

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ ĐẾN KHẢ NĂNG TÁI HYDRAT HÓA KHI SẤY RONG LỤC (*Ulva lactuca*) BẰNG BƠM NHIỆT KẾT HỢP BỨC XẠ HỒNG NGOẠI

Hoàng Thái Hà¹, Lê Thị Hồng Ánh¹,Nguyễn Thị Thảo Minh¹, Nguyễn Thị Phương¹,Nguyễn Thị Thu Huyền¹, Võ Văn Phấn³, Đặng Xuân Cường^{1,2}

TÓM TẮT

Nghiên cứu tập trung về tối ưu hóa điều kiện sấy rong lục *Ulva lactuca* thu mua tại vịnh Cam Ranh – Khánh Hòa bằng công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại theo mô hình thực nghiệm đa nhân tố bậc 1 của Box-Wilson dựa trên hàm mục tiêu tỷ lệ tái hydrat hóa sản phẩm sau sấy. Các chỉ tiêu cảm quan, vật lý (tạp chất, hoạt độ nước), hóa học (chất xơ tổng số và protein tổng số) và vi sinh vật (tổng số vi sinh vật hiếu khí, *E. coli*, *Coliforms*, *Salmonella*, *V. cholerae*, *S. aureus*) được đánh giá trên rong lục sấy bằng 3 phương pháp khác nhau (công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, công nghệ bơm nhiệt và sấy dưới mặt trời). Thực nghiệm cho ra phương trình hồi quy $Y = 81,21 + 0,95X_1 + 0,15X_2 + 1,37X_3 - 0,55X_4 + 0,305X_1X_2 - 0,21X_1X_3 + 0,42X_1X_4 + 0,64X_2X_3 + 0,75X_2X_4 - 0,22X_3X_4$ thể hiện mối tương quan giữa tỷ lệ tái hydrat hóa rong sấy (Y, %) và các nhân tố tác động: nhiệt độ sấy (X_1), nồng độ sorbitol (X_2), chiều dày nguyên liệu sấy (X_3) và tốc độ gió (X_4), trong đó chiều dày nguyên liệu sấy (X_3) ảnh hưởng lên tỷ lệ tái hydrat hóa nhiều hơn so với các yếu tố khác. Điều kiện sấy tối ưu là sorbitol 11%, nhiệt độ sấy 47,5°C, tốc độ gió 1,8 m/s và thời gian sấy là 3,55 giờ. Rong lục khô đã sấy ở điều kiện tối ưu có tỷ lệ tái hydrat hóa là 83,55% và đạt chất lượng cảm quan và vệ sinh an toàn thực phẩm cao hơn so với các phương pháp sấy không khí và sấy dưới ánh nắng mặt trời.

Từ khóa: Rong lục, bơm nhiệt, bức xạ hồng ngoại, sấy, Box-Wilson.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trên thế giới, trong những năm gần đây, rong lục ngày càng được quan tâm sử dụng làm thực phẩm, mỹ phẩm và dược phẩm đặc biệt là trong lĩnh vực y học. Chúng phân bố tập trung tại Philipin, Hàn Quốc, Indonesia, Nhật Bản và rải rác ở các nước khác trên thế giới (Argentina, Bangladesh, Canada, Chile, Pháp, Israel, Italy, Kenya, Bồ Đào Nha) và khu vực với các chi *Ulva*, *Enteromorpha*, *Caulerpa*, *Codium* được sử dụng như là nguồn thức ăn phổ biến. Ở Việt Nam có 152 loài rong lục chủ yếu thuộc các chi (*Ulva*, *Caulerpa*, *Chaetomorpha*, *Enteromorpha*) phân bố ở các thủy vực nước lợ ở Quảng Ninh, Thanh Hóa, Hải Phòng, Hà Tĩnh, Nam Trung bộ, Bà Rịa - Vũng Tàu, Kiên Giang, trong đó chỉ 69 loài *Ulva*. Công bố chính thức về sản lượng và trữ lượng của chi rong *Ulva* cũng như rong *Ulva lactuca* là chưa có, mặc dù *Ulva lactuca* phân bố rộng

với trữ lượng lớn ở khu vực Nam Trung bộ (Phạm Hoàng Hộ, 1969; Nguyễn Hữu Dinh và cs, 1993).

Chi *Ulva* rất giàu protein, polysaccharide (dạng tan trong nước là ulvan, dạng không tan trong nước là cellulose, dạng tan trong kiềm là xyloglucan mạch thẳng và lượng nhỏ glucuronan), các vitamin và các khoáng chất. Rong *Ulva lactuca* đang được sử dụng như làm thức ăn cho tôm, cá, làm mặt nạ đắp mặt, trong sản xuất sản phẩm ăn liền tẩm gia vị hay nấu canh và làm gỏi. Tuy nhiên, cấu trúc tế bào của rong lục rất lỏng lẻo nên dễ bị biến đổi chất lượng gây mùi xấu cho môi trường và khó bảo quản. Người dân và doanh nghiệp đã sử dụng công nghệ sấy dưới ánh nắng mặt trời để làm khô rong *Ulva lactuca* để tận dụng được nguồn năng lượng mặt trời cho việc làm khô rong, nhưng phụ thuộc nhiều vào thời tiết và môi trường, sự biến đổi chất lượng rong nhanh theo thời gian sấy, thời gian bảo quản rong sau sấy ngắn, giá trị dinh dưỡng bị suy giảm cũng như khả năng tái hydrate của rong còn thấp.

Hiện nay, có rất nhiều công nghệ sấy khô khác nhau đã được áp dụng trên thế giới và ở Việt Nam,

¹ Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm Thành phố Hồ Chí Minh

² Viện Nghiên cứu và Ứng dụng Công nghệ Nha Trang

³ Phòng Kinh tế huyện Nhà Bè, thành phố Hồ Chí Minh

như sấy lạnh, sấy nóng, sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, sấy vi sóng mang lại chất lượng cao hơn cho sản phẩm sấy. Trong đó, công nghệ sấy bơm nhiệt đã cải thiện được chất lượng của rong khô nhưng tác động nhiệt là từ bề mặt của rong, nên sự biến đổi chất lượng rong vẫn diễn ra bên trong rong trong quá trình làm khô, bề mặt rong dễ bị nóng và khô hơn so với bên trong sợi cơ rong. Công nghệ sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại đã giúp giảm thiểu sự biến đổi chất lượng của thủy sản nói chung (Nguyễn Thị Mỹ Trang và cs, 2015; Đào Trọng Hiếu và Ngô Đăng Nghĩa, 2005, 2007; Đào Trọng Hiếu, 2013) rong tươi sau sấy nói riêng (Yun *et al.*, 2011; Tae-Hwann *et al.*, 2012; Yingqiang *et al.*, 2014), khắc phục được nhược điểm của các công nghệ sấy bơm nhiệt hay sấy dưới mặt trời, thời gian sấy ngắn hơn, nhiệt độ sấy thấp hơn so với sấy bơm nhiệt bởi nhiệt được sinh ra từ đèn hồng ngoại. Tia hồng ngoại xuyên qua rong, đồng thời sinh ra năng lượng bức xạ hồng ngoại tác động lên nước trong rong, lúc này nước sẽ dao động và sinh động năng, dẫn đến sự va chạm và sinh nhiệt. Khi nhiệt sinh ra dẫn đến sự phân tách và khuếch tán nước từ tâm sản phẩm ra bề mặt sản phẩm đồng đều. Quá trình sấy sẽ nhanh hơn, sự biến đổi xấu chất lượng sản phẩm ít hơn, khả năng tái hydrat hóa sau sấy cao hơn (Tamás và Benedek, 2016).

Vì vậy, nghiên cứu này tập trung vào tối ưu hóa sấy rong lục bằng công nghệ sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại và so sánh chất lượng với sấy bơm nhiệt cũng như sấy bằng năng lượng mặt trời.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

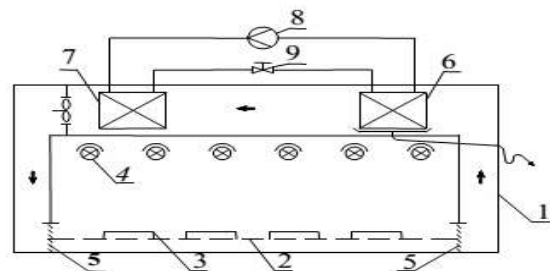
2.1.1. Vật liệu thí nghiệm

Rong lục (*Ulva lactuca*) tươi có độ ẩm ban đầu 87,96%, được thu mua ở vịnh Nha Trang – Khánh Hòa. Rong được vận chuyển trong thùng xốp cách nhiệt và chuyển về Phòng thí nghiệm Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm thành phố Hồ Chí Minh trong thời gian không quá 18 giờ và được rửa sạch bằng nước muối 0,1% trong 5 - 7 phút để loại bỏ tạp chất. Sau đó, rong được ngâm trong sorbitol (dung dịch sorbitol tinh khiết do Hãng Merck - Đức cung cấp) với tỷ lệ 5 - 15%, tùy theo từng thí nghiệm trong thời gian 30 phút với mục đích để rong lục khô có khả năng tái hydrat hóa (khả năng hoàn nguyên trở lại trạng thái gần giống ban đầu) và giữ màu tự

nhiên. Tiếp theo rong được chần ở 85°C trong thời gian 10 giây, để ráo và sấy bơm nhiệt phối hợp bức xạ hồng ngoại đến độ ẩm $20 \pm 0,3\%$.

2.1.2. Thiết bị và dụng cụ thí nghiệm

Thiết bị sử dụng trong nghiên cứu là của Đức (cân phân tích, dụng cụ đo độ ẩm) và của Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm thành phố Hồ Chí Minh chế tạo (thiết bị chần, thiết bị sấy bơm nhiệt phối hợp bức xạ hồng ngoại). Thiết bị sấy bơm nhiệt phối hợp bức xạ hồng ngoại hoạt động theo nguyên lý: không khí ẩm được quạt hút ra từ buồng sấy được làm lạnh và tách ẩm bằng giàn lạnh, sau đó được gia nhiệt bằng giàn nóng đến nhiệt độ nhất định rồi thổi qua bề mặt nguyên liệu kết hợp với gia nhiệt nguyên liệu năng lượng phát ra từ các đèn bức xạ hồng ngoại. Không khí được tuần hoàn. Thiết bị hoạt động với thông số năng suất 5 kg rong lục/mẻ, công suất của các bóng đèn hồng ngoại 4,2 kW, tự động điều chỉnh nhiệt độ với sai số $\pm 0,1^\circ\text{C}$ và vận tốc gió với sai số $\pm 0,1$ m/s. Sơ đồ cấu tạo thiết bị sấy như hình 1.



Hình 1. Thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại

(1: vỏ tủ sấy; 2: giá đỡ nguyên liệu dạng lưới; 3: nguyên liệu sấy; 4: đèn bức xạ hồng ngoại; 5: bộ phận phân phối gió; 6: dàn lạnh; 7: dàn ngưng (dàn nóng); 8: máy nén lạnh; 9: van tiết lưu).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu đã áp dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của 4 yếu tố vào: nhiệt độ sấy Z_1 ($^\circ\text{C}$), nồng độ sorbitol Z_2 (%), chiều dày nguyên liệu Z_3 (cm) và vận tốc gió Z_4 (m/s) đến tỷ lệ tái hydrate hoá rong lục sau khi sấy $Y(\%)$. Ma trận thí nghiệm được xây dựng theo phương án qui hoạch thực nghiệm bậc 1 của Box-Wilson. Số lượng thí nghiệm theo phương án này được tính theo công thức (Phạm Văn Lang và Bạch Quốc Khang, 1998; Mahmoud và Seid, 2017): $N = 2^m + N_0$.

Trong đó: 2^m là số thí nghiệm ở mức trên và dưới (m là số yếu tố ảnh hưởng); N_0 - số thí nghiệm ở mức trung tâm.

Với số yếu tố đầu vào $m = 4$ và chọn số thí nghiệm ở mức trung tâm $N_0=4$ thì số thí nghiệm là:

$$N=2^4+4=20 \quad (1)$$

Biến thực Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 chuyển sang biến mã mới không thứ nguyên X_1, X_2, X_3, X_4 theo công thức sau:

$$X_i = \frac{Z_i - Z_{i0}}{\Delta Z_i} \quad (2)$$

$$\Delta Z_i = \frac{Z_{it} - Z_{id}}{2} \quad (3)$$

X_i - biến mã hoá của yếu tố thứ i ($i = 1 - 4$); Z_{it}, Z_{i0}, Z_{id} - biến thực của yếu tố thứ i ở mức trên, mức cơ sở và mức dưới; ΔZ_i - khoảng biến thiên của yếu tố thứ i ; Z_{it}, Z_{i0}, Z_{id} có giá trị mã hóa -1; 0; +1.

Mức biến thiên, khoảng biến thiên và giá trị mã hoá của các yếu tố được lựa chọn theo bảng 1.

Bảng 1. Mức biến thiên, khoảng biến thiên và biến mã hoá của các yếu tố Z_i

Các mức	Các yếu tố ảnh hưởng			
	Z_1 (°C) Nhiệt độ	Z_2 (%) Nồng độ sorbitol	Z_3 (cm) Chiều dày nguyên liệu sấy	Z_4 (m/s) Vận tốc gió
Mức trên (+1)	50	15	3	3
Mức cơ sở (0)	45	10	2	2
Mức dưới (-1)	40	5	1	1
Khoảng biến thiên ΔZ_i	5	5	1	1

Phương trình của hàm mục tiêu tỷ lệ tái hydrat hoá Y biểu diễn dạng bậc 1 (Dov *et al.*, 2009):

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m b_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

2.3. Phương pháp xác định một số thông số của quá trình sấy

Nhiệt độ dòng khí sấy được xác định bằng thiết bị đo nhiệt độ điện tử hiện số mã hiệu SGK-MF-904 (Hong Kong), khoảng đo -40°C - 200°C, sai số 0,5°C. Vận tốc gió được xác định bằng thiết bị đo tốc độ gió Testo 405 - V_1 (Đức).

Độ ẩm vật liệu sấy được xác định bằng phương pháp sấy đến khối lượng không đổi ở 105°C. Mức độ

biến đổi độ ẩm trong quá trình sấy được tính theo công thức thực nghiệm (Nguyễn Thị Mỹ Trang và cs, 2015): W_2 (%) = $100 - [G_1(100 - W_1)]/G_2$, trong đó: G_1, G_2 là khối lượng của nguyên liệu trước và sau khi sấy (g); W_1, W_2 là độ ẩm của nguyên liệu trước và sau khi sấy (%). Thời gian sấy là khoảng thời gian thực hiện một mẻ sấy được tính từ lúc bắt đầu sấy đến khi sản phẩm đạt độ khô theo yêu cầu công nghệ 20% và được xác định bằng đồng hồ đo thời gian thông dụng.

Tỷ lệ tái hydrat hóa H_w (%): cân 20 gam (m_1) rong lục đã được sấy khô cho vào vào 250 ml nước cất. Sau 15 phút vớt rong lục ra, để ráo nước trong 5 phút và cân khối lượng mẫu rong lục đã ngâm nước (m_2). Tỷ lệ tái hydrat hóa của rong lục tính theo công thức: H_w (%) = $(m_2 - m_1)/m_1$ (Nguyễn Thị Mỹ Trang và cs, 2015).

Chất lượng cảm quan của rong lục khô được đánh giá theo phương pháp cho điểm với thang điểm 20 mô phỏng theo TCVN 3215-79. Hội đồng đánh giá gồm 7 thành viên, bảng điểm cảm quan được xây dựng 6 bậc theo thang điểm từ 0-5 điểm.

Định lượng protein và nitơ tổng số theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 3705: 1990.

Xác định tổng số vi sinh vật hiếu khí (Kl/g) theo TCVN 5367: 1991; *Escherichia coli* (Kl/g) theo TCVN 7924-2008; *Coliforms* (Kl/g) theo TCVN 4882: 2007; *Samonella* sp. (Kl/g) theo TCVN 4829: 2005; *Vibrio cholerae* (Kl/g) theo TCVN 7905-1: 2008; *Staphylococcus aureus* (Kl/g) theo TCVN 4830-1: 2005.

2.4. Phân tích dữ liệu

Mỗi nghiệm thức được lặp lại 3 lần. Phân tích thống kê, ANOVA và tối ưu hóa bằng phần mềm Statgraphics centurion XVI và Excel.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tối ưu hóa sấy rong lục

Dựa vào kết quả khảo sát miền tối ưu, với nồng độ sorbitol từ 5 - 15%, vận tốc gió thay đổi trong khoảng 1 - 3 m/s, chiều dày nguyên liệu sấy 1-3 cm và nhiệt độ sấy trong khoảng 40-50°C, khi tăng nồng độ sorbitol, thời gian sấy càng dài, chất lượng cảm quan, tỷ lệ tái hydrat hoá của tôm sấy càng thấp. Nồng độ sorbitol hơn 15%, chất lượng cảm quan, tỷ lệ tái hydrat hoá của rong lục sấy thấp hơn so với nồng độ 5 - 15%. Tốc độ gió lớn hơn 3 m/s, rong sấy có tỷ

lệ tái hydrat hoá và chất lượng cảm quan thấp hơn khi rong sấy với tốc độ gió 1 - 3 m/s. Nhiệt độ sấy 45°C cho rong khô có chất lượng cảm quan và tỷ lệ tái hydrat hoá đạt mức cao hơn so với các nhiệt độ khác. Chiều dày nguyên liệu sấy lớn hơn 3 cm, thời

gian sấy khô rong kéo dài, tỷ lệ tái hydrat hoá thấp hơn khi sấy rong với chiều dày nguyên liệu từ 1 - 3 cm (Bảng 2). Tỷ lệ tái hydrat dao động từ 77,56% đến 83,92% trong khoảng tối ưu và 81,42% ở thí nghiệm trung tâm.

Bảng 2. Ma trận và kết quả thí nghiệm theo mô hình bậc 1 của Box-Wilson

Số TN	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₂₃	X ₂₄	X ₃₄	Y
Số TN trong phương án 2k	40,0	5,0	1,0	1,0	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	80,82
	50,0	5,0	1,0	1,0	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	81,92
	40,0	15,0	3,0	1,0	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	82,98
	40,0	5,0	3,0	3,0	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	79,40
	50,0	15,0	1,0	1,0	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	80,01
	40,0	15,0	3,0	3,0	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	81,60
	50,0	5,0	1,0	3,0	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	80,35
	40,0	5,0	3,0	1,0	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	83,23
	40,0	15,0	1,0	1,0	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	77,76
	50,0	5,0	3,0	1,0	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	83,31
	50,0	15,0	3,0	3,0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	84,98
	50,0	15,0	3,0	1,0	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	83,72
	50,0	15,0	1,0	3,0	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	81,53
	40,0	5,0	1,0	3,0	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	78,03
	50,0	5,0	3,0	3,0	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	81,02
	40,0	15,0	1,0	3,0	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	77,90
Số thí nghiệm ở tâm	45,0	10,0	2,0	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81,42
	45,0	10,0	2,0	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81,42
	45,0	10,0	2,0	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81,45
	45,0	10,0	2,0	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81,42

Phân tích thống kê cho thấy sai số chuẩn của tất cả các mẫu đều nhỏ hơn 5% với mức thống kê có ý nghĩa ($p < 0,05$), đồng nghĩa với tỷ lệ tái hydrat hóa sản phẩm sấy bị ảnh hưởng bởi cả 4 yếu tố đầu vào là nồng độ sorbitol, nhiệt độ sấy, chiều dày nguyên liệu sấy và vận tốc gió. Trong đó chiều dày nguyên liệu sấy có tác động mạnh nhất đến tỷ lệ tái hydrat hoá sản phẩm sấy ($b_3 = 1,37$), tiếp đến nhiệt độ sấy ($b_1 = 0,95$), vận tốc gió ($b_4 = -0,55$) và sau cùng là nồng độ sorbitol ($b_2 = 0,15$) ($p < 0,05$). Như vậy, khi chiều dày nguyên liệu sấy càng cao, nhiệt độ sấy càng cao, nồng độ sorbitol ngâm nguyên liệu sấy càng thấp, vận tốc gió càng cao dẫn đến tỷ lệ tái hydrat hóa cao. Mô hình thực nghiệm và mô hình tiên đoán đều đưa ra kết quả hàm bậc 1 có ý nghĩa về mặt thống kê ($p < 0,05$), do đó giữa lý thuyết và thực nghiệm là phù hợp và đảm bảo độ tin cậy trong nghiên cứu thực nghiệm. Mô hình sấy tuân theo phương trình tuyến tính bậc 1 bởi thời gian sấy càng dài, chất lượng cảm quan của rong lục càng giảm, khả năng tái hydrat hóa cũng giảm. Bảng kết quả phân tích ANOVA mô hình đáp ứng cũng chỉ ra mối tương quan chặt chẽ

giữa các yếu tố tác động đã nghiên cứu lên hàm mục tiêu Y ($R^2 > 0,9$).

Bảng 3. Kết quả phân tích ANOVA mô hình đáp ứng

Hệ số	Giá trị b	Giá trị thực	Giá trị p
Hàng số	b_0	81,21	$< 0,0001^*$
A: Nhiệt độ sấy (X_1)	b_1	0,95	0,0000
B: Nồng độ sorbitol (X_2)	b_2	0,15	0,0368
C: Chiều dày nguyên liệu (X_3)	b_3	1,37	0,0000
D: Vận tốc gió (X_4)	b_4	- 0,55	0,0000
$X_1 X_2$	b_{12}	0,305	0,0008
$X_1 X_3$	b_{13}	- 0,21	0,0062
$X_1 X_4$	b_{14}	0,42	0,0001
$X_2 X_3$	b_{23}	0,64	0,0000
$X_2 X_4$	b_{24}	0,75	0,0000
$X_3 X_4$	b_{34}	- 0,22	0,0056

Sau khi tính toán và kiểm tra, đảm bảo sự tương thích của mô hình toán học với thực nghiệm, mô

hình toán học được xác định là phương trình tuyến tính:

$$Y = 81,21 + 0,95X_1 + 0,15X_2 + 1,37X_3 - 0,55X_4 + 0,305X_1X_2 - 0,21X_1X_3 + 0,42X_1X_4 + 0,64X_2X_3 + 0,75X_2X_4 - 0,22X_3X_4 \quad (5)$$

Giải phương trình hồi quy hàm thời gian sấy Y bằng cách đạo hàm riêng đối với mỗi yếu tố X_i và cho bằng 0 ta được hệ 4 phương trình tuyến tính. Giải hệ phương trình này, được giá trị tối ưu dạng mã của các yếu tố vào X_1, X_2, X_3 và X_4 như sau:

$$\begin{cases} X_1 = 1,5 \\ X_2 = 0,2 \\ X_3 = 0,6 \\ X_4 = -0,2 \end{cases} \quad (6)$$

Thay các giá trị X_1, X_2, X_3, X_4 từ công thức (6) vào công thức (5) xác định được giá trị tối ưu của tỷ lệ tái hydrat hóa là $Y = 83,55\%$.

Chuyển sang giá trị thực của các yếu tố X_i theo công thức:

$$Z_i = X_i \cdot \Delta Z_i + Z_i^0 \quad (7)$$

Thay giá trị X_1, X_2, X_3 từ công thức (6) vào công thức (7), có giá trị tối ưu dạng thực của các yếu tố vào như sau:

$$Z_1 = 1,5 \cdot 5 + 40 = 47,5^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$Z_2 = 0,2 \cdot 5 + 10 = 11\% \quad (9)$$

$$Z_3 = 0,6 \cdot 1 + 2 = 2,6 \text{ cm} \quad (10)$$

$$Z_4 = -0,2 \cdot 1 + 2 = 1,8 \text{ m/s} \quad (11)$$

Như vậy, chế độ tối ưu sấy rong lục bằng phương pháp sấy phối hợp bơm nhiệt và bức xạ hồng ngoại như sau: nồng độ sorbitol 11%, nhiệt độ không khí trong buồng sấy $47,5^\circ\text{C}$ và tốc độ dòng khí sấy 1,8 m/s và chiều dày nguyên liệu sấy 2,6 cm. Ứng với chế độ sấy tối ưu của các yếu tố vào nêu trên thì tỷ lệ tái hydrat hóa đạt giá trị cao nhất $Y_{\max} = 83,55\%$.

Trên cơ sở các thông số tối ưu đã tìm được, đã tiến hành 3 thí nghiệm lặp lại ở chế độ tối ưu của các yếu tố vào: nồng độ sorbitol 11%, nhiệt độ không khí trong buồng sấy $47,5^\circ\text{C}$ và tốc độ dòng khí sấy 1,8 m/s và chiều dày nguyên liệu sấy 2,6 cm. Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu chất lượng sản phẩm được ghi trong bảng 4.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm sấy tại các thông số tối ưu

Thí nghiệm	Nhiệt độ dòng khí sấy ($Z_1, ^\circ\text{C}$)	Nồng độ sorbitol ($Z_2, \%$)	Chiều dày nguyên liệu sấy (Z_3, cm)	Vận tốc gió ($Z_4, \text{m/s}$)	Thời gian sấy (τ, h)	Tỷ lệ tái hydrat hóa ($H_w, \%$)	Chất lượng cảm quan ($Q, \text{điểm}$)
1	47,5	11	2,6	1,8	3,50	83,50	18,39
2	47,5	11	2,6	1,8	3,48	81,36	18,38
3	47,5	11	2,6	1,8	3,52	81,59	18,38
Giá trị trung bình					3,50	82,15	18,38

Bảng 4 cho thấy, sai số giữa tính toán và thực nghiệm đối với các hàm tỷ lệ tái hydrat hóa H_w là 1,4% (nhỏ hơn 5%), vì vậy kết quả nghiên cứu xác định các thông số tối ưu của quá trình sấy rong lục đảm bảo độ tin cậy.

Ngoài việc xác định hàm tỷ lệ tái hydrat hóa H_w , đã tiến hành xác định thời gian sấy (τ, h) và chất lượng cảm quan sản phẩm sấy ($Q, \text{điểm}$). Ứng với chế độ sấy tối ưu của các yếu tố vào như trong bảng 4, thì thời gian sấy và chất lượng cảm quan của rong lục khô có giá trị tương ứng là 3,5 h và 18,38 điểm. Điều kiện này phù hợp về mặt công nghệ và thực tiễn khi phân tích so sánh trong điều kiện của Việt Nam, cũng như các công bố trên thế giới về sấy rong lục khô bằng công nghệ sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại (Yun *et al.*, 2011; Yingqiang *et al.*, 2014).

Sự khác biệt về vận tốc gió so với công bố trên thế giới có thể do hàm ẩm trong dòng khí, đặc tính nguyên liệu rong (loại rong, chất lượng rong, vùng sinh trưởng, giai đoạn rong được khai thác, kỹ thuật khai thác và bảo quản rong).

3.2. Xác định một số chỉ tiêu chất lượng sản phẩm rong lục khô

Dựa trên các điều kiện tối ưu sấy rong lục bằng công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, tiến hành đánh giá chất lượng rong lục khô song hành với rong lục được sấy bằng không khí nóng và sấy dưới ánh nắng mặt trời. Rong nguyên liệu sấy được chuẩn bị và phân lô giống nhau áp dụng bằng 3 công nghệ sấy khác nhau. Chất lượng sản phẩm rong lục khô giảm dần theo thứ tự: sấy bằng bơm nhiệt phối hợp bức xạ hồng ngoại, sấy bằng không khí

nóng và sấy dưới mặt trời (Bảng 5). Rong lục sấy bằng bơm nhiệt phối hợp bức xạ hồng ngoại có chất lượng tốt nhất cả về cảm quan, vật lý, hóa học cũng như vi sinh vật, điều này cũng được khẳng định trong các công bố trước đây (Yun *et al.*, 2011; Yingqiang *et al.*, 2014). Yun *et al.* (2011) chỉ ra, cấu trúc vi mô của sợi cơ rong được làm khô bằng tia hồng ngoại tương tự như mẫu tươi. Rong sấy khô bằng tia hồng ngoại ít co ngót khi sấy khô, màu sắc tươi sáng hơn và khả

năng bù nước tốt hơn các sản phẩm sấy bằng công nghệ chỉ bơm nhiệt. Màu sắc rong khô sấy bằng bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có giá trị xanh lục cao hơn rong sấy bằng không khí nóng và sấy dưới mặt trời.

Không tìm thấy sự khác biệt đáng kể nào về giá trị protein, DMA hoặc L giữa tất cả các mẫu đã sấy khô (Yun *et al.*, 2011; Yingqiang *et al.*, 2014).

Bảng 5. Điều kiện sấy và chất lượng của sản phẩm rong lục khô

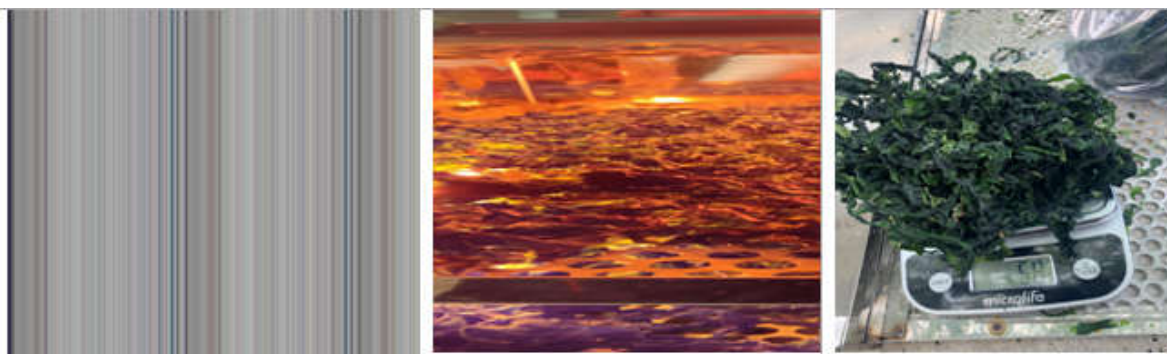
Thông số sấy	Đơn vị tính	Điều kiện sấy		
		Sấy bơm nhiệt kết hợp BXHN	Sấy bằng không khí nóng	Sấy dưới ánh nắng mặt trời
Nồng độ sorbitol	%	11	11	11
Nhiệt độ sấy	°C	47,5	55 - 70	33 - 36
Vận tốc gió	m/s	1,8	1,8	
Chiều dày nguyên liệu sấy	cm	2,6	2,6	2,6
Độ ẩm rong ban đầu	%	87,96	87,96	87,96
Độ ẩm rong sau khi sấy	%	20 ± 0,3	20 ± 0,7	24 ± 0,3
Chỉ tiêu cảm quan		Chất lượng cảm quan		
Màu sắc		Màu đặc trưng của rong màu xanh lục, lóng lánh	Màu xanh lục nhưng không lóng lánh	Màu hơi xanh đậm nhưng không tươi
Mùi		Mùi thơm đặc trưng của sản phẩm rong khô, không có mùi lạ	Mùi thơm đặc trưng của rong khô, không có mùi lạ, hơi có mùi hôi khét	Mùi thơm đặc trưng của rong khô truyền thống, không có mùi lạ, hơi có mùi hôi khét
Vị		Vị đặc trưng rong lục tươi	Vị hơi đặc trưng rong lục tươi	Vị ít đặc trưng rong lục tươi
Trạng thái		Dai, mềm, không nhũn, ít nhót, rong lục thân không bị đứt, thân có màu xanh không sẫm màu.	Ít dai, mềm, không nhũn, ít nhót, rong lục thân không bị đứt, thân có màu xanh nhưng hơi sẫm.	Kém dai, mềm, không nhũn, ít nhót, rong lục thân không bị đứt, thân có màu xanh nhưng hơi sẫm.
Chỉ tiêu vật lý		Kết quả vật lý		
Cường độ màu xanh lục		57,77	49,32	35,88
Tỷ lệ gãy vụn		3	8	12
Tỷ lệ tái hydrat hóa	%	83,55 ± 2,01	71,52 ± 2,04	63,26 ± 2,09
Lượng tạp chất	%	0	0	0
Hoạt độ nước		0,44 ± 0,03	0,52 ± 0,03	0,59 ± 0,04
Thời gian	h	3,55	4,5	24
Chỉ tiêu hóa học		Kết quả hóa học		
Chất xơ tổng số	%	32,28 ± 0,04	32,28 ± 0,04	32,28 ± 0,04
Protein tổng số	%	43,92 ± 0,09	43,92 ± 0,09	43,92 ± 0,09
Chỉ tiêu vi sinh vật		Kết quả vi sinh vật		
Tổng số vi sinh vật hiếu	Kl/g	2,0 x 10 ²	3,0 x 10 ²	3,8 x 10 ²

khí				
<i>E. coli</i>	Kl/g	-	-	-
Coliforms	Kl/g	-	-	-
<i>Samonella</i>	Kl/g	-	-	-
<i>V. cholerae</i>	Kl/g	-	-	-
<i>S. aureus</i>	Kl/g	-	-	-

“-”: Không phát hiện

Vi khuẩn hiếu khí của rong lục khô trong không khí được làm nóng tăng sau khi sấy, nhưng tỷ lệ tăng thấp hơn ở rong sấy bằng công nghệ bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại. Độ bền cắt và độ xuyên thấu của rong khô hồng ngoại xa tương đối thấp hơn. Ngoài ra, sấy rong bằng tia hồng ngoại xa tiêu thụ ít năng lượng hơn so với sấy bằng không khí nóng (Tae-Hwann *et al.*, 2012). Trong nghiên cứu này, rong lục được sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có chất lượng rất tốt và đảm bảo tiêu chuẩn vệ

sinh an toàn thực phẩm theo quy định hiện hành của Bộ Y tế, hoàn toàn có thể triển khai ở quy mô công nghiệp hoặc chuyển giao công nghệ cho người dân để đáp ứng nhu cầu về chất lượng sản phẩm ngày càng cao của người tiêu dùng trong nước và trên thế giới. Ngoài sản phẩm rong lục sấy, công nghệ sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại sẽ được ứng dụng nhiều trong lĩnh vực công nghệ sau thu hoạch góp phần đảm bảo chất lượng các sản phẩm có nguồn gốc từ tự nhiên.



Hình 2. Hình ảnh sấy rong lục bằng bơm nhiệt phối hợp bức xạ hồng ngoại

Ghi chú: Rong lục tươi; b) Rong lục trong thiết bị sấy phối hợp bơm nhiệt và BXHN; c) Rong lục khô

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã thiết lập được phương trình tuyến tính $Y = 81,21 + 0,95X_1 + 0,15X_2 + 1,37X_3 - 0,55X_4 + 0,305X_1X_2 - 0,21X_1X_3 + 0,42X_1X_4 + 0,64X_2X_3 + 0,75X_2X_4 - 0,22X_3X_4$, để biểu diễn mối quan hệ giữa tỷ lệ tái hydrat hóa Y với nhiệt độ sấy X_1 , nồng độ sorbitol X_2 , chiều dày nguyên liệu sấy X_3 và tốc độ gió X_4 , trong đó chiều dày nguyên liệu sấy X_3 là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến tỷ lệ tái hydrat hóa sản phẩm rong lục sấy. Thời gian sấy tối ưu ở 3,55 giờ và tỷ lệ tái hydrat hóa đạt 83,55% khi giá trị các yếu tố đầu vào tương ứng nồng độ sorbitol 11%, nhiệt độ sấy 47,5°C, chiều dày nguyên liệu sấy 2,6 cm và vận tốc gió 1,8 m/s. Rong lục sấy ở điều kiện tối ưu này đạt chất lượng cảm quan, vệ sinh an toàn thực phẩm và có chất lượng dinh dưỡng vượt trội so với các phương pháp sấy bằng không khí

nóng và sấy dưới ánh nắng mặt trời. Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng để hoàn thiện công nghệ và triển khai ứng dụng rộng rãi trong sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Dov P., Maria L. G., 2009. Post - harvest Pathology, Springer Science & Business Media, pp. 212.
2. Đào Trọng Hiếu, Ngô Đăng Nghĩa, 2005. Nghiên cứu chế độ sấy tối ưu cho sản phẩm cá cơm khô bằng phương pháp sấy kết hợp hồng ngoại và bơm nhiệt. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy sản, 02, 8-11.
3. Đào Trọng Hiếu, Ngô Đăng Nghĩa, 2007. Một số kết quả nghiên cứu ứng dụng thiết bị sấy hồng ngoại kết hợp sấy lạnh để sấy rong lục lột da xuất khẩu. Tạp chí Thông tin Khoa học Công nghệ và Kinh tế thủy sản, 5, 24-26.

4. Đào Trọng Hiếu, 2013. Nghiên cứu sự biến đổi thành phần hóa học, tính chất vật lý và đề xuất biện pháp nâng cao chất lượng cá cơm săng (*Spratelloides gracilis*) sấy hồng ngoại xuất khẩu. Luận án tiến sĩ kỹ thuật chuyên ngành Công nghệ chế biến thủy sản, Trường Đại học Nha Trang.
5. Mahmoud Y., Seid M. J., 2017. Applications of response surface methodology in the food industry processes. Food Bioproc Tech., 10, 413–433.
6. Nguyễn Hữu Dinh, Huỳnh Quang Năng, Trần Ngọc Bút, Nguyễn Văn Tiến, 1993. Rong biển Việt Nam (phần phía Bắc). Nxb Khoa học và Kỹ thuật, thành phố Hồ Chí Minh, 364 trang.
7. Nguyễn Thị Mỹ Trang, Vũ Ngọc Bội, Nguyễn Thị Hương, Hoàng Thái Hà, Đặng Xuân Cường, 2015. Nghiên cứu tối ưu hóa công đoạn sấy rong nho (*Caulerpa lentillifera* J. Agardh) bằng phương pháp sấy lạnh kết hợp bức xạ hồng ngoại. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy sản, 02, 133-139.
8. Phạm Hoàng Hộ, 1969. Rong biển Việt Nam (Marine algae of South Vietnam). Trung tâm Học liệu xuất bản, Sài Gòn. 558 trang. *Ulva lactuca*
9. Phạm Văn Lang, Bạch Quốc Khang, 1998. Cơ sở lý thuyết quy hoạch thực nghiệm và ứng dụng trong kỹ thuật nông nghiệp. Nxb Nông nghiệp.
10. Tae-Hwann K., Hyun-Gi H., Hongyoung J., Chung-Su H., 2012. Drying characteristics of squids according to far infrared and heated air drying conditions. Journal of Biosystems Engineering, 36 (2), 109 – 115.
11. Tamás A., Benedek K., 2016. Investigation of hot air - and infrared - assisted freeze - drying of apple. J Food Process Preserv, 40 (2), 257 - 269.
12. Yun D., Yumin L., Bingjun Q., Shuqiang S., Juan W., Xiaoyong S., Hongshun Y., 2011. Impact of far-infrared radiation-assisted heat pump drying on chemical compositions and physical properties of squid (*Illex illecebrosus*) fillets. European Food Research and Technology, 232, 761–768.
13. Yingqiang W., Min Z., Arun S. M., Huizhi C., 2014. Drying and quality characteristics of shredded squid in an infrared-assisted convective dryer. Drying Technology, 32(15), 1828-1839.

STUDY ON SOME PARAMETERS EFFECT OF INFRARED - ASSISTED HEATING PUMP DRYING FOR THE REHYDRATING ABILITY OF GREEN ALGAE (*Ulva lactuca*) AFTER DRYING

Hoang Thai Ha, Le Thi Hong Anh, Nguyen Thi Thao Minh,
 Nguyen Thi Phuong, Nguyen Thi Thu Huyen,
 Vo Van Phang, Dang Xuan Cuong

Summary

The article focused on optimizing the drying conditions of green seaweed purchased at Nha Trang fishing port by infrared radiation-assisted heating pump technology according to Box-Wilson's first multifactor experimental model based on the target function drying time. Sensory, physical (re-hydration capacity, impurities, water activity), chemistry (nitrogen and total protein), and microorganism (total aerobic microorganisms, *E. coli*, *Coliforms*, *Salmonella*, *V. cholerae*, *S. aureus*) were evaluated on drying squid by using 03 different methods (infrared radiation – assisted heating pump technology, heat pump technology, and sun drying). The experiments showed that the equation $Y = 81.21 + 0.95X_1 + 0.15X_2 + 1.37X_3 - 0.55X_4 + 0.305X_1X_2 - 0.21X_1X_3 + 0.42X_1X_4 + 0.64X_2X_3 + 0.75X_2X_4 - 0.22X_3X_4$ exhibited the correlation between the rate of re-hydration ($Y, \%$) and the impact factors drying temperature (X_1), sorbitol concentration (X_2), drying material thickness (X_3) and wind speed (X_4), in which the drying material thickness (X_3) had a stronger effect on drying time than other factors. Optimal drying conditions were sorbitol (11%), drying temperature (47.5°C), drying material thickness (2.6 cm), wind speed (1.8 m/s) and the rate of re-hydration (83.55%). Dried green seaweed under optimum conditions for sensory quality, food hygiene and safety and higher safety than the air drying and sun drying methods.

Keywords: Green seaweed, heat pump, infrared radiation, drying, Box-Wilson.

Người phản biện: PGS.TS. Trần Như Khuyến

Ngày nhận bài: 25/6/2021

Ngày thông qua phản biện: 27/7/2021

Ngày duyệt đăng: 3/8/2021