

THIẾT KẾ, ĐIỀU KHIỂN VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐẢO GIÓ KHÁC NHAU TRONG SẤY NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

DESIGN, CONTROL, AND EFFECTIVENESS ASSESSMENT OF VARIOUS
AIRFLOW REVERSAL TECHNIQUES IN SOLAR DRYING

Hà Anh Tùng

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

Email: ha-tung@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Sấy năng lượng mặt trời là một giải pháp bền vững và tiết kiệm chi phí để bảo quản nông sản, tuy nhiên, các hệ thống sấy tĩnh truyền thống thường gặp phải vấn đề sấy không đồng đều, dẫn đến giảm chất lượng sản phẩm và hiệu quả sấy thấp. Kỹ thuật đảo gió được xem là một giải pháp hiệu quả để khắc phục nhược điểm này. Bài báo này trình bày chi tiết về việc thiết kế, chế tạo hệ thống sấy năng lượng mặt trời kết hợp bộ điều khiển và đánh giá hiệu quả của 4 phương pháp đảo gió bao gồm: (1) Thổi từ dưới lên; (2) Thổi ngang; (3) Đảo gió tự động theo chiều đứng và (4) Đảo gió tự động theo chiều ngang. Kết quả thực nghiệm trên sản phẩm xoài cắt lát cho thấy phương pháp phân phối dòng không khí sấy tự động đảo chiều theo phương ngang đạt được độ ẩm và chất lượng đồng đều tốt nhất của sản phẩm trên toàn bộ các khay. Nghiên cứu khẳng định tiềm năng của việc thiết kế các hệ thống điều khiển đảo gió trong việc nâng cao hiệu quả và chất lượng của công nghệ sấy năng lượng mặt trời trong thực tế.

Từ khóa: Sấy năng lượng mặt trời; Collector tấm phẳng; Tấm hấp thụ chéo; Điều khiển tự động; Hiệu quả sấy; Phương pháp đảo gió.

ABSTRACT

Solar drying is a sustainable and cost-effective solution for agro-product preservation; however, traditional static drying systems often suffer from non-uniform drying, leading to reduced product quality and low drying efficiency. The airflow reversal technique is considered an effective solution to overcome this drawback. This paper presents the design and fabrication of a solar drying system integrated with a controller, and evaluates the effectiveness of four airflow strategies: (1) Upward flow; (2) Horizontal flow; (3) Automatic vertical airflow reversal; and (4) Automatic horizontal airflow reversal. Experimental results on sliced mango showed that the automatic horizontal airflow reversal method achieved the best uniformity in moisture content and product quality across all trays. The study confirms the potential of designing airflow reversal control systems to enhance the efficiency and quality of solar drying technology in practice.

Keywords: Solar drying; Flat plate collector; Cross-flow absorber plate; Automatic control; Drying efficiency; Airflow reversal method.

1. TỔNG QUAN

Tồn thất sau thu hoạch là một trong những thách thức nghiêm trọng nhất đối với an ninh lương thực toàn cầu, đặc biệt là ở các nước đang phát triển nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới. Ước tính có tới 20-40% sản lượng nông sản, đặc biệt là trái cây và rau quả, bị hư hỏng trước khi đến tay người tiêu dùng do hàm lượng ẩm cao, tạo điều kiện cho vi sinh vật phát triển và các phản ứng enzyme không mong muốn [1]. Sấy là phương pháp bảo quản truyền thống và hiệu quả nhất để giảm thiểu tổn thất này bằng cách làm giảm lượng nước trong vật liệu, qua đó ức chế sự phát triển của vi sinh vật và kéo dài thời gian bảo quản [2].

Trong nhiều thập kỷ, phơi nắng là phương pháp phổ biến nhất do chi phí đầu tư bằng không. Tuy nhiên, phương pháp này tồn tại nhiều nhược điểm chí mạng: thời gian sấy kéo dài, phụ thuộc hoàn toàn vào thời tiết, và sản phẩm dễ bị ô nhiễm bởi bụi bẩn, côn trùng và động vật [3]. Các hệ thống sấy công nghiệp sử dụng nhiên liệu hóa thạch hoặc điện lưới, tuy khắc phục được các vấn đề về vệ sinh và thời gian sấy, nhưng lại tạo ra gánh nặng lớn về chi phí năng lượng và phát thải khí nhà kính, đi ngược lại xu hướng phát triển bền vững. Trong bối cảnh đó, sấy năng lượng mặt trời nổi lên như một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn. Công nghệ này kết hợp các ưu điểm của sấy tự nhiên (chi phí vận hành thấp, thân thiện môi trường) và sấy công nghiệp, đặc biệt là loại đối lưu cưỡng bức gián tiếp, đã được chứng minh là cải thiện đáng kể tốc độ sấy và chất lượng sản phẩm so với phơi nắng [4].

Mặc dù có nhiều ưu điểm, các hệ thống sấy năng lượng mặt trời kiểu buồng hoặc kiểu khay truyền thống vẫn đối mặt với một tồn đọng kỹ thuật lớn: sự không đồng đều trong quá

trình sấy [5]. Trong một hệ thống sấy tĩnh điển hình, không khí nóng được thổi qua các khay chứa vật liệu. Các lớp vật liệu ở gần lối vào của không khí nóng sẽ tiếp xúc với không khí có nhiệt độ cao nhất và độ ẩm tương đối thấp nhất, dẫn đến tốc độ sấy nhanh hơn đáng kể. Ngược lại, khi không khí di chuyển qua các lớp vật liệu, nó bị nguội dần và bão hòa hơi nước, làm giảm khả năng nhận ẩm ở các lớp vật liệu phía sau [6]. Hậu quả của việc sấy không đồng đều là rất rõ ràng: một phần sản phẩm bị sấy quá khô, dẫn đến hao hụt dinh dưỡng, biến màu và lãng phí năng lượng, trong khi một phần khác vẫn còn ẩm, dễ bị nấm mốc và hư hỏng trong quá trình bảo quản [7].

Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã đề xuất nhiều giải pháp. Một số nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa thiết kế khí động học của buồng sấy, chẳng hạn như sử dụng các tấm hướng dòng hoặc thiết kế lại khoang phân phối khí để đạt được sự phân bố không khí đồng đều hơn [8, 9]. Tuy nhiên, các giải pháp thiết kế cơ khí tĩnh này thường phức tạp và chỉ hiệu quả ở một mức độ nhất định, vì đặc tính của vật liệu sấy (ví dụ: độ co ngót, độ rỗng) liên tục thay đổi trong quá trình sấy.

Một phương pháp linh hoạt và hiệu quả hơn là chủ động thay đổi hướng dòng chảy của không khí sấy, hay còn gọi là kỹ thuật đảo gió. Nguyên lý của phương pháp này là đảo ngược định kỳ hướng của luồng không khí nóng, khiến cho các lớp vật liệu “nóng” và “lạnh” (hay “khô” và “ẩm”) luân phiên đổi vai trò cho nhau, từ đó làm giảm chênh lệch nhiệt độ và độ ẩm trong toàn bộ buồng sấy [10]. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có về đảo gió vẫn còn nhiều hạn chế. Hầu hết các công trình chỉ so sánh sấy một chiều với một phương pháp đảo gió duy nhất, thường là đảo gió theo chu kỳ thời gian cố định [11]. Có rất ít nghiên cứu thực hiện một



so sánh đối chứng trực tiếp hiệu quả của các phương pháp đảo gió khác nhau (ví dụ: đảo gió theo chiều đứng so với đảo gió theo chiều ngang) trong cùng một điều kiện vận hành. Hơn nữa, việc xác định chu kỳ đảo gió tối ưu còn mang tính thử nghiệm và chưa có các hệ thống điều khiển “thông minh” thực sự, có khả năng tự động ra quyết định đảo gió dựa trên trạng thái thực của vật liệu sấy.

Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm lấp đầy khoảng trống đó. Mục tiêu của bài báo là (1) Thiết kế và chế tạo một hệ thống sấy năng lượng mặt trời linh hoạt, được trang bị bộ điều khiển tự động cho phép thực hiện nhiều phương pháp đảo gió khác nhau; (2) Đánh giá và so sánh một cách có hệ thống hiệu quả của bốn phương pháp phân phối và đảo gió (Thổi từ dưới lên, Thổi ngang, Đảo gió tự động theo chiều đứng, và Đảo gió tự động theo chiều ngang); và (3) Xác định phương pháp tối ưu nhất dựa trên các tiêu chí về độ đồng đều của sản phẩm, tốc độ sấy và chất lượng sản phẩm sấy. Kết quả của nghiên cứu này sẽ cung cấp một cơ sở khoa học và kỹ thuật quan trọng cho việc thiết kế các hệ thống sấy năng lượng mặt trời thế hệ mới, hiệu quả và chất lượng cao hơn.

2. QUÁ TRÌNH THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO HỆ THỐNG SẤY NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

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

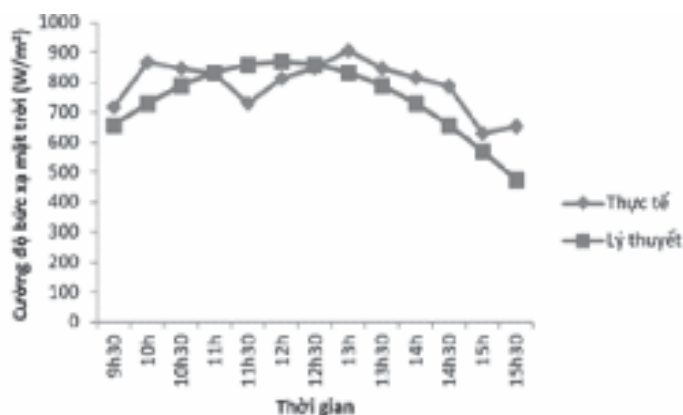
Bảng 1. Thông số thiết kế ban đầu cho hệ thống sấy

STT	Thông số thiết kế	Giá trị
1	Khối lượng xoài keo	0.5 kg/mẻ
2	Bề dày lát xoài trước khi sấy	2 mm
3	Thời gian sấy	6 giờ
4	Độ ẩm ban đầu	83.5%
5	Độ ẩm sau cùng	20%
6	Tốc độ tác nhân sấy	0.5 m/s
7	Nhiệt độ trung bình của không khí vào buồng sấy (dựa vào thử nghiệm sơ bộ)	50°C

Từ các giá trị yêu cầu này, kích thước buồng sấy được xác định như sau:

- Chiều rộng buồng sấy: $W = 0.28$ m;
- Chiều dài buồng sấy: $L = 0.45$ m;
- Chiều cao buồng sấy: $H = 0.9$ m;
- Số khay sấy: 5 khay;
- Vật liệu chế tạo: Gỗ.

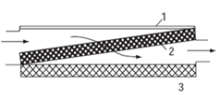
Các tính toán lý thuyết về cường độ bức xạ mặt trời lên mặt phẳng ngang [12] cho địa điểm thử nghiệm tại Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh với thời gian trong khoảng tháng 6 và tháng 7 cũng cho thấy sự tương đồng với kết quả đo đạc tại chỗ, như thể hiện trong Hình 1.



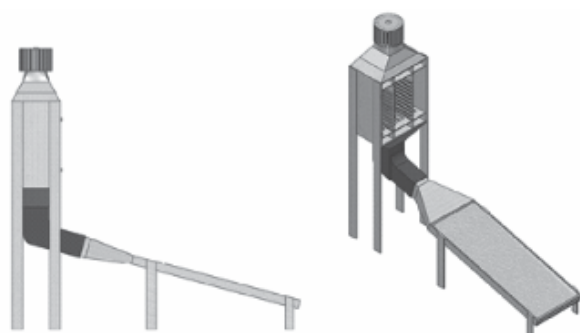
Hình 1. Đồ thị so sánh cường độ bức xạ mặt trời theo tính toán lý thuyết và đo thực tế

Với kích thước buồng sấy đã có, 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/m^2 như xác định trong khoảng thời gian thử nghiệm, kích thước bộ thu năng lượng mặt trời kiểu tấm phẳng với tấm hấp thụ dạng chèo cũng được tính toán từ các phương trình truyền nhiệt và cân bằng năng lượng [12] và trình bày trong Bảng 2.

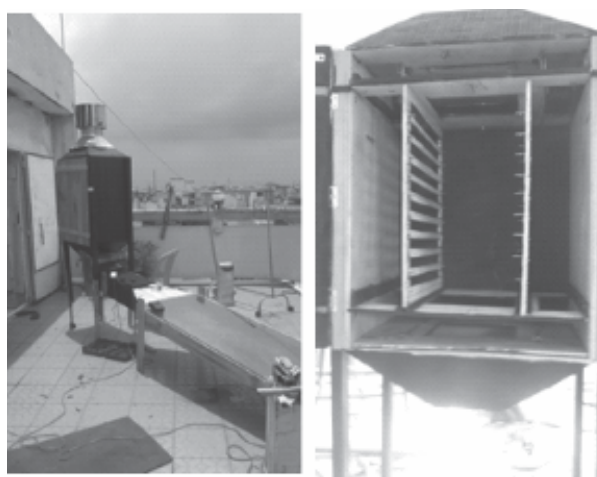
Bảng 2. Thông số tính toán của bộ thu năng lượng mặt trời dạng tấm phẳng

STT	Thông số thiết kế	Giá trị
1	Chiều dài collector	1.6 m
2	Chiều rộng collector	0.6 m
3	Chiều cao	0.2 m
4	Tấm hấp thụ có lỗ và đặt chèo như hình bên	

Từ các thông số thiết kế buồng sấy và collector đã xác định, hệ thống sấy năng lượng mặt trời cho xoài keo cắt lát được mô phỏng 3D như Hình 2 và sau đó được chế tạo như Hình 3.



Hình 2. Mô phỏng 3D của hệ thống sấy năng lượng mặt trời.

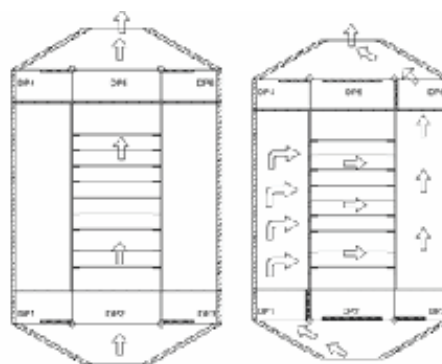


Hình 3. Hình ảnh thực tế của hệ thống sấy năng lượng mặt trời.

3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG PHÂN PHỐI GIÓ TỰ ĐỘNG VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN

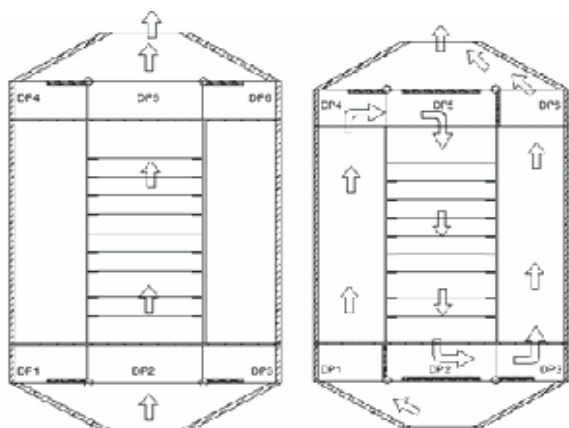
Để khảo sát ảnh hưởng của kiểu phân phối gió đến chất lượng sấy, buồng sấy được thiết kế bố trí các vách ngăn dòng, kết hợp với 6 van gió để tạo thành 4 phương án phân phối gió khác nhau như sau:

- Phương án 1: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ dưới buồng sấy đi qua các khay sấy rồi ra khỏi buồng sấy từ phía trên. Để thực hiện phương án này, khi vận hành damper 1, 3, 4, 6 đóng; damper 2, 5 mở, đồng thời sử dụng 2 tấm đỡ khay không có rãnh (Hình 4).

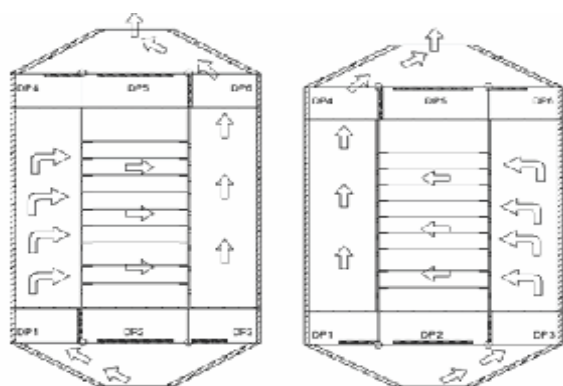


a) Thổi từ dưới lên b) Thổi ngang

Hình 4. Hai phương pháp phân phối gió truyền thống



Hình 5. Phương pháp c) Đảo gió lên và xuống theo chu kỳ



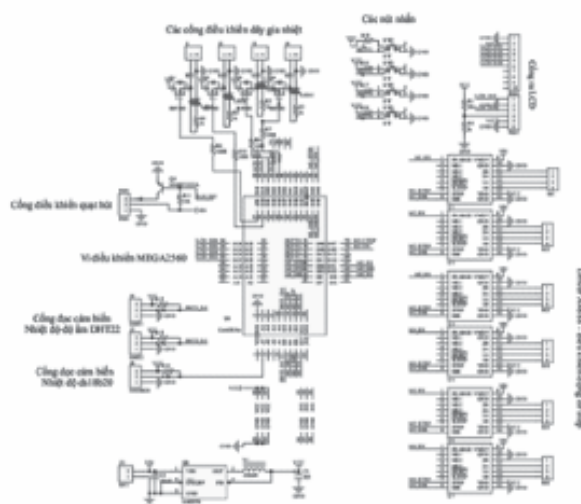
Hình 6. Phương pháp d) Đảo gió ngang theo hai chiều trái và phải theo chu kỳ

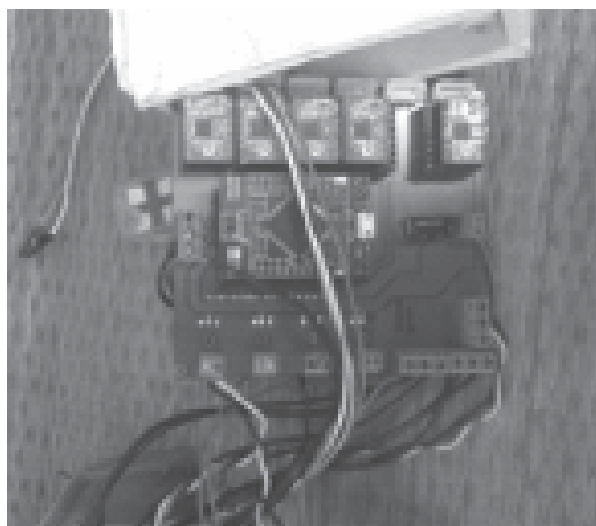
- Phương án 2: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ trái buồng sấy đi qua các khay sấy, qua phải rồi ra khỏi buồng sấy. Để thực hiện phương án này, cách điều khiển của damper như sau: damper 2, 3, 4, 5 đóng, damper 1, 6 mở và sử dụng tấm đỡ khay có rãnh (Hình 4).

- Phương án 3: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ dưới lên kết hợp trên xuống (có luân phiên đảo chiều). Để thực hiện phương án này, các damper 1, 3, 4, 6 đóng, trong khi đó damper 2, 5 mở. Sau thời gian nhất định đảo chiều damper 2, 3, 4, 5 đóng, damper 1, 6 mở (và cần sử dụng tấm đỡ khay không có rãnh) (Hình 5).

- Phương án 4: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ trái qua phải và phải qua trái (có luân phiên đổi chiều). Để thực hiện phương án 4, cách điều khiển của damper như sau: damper 2, 3, 4, 5 đóng, damper 1, 6 mở. Sau thời gian nhất định đảo chiều damper 1, 2, 5, 6 đóng, damper 3, 4 mở (trường hợp này sẽ sử dụng tấm đỡ khay không có rãnh) (Hình 6).

Ngoài ra, để việc so sánh và đánh giá bốn phương pháp phân phối gió trên trong điều kiện sấy như nhau, cần duy trì quá trình cấp nhiệt ổn định cho buồng sấy. Do nhiệt độ không khí vào buồng sấy không ổn định vì ảnh hưởng bởi điều kiện thay đổi liên tục từ bức xạ mặt trời, thời tiết... gió trước khi vào buồng sấy sẽ được điều chỉnh nhiệt độ không đổi 50°C nhờ việc gia nhiệt thêm từ một điện trở lắp trên đường gió vào buồng sấy. Các giá trị tín hiệu từ cảm biến nhiệt độ lắp trên đường gió vào sẽ được truyền về bộ điều khiển trung tâm và tùy theo giá trị mà điều khiển điện trở để kiểm soát nhiệt độ vào buồng sấy. Bộ điều khiển trung tâm cũng được kết nối với màn hình Led để hiển thị các giá trị đo đạc, cũng như điều khiển tốc độ quạt và 6 động cơ bước giúp đóng, mở 6 dampers phân phối dòng không khí theo bốn phương pháp đã đề xuất.



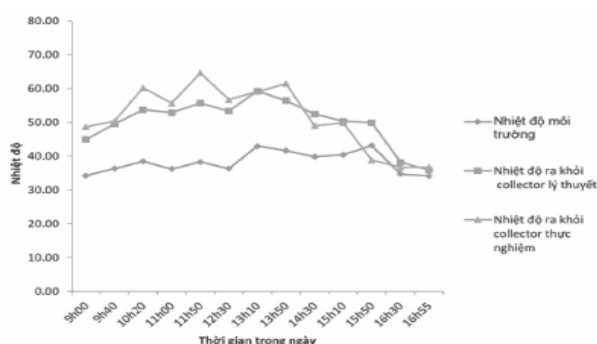


Hình 7. Hình ảnh bản thiết kế và mạch điều khiển trung tâm thực tế sau khi lắp ráp.

Hình 7 thể hiện Board điều khiển tổng Arduino Mega A2560 được kết nối đến các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm, màn hình hiển thị và 6 động cơ bước thông qua driver bước A4988.

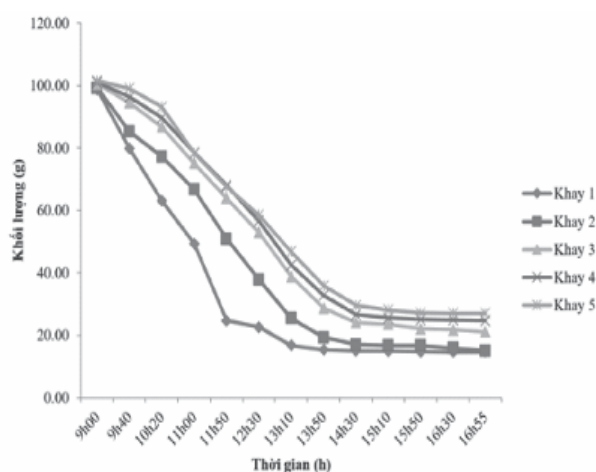
4. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

Hình 8 trình bày biểu đồ so sánh nhiệt độ ra khỏi collector lý thuyết với đo đặc thực tế trong thí nghiệm. Kết quả cho thấy có sự tương đồng giữa tính toán lý thuyết và dữ liệu đo đặc thực tế, chứng tỏ tính hợp lý trong các thông số tính toán của hệ thống sấy năng lượng mặt trời đã thiết kế.



Hình 8. Biểu đồ so sánh nhiệt độ ra khỏi collector lý thuyết với thực tế thí nghiệm.

Khi tiến hành sấy theo phương pháp truyền thống thổi gió nóng vào buồng sấy theo hướng từ dưới lên, kết quả thực nghiệm cho thấy có sự khác biệt khá lớn giữa tốc độ giảm ẩm trên các khay. Theo chiều từ dưới lên, các miếng xoài đặt trên khay số 1 (thấp nhất) sẽ khô nhanh nhất, tiếp theo đó lần lượt là khay số 2, 3, 4 và 5 (lắp trên cùng).

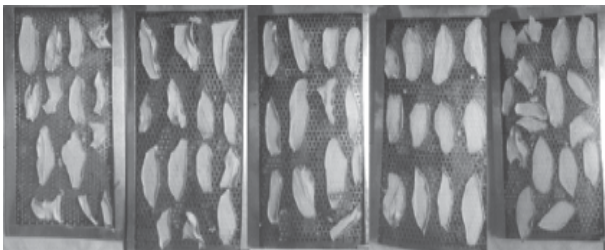


Hình 9. Sự giảm ẩm không đều của 5 khay khi thổi gió theo phương pháp truyền thống từ dưới lên (Phương pháp 1).

Để đánh giá sự khác biệt giữa bốn phương pháp phân phối gió, thực nghiệm sấy được tiến hành cho bốn phương pháp trên với nhiệt độ không khí cấp vào buồng sấy được duy trì gần như không đổi ở 50°C, tốc độ gió 0.5 m/s thông qua bộ điều khiển trung tâm kết nối với quạt, các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm và 6 động cơ bước giúp đóng, mở các dampers một cách tự động theo phương pháp phân bố gió đã chọn. Bảng 2 cho thấy trong bốn phương pháp phân phối gió, phương pháp thổi ngang có đảo chiều giúp vật liệu sấy trên các khay đạt độ ẩm đồng đều tốt nhất, tiếp theo là phương án thổi ngang không đảo chiều, còn hai phương án còn lại rõ ràng không hiệu quả vì độ ẩm giữa các khay chênh nhau quá nhiều.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm xác định độ ẩm vật liệu sấy trên từng khay cho bốn phương án phân phối gió (sau 3 giờ sấy).

	Thời điểm	Độ ẩm khay (%)					% Sai lệch
		Khay 1	Khay 2	Khay 3	Khay 4	Khay 5	
	Ban đầu	83.50	83.50	83.50	83.50	83.50	
Phương án 1	Kết thúc	10.63	26.88	26.88	35.73	56.42	81
Phương án 2		27.14	39.82	39.82	33.13	42.48	36
Phương án 3		18.31	30.53	30.53	48.35	38.49	62
Phương án 4		27.70	33.27	33.27	33.20	39.92	31



Hình 10. Sản phẩm sấy trên 5 khay với phương pháp phân phối gió kiểu 4.

Hình 10 chụp ảnh sản phẩm sau khi sấy trên 5 khay theo phương pháp phân phối gió kiểu thổi ngang có đảo dòng theo chu kỳ. Màu sắc và hương vị của các miếng xoài sau khi sấy cho thấy chất lượng sản phẩm trên các khay là khá tương đồng, thể hiện tính ưu việt của phương pháp phân bố gió kiểu thổi ngang có đảo dòng so với các phương pháp còn lại.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày chi tiết quá trình thiết kế, chế tạo và đánh giá hiệu quả hệ thống sấy năng lượng mặt trời được tích hợp bộ điều khiển tự động. Hệ thống được thiết kế linh hoạt để có thể thực hiện và so sánh bốn phương pháp phân phối và đảo gió khác nhau, nhằm khắc phục nhược điểm sấy không đồng đều của các hệ thống sấy tĩnh truyền thống. Kết quả thực nghiệm sấy xoài cắt lát trong điều kiện nhiệt độ

không khí vào buồng sấy được duy trì ổn định đã cho thấy trong số bốn phương pháp được so sánh, phương pháp phân phối dòng không khí sấy tự động đảo chiều theo phương ngang (Phương án 4) đạt được độ đồng đều về độ ẩm, màu sắc và hương vị của vật liệu sấy trên cả 5 khay là tốt nhất. Nghiên cứu đã khẳng định rõ ràng tiềm năng và hiệu quả của việc áp dụng kỹ thuật đảo gió tự động, có thể xem xét như một giải pháp hiệu quả để nâng cao đáng kể độ đồng đều và chất lượng sản phẩm cho công nghệ sấy năng lượng mặt trời trong thực tế.

Lời cảm ơn:

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: 14/10/2025

Ngày phản biện: 28/10/2025

Tài liệu tham khảo:

[1]. Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M., Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina Á.A. and Figiel A., “Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits”. Vegetables and Aromatic Herbs, Foods, 9(9), 2020.

- [2]. Surendra P., Jain D., Santra P., and Singh, A. K., “Use of solar energy in agricultural production and processing”. Indian Farming, 68, No. 9, 2018.
- [3]. Kimaro D., Nyangarika A. and Kivevele T., “Uncovering socioeconomic insights of solar dryers for sustainable agricultural product preservation: A systematic review”. Heliyon, 10(23), 2024.
- [4]. Rizalman, M.K., Mounq, E.G., Dargham, J.A., Jamain, Z., Yaakub, N.A.M. and Farzamnia, A., “A review of solar drying technology for agricultural produce”. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 30(3), 2023.
- [5]. Singh, P. and Gaur, M.K., “Review on development, recent advancement and applications of various types of solar dryers”. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 46(1), 2024.
- [6]. Kidane, H., Farkas, I. and Buzás, J., “Enhancing the drying uniformity in solar drying systems: computational and experimental study”. International Journal of Thermofluids, 2025.
- [7]. Precoppe M., Janjai S., Mahayothee B. and Müller J., “Batch uniformity and energy efficiency improvements on a cabinet dryer suitable for smallholder farmers”. J. Food Sci. Technol., 52(8), 2015.
- [8]. Misha, S., Mat, S., Ruslan, M.H., Sopian, K. and Salleh, E., “The prediction of drying uniformity in tray dryer system using CFD simulation”. International Journal of Machine Learning and Computing, 3(5), 2013.
- [9]. Kidane, H., Farkas, I. and Buzás, J., “Enhancing the drying uniformity in solar drying systems: computational and experimental study”. International Journal of Thermofluids, 2025.
- [10]. Tchaya, G.B., Kamta, M. and Kapseu, C., “Improvement of an indirect solar dryer with forced convection by variation of airflow mode”. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4(1), 2014.
- [11]. Senger, M.K.S., Dewangan, A.K., Dutt, N. and Yadav, A.K., “Research advances in solar dryer technologies integrated with solar air heater: a state-of-the art review on design variations, performance and feasibility assessments”. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149(22), 2024.
- [12]. Nguyễn, T. B., “Năng lượng tái tạo và sự phát triển bền vững”. NXB. Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh, 2016.