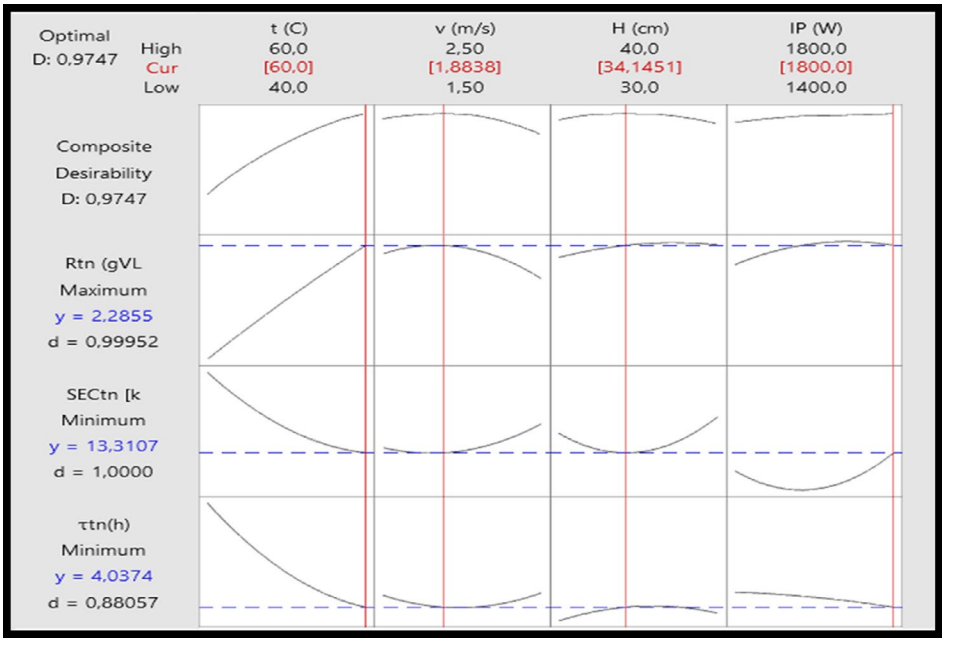
2. Tối ưu hóa đa mục tiêu xác định chế độ sấy

2.1. Kết quả xác định thông số tối ưu cho tôm thẻ chân trắng xẻ bụng sấy bằng công nghệ IR-SE

Để xác định chế độ sấy tối ưu thỏa mãn ba mục tiêu: rút ngắn thời gian, giữ chất lượng cảm quan và tiết kiệm năng lượng, nghiên cứu áp dụng phương pháp RSM (Response Surface Methodology). Phương pháp này giúp phân tích đồng thời ảnh hưởng riêng lẻ và tương tác của các thông số công nghệ. Các biến khảo sát, phạm vi thí nghiệm và kết quả tối ưu theo từng mục tiêu được trình bày tại Bảng 4, làm cơ sở đề xuất chế độ sấy hiệu quả.

Bảng 4. Các hàm mục tiêu tối ưu và trọng số ưu tiên

STT	Mục tiêu đầu ra	Mục tiêu	Thấp hơn	Mục tiêu	Cao hơn	Trọng số
1	τ_{TN} [phút]	Nhỏ nhất (Min)	3,5	3,5	8.0	1
2	R_{TN} [gVLA/gVLK]	Lớn nhất (Max)	1,188	2,286	2,286	2
3	SEC_{TN} [kWh/kg H_2O]	Nhỏ nhất (Min)	13,6058	13,6058	24,742	2



Hình 4. Đồ thị tối ưu phân tích bằng phần mềm Minitab

Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu bằng phương pháp RSM cho thấy mô hình có mức độ phù hợp rất cao, với Chỉ số mong đợi tổng (Composite Desirability) đạt 0,9747. Bộ thông số tối ưu xác định gồm: nhiệt độ 60°C, vận tốc tác nhân sấy 1,88 m/s, khoảng cách đèn hồng ngoại 34,14 cm và công suất bức xạ 1800 W. Ở điều kiện này, tỷ lệ phục hồi ẩm đạt 2,2855 gVLA/gVLK với giá trị kỳ vọng (desirability = 0,99952), suất tiêu thụ năng lượng riêng giảm còn 13,3107 kWh/kg với (desirability = 1,0000), và thời gian sấy rút ngắn xuống 4,0374 giờ với giá trị kỳ vọng (desirability = 0,88057). Kết quả này cho thấy bộ thông số tối ưu không chỉ cải thiện hiệu quả năng lượng và thời gian sấy mà còn duy trì chất lượng sản phẩm sau sấy, khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tiễn của hệ thống sấy IR-SE đối với tôm thẻ chân trắng xẻ bụng.

2.2. Đánh giá sự phù hợp giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm

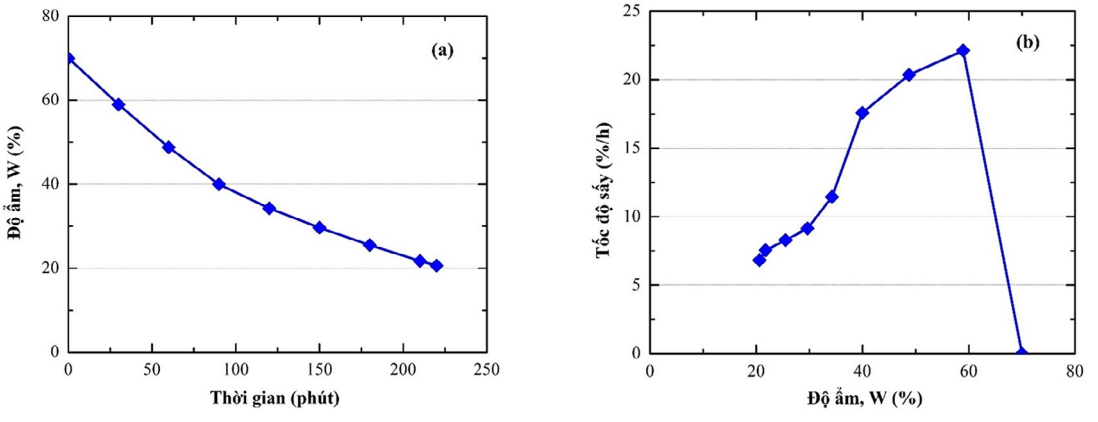
Dữ liệu từ Bảng 5 cho thấy sai số giữa giá trị dự đoán từ các phương trình hồi quy và kết quả thực nghiệm đều nằm trong giới hạn cho phép, với mức sai lệch dưới 10% [10-11]. Cụ thể, sai số đối với thời gian sấy là 8,19%, chỉ số tỷ lệ phục hồi ẩm là 7,00%, và suất tiêu thụ năng lượng là 8,08%. Các mức sai số thấp này cho thấy các mô hình hồi quy được xây dựng có độ chính xác và độ tin cậy cao, hoàn toàn khả thi trong việc dự đoán các thông số kỹ thuật quan trọng của quá trình sấy tôm thẻ chân trắng xẻ bụng. Điều này khẳng định tính ứng dụng thực tiễn của mô hình trong thiết kế và tối ưu hóa quy trình sấy.

Bảng 5. Kết quả đánh giá sự phù hợp giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm

Stt	Hàm mục tiêu	Kết quả xác định từ PTHQ (3.1 ÷ 3.3)	Kết quả thực nghiệm kiểm chứng	Sai số (%)
1	Thời gian sấy τ_{TN} (giờ)	4,03	3,7	8,19
2	Chỉ số tỷ lệ phục hồi ẩm của tôm khô R_{TN} (g_{VLA}/g_{VLK})	2,285	2,125	7,0
3	Mức tiêu thụ năng lượng riêng SEC_{TN} (kWh/kg_{H2O})	13,31	14,48	8,08

3. Xây dựng đường cong sấy và tốc độ sấy ở chế độ sấy tối ưu

Biểu đồ 5a cho thấy độ ẩm của sản phẩm giảm liên tục trong suốt quá trình sấy và có thể chia thành hai giai đoạn rõ rệt. Trong 90 phút đầu, độ ẩm giảm nhanh từ khoảng 70% xuống còn 40%, tương ứng với giai đoạn bay hơi ẩm tự do, khi nước không liên kết dễ dàng thoát ra nhờ truyền nhiệt hiệu quả. Từ 90 đến 220 phút, độ dốc đường cong giảm dần, phản ánh sự chuyển sang giai đoạn tách ẩm liên kết, khi nước bị giữ chặt trong cấu trúc mô và tốc độ sấy chậm lại, kéo theo nhu cầu năng lượng lớn hơn. Đường cong không xuất hiện đoạn nằm ngang hay ngưng trệ, chứng tỏ điều kiện sấy ổn định và được kiểm soát tốt. Biểu đồ 5b thể hiện mối quan hệ phi tuyến giữa tốc độ sấy và độ ẩm vật liệu, với đường cong có dạng đối xứng tăng, giảm rõ rệt. Khi độ ẩm còn cao (>60%), tốc độ sấy ở mức thấp do giai đoạn làm nóng vật liệu sấy hơi nước chưa tiếp xúc hiệu quả với nguồn nhiệt. Tốc độ sấy đạt giá trị cực đại trong khoảng độ ẩm khoảng 40–60%, đây là giai đoạn sấy hiệu quả nhất khi truyền nhiệt và khuếch tán ẩm diễn ra mạnh. Khi độ ẩm giảm xuống dưới 30%, tốc độ sấy suy giảm nhanh do nước liên kết khó thoát hơn, làm tăng nhu cầu năng lượng. Xu hướng này giúp xác định khoảng độ ẩm thích hợp để điều chỉnh chế độ sấy, nhằm nâng cao hiệu quả và đảm bảo chất lượng sản phẩm.



Hình 5. Đường cong sấy và tốc độ sấy

4. Đánh giá chất lượng và an toàn thực phẩm của tôm thẻ xẻ bụng sấy ở chế độ tối ưu

4.1. Đánh giá chất lượng cảm quan và tỷ lệ phục hồi ẩm của tôm thẻ khô xẻ bụng

Kết quả thu được từ Bảng 6 và Hình 6a cho thấy công nghệ sấy IR-SE mang lại hiệu quả cảm quan đáng kể cho sản phẩm tôm thẻ chân trắng xẻ bụng. Cụ thể, điểm cảm quan tổng thể (CLCQ) đạt 18,21, phản ánh mức độ chấp nhận cao của người tiêu dùng đối với các đặc tính như mùi vị, màu sắc và kết cấu của sản phẩm sau sấy. Bên cạnh đó, chỉ số phục hồi ẩm (R_{TN}) đạt 2,125 g_{VLA}/g_{VLK} cho thấy khả năng tái hấp thụ nước của sản phẩm tôm khô sau sấy là tương đối tốt, góp phần cải thiện cảm giác ăn và nâng cao giá trị sử dụng của sản phẩm. Những kết quả này khẳng định rằng công nghệ sấy IR-SE không chỉ giúp bảo toàn các đặc tính cảm quan quan trọng, mà còn duy trì tốt khả năng phục hồi độ ẩm, một yếu tố then chốt đối với chất lượng của thực phẩm sấy khô. Qua đó, phương pháp này góp phần nâng cao giá trị cảm quan và giá trị sử dụng của sản phẩm tôm khô, phù hợp với yêu cầu của thị trường và người tiêu dùng hiện đại.

Bảng 6. Kết quả CLCQ và chỉ số phục hồi ẩm của tôm thẻ xẻ bụng

STT	Phương pháp sấy	Điểm CLCQ (điểm)	Chỉ số phục hồi ẩm của tôm thẻ R_{TN} (gVLA/gVLK)
1	Tôm thẻ chân trắng xẻ bụng sấy bằng IR-SE.	18,21	2,125

a) Mẫu tôm thẻ xẻ bụng sau khi sấy

b) Mẫu tôm thẻ xẻ bụng trước khi sấy

Hình 6. Hình ảnh tôm thẻ xẻ bụng trước và sau khi sấy bằng IR-SE

4.2. Đánh giá độ an toàn thực phẩm của tôm thẻ chân trắng xẻ bụng khô sấy bằng công nghệ IR-SE

Kết quả trong Bảng 7 cho thấy không phát hiện sự hiện diện của vi khuẩn Escherichia coli và Salmonella trong mẫu tôm sau sấy. Các chỉ tiêu vi sinh còn lại đều nằm dưới giới hạn cho phép đối với sản phẩm thực phẩm khô theo quy định hiện hành. Điều này chứng tỏ công nghệ sấy IR-SE có hiệu quả rõ rệt trong việc ức chế vi sinh vật gây hại, góp phần đảm bảo an toàn vi sinh và chất lượng vệ sinh thực phẩm của sản phẩm sau chế biến [9].

Bảng 7. Kết quả kiểm nghiệm của mẫu tôm thẻ chân trắng sấy bằng IR-SE

STT	Chỉ tiêu kiểm nghiệm	Phương pháp kiểm nghiệm	Kết quả
1	Coliforms	ISO 4832:2006(*)	< 10 CFU/g
2	Tổng số nấm men và nấm mốc	ISO 21527-2:2008(*)	< 10 CFU/g
3	Escherichia coli	ISO 16649-2:2001(*)	Âm tính/25 g
4	Salmonella	TCVN 10780-1:2017(*)	Âm tính/25 g
5	Tổng số vi sinh vật hiếu khí	TCVN 4884-1:2015(*)	8,2 x 10^3 CFU/g

5. KẾT LUẬN

Thông qua nghiên cứu công nghệ sấy hồng ngoại kết hợp năng lượng mặt trời gián tiếp IR-SE áp dụng cho tôm thẻ chân trắng xẻ bụng, các điều kiện vận hành tối ưu đã được xác lập, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả năng lượng. Cụ thể, các thông số tối ưu gồm: nhiệt độ sấy 60°C, công suất bức xạ hồng ngoại 1800 W, vận tốc dòng không khí 1,88 m/s, khoảng cách từ nguồn hồng ngoại đến nguyên liệu 34,15 cm. Độ ẩm tương đối của không khí sấy duy trì trong khoảng 20–25%. Nguyên liệu đầu vào là tôm thẻ đã luộc, có độ ẩm khoảng 70% và được sấy đến khi đạt độ ẩm cuối 20 ± 1%, đáp ứng yêu cầu của sản phẩm tôm khô thương mại. Thời gian sấy tối ưu là 4,03 giờ, với tỷ lệ phục hồi ẩm (R_{TN}) cao, đạt 2,285 gVLA/gVLK. Phương pháp sấy IR-SE cũng cho thấy hiệu quả sử dụng năng lượng tốt, với mức tiêu thụ năng lượng riêng (SEC) chỉ 13,31 kWh/kg H_2O, phản ánh khả năng tiết kiệm đáng kể.

Các mô hình hồi quy xây dựng trong nghiên cứu dự đoán chính xác các chỉ tiêu quan trọng như thời gian sấy, mức tiêu thụ năng lượng và tỷ lệ phục hồi ẩm. Những kết quả này không chỉ có giá trị lý thuyết mà còn mang ý nghĩa thực tiễn, tạo nền tảng khoa học cho thiết kế và vận hành hệ thống sấy IR-SE ở quy mô công nghiệp. Nghiên cứu góp phần hoàn thiện quy trình chế biến tôm thẻ chân trắng xẻ bụng khô đạt chất lượng cao, bảo đảm an toàn thực phẩm và tối ưu hiệu suất năng lượng trong sản xuất thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng việt

1. Nguyễn Trọng Cẩn, Đỗ Minh Phụng (2006), "*Công nghệ chế biến thực phẩm thủy sản*", tập 1&2, NXB Nông Nghiệp, TP.Hồ chí Minh.
2. Lê Như Chính (2022); "*Nghiên cứu thực nghiệm xác định thông số sấy tối ưu cho tôm thẻ chân trắng bằng bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại*". Tạp chí Khoa học- Công nghệ Thủy sản; ISSN: 1859-2252, số 3/2022, pp13 -23.
3. Nguyễn Văn Phúc, Lê Như Chính, Trần Thị Bảo Tiên, Lương Đức Vũ (2019), "*Nghiên cứu thực nghiệm quá trình sấy tôm thẻ sử dụng thiết bị sấy vi sóng kết hợp với sấy lạnh*", Tạp chí KHCN thủy sản, số 2/2019, pp 54-61.
4. Lê Như Chính, Nguyễn Văn Phúc, Huỳnh Văn Thạo, Nguyễn Nguyên An (2021), "*Nghiên cứu chế tạo máy sấy bằng bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại để sấy nông sản và thủy sản*", Tạp chí KHCN thủy sản, số 1/2021, pp 19-25.
5. Nguyễn Văn Phúc, Trần Đại Tiến, Lê Như Chính (2018) *"Nghiên cứu chế tạo thiết bị sấy thủy sản sử dụng thanh gốm hồng ngoại kết hợp với đối lưu"*. Tạp chí Khoa học - Công nghệ Thủy sản Số 1/2018.

6. 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.
7. Trần Đại Tiến, Lê Như Chính, Nguyễn Văn Hoàng (2022) " Kỹ Thuật sấy thủy sản", NXB Khoa học và kỹ thuật.
8. Lê Như Chính, Nguyễn Văn Phúc, Trần Đình Khoa, Đỗ Trọng Quý, "*Tối ưu hóa đa mục tiêu xác định thông số sấy cho cá cơm thường bằng bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại".* Tạp chí Năng lượng nhiệt, số 160-12/2023, pp 2-10.
9. Quyết định Số: 46/2007/QĐ-BYT (2007) "*Quy định giới hạn tối đa ô nhiễm sinh học và hóa học trong thực phẩm*" của Bộ Y Tế Việt Nam.

Tiếng Anh

10. 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. https://doi:10.1088/1755-1315/1278/1/012012.
11. 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. https://doi.org/10.1590/1981-6723.03924.
12. Minitab, Inc. (2000), "*MINITAB User's Guide 2: Data Analysis and Quality Tools",* Printed in the USA, ISBN 0-925636-44-4.
13. 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.
14. Song Xiaoyong (2013). "*Banana Chip Drying Using Far Infrared-Assisted Heat Pump".* The Philippine Agricultural Scientist, Vol. 96 No. 3, pp 275-281.
15. Anumudu CK, Onyeaka H, Ekwueme CT, Hart A, Isaac-Bamgboye F, Miri T (2024). "*Advances in the Application of Infrared in Food Processing for Improved Food Quality and Microbial Inactivation"*. Foods, 13(24):4001. https://doi.org/10.3390/foods13244001.
16. Prashob K, Sirisomboon P. (2022). "*Drying of shrimp using hot air-assisted continuous infrared drying system",* Journal of Food Processing and Preservation, Vol.46. https://doi.org/10.1111/jfpp.16364
17. Nguyen Hay, Le Quang Huy, pham Van Kien (2022). "*A review of drying methods assisted by infrared radiation, microwave and radio frequency",* Food Processing–Recent Advances. https://www.intechopen.com/chapters/84922.

Các trang Web

18. *https://www.gso.gov.vn/tin-tuc-thong-ke/2022/10/day-manh-phat-trien-nuoi-trong-thuy-san/*
19. https://www.mard.gov.vn/Pages/phat-trien-nganh-tom-huong-den-muc-tieu-xuat-khau-4-3-ty-usd.aspx (Phát triển ngành tôm, hướng đến mục tiêu xuất khẩu 4,3 tỷ USD, Truy cập ngày 15/05/2025)
20. *https://tienphong.vn/thuy-san-kho-che-bien-va-lua-chon-nhu-the-nao-de-bao-dam-an-toan-post1076770.tpo.* (Thủy sản khô, chế biến và lựa chọn sao cho an toàn, Truy cập ngày 01/10/2025)