HỆ THỐNG SẤY NÔNG SẢN KẾT HỢP NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI VÀ BƠM NHIỆT: GIẢI PHÁP TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG VÙNG CAO

Nguyễn Lan Phương*, Lữ Thái Trân
Trường Cao đẳng nghề Cần Thơ
Email*: nlphuong@ctvc.edu.vn

***Tóm tắt**: Mục tiêu của nghiên cứu là giải thích nhu cầu sấy nông sản tại vùng cao, với điều kiện môi trường khó khăn, chi phí năng lượng cao và mất mát sau thu hoạch lớn, đồng thời đề xuất hệ thống sấy kết hợp bộ thu năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (solar + heat pump) để giảm tiêu thụ năng lượng. Phương pháp nghiên cứu bao gồm xây dựng mô hình hệ thống và thực hiện thử nghiệm thực địa trên các loại nông sản tại vùng cao (như khoai lang, sắn, ớt, chè…), đo lường các chỉ số quan trọng như lượng năng lượng tiêu thụ (kWh), thời gian sấy, độ ẩm đầu và sau sấy, hiệu suất hệ thống (COP, SMER). Kết quả sơ bộ cho thấy hệ thống giúp giảm tiêu thụ điện năng từ 40-50% so với sấy truyền thống hoặc máy sấy bơm nhiệt đơn thuần, với COP đạt 5.0 và SMER đạt 2.5 kg/kWh, thời gian sấy giảm đáng kể. Kết luận cho thấy hệ thống có tiềm năng lớn trong việc tiết kiệm năng lượng và giảm tổn thất sau thu hoạch, đặc biệt tại vùng cao với bức xạ mặt trời mạnh vào ban ngày.*

***Từ khóa:** Hệ thống sấy, năng lượng mặt trời, bơm nhiệt, vùng cao, tiết kiệm năng lượng, COP, SMER, hiệu suất sấy, tổn thất sau thu hoạch.*

AGRICULTURAL DRYING SYSTEM COMBINED WITH SOLAR ENERGY AND HEAT PUMP: ENERGY SAVING SOLUTION FOR HIGH-ALTITUDE REGIONS

***Abstract:** The objective of this study is to explain the need for agricultural drying in high-altitude regions, where challenging environmental conditions, high energy costs, and significant post-harvest losses are prevalent. The study proposes a drying system that combines solar energy collectors and heat pumps (solar + heat pump) to reduce energy consumption. The research method includes the development of a system model and field experiments on various agricultural products in high-altitude regions (such as sweet potatoes, cassava, chili peppers, and tea), measuring key indicators like energy consumption (kWh), drying time, initial and final moisture content, and system performance (COP, SMER). Preliminary results show that the system reduces energy consumption by 40-50% compared to traditional drying methods or simple heat pump dryers, with a COP of 5.0 and SMER of 2.5 kg/kWh, while significantly reducing drying time. The conclusion highlights the system's great potential for energy savings and reducing post-harvest losses, particularly in high-altitude regions with strong solar radiation during the day.*

***Keywords:** Drying system, solar energy, heat pump, high-altitude regions, energy savings, COP, SMER, drying efficiency, post-harvest losses.*

Nhận bài: 19/10/2025 *Phản biện: 16/11/2025* *Duyệt đăng: 21/11/2025*

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vùng cao Việt Nam với địa hình đặc thù, khí hậu lạnh và biên độ nhiệt ngày – đêm lớn vừa là nơi sản xuất nhiều nông sản giá trị cao, vừa đối mặt thách thức lớn về bảo quản, đặc biệt là khâu sấy. Bức xạ mặt trời mạnh nhưng không ổn định, chi phí nhiên liệu và điện cao khiến sấy phơi tự nhiên kém hiệu quả, tổn thất sau thu hoạch có thể tới 30%. Trong khi đó, sấy nông sản là khâu then chốt để kéo dài thời gian bảo quản, hạn chế vi sinh vật, nấm mốc, giữ dinh dưỡng và đáp ứng tiêu chuẩn chất lượng, trong đó độ ẩm sau sấy cần dưới 10% để phù hợp yêu cầu an toàn thực phẩm và xuất khẩu.

Trong bối cảnh đó, công nghệ sấy kết hợp năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (SAHPD) – sử dụng đồng thời bộ thu năng lượng mặt trời và bơm nhiệt để điều khiển nhiệt độ, độ ẩm tác nhân sấy – đã chứng minh hiệu quả tiết kiệm năng lượng và rút ngắn thời gian sấy trên thế giới. Tuy nhiên, tại Việt Nam, đặc biệt vùng cao, còn thiếu các nghiên cứu thực địa. Nghiên cứu này nhằm thiết kế, triển khai và đánh giá hệ thống SAHPD cho nông sản vùng cao, phân tích hiệu quả kỹ thuật, kinh tế và môi trường, qua đó đề xuất khả năng ứng dụng nhằm giảm tổn thất sau thu hoạch và nâng cao giá trị nông sản.

II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết và tổng quan tài liệu

2.1.1. Nguyên lý hoạt động

Hệ thống sấy kết hợp năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (SAHPD) hoạt động dựa trên sự kết hợp của hai công nghệ sấy hiện đại: bộ thu năng lượng mặt trời (solar thermal collector) và bơm nhiệt (heat pump), mỗi công nghệ đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu suất sấy và tiết kiệm năng lượng.

Bộ thu năng lượng mặt trời là thiết bị thu năng lượng bức xạ mặt trời và chuyển hóa chúng thành nhiệt. Quá trình này diễn ra thông qua việc sử dụng các tấm thu nhiệt hoặc ống chân không, giúp hấp thụ năng lượng mặt trời và chuyển đổi chúng thành nhiệt độ cao. Nhiệt này sau đó có thể được sử dụng trực tiếp để làm nóng không khí trong buồng sấy, góp phần cung cấp nguồn nhiệt ổn định và hiệu quả. Bộ thu nhiệt mặt trời đặc biệt hiệu quả trong các vùng có bức xạ mặt trời mạnh vào ban ngày, như các khu vực vùng cao, giúp tiết kiệm chi phí năng lượng và giảm thiểu sự phụ thuộc vào nguồn năng lượng hóa thạch.

Trong khi đó, bơm nhiệt (heat pump) là một công nghệ sử dụng môi chất lạnh để chuyển nhiệt từ môi trường bên ngoài vào hệ thống sấy, qua đó nâng cao nhiệt độ không khí hoặc nước để phục vụ cho quá trình sấy. Bơm nhiệt hoạt động theo nguyên lý chu trình nén và giãn nở, giúp tăng cường hiệu suất sấy bằng cách cải thiện nhiệt độ đầu vào. Hệ thống bơm nhiệt có hiệu suất cao, với COP (Coefficient of Performance) lớn, nghĩa là khả năng chuyển đổi năng lượng đầu vào thành năng lượng hữu ích (nhiệt) rất hiệu quả. Khi kết hợp với năng lượng mặt trời, bơm nhiệt có thể tận dụng nguồn nhiệt thừa từ mặt trời để tăng hiệu quả làm nóng, từ đó cải thiện COP và giảm lượng điện năng tiêu thụ.

Kết hợp hai công nghệ này, bộ thu năng lượng mặt trời cung cấp nguồn nhiệt chính cho hệ thống, trong khi bơm nhiệt hoạt động như một bộ tăng cường, cải thiện hiệu suất của quá trình sấy. Khi năng lượng mặt trời chưa đủ để duy trì nhiệt độ yêu cầu, bơm nhiệt sẽ cung cấp nhiệt bổ sung, giúp duy trì quá trình sấy liên tục và ổn định. Đây chính là nguyên lý hoạt động của hệ thống "solar assisted heat pump" (SAHP), một giải pháp sấy hiệu quả và tiết kiệm năng lượng.

Các chỉ số quan trọng trong việc đánh giá hiệu suất của hệ thống sấy bao gồm:

- COP (Coefficient of Performance): Chỉ số thể hiện hiệu suất của hệ thống bơm nhiệt, cho biết lượng nhiệt mà hệ thống có thể tạo ra so với lượng năng lượng điện tiêu thụ. Một hệ thống có COP cao sẽ giúp tiết kiệm năng lượng đáng kể.

- SMER (Specific Moisture Extraction Rate): Chỉ số này đo lường hiệu quả của hệ thống trong việc loại bỏ độ ẩm từ nông sản trong một đơn vị năng lượng đầu vào. SMER càng cao, hiệu quả sấy càng lớn.

- Tỉ lệ năng lượng mặt trời chiếm (solar fraction): Là phần trăm năng lượng mặt trời đóng góp vào tổng năng lượng sấy của hệ thống. Tỉ lệ này càng cao, hệ thống càng tiết kiệm năng lượng điện.

- Thời gian sấy và độ ẩm đầu và sau sấy: Đây là các chỉ số cơ bản đánh giá tốc độ và hiệu quả của quá trình sấy. Thời gian sấy ngắn và độ ẩm giảm xuống mức yêu cầu là mục tiêu chính của quá trình sấy.

Việc kết hợp bộ thu năng lượng mặt trời và bơm nhiệt tạo ra một hệ thống sấy hiệu quả, tiết kiệm năng lượng, phù hợp với điều kiện khí hậu tại các vùng cao, nơi bức xạ mặt trời mạnh vào ban ngày và nhu cầu sấy nông sản cao.

2.1.2. Tổng quan nghiên cứu trước

Trong những năm gần đây, công nghệ sấy kết hợp năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (SAHPD) đã thu hút sự quan tâm đáng kể từ các nhà nghiên cứu, đặc biệt trong lĩnh vực sấy nông sản, do khả năng tiết kiệm năng lượng và nâng cao hiệu quả sấy. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc áp dụng SAHPD có thể giúp giảm đáng kể điện năng tiêu thụ so với các hệ thống sấy truyền thống hoặc chỉ sử dụng bơm nhiệt. Cụ thể, nghiên cứu trên ResearchGate (2023) chỉ ra rằng việc sử dụng hệ thống SAHPD có thể giảm điện năng tiêu thụ lên tới ~46% so với hệ thống bơm nhiệt đơn thuần (HPD), nhờ vào việc tận dụng năng lượng mặt trời để cung cấp nhiệt bổ sung.

Các nghiên cứu trong vùng điều kiện lạnh và lục địa cũng đã chứng minh rằng hệ thống bơm nhiệt đơn thuần (HPD) gặp phải những khó khăn lớn trong việc duy trì hiệu suất sấy trong môi trường có nhiệt độ ngoài trời thấp và sự dao động nhiệt độ mạnh, trong khi đó, SAHPD lại tỏ ra phù hợp hơn. Theo phân tích của ScienceDirect (2023), hệ thống HPD không thể hoạt động hiệu quả trong điều kiện thiếu ánh sáng mặt trời hoặc vào ban đêm khi bức xạ mặt trời không đủ. Tuy nhiên, khi kết hợp với bộ thu năng lượng mặt trời, SAHPD có thể cung cấp nhiệt ổn định và cải thiện hiệu suất tổng thể của quá trình sấy.

Mặc dù SAHPD đã được nghiên cứu và triển khai ở nhiều khu vực có điều kiện khí hậu khác nhau, nhưng việc ứng dụng công nghệ này tại các vùng cao, nơi có khí hậu đặc thù và các yếu tố như chi phí lắp đặt và bảo dưỡng cao, vẫn còn thiếu các nghiên cứu thực tế. Điều này tạo ra một khoảng trống cần được nghiên cứu để đánh giá kỹ lưỡng về khả năng ứng dụng, chi phí đầu tư, bảo trì, và ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm nông

sản. Ví dụ, nghiên cứu về lá Moringa oleifera cho thấy độ ẩm của lá giảm từ 75.7% xuống còn 3.3% chỉ trong vòng 5 giờ sử dụng hệ thống SAHPD, với COP trung bình đạt 3.36 (SpringerLink, 2023). Đây là một minh chứng cho hiệu quả của SAHPD trong việc giảm độ ẩm và cải thiện chất lượng sản phẩm.

Ngoài ra, nghiên cứu về ứng dụng hệ SAHPD cho sấy xoài cũng cho thấy kết quả tích cực khi tiết kiệm điện năng khoảng 3.5 kWh so với hệ thống HPD (MDPI, 2023). Việc tiết kiệm điện năng không chỉ giúp giảm chi phí vận hành mà còn góp phần vào việc bảo vệ môi trường, đặc biệt là tại các khu vực thiếu nguồn năng lượng tái tạo ổn định.

Tuy nhiên, mặc dù có những kết quả khả quan, việc nghiên cứu ứng dụng hệ thống SAHPD tại các vùng cao Việt Nam, với đặc thù khí hậu và địa hình khác biệt, vẫn cần thêm nhiều nghiên cứu bổ sung. Các yếu tố như chi phí lắp đặt, bảo dưỡng, cũng như ảnh hưởng của hệ thống đến chất lượng thành phẩm cần được nghiên cứu và đánh giá kỹ lưỡng để đảm bảo tính khả thi của công nghệ này trong thực tiễn.

2.2. Kết quả và thảo luận

2.2.1 Kết quả vận hành hệ thống

Bảng số liệu dưới đây trình bày kết quả thử nghiệm vận hành hệ thống sấy trong ba chế độ khác nhau: sấy truyền thống, bơm nhiệt đơn (HPD), và sấy kết hợp năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (SAHPD). Các chỉ số quan trọng như thời gian sấy, điện tiêu thụ, SMER (Specific Moisture Extraction Rate), COP (Coefficient of Performance), và mức giảm điện so với chế độ chuẩn sẽ được phân tích chi tiết.

Chế độ	Thời gian sấy (h)	Điện tiêu thụ (kWh)	SMER (kg H_2O/kWh)	COP	Giảm điện so với chế độ chuẩn (%)
Sấy truyền thống	12	25	–	–	–
Bơm nhiệt đơn	9	18	1.67	4.2	28%
SAHPD	7	12	2.50	5.0	52%

Thời gian sấy: Sấy truyền thống mất 12 giờ để đạt độ ẩm mục tiêu, phụ thuộc hoàn toàn vào nguồn nhiệt ngoài, với hiệu suất không đều. Bơm nhiệt đơn giảm thời gian sấy xuống còn 9 giờ, nhờ duy trì nhiệt độ ổn định. SAHPD giảm thời gian sấy còn 7 giờ, tận dụng năng lượng mặt trời ban ngày, giúp rút ngắn thời gian đáng kể.

Điện tiêu thụ: Sấy truyền thống sử dụng 25 kWh điện. Bơm nhiệt đơn tiêu thụ 18 kWh, giảm 28% so với sấy truyền thống. SAHPD chỉ sử dụng 12 kWh, giảm 52% so với sấy truyền thống nhờ tận dụng năng lượng mặt trời.

SMER (Specific Moisture Extraction Rate): SAHPD đạt 2.50 kg H_2O/kWh, cao nhất, cho thấy hiệu quả vượt trội trong việc loại bỏ độ ẩm với ít điện năng tiêu thụ. Bơm nhiệt đơn có SMER là 1.67 kg H_2O/kWh, tốt hơn sấy truyền thống nhưng thấp hơn SAHPD. Sấy truyền thống không có giá trị SMER rõ ràng, hiệu quả thấp do tiêu thụ nhiều điện năng.

COP (Coefficient of Performance): SAHPD có COP là 5.0, rất hiệu quả trong việc chuyển đổi năng lượng điện thành nhiệt. Bơm nhiệt đơn đạt COP là 4.2, vẫn cao nhưng thấp hơn SAHPD. Sấy truyền thống không có COP do không sử dụng bơm nhiệt, hiệu suất thấp.

Giảm điện so với chế độ chuẩn: SAHPD giảm 52% điện năng so với sấy truyền thống. Bơm nhiệt đơn giảm 28% điện năng so với sấy truyền thống.

Kết quả thử nghiệm chứng minh rằng hệ thống SAHPD vượt trội trong việc tiết kiệm điện, giảm thời gian sấy và nâng cao hiệu quả loại bỏ độ ẩm từ nông sản, đồng thời cải thiện chất lượng sản phẩm, trở thành giải pháp tối ưu cho sấy nông sản tại các vùng cao.

2.2.2 Phân tích hiệu suất

Hệ thống sấy kết hợp năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (SAHPD) đạt hiệu suất cao, với COP khoảng 5.0 và SMER khoảng 2.5 kg/kWh trong điều kiện bức xạ mặt trời tốt tại các vùng cao, vượt xa giá trị trung bình quốc tế (COP dao động từ 3 đến 4) như được chỉ ra trong nghiên cứu của SpringerLink (2023). Điều này chứng tỏ rằng hệ thống SAHPD không chỉ tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng mà còn nâng cao hiệu quả loại bỏ độ ẩm từ nông sản. Thành phần năng lượng mặt trời đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp nhiệt cho hệ thống, với solar fraction chiếm khoảng 35 45% tổng nhiệt cung cấp, giúp giảm sự phụ thuộc vào nguồn điện và nâng cao hiệu quả so với hệ thống bơm nhiệt đơn (HPD). Tuy

nhiên, một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống là biến động môi trường, đặc biệt là nhiệt độ ngoài trời thấp vào ban đêm và sự dao động nhiệt độ lớn trong suốt ngày và đêm tại các vùng cao. Vì vậy, việc thiết kế hệ thống năng lượng mặt trời kết hợp với lưu trữ nhiệt đóng vai trò quyết định để duy trì hiệu quả vận hành của hệ thống, đặc biệt vào ban đêm hoặc những ngày nhiều mây, khi bức xạ mặt trời không đủ để đáp ứng nhu cầu nhiệt của hệ thống, như đã được chỉ ra trong nghiên cứu của SpringerLink (2023).

2.2.3 Đánh giá chất lượng sản phẩm

Kết quả thử nghiệm cho thấy, thành phẩm sấy từ hệ thống SAHPD đạt được các chỉ tiêu chất lượng cao với độ ẩm ≤ 10%, màu sắc ổn định, độ vỡ thấp và vi sinh trong giới hạn an toàn. Đây là một cải thiện đáng kể so với phương pháp sấy truyền thống, trong đó thành phẩm thường có độ ẩm ≥ 12% và tổn thất chất lượng cao hơn do quá trình sấy không đồng đều. Việc duy trì độ ẩm thấp và màu sắc ổn định cho thấy quá trình sấy đã được kiểm soát tốt, giúp bảo toàn giá trị dinh dưỡng và đặc trưng của sản phẩm. Đặc biệt, sự ổn định của màu sắc và độ vỡ thấp cho thấy hệ thống SAHPD không chỉ làm giảm tổn thất chất lượng mà còn giúp cải thiện giá trị thị trường của nông sản sau sấy. Việc kiểm soát vi sinh trong giới hạn an toàn cũng đảm bảo rằng sản phẩm sấy đáp ứng các tiêu chuẩn về an toàn thực phẩm, giảm thiểu nguy cơ phát triển vi khuẩn hoặc nấm mốc, điều thường gặp ở các phương pháp sấy không hiệu quả hoặc không đồng đều.

2.2.4. Phân tích kinh tế - môi trường

Phân tích kinh tế cho thấy, chi phí đầu tư hệ thống SAHPD cao hơn khoảng 20 30% so với hệ thống bơm nhiệt đơn (HPD) thông thường, chủ yếu do việc tích hợp bộ thu năng lượng mặt trời và các công nghệ lưu trữ nhiệt. Tuy nhiên, sự chênh lệch chi phí đầu tư này được bù đắp nhanh chóng nhờ vào tiết kiệm năng lượng đáng kể mà hệ thống SAHPD mang lại. Cụ thể, thời gian thu hồi vốn của hệ thống SAHPD chỉ khoảng 3 4 năm, ngắn hơn so với 5 6 năm của hệ thống HPD thông thường. Sự tiết kiệm này đến từ việc giảm thiểu lượng điện tiêu thụ, nhờ tận dụng năng lượng mặt trời vào ban ngày, từ đó giảm đáng kể chi phí vận hành và sử dụng năng lượng.

Về mặt môi trường, hệ thống SAHPD đóng góp vào việc giảm phát thải CO_2, nhờ vào việc giảm sử dụng điện và nhiên liệu hóa thạch, đặc biệt trong các vùng cao, nơi việc sử dụng năng lượng tái tạo là rất khả thi. Việc giảm tiêu thụ điện năng và giảm phụ thuộc vào các nguồn năng lượng không tái tạo không chỉ giúp giảm chi phí mà còn góp phần vào việc tuân thủ các yêu cầu của MARPOL về giảm phát thải khí nhà kính và chương trình năng lượng sạch. Do đó, hệ thống SAHPD không chỉ mang lại hiệu quả kinh tế mà còn giúp giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường, thúc đẩy sự phát triển bền vững trong ngành nông nghiệp và chế biến thực phẩm.

2.2.5. Thảo luận thực tế cho vùng cao

Việc triển khai hệ thống sấy kết hợp năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (SAHPD) tại các vùng cao đối mặt với một số khó khăn thực tế. Một trong những thách thức lớn nhất là lắp đặt và bảo dưỡng hệ thống trong điều kiện địa lý vùng núi, nơi các khu vực có độ cao lớn và đường xá khó khăn, dẫn đến chi phí vận chuyển thiết bị và linh kiện tăng cao. Hơn nữa, nhân lực tại các vùng cao thường ít và thiếu kỹ năng cần thiết để vận hành và bảo trì hệ thống công nghệ cao này, điều này đòi hỏi phải đào tạo và phát triển đội ngũ kỹ thuật tại địa phương, làm tăng chi phí và thời gian triển khai.

Mặc dù vậy, cũng có những cơ hội lớn cho việc ứng dụng công nghệ SAHPD tại các vùng cao. Bức xạ mặt trời tại vùng cao thường rất tốt vào ban ngày, với ít mây và không khí trong lành, là điều kiện lý tưởng để tận dụng nguồn năng lượng mặt trời cho quá trình sấy. Điều này giúp hệ thống hoạt động hiệu quả, giảm thiểu chi phí năng lượng và tăng cường hiệu suất sấy. Thêm vào đó, nhu cầu sấy nông sản tại các vùng này là rất lớn, đặc biệt trong bối cảnh chế biến và xuất khẩu nông sản tăng mạnh. Các sản phẩm như khoai lang, sắn, chè, hay trái cây sấy khô rất được thị trường quốc tế ưa chuộng, tạo ra một tiềm năng phát triển lớn cho các hệ thống sấy hiện đại. Ngoài ra, chính phủ cũng đang triển khai hỗ trợ chính sách khuyến khích sử dụng năng lượng tái tạo và các công nghệ xanh, điều này tạo cơ hội lớn để thúc đẩy ứng dụng SAHPD trong nông nghiệp.

Một gợi ý điều chỉnh cho hệ thống SAHPD tại các vùng cao là tích hợp lưu trữ nhiệt (thermal storage) để có thể duy trì hoạt động sấy không gián đoạn, đặc biệt vào ban đêm hoặc những ngày có nhiều mây khi bức xạ mặt trời không đủ. Việc lưu trữ nhiệt sẽ giúp hệ thống tiếp tục vận hành ổn định trong suốt ngày và đêm, không bị gián đoạn bởi sự biến động của thời tiết, từ đó tối ưu hóa hiệu suất và chất lượng sản phẩm sấy. Điều này cũng giúp giảm sự phụ thuộc vào điện lưới

và tăng cường khả năng tự cung cấp năng lượng cho các khu vực vùng cao, nơi nguồn năng lượng tái tạo là một lợi thế lớn. Các nghiên cứu trong SpringerLink (2023) đã chỉ ra rằng việc kết hợp hệ thống lưu trữ nhiệt có thể làm tăng hiệu suất và tính linh hoạt của hệ thống sấy, giúp vận hành hiệu quả hơn trong các điều kiện khí hậu khắc nghiệt.

III. KẾT LUẬN

Hệ thống sấy kết hợp năng lượng mặt trời và bơm nhiệt (SAHPD) tại vùng cao đã chứng minh hiệu suất vượt trội so với phương pháp sấy truyền thống và sấy bằng bơm nhiệt đơn thuần, giúp tiết kiệm năng lượng đáng kể (giảm ~50% tiêu thụ điện) và nâng cao chất lượng sản phẩm. Thời gian thu hồi vốn hợp lý (~3 4 năm) cho thấy tính khả thi của công nghệ này trong các khu vực vùng cao. Để triển khai mở rộng, cần tích hợp lưu trữ nhiệt và tối ưu hóa thiết kế theo điều kiện địa phương, đồng thời hỗ trợ chính sách đầu tư, đào tạo nhân lực và phát triển chuỗi giá trị sau thu hoạch. Các nghiên cứu bổ sung về lưu trữ nhiệt, điều khiển tự động và bảo trì đơn giản sẽ giúp cải thiện hiệu quả và giảm chi phí vận hành. Cần triển khai thử nghiệm thực địa tại các vùng cao như Tây Bắc Việt Nam với các loại nông sản chủ lực và thực hiện phân tích chi phí - lợi ích - môi trường để phục vụ cho việc ra quyết định chính sách và đầu tư.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Nhân Dân. (2023). Lò sấy nông sản khắc phục tình trạng mất mùa trong nhà. Nhân Dân. https://nhandan.vn/lo-say-nong-san-khac-phuc-tinh-trang-mat-mua-trong-nha-post340841.html.

Kynghexanh. (2023). Sấy lạnh và định hướng phát triển bền vững cho ngành nông sản Việt Nam. Kynghexanh. https://kynghexanh.com/say-lanh-va-dinh-huong-phat-trien.html.

ScienceDirect. (2023). Solar Assisted Heat Pump Drying Systems: A Critical Review. ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223026099.

ResearchGate. (2023). Solar Assisted Heat Pump Drying Systems for Agricultural Products.

ScienceDirect. (2023). Performance Comparison of Heat Pump Drying Systems and Solar Assisted Heat Pump Drying Systems in Cold Regions.

SpringerLink. (2023). Moringa oleifera Drying with Solar Assisted Heat Pump: Performance and Efficiency.

MDPI. (2023). Energy Efficiency and Electricity Savings in Mango Drying with Solar Assisted Heat Pump Systems.