

MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH SẤY BƠM NHIỆT DÒNG KHÍ THẲNG ĐỨNG CHO VẬT LIỆU DẠNG BỘT DỄ CHÁY NỔ

MODELING AND SIMULATION OF VERTICAL AIR-FLOW HEAT PUMP DRYING PROCESS FOR EXPLOSIVE POWDER MATERIALS

Nguyễn Duy Dân*, Nguyễn Văn Thành, Trần Xuân Thịnh

Trung tâm Quang điện tử, Viện Ứng dụng công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ

*Email: ngduydan166@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình hóa và mô phỏng động lực học của quá trình sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng đối với vật liệu bột có nguy cơ cháy nổ cao. Mô hình toán được thiết lập dựa trên phương trình cân bằng năng lượng – khối lượng kết hợp mô phỏng động lực học chất lưu (CFD), nhằm phân tích trường nhiệt – ẩm và phân bố vận tốc dòng khí trong buồng sấy. Kết quả mô phỏng cho thấy dòng khí thẳng đứng giúp phân bố nhiệt đều, ổn định gradient ẩm theo chiều sâu lớp bột, hạn chế tích nhiệt cục bộ. Lớp bột có chiều dày 2-4 mm đạt hiệu suất sấy cao nhất, rút ngắn thời gian sấy 20-25% so với sấy ngang truyền thống. Hệ số hiệu suất năng lượng COP đạt 3,4-4,2, với mức tiết kiệm điện năng trung bình 18-25%. Hệ thống duy trì an toàn nhiệt cấp II theo tiêu chuẩn ATEX, không xuất hiện vùng quá nhiệt ($>85^{\circ}\text{C}$) trong suốt chu trình sấy. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho thiết kế và chế tạo hệ thống sấy bơm nhiệt tự động, tiết kiệm năng lượng và đảm bảo an toàn cháy nổ cho vật liệu bột dễ cháy.

Từ khóa: Sấy bơm nhiệt; Mô hình CFD; Bột dễ cháy nổ; Dòng khí thẳng đứng; Động lực học nhiệt – ẩm.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and dynamic simulation of a vertical air-flow heat pump drying process for powder materials with a high risk of explosion. A mathematical model was developed based on the energy – mass balance equations combined with Computational Fluid Dynamics (CFD) to analyze the temperature – moisture field and air velocity distribution inside the drying chamber. The simulation results show that the vertical airflow ensures a uniform temperature distribution, stabilizes the moisture gradient along the powder layer, and prevents local heat accumulation. Powder layers with a thickness of 2-4 mm achieved the highest drying efficiency, reducing the drying time by 20-25% compared to conventional horizontal airflow drying. The Coefficient of Performance (COP) ranged from 3.4 to 4.2, corresponding to an average energy saving of 18-25%. The system maintained thermal safety level II (ATEX standard), with no overheat zones ($>85^{\circ}\text{C}$) observed during the entire drying cycle. The results provide a scientific basis for the design and development of automatic, energy-efficient, and explosion-safe heat pump drying systems for fine and flammable powder materials.

Keywords: Heat pump drying; CFD modeling; Explosive powder materials; Vertical airflow; Thermo – moisture dynamics.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong lĩnh vực chế biến vật liệu dạng bột dễ cháy nổ (như bột kim loại, bột năng lượng, bột hữu cơ tinh chế), công đoạn sấy và định lượng luôn tiềm ẩn rủi ro cao về cháy bụi. Các hệ thống sấy cưỡng bức truyền thống thường xuất hiện điểm nóng cục bộ và tích tụ nhiệt, dẫn đến nguy cơ cháy nổ khi nồng độ bụi vượt giới hạn cháy nổ hạ (LEL) [1-4]. Ngoài ra, trong quá trình sấy đối lưu thông thường, sự phân bố nhiệt và ẩm không đồng đều trong khối bột dẫn đến hiện tượng tạo vón cục, biến tính sản phẩm và làm giảm chất lượng cuối cùng [2, 3]. Việc phát triển các công nghệ sấy tiên tiến có khả năng điều khiển chính xác nhiệt độ, độ ẩm và dòng không khí đang là hướng nghiên cứu trọng tâm của nhiều nhóm trong và ngoài nước [5, 6]. Trong đó, công nghệ sấy bơm nhiệt (Heat Pump Drying – HPD) được xem là một giải pháp hiệu quả do có thể thu hồi và tái sử dụng nhiệt ẩn của không khí thải, giúp tiết kiệm năng lượng 30-50% so với sấy điện trở thông thường [6-8]. Nguyên lý hoạt động dựa trên chu trình nén – ngưng – giãn – bay hơi, cho phép duy trì nhiệt độ sấy thấp (40-70°C) nhưng vẫn đảm bảo tốc độ truyền nhiệt cao nhờ khả năng tuần hoàn không khí kín [5, 7]. Một số nghiên cứu trước đây như của Trần Văn Phú (2002) [1], Hoàng Văn Chúc (2006) [3] và Alves-Filho & Stommen (1996) [4] đã chứng minh rằng việc tổ chức dòng khí thẳng đứng cưỡng bức giúp giảm đáng kể gradient nhiệt theo chiều dày vật liệu, tăng tính đồng đều của quá trình trao đổi nhiệt – ẩm. Tuy nhiên, các công trình này chủ yếu tập trung vào vật liệu nông sản hoặc sinh khối, chưa xem xét kỹ yếu tố an toàn cháy nổ khi sấy vật liệu có khả năng tự bốc cháy hoặc phát tia lửa.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung mô phỏng và đánh giá đặc tính truyền nhiệt –

ẩm của hệ thống sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng cho vật liệu dạng bột dễ cháy nổ, với mục tiêu: (i) xây dựng mô hình toán mô tả động lực học truyền nhiệt – ẩm; (ii) phân tích phân bố trường nhiệt độ, độ ẩm và vận tốc dòng khí bằng phương pháp mô phỏng CFD; và (iii) đề xuất cấu hình vận hành tối ưu đảm bảo hiệu suất năng lượng cao và an toàn nhiệt trong môi trường có nguy cơ cháy nổ cao [7-9].

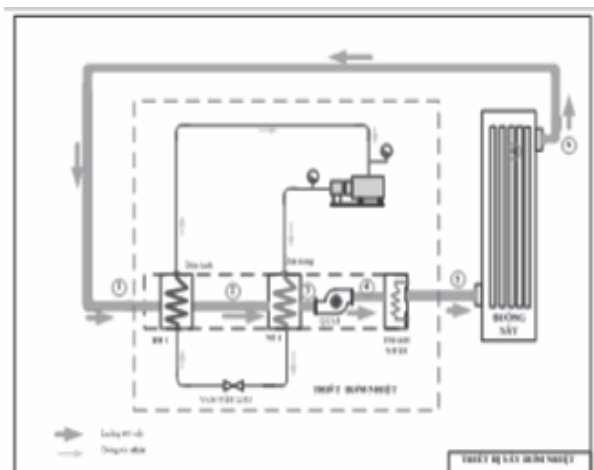
2. CẤU HÌNH THIẾT BỊ VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

Hệ thống sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng được thiết kế dưới dạng buồng sấy kín, sử dụng chu trình bơm nhiệt tuần hoàn cưỡng bức, trong đó luồng khí nóng khô được thổi từ dưới lên xuyên qua lớp bột vật liệu. Cấu hình tổng thể gồm bốn cụm chính: Cụm bơm nhiệt (Heat pump unit): Gồm máy nén, dàn ngưng, dàn bay hơi và van tiết lưu; sử dụng môi chất lạnh R134a. Hệ thống thực hiện chu trình nén – ngưng – giãn – bay hơi, cho phép thu hồi và tái sử dụng nhiệt từ khí thải, đồng thời duy trì nhiệt độ ổn định 40-70°C trong buồng sấy.

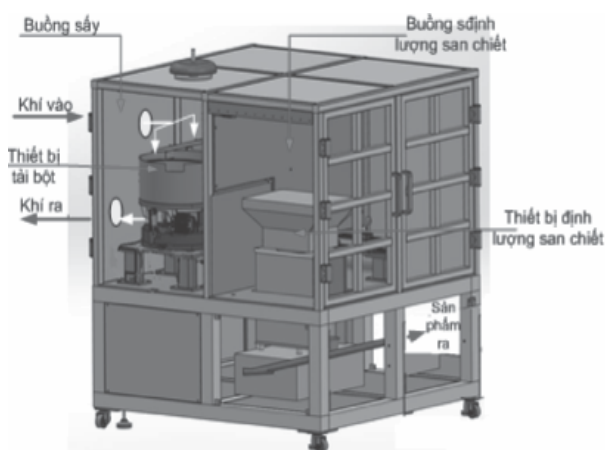
Buồng sấy đối lưu thẳng đứng: Có kích thước 1000 × 600 × 800 mm; vỏ hai lớp inox – composite cách nhiệt. Luồng khí nóng được phân phối đều tại đáy buồng, đi xuyên qua khay sấy chứa lớp bột dày 2-10 mm. Nhiệt độ được kiểm soát tự động với sai số ±1°C. Cụm định lượng – san chiết: Cho phép định lượng khối lượng 50-200 g mỗi chu kỳ, sai số ±0,3%. Sau sấy, sản phẩm được chuyển đến phễu định lượng và san chiết tự động.

Hệ thống điều khiển và giám sát SCADA: Gồm cảm biến nhiệt, ẩm, áp suất và khối lượng; bộ PID điều khiển công suất nén; màn hình hiển thị và lưu trữ dữ liệu thời gian thực. Hệ thống có chức năng cảnh báo quá nhiệt 

($> 90^{\circ}\text{C}$), van xả áp tự động và ngắt mạch khẩn cấp, đảm bảo an toàn cấp II theo tiêu chuẩn ATEX.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng.



Hình 2. Cấu tạo buồng sấy và hệ thống định lượng tự động.

Nguyên lý hoạt động: Không khí ẩm từ lớp bột được dẫn qua dàn bay hơi để tách nước, sau đó được gia nhiệt trở lại trong dàn ngưng tụ và phân phối đều trong buồng sấy. Quá trình này lặp lại cho đến khi độ ẩm của vật sấy giảm dưới 1%. Cấu trúc dòng khí thẳng đứng giúp giảm gradient nhiệt, ngăn hiện tượng “cháy lớp” thường gặp trong sấy ngang.

3. MÔ HÌNH TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

3.1. Mô hình toán học

Quá trình sấy được mô tả dựa trên hệ phương trình truyền nhiệt – truyền khối kết hợp trong môi trường xốp, có xét tới sự biến thiên ẩm và nhiệt theo thời gian và không gian [1, 5, 10, 11]:

$$\begin{aligned}\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} &= k_{eff} \nabla^2 T - L_v \frac{\partial w}{\partial t} \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= D_{eff} \nabla^2 w - v_z \frac{\partial w}{\partial z}\end{aligned}$$

Trong đó:

- T: Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$);
- w: Độ ẩm vật liệu (%);
- ρ_s, c_s : Khối lượng riêng và nhiệt dung riêng của vật liệu;
- k_{eff} : Hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng ($\text{W/m}\cdot\text{K}$);
- D_{eff} : Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng (m^2/s);
- v_z : Vận tốc dòng khí thẳng đứng (m/s);
- L_v : Nhiệt ẩn hóa hơi của nước (kJ/kg).

Các hằng số vật lý được xác định theo thực nghiệm và tham chiếu theo mô hình truyền nhiệt – ẩm [10, 11].

3.2. Mô phỏng CFD

Mô hình CFD được xây dựng trên phần mềm ANSYS Fluent 2024R1, chia lưới không gian 3D theo khối dạng cấu trúc (structured grid), với kích thước ô 1 mm trong vùng lớp bột ($2 \div 10$ mm). Mô phỏng sử dụng mô hình dòng rối k- ϵ chuẩn (Standard k- ϵ), kết hợp với mô hình Discretized Evaporation để mô phỏng sự thoát hơi ẩm từ bề mặt hạt bột [12].

Điều kiện biên mô phỏng:

Nhiệt độ khí vào: $40 \div 70^\circ\text{C}$ (nội suy tới 100°C).

Độ ẩm tương đối khí vào: 20%.

Tốc độ dòng khí: $0,5 \div 1,2 \text{ m/s}$.

Độ dày lớp bột: 2, 4, 6, 10 mm.

Các đại lượng được trích xuất sau mô phỏng:

Phân bố nhiệt độ trong lớp bột theo thời gian (T-z-t).

Biến thiên độ ẩm trung bình (w-t).

Gradient nhiệt độ và ẩm theo chiều sâu (dT/dz, dw/dz).

Đánh giá ổn định dòng nhiệt và nguy cơ tích tụ nhiệt cục bộ.

Dữ liệu mô phỏng được dùng làm cơ sở để vẽ các biểu đồ 2D và 3D về:

Biến thiên nhiệt độ theo thời gian;

Độ ẩm giảm theo thời gian;

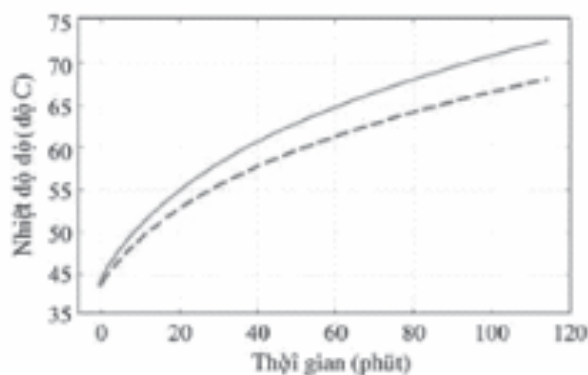
Phân bố nhiệt độ – độ ẩm – chiều dày lớp bột.

Kết quả này là nền tảng để xây dựng biểu đồ đặc trưng động lực học sấy (drying kinetics) và phân tích độ ổn định nhiệt – an toàn phòng nổ.

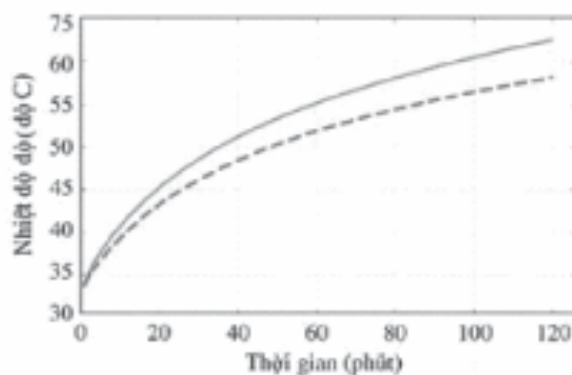
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian và chiều dày lớp bột

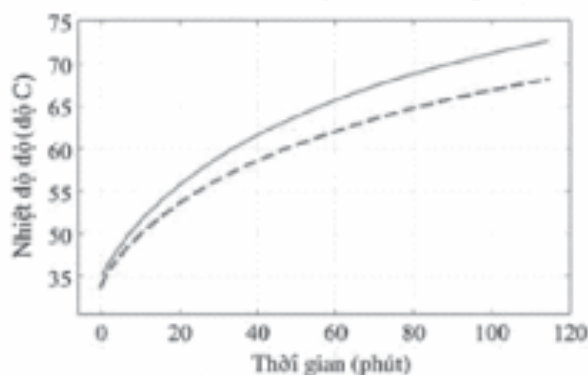
Kết quả mô phỏng (Hình 3) cho thấy nhiệt độ phân bố đều trong toàn lớp bột. Giai đoạn đầu (0-30 phút): nhiệt độ tăng nhanh từ 25°C lên 50°C . Sau 120 phút, chênh lệch nhiệt độ giữa mặt trên – dưới lớp bột chỉ còn $0,8-1,2^\circ\text{C}$. Lớp bột dày 2 mm đạt trạng thái ổn định nhiệt sau 60 phút, lớp 10 mm cần ~ 180 phút.



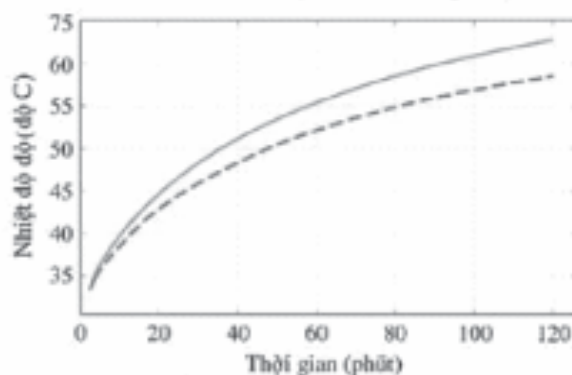
Hình 1a. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian ($\sigma=2 \text{ mm}$)



Hình 1b. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian ($\sigma=4 \text{ mm}$)



Hình 1c. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian ($6-5 \text{ mm}$)



Hình 1a. Biến thiên nhiệt độ theo thời an ($6-10 \text{ mm}$)

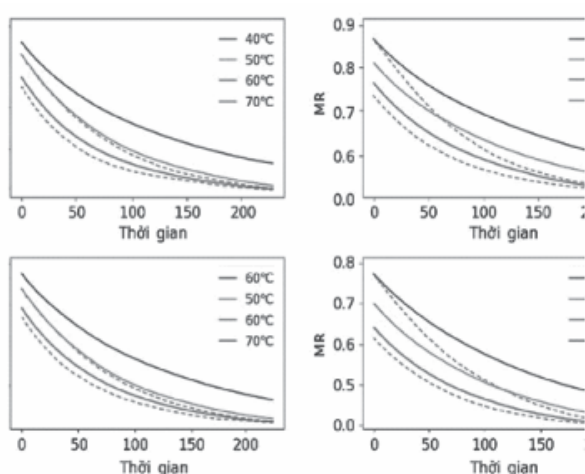
Hình 3. Biểu đồ biến thiên nhiệt độ trung bình theo thời gian ở các lớp bột (2, 4, 6, 10 mm).



Hiệu quả này chứng tỏ dòng khí thẳng đứng cho hiệu suất truyền nhiệt cao hơn 15-25% so với sấy ngang.

4.2. Biến thiên độ ẩm và mô hình động lực học sấy

Độ ẩm giảm nhanh trong 100 phút đầu – giai đoạn sấy tốc độ không đổi, sau đó giảm chậm dần (Hình 4).



Hình 4. Quan hệ giữa độ ẩm tương đối (MR) và thời gian sấy ở các mức nhiệt độ khác nhau (40-70°C)

Mô hình Henderson – Pabis hiệu chỉnh được sử dụng:

$$MR = A e^{-k t}$$

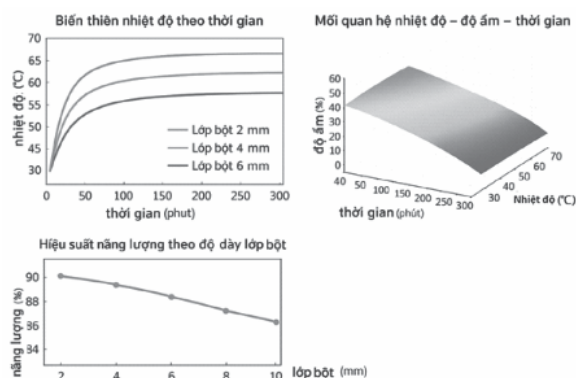
Trong đó: $A \approx 1$, k thay đổi từ 0,0042-0,0095 min^{-1} (40-70°C).

Hệ số tương quan $R^2 > 0,99$ chứng tỏ mô hình mô phỏng phù hợp thực tế.

4.3. Phân bố nhiệt – ẩm 3D trong buồng sấy

Kết quả mô phỏng (Hình 5) thể hiện trường nhiệt đều và gradient thấp: Gradient

nhiệt trung bình: $<1,2^\circ\text{C}/\text{cm}$; Gradient ẩm: $<1\%/ \text{cm}$ sau 200 phút. Cơ chế “đẩy ẩm liên tục” (Continuous Vapor Lifting) giúp tránh tích ẩm vùng sâu, tăng đồng đều chất lượng sấy.



Hình 5. Phân bố trường nhiệt và độ ẩm 3D trong buồng sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng.

4.4. Phân tích năng lượng

Hệ số hiệu suất năng lượng COP xác định theo:

$$COP = \frac{Q_{\text{useful}}}{W_{\text{input}}}$$

Trong đó:

- Q_{useful} : Nhiệt lượng có ích truyền vào vật liệu (kJ);
- W_{input} : Điện năng tiêu thụ của hệ bơm nhiệt (kJ).

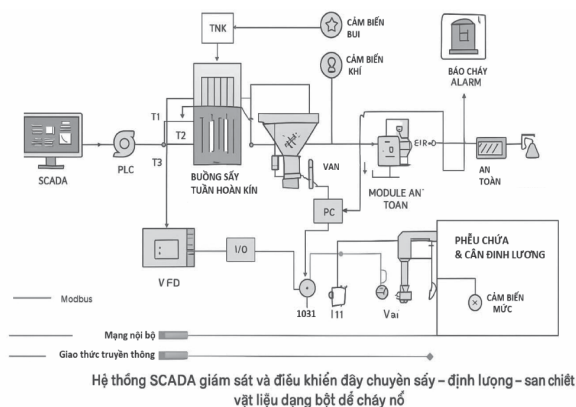
Kết quả cho thấy: Ở 60°C: COP = 3,8-4,2; Ở 70°C: COP = 3,4-3,6. Mức tiêu thụ năng lượng giảm 18-25% so với sấy điện trở cưỡng bức.

4.5. Đánh giá an toàn cháy nổ

Mô phỏng trường nhiệt cho thấy không xuất hiện vùng quá nhiệt ($> 85^\circ\text{C}$) trong toàn bộ thể tích sấy, kể cả với lớp bột dày 10 mm. Độ ẩm khí thải luôn duy trì dưới 20%, giúp giảm khả năng tích điện tĩnh và cháy bụi. Áp

suất buồng sấy được điều chỉnh ổn định nhờ cơ chế xả ẩm tuần hoàn kín. Hệ thống đạt cấp an toàn II theo tiêu chuẩn ATEX – phù hợp với vật liệu dễ cháy nổ.

Ngoài ra, hệ thống được trang bị bộ điều khiển SCADA để giám sát và cảnh báo tự động các thông số nhiệt, ẩm, áp suất, khối lượng, cùng với tính năng ngắt mạch khẩn cấp khi vượt ngưỡng an toàn (Hình 6).



Hình 6. Hệ thống điều khiển SCADA và giao diện hiển thị thông số vận hành.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xây dựng và mô phỏng thành công mô hình sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng cho vật liệu dạng bột dễ cháy nổ bằng phương pháp CFD.

Kết quả mô phỏng cho thấy phân bố nhiệt – ẩm đồng đều trong toàn buồng sấy, với gradient nhiệt nhỏ và hiệu quả thoát ẩm cao, góp phần giảm nguy cơ cháy bụi và cải thiện chất lượng sản phẩm.

Động lực học sấy được mô tả tốt bằng mô hình Henderson – Pabis, với hệ số tương quan $R^2 > 0,99$, chứng minh độ phù hợp cao giữa kết quả mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm.

Hiệu suất năng lượng của hệ thống, biểu thị qua hệ số COP, đạt từ 3,4-4,2 ở nhiệt độ sấy 40-70°C, cao hơn 20-25% so với sấy cưỡng bức thông thường.

Cấu trúc dòng khí thẳng đứng cưỡng bức và chu trình bơm nhiệt kín giúp hệ thống hoạt động ổn định, không phát sinh điểm nóng, đảm bảo an toàn cho vật liệu dạng bột có nguy cơ cháy nổ.

Kết quả nghiên cứu khẳng định tính khả thi và hiệu quả năng lượng của công nghệ sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng trong các ứng dụng công nghiệp, dược phẩm và quốc phòng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ: “Nghiên cứu công nghệ và giải pháp an toàn chế tạo hệ thống thiết bị tự động liên hoàn sấy, định lượng san chiết vật liệu dạng bột dễ cháy nổ”, mã số: 03/2024/HĐ-ĐTCB.❖



Ngày nhận bài: 03/11/2025

Ngày phản biện: 12/11/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Trần Văn Phú (2002), “*Tính toán và thiết kế hệ thống sấy*”. NXB. Giáo dục.
- [2]. Trần Văn Phú (1994), “*Hệ thống sấy công nghiệp và dân dụng*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [3]. Hoàng Văn Chúc (2006), “*Thiết kế hệ thống thiết bị sấy*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [4]. Alves-Filho O., Stommen I. (1996), “*Application of heat pump in drying of biomaterials*”. Drying Technology, 14: 2061-2090.
- [5]. Hoàng Đình Tín (1996), “*Truyền nhiệt và tính toán thiết bị trao đổi nhiệt*”. Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh.
- [6]. Phạm Văn Tùy, Nguyễn Văn An (2005), “*Bơm nhiệt sấy lạnh và hút ẩm BK-BSH18*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt, số 65/2005.
- [7]. Nguyễn Đức Lợi, Phạm Văn Tùy (2005), “*Máy và thiết bị lạnh*”. NXB. Giáo dục.
- [8]. Hoàng Đình Tín, Lê Chí Hiệp (1997), “*Nhiệt động lực học kỹ thuật*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [9]. Võ Chí Chính, Đinh Văn Thuận (2009), “*Hệ thống máy và thiết bị lạnh*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [10]. Hoàng Đình Tín, Bùi Hải (2004), “*Bài tập nhiệt động lực học kỹ thuật và truyền nhiệt*”. NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
- [11]. Hoàng Đình Tín (2002), “*Cơ sở truyền nhiệt*”. NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
- [12]. Adhikari B., Howes T., Bhandari B.R., Truong V. (2001), “*Stickiness in food: a review of mechanisms and test methods*”. Int. J. Food Prop., 4(1): 1-33.