

MÔ PHỎNG DÀN NÓNG CỦA MÁY SẤY BƠM NHIỆT DÙNG MÔ HÌNH XÓP

SIMULATION OF A HEAT PUMP DRYER'S CONDENSER UNIT USING A POROSITY MODEL

Đặng Văn Hải¹, Võ Tuyền¹, Nguyễn Minh Phú^{2,*}

¹Khoa Công nghệ cơ khí, Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh

²Khoa Công nghệ nhiệt lạnh, Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh

*Email: nguyenminhphu@iuh.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu mô phỏng đặc tính dòng chảy và truyền nhiệt qua dàn nóng của máy sấy bơm nhiệt bằng cách sử dụng phương pháp môi trường xốp (porous medium). Mục tiêu chính của nghiên cứu là đơn giản hóa cấu trúc hình học phức tạp của dàn ống cánh mã hiệu *fc_tubes_sCF-775-58T* nhằm tối ưu hóa nguồn lực tính toán trong mô phỏng CFD. Bằng phương pháp hồi quy đa thức từ dữ liệu thực nghiệm về độ sụt áp suất theo vận tốc đón gió, nghiên cứu đã xác lập được hàm tương quan $\Delta P = 3.65335V^2 + 5.93523V$. Từ đó, các thông số trở kháng quan trọng của dàn đã được trích xuất với hệ số kháng nhớt đạt $1.928 \div 10^6 \text{ l/m}^2$ và hệ số kháng quán tính đạt 105 l/m . Kết quả mô phỏng bằng phần mềm ANSYS Fluent cho thấy sự phân bố nhiệt độ và áp suất qua dàn có độ tin cậy cao; cụ thể ở vận tốc đón gió 4 m/s , nhiệt độ không khí ra đạt xấp xỉ 40°C và độ sụt áp suất khoảng 100 Pa , hoàn toàn trùng khớp với các thông số tính toán và điều kiện biên ban đầu. Phương pháp tiếp cận này cung cấp một công cụ hiệu quả cho việc dự báo nhanh hiệu suất nhiệt và tối ưu hóa thiết kế các hệ thống sấy bơm nhiệt trong thực tế.

Từ khóa: Sấy gió nóng; Mô hình xốp; Dàn ống cánh; Nhiệt thủy lực.

ABSTRACT

This paper presents a simulation study on the flow characteristics and heat transfer across the condenser of a heat pump dryer using the porous medium approach. The primary objective of the research is to simplify the complex geometry of the finned-tube heat exchanger (model *fc_tubes_sCF-775-58T*) to optimize computational resources in CFD simulations. By applying polynomial regression to experimental data regarding pressure drop versus frontal air velocity, the study established the correlation function: $\Delta P = 3.65335V^2 + 5.93523V$. From this, critical resistance parameters were extracted, yielding a viscous resistance coefficient of $1.928 \times 10^6 \text{ l/m}^2$ and an inertial resistance coefficient of 105 l/m . Simulation results obtained via ANSYS Fluent demonstrate high reliability in temperature and pressure distribution; specifically, at a frontal velocity of 4 m/s , the outlet air temperature reached approximately 40°C with a pressure drop of about 100 Pa , aligning perfectly with calculated parameters and initial boundary conditions. This approach provides an efficient tool for rapid thermal performance prediction and design optimization of practical heat pump drying systems.

Keywords: Hot air drying; Porous model; Finned-tube heat exchanger; Thermo-hydraulic. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ sấy dùng bơm nhiệt hiện đang được xem là một trong những giải pháp tối ưu nhất trong lĩnh vực bảo quản nông sản và thực phẩm nhờ khả năng tiết kiệm năng lượng vượt trội và bảo vệ chất lượng sản phẩm. Khác với các phương pháp sấy nhiệt truyền thống thường gây thất thoát nhiệt lớn ra môi trường, hệ thống sấy bơm nhiệt hoạt động dựa trên một chu trình khép kín, trong đó dàn nóng của bơm nhiệt đóng vai trò là bộ phận gia nhiệt chính cho tác nhân sấy [1]. Trong cấu tạo của máy sấy bơm nhiệt, các dàn trao đổi nhiệt (thường là dạng ống đồng cánh nhôm) là thành phần then chốt quyết định hiệu suất của toàn bộ hệ thống. Không khí sau khi đi qua dàn nóng sẽ được nhận nhiệt lượng từ môi chất lạnh, tăng nhiệt độ lên mức cần thiết trước khi đi vào buồng sấy để tách ẩm từ vật liệu sấy. Hiệu quả của quá trình này phụ thuộc rất lớn vào đặc tính truyền nhiệt và động lực học của dòng khí khi đi qua các khe hẹp giữa các cánh tản nhiệt và các hàng ống. Việc thiết kế dàn trao đổi nhiệt sao cho đạt được diện tích tiếp xúc lớn nhất nhưng vẫn đảm bảo độ sụt áp suất của dòng không khí ở mức thấp là một bài toán tối ưu hóa phức tạp.

Trong nghiên cứu và phát triển thiết bị nhiệt lạnh, việc mô phỏng số (CFD) đóng vai trò cực kỳ quan trọng để dự báo trước hiệu suất làm việc của thiết bị. Tuy nhiên, các dàn trao đổi nhiệt thực tế thường có cấu tạo cực kỳ chi tiết với hàng trăm cánh tản nhiệt mỏng và nhiều hàng ống đan xen. Nếu xây dựng lưới mô phỏng chi tiết cho từng khe hẹp của cánh tản nhiệt, khối lượng tính toán sẽ trở nên khổng lồ, đòi hỏi cấu hình máy tính cực mạnh và thời gian xử lý rất dài. Để giải quyết thách thức này, mô hình môi trường xốp (porous medium) được ứng dụng như một phương pháp đơn giản hóa hiệu quả và mang tính đột phá. Thay vì phải mô phỏng từng chi tiết hình học nhỏ nhất,

chúng ta xem toàn bộ khối dàn trao đổi nhiệt là một vùng không gian đồng nhất có các đặc tính cản trở dòng chảy tương đương [2]. Ý nghĩa của phương pháp này bao gồm: Giảm đáng kể số lượng lưới (mesh), giúp quá trình mô phỏng diễn ra nhanh chóng nhưng vẫn đảm bảo độ tin cậy về mặt vật lý. Thông qua việc hồi quy các hàm số về độ sụt áp suất theo vận tốc gió. Mô hình này cho phép quan sát trực quan sự thay đổi trạng thái của không khí (áp suất giảm dần và nhiệt độ tăng dần) khi đi xuyên qua dàn nóng, từ đó giúp hiệu chỉnh các thông số vận hành của máy sấy một cách chính xác [3-5]. Việc kết hợp giữa thực nghiệm đo đạc và mô phỏng môi trường xốp không chỉ giúp các kỹ sư hiểu rõ bản chất quá trình trao đổi nhiệt mà còn là cơ sở để cải tiến thiết kế các hệ thống sấy bơm nhiệt hiện đại, hướng tới mục tiêu nâng cao năng suất và giảm giá thành vận hành.

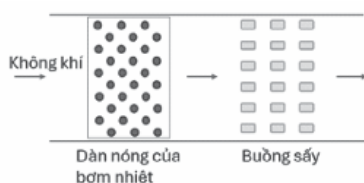
Nghiên cứu này xuất phát từ nhu cầu tối ưu hóa hiệu suất năng lượng trong công nghệ sấy bơm nhiệt, một giải pháp tiên tiến giúp tiết kiệm điện năng và bảo vệ chất lượng nông sản. Tuy nhiên, việc mô phỏng chi tiết các dàn trao đổi nhiệt ống cánh (fin-and-tube heat exchanger) bằng phương pháp CFD truyền thống gặp trở ngại lớn về khối lượng tính toán do cấu trúc hình học cực kỳ phức tạp của các lá nhôm và hàng ống. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm ứng dụng mô hình môi trường xốp (porous medium model) để đơn giản hóa quá trình mô phỏng mà vẫn đảm bảo độ tin cậy.

2. MÔ TẢ MÔ HÌNH

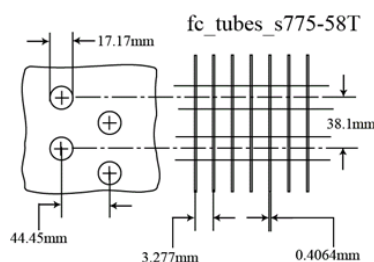
Cấu tạo của hệ thống sấy bơm nhiệt trong nghiên cứu này được mô tả tổng quát thông qua Hình 1. Theo đó, thiết bị bao gồm một dàn nóng đóng vai trò là bộ phận trao đổi nhiệt chính, nơi năng lượng từ môi chất lạnh được truyền cho luồng không khí đi qua. Sau

khi nhận nhiệt, luồng khí nóng tiếp tục lưu thông vào buồng sấy để thực hiện quá trình tách ẩm từ vật liệu sấy, vốn được bố trí trên các khay sấy theo một quy luật nhất định nhằm tối ưu hóa diện tích tiếp xúc. Hướng chuyển động của tác nhân sấy được thiết lập xuyên suốt từ dàn gia nhiệt đến buồng sấy, đảm bảo sự phân bố nhiệt năng đồng đều cho quá trình làm khô sản phẩm.

Để phục vụ cho việc xây dựng mô hình mô phỏng, các thông số hình học chi tiết của dàn ống cánh (mã hiệu fc_tubes_sCF-775-58T) đã được xác lập cụ thể trong Hình 2. Dàn trao đổi nhiệt sử dụng cấu trúc ống đồng có đường kính ngoài là 10,21 mm. Các ống được bố trí theo sơ đồ so le với bước ống ngang là 22 mm và bước ống đứng là 25,4 mm nhằm tăng cường sự xáo trộn của dòng khí. Hệ thống cánh tản nhiệt phẳng bao quanh các hàng ống có độ dày lá cánh là 0,3302 mm, được lắp đặt với bước cánh (khoảng cách giữa các cánh) là 3,175 mm. Việc xác định chính xác các thông số kích thước này là cơ sở quan trọng để tính toán đặc tính dòng chảy và các hệ số kháng trong mô hình môi trường xốp ở các giai đoạn tiếp theo của nghiên cứu.



Hình 1. Sơ đồ sấy dùng bơm nhiệt



Hình 2. Thông số hình học dàn nóng [6]

Trong phần mềm ANSYS Fluent [7], việc mô phỏng dòng chảy và truyền nhiệt qua môi trường xốp (porous medium) được thực hiện bằng cách bổ sung các số hạng nguồn vào phương trình bảo toàn động lượng và bảo toàn năng lượng chuẩn. Môi trường xốp được mô phỏng bằng cách thêm một số hạng nguồn động lượng vào phương trình Navier-Stokes chuẩn để đại diện cho độ sụt áp suất do lực cản dòng chảy gây ra. Xem môi trường xốp đồng nhất đơn giản và liên hệ giữa độ sụt áp suất (P) với số hạng nguồn (S_i), có thể được biểu diễn là:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) = \nabla P$$

Trong đó, α là độ thấm (permeability), $1/\alpha$ là kháng nhớt (viscous resistance), và C_2 là hệ số kháng quán tính (inertial resistance).

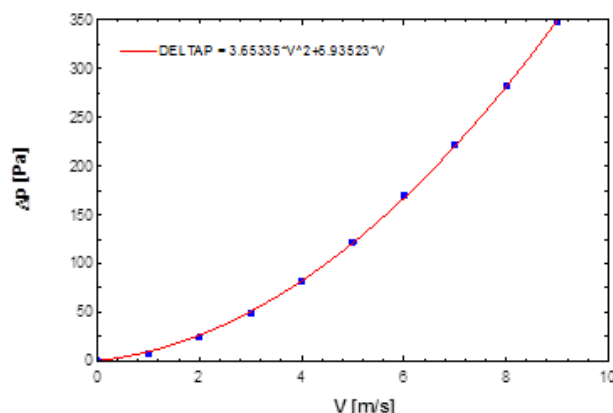
Bảng 1 trình bày các thông số đầu vào phục vụ cho quá trình thiết lập mô phỏng số cho hệ thống dàn nóng. Các thông số này bao gồm diện tích đón gió của dàn là 1 m², chiều cao dàn là 1 m và chiều dài dàn (độ dày theo phương dòng chảy) là 0,1 m. Về mặt nhiệt động, bảng xác định điều kiện biên với nhiệt độ không khí đi vào dàn là 30°C và nhiệt độ không khí sau khi ra khỏi dàn đạt 40°C. Các thông số nhiệt vật lý của không khí (khối lượng riêng ρ , độ nhớt động lực học μ) được lấy ở nhiệt độ trung bình của không khí qua dàn.

Bảng 1. Các thông số nhập vào

Thông số	Giá trị
Diện tích đón gió	$A_{fr} = 1\text{m}^2$
Chiều dài dàn	$L = 0.1\text{m}$
Nhiệt độ không khí vào dàn	$T_i = 30^\circ\text{C}$
Nhiệt độ không khí ra khỏi dàn	$T_o = 40^\circ\text{C}$
Chiều cao dàn	$H = 1\text{m}$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để xác định các hệ số kháng đặc trưng cho mô hình môi trường xốp, nghiên cứu tiến hành phân tích mối tương quan giữa độ sụt áp suất và vận tốc đón gió thông qua dữ liệu biểu diễn tại Hình 3 dùng phần mềm EES. Bằng phương pháp hồi quy đa thức bậc hai trên tập dữ liệu thực nghiệm, hàm số mô tả sự biến thiên của áp suất được xác lập dưới dạng phương trình hồi quy. Dựa trên nguyên lý của mô hình Darcy-Forchheimer, các hệ số của phương trình hồi quy này được đối chiếu tương ứng với các thành phần kháng nhớt và kháng quán tính. Kết hợp với các thông số vật lý của không khí và chiều dài dàn, kết quả tính toán đã xác định được giá trị kháng nhớt (Viscous Resistance) như sau:



Hình 3. Hồi quy tuyến tính hàm chên lệch áp suất không khí qua dàn

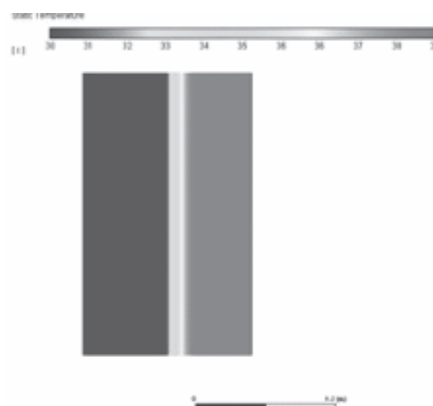
$$3.65335235 = \text{ViscousResistance} \cdot \mu \cdot L$$

$$5.93522597 = \text{InertialResistance} \cdot \rho \cdot L / 2$$

Khi đó, $\text{ViscousResistance} = 1.928 \times 10^6$ $1/\text{m}^2$ và $\text{InertialResistance} = 105$ $1/\text{m}$.

Kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ không khí khi đi qua dàn nóng được thể hiện trực quan qua Hình 4, minh chứng cho tính chính xác của mô hình môi trường xốp đã thiết lập. Quan sát trường nhiệt độ, ta có thể thấy sự

gia tăng nhiệt độ rõ rệt của dòng khí từ mức 30°C tại cửa vào cho đến khi đạt xấp xỉ 40°C tại cửa ra sau khi xuyên qua vùng miền xốp. Điểm đáng chú ý là với nguồn nhiệt thể tích được tính toán và nhập vào là 454562 W/m^3 (tương ứng với vận tốc đón gió 4 m/s), kết quả nhiệt độ gió ra đạt được hoàn toàn trùng khớp với thông số mục tiêu $T_o = 40^\circ\text{C}$ đã đề ra trong Bảng 1. Sự hội tụ giữa giá trị mô phỏng và thông số đầu vào này không chỉ khẳng định tính đúng đắn của việc xác định nguồn nhiệt thể tích mà còn cho thấy khả năng của mô hình xốp trong việc tái hiện chính xác quá trình trao đổi nhiệt thực tế bên trong dàn nóng của máy sấy bơm nhiệt. Ta có thể thấy sự biến thiên đồng nhất của dòng khí khi di chuyển xuyên qua vùng miền xốp. Tại cửa vào, không khí duy trì mức nhiệt độ ổn định là 30°C , đúng với thông số thiết lập ban đầu trong Bảng 1. Khi dòng khí tiếp xúc và đi xuyên qua vùng xốp (đại diện cho dàn ống cánh), nhiệt độ tăng dần theo phương chuyển động của dòng chảy do tác động của nguồn nhiệt thể tích đã được xác lập.

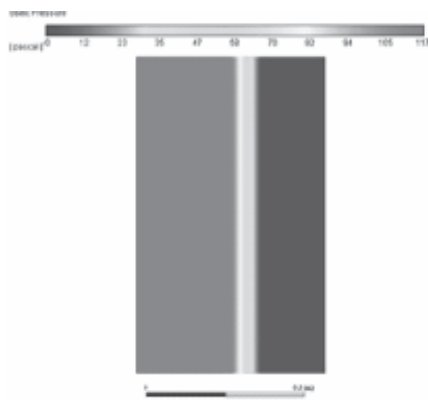


Hình 4. Phân bố nhiệt độ không khí qua dàn ở vận tốc đón gió 4 m/s (nguồn nhiệt thể tích 454562 W/m^3)

Hình 5 trình bày kết quả mô phỏng trường áp suất tĩnh của dòng không khí khi đi xuyên qua dàn nóng ở vận tốc đón gió 4 m/s .

Quan sát biểu đồ phân bố áp suất, ta thấy một sự sụt giảm áp suất rõ rệt và đồng đều

khi dòng khí di chuyển từ phía trước ra phía sau vùng môi trường xốp. Tại khu vực cửa vào (phía bên trái miền xốp), áp suất tĩnh đạt giá trị cao nhất, sau đó giảm dần theo phương chuyển động của dòng chảy do tác động của lực cản ma sát và lực cản quán tính từ cấu trúc ống cánh đã được thiết lập thông qua các hệ số trở kháng. Sự phân tầng màu sắc từ đỏ sang xanh trong miền xốp minh chứng cho tính ổn định của mô hình trong việc tái hiện tổn thất áp suất động lực học. Kết quả này không chỉ phù hợp với các quy luật vật lý về dòng chảy trong môi trường hạn chế mà còn cung cấp cơ sở quan trọng để các nhà thiết kế lựa chọn công suất quạt phù hợp, đảm bảo lưu lượng tác nhân sấy cho toàn bộ hệ thống bơm nhiệt. Độ sụt áp suất quan sát được trong mô phỏng 2D đạt giá trị xấp xỉ 100 Pa. Giá trị này hoàn toàn trùng khớp với kết quả thu được từ Hình 3. Sự thống nhất giữa kết quả mô phỏng số và tính toán giải tích một lần nữa khẳng định rằng các hệ số trở kháng được trích xuất là hoàn toàn tin cậy, cho phép dự báo chính xác tổn thất áp suất động lực học của dàn trao đổi nhiệt trong các điều kiện vận hành khác nhau.



Hình 5. Phân bố áp suất không khí qua dàn ở vận tốc đón gió 4 m/s

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng thành công mô hình môi trường xốp (porous medium) để

mô phỏng đặc tính dòng chảy và truyền nhiệt qua dàn nóng của máy sấy bơm nhiệt. Thông qua việc hồi quy dữ liệu thực nghiệm, các hệ số kháng nhớt và kháng quán tính đặc trưng cho dàn ống cánh fc_tubes_sCF-775-58T đã được xác định chính xác, với giá trị lần lượt là $1.928 \times 10^6 \text{ 1/m}^2$ và 105 1/m . Kết quả mô phỏng bằng phần mềm ANSYS Fluent cho thấy sự phân bố nhiệt độ và áp suất qua dàn có độ tin cậy cao; đặc biệt, nhiệt độ gió ra đạt mức 40°C hoàn toàn trùng khớp với thiết lập nguồn nhiệt thể tích và các thông số tính toán ban đầu. Phương pháp tiếp cận này không chỉ giúp giảm thiểu đáng kể thời gian và nguồn lực tính toán mà còn cung cấp một công cụ hiệu quả cho việc tối ưu hóa thiết kế các hệ thống sấy công nghiệp hiện nay. ❖

Ngày nhận bài: **15/4/2026**

Ngày phản biện: **23/4/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. K. Chua, S. Chou, J. Ho, and M. Hawlader, "Heat pump drying: recent developments and future trends". Drying Technology, vol. 20, no. 8, pp. 1579-1610, 2002.
- [2]. R. Nowak, "Estimation of viscous and inertial resistance coefficients for various heat sink configurations". Procedia Engineering, vol. 157, pp. 122-130, 2016.
- [3]. T. K. Kim, H. C. Kang, and J. S. Lee, "A porosity model for flow resistance calculation of heat exchanger with louvered fins". Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 30, no. 4, pp. 1943-1948, 2016.
- [4]. T. K. Kim, "Three-dimensional estimation of thermal and pressure drop performance of louvered-fin tube heat exchanger using porous medium approach considering inertia effect". Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 31, no. 8, pp. 4011-4017, 2017.
- [5]. T. K. Kim, "Development of friction model for offset strip fin with separated viscous and inertial resistances". Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 31, no. 12, pp. 6051-6057, 2017.
- [6]. Klein, Sanford A., and Gregory Nellis, "Mastering EES". Madison, WI, USA: f-Chart software, 2013.
- [7]. Manual, User, "ANSYS FLUENT 12.0". Theory Guide 67, 2009.