

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO VÀ KHẢO NGHIỆM HỆ THỐNG SẤY BƠM NHIỆT KẾT HỢP THÙNG QUAY

DESIGN, MANUFACTURE AND EXPERIMENT ON ROTARY DRUM HEAT PUMP
DRYING SYSTEM

Nguyễn Minh Quốc^{1,2,3}, Mai Xuân Điều³, Phan Thành Nhân^{1,2,*}

¹Bộ môn Công nghệ Nhiệt Lạnh, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Khoa Công nghệ Nhiệt - Lạnh, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng

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

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả thiết kế, chế tạo và khảo nghiệm máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay sấy đậu Hà Lan với năng suất 2kg/mẻ. Trong đó, các thông số kỹ thuật của máy sấy như sau: Thùng sấy có chiều dài 892mm, đường kính 223mm; máy nén lạnh có công suất 1HP sử dụng môi chất lạnh R404A, công suất làm lạnh của dàn lạnh 3kW, công suất giải nhiệt của dàn nóng chính 2,65kW; và dàn nóng phụ có công suất giải nhiệt 1,1kW; Kết quả thực nghiệm không tải cho thấy hệ thống bơm nhiệt hoạt động ổn định với nhiệt độ bay hơi 5,2°C, nhiệt độ ngưng tụ 50,2°C; tác nhân sấy đi vào thùng sấy có nhiệt độ ổn định theo thời gian. Hệ thống thùng quay hoạt động ổn định và có thể điều chỉnh tốc độ. Thực nghiệm sấy đậu Hà Lan có độ ẩm ban đầu tính theo cơ sở ướt là 68,35% (tương đương 2,16 kga/kgVLK theo cơ sở khô) ở điều kiện vận tốc tác nhân sấy là 3m/s, tốc độ thùng quay 8 vòng/phút ở các mức nhiệt độ tác nhân sấy lần lượt là 40, 45, 50, 55, 60°C cho đến khi đạt độ ẩm 13% (tương đương 0,15 kga/kgVLK). Kết quả cho thấy khi tăng nhiệt độ sấy từ 40°C lên 60°C sẽ giúp giảm hơn 50% thời gian sấy và 23,89% lượng năng lượng tiêu thụ. Cụ thể, nhiệt độ sấy là 40°C thì thời gian sấy là 10,35 giờ và lượng điện năng tiêu thụ là 13,77 kWh; nhiệt độ sấy là 50°C thì thời gian sấy giảm còn 6,47 giờ và lượng điện năng tiêu thụ là 12,33 kWh; và khi nhiệt độ sấy tăng lên đến 60°C, thời gian sấy chỉ còn 3,97 giờ và lượng điện năng tiêu thụ là 10,48 kWh. Sản phẩm đậu Hà Lan sau khi sấy trên hệ thống sấy bơm nhiệt thùng quay cho kết quả tốt, giữ được màu sắc và hương vị.

Từ khóa: Sấy bơm nhiệt; Sấy thùng quay; Sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay; Sấy đậu Hà Lan.

ABSTRACT

This paper presents the results of the design, manufacture, and experimental evaluation of a rotary drum heat pump dryer for drying green peas (*Pisum sativum* L.) with a batch capacity of 2 kg. The technical specifications of the dryer are as follows: the drying drum has a length of 892 mm and a diameter of 223 mm; the refrigeration system employs a 1 HP compressor using R404A refrigerant; the cooling capacity of the evaporator is 3 kW; the heat rejection capacity of the main

condenser is 2,65 kW; and the auxiliary condenser has a heat rejection capacity of 1,1 kW. No-load experimental results indicate that the heat pump system operated stably, with an evaporation temperature of 5.2°C and a condensation temperature of 50.2°C; the drying air supplied to the drying drum maintained a stable temperature over time. The rotary drum system operated stably and allowed adjustable rotational speed. Drying experiments were conducted on green peas with an initial moisture content of 68,35% (wet basis), corresponding to 2,16 kg water per kg dry matter (dry basis), under the conditions of a drying air velocity of 3 m/s and a drum rotational speed of 8 rpm, at drying air temperatures of 40, 45, 50, 55, and 60°C, until a final moisture content of 13%, corresponding to 0,15 kg water per kg dry matter, was achieved. The results indicate that increasing the drying temperature from 40°C to 60°C reduced drying time by more than 50% and decreased energy consumption by 23.89%. Specifically, at a drying temperature of 40°C, the drying time was 10,35 hours and the electrical energy consumption was 13,77 kWh; at 50°C, the drying time decreased to 6,47 hours and the electrical energy consumption was 12,33 kWh; and when the drying temperature increased to 60°C, the drying time was reduced to 3,97 hours and the electrical energy consumption was 10,48 kWh. Green pea products dried using the heat-pump rotary drum drying system exhibited good color and flavor retention.

Keywords: Heat pump drying; Rotary drum drying; Rotary drum heat pump drying; Green peas (*Pisum sativum* L.) drying.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sấy là phương pháp làm khô sản phẩm hiệu quả và phổ biến hiện nay. Trong đó, Sấy bơm nhiệt (HPD) mang lại chất lượng sản phẩm cao và giảm chi phí, tại cùng nhiệt độ sấy thì máy sấy bơm nhiệt có tốc độ sấy và hiệu quả năng lượng gấp 2,76 lần so với máy sấy điện trở [1]. Nhiều nghiên cứu về sấy bơm nhiệt, sấy bơm nhiệt kết hợp dùng để sấy nông sản, thủy sản được công bố trong thời gian gần đây. Cụ thể, nghiên cứu của nhóm tác giả Nguyễn Minh Hạ và Hà Anh Tùng [2] tìm ra chế độ sấy tốt nhất cho chanh lát bằng HPD kết hợp hồng ngoại ở nhiệt độ 42,5°C - 45°C và cường độ bức xạ 110W/m² đến 300W/m². Tương tự, nhóm tác giả Lê Như Chính và cộng sự [3], [4] đã chế tạo máy sấy HPD-IR và xác định được các thông số tối ưu cho tôm thẻ chân trắng và cá cơm, đạt thời gian sấy ngắn và chất lượng tốt. Lê Thị Hồng Ánh [5] và Hoàng Thái Hà [6] để tối ưu hóa sấy cá lóc và cá kèo, cho thấy sản phẩm đạt chất lượng cảm quan và an

toàn vệ sinh thực phẩm cao hơn hẳn sấy truyền thống. Bên cạnh đó, các phương pháp bơm nhiệt kết hợp khác cũng được nghiên cứu rộng rãi: Abdelwahab N. Allam và cộng sự [7] đã so sánh sấy hành tây giữa máy sấy bơm nhiệt và sấy bằng điện trở, chỉ ra rằng HPD tiết kiệm năng lượng 22,2%; đạt mức tiêu thụ thấp nhất ở 50°C và vận tốc không khí 0,2m/s. Huanyu Kang và cộng sự [8] đã phát triển hệ thống sấy bơm nhiệt có hỗ trợ năng lượng mặt trời (S-HP) cho Tảo Bẹ, cho thấy COP và tốc độ hút ẩm riêng (SMER) của S-HP cao gấp đôi so với HPD truyền thống, giúp rút ngắn thời gian sấy và duy trì chất lượng tốt. Đoàn Thị Bắc đã tối ưu hóa quy trình chần và sấy măng lát bằng HPD để giữ màu sắc và giảm hàm lượng Xyanua [9]; Trần Hà đã kết hợp HPD với vi sóng để sấy quả Hôi, rút ngắn thời gian sấy và đạt hàm lượng tinh dầu cao [10]. Đặc biệt, Lương Thị Thu Huyền và Nguyễn Ngọc Vinh đã nghiên cứu ảnh hưởng sóng siêu âm vào HPD, kết quả chỉ ra rằng sóng siêu âm giúp giảm thời gian và chi phí sấy, đồng thời bảo

toàn hàm lượng Polysaccharide (có trong nấm Linh Chi) [11] và Protein (có trong Nấm Mối) tốt hơn [12]. Những kết quả này thể hiện tính đa dạng và hiệu quả của HPD khi kết hợp với những kỹ thuật hỗ trợ khác, song các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào các phương pháp sấy tĩnh, chưa có nhiều nghiên cứu việc kết hợp HPD với các phương pháp sấy động như: thùng quay, băng tải, sấy phun,... Sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay đã được nhóm tác giả Võ Mạnh Duy và Lê Chí Hiệp [13] tối ưu hóa sấy cà rốt ở nhiệt độ 40°C, vận tốc tác nhân sấy 2,5 m/s và số vòng quay 15 vòng/phút, sản phẩm cà rốt sấy giữ được màu sắc, mùi vị, thành phần dinh dưỡng và hình dạng tốt hơn rõ rệt so với sấy thông thường. Bên cạnh đó, Đinh Văn Nhượng đã thiết kế thành công máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay để sấy thóc giống, đạt hiệu suất tách ẩm cao và đảm bảo tỉ lệ nảy mầm cao 91% [14].

Đậu Hà Lan (*Pisum Sativum* L.) là một sản phẩm có nguồn Protein thực vật cao, giàu dinh dưỡng và tốt cho sức khỏe. Theo báo cáo thị trường tiêu thụ và xuất khẩu các sản phẩm từ các loại đậu, trong đó có đậu Hà Lan được dự báo tăng trưởng với tốc độ 6,88% trong giai đoạn 2024-2029 [15], từ đó mở ra cơ hội lớn cho việc cung ứng và xuất khẩu. Trong xu thế giảm Protein có nguồn gốc từ động vật ở các nước có thu nhập cao [16], đậu Hà Lan đáp ứng nhu cầu người dùng với các sản phẩm đa dạng từ đồ uống, thanh dinh dưỡng đến các sản phẩm thay thế thịt và thực phẩm chức năng, từ đó đáp ứng nhu cầu dinh dưỡng lành mạnh và bền vững [17]. Mặt khác, thách thức phải đối mặt là việc sản xuất và bảo quản đậu Hà Lan gặp nhiều khó khăn do đây là loại nông sản có độ ẩm cao, dễ nảy mầm và khó bảo quản sau khi thu hoạch [1]. Các nghiên cứu về sấy đậu Hà Lan chỉ ra rằng nhiệt độ quá cao có thể phá vỡ cấu trúc và thành phần hóa học quan trọng. Nhiệt độ sấy cao hơn làm tăng tốc độ loại ẩm

[18], công suất vi sóng thấp (100W) giúp giữ được hàm lượng phenolic và khả năng chống oxy hóa cao nhất, nhiệt độ sấy ảnh hưởng mạnh mẽ đến chất lượng: tăng từ 50°C lên 70°C làm giảm 60% chất diệp lục và hoạt tính chống oxy hóa [19]. Đặc biệt, Pantoja Espinosa và cộng sự [20] khuyến nghị sấy đậu Hà Lan ở nhiệt độ dưới 55°C là phù hợp nhất để tránh bong tróc và giữ được mùi vị tự nhiên. Các kết quả này đều cho thấy việc lựa chọn chế độ sấy (đặc biệt là nhiệt độ sấy thấp hơn 60°C) là yếu tố quan trọng để đảm bảo chất lượng và hàm lượng dinh dưỡng có trong đậu Hà Lan. Từ các nghiên cứu trên, có thể thấy Sấy bơm nhiệt phù hợp cho sản phẩm đậu Hà Lan và việc kết hợp với thùng quay giúp tăng hiệu quả sấy đồng đều giữa các hạt. Bài báo này sẽ mang đến kết quả của việc tính toán thiết kế và khảo nghiệm sấy đậu Hà Lan trên máy sấy bơm nhiệt thùng quay nhằm đa dạng hóa các phương pháp sấy, tăng hiệu quả của quá trình sấy bơm nhiệt cũng như khả năng ứng dụng vào việc sấy các sản phẩm có tính chất tương đồng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở tính toán thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay

Phương pháp lý thuyết: Tính toán thiết kế máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay dựa trên lý thuyết tính toán thiết kế máy sấy bơm nhiệt [21] và cơ sở tính toán thùng quay [22]; các đặc điểm, thông số vật lý của đậu Hà Lan, năng suất của máy sấy, các nghiên cứu về sấy đậu Hà Lan; cơ sở truyền nhiệt và thiết kế thiết bị trao đổi nhiệt [23].

2.1.1. Độ ẩm tương đối ϕ %

Là tỷ số giữa độ ẩm tuyệt đối của không khí ẩm chưa bão hòa và của không khí ẩm bão hòa ở cùng nhiệt độ [22].

$$\varphi = \frac{p_a}{p_{max}} = \frac{p_a}{p_{max}} [\%] \quad (1)$$

p_a : Phân áp suất hơi nước;
 p_{max} : Phân áp suất hơi nước bão hòa tại t.

2.1.2. Độ chứa hơi d (dung ẩm)

Độ chứa hơi d là lượng hơi nước chứa trong không khí ẩm ứng với 1kg không khí khô [22].

$$d = 0,622 \frac{\phi \cdot p_{max}}{B - \phi \cdot p_{max}} [\text{kga/kgkk}] \quad (2)$$

G_a : Khối lượng hơi nước [kga];
 G_k : Khối lượng không khí khô [kgkk];
 B: Áp suất khí trời, [bar].

2.1.3. Enthalpy của không khí ẩm I

Enthalpy của không khí ẩm là năng lượng của không khí ẩm trên 1 kg không khí [22].

$$I = 1,004 \cdot t + d \cdot (2500 + 1,842 \cdot t) [\text{kJ/kgkk}] \quad (3)$$

2.1.4. Thể tích của thùng sấy

Thể tích của thùng quay được xác định bằng công thức [22]:

$$V = \frac{G_1 \cdot \tau}{\gamma_v \cdot \beta} [\text{m}^3] \quad (4)$$

γ_v : Mật độ của khối hạt [kg/m^3];
 β : Độ giãn nở;
 τ : Thời gian sấy [giờ];
 G_1 : Khối lượng ban đầu vật liệu sấy [kg].

2.2. Vật liệu sấy

Vật liệu sấy đậu Hà Lan được thu hoạch tại Lâm Đồng. Tách bỏ vỏ, lấy hạt, và

được sàng qua rây nhằm loại bỏ các hạt có kích thước quá nhỏ hoặc quá to, các hạt có đường kính trung bình 7÷8mm. Khối lượng ban đầu là 2kg/m². Độ ẩm ban đầu của đậu Hà Lan được xác định máy phân tích ẩm AND MX50 là 68,35%. Bằng thực nghiệm, xác định được khối lượng riêng của đậu Hà Lan $\rho = 1036 \text{ kg/m}^3$, khối lượng riêng thể tích $\rho_v = 620 \text{ kg/m}^3$.



Hình 1. Hạt đậu Hà Lan tươi

2.3. Phương pháp chế tạo máy sấy

- Khảo sát thực tế máy sấy bơm nhiệt và thùng quay trên thị trường kết hợp tham khảo các nghiên cứu trước.

- Máy sấy được thiết kế trực quan bằng phần mềm Solidworks và được đặt gia công cơ khí một số chi tiết, phần còn lại được đặt mua trực tiếp trên thị trường, sau đó về lắp đặt hoàn thiện.

2.4. Phương pháp lấy số liệu

Máy sấy được khảo nghiệm không tải để xác định độ ổn định của các cụm thiết bị, các thông số vận hành theo yêu cầu tính toán thiết kế ban đầu. Máy sấy được sấy khảo nghiệm với sản phẩm đậu Hà Lan nhằm đánh giá khả năng hoạt động và các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình sấy.

- Phương pháp xác định độ ẩm tại một thời điểm trong quá trình sấy: Sử dụng cân tiểu ly SH-131 để cân khối lượng sản phẩm sấy và dùng công thức liên hệ để xác định ẩm độ của VLS theo thời gian [24]:

$$M_{iwb} = 100 - \frac{G_1}{G_i} \cdot (100 - M_{1wb}) \quad (5)$$

G_1 : Khối lượng ban đầu [kg];

G_i : Khối lượng vật liệu tại thời điểm i [kg];

M_{1wb} : Độ ẩm ban đầu của vật liệu sấy [%].

- Phương pháp xác định sự thay đổi màu sắc của sản phẩm sau khi sấy: Sử dụng máy đo màu CHN SPEC DS-200, sự thay đổi màu sắc thể hiện qua giá trị ΔE [25]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_o - L)^2 + (a_o - a)^2 + (b_o - b)^2} \quad (6)$$

Chỉ số L_o , a_o , b_o chỉ giá trị đo của vật liệu trước khi sấy; chỉ số L , a , b chỉ giá trị đo vật liệu sau khi sấy.

2.5. Bố trí thí nghiệm và dụng cụ đo

- Thực nghiệm không tải để xác định khả năng làm việc của cụm bơm nhiệt và máy sấy.

- Sấy thực nghiệm đậu Hà Lan với các mức nhiệt độ khác nhau: 40, 45, 50, 55, 60°C trong cùng một điều kiện: vận tốc tác nhân sấy 3m/s; tốc độ thùng quay 6 vòng/phút.

- Các dụng cụ đo được liệt kê trong bảng 1.

Bảng 1. Các dụng cụ đo và sai số thiết bị

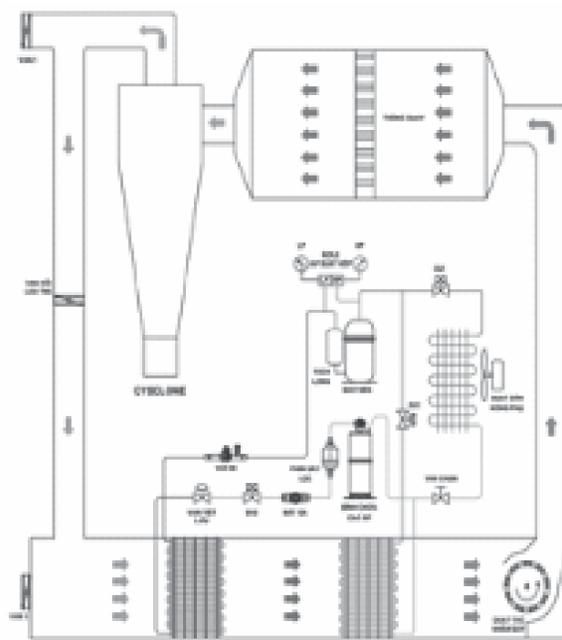
Dụng cụ đo	Model	Sai số
Độ ẩm VLS	AND MX-50	$\pm 0,1\%$
Vận tốc tác nhân sấy	UNI-TUT363S	-
Nhiệt độ, độ ẩm TNS	STC-3028	$\pm 1^\circ\text{C}$ $\pm 0,1\% \text{ rh}$
Tốc độ thùng quay	INSIZE 9225-405	$\pm (0,05\% n + 1d)$ RPM
Khối lượng	SH-131	$\pm 0,1\text{g}$
Màu sắc	CHN SPEC DS-200	$\pm 0,01$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả tính toán thiết kế

3.1.1. Sơ đồ nguyên lý máy sấy

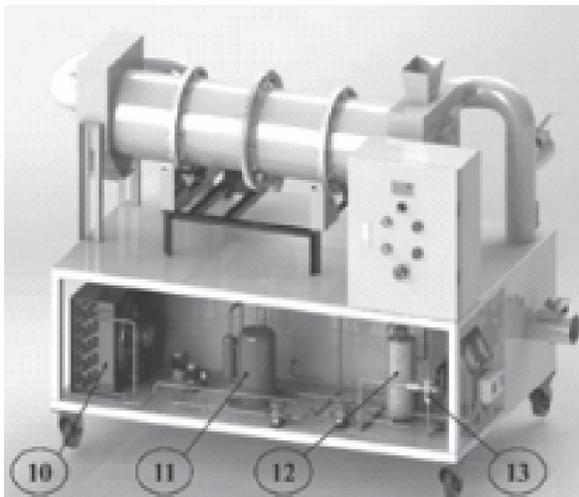
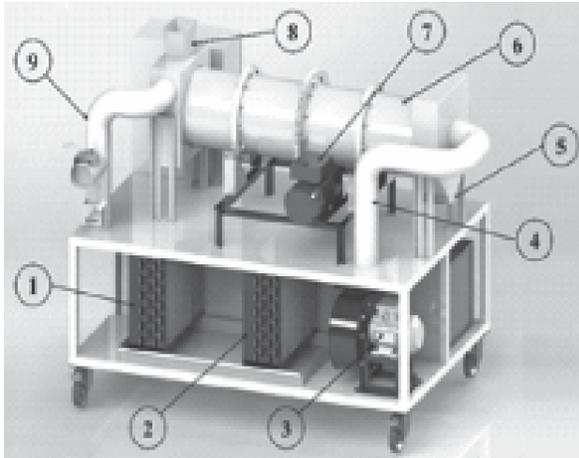
Sơ đồ nguyên lý máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay được thể hiện như hình 2.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay

3.1.2. Kết quả tính toán thiết kế

Hình 3 thể hiện bản vẽ thiết kế mô hình máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay. Cấu tạo chung của máy sấy bao gồm ba phần chính: hệ thống bơm nhiệt, thùng sấy và hệ thống điện điều khiển.



Hình 3. Hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay được thiết kế hoàn thiện:

1. Dàn bay hơi; 2. Dàn nóng chính; 3. Động cơ quạt ly tâm; 4. Đường ống gió đi vào thùng sấy; 5. Cửa xả vật liệu sấy; 6. Thùng quay; 7. Động cơ bánh răng; 8. Cửa nạp vật liệu sấy; 9. Đường ống gió đi ra thùng sấy; 10. Dàn nóng phụ; 11. Máy nén; 12. Bình chứa cao áp; 13. Van tiết lưu nhiệt.

- Hệ thống sấy bơm nhiệt thùng quay với các thông số sau: Công suất máy nén 1 HP, môi chất lạnh R404A, dàn bay hơi có năng suất lạnh 3kW, dàn nóng chính 2,65kW, dàn nóng phụ 1,1 kW. Trống quay có chiều dài 892mm, đường kính 223mm, tốc độ thùng quay được điều chỉnh bằng động cơ vô cấp được điều khiển bởi bộ điều khiển tốc độ điện tử. Tác nhân sấy vận chuyển bằng quạt ly tâm có công suất 120W, tốc độ được điều khiển bằng Dimer.

- Thùng sấy (6) quay được nhờ động cơ bánh răng (7). Vật liệu sấy được đưa vào từ cửa nạp vật liệu sấy (8) và đi vào trong thùng sấy nhờ cơ cấu vít nạp liệu và các cánh đảo liệu, vật liệu sấy liên tục được đảo và di chuyển từ từ qua cửa xả vật liệu sấy (5).

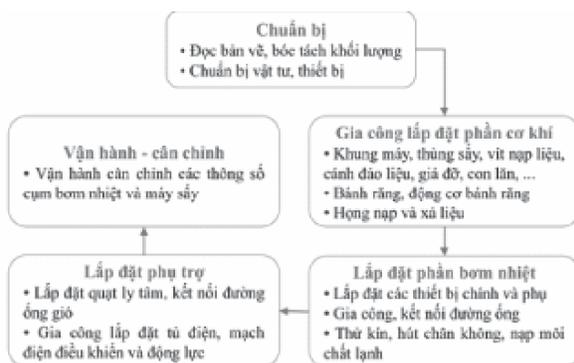
- Tác nhân sấy (không khí) có nhiệt độ và độ ẩm ban đầu được quạt ly tâm (3) hút và thổi qua đường ống gió (4) đi vào thùng sấy, tại đây TNS trao đổi nhiệt ẩm với vật liệu sấy (ngược chiều) làm cho độ ẩm trong TNS tăng lên, nhiệt độ TNS giảm đi đồng thời độ ẩm trong VLS giảm đi, sau đó TNS được hồi lưu hoàn toàn qua đường ống gió (9) đi ra khỏi thùng sấy đến dàn lạnh (1), tại đây TNS được làm lạnh và tách ẩm, nhiệt độ và độ ẩm trong TNS giảm. Sau đó, TNS tiếp tục đi qua dàn nóng chính (2), gia nhiệt lên đến nhiệt độ sấy rồi lại được quạt ly tâm (3) hút và thổi vào thùng sấy. Dòng TNS liên tục được tuần hoàn như vậy cho đến khi đạt độ ẩm của VLS theo yêu cầu công nghệ.

3.2. Kết quả chế tạo, lắp đặt mô hình

3.2.1. Quy trình chế tạo

- Máy sấy được gia công một số chi tiết cơ khí tại xưởng cơ khí theo bản vẽ thiết kế, phần cụm bơm nhiệt được lựa chọn và lắp đặt theo bản vẽ thiết kế theo quy trình chế tạo (hình 4).





Hình 4. Quy trình chế tạo hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay

3.2.2. Kết quả chế tạo

- Máy sấy được chế tạo phần cơ khí, lắp đặt bơm nhiệt và hệ thống điện tại xưởng. Kết quả chế tạo mô hình được thể hiện qua hình 5.



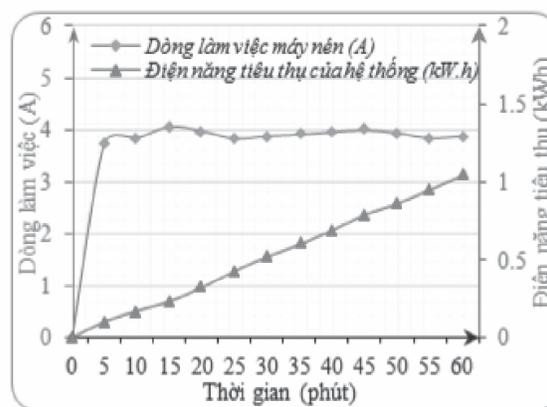
Hình 5. Mô hình máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay thực tế

3.3. Kết quả khảo nghiệm kiểm tra sự ổn định của máy sấy

3.3.1. Kiểm tra độ ổn định của hệ thống Bơm nhiệt

Khảo nghiệm sự ổn định của máy sấy nhằm xác định chất lượng chế tạo mô hình máy sấy. Máy sấy được vận hành không tải để xác

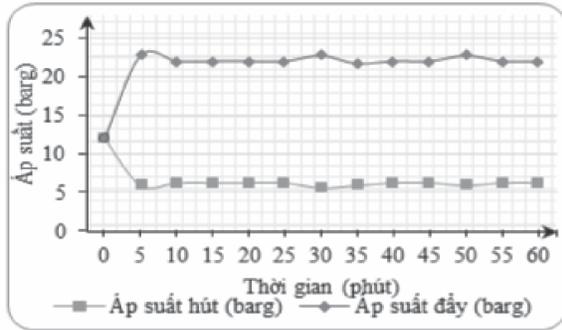
định sự ổn định của các thông số cụm bơm nhiệt như: Áp suất bay hơi, áp suất ngưng tụ, nhiệt độ không khí đi vào thùng sấy. Đồ thị hình 6 dưới đây thể hiện sự ổn định dòng làm việc của động cơ máy nén theo thời gian. Thí nghiệm được thực hiện bằng cách cho cụm bơm nhiệt chạy không hồi lưu, cài đặt nhiệt độ TNS vào thùng quay 40°C, trong điều kiện nhiệt độ môi trường có nhiệt độ (30,1÷31)°C.



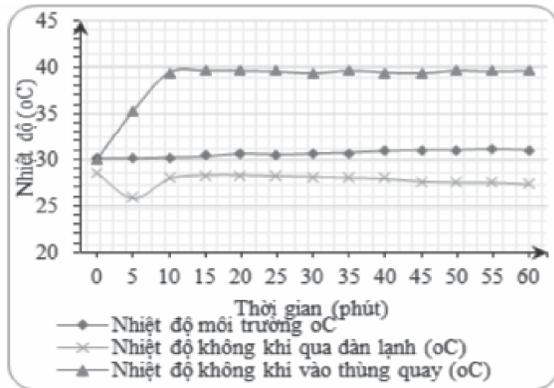
Hình 6. Dòng làm việc của máy nén và điện năng tiêu thụ của máy sấy theo thời gian

Kết quả thí nghiệm cho thấy cụm bơm nhiệt hoạt động ổn định với áp suất bay hơi trung bình là 6,06 (barg) tương ứng với nhiệt độ bay hơi 5,16°C và áp suất ngưng tụ trung bình là 22,21 (barg) tương ứng với nhiệt độ ngưng tụ 50,18°C (hình 7).

Để kiểm tra sự ổn định của nhiệt độ không khí đi vào thùng sấy, tiến hành thiết bị thí nghiệm ở chế độ chạy không tải (hồi lưu 100% TNS, cài đặt nhiệt độ TNS vào thùng quay 40°C, $t_{mt} = (30,5 \pm 0,5)^\circ\text{C}$). Kết quả cho thấy, khi mới bắt đầu chạy, nhiệt độ không khí sau dàn lạnh giảm dần và nhiệt độ không khí vào thùng quay tăng dần. Sau 5 phút, nhiệt độ không khí sau dàn lạnh bắt đầu tăng dần trong khi nhiệt độ TNS vào buồng sấy vẫn tiếp tục tăng đến giá trị cài đặt (hình 8).



Hình 7. Áp suất bay hơi và áp suất ngưng tụ theo thời gian



Hình 8. Nhiệt độ không khí vào buồng sấy ổn định theo thời gian

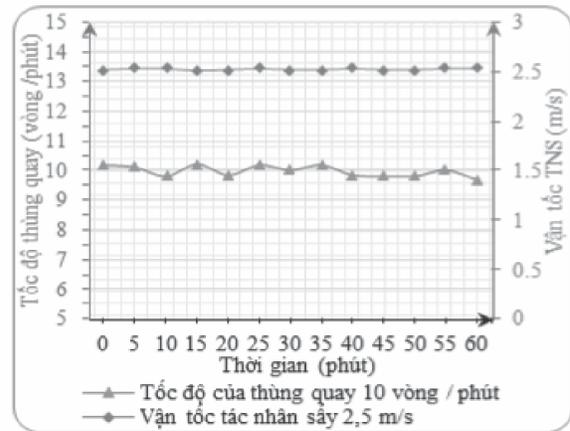
Sau 10 phút, khi nhiệt độ TNS vào buồng sấy đã đạt được giá trị cài đặt và tiếp tục duy trì ổn định, nhiệt độ không khí ra khỏi dàn lạnh cũng ổn định và ít thay đổi. Lúc này do tại dàn lạnh quá trình làm lạnh-tách ẩm diễn ra mạnh mẽ, và vì chạy không tải ở chế độ hồi lưu 100% nên độ ẩm trong buồng sấy lúc này ngày càng giảm, do đó, khi quay ngược trở lại dàn lạnh quá trình làm lạnh tách ẩm diễn ra làm cho nhiệt độ ra khỏi dàn lạnh có xu hướng giảm dần.

3.3.2. Khảo nghiệm kiểm tra độ ổn định của hệ thống Thùng quay

- Sự ổn định của Tốc độ thùng quay: Thí nghiệm kiểm tra sự ổn định tốc độ của thùng

quay, tốc độ thùng quay được điều chỉnh bằng bộ điều tốc điện tử và đo kiểm bằng dụng cụ đo tốc độ vòng quay INSIZE 9225-405. Tiến hành thí nghiệm bằng cách cài đặt tốc độ thùng quay ở 10 vòng/phút, sau đó cứ 5 phút sử dụng dụng cụ đo để đo lại tốc độ của thùng quay, tổng số lần đo là 13 lần. Kết quả được thể hiện ở đồ thị hình 9 cho thấy hệ thống thùng quay hoạt động ổn định.

- Sự ổn định của vận tốc TNS trong thùng quay: Để kiểm tra ổn định của vận tốc TNS trong thùng quay, thí nghiệm điều chỉnh Dimer quạt TNS sao cho tốc độ TNS vào thùng quay đạt vận tốc 2,5 m/s. Sau đó cứ 5 phút, sử dụng máy đo tốc độ gió UNI-TUT363S để đo vận tốc gió vào thùng sấy, tổng số lần đo là 13 lần. Kết quả cho thấy vận tốc TNS vào thùng sấy ổn định theo thời gian (hình 9).



Hình 9. Sự ổn định của tốc độ thùng quay và vận tốc không khí đi qua thùng quay

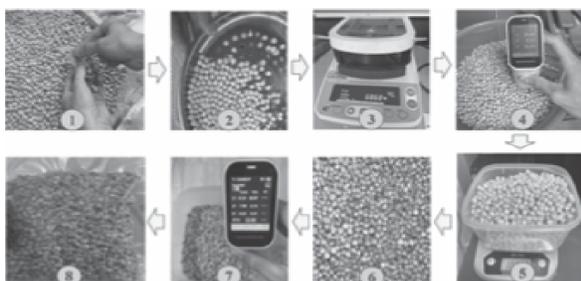
3.4. Kết quả khảo nghiệm sấy đậu Hà Lan, đường cong đặc tính của quá trình sấy

3.4.1. Quy trình sấy đậu Hà Lan tươi

- Đậu Hà Lan tươi được thu hoạch trong ngày và vận chuyển từ vùng đất Lâm Đồng về TP. Hồ Chí Minh để phục vụ cho quá trình sấy.

- Quy trình thí nghiệm sấy đậu Hà Lan được thể hiện ở hình 10 với các bước như sau:

- Bước 1: Lựa chọn và tách lấy hạt Đậu Hà Lan tươi.
- Bước 2: Dùng sàng rây để loại bỏ các hạt quá nhỏ và quá to, sau đó rửa sạch đậu Hà Lan và để ráo nước.
- Bước 3: Xác định độ ẩm ban đầu, đo màu đậu Hà Lan trước khi sấy.
- Bước 4: Cân khối lượng đậu Hà Lan.
- Bước 5: Kiểm tra và vận hành máy sấy, cài đặt các thông số đầu vào như nhiệt độ, vận tốc tác nhân sấy và tốc độ thùng quay.
- Bước 6: Tiến hành cấp liệu và thực hiện quá trình sấy, ghi nhận các thông số.
- Bước 7: Đo màu sản phẩm sấy sau quá trình sấy.
- Bước 8: Hút chân không, đóng gói, ghi nhãn sản phẩm sau khi sấy.

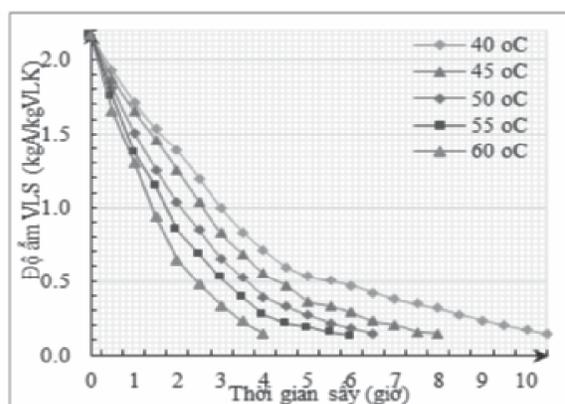


Hình 10. Các bước tiến hành thí nghiệm sấy đậu Hà Lan

3.4.2. Đường cong đặc tính của quá trình sấy đậu Hà Lan trên máy sấy Bơm nhiệt kết hợp thùng quay

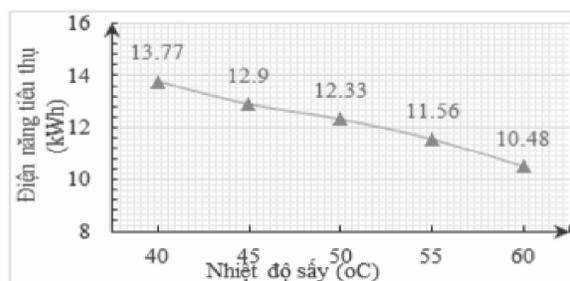
Tiến hành sấy thực nghiệm đậu Hà Lan có độ ẩm ban đầu 68,35% (tương đương 2,16 kga/kgVLK) trên máy sấy bơm nhiệt thùng quay ở điều kiện vận tốc TNS 3 m/s, tốc độ thùng quay 6 vòng/phút với các mức nhiệt độ 40, 45, 50, 55, 60°C cho đến khi đạt độ ẩm 13% (tương đương 0,15 kga/kgVLK) thu được kết quả đường cong

sấy như hình 11. Kết quả cho thấy khi tăng nhiệt độ, tốc độ giảm ẩm theo thời gian của hạt đậu Hà Lan tăng lên. Đường cong sấy ở mức nhiệt độ 60°C có độ dốc cao nhất cho thấy tốc độ giảm ẩm lớn nhất, vật liệu mất ẩm nhanh nhất. Ngược lại, đường cong sấy ở mức nhiệt độ 40°C có độ dốc thấp nhất, tốc độ giảm ẩm nhỏ nhất, vật liệu mất ẩm chậm nhất. Đồng thời, khi nhiệt độ TNS tăng thì thời gian sấy giảm; từ 10,35 giờ ở 40°C xuống còn 3,97 giờ ở 60°C tương đương giảm hơn 50% thời gian sấy; điều này hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu trước.



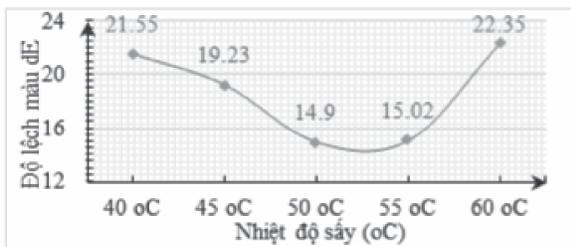
Hình 11. Đường cong sấy đậu Hà Lan ở các mức nhiệt độ khác nhau

Mặt khác, khi nhiệt độ sấy tăng, điện năng tiêu thụ giảm (hình 12). Điện năng tiêu thụ giảm từ 13,77 kWh ở nhiệt độ sấy 40°C xuống còn 10,48 kWh ở nhiệt độ sấy 60°C tương đương giảm 23,89% lượng điện tiêu thụ.



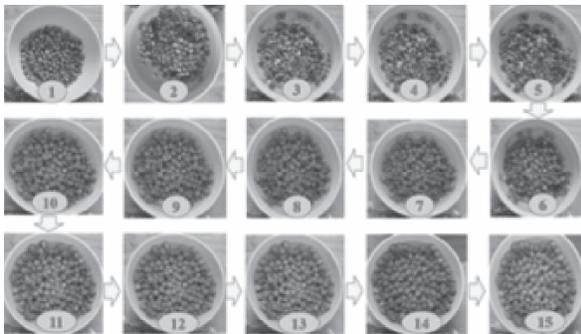
Hình 12. Đồ thị biểu diễn ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến điện năng tiêu thụ của hệ thống

Xét về sự thay đổi màu sắc, khi sấy ở nhiệt độ 45°C đến 50°C, đậu sau khi sấy có sự thay đổi màu sắc dE giảm rõ rệt, điều này có thể được giải thích rằng khi sấy ở nhiệt độ thấp sẽ giữ được màu sắc của vật liệu, nhưng khi thời gian sấy quá lâu sẽ dẫn tới việc phai màu ở sản phẩm sấy. Chính vì thế mặc dù sấy ở 40°C nhưng sự thay đổi màu sắc khá lớn. Ngược lại, khi sấy ở mức nhiệt độ 50 và 55°C, thời gian sấy nhanh, sự thay đổi màu sắc giảm rõ rệt (hình 13). Tuy nhiên, khi nhiệt độ sấy tăng lên 60°C, với mức nhiệt độ này làm cho vỏ đậu Hà Lan bị thay đổi màu sắc rõ rệt, chính vì vậy kết quả sấy ở 60°C làm giảm đáng kể thành phần dinh dưỡng có trong đậu Hà Lan.



Hình 13. Đồ thị thể hiện sự thay đổi màu sắc theo nhiệt độ sấy

Sản phẩm đậu Hà Lan sau khi sấy, được hút chân không và bảo quản được trong thời gian dài. Khi cần sử dụng, tiến hành ngâm đậu trong nước trong thời gian từ 6-8 tiếng, đậu sẽ trở về trạng thái đậu tươi như ban đầu (hình 14).



Hình 14. Sản phẩm đậu Hà Lan sau khi sấy được ngâm nước trở về trạng thái ban đầu

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đạt được kết quả tính toán thiết kế chế tạo và khảo nghiệm máy sấy bơm nhiệt kết hợp thùng quay để sấy đậu Hà Lan. Trong đó, các thông số của máy sấy này như sau: Thùng sấy có chiều dài 892mm đường kính 223mm; máy nén có công suất 1HP sử dụng môi chất lạnh R404A, công suất làm lạnh của dàn lạnh 3kW, công suất giải nhiệt của thiết bị ngưng tụ chính 2,65kW; và thiết bị ngưng tụ phụ có công suất giải nhiệt 1,1kW; Máy sấy được khảo nghiệm không tải cho kết quả hoạt động ổn định với nhiệt độ bay hơi 5,2°C, nhiệt độ ngưng tụ 50,2°C; vận tốc và nhiệt độ tác nhân sấy đi vào thùng sấy ổn định theo thời gian; thùng quay hoạt động với tốc độ ổn định theo thời gian. Khảo nghiệm có tải ở các mức nhiệt độ sấy: 40, 45, 50, 55, 60°C cho thấy điện năng tiêu thụ và thời gian sấy giảm khi nhiệt độ sấy tăng: Ở mức nhiệt độ sấy là 40°C, thời gian sấy là 10,35 giờ và điện năng tiêu thụ là 13,77 kWh; nhiệt độ sấy là 50°C, thời gian sấy là 6,47 giờ và điện năng tiêu thụ là 12,33 kWh; và khi nhiệt độ sấy là 60°C, thời gian sấy chỉ còn 3,97 giờ và điện năng tiêu thụ là 10,48 kWh. Sản phẩm sau khi sấy giữ được màu sắc và chất lượng tốt với kết quả tốt nhất ở (50÷55)°C với độ lệch màu lần lượt là 14,9 và 15,02.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Danh mục viết tắt:

- HPD: Heatpump dryer, sấy bơm nhiệt;
- HPD-IR: Sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại;
- S-HP: Sấy bơm nhiệt có sự hỗ trợ của năng lượng mặt trời;
- TNS: Tác nhân sấy.
- VLS: Vật liệu sấy.



Ngày nhận bài: 05/12/2025

Ngày phản biện: 17/12/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1.] T. N. Phan, V. H. Tran, N. Kaloyanov, and M. Zlateva, "An experimental study for drying *Pisum sativum* on an electric dryer and a heat pump dryer". E3S Web of Conferences, vol. 327. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202132701006.
- [2.] Nguyen Minh Ha and Ha Anh Tung, "Experimental study of infrared – assisted heat pump drying of lime slices". Journal of Technical Education Science, no. 66. pp. 1-10, 2021. doi: 10.54644/jte.66.2021.1056.
- [3.] L. N. Chinh, N. Van Phuc, H. Van Thao, and N. N. An, "Research on fabrication of heat pump dryer combined with infrared to dry agricultural and aquatic products. pdf". J. Fish. Sci. Technol., vol. 1, pp. 19-25, 2021.
- [4.] L. N. Chinh, N. Van Phuc, T. D. Khoa, and D. T. Quy, "Multi-objective optimization determinate the optimized drying parameters for commerson anchovy by infrared assisted heat pump dryer.pdf". Therm. Energy Rev., vol. 160, pp. 2-10, 2023.
- [5.] T. H. A. Le et al., "Study on the drying condition optimisation of the heating pump and the infrared radiation for the snakehead fish *Channa maculata*". Ministry of Science and Technology, Vietnam, vol. 63, no. 5. pp. 55-59, 2021. doi: 10.31276/vjst.63(5).55-59.
- [6.] H. T. Ha and N. T. Nam, "Optimization of drying conditions of infrared radiation-assisted thermal pump on raw fish (*Pseudapocryptes elongatus*).pdf". Huit J. Sci. - Huit., vol. 23, no. 1, pp. 146-153, 2023, doi: 10.62985/j.huit_ojs.vol23.no1.55.
- [7.] A. Abdelwahab, M. Nasr, and M. Ali, "Comparison Between Heat Pump and Electric Heater for Drying Onion Slices". Journal of Advanced Engineering Trends, vol. 41, no. 2. pp. 187-204, 2021. doi: 10.21608/jaet.2021.49521.1071.
- [8.] H. Kang et al., "Design of a Greenhouse Solar-Assisted Heat Pump Dryer for Kelp (*Laminaria japonica*): System Performance and Drying Kinetics". Foods, vol. 11, no. 21. 2022. doi: 10.3390/foods11213509.
- [9.] T. B. Doan, T. H. Ta, D. B. M. Nguyen, T. H. L. Nguyen, and T. T. Tran, "Study on drying bamboo shoots by Sasaki heat pump drying technology". Minist. Sci. Technol. Vietnam, vol. 63, no. 6, pp. 57-62, 2021, doi: 10.31276/vjst.63(6).57-62.
- [10.] H. Tran, T. B. T. Ma, P. Nguyen, T. H. Nguyen, and V. L. Vu, "Optimisation of the drying temperature of star anise by low-temperature drying technique combined with microwave". Ministry of Science and Technology, Vietnam, vol. 65, no. 10DB. pp. 77-80, 2023. doi: 10.31276/vjst.65(10db).77-80.
- [11.] L. T. T. Huyen, L. Q. Huy, T. T. N. Diep, and N. T. Bao, "Experimental study to evaluate the effects of ultrasonic waves in a ganoderma mushroom drying device using the heat pump combined with ultrasonic waves.pdf". J. Sci. Technol., vol. 59, no. 6C, pp. 78-84, 2023.
- [12.] N. N. Vinh, L. M. Nhut, L. D. Trung, and L. Q. Huy, "Evaluating the effect of ultrasonic wave power on protein content of *termitomyces albuminosus* by using drying method of heat pump combined with ultrasonic waves.pdf". Hanoi Univ. Ind. J. Sci. Technol., vol. 60, no. 8, pp. 101-109, 2024, doi: http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.272.
- [13.] V. M. Duy and L. C. Hiep, "Study on drying of carrots in a combining heat pump and rotary drum dryer". CTU J. Sci., vol. 20b, pp. 209-216, 2011.
- [14.] D. Van Nhuong, "Experimental Study on Drying of Bac Thom Rice in a Heat Pump Combined Rotary Drum Dryer". J. Sci. Technol. Hanoi Univ. Ind., vol. 42, pp. 81-86, 2017.
- [15.] Mordor IntelligenceTM Industry Report, "Phân tích thị phần và quy mô thị trường đậu Hà Lan - Dự báo và xu hướng tăng trưởng (2024-2029)".
- [16.] Adam Drewnowski and Kayla Hooker, "The protein transition what determines the animal-to-plant (AP) protein ratios in global diets.pdf". Front. Nutr., p. 9, 2025.
- [17.] H. Rogers, M. Dora, N. Tsolakis, and M. Kumar, "Plant-based Food Supply Chains Recognising Market Opportunities and Industry Challenges of Pea Protein". Appl. Food Res., vol. 4, p. 10, 2024.
- [18.] J. N. Janevski, M. M. Stojiljković, B. V. Stojanović, and S. D. Jovanović, "Advantages of Drying of Vegetables Using the Integrated Heat Pump Technology", 2018.
- [19.] M. Gonzalez, J. Alvarez-Ramirez, E. J. Vernon-Carter, I. Reyes, and L. Alvarez-Poblano, "Effect of the Drying Temperature on Color, Antioxidant Activity and In Vitro Digestibility of Green Pea (*Pisum sativum* L.) Flour". Starch/Staerke, vol. 72, no. 9-10. 2020. doi: 10.1002/star.201900228.
- [20.] D. C. Pantoja Espinosa, J. Rodríguez Cortina, M. Hernández Carrión, and O. Osorio Mora, "Drying and cooking effects on the final quality of pea grains (*Pisum sativum* varieties)". Food Science and Technology (Brazil), vol. 42. 2022. doi: 10.1590/fst.32120.
- [21.] O. Alves-Filho, "Heat pump dryers: Theory, design and industrial applications". Heat Pump Dryers: Theory, Design and Industrial Applications. pp. 1-330, 2015. doi: 10.1201/b18783.
- [22.] T. V. Phú, "Tính toán và thiết kế hệ thống sấy". NXB. Giáo dục, p. 360, 2002.
- [23.] H. Đ. Tín, "Cơ sở truyền nhiệt và thiết kế thiết bị trao đổi nhiệt". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2013.
- [24.] PGS, TS. Bùi Trung Thành, "Giáo trình lý thuyết tính toán và thiết kế máy sấy". NXB. Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, 2024.
- [25.] M. Maskan, "Microwaveair and microwave finish drying of banana.pdf". J. Food Eng., vol. 44, pp. 71-78, 2000.