

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SẤY CÀ RỐT TRÊN MÁY SẤY NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

EXPERIMENTAL STUDY ON DRYING CARROTS USING A SOLAR DRYER

Nguyễn Văn Hạnh^{1,2,*}, Phan Thành Nhân^{1,2}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email tác giả liên hệ: nguyenvanhnh@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Sấy nông sản bằng năng lượng mặt trời là một giải pháp phù hợp nhằm tận dụng nguồn năng lượng tái tạo, giảm tiêu thụ năng lượng hóa thạch và nâng cao tính bền vững trong chế biến thực phẩm. Trong nghiên cứu này, quá trình sấy cà rốt bằng hệ thống sấy năng lượng mặt trời gián tiếp đối lưu tự nhiên và đối lưu cưỡng bức được khảo sát. Hệ thống được thiết kế và chế tạo phù hợp với điều kiện khí hậu khu vực Thành phố Hồ Chí Minh. Kết quả thực nghiệm cho thấy nhiệt độ trung bình của không khí đi vào buồng sấy khi đối lưu tự nhiên khoảng 47.4°C, khi đối lưu cưỡng bức khoảng 37.5°C; Độ ẩm của cà rốt có thể giảm từ 89.60% xuống khoảng 10% sau 6 giờ sấy với đối lưu tự nhiên và 3.5 giờ sấy với đối lưu cưỡng bức. Sấy đối lưu cưỡng bức giúp giảm thời gian sấy khoảng 42% so với sấy đối lưu tự nhiên, đồng thời cải thiện màu sắc và độ đồng đều của sản phẩm. Kết quả này cho thấy phương pháp sấy năng lượng mặt trời có khả năng làm khô cà rốt hiệu quả, đồng thời thể hiện tiềm năng ứng dụng trong quy mô hộ gia đình và sản xuất nhỏ.

Từ khóa: Sấy năng lượng mặt trời; Sấy cà rốt; Sấy gián tiếp; Năng lượng tái tạo.

ABSTRACT

Solar drying of agricultural products is an effective solution for utilizing renewable energy, reducing fossil fuel consumption, and enhancing sustainability in food processing. This study investigates the drying process of carrots using indirect solar drying systems with natural convection and forced convection. The system was designed and manufactured to suit the climatic conditions of Ho Chi Minh City. Experimental results show that the average temperature of the air entering the drying chamber is approximately 47.4°C with natural convection and approximately 37.5°C with forced convection. The moisture content of carrots can be reduced from 89.60% to about 10% after 6 hours of drying with natural convection and 3.5 hours of drying with forced convection. Forced convection reduced drying time by approximately 42% compared to natural convection while improving product color and uniformity. These results demonstrate that the solar drying method is capable of effectively drying carrots and shows potential for application on a household and small-scale production basis.

Keywords: Solar drying; Carrot drying; Indirect drying; Renewable energy.



1. GIỚI THIỆU

Sấy là quá trình loại bỏ độ ẩm khỏi vật liệu thông qua sự trao đổi đồng thời giữa nhiệt và khối lượng [1]. Đây là một trong những phương pháp bảo quản và chế biến nông sản được sử dụng phổ biến nhằm kéo dài thời gian bảo quản, giảm khối lượng sản phẩm và hạn chế sự phát triển của vi sinh vật gây hư hỏng. Phương pháp phơi khô truyền thống hiện vẫn được áp dụng rộng rãi nhưng tồn tại nhiều hạn chế như: nông sản tiếp xúc trực tiếp với mưa, bụi và côn trùng; quá trình sấy phụ thuộc hoàn toàn vào điều kiện thời tiết; chất lượng sản phẩm sau sấy không đồng đều và khó kiểm soát [2]. Những hạn chế này làm giảm giá trị và khả năng bảo quản của sản phẩm, đặt ra yêu cầu cần có các giải pháp sấy hiệu quả và ổn định hơn. Trong bối cảnh nhu cầu sử dụng năng lượng sạch và bảo vệ môi trường ngày càng gia tăng, năng lượng mặt trời được xem là nguồn năng lượng tái tạo có tiềm năng lớn, đặc biệt phù hợp với các quốc gia có cường độ bức xạ mặt trời cao như Việt Nam. Các hệ thống sấy sử dụng năng lượng mặt trời thường đáp ứng dải nhiệt độ thấp đến trung bình (dưới 80°C), phù hợp cho các ứng dụng sấy nông sản, thảo dược và làm khô không khí [3]. Máy sấy năng lượng mặt trời nói chung có công suất nhỏ, thiết kế chủ yếu dựa trên dữ liệu thực nghiệm và bán thực nghiệm hơn là các mô hình lý thuyết hoàn chỉnh. Phần lớn các hệ thống này được sử dụng trong quy mô hộ gia đình hoặc sản xuất nhỏ, nhằm tận dụng nguồn năng lượng sẵn có và giảm chi phí vận hành [4]. Tại Việt Nam, đã có nhiều nghiên cứu thực nghiệm về hệ thống sấy năng lượng mặt trời đối lưu tự nhiên cho các loại nông sản khác nhau và cho kết quả khả quan. Đỗ Minh Cường và Phan Hòa (2009) nghiên cứu quá trình sấy thóc bằng thiết bị sấy năng lượng mặt trời đối lưu tự nhiên, cho thấy thời gian sấy giảm từ 25% đến 28,5% và chất lượng sản phẩm đồng đều hơn so với phương

pháp phơi truyền thống [5]. Đinh Vương Hùng và Nguyễn Xuân Trung (2011) nghiên cứu sấy tỏi bằng hệ thống sấy năng lượng mặt trời kiểu hỗn hợp đối lưu tự nhiên, cho thấy hệ thống phù hợp cho quá trình sấy bổ sung sau phơi hoặc sấy lại sau tồn trữ nhằm hạn chế hiện tượng nảy mầm [6]. Trong số các loại rau củ, cà rốt là sản phẩm có giá trị dinh dưỡng cao, giàu vitamin A, chất xơ và khoáng chất, được tiêu thụ phổ biến trong đời sống hằng ngày. Tuy nhiên, do hàm lượng nước lớn, cà rốt rất dễ bị hư hỏng nếu không được bảo quản và chế biến kịp thời sau thu hoạch, dẫn đến tổn thất đáng kể về kinh tế. Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm khảo sát khả năng ứng dụng của hệ thống sấy năng lượng mặt trời trong quá trình sấy cà rốt. Đồng thời, các thông số đặc trưng của quá trình sấy như nhiệt độ trong buồng sấy, thời gian sấy và sự thay đổi độ ẩm của sản phẩm được phân tích nhằm đánh giá hiệu quả và tiềm năng ứng dụng của hệ thống.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Xác định độ ẩm của vật liệu sấy

Độ ẩm của cà rốt trước và trong quá trình sấy được xác định dựa trên sự thay đổi khối lượng theo thời gian. Độ ẩm của cà rốt được xác định theo công thức (1) và (2).

$$w_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (\%) \quad (1)$$

$$w_i = 100 - \frac{m_1(100 - w_1)}{m_i} \quad (\%) \quad (2)$$

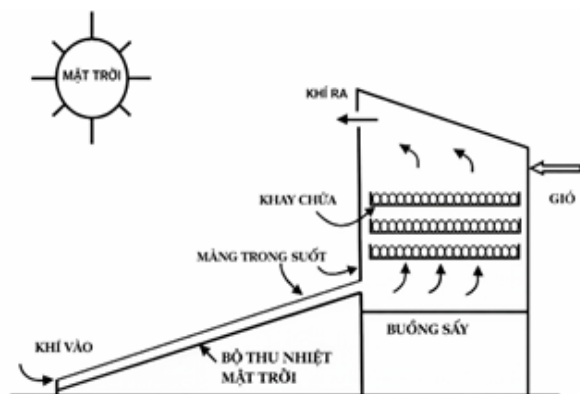
Trong đó, w_1 và w_i là độ ẩm ban đầu và độ ẩm ở thời điểm i của cà rốt trong quá trình sấy; m_1 , m_2 và m_i là khối lượng ban đầu, khối lượng chất khô và khối lượng ở thời điểm i của cà rốt (g). Các đại lượng đặc trưng của quá trình

sấy bao gồm lượng ẩm tách ra, độ ẩm của sản phẩm theo thời gian và tốc độ giảm ẩm được tính toán thông qua các biểu thức cân bằng khối lượng. Dữ liệu khối lượng và nhiệt độ được ghi nhận định kỳ trong suốt quá trình sấy để phục vụ phân tích.

2.2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.2.1. Hệ thống thí nghiệm

Hệ thống sấy được sử dụng trong nghiên cứu là hệ thống sấy năng lượng mặt trời gồm các bộ phận chính: bộ thu năng lượng mặt trời với tấm hấp thụ được đục lỗ (collector tấm phẳng), buồng sấy, khay sấy, ống dẫn không khí và quạt với trường hợp đối lưu cưỡng bức. Không khí được gia nhiệt trong bộ thu năng lượng mặt trời, sau đó di chuyển vào buồng sấy.



Hình 1. Nguyên lý của máy sấy năng lượng mặt trời gián tiếp đối lưu tự nhiên

* Thiết kế và chế tạo hệ thống sấy:

Bước đầu tiên của quá trình thiết kế hệ thống sấy là xác định kích thước buồng sấy dựa trên yêu cầu về khối lượng, thời gian sấy, độ ẩm... của sản phẩm sấy như trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số thiết kế ban đầu của hệ thống sấy

STT	Thông số thiết kế	Giá trị
1	Khối lượng cà rốt	500 gram/mẻ
2	Độ dày lớp cắt	1 mm
3	Thời gian sấy (đối lưu tự nhiên)	6 giờ
4	Độ ẩm ban đầu	90%
5	Độ ẩm sau cùng	10%
6	Nhiệt độ không khí vào buồng sấy	50°C

Từ các thông số thiết kế ban đầu của hệ thống sấy, kích thước buồng sấy được xác định như sau: Chiều dài, chiều rộng, chiều cao lần lượt là 0,45 m, 0,3 m, 0,5 m; Số khay sấy: 3; Vật liệu chế tạo: Gỗ.

Với kích thước buồng sấy như trên, kết hợp với điều kiện ngoài trời chọn tại địa điểm thí nghiệm có nhiệt độ ngoài trời 34°C, độ ẩm 70%, bức xạ nhiệt trung bình 700 W/m², kích thước bộ thu năng lượng mặt trời kiểu tấm phẳng với tấm hấp thụ dạng chèo được tính toán từ các phương trình truyền nhiệt và cân bằng năng lượng [7] và trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số tính toán của bộ thu năng lượng mặt trời dạng tấm phẳng

STT	Thông số thiết kế	Giá trị
1	Chiều dài	1,15 m
2	Chiều rộng	0,4 m
3	Chiều cao	0,2 m
4	Tấm hấp thụ được đục lỗ và đặt chèo	



Hình 2. Hình thực tế của hệ thống sấy

Dụng cụ đo: Các dụng cụ đo sử dụng trong các thí nghiệm được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Dụng cụ đo

Thông số đo	Thiết bị	Độ chính xác
Nhiệt độ	Extech SDL200	$\pm 0,4\%$
Khối lượng vật liệu	Cân Electronic Kitchen B05	$\pm 0,1\text{grams}$
Bức xạ mặt trời	Tes 132	$\pm 5\%$
Độ ẩm vật liệu	AND MX-50	$\pm 0,1\%$

2.2.2. Chuẩn bị vật liệu sấy

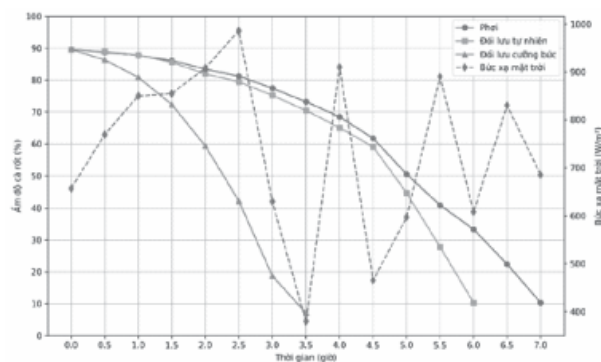
Nguyên liệu sử dụng trong nghiên cứu là cà rốt tươi, được lựa chọn đồng đều về kích thước. Trước khi sấy, cà rốt được rửa sạch, gọt vỏ và cắt lát với độ dày khoảng 1 mm, gần đồng nhất nhằm đảm bảo điều kiện truyền nhiệt và truyền ẩm tương đối giống nhau giữa các mẫu. Khối lượng mẫu cho mỗi mẻ sấy là 500g. Độ ẩm ban đầu của cà rốt đo được từ 89% đến 90%. Các quá trình sấy được thực hiện cùng 1 ngày. Với sấy đối lưu cưỡng bức dùng quạt hướng trục công suất 20W, lưu lượng 150 m³/h.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thực nghiệm được tiến hành trong tháng 3 tại Thành phố Hồ Chí Minh. Quá trình sấy được thực hiện liên tục trong khoảng thời gian ban ngày, khi cường độ bức xạ mặt trời đủ

lớn. Các thông số nhiệt độ không khí và cường độ bức xạ mặt trời được ghi nhận mỗi 30 phút nhằm đánh giá khả năng duy trì điều kiện sấy ổn định của hệ thống.

Kết quả nhiệt độ môi trường tương đối ổn định, dao động từ 28-31°C, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình sấy. Khi sấy đối lưu tự nhiên, nhiệt độ không khí trước buồng sấy dao động trong khoảng 42-54,7°C. Khi sấy đối lưu cưỡng bức cho hiệu quả vượt trội khi nhiệt độ không khí trước buồng sấy duy trì trong khoảng 31,3-40,1°C, thấp hơn so với đối lưu tự nhiên nhưng vẫn đảm bảo quá trình sấy diễn ra nhanh. Mặc dù sấy đối lưu tự nhiên đạt nhiệt độ không khí cao hơn, nhưng hiệu quả sấy thấp hơn do vận tốc không khí nhỏ, làm giảm hệ số truyền nhiệt và truyền ẩm, đồng thời hình thành lớp biên ẩm dày cản trở quá trình bay hơi. Ngược lại, sấy đối lưu cưỡng bức dù có nhiệt độ thấp hơn nhưng nhờ tăng vận tốc không khí đã làm mỏng lớp biên, tăng cường trao đổi nhiệt – ẩm và duy trì gradient áp suất hơi lớn, từ đó nâng cao tốc độ sấy.



Hình 3. Quá trình giảm ẩm của cà rốt

Hình 3 cho thấy tốc độ giảm ẩm của cà rốt trong cả ba phương pháp đều tăng theo cường độ bức xạ mặt trời, do bức xạ quyết định lượng nhiệt cung cấp cho quá trình bay hơi. Tuy nhiên, mức độ phụ thuộc khác nhau rõ rệt giữa các phương pháp. Phơi tự nhiên phụ thuộc

hoàn toàn vào bức xạ nên tốc độ sấy biến thiên mạnh theo điều kiện môi trường. Đối lưu tự nhiên giảm bớt sự phụ thuộc này nhờ hiệu ứng gia nhiệt trong buồng sấy. Trong khi đó, đối lưu cưỡng bức cho thấy tốc độ giảm ẩm cao và ổn định hơn, do tăng cường trao đổi nhiệt và ẩm, làm giảm đáng kể ảnh hưởng của dao động bức xạ mặt trời.

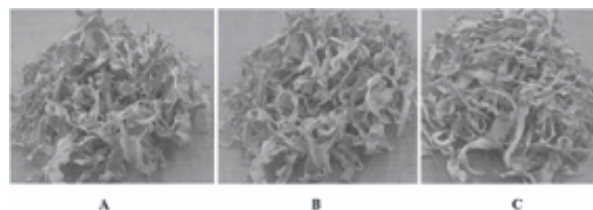
Trong trường hợp đối lưu cưỡng bức, ẩm độ giảm nhanh nhất, từ khoảng 89,60% xuống còn 7,14% chỉ trong 3,5 giờ. Đặc biệt, trong 2-3 giờ đầu, tốc độ giảm ẩm rất lớn, thể hiện quá trình truyền nhiệt và truyền khối diễn ra mạnh mẽ nhờ sự hỗ trợ của dòng không khí cưỡng bức. Điều này làm tăng hệ số trao đổi nhiệt đối lưu và tăng khả năng mang ẩm ra khỏi vật liệu.

Đối với đối lưu tự nhiên, quá trình giảm ẩm diễn ra chậm hơn, với ẩm độ giảm từ 89,60% xuống khoảng 10,34% sau 6 giờ. Sự suy giảm tốc độ sấy ở giai đoạn sau là rõ rệt, do chuyển sang giai đoạn khuếch tán ẩm bên trong vật liệu, trong khi cường độ trao đổi nhiệt và khối bị hạn chế bởi dòng không khí tự nhiên.

Trong khi đó, phơi tự nhiên cho thấy hiệu quả thấp nhất. Sau 7 giờ, ẩm độ chỉ giảm xuống khoảng 10,34%, và tốc độ giảm ẩm giảm mạnh từ sau 4 giờ. Nguyên nhân chủ yếu là do phụ thuộc hoàn toàn vào điều kiện môi trường như bức xạ mặt trời và gió, dẫn đến quá trình truyền nhiệt không ổn định.

Xét về cơ chế, cả ba phương pháp đều thể hiện hai giai đoạn sấy đặc trưng: (i) giai đoạn đầu với tốc độ giảm ẩm cao, chi phối bởi quá trình bay hơi bề mặt; và (ii) giai đoạn sau với tốc độ giảm ẩm thấp hơn, chi phối bởi quá trình khuếch tán ẩm từ bên trong vật liệu ra bề mặt. Tuy nhiên, thời gian chuyển tiếp giữa hai giai đoạn và tốc độ giảm ẩm phụ thuộc mạnh

vào phương thức cấp nhiệt và lưu thông không khí.



Hình 4. Cà rốt sau khi sấy

Hình 4 cho thấy sự khác biệt khá rõ về hình thái và màu sắc của cà rốt sau khi sấy bằng các phương pháp khác nhau:

Mẫu sấy đối lưu cưỡng bức (A): Cà rốt có màu cam sáng, tương đối đồng đều, cấu trúc lát sấy tơi và ít bị co rút mạnh. Điều này cho thấy quá trình truyền nhiệt – truyền ẩm diễn ra nhanh và ổn định, giúp hạn chế hiện tượng oxy hóa và biến đổi màu sắc.

Mẫu sấy đối lưu tự nhiên (B): Màu sắc có xu hướng sẫm hơn so với sấy cưỡng bức, một số lát bị xoắn và co rút không đồng đều. Điều này phản ánh tốc độ sấy chậm hơn, dẫn đến thời gian tiếp xúc nhiệt dài hơn, làm tăng mức độ biến đổi vật lý và hóa học.

Mẫu phơi tự nhiên (C): Màu sắc nhạt và không đồng đều, một số phần có dấu hiệu biến màu (xỉn màu). Hình dạng bị co rút mạnh, cấu trúc kém đồng nhất, dễ bị dính lại. Điều này cho thấy quá trình khô phụ thuộc hoàn toàn vào điều kiện môi trường (bức xạ mặt trời, độ ẩm không khí), dẫn đến tốc độ bay hơi ẩm thấp và không ổn định.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện khảo sát thực nghiệm quá trình sấy cà rốt bằng hệ thống sấy năng lượng mặt trời gián tiếp với hai chế độ đối

lưu tự nhiên và đối lưu cưỡng bức trong điều kiện khí hậu Thành phố Hồ Chí Minh. Kết quả cho thấy cả hai phương pháp đều có khả năng giảm độ ẩm của cà rốt từ khoảng 89.60% xuống gần 10%, đáp ứng yêu cầu bảo quản sau sấy.

Tuy nhiên, sấy đối lưu cưỡng bức thể hiện ưu thế rõ rệt, khi rút ngắn thời gian sấy xuống còn khoảng 3,5 giờ, so với 6 giờ ở chế độ đối lưu tự nhiên, tương ứng giảm khoảng 42% thời gian sấy. Mặc dù nhiệt độ không khí sấy trung bình thấp hơn, nhưng nhờ tăng cường vận tốc không khí, quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm được cải thiện đáng kể, làm tăng tốc độ bay hơi ẩm.

Bên cạnh đó, chất lượng cảm quan của sản phẩm sau sấy cũng được cải thiện đáng kể trong chế độ đối lưu cưỡng bức, thể hiện qua màu sắc tươi sáng hơn, cấu trúc ít co rút và đồng đều hơn so với đối lưu tự nhiên và phương pháp phơi. Điều này cho thấy việc rút ngắn thời gian sấy góp phần hạn chế các biến đổi bất lợi như oxy hóa và suy giảm sắc tố.

Từ các kết quả thu được, có thể khẳng định rằng việc tích hợp đối lưu cưỡng bức trong hệ thống sấy năng lượng mặt trời là giải pháp hiệu quả nhằm nâng cao hiệu suất sấy và chất lượng sản phẩm. Hệ thống có tiềm năng ứng dụng trong quy mô hộ gia đình và sản xuất nhỏ tại các khu vực có bức xạ mặt trời dồi dào.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần tập trung vào tối ưu hóa thiết kế hệ thống (kênh dẫn khí, lưu lượng gió, vật liệu hấp thụ) và tích hợp công nghệ đồng phát nhiệt – điện (PV/T) nhằm nâng cao hiệu suất năng lượng tổng thể và tính ổn định của quá trình sấy.

Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ về thời gian và cơ sở vật chất từ Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUT-VNU) cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **10/6/2026**

Ngày phản biện: **25/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ertekin, C., & Yaldiz, O. S. M. A. N. (2004), “*Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model*”. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349-359.
- [2]. Madhlopa, A., Jones, S. A., & Saka, J. K. (2002), “*A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration*”. *Renewable Energy*, 27(1), 27-37.
- [3]. Narinesingh, D., & Mohammed-Maraj, R. (1989), “*Solar drying characteristics of papaya (Carica papaya) latex*”. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 46(2), 175-186.
- [4]. Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011), “*Solar drying*”. *Solar Energy*, 85(8), 1665-1691.
- [5]. Đỗ Minh Cường, Phan Hòa (2009), “*Nghiên cứu quá trình sấy thóc bằng thiết bị sấy năng lượng mặt trời kiểu đối lưu tự nhiên*”. *Tạp chí Khoa học Đại học Huế*, số 55, 27-33.
- [6]. Đinh Vương Hùng, Nguyễn Xuân Trung (2011), “*Một số kết quả nghiên cứu sấy tỏi bằng hệ thống sấy dùng năng lượng mặt trời kiểu hỗn hợp đối lưu tự nhiên*”. *Tạp chí Công nghiệp nông thôn*, số 02, 12-16.
- [7]. Nguyễn Thế Bảo (2016), “*Năng lượng tái tạo và sự phát triển bền vững*”. NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.