

# ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ GIẢM PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH TRONG HỆ THỐNG SẤY BƠM NHIỆT KẾT HỢP HỒNG NGOẠI

## EVALUATION OF GREENHOUSE GAS EMISSION REDUCTION EFFICIENCY IN COMBINED HEAT PUMP AND INFRARED DRYING SYSTEM

LÊ TRUNG KIỆT<sup>1,a</sup>, ĐỖ CHÍ PHI<sup>2</sup>, MAI ĐĂNG TUẤN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Trường Trung Cấp Kỹ thuật - Nghiệp Vụ Cái Bè

<sup>2</sup> Trường Cao Đẳng Kỹ Thuật Cao Thắng

<sup>3</sup> Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

<sup>a</sup>Tác giả liên hệ: [trungkietnlqk9@gmail.com](mailto:trungkietnlqk9@gmail.com)

*Nhận bài(Received): 30/7/2025; Phản biện (Reviewed): 15/8/2025; Chấp nhận (Accepted): 18/9/2025*

### TÓM TẮT

Trong bài báo này chỉ tập trung đánh giá hiệu quả giảm phát thải khí nhà kính và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống sấy trái cây sử dụng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (BN-HN), thông qua so sánh với hai phương pháp sấy truyền thống phổ biến hiện nay là sấy điện trở (ER) và sấy bơm nhiệt thuần túy (BN). Thử nghiệm được thực hiện với nguyên liệu sấy là thanh long, khối lượng mỗi mẻ 45 kg. Kết quả cho thấy, phương pháp sấy BN-HN giúp giảm suất tiêu hao năng lượng riêng xuống còn 0,032 kWh/kg nước bốc hơi – mức thấp nhất trong ba phương pháp khảo sát. Đồng thời, phát thải khí CO<sub>2</sub> của hệ thống BN-HN giảm 36,4% so với sấy điện trở và 15,2% so với sấy bơm nhiệt thuần túy. Các kết quả trên phù hợp với xu hướng và kết luận của nhiều nghiên cứu trước, khẳng định tiềm năng ứng dụng của công nghệ sấy BN-HN trong các hệ thống sấy hiệu quả năng lượng, thân thiện môi trường và hướng tới phát triển bền vững.

**Từ khóa:** Sấy bơm nhiệt, hồng ngoại, khí nhà kính, phát thải CO<sub>2</sub>.

### ABSTRACT

*This paper focuses on evaluating the effectiveness of reducing greenhouse gas emissions and improving energy efficiency of the fruit drying system using infrared heat pump (BN-HN), through comparison with two popular traditional drying methods: resistance drying (ER) and pure heat pump drying (BN). The test was conducted with dragon fruit as the drying material, each batch weighing 45 kg. The results showed that the BN-HN drying method helps reduce the specific energy consumption rate to 0.032 kWh/kg of evaporated water - the lowest level among the three surveyed methods. At the same time, CO<sub>2</sub> emissions of the BN-HN system decreased by 36.4% compared to resistance drying and 15.2% compared to pure heat pump drying. The above results are consistent with the trends and conclusions of many previous studies, affirming the application potential of BN-HN drying technology in energy-efficient, environmentally friendly drying systems and towards sustainable development.*

**Keywords:** Heat pump drying, infrared drying, Greenhouse gas, Energy consumption, CO<sub>2</sub> emission

## 1. GIỚI THIỆU

Công nghệ sấy là một trong những giải pháp quan trọng trong việc bảo quản nông sản sau thu hoạch [2]. Tuy nhiên, các hệ thống sấy truyền thống như không khí nóng (KKN), điện trở (ER) thường có hiệu suất năng lượng thấp và phát thải CO<sub>2</sub> khá cao [3],[4],[7]. Để khắc phục hạn chế này, nhiều nghiên cứu đã tập trung phát triển các công nghệ sấy thay thế, điển hình là sấy bơm nhiệt (BN), sấy hồng ngoại (HN) hoặc kết hợp hai phương pháp thành hệ thống bơm nhiệt – hồng ngoại (BN-HN).

Theo nghiên cứu [2], công nghệ sấy BN-HN có khả năng rút ngắn thời gian sấy tới 48,9% so với sấy bơm nhiệt thuần túy. Doymaz và cộng sự (2023) cũng chỉ ra rằng khi sấy cà rốt với IR-HP, hệ thống không chỉ tiết kiệm năng lượng mà còn giảm phát thải CO<sub>2</sub> đáng kể [3]. Kết quả của Malçok et al. (2023) cho thấy thời gian sấy nấm giảm khoảng 26% khi áp dụng IR-HP, đồng thời chất lượng sản phẩm được cải thiện rõ rệt về hàm lượng vitamin, hợp chất phenolic và khả năng chống oxy hóa [6]. Bên cạnh đó, Khodaei et al. (2023) nghiên cứu mô hình sấy vi sóng kết hợp đối lưu đã ghi nhận mức phát thải CO<sub>2</sub> trong khoảng 5–12 kg tùy phương pháp, qua đó nhấn mạnh tiềm năng của các hệ thống sấy tích hợp [7].

Song song với các kết quả quốc tế, nghiên cứu trong nước cũng đã chứng minh tính khả thi của BN-HN. Kiều Anh (TP. HCM) đã ứng dụng hệ thống bơm nhiệt nội địa trong sấy xoài, nấm, đậu và đạt mức tiết kiệm năng lượng 30–40%, đồng thời duy trì được màu sắc sản phẩm [9]. Một nghiên cứu khác về sấy tinh bột nghệ bằng bơm nhiệt cho thấy điều kiện 55°C trong 10 giờ cho chất lượng sản phẩm tối ưu, với độ ẩm còn lại khoảng 8,46% [10].

Ngoài ra, nhiều công bố chỉ ra rằng

suất tiêu hao năng lượng riêng (SEC) khi sấy các loại nông sản như lê, cà rốt thường nằm trong khoảng 0,38÷0,5 kWh/kg [3], [4]. Việc kết hợp bức xạ hồng ngoại vào các hệ thống sấy đã được chứng minh có khả năng giảm SEC, rút ngắn thời gian sấy và nâng cao chất lượng [5], [6]. Một số mô hình tích hợp khác như hồng ngoại – đối lưu sử dụng biomass cho SEC chỉ khoảng 3,8 MJ/kg (tương đương 1,06 kWh/kg), thấp hơn nhiều so với các phương pháp đơn lẻ [8].

Đối tượng được xem xét trong nghiên cứu này là thanh long ruột đỏ, một loại quả có giá trị xuất khẩu cao của Việt Nam nhưng rất dễ mất nước và giảm chất lượng sau thu hoạch. Thí nghiệm được tiến hành ở quy mô phòng thí nghiệm với năng suất 45 kg/m<sup>2</sup>, nhằm phân tích hiệu quả năng lượng và mức phát thải khí nhà kính. Từ đó, nghiên cứu đưa ra khuyến nghị mở rộng cho sản xuất ở quy mô hộ gia đình, cơ sở vừa và nhỏ, cũng như các dây chuyền công nghiệp.

Trong bối cảnh Việt Nam, đặc biệt là khu vực Đồng bằng sông Cửu Long, nơi tập trung sản lượng nông sản lớn, nhu cầu về các giải pháp sấy tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải khí nhà kính ngày càng cấp thiết [11]. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả hệ thống BN-HN trong sấy thanh long lát, đồng thời so sánh với hai công nghệ phổ biến khác là ER và BN, qua đó làm rõ khả năng ứng dụng thực tiễn và tiềm năng nhân rộng của công nghệ.

Bài báo có cấu trúc như sau:

- Phần 1. Giới thiệu
- Phần 2. Phương pháp nghiên cứu
- Phần 3. Kết quả và phân tích
- Phần 4. Kết luận

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Cấu hình của hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp với hồng ngoại (BN-HN)

Hệ thống sấy BN-HN được thiết kế dạng buồng kín hình hộp chữ nhật có kích thước tổng thể 1800 mm (dài) × 1700 mm (rộng) × 1900 mm (cao), thể tích buồng khoảng 5,8 m<sup>3</sup>. Tích hợp hai khung khay sấy với tổng 16 khay chứa sản phẩm, phân bố đều theo chiều đứng, đảm bảo luồng khí đối lưu tuần hoàn hiệu quả.

➤ Khô lạnh bơm nhiệt sử dụng máy nén lạnh công suất định mức 2 HP, môi chất lạnh R22, kết hợp dàn bay hơi và dàn ngưng trao đổi nhiệt cưỡng bức. Không khí sau khi được gia nhiệt gián tiếp sẽ được thổi qua sản phẩm bằng quạt hướng trục, tốc độ 3,5 m/s.

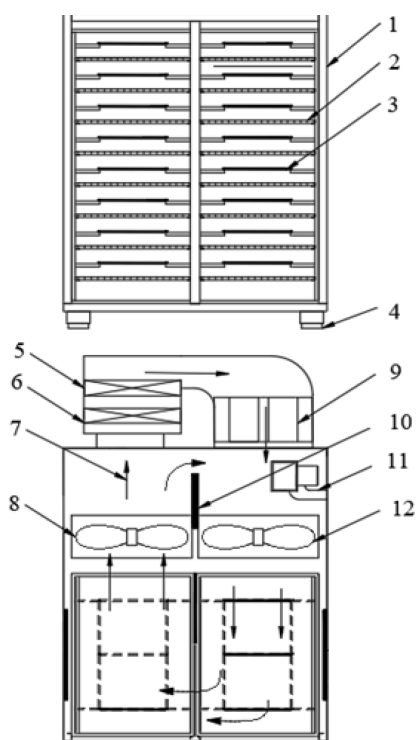
➤ Bộ phát hồng ngoại (HN) gồm các bóng đèn hồng ngoại được bố trí giữa các khay sấy, công suất tổng cộng 5,2 kW, bước sóng trung bình từ 2 ÷ 4 μm, phù hợp

với độ hấp thụ nước của nguyên liệu. IR tạo ra nhiệt bức xạ tác động trực tiếp lên bề mặt sản phẩm, giúp tăng tốc độ truyền ẩm.

➤ Bộ điều khiển trung tâm sử dụng vi điều khiển tích hợp cảm biến nhiệt độ, độ ẩm ( $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  và  $\pm 2\%$ ) và role SSR để đóng cắt tải công suất. Giao diện bằng màn hình LCD cảm ứng, giúp cho người dùng có thể lập trình các chế độ sấy linh hoạt theo thời gian, nhiệt độ và công suất phát xạ.

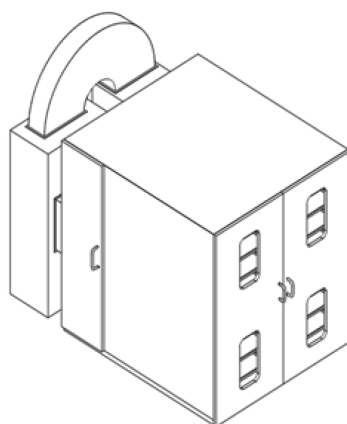
➤ Hệ thống an toàn bao gồm: công tắc chống quá dòng, cảm biến nhiệt cắt khi quá nhiệt ( $>70^{\circ}\text{C}$ ) và van an toàn áp suất cho cụm lạnh.

Hệ thống được thiết kế gồm các mô-đun, dễ lắp ráp, bảo trì, phù hợp cho quy mô thử nghiệm và hướng đến triển khai ở các hợp tác xã nông nghiệp có sản lượng trung bình. Mô hình này kết hợp hiệu quả gia nhiệt đối lưu tuần hoàn từ cụm bơm nhiệt và gia nhiệt bức xạ từ hồng ngoại, vừa tăng tốc sấy, vừa tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải.



**Hình 1. Nguyên lý cấu tạo máy sấy trái cây thái lát theo nguyên lý bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại [12]**

1. Buồng sấy;
2. Khay sấy;
3. Đèn hồng ngoại;
4. Bánh xe;
5. Dàn ngưng tụ;
6. Dàn bay hơi;
7. Hướng đi tác nhân sấy;
8. Quạt hút;
9. Bộ phận phân bố tác nhân sấy;
10. Tấm điều chỉnh lượng tác nhân sấy hồi lưu;
11. Quạt xả ẩm;
12. Quạt thổi



**2.2. Quy trình thực nghiệm**

Trong nghiên cứu này, sản phẩm được xem là đạt chuẩn khi độ ẩm cuối cùng dưới 12% (đo bằng cân ẩm điện tử) và màu sắc lát thanh long không bị biến đổi rõ rệt.

Vật liệu sấy là thanh long ruột đỏ được gọt vỏ, thái lát dày 5 mm, mỗi mẻ có khối lượng 45 kg. Thực nghiệm được thực hiện với ba phương pháp sấy trong cùng một điều kiện: sấy điện trở (ER), sấy bơm nhiệt (BN) và sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (BN-HN).

Các thông số được cần xác định gồm: năng lượng tiêu thụ (bằng đồng hồ đo điện năng Hioki), thời gian sấy, khối lượng nước bốc hơi, nhiệt độ, độ ẩm trong buồng sấy và phát thải CO<sub>2</sub> gián tiếp được tính

theo công thức:

- Công thức tính năng lượng tiêu thụ riêng (SEC): Theo nghiên cứu [3], suất tiêu hao năng lượng riêng trong quá trình sấy được xác định:

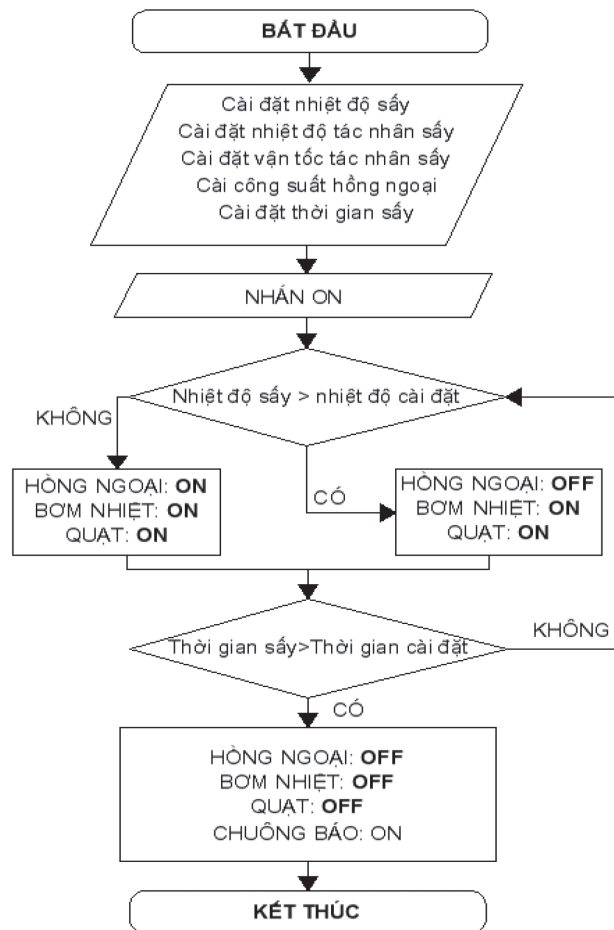
$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (1)$$

Trong đó:

E: Năng lượng tiêu thụ (kWh).

m<sub>w</sub>: Khối lượng nước bốc hơi (kg)

Toàn bộ năng lượng cung cấp cho hệ thống (máy nén lạnh, quạt gió và đèn hồng ngoại) đều là điện năng. Do đó, giá trị năng lượng tiêu thụ đo được bằng thiết bị Hioki đã bao gồm cả phần công suất hồng ngoại, không cần cộng riêng rẽ.



**Hình 2. Lưu đồ điều khiển hệ thống sấy**

- Công thức tính lượng phát thải CO<sub>2</sub> gián tiếp: Áp dụng theo hệ số phát thải điện lưới Việt Nam 2024 [1]:

$$\text{CO}_2 = E \cdot \text{EF} \text{ (kg)} \quad (2)$$

Trong đó:

E là năng lượng tiêu thụ (kWh),

EF là hệ số phát thải lưới điện Việt Nam

năm 2024, với EF = 0,6811 kgCO<sub>2</sub>/kWh [1].

Để thực hiện thí nghiệm, nhóm nghiên cứu đã chế tạo hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại với cấu tạo gọn, cho phép vừa tận dụng nhiệt thu hồi vừa bổ sung gia nhiệt bức xạ trực tiếp. Hình 3 minh họa mô hình hệ thống được sử dụng trong nghiên cứu.



Hình 3. Hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại sử dụng trong thực nghiệm

Máy sấy và toàn bộ quá trình thực nghiệm đều được thực hiện tại Trường Cao Đẳng Kỹ Thuật Cao Thắng. Đây là nơi có đầy đủ điều kiện cơ sở vật chất phù hợp để thực nghiệm.

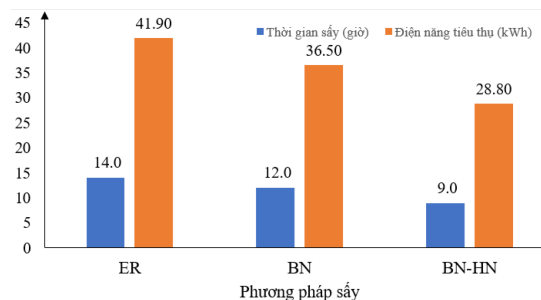
### 3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

#### 3.2. So sánh hiệu quả sấy

Ba phương pháp sấy gồm: sấy điện trở (ER), sấy bơm nhiệt (BN) và sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (BN-HN) được tiến hành trong cùng điều kiện cụ thể như: khối lượng nguyên liệu (45 kg), độ dày lát (5mm), nhiệt độ sấy (45°C) và độ ẩm cuối cần đạt (dưới 12%). Qua quá trình thực nghiệm kết quả được tổng hợp dưới bảng 1.

Bảng 1. Kết quả thực nghiệm

Phương pháp sấy	Năng lượng (kWh)	Thời gian sấy (giờ)	SEC (kWh/kg)
ER	41,90	14,0	1,14
BN	36,50	12,0	0,99
BN-HN	28,80	9,0	0,78

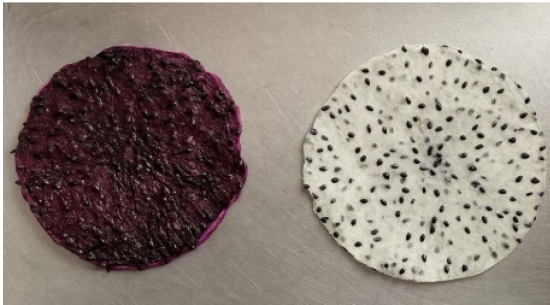


Hình 4. So sánh hiệu quả sấy giữa các phương pháp sấy

Kết quả thực nghiệm trình bày từ Bảng 1 và Hình 4 cho thấy hệ thống sấy BN-HN có mức tiêu thụ điện năng thấp nhất (28,80 kWh), thấp hơn lần lượt 31,2% so với ER và 21,1% so với BN. Đặc biệt, chỉ số suất tiêu hao năng lượng riêng (SEC) giảm đáng kể, chỉ còn 0,78 kWh cho mỗi kg nước bay hơi phản ánh hiệu suất sử dụng năng lượng vượt trội.

Thời gian sấy giảm xuống còn 9 giờ so với 14 giờ của phương pháp điện trở (ER) và 12 giờ của bơm nhiệt (BN), tương ứng mức rút ngắn 35,7 % và 25 %. Kết quả này chứng tỏ bức xạ hồng ngoại đã

tăng tốc quá trình gia nhiệt bề mặt, thúc đẩy truyền ẩm nhanh hơn, từ đó rút ngắn đáng kể thời gian sấy. Hiệu ứng này đồng thời giúp giảm thời gian vận hành và hạn chế tổn thất năng lượng gián tiếp từ các hệ thống phụ trợ.



Hình 5. Sản phẩm sau khi sấy

### 3.2. So sánh giảm phát thải CO<sub>2</sub>

Việc tính toán phát thải CO<sub>2</sub> được thực hiện dựa trên tổng điện năng tiêu thụ của từng phương pháp sấy, nhân với hệ số phát thải chuẩn của điện lưới Việt Nam năm 2024 là 0,6811 kgCO<sub>2</sub>/kWh [1].

Bảng 3. So sánh kết quả nghiên cứu về SEC và thời gian sấy khi tích hợp hồng ngoại

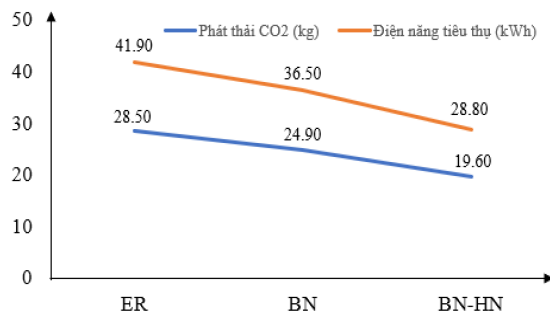
Tác giả/năm	Đối tượng sấy	Phương pháp sấy	Giảm SEC so với truyền thống	Giảm thời gian sấy
Doymaz et al. (2023)	Cà rốt bào sợi	BN-HN	15-25%	25-25%
Kaveh et al. (2023)	Lát lê	HN - Không khí nóng	13-30%	20-30%
Nghiên cứu này	Thanh Long thái lát	BN-HN	30,6%	48%

Do đó, hiệu quả đạt được trong thực nghiệm này là hợp lý và có cơ sở khoa học rõ ràng. Nghiên cứu đã thiết kế và vận hành thành công hệ thống sấy thanh long thái lát sử dụng công nghệ bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống này có hiệu suất năng lượng cao, SEC thấp, thời gian sấy ngắn và phát thải CO<sub>2</sub> giảm đáng kể. So với phương pháp sấy điện trở, BN-HN giảm gần 8,9 kg CO<sub>2</sub> mỗi mẻ sấy tương ứng với 31,2%. So với BN thuần túy, hệ thống BN-HN vẫn có

Kết quả phát thải gián tiếp được thể hiện ở bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính toán phát thải của các phương pháp sấy

Phương pháp sấy	Điện năng tiêu thụ (kWh)	Phát thải CO <sub>2</sub> (kg)
ER	41,90	28,50
BN	36,50	24,90
BN-HN	28,80	19,60



Hình 6. So sánh phát thải CO<sub>2</sub>

hiệu quả vượt trội về thời gian và phát thải. Điều này khẳng định tính ưu việt của công nghệ sấy tích hợp trong bối cảnh phát triển sản xuất nông nghiệp xanh tại Việt Nam. Nghiên cứu đề xuất mở rộng mô hình quy mô lớn và kết hợp năng lượng tái tạo trong tương lai để nâng cao hiệu quả bền vững.

### 3.4. Phân tích tổng phát thải CO<sub>2</sub> trong một năm

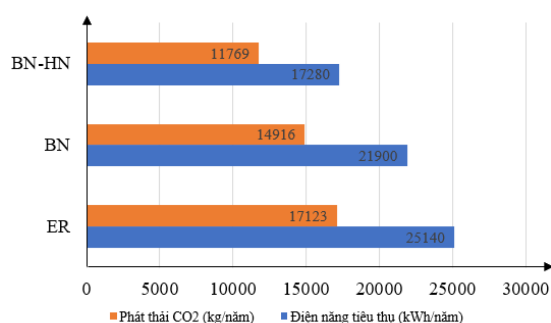
Để đánh giá tiềm năng giảm phát thải của từng công nghệ sấy, tiến hành quy đổi

mức phát thải CO<sub>2</sub> từ điện năng tiêu thụ của hệ thống, với giá định hệ thống sấy hoạt động 2 mẻ/ngày trong 300 ngày/năm (tổng cộng 600 mẻ mỗi năm).

Kết quả tổng lượng phát thải CO<sub>2</sub> trong một năm được trình bày trong bảng 4.

Bảng 4. Tổng phát thải CO<sub>2</sub> trong năm của từng hệ thống sấy.

Phương pháp sấy	Điện năng tiêu thụ (kWh/năm)	Phát thải CO <sub>2</sub> (kg/năm)
ER	25140	17123
BN	21900	14916
BN-HN	17280	11769



Hình 6. Phát thải CO<sub>2</sub> của các phương pháp sấy trong một năm

Qua kết quả ta thấy, hệ thống sấy BN-HN có thể giảm hơn 5 tấn CO<sub>2</sub> mỗi năm so với ER (tương đương giảm 31,3%) và hơn 3 tấn CO<sub>2</sub> so với BN thuần túy (tương ứng 21,1%). Đây là một chỉ số có ý nghĩa trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh lộ trình giảm phát thải ngành chế biến nông sản theo chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh.

Bên cạnh việc rút ngắn thời gian sấy và giảm điện năng tiêu thụ, một ưu điểm nổi bật của hệ thống BN-HN là khả năng thu hồi nhiệt từ dòng khí thải. Kết quả tính toán và vận hành cho thấy nhiệt thải sau buồng sấy vẫn còn ở mức cao. Thay vì xả bỏ ra môi trường, phần nhiệt này được bơm nhiệt

tái thu hồi, vừa giảm tổn thất, vừa cắt giảm phát thải CO<sub>2</sub> gián tiếp. Đây là điểm khác biệt căn bản so với sấy điện trở và sấy khí nóng truyền thống – vốn thải hoàn toàn khí nóng ra ngoài mà không tái sử dụng.

### 3.5. Chi phí vận hành và thời gian hoàn vốn

#### 3.5.1. Chi phí đầu tư

Theo khảo sát thực tế và báo giá thiết bị, hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (BN-HN) có chi phí đầu tư ban đầu cao hơn hệ thống sấy điện trở truyền thống (ER) khoảng 25–30%, tương ứng mức chênh lệch từ 15÷20 triệu đồng đối với hệ thống quy mô 45 kg nguyên liệu/mẻ.

#### 3.5.2. Chi phí vận hành

Hệ thống BN-HN giúp tiết kiệm đáng kể chi phí điện năng so với các phương pháp sấy khác được trình bày trong bảng 5.

Bảng 5. Chi phí vận hành các hệ thống sấy

Phương pháp sấy	Điện năng tiêu thụ (kWh/mẻ)	Chi phí điện / mẻ (đồng) Đơn giá: 2000 <sup>d</sup> /kWh
ER	41,90	83.800
BN	36,50	73.000
BN-HN	28,80	57.600

So với sấy điện trở, hệ thống BN-HN giúp tiết kiệm 26.200 đồng/mẻ, tương đương mức giảm 31,2% chi phí điện năng.

So với sấy bơm nhiệt thuần túy, mức tiết kiệm là 15.400 đồng/mẻ, tương đương 21,1%.

#### 3.5.3. Thời gian hoàn vốn

Trung bình mỗi tháng cơ sở sản xuất sấy 2 tấn Thanh Long, tương đương 45 mẻ sấy (mỗi mẻ 45kg/mẻ).

Mức tiết kiệm điện năng mỗi mẻ là 26.200 đồng so với sấy điện trở.

❖ Tổng tiết kiệm điện năng mỗi tháng:

$$S = (C_{ER} - C_{BN-HN}) \cdot n$$

Trong đó:

S: Số tiền tiết kiệm điện năng trên tháng (VNĐ/tháng)

$C_{ER}$ : Chi phí điện năng một mẻ sấy bằng điện trở (VNĐ/mẻ)

$C_{BN-HN}$ : Chi phí điện năng cho mẻ sấy BN-HN (VNĐ/mẻ)

n: số mẻ sấy trung bình trong một tháng (mẻ/tháng)

$$S = 26.200 \text{ đồng/mẻ} \cdot 45 \text{ mẻ/tháng} \\ = 1.179.000 \text{ đồng/tháng}$$

Chênh lệch chi phí đầu tư ban đầu: Theo khảo sát, hệ thống BN-HN có chi phí cao hơn khoảng 15–20 triệu đồng so với hệ thống ER.

❖ Thời gian hoàn vốn:

$$t = \frac{\Delta I}{S}$$

Trong đó:

t: thời gian hoàn vốn (tháng)

$\Delta I$ : Chi phí đầu tư trên lệch giữa hệ thống BN-HN và hệ thống ER (VNĐ)

S: Tổng tiết kiệm điện năng mỗi tháng (VNĐ/tháng)

• Trường hợp đầu tư cao hơn 15 triệu đồng:

$$t = \frac{15.000.000}{1.179.000} \approx 13 \text{ tháng}$$

• Trường hợp đầu tư cao hơn 20 triệu đồng:

$$t = \frac{20.000.000}{1.179.000} \approx 17 \text{ tháng}$$

Tính toán thực tế cho thấy, thời gian hoàn vốn của hệ thống BN-HN dao động từ 12–18 tháng, có thể rút ngắn xuống còn 6–12 tháng tùy theo sản lượng và hiệu quả vận hành cụ thể của từng cơ sở sản xuất.

#### 4. KẾT LUẬN

Hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại (BN-HN) cho thấy hiệu quả vượt trội so với các phương pháp sấy truyền thống. Thực nghiệm ghi nhận SEC chỉ 0,78 kWh/kg, rút ngắn đáng kể thời gian sấy và giảm phát thải CO<sub>2</sub>. So với sấy điện trở, BN-HN tiết kiệm 31,3% điện năng và giảm gần 8,9 kg CO<sub>2</sub>/mẻ; so với bơm nhiệt thuần, hệ thống vẫn giữ hiệu suất cao nhưng cải thiện rõ tốc độ sấy.

Việc bổ sung hồng ngoại giúp giảm tải cho cụm nén lạnh, tăng truyền nhiệt trực tiếp và duy trì độ ẩm cuối dưới 12%, đáp ứng yêu cầu bảo quản. Tuy chi phí đầu tư ban đầu cao hơn 25–30%, hệ thống mang lại lợi ích lớn về năng lượng, môi trường và chất lượng sản phẩm.

Một hạn chế của nghiên cứu là chưa thực hiện phân tích chi tiết hiệu suất năng lượng và exergy do giới hạn dữ liệu thực nghiệm. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả dự kiến sẽ bổ sung phân tích này để đánh giá toàn diện hơn hiệu quả nhiệt động của hệ thống, đồng thời tích hợp giải pháp thu hồi nhiệt thải nhằm nâng cao tính bền vững của công nghệ sấy BN-HN.

Mặc dù tồn tại một số hạn chế về chi phí đầu tư, những lợi ích về tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải và duy trì chất lượng sản phẩm đã khẳng định BN-HN là công nghệ phù hợp với định hướng phát triển nông nghiệp xanh và bền vững. Trong tương lai, việc triển khai mô hình ở quy mô công nghiệp (300–500 kg/mẻ) tại các địa phương có sản lượng nông sản lớn

như Tiền Giang và Đồng Tháp, kết hợp với năng lượng tái tạo như điện mặt trời, hứa hẹn mang lại hiệu quả kinh tế và môi trường lâu dài.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Lê Hải Hưng, Nguyễn Đức Quyền và Phạm Ngọc Anh (2025), “*Ước tính hệ số phát thải khí nhà kính (KNK) của lưới điện Việt Nam năm 2024*”, Tạp chí Tài nguyên & Môi trường.
- [2]. Phạm Thị Hạnh và cộng sự (2024), “*Heat Pump Technologies for Drying Agricultural Products and Medicinal Herbs – A Review*”, Tạp chí IJAEM, Vol.6, pp.947-951.
- [3]. Doymaz Ismail et al (2023), “*Performance analysis of infrared-heat pump drying of grated carrot*”, Thermal Science and Engineering Progress.
- [4]. Kaveh, M., Çetin, N., Gilandeh, Y.A. et al (2023), “*Comparative evaluation of greenhouse gas emissions and specific energy consumption of different drying techniques in pear slices*”, Eur Food Res Technol 249, pp. 3027–3041.
- [5]. Kaveh Ali et al (2023), “*Infrared-convective drying of pear slices and its impact on energy and emission efficiency*”, Scientific Reports.
- [6]. Senanur Durgut Malçok, M. A. Ozdemir và M. Baysal (2023), “*Influence of IRHP dryer on drying characteristics and bioaccessibility of mushroom slices*”, Journal of Agricultural Engineering.
- [7]. Khodaei Masoud, Motevali Ali và Minaei Saeid (2023), “*GHG emission reduction potential and exergy analysis of combined microwaveconvective dryer*”, Tạp chí Energy, Tập 285, trang 129344.
- [8]. Onwude David I., Hashim Norhashila, Janius Ramli, Nawi Nazmi, Abdan Khalina (2018), “*Evaluation of infrared radiation combined with hot air convection for energy-efficient drying of biomass*”, Tạp chí Energies, Tập 11, số 14, trang 2818.
- [9]. Kiều Anh (2018), “*Giữ chất lượng nông sản bằng công nghệ sấy bơm nhiệt*”, Tạp chí Khoa học & Phát triển.
- [10]. Viện Khoa học Kỹ thuật Nông nghiệp miền Nam (2017), “*Nghiên cứu ảnh hưởng chế độ sấy bơm nhiệt đến chất lượng tinh bột nghệ*”, Tạp chí Khoa học VAAS.
- [11]. <https://baomoi.com/phat-trien-nong-nghiep-ben-vung-gop-phan-giam-phat-thai-khi-nha-kinh-c46807337.epi> [Truy cập; 10/07/2025]
- [12]. Vũ Kế Hoạch và Lê Anh Đức (2019), “*Nghiên cứu thiết kế và chế tạo thiết bị đa năng sấy và khử khuẩn thanh long thái lát*”, Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn.