

THÔNG BÁO KHOA HỌC

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM TRƯỜNG ÁP SUẤT BÊN TRONG TÔM THÊ CHÂN TRẮNG SẤY BẰNG BƠM NHIỆT KẾT HỢP VỚI BỨC XẠ HỒNG NGOẠI
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PRESSURE INSIDE THE DRIED WHITE - LEG SHRIMP BY FAR-INFRARED ASSISTED HEAT PUMP DRYING

Lê Như Chính¹, Nguyễn Nguyễn An²

Ngày nhận bài: 13/9/2018; Ngày phản biện thông qua: 3/12/2018; Ngày duyệt đăng: 1/3/2019

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định sự thay đổi nhiệt độ và áp suất bên trong tôm thẻ chân trắng khi sấy bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại. Theo đó, nhiệt độ và áp suất trong tôm đạt giá trị lớn nhất tại tâm và giảm dần ra bề mặt theo hướng bán kính. Như vậy, sấy bằng bức xạ hồng ngoại sẽ tăng cường quá trình trao đổi nhiệt bức xạ làm cho sản phẩm nóng từ bên trong, làm gia tăng nhiệt độ và áp suất bên trong tâm của tôm sấy. Bên cạnh đó, sấy lạnh bằng bơm nhiệt lại có tác dụng để duy trì nhiệt độ bề mặt tôm không bị quá nhiệt bằng dòng không khí lạnh thổi qua và giảm khả năng tạo màng trên bề mặt ngoài sản phẩm, tăng cường quá trình khuếch tán nội, tăng tốc độ và hiệu quả sấy.

Từ khóa: Sấy bơm nhiệt, sấy hồng ngoại, sấy tôm thẻ chân trắng

ABSTRACT

This article presents the results of an experimental research on changes of temperature and pressure inside white - leg shrimp when dried by far-infrared assisted heat pump. Accordingly, the temperature and pressure in the shrimp reach the maximum value at the center and gradually decrease to the surface in the direction of the radius. Thus, the infrared radiation drying will enhance the radiant heat exchange process, making the product hotter from inside and thus, increasing the temperature and pressure at the center of the dried shrimps. In addition, by applying the heat pump cool – dry method, the surface temperature of the shrimp is not exaggerated, thus reducing the ability of producing the film at the surface of the product (shrimps), enhancing the internal diffusion process and increasing the drying speed as well as increasing the efficiency of the drying process.

Keywords: Heat pump drying, Infrared radiation drying, White - leg shrimp drying

BẢNG CÁC KÝ HIỆU SỬ DỤNG

G_1 Khối lượng mẫu ban đầu, gam	U Tốc độ sấy, %/h
G_i Khối lượng mẫu cân sau khi sấy ở thời điểm thứ i , gam.	VLS Vật liệu sấy
W_1 Độ ẩm ban đầu của nguyên liệu sấy, %	t_{sp} Nhiệt độ tại tâm của sản phẩm, °C
W_i Độ ẩm của nguyên liệu sau khi sấy ở thời điểm thứ i , %	$t_{bề\ mặt}$ Nhiệt độ bề mặt của sản phẩm, °C
h Độ cao chênh lệch của mực chất lỏng trong 2 ống chứa u , m	IR Bức xạ hồng ngoại
W Độ ẩm của sản phẩm, %	ΔP Gradient áp suất trong tôm sấy, Pa
x_i là những biến mã hóa	P_2 Áp suất khí quyển, Pa
β_{ii} là các hệ số bậc 2	P_1 Áp suất hơi bên trong tôm sấy, Pa
h_{BX} Khoảng cách từ bề mặt đèn đến VLS, cm	τ Thời gian sấy, s

¹ Nghiên cứu sinh trường Đại học Bách khoa Hà Nội, đơn vị công tác: Khoa Cơ khí, Trường ĐH Nha Trang

² Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, kim ngạch xuất khẩu thủy sản Việt Nam liên tục tăng. Theo (VASEP) dự báo trong năm 2018, xuất khẩu tôm sẽ tăng và có thể đạt 4,2 tỷ USD. Trong đó, xuất khẩu tôm thẻ chân trắng đạt khoảng 2 tỷ USD, tăng 8 % so với năm 2017 [12]. Tuy có tiềm năng rất lớn nhưng hiện nay, mặt hàng tôm khô vẫn còn sản xuất nhỏ lẻ, thủ công bằng các phương pháp sấy truyền thống như phơi nắng hay sấy bằng than, củi nên chất lượng tôm khô bị suy giảm nhiều. Do đó, đã có rất nhiều nghiên cứu về quá trình truyền nhiệt truyền ẩm bên trong VLS nhằm mục đích xác định các thông số ảnh hưởng đến quá trình sấy được thực hiện trong thời gian gần đây. Các nghiên cứu về truyền nhiệt truyền chất của A. Luikov [4] cho rằng quá trình sấy có tốc độ sấy cao như sấy bằng vi sóng hay bức xạ hồng ngoại thì gradient áp suất trong VLS xuất hiện là do quá trình bay hơi của nước tự do trong cấu trúc xốp-mao dẫn của VLS và sự chuyển động của hơi nước trong mao quản làm tăng áp suất mao quản trong VLS. Bên cạnh đó, quá trình nghiên cứu về truyền nhiệt truyền chất trong khi sấy vật liệu ẩm là xốp mao dẫn như khoai tây, cà rốt, củ cải của Mingheng Shi và cộng sự [5] đã chỉ ra có năm cơ chế truyền ẩm từ bề trong ra bề mặt VLS trong quá trình làm khô đó là: (1) sự khuếch tán ẩm do gradient độ ẩm, (2) khuếch tán ẩm gây ra bởi lực mao dẫn, (3) khuếch tán ẩm do gradient nhiệt độ, (4) khuếch tán ẩm do nước bay hơi và ngưng tụ trong các mao dẫn, và (5) khuếch tán ẩm gây ra bởi gradient áp suất bên trong VLS. Mingheng Shi cũng cho rằng trong quá trình làm khô nhanh VLS thì dòng ẩm chảy trong cấu trúc mao dẫn theo gradient áp suất là cơ chế chủ yếu. Nhận định này cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu của Soner Celen và cộng sự [3] cho thấy áp suất bên trong vật liệu sấy tăng trong giai đoạn đầu quá trình sấy và sau đó giảm dần theo độ ẩm của sản phẩm. Như vậy, xác định trường áp suất bên trong VLS để xây dựng và giải các bài toán về truyền nhiệt truyền chất nhằm nâng cao tốc độ sấy, đảm bảo chất lượng và hạ giá thành sản phẩm tôm khô là yêu cầu cấp thiết

phù hợp với nhu cầu thực tiễn.

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

1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu trong bài báo này là tôm thẻ chân trắng (White - Leg shrimp), có kích cỡ $100 \div 110$ con/kg với màu sắc, mùi tanh tự nhiên của sản phẩm tươi. Tôm thu mua xong được bảo quản bằng nước đá vảy trong các thùng xốp cách nhiệt rồi được chuyển về phòng thí nghiệm Nhiệt lạnh của Trường Đại học Nha Trang, sau đó được rửa sạch và luộc khoảng 10 phút trong nước muối có nồng độ 3 %. Tôm sau khi luộc được tiến hành sấy để xác định nhiệt độ và áp suất trong tôm đến khi độ ẩm cuối cùng của sản phẩm sấy đạt khoảng 20% [1], [7].



Hình 1. Tôm thẻ chân trắng sau khi luộc và trước khi sấy

2. Thiết bị nghiên cứu

2.1. Máy sấy bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại



Hình 2. Máy sấy bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại

Nghiên cứu được tiến hành trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (Hình 2). Máy được thiết kế và lắp đặt tại Phòng thí nghiệm nhiệt lạnh, Khoa Cơ Khí, Trường

Đại học Nha Trang với tính năng kỹ thuật như sau: năng suất 5 kg/m², công suất bơm nhiệt (0,745 kW), công suất đèn hồng ngoại (2 kW), quạt ly tâm (0,1 kW). Máy sấy có thể điều chỉnh các thông số theo yêu cầu của công nghệ như công suất hồng ngoại từ 200 ÷ 2000W, tốc độ gió trong buồng sấy từ 0,5 ÷ 5 m/s, khoảng cách bức xạ hồng ngoại từ đèn đến VLS từ 0,2 ÷ 0,4 m. Trong nghiên cứu này, máy sấy hoạt động ở chế độ như sau: Nhiệt độ sấy $t_{TNS} = 60^{\circ}\text{C}$, vận tốc gió $v_{TNS} = 2$ m/s, khoảng cách từ bề mặt đèn hồng ngoại đến vật liệu sấy là $h_{BX} = 40$ cm, công suất hồng ngoại $IP = 1800$ W, độ dày lớp vật liệu sấy $d_{NL} = 1$ cm. Theo kết quả nghiên cứu của các tác giả [1], [6, 7, 8] cũng cho thấy chế độ sấy trên sẽ có tốc độ sấy nhanh, thời gian sấy ngắn và giữ được chất lượng tôm thẻ khô.

2.2. Thiết bị đo vận tốc gió trong phòng sấy

Xác định vận tốc gió tại phòng sấy bằng lưu tốc kế hiện số Testo 405V₁ - Đức, độ chính xác

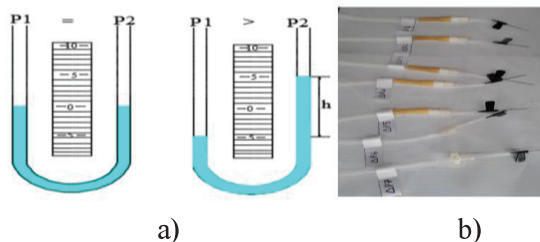
$\pm (5\%+0,1\text{m/s})$

2.3. Cân phân tích điện tử Precisa XT2200C

Xác định khối lượng tôm theo thời gian sấy bằng cân phân tích điện tử XT2200C với độ chính xác $\pm 0,01\text{g}$

2.4. Thiết bị đo áp suất bên trong tôm bằng áp kế chữ U

Bộ đầu đo lấy tín hiệu áp suất trong tôm sấy được ứng dụng từ bộ kim tiêm truyền dịch trong ngành Y tế (Hình 3b). Đặc điểm là có kim tiêm kích thước nhỏ và sắc nhọn đảm bảo khi tiêm vào vật liệu ẩm luôn tạo được độ kín mà không bị tràn dịch hoặc hơi ra bề mặt. Hơn nữa, với đặc tính VLS là keo xốp mao dẫn nên theo thời gian sấy, nhiệt độ bề mặt VLS tăng nhanh, quá trình bay hơi ẩm trên bề mặt diễn ra mạnh và bề mặt đã có hiện tượng tạo màng nhẹ và đặc biệt là sự co rúm cơ thịt tôm làm cho kim tiêm cắm trong tôm càng ngày càng được giữ chặt hơn đảm bảo kín để duy trì tín hiệu áp suất đưa về áp kế chữ U (Hình 3a).



Hình 3. Thiết bị đo áp suất bên trong tôm sấy

a) Thiết bị đo áp suất bằng áp kế chất lỏng chữ U, b) Đầu đo áp suất trong tôm sấy

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của áp kế chữ U

Loại áp kế	Thang đo		Kích thước áp kế, mm				Khối lượng riêng của nước cất theo nhiệt độ ρ , kg/m ³		
	h, mm	Δp , Pa	Đường kính trong d_T	Đường kính ngoài d_N	Chiều cao, H	Chiều rộng, W	Nhiệt độ tiêu chuẩn 0 °C	Nhiệt độ 10 ÷ 30 °C	Nhiệt độ 35 °C
Áp kế chữ U	100-0-100	1000-0-1000	4,60	6,0	200	70	999,90	999,70-995,70	995,95

2.5. Thiết bị đo nhiệt độ bên trong tôm sấy

Thiết bị đo nhiệt độ trong tôm sấy bằng nhiệt kế hiện thị số EXTECH, Model TM500 - Đài Loan, độ chính xác $\pm (0.4 \% + 1^{\circ}\text{C})$.



Hình 4. Thiết bị đo nhiệt không khí và nhiệt độ sản phẩm

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Phương pháp Taguchi

Taguchi là phương pháp hiệu quả, giúp giảm tối đa số lượng thí nghiệm trong quá trình nghiên cứu. Trong bài báo này, phương pháp Taguchi được sử dụng để thiết kế tất cả các thí nghiệm cho việc xác định áp suất bên trong tôm sấy với k yếu tố đầu vào và ở 3 mức với số thí nghiệm $L9 = 3^k$ [11]. Bảng trực giao thiết kế thí nghiệm và kết quả được trình bày trong (Bảng 2).

3.2. Phương pháp mặt đáp ứng (RSM – Response Surface Methodology)

RSM là phương pháp thống kê toán học được sử dụng để thiết lập mô hình dự đoán thực nghiệm. Phương pháp này cho phép biểu diễn mối quan hệ giữa các biến đầu vào độc lập với các biến đầu ra phụ thuộc. Trong nghiên cứu này, phương pháp phân tích hồi quy được sử dụng để thiết lập mô hình thực nghiệm cho việc dự áp suất bên trong tôm sấy. Mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra có thể được biểu diễn bởi phương trình sau [10]:

$$\Delta p = \varphi(\text{ttsp}, w) \quad (1)$$

Từ phương trình (1) có thể được viết lại dưới dạng phương trình bậc 2 cho “k” biến đầu vào như sau:

$$\Delta P = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Như vậy, ứng dụng phương pháp Taguchi để thiết kế bảng ma trận thí nghiệm (Bảng 3) còn phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) phân tích số liệu thực nghiệm và xây dựng phương trình hồi quy (6) giúp dự đoán áp suất trong tôm sấy.

3.3. Phương pháp xác định

3.3.1. Phương pháp xác định nhiệt độ trong tôm sấy

Đặt vị trí đầu dò đo nhiệt độ tại một điểm trong tủ sấy sao cho cùng khoảng cách với VLS, để cường độ bức xạ mà đầu dò nhiệt độ nhận được tương đương với cường độ bức xạ mà VLS nhận được trong tủ sấy ở cùng thời gian sấy.

3.3.2. Xác định độ ẩm của tôm sấy

Độ ẩm của tôm biến đổi trong quá trình sấy được xác định bằng phương pháp cân khối lượng theo công thức (3) [1, 2].

$$W_i = 100 - \frac{(100 - W_1)}{G_i} . G_1 \quad (3)$$

3.3.3. Xác định tốc độ sấy

Tốc độ sấy được xác định dựa vào độ biến đổi độ ẩm của tôm theo thời gian sấy, theo công thức (4)[1, 2].

$$U = \frac{\Delta W}{\Delta \tau} \quad (4)$$

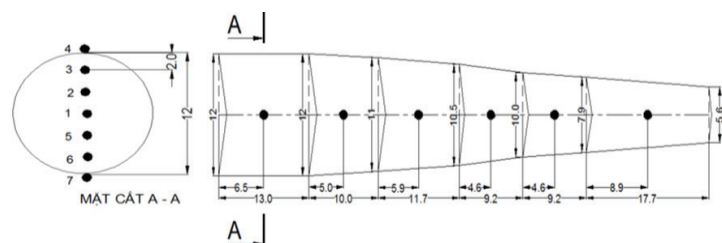
3.3.4. Xác định thay đổi áp suất trong tôm sấy

Xác định áp suất bên trong tôm sấy dựa vào khối lượng riêng, chênh lệch độ cao của mực chất lỏng trong 2 ống trên áp kế (Hình 3) và (Bảng 1) theo công thức (5) [9].

$$\Delta P = P1 - P2 = h . \rho . g \quad (5)$$

3.3.5. Phương pháp xác định nhiệt độ và áp suất trong tôm sấy

Chọn tôm có cùng kích thước và khối lượng sau đó tiến hành đo áp suất và nhiệt độ. Do tôm sấy được trao đổi nhiệt bằng bức xạ từ 2 mặt đối xứng với cùng khoảng cách hồng ngoại (h_{BX}), nên xem đây là bài toán truyền nhiệt đối xứng, khi đó nhiệt độ và áp suất tại các điểm (1,2,3,4) cũng chính bằng nhiệt độ và áp suất tại các điểm (1,5,6,7). Như vậy, trong nghiên cứu này tác giả chỉ xác định nhiệt độ và áp suất theo hướng bán kính là từ điểm đo số 1 ÷ 4. Trong đó, điểm (1) là tâm và điểm (4) là bề mặt của tôm (Hình 5).

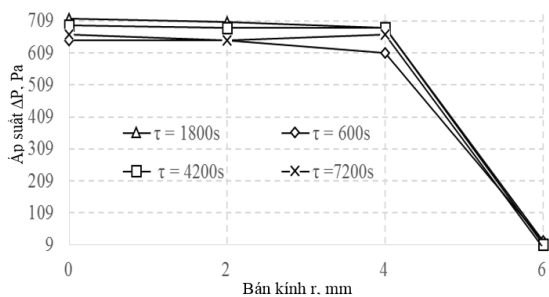


Hình 5. Sơ đồ đo áp suất và nhiệt độ trong tôm sấy

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

1. Xác định trường áp suất bên trong và bề mặt theo hướng bán kính của thân tôm

Kết quả nghiên cứu (Hình 6), (Hình 7) và (Bảng 2) cho thấy áp suất tại tâm đạt giá trị lớn nhất là 716,13Pa và tốc độ sấy cao nhất đạt 29,56 %/h ở thời gian sấy là 1800s và giảm dần theo các lớp biên và bề mặt thân tôm. Do là quá trình sấy có bức xạ hồng ngoại nên nhiệt độ tâm sản phẩm tăng, khi đó nước tự do bay hơi mạnh ở các lớp cơ thịt trong tôm sấy, làm tăng áp suất hơi bên trong mao quản và đẩy hơi ra bề mặt làm tăng quá trình khuếch tán nội, tăng tốc độ sấy. Tuy nhiên, theo thời gian sấy thì áp suất tại tâm và các lớp theo hướng bán kính lại liên tục giảm dần theo độ ẩm của tôm.



Hình 6. Thay đổi áp suất bên trong theo hướng bán kính của thân tôm

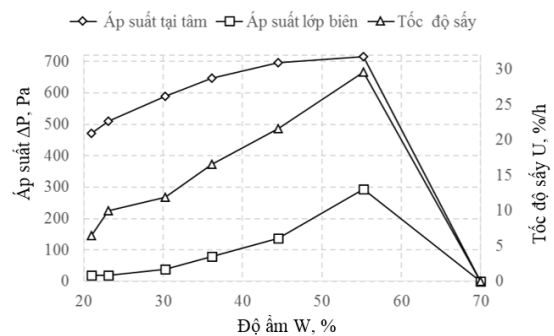
Bảng 2. Biến đổi độ ẩm, nhiệt độ và áp suất trong tôm sấy

STT	Thời gian sấy τ , Phút	Độ ẩm W, %	Tốc độ sấy U, %/h	Nhiệt độ t_1 , °C	Nhiệt độ t_4 , °C	Áp suất ΔP_1 , Pa	Áp suất ΔP_3 , Pa
1	0	70	0	25,0	25,0	0	0
2	30	55,22	29,56	62,3	58,9	716,13	294,30
3	60	44,44	21,56	61,9	57,3	696,51	137,34
4	90	36,16	16,56	63,3	60,4	647,46	78,48
5	120	30,22	11,88	62,8	60,1	588,60	39,24
6	150	23,06	10,00	63,9	61,1	510,12	19,62
7	160	20,92	6,50	64,8	61,6	470,88	19,62

2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm đến áp suất bên trong tôm sấy

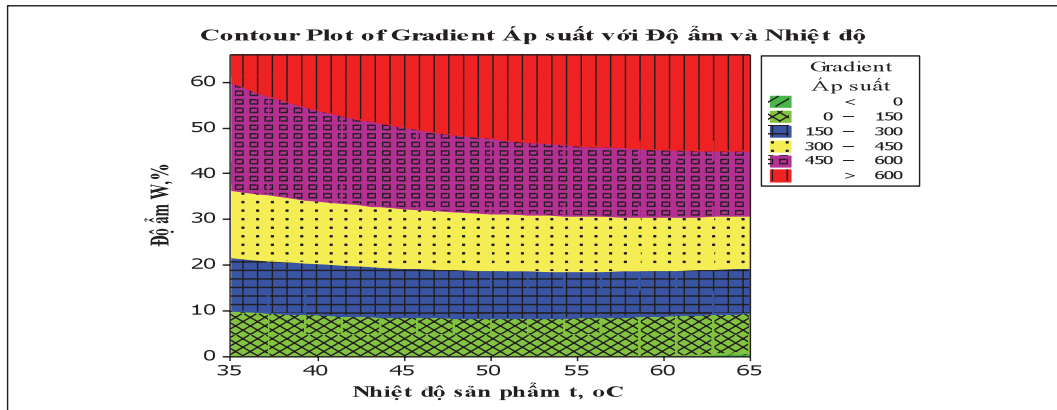
Kết quả mô phỏng trên (Hình 8) cho thấy áp suất bên trong tôm sấy phụ thuộc chính vào nhiệt độ và độ ẩm của tôm. Giai đoạn sấy nâng nhiệt, nhiệt độ sản phẩm tăng từ 35 ÷ 60°C,

Cụ thể là khi gradient áp suất tại tâm giảm còn đến 470,88 Pa và lớp biên gần bề mặt giảm tới 19,62 Pa thì tốc độ sấy là 6,5 %/h. Bởi vì, ở giai đoạn sấy giảm tốc nên theo thời gian nước tự do trong cơ thịt tôm đã bay hơi hết và còn lại chủ yếu là nước liên kết hóa lý và nước liên kết hóa học. Các loại nước này có liên kết hóa học giữa các nguyên tử rất bền vững, rất khó bay hơi nên làm giảm áp suất trong tôm sấy và giảm tốc độ sấy. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với nhận định Soner Celen [3] là áp suất bên trong vật liệu sấy tăng trong giai đoạn đầu quá trình sấy và sau đó giảm dần theo độ ẩm của sản phẩm. Như vậy, áp suất trong tôm sấy phụ thuộc vào nhiệt độ sản phẩm ở giai đoạn sấy nâng nhiệt còn giai đoạn giảm tốc thì áp suất trong tôm phụ thuộc chính vào hàm lượng nước còn lại trong tôm sấy.



Hình 7. Đường cong tốc độ sấy và áp suất trong tôm sấy

hàm lượng ẩm trong tôm sấy giảm từ 70 ÷ 60% và áp suất bên trong tôm là lớn nhất đạt trên 600 Pa. Do là, nhiệt độ trong tôm tăng đạt đến nhiệt độ nhiệt kế ướt thì nước tự do bay hơi mãnh liệt làm tăng áp suất hơi trong tâm tôm sấy. Theo thời gian sấy nhiệt độ tôm tăng nhẹ



Hình 8. Ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm đến áp suất trong tôm thẻ sấy

và ổn định ở 60 ÷ 65°C còn độ ẩm trong tôm sấy giảm dần đến 0%. Giai đoạn này áp suất trong tôm phụ thuộc chính và giảm theo hàm lượng ẩm còn lại trong tôm. Cụ thể là ở độ ẩm 40 ÷ 50 % áp suất đạt 400 ÷ 600 Pa, độ ẩm 20 ÷ 30% áp suất đạt 30 ÷ 450 Pa và ở độ ẩm 10 ÷ 20% thì áp suất đạt 150 ÷ 300Pa. Như vậy, với phương pháp sấy lạnh kết hợp hồng ngoại, xác định được nhiệt độ tại tâm và độ ẩm của tôm cũng đồng nghĩa với xác định được gradient áp suất trong tôm sấy.

3. Mô hình xác định thay đổi áp suất bên trong tôm sấy theo nhiệt độ và độ ẩm dựa trên phương pháp RSM

Từ kết quả thực nghiệm theo Taguchi (Bảng 3) và phương pháp RSM, tác giả đã xây dựng được phương trình toán học bậc 2 biểu diễn mối quan hệ giữa Gradient áp suất bên trong tôm sấy ΔP , Pa và các thông số: Nhiệt độ sản phẩm t_{tsp} , °C, độ ẩm của sản phẩm W_{sp} , %. Phương trình này được sử dụng cho việc dự đoán áp suất trong tôm thẻ khi sấy bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại với độ tin cậy $R = 99\%$ [11].

$$\Delta P_l = -155,095 + 7,116.t_{tsp} + 13,519.W_{sp} - 0,0757.t_{tsp}^2 - 0,1.W_{sp}^2 + 0,0713.t_{tsp}.W_{sp} \quad (6)$$

Theo phương trình toán học (6) cho thấy áp suất bên trong tôm phụ thuộc vào nhiệt độ và độ ẩm của tôm sấy. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ là nhỏ hơn độ ẩm tới áp suất trong tôm. Bởi vì hệ số $\beta_2 = 13,519$ lớn hơn gấp 2 lần so với hệ số $\beta_1 = 7,116$. Như vậy,

sự tác động của nhiệt độ tới áp suất trong tôm chủ yếu ở giai đoạn đầu quá trình sấy là giai đoạn nâng nhiệt còn giai đoạn sấy giảm tốc do nhiệt độ đã ổn định nên áp suất phụ thuộc chính vào hàm lượng ẩm còn lại trong tôm.

Bảng 3. Kết quả xác định sự thay đổi áp suất bên trong theo nhiệt độ và độ ẩm của tôm sấy

TN	Các mức		Các yếu tố đầu vào		Kết quả $\Delta P_l, Pa$
	$t_{tsp}, ^\circ C$	$W_{sp}, \%$	$t_{tsp}, ^\circ C$	$W_{sp}, \%$	
1	1	1	35	0,0	0,00
2	1	2	35	33	450
3	1	3	35	66	608
4	2	1	50	0,0	0,00
5	2	2	50	33	470
6	2	3	50	66	716
7	3	1	65	0,0	0,00
8	3	2	65	33	460
9	3	3	65	66	750

4. Đánh giá sai số giữa giá trị dự đoán Gradient áp suất của mô hình lý thuyết và thực nghiệm

Kết quả thí nghiệm trên (Bảng 4) cho thấy sai số giữa giá trị áp suất đo được trong tôm sấy

bằng thực nghiệm và giá trị áp suất dự đoán từ phương trình (5) là rất nhỏ, lần lượt là 0,49%, 2,5% và 1,28%. Với kết quả này, phương pháp RSM áp dụng cho việc xây dựng phương trình toán học xác định áp suất trong tôm sấy là hoàn

Bảng 4. Giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm áp suất trong tôm thẻ sấy

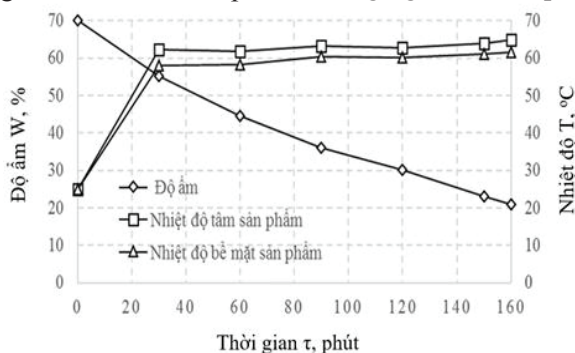
Thí nghiệm	Giá trị đầu vào của mô hình		Giá trị đầu ra dự đoán ΔP_I , Pa	Giá trị đầu ra thực nghiệm ΔP_I , Pa	Sai số, %
	t_{isp} , °C	W_{sp} , %			
1	57,5	60,96	702,829	706,32	0,49
2	63,4	54,98	678,47	696,51	2,5
3	50	65	695,62	686,70	1,28

toàn chính xác phù hợp với thực nghiệm. Như vậy, phương trình (6) được áp dụng để xác định áp suất lớn nhất khi biết nhiệt độ tâm và độ ẩm của tôm khi sấy bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại.

5. Xây dựng đường cong sấy và đường cong nhiệt độ sấy theo thời gian

Kết quả nghiên cứu trên (Hình 9) và (Bảng 2) cho thấy nhiệt độ tâm và nhiệt độ bề mặt tôm sấy liên tục tăng và đạt giá trị cao nhất trong khoảng thời gian đầu 20 ÷ 30 phút và giữ ổn định theo thời gian sấy. Theo đó, nhiệt độ tâm lớn nhất đạt 64,8°C và giảm dần đến bề mặt đạt nhiệt độ thấp hơn là 61,6°C. Như vậy, độ chênh lệch nhiệt độ tâm và nhiệt độ bề mặt thân tôm là $\Delta t = 3,2^\circ\text{C}$. Điều này, là do quá trình sấy tôm bằng bơm nhiệt kết hợp

hồng ngoại nhờ khả năng đâm xuyên của tia hồng ngoại vào tâm sản phẩm làm cho nhiệt độ trong tâm cao kết hợp với bề mặt ngoài của thân tôm được làm lạnh bởi không khí khô đã được tách ẩm từ dàn lạnh nên tạo ra độ chênh lệch nhiệt độ $\Delta t = (t_1 - t_4)$ tăng, dòng nhiệt dẫn theo chiều từ trong tâm ra bề mặt ngoài thân tôm, làm xuất hiện thêm dòng ẩm di chuyển cùng chiều dòng nhiệt kết hợp với dòng ẩm di chuyển do chênh lệch áp suất, độ ẩm giữa lớp bên trong và bề mặt ngoài thân tôm. Khi đó sẽ có các dòng ẩm di chuyển cùng chiều, tăng cường quá trình khuếch tán nội, tăng tốc độ sấy và rút ngắn thời gian sấy tôm chỉ còn khoảng 160 phút. Đây là ưu điểm của phương pháp sấy dùng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại so với phương pháp sấy khác.



Hình 9. Biến đổi của đường cong sấy và đường cong nhiệt độ sấy theo thời gian

IV. Kết luận và kiến nghị

1. Kết luận

Quá trình thay đổi nhiệt độ và áp suất bên trong theo hướng bán kính thân tôm khi sấy

bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại cho thấy nhiệt độ và áp suất tại tâm đạt giá trị lớn hơn ở các lớp biên và bề mặt. Theo đó, nhiệt độ và trường áp suất trong tôm liên

tục tăng trong giai đoạn nâng nhiệt còn giai đoạn sấy giảm tốc thì nhiệt giữ độ tăng nhẹ và ổn định còn áp suất lại giảm theo độ ẩm của tôm. Kết luận này hoàn toàn phù hợp với phương trình toán học (6) về sự phụ thuộc của áp suất vào nhiệt độ và hàm lượng ẩm của tôm theo thời gian sấy. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng đường cong thay đổi áp suất trong tôm theo độ ẩm có biên dạng giống như đường cong tốc độ sấy. Đây là một nhận định, đóng góp mới trong lĩnh vực nghiên cứu về truyền

nhiệt truyền ẩm trong sấy tôm thẻ nói riêng và công nghệ sấy thủy sản nói chung.

2. Kiến nghị

Trên đây là một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về sự thay đổi nhiệt độ và trường áp suất trong tôm thẻ sấy. Trong các nghiên cứu tiếp theo nên xác định các thông số nhiệt vật lý của tôm và từ đó giải bài toán truyền nhiệt, mô phỏng và xác định trường nhiệt độ và áp suất trong tôm thẻ chân trắng sấy bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Lê Như Chính, Nguyễn Nguyên An, Phạm Văn Tùy, 2018. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số phương pháp sấy đến chất lượng của tôm thẻ chân trắng khô, tạp chí Năng lượng nhiệt, số 142-7.
2. Trần Đại Tiến, 2007. Nghiên cứu phương pháp sấy và bảo quản mực ống lột da, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Trường ĐH Nha Trang

Tiếng Anh

3. Soner Celen¹ and Kamil Kahveci², 2012. Microwave drying behaviour of apple slices.
4. A. Luikov, 1980. Heat and mass transfer, translated from Russian by Kortneva.
5. Mingheng Shi & Xin Wang, 2004. Investigation on Moisture Transfer Mechanism in Porous Media During Rapid Drying Process.
6. Mr. Worachard Chawanasporn, 2003. Two-dimensional modeling of heat and mass transfer during drying of shrimp.
7. Supawan, Walangkana and Yutthana, 2008. Drying Strategy of Shrimp using Hot Air Convection and Hybrid Infrared Radiation/Hot Air Convection.
8. Song Xiaoyong, Cheng Luming, 2014. Study of Iron Yam-Chip (*Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun) Dehydration Using Far-Infrared Radiation Assisted Heat Pump Drying.
9. Frank M. White, 1991. Fluid Mechanics, University of Rhode Island.
10. Myers RH; Montgomery DC, 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments. Wiley, New York.
11. Phần mềm thiết kế và phân tích thí nghiệm Minitab 16
12. <http://cafef.vn/xuat-khau-tom-se-dat-tren-4-ty-usd-trong-nam-2018-20180621164541548.chn>