

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SẤY CHANH BẰNG PHƯƠNG PHÁP SẤY BƠM NHIỆT KẾT HỢP HỒNG NGOẠI

EXPERIMENTAL STUDY OF INFRARED – ASSISTED HEAT PUMP DRYING OF LIME SLICES

Nguyễn Minh Hạ¹, Hà Anh Tùng²

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải Phân hiệu tại TP.HCM, Việt Nam

²Trường Đại học Bách khoa TP.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 16/7/2021, ngày phân biên đánh giá 28/7/2021, ngày chấp nhận đăng 26/8/2021

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm chế độ sấy chanh lát trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại. Các thí nghiệm được tiến hành trên mô hình máy sấy bơm nhiệt công suất 1HP kết hợp với bộ hồng ngoại 2000 W có bộ điều chỉnh công suất từ 0% đến 100%. Thực nghiệm được tiến hành với năng suất sấy 1,2 kg/m²; tốc độ tác nhân sấy 1,2 m/s nhằm đánh giá: ảnh hưởng của bề dày vật liệu đến thời gian sấy; ảnh hưởng của nhiệt độ buồng sấy (tác nhân sấy) và cường độ bức xạ hồng ngoại đến thời gian sấy, mức tiêu hao điện năng và chất lượng sản phẩm sấy. Kết quả cho thấy khi sấy với bề dày lát chanh 3mm, nhiệt độ trong buồng sấy trong khoảng 42,5°C đến 45°C và cường độ bức xạ từ 110W/m² đến 300W/m² là vùng sấy có hiệu quả tốt. Ngoài ra, nghiên cứu đã xây dựng phương trình hồi quy tuyến tính thể hiện mối quan hệ giữa thời gian sấy với nhiệt độ trong buồng sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại; phương trình có thể sử dụng để xác định thời gian sấy thực tế cũng như hỗ trợ quá trình thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại.

Từ khóa: sấy chanh lát; máy sấy bơm nhiệt; máy sấy hồng ngoại; máy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại; hồi quy tuyến tính.

ABSTRACT

This paper describes the experimental drying of lime slices using an infrared –assisted heat pump dryer. Experiments were carried out on a heat pump dryer model with a capacity of 1 HP integrated with 2000 W infrared radiator whose power can be varied from 0% to 100%. Experiments have been performed with the drying capacity of 1,2 kg/batch and the drying air velocity of 1,2 m/s. Three evaluations were considered: the effect of material thickness on drying time; the effect of temperature in drying chamber and intensity of infrared radiation on drying time, power consumption and product quality. The results showed that the drying process having 3 mm thickness of lime slices, the temperature in the drying chamber of 42,5÷45°C and the radiation intensity of 110÷300W/m² was the good effective drying range. In addition, the study formulated a linear regression equation for the drying time relationship with drying chamber temperature and infrared radiation intensity. This mathematical model can be used as reference to determine actual drying time as well as a helpful tool for designing infrared - heat pump dryer.

Keywords: dried lime slices; heat pump dryer; infrared dryer; infrared - heat pump dryer; linear regression.

1. GIỚI THIỆU

Chanh là loại trái cây có nhiều lợi ích trong bảo vệ sức khỏe. Hiện nay, ngoài chanh

tươi thì trên thị trường còn có chanh sấy khô thành phẩm. Sản phẩm chanh sấy khô được đánh giá tốt, có thể sử dụng làm trà, làm thực phẩm chức năng, làm đẹp, gia vị. Hiện nay,

chanh sấy thành phẩm trên thị trường được sấy ở nhiệt độ cao bằng điện trở, do đó ảnh hưởng lớn đến màu sắc, hàm lượng vitamin C, tinh dầu và các vi lượng khác trong chanh [1].

Theo nghiên cứu của Leonard và cộng sự (cs) [2] về ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại đến cấu trúc của chuỗi sấy cắt lát; họ chỉ ra rằng bức xạ hồng ngoại làm tăng độ xốp của chuỗi sấy, giúp chất lượng sản phẩm sấy được nâng cao. Tan và cs [3] nghiên cứu ảnh hưởng bức xạ hồng ngoại đến sự thay đổi màu sắc của dứa và khoai tây; kết quả nghiên cứu cho thấy bức xạ hồng ngoại không làm suy giảm màu sắc của dứa và khoai tây sau khi sấy. Tương tự, Shi và cs [4] nghiên cứu ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại đến việt quất sấy; họ kết luận bức xạ hồng ngoại không phá vỡ cấu trúc quả việt quất sau khi sấy. Paakkonen và cs [5] nghiên cứu chế độ sấy thảo dược bằng bức xạ hồng ngoại; kết quả nghiên cứu cho thấy chất lượng thảo dược được nâng cao, thời gian sấy giảm, tiêu hao điện năng giảm. Qua những nghiên cứu trên thấy rằng bức xạ hồng ngoại có khả năng cấp nhiệt nhanh, đều và ít ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm sấy. Đây là một phương án sấy có thể ứng dụng tốt vào thực tế sản xuất.

Sấy bơm nhiệt là công nghệ sấy ở nhiệt độ thấp, theo các nghiên cứu thì máy sấy bơm nhiệt có hiệu quả sử dụng năng lượng cao, chất lượng sản phẩm sấy như màu sắc, vi lượng được đảm bảo, phù hợp cho sấy các vật liệu nhạy cảm. Có nhiều nghiên cứu về sấy bơm nhiệt, đơn cử như: Fatouh và cs [6] nghiên cứu sấy các loại thảo mộc trên máy sấy bơm nhiệt; các tác giả chỉ ra rằng chất lượng thảo mộc sau khi sấy như màu sắc và vi lượng được đảm bảo tốt, chất lượng suy giảm không đáng kể. Colak và cs [7] nghiên cứu đánh giá hiệu quả exergy quá trình sấy lá bạc hà trên máy sấy bơm nhiệt; họ kết luận hiệu suất exergy của máy đạt 76,03÷97,24%. Erbay và cs [8] nghiên cứu chế độ sấy lá ô liu trên máy sấy bơm nhiệt; kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng hàm lượng Phenolic trong sản phẩm sấy cao, hiệu suất exergy của hệ thống lớn nhất đạt 69,55%.

Sự kết hợp giữa sấy bơm nhiệt với sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại cũng đã được thực hiện trong nhiều nghiên cứu trước đó, đơn cử như: Nathakaranakule và cs [9] nghiên cứu thực nghiệm sấy nhãn sử dụng máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại; kết luận nhãn khô nhanh, độ cứng giảm, tiêu hao năng lượng thấp hơn khi sấy bằng bơm nhiệt thông thường. Deng và cs [10] nghiên cứu thực nghiệm sấy mực trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại; kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng hàm lượng protein, màu sắc của vật liệu sấy không thay đổi nhiều; tuy nhiên, chỉ số vi khuẩn hiếu khí của phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại ít hơn so với sấy bơm nhiệt thông thường. Aktas và cs [11] nghiên cứu đánh giá hiệu suất exergy của máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại để sấy cà rốt cắt lát; kết luận hiệu suất exergy của hệ thống 31,6 ÷ 66,8%, thời gian sấy giảm khoảng 2 lần so với sấy bơm nhiệt thông thường. Xiaoyong [12] nghiên cứu sấy khoai tây trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại; nghiên cứu chỉ ra rằng chất lượng khoai tây sấy được nâng cao, tiêu hao điện năng giảm 37,22% so với sấy bơm nhiệt truyền thống.

Các khảo sát liên quan đến sấy chanh cũng đã được thực hiện thông qua các nghiên cứu như: Matouk và cs [13] nghiên cứu chanh (màu vàng) cắt lát sấy bằng bức xạ hồng ngoại; họ kết luận rằng khả năng giảm ẩm của chanh tăng khi tăng cường độ bức xạ và nhiệt độ sấy; ở cường độ bức xạ 0,973 kW/m² và nhiệt độ sấy là 50°C thì hàm lượng axit citric và vitamin C lớn nhất. Darvishi và cs [14], nghiên cứu ảnh hưởng chế độ sấy đến màu sắc của chanh cắt lát trên máy sấy vi sóng đôi lưu; nghiên cứu chỉ ra rằng màu sắc của chanh sấy sẽ giảm khi tăng nhiệt độ sấy. Tác giả Chin và cs [15] nghiên cứu chế độ sấy và chất lượng của chanh lát sấy khô trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp dòng điện cao tần; nghiên cứu chỉ ra rằng hàm lượng vitamin C của sản phẩm sấy cao nhất ở nhiệt độ 50°C.

Hiện nay, sản phẩm chanh sấy trên thị trường vẫn còn nhiều hạn chế về mặt chất

lượng sản phẩm, vì vậy việc nghiên cứu tìm ra một giải pháp sấy mới cho chanh là cần thiết. Từ những kết quả nghiên cứu trên một số loại trái cây khác đã cho thấy ở trên, phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại đã chứng tỏ là một trong những giải pháp sấy hiệu quả giúp nâng cao chất lượng sản phẩm. Vì vậy, trong bài báo này, nhóm tác giả nhằm đến giải pháp sử dụng bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại để tìm ra chế độ sấy hiệu quả cho chanh cắt lát. Đây cũng là hướng nghiên cứu mà hiện nay tại Việt Nam vẫn chưa có tác giả nào đề cập đến.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Vật liệu sấy

Trong nghiên cứu này, chanh cắt lát được sử dụng làm vật liệu sấy trong các thực nghiệm khảo sát. Chanh (Chanh ta) sau khi chọn mẫu với đường kính $4 \pm 0,5$ cm được rửa sạch và để ráo nước. Sau đó cắt lát với bề dày lần lượt là $3 \pm 0,2$ mm, $4 \pm 0,2$ mm và $5 \pm 0,2$ mm. Mỗi mẻ sấy với khối lượng chanh là 1,2kg. Quá trình sấy kết thúc khi độ ẩm chanh đạt yêu cầu là 13%. Độ ẩm ban đầu của chanh được xác định bằng phương pháp cân. Thời gian kiểm tra mẫu 30 phút. Độ ẩm vật liệu tại một thời điểm được xác định bằng cách cân sau đó tính toán theo công thức (2).

2.2 Phương pháp và mục tiêu thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, chanh cắt lát được sử dụng để làm vật liệu sấy cho thực nghiệm. Độ ẩm ban đầu của chanh được xác định bằng phương pháp tủ sấy và được tính theo công thức [16]:

$$W_o = \frac{G_o - G_c}{G_o} \cdot 100\% \quad (1)$$

Trong đó :

G_o : Khối lượng ban đầu vật liệu; g

G_c : Khối lượng vật liệu sau khi sấy kiệt; g

Độ ẩm vật liệu sấy tại một thời điểm được xác định [17]:

$$W_i = \frac{G_{ni}}{G_i} \cdot 100\% \quad (2)$$

Trong đó :

G_{ni} - Khối lượng nước trong vật liệu tại thời điểm đo; g

G_i - Khối lượng vật liệu tại thời điểm đo; g

Đây là cơ sở để kiểm tra độ ẩm vật liệu trong quá trình thực nghiệm.

Mức tiêu hao điện năng của máy sấy được xác định bằng lượng điện tiêu tốn cho mẻ sấy trên khối lượng sản phẩm thu được:

$$e = \frac{P_t}{G}; kWh / kg \quad (3)$$

Trong đó:

P_t : Lượng điện năng tiêu tốn cấp cho mẻ sấy; kWh

G : Khối lượng sản phẩm sấy; kg

Các chế độ sấy chanh cắt lát khác nhau đã được thực hiện với 3 mục tiêu sau:

Mục tiêu 1: Đánh giá ảnh hưởng của bề dày vật liệu đến thời gian sấy và mức tiêu hao điện năng.

Mục tiêu 2: Đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ buồng sấy (tác nhân sấy) và cường độ bức xạ hồng ngoại đến thời gian sấy.

Mục tiêu 3: Đánh giá mức tiêu hao điện năng và chất lượng chanh sau khi sấy so với phương pháp sấy bơm nhiệt và điện trở.

2.3 Mô hình thực nghiệm

Mô hình máy sấy bơm nhiệt sử dụng trong bài báo được thiết kế dựa trên các yêu cầu sau:

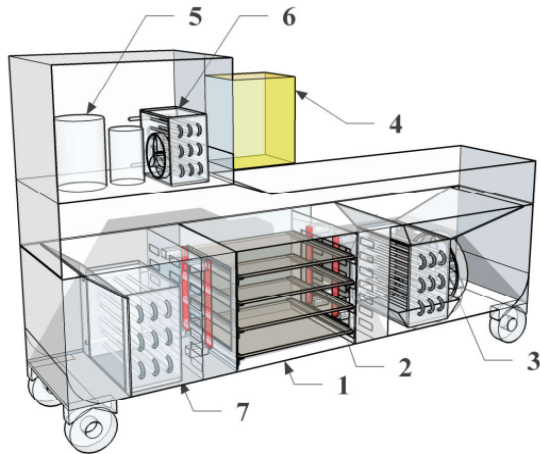
- Vật liệu sấy: Chanh cắt lát

- Độ ẩm ban đầu: 83,7%

- Độ ẩm yêu cầu của sản phẩm: 13%

- Năng suất: 1,2 kg/mê

- Thời gian sấy: 10 giờ.



- 1: Buồng sấy, 2: Đèn bức xạ hồng ngoại,
 3: Dàn bay hơi, 4: Tủ điện, 5: Máy nén,
 6: Dàn ngưng tụ phụ, 7: Dàn ngưng tụ chính

Hình 1. Mô hình máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại

Hình 1 và Bảng 1 thể hiện các thông số kỹ thuật của mô hình sấy đã thiết kế. Để khảo sát ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại lên chất lượng sản phẩm và thời gian sấy, hệ thống đã được tích hợp thêm bộ đèn hồng ngoại gồm 2 bóng, mỗi bóng có công suất 1000W có thể điều chỉnh công suất từ 0÷100%. Ngoài ra, máy sấy cũng có thể điều chỉnh được nhiệt độ sấy trong khoảng 40÷45°C, vận tốc gió 0,5÷1,2m/s. Nhiệt độ tác nhân sấy được kiểm soát bằng role nhiệt độ EW-181H với đầu cảm biến được bố trí ngay giữa buồng sấy có bọc che chắn tránh nhận bức xạ trực tiếp của đèn hồng ngoại.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật máy sấy

STT	Tên bộ phận	Thông số
1	Khung máy	1800x320x1600mm
2	Khay sấy	480x300x95mm
3	Buồng sấy	500x320x400mm
4	Máy nén	1HP, 1 pha/220V
5	Dàn ngưng tụ chính	4,4 m ² , hãng XMG
6	Dàn bay hơi	4,4 m ² , hãng XMG
7	Dàn ngưng tụ phụ	1,2 m ² , hãng XMG
8	Van tiết lưu	TEX02- kim 02
9	Quạt	Q=200 m ³ /h H=55 Pa
10	Đèn hồng ngoại	2 đèn x 1000W

2.4 Bố trí thí nghiệm và dụng cụ đo

Thực nghiệm được bố trí theo phương pháp ngẫu nhiên giá trị trong vùng khảo sát. Ba biến đầu vào là: nhiệt độ sấy được bố trí theo 3 mức 40°C; 42,5°C; 45°C, cường độ bức xạ hồng ngoại được bố trí với 5 mức 50W/m²; 70W/m²; 200W/m²; 280W/m²; 350W/m² và bề dày lát chanh $\delta=3\pm 0,2$ mm được xem xét để khảo sát.

Trong quá trình thực nghiệm, các thông số của chế độ sấy (độ ẩm của chanh, nhiệt độ không khí trong buồng sấy, cường độ bức xạ hồng ngoại, điện năng tiêu thụ) được ghi nhận thông qua các thiết bị/dụng cụ đo sau:

- Role nhiệt độ EW-181H với khoảng đo và kiểm soát nhiệt độ -45÷80°C; độ chính xác $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Công tơ điện Emic độ chính xác $\pm 2\%$ toàn dãy đo (kWh).
- Máy cắt lát hoa quả Dremax; khoảng cắt 1 ± 12 mm; độ chính xác $\pm 0,2$ mm.
- Cân điện tử Kitchen scale loại 5kg; khoảng cân 0÷5000g; độ chính xác ± 1 g.
- Thiết bị đo bức xạ Tenmars TM-206 ; khoảng đo 0÷2000W/m²; độ chính xác $\pm 0,1$ W/m².

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong quá trình thực nghiệm, do bề dày lát cắt rất khó đồng nhất nên độ ẩm ban đầu ít nhiều có sự thay đổi. Vì vậy, ở mỗi mẻ sấy, các lát chanh với bề dày khác nhau được sấy kiệt cho đến khi khối lượng không đổi để xác định độ ẩm ban đầu. Kết quả độ ẩm ban đầu thể hiện như Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả xác định độ ẩm ban đầu của chanh cắt lát với bề dày 3mm, 4mm và 5mm

STT	Bề dày lát chanh (mm)	Độ ẩm ban đầu (%)
1	3	83,7
2	4	84,3
3	5	84,7

Kết quả Bảng 2 cho thấy, với bề dày càng mỏng thì ẩm độ ban đầu càng nhỏ; cụ thể, đối

với lát chanh cắt dày 3mm thì ẩm độ ban đầu là 83,7%, lát chanh cắt dày 4mm thì ẩm độ ban đầu là 84,3%, lát chanh cắt dày 5mm thì ẩm độ ban đầu là 84,7%. Điều này có thể giải thích rằng khi bề dày lát chanh càng mỏng thì tếp chanh ít đi hoặc tếp chanh bị vỡ khi cắt nên lượng ẩm trong mẫu giảm xuống theo bề dày lát cắt.

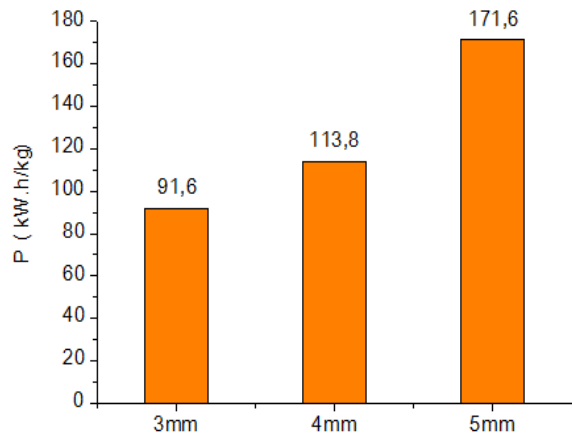
Vì phương pháp sấy hồng ngoại chỉ phù hợp với các sản phẩm sấy mỏng, có độ dày khoảng 1mm đến 5mm, nên nhóm tác giả chỉ thực nghiệm cắt chanh lát trong khoảng bề dày này. Tuy nhiên, thực tế cho thấy với bề dày lát chanh từ 2mm trở xuống, lát chanh rất mỏng, khi sấy khô bị dính vào khay, dễ vỡ khi lấy ra khỏi khay sấy và không giữ được hình dạng ban đầu. Do đó, các bề dày 1mm và 2mm đã không được đưa vào thực nghiệm.

Để đánh giá ảnh hưởng bề dày vật liệu đến thời gian sấy và mức tiêu hao điện năng, nhóm tác giả tiến hành thực nghiệm sấy chanh cắt lát với công suất 1,2kg/m²; tốc độ tác nhân sấy 1,2m/s; nhiệt độ trong buồng sấy 45°C; cường độ bức xạ hồng ngoại 350W/m² cho các bề dày lát chanh lần lượt là 3mm, 4mm và 5mm; ẩm độ yêu cầu cuối cùng là 13%. Kết quả thực nghiệm thể hiện ở Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả thực nghiệm các mẻ sấy chanh cắt lát với bề dày 3mm, 4mm và 5mm

STT	Bề dày lát chanh (mm)	Thời gian sấy (giờ)	Điện năng Tiêu thụ (kW.h)	Độ ẩm cuối (%)
1	3	13	20,6	11,5
2	4	16	25,6	11,5
3	5	24	38,6	12,3

Kết quả thực nghiệm cho thấy, thời gian sấy thay đổi đáng kể khi thay đổi bề dày lát chanh. Thời gian sấy chanh cắt lát 3mm ít hơn thời gian sấy chanh cắt lát 4mm và 5mm lần lượt là 3 giờ và 11 giờ. Mức tiêu hao điện năng khi sấy chanh cắt lát 4mm và 5mm so với chanh cắt lát 3mm tăng lần lượt 24,2% và 87,3%. Kết quả thể hiện như Hình 2.



Hình 2. Mức tiêu hao điện năng khi sấy chanh cắt lát 3mm, 4mm và 5mm

Do đó, trong các thực nghiệm tiếp theo, nhằm thuận tiện cho việc khảo sát, đánh giá các thông số khác, nhóm tác giả đã giữ cố định bề dày chanh cắt lát dày 3mm cho các mẻ sấy.

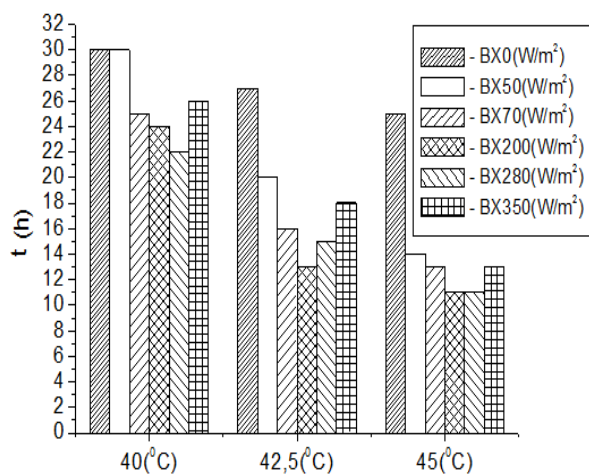
Bảng 4 thể hiện ảnh hưởng của nhiệt độ buồng sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại đến thời gian sấy cũng như đến mức tiêu hao điện năng cho 1kg sản phẩm.

Bảng 4. Kết quả thực nghiệm chế độ sấy chanh cắt lát trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại

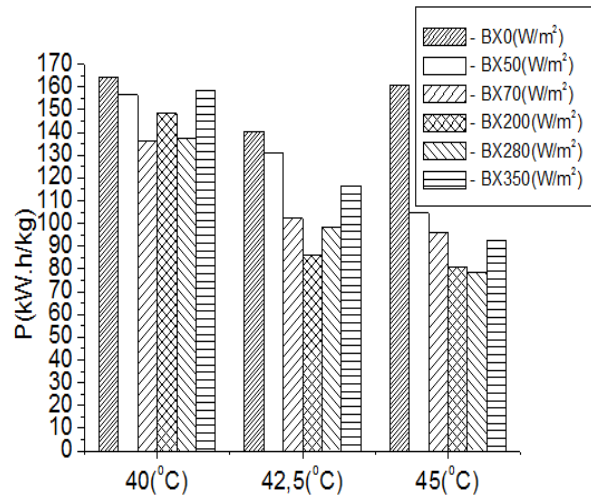
STT	t _{bs} , °C	q _{hn} , W/m ²	Thời gian sấy, giờ	Mức tiêu hao điện năng, kW.h/kg
1	40	0	30	164,0
2		50	29	156,4
3		70	25	136,4
4		200	24	148,4
5		280	22	137,3
6		350	26	158,2
7	42,5	0	27	140,4
8		50	20	131,1
9		70	16	102,2
10		200	13	85,8
11		280	15	98,2
12		350	18	116,4

STT	$t_{bs}, ^\circ\text{C}$	$q_{hn}, \text{W/m}^2$	Thời gian sấy, giờ	Mức tiêu hao điện năng, kW.h/kg
13	45	0	25	160,9
14		50	14	104,5
15		70	13	95,9
16		200	11	80,9
17		280	11	78,2
18		350	13	92,4

Kết quả thực nghiệm từ Bảng 4 cho thấy, nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng lớn đến hiệu quả quá trình sấy. Với nhiệt độ trong buồng sấy từ $40^\circ\text{C} \div 45^\circ\text{C}$ thì cường độ bức xạ hồng ngoại để quá trình sấy hiệu quả nằm trong khoảng $200\text{W/m}^2 \div 280\text{W/m}^2$, thể hiện ở thời gian sấy giảm, kèm với mức tiêu hao điện năng thấp. Tuy nhiên, khi công suất hồng ngoại tăng lên đến 350W/m^2 , hệ thống lại cho thời gian sấy lâu hơn và mức tiêu hao điện năng lớn hơn. Điều này có thể giải thích vì ở mức 350W/m^2 , khi đèn hồng ngoại mới vừa bật thì nhiệt độ buồng sấy đã nhanh chóng đạt nhiệt độ sấy yêu cầu, lúc này đèn hồng ngoại được bộ điều khiển tự động ngắt, dẫn đến các tia bức xạ nhiệt chưa kịp chiếu lâu vào sản phẩm sấy nên làm thời gian sấy lâu hơn. Kết quả thể hiện như Hình 3 và Hình 4.

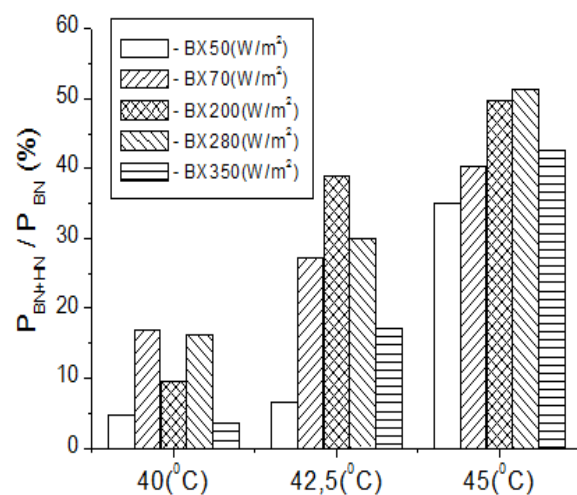


Hình 3. Ảnh hưởng nhiệt độ và cường độ bức xạ đến thời gian sấy



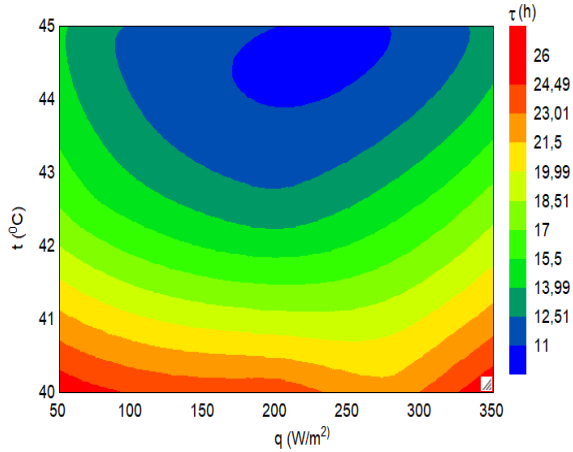
Hình 4. Ảnh hưởng nhiệt độ và cường độ bức xạ đến mức tiêu hao điện năng

Bảng 4 cũng cho thấy, ở chế độ sấy bơm nhiệt có kết hợp bức xạ hồng ngoại $50\text{W/m}^2 \div 350\text{W/m}^2$ thì thời gian sấy giảm từ 1 giờ \div 14 giờ và tiêu hao điện năng giảm từ 3,54% \div 51,4% so với sấy bơm nhiệt đơn thuần (3 thử nghiệm ứng với $q_{hn} = 0$ trong Bảng 4). Rõ ràng, khi kết hợp bức xạ hồng ngoại thì hiệu quả sấy tăng lên rõ rệt. Kết quả thể hiện ở Hình 5.

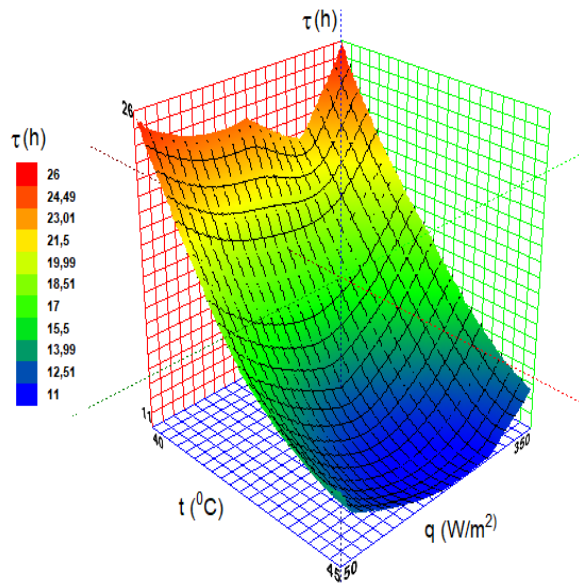


Hình 5. Độ giảm tiêu hao điện năng khi sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại so với sấy bơm nhiệt đơn thuần

Với nhiệt độ trong buồng sấy $42,5^\circ\text{C} \div 45^\circ\text{C}$; cường độ bức xạ $110\text{W/m}^2 \div 300\text{W/m}^2$ thì cho thời gian sấy nhỏ hơn 12 giờ. Đây là vùng sấy có thể tham khảo, áp dụng vào thực tế sản xuất. Kết quả thể hiện như Hình 6 và Hình 7.



Hình 6. Đồ thị Contour thời gian sấy theo nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại



Hình 7. Đồ thị lưới thời gian sấy theo nhiệt độ và cường độ bức xạ hồng ngoại

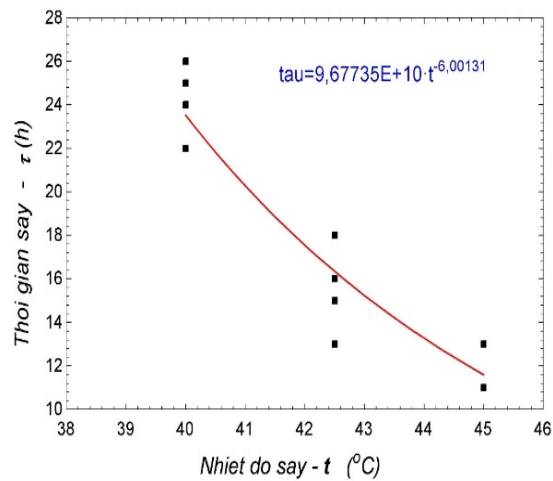
Để xây dựng phương trình hồi quy tuyến tính mối quan hệ thời gian sấy với nhiệt độ trong buồng sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại, qua các thực nghiệm, nhóm tác giả chọn vùng khảo sát:

- Nhiệt độ trong buồng sấy: $t = 40 \div 45^{\circ}\text{C}$
- Cường độ bức xạ: $q = 70 \div 280 \text{ W/m}^2$

Thực hiện phân tích hồi quy, hàm số thời gian sấy τ theo nhiệt độ sấy t được xác định:

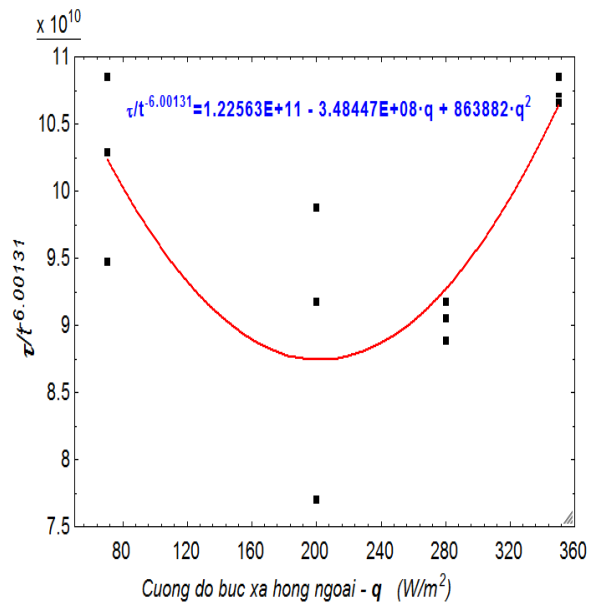
$$\tau = 9,6773 \cdot 10^{10} \cdot t^{-6,00131} \quad (4)$$

Mối tương quan giữa thời gian sấy τ và nhiệt độ sấy t thể hiện như Hình 8.



Hình 8. Mối tương quan τ và t

Tiếp tục thực hiện phân tích hồi quy ảnh hưởng của cường độ bức xạ hồng ngoại q đến hàm số $\tau/t^{-6,00131}$. Kết quả phân tích hồi quy thể hiện như Hình 9.



Hình 9. Mối tương quan $\tau/t^{-6,00131}$ và q

Hàm số $\tau/t^{-6,00131}$ theo q được xác định:

$$\tau/t^{-6,00131} = 1,22563 \cdot 10^{11} - 3,48447 \cdot 10^8 \cdot q + 863882 \cdot q^2 \quad (5)$$

Từ phương trình (4) và (5) ta lập được phương trình hồi quy tuyến tính thời gian sấy theo nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại:

$$\tau = t^{-6,00131} \cdot (1,22563 \cdot 10^{11} - 3,48447 \cdot 10^8 \cdot q + 863882 \cdot q^2) \quad (6)$$

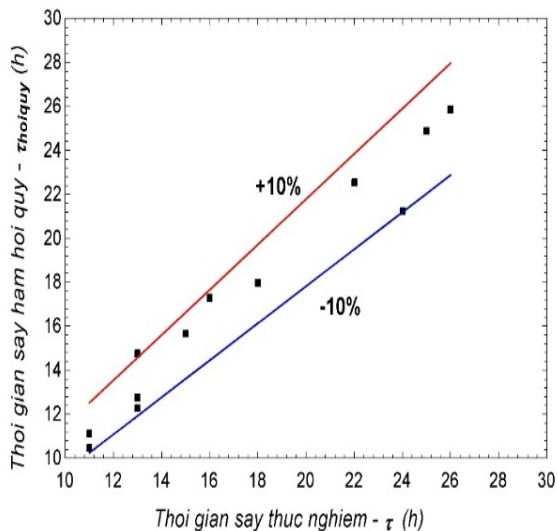
Trong đó:

τ : Thời gian sấy; giờ (h)

t: Nhiệt độ sấy; °C

q: Cường độ bức xạ hồng ngoại; W/m²

Phương trình (6) được lập với hệ số tương quan $R^2=0,9797$. Sai lệch hàm thời gian lập được với kết quả thực nghiệm $\pm 10\%$ thể hiện như Hình 10.

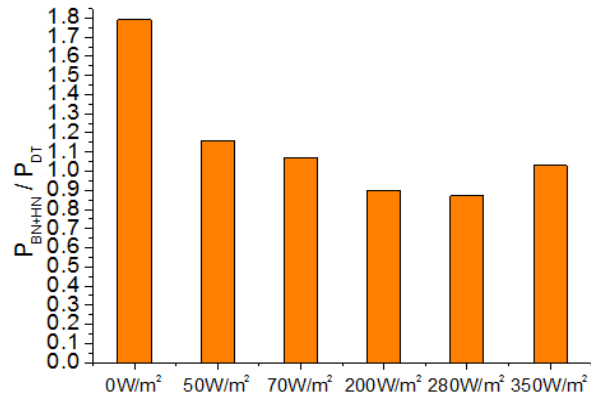


Hình 10. Sai số giữa hàm thời gian sấy lập được so với kết quả thực nghiệm

Kết quả trên cho thấy, phương trình (6) có thể sử dụng để dự đoán thời gian sấy chanh cắt lát 3mm khi sấy trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại với phạm vi $t_s = 40 \div 45^\circ\text{C}$; $q_{bx} = 70 \div 280 \text{ W/m}^2$.

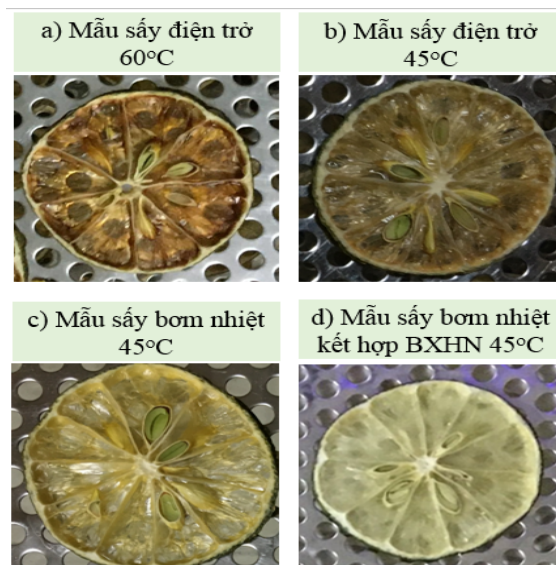
Để đánh giá tiêu hao điện năng và chất lượng sản phẩm khi sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại so với sấy điện trở, tác giả tiến hành thực nghiệm sấy điện trở ở 60°C (nhiệt độ sấy chanh lát hiện đang sử dụng trên thị trường) và sấy điện trở ở 45°C để so sánh với trường hợp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại ở nhiệt độ sấy 45°C .

Kết quả thực nghiệm cho thấy, khi cùng nhiệt độ sấy là 45°C thì tiêu hao điện năng khi sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại thấp hơn so với sấy điện trở, xấp xỉ khoảng $0,87 \div 0,9$ lần (Hình 11) khi sử dụng cường độ bức xạ $200 \div 280 \text{ W/m}^2$.



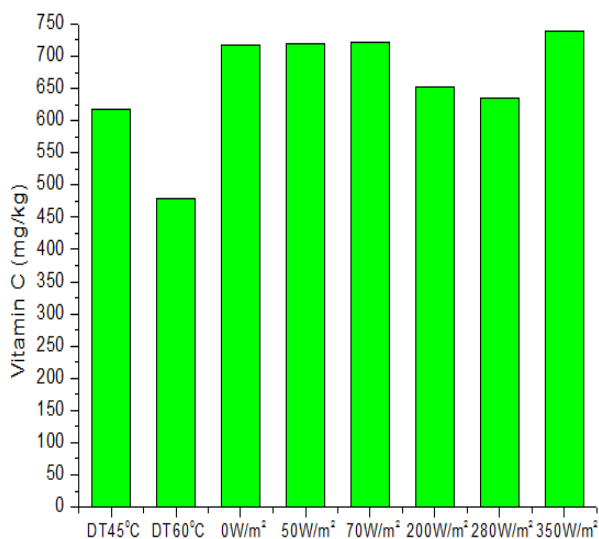
Hình 11. Mức tiêu hao điện năng khi sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại so với sấy bằng điện trở ở nhiệt độ 45°C

Bên cạnh đó, khi đánh giá về cảm quan sản phẩm sử dụng sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, kết quả cho thấy màu sắc các lát chanh vẫn được tươi tương tự như khi sấy bơm nhiệt đơn thuần ở cùng nhiệt độ, trong khi các mẫu sấy bằng điện trở có màu sẫm hơn rõ rệt (Hình 12).



Hình 12. Màu sắc cảm quan của chanh khi sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (d) với sấy điện trở (a,b), bơm nhiệt (c)

Ngoài ra, các mẫu đánh giá về thành phần dinh dưỡng còn lại trong sản phẩm sấy cho thấy thành phần vitamin C của chanh sấy bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại có giá trị trung bình cao hơn từ $3 \div 20\%$ (Hình 13) so với sấy bằng điện trở ở cùng nhiệt độ, và hơn hẳn hàm lượng vitamin C khi sấy ở nhiệt độ 60°C từ $33 \div 55\%$.



Hình 13. Hàm lượng vitamin C trung bình trong chanh lát sấy khô khi sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại và sấy điện trở

Rõ ràng, nếu quan tâm đến chất lượng sản phẩm chanh sấy thì sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại là một phương pháp có thể sử dụng để thay thế phương pháp sấy bằng điện trở.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này trình bày thực nghiệm đánh giá mức tiêu hao điện năng cũng như chất lượng sấy chanh cắt lát trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại. Qua nghiên cứu có một số kết luận như sau:

- Bề dày lát chanh ảnh hưởng lớn đến thời gian sấy và tiêu hao điện năng, qua thực nghiệm cho thấy bề dày phù hợp của lát chanh khi sấy trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại là 3 mm.
- Tiêu hao điện năng khi sấy chanh cắt lát trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ

hồng ngoại giảm từ 3,35÷56,02% so với sấy bơm nhiệt đơn thuần. Qua đó, cho thấy sấy chanh cắt lát trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại tăng hiệu quả sấy và giảm tiêu hao về năng lượng đáng kể.

- Thời gian sấy và hàm lượng vitamin C trong sản phẩm ảnh hưởng nhiều bởi nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại. Qua thực nghiệm cho thấy với nhiệt độ sấy 42,5÷45°C và cường độ bức xạ 110÷300W/m² là vùng sấy có hiệu quả tốt, do đó có thể tham khảo, áp dụng vào thực tế sản xuất.
- Phương trình hồi quy (6) thể hiện mối quan hệ giữa thời gian sấy với nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại khi sấy chanh cắt lát 3 mm trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại trong phạm vi: $t = 40 \div 45^{\circ}\text{C}$; $q = 70 \div 280\text{W/m}^2$. Phương trình (6) có thể sử dụng để xác định thời gian sấy khi sấy thực tế hoặc khi thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại.
- Khi sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại để sấy chanh cắt lát thì chất lượng sản phẩm về mặt cảm quan và hàm lượng vitamin C tốt hơn rõ rệt so với giải pháp sấy điện trở. Hàm lượng vitamin C khi sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại ở nhiệt độ sấy 45°C cao hơn khi sấy bằng điện trở ở cùng nhiệt độ từ 3÷20%.
- Qua nghiên cứu cho thấy, sấy chanh cắt lát trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có thể áp dụng vào thực tế sản xuất thay thế phương pháp sấy bằng điện trở hiện nay, nhằm mục đích nâng cao chất lượng sản phẩm sấy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Moursy, F.I., et al., Effect of drying temperature on vitamin C of lemon fruit, International Journal of Advances Research in Science and Engineering, 3(9), p. 467-475, 2014.
- [2] Léonard, A., et al., Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product, Journal of Food Engineering, 85(1), p. 154-162, 2008.

- [3] Tan, M., et al., Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple, *Drying Technology*, 19(9), p. 2193-2207, 2001.
- [4] Shi, J., et al., Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating, *LWT-Food Science and Technology*, 41(10), p. 1962-1972, 2008.
- [5] Paakkonen, K., J. Havento, and B. Galambosi, Infrared drying of herbs (Research Note), *Agricultural and Food Science*, 8(1), p. 19-27, 1999.
- [6] Fatouh, M., et al., Herbs drying using a heat pump dryer, *Energy conversion and management*, 47(15-16), p. 2629-2643, 2006.
- [7] Colak, N., E. Kuzgunkaya, and A. Hepbasli, Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer, *Journal of Food Process Engineering*, 31(3), p. 281-298, 2008.
- [8] Erbay, Z. and F. Icier, Optimization of drying of olive leaves in a pilot-scale heat pump dryer, *Drying Technology*, 27(3), p. 416-427, 2009.
- [9] Nathakaranakule, A., P. Jaiboon, and S. Soponronnarit, Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit, *Journal of Food Engineering*, 100(4), p. 662-668, 2010.
- [10] Deng, Y., et al., Characteristics of squid (*Illex illecebrosus* LeSueur) fillets dried using a combination of heat pump drying and far infrared radiation, *Philippine Agricultural Scientist*, 94(3), p. 270-277, 2011.
- [11] Aktaş, M., et al., Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology, *Energy Conversion and Management*, p. 327-338, 2017.
- [12] Xiaoyong, S., Study on Iron Yam Chips by Far-infrared-assisted Heat Pump Drying, *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, p. 16, 2015.
- [13] Matouk, A., et al., Infrared Drying Of Lemon Slices, *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 5(4), p. 569-581, 2014.
- [14] Darvishi, H., M.H. Khoshtaghaza, and S. Minaee, Drying kinetics and colour change of lemon slices, *International Agrophysics*, 28(1), 2014.
- [15] Chin, S., Y. Lee, and B. Chung. Drying characteristics and quality of lemon slices dried undergone Coulomb force assisted heat pump drying. in *IDS 2018, 21st International Drying Symposium Proceedings*. 2018.
- [16] TCVN 10788:2015 về Malt - Xác định độ ẩm - Phương pháp khối lượng.
- [17] Phú, T.V., *Tính toán thiết kế hệ thống sấy*, NXBGD, 2003.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Nguyễn Minh Hạ

Trường Đại học Giao thông Vận tải Phân hiệu tại TP.HCM

Email: nmha@utc2.edu.vn