

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SẤY ĐẬU HÀ LAN TRÊN HỆ THỐNG SẤY BƠM NHIỆT TẦNG SÔI

EXPERIMENTAL STUDY ON DRYING OF PISUM SATIVUM ON A FLUIDIZED BED HEAT PUMP DRYING SYSTEM

Bùi Nguyễn Nhật Tài^{1,2}, Bùi Hoàng Gia Bảo^{1,2}, Nguyễn Tuấn Đạt^{1,2}, Phan Thành Nhân^{1,2,*}

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

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

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

TÓM TẮT

Nghiên cứu thực nghiệm quá trình sấy đậu Hà Lan trên hệ thống bơm nhiệt tầng sôi nhằm xác định các thông số kỹ thuật tối ưu. Kết quả cho thấy chiều cao lớp hạt 3 cm là lựa chọn phù hợp để cân bằng tốc độ giảm ẩm và độ ổn định của quá trình sấy. Phương pháp sấy bơm nhiệt tầng sôi vượt trội hơn so với sấy bơm nhiệt truyền thống về hiệu quả truyền nhiệt và truyền ẩm, nhờ đó có thể rút ngắn thời gian sấy 60 đến 90 phút tại cùng mức nhiệt độ. Nhiệt độ sấy 50°C được xác định là tối ưu để đảm bảo tốc độ sấy phù hợp và duy trì cấu trúc. Nghiên cứu chỉ ra mô hình Wen-Yu và Leva cho kết quả tính toán vận tốc tối thiểu rất gần với thực nghiệm (sai số lần lượt là 4.8% và 0.96%), phù hợp để tính toán cho đậu Hà Lan (hạt nhóm D). Mô hình Sheed cho kết quả tổn thất áp suất tốt nhất. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu cung cấp thông số kỹ thuật tối ưu, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm sấy và thúc đẩy ứng dụng công nghệ hiện đại trong chế biến nông sản.

Từ khóa: Chế độ sôi; Sấy bơm nhiệt; Sấy đậu Hà Lan; Sấy tầng sôi.

ABSTRACT

This study experimentally determined the drying process of Pisum Sativum in a fluidized bed heat pump system. The results show that a 3 cm bed height optimally balances the moisture-removal rate and system stability. Fluidized-bed heat-pump drying outperforms conventional drying, reducing drying time by 60-90 minutes thanks to its superior heat- and mass-transfer efficiency. A 50°C drying temperature proved optimal for achieving an appropriate drying rate while preserving the product's structure and color. The Wen-Yu and Leva models yielded minimum-fluidization velocity predictions that closely matched the experimental values, with errors of 4.8% and 0.96%, respectively, making them suitable for green peas (group D particles). The Sheed model provided the most accurate pressure-drop predictions. This research supplies optimal technical parameters, contributing to improved dried-product quality and encouraging the adoption of advanced technologies in agricultural processing.

Keywords: Fluidization regime; Heat-pump drying; Green pea drying; Fluidized-bed drying. 

1. GIỚI THIỆU

Đậu Hà Lan (*Pisum sativum* L.) là một trong những thực phẩm thiết yếu trong chế độ ăn của con người và được trồng ở hầu hết các quốc gia trên thế giới. Đậu Hà Lan xanh có giá trị cao về mặt dinh dưỡng và đặc biệt là nguồn protein giá rẻ giàu axit amin thiết yếu – tryptophan và lysin – mà cơ thể con người không tự tổng hợp được [1]. Đậu Hà Lan có ít yếu tố phân dinh dưỡng và giống như các cây họ đậu khác, đóng vai trò quan trọng trong dinh dưỡng cho người và động vật [2], [3]. Chúng được sử dụng rộng rãi trong súp, ngũ cốc ăn sáng, thịt chế biến, thực phẩm chức năng, mì ống, bột đậu hoặc chế biến thành tinh bột đậu và protein cô đặc [4].

Tuy nhiên, độ ẩm của đậu Hà Lan tươi rất cao từ 60 đến 75 %, điều này dẫn đến thời gian sử dụng sản phẩm rất ngắn nếu không bảo quản đúng cách. Để bảo quản sản phẩm trong thời gian dài, sấy là một trong những phương pháp có thể đáp ứng được nhiệm vụ này. Sấy có nhiều phương pháp khác nhau, nhiều chế độ khác nhau, từ đó sẽ dẫn đến sản phẩm sau khi sấy sẽ có chất lượng khác nhau. Chế độ sấy như nhiệt độ, ẩm độ, tốc độ gió là các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của sản phẩm sau khi sấy, trong đó nhiệt độ là yếu tố chính và tác động lớn nhất đến màu sắc, mùi vị của sản phẩm. Theo phân tích của nhóm tác giả Nguyễn Minh Hạ, Hà Anh Tùng [5] đã đánh giá thực nghiệm về sấy chanh bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại và đã đưa ra các thông số ảnh hưởng của quá trình sấy đến kết quả sấy này. Năm 2023, nhóm tác giả Dương Ngọc Khánh và Phan Thành Nhân [6] đã có công bố về nghiên cứu sấy trà hoa Lavender trên hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi với kết luận đánh giá sự ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến tốc độ giảm ẩm của vật liệu sấy cũng như so sánh hiệu quả sấy trên hệ thống sấy bơm nhiệt và hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi. Với

sản phẩm sấy đậu Hà Lan, tác giả Phạm Thị Hằng [7] đã thực nghiệm công nghệ sấy tầng sôi bơm nhiệt trên sản phẩm này và nghiên cứu cho thấy sấy bơm nhiệt tầng sôi đã cho kết quả tốt hơn so với sấy bơm nhiệt đơn thuần, đặc biệt về sự đồng đều trong giảm độ ẩm và chất lượng sản phẩm cuối cùng.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu về hệ thống sấy cũng như là nghiên cứu chế độ ảnh hưởng của quá trình sấy trực tiếp trên sản phẩm cũng đã được thực hiện bởi nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới. Mohammadi, Z và cộng sự [8] đã so sánh hiệu quả của sấy tầng sôi bơm nhiệt với sấy tầng sôi truyền thống trên đậu Hà Lan, kết luận rằng sấy bơm nhiệt tầng sôi giảm được đáng kể thời gian và năng lượng tiêu thụ, đồng thời giữ chất lượng sản phẩm tốt hơn. Chen, X., [9] nghiên cứu tổng hợp các lợi ích của sấy bơm nhiệt trên nhiều loại nông sản xanh, đặc biệt là đậu Hà Lan, cho thấy khả năng giữ màu sắc và thành phần dinh dưỡng vượt trội. Kumar, A [10] đã khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của đậu Hà Lan sấy bằng bơm nhiệt, và nhận thấy rằng sản phẩm này có tỷ lệ chất dinh dưỡng cao hơn và thời gian bảo quản tốt hơn so với các sản phẩm sấy khác. Năm 2016, nhóm tác giả Folasayo Fayose, Zhongjie Huan [11] công bố nghiên cứu về sấy bơm nhiệt cho sản phẩm trái cây và rau quả: nguyên lý và tiềm năng cho Khu vực châu Phi cận Sahara.

Tại Hội nghị COP28 về biến đổi khí hậu, Thủ tướng Chính phủ Việt Nam đã tái khẳng định cam kết đạt mức phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050, đồng thời đặt mục tiêu giảm 43,5% lượng phát thải khí nhà kính vào năm 2030. Ứng dụng sấy bơm nhiệt tầng sôi hoàn toàn phù hợp với định hướng của Việt Nam tại COP28 thúc đẩy mô hình sản xuất xanh, giúp ngành chế biến nông sản chuyển đổi theo hướng phát triển bền vững.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về máy

sấy bơm nhiệt nhưng việc nghiên cứu sấy bơm nhiệt tầng sôi cho đậu Hà Lan chưa được rộng rãi tại Việt Nam. Bài báo này sẽ góp phần tìm ra các thông số kỹ thuật tối ưu để nâng cao chất lượng sản phẩm sấy, giúp các doanh nghiệp ứng dụng công nghệ này hiệu quả hơn để phù hợp với xu hướng sản xuất hiện đại và chính sách phát triển xanh của Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Xác định trở lực qua lớp hạt tiền sôi

Mô hình Sheed [12]:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = A_1 \times V^{B_1} \quad (1)$$

Trong đó: A_1 , B_1 là hằng số thực nghiệm được xác định qua thí nghiệm.

Hukill & Ives [13] đề xuất công thức thực nghiệm nhằm mở rộng mô hình Shedd cho dải tốc độ khí rộng hơn. Hukill và Ives đã đề xuất phương trình thực nghiệm như sau:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = \frac{A_2 \times V^2}{\ln(1 + B_2 \times V)} \quad (2)$$

Trong đó: A_2 , B_2 là hằng số đặc trưng cho từng loại hạt.

Hunter và Bajer-Arkema [14] đã cải tiến phương trình Ergun:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = A_3 \times V + B_3 \times V^2 \quad (3)$$

Trong đó: A_3 , B_3 là các hằng số thực nghiệm đã bao gồm ảnh hưởng của tính chất dòng khí.

2.1.2. Xác định vận tốc sôi tối thiểu

Vận tốc sôi tối thiểu nhằm xác định và đề xuất mô hình toán phù hợp trong các tính toán và để xác định vận tốc thấp nhất đi qua lớp hạt làm cho lớp hạt sôi. Trong các nghiên cứu đã công bố, nhiều mô hình tính toán đã được đề xuất nhằm xác định vận tốc sôi tối thiểu của dòng khí đi vào lớp hạt. Tiêu biểu có thể kể đến các mô hình Reynolds và Archimedes, Wen và Yu, Goroshko, Leva, Kunii-Levenspiel, Kozeny-Carman, Bena được tổng hợp trong Bảng 1.

Theo [15], nghiên cứu này đã chỉ ra rằng nhóm hạt Geldart loại D khó sôi do kích thước lớn và khối lượng riêng cao. Nên chọn bề dày lớp hạt là 3 cm nhằm tạo điều kiện cho việc hình thành cấu trúc tầng sôi rõ ràng hơn. Ở điều kiện này sẽ ít bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng thành và dòng khí cục bộ, từ đó phản ánh tốt hơn vận tốc sôi tối thiểu của hệ.

Bảng 1. Các công thức tính toán vận tốc sôi tối thiểu của đậu Hà Lan

Renold và Archimedes [17]	$Ar = 150 \times \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi^2 \times \epsilon_{mf}^3} \times Re_{mf} + \frac{1.75}{\phi \times \epsilon_{mf}^3} \times Re_{mf}^2 \quad (4)$	
	$Ar = \frac{g \times (d_m \times \phi)^3 \times (\rho_v - \rho_g) \times \rho_g}{\mu_k^2} \quad (5)$	
Wen và Yu [17] ($d_p > 100\mu m$)	$V_{mf} = 7.9 \times 10^{-3} \times \phi \times d_p^{1.82} \times (\rho_v - \rho_g) \times 0.94 \times \mu_k^{-0.83} \quad (6)$	



Goroshko [17]	$Re_{mf} = \frac{Ar}{150 \times \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} + \sqrt{\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3} \times Ar}}$	(7)
Leva [18]	$V_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} \times (\phi \times d_m)^{1.82} \times (\rho_v - \rho_k)^{0.94} \times g}{\mu_k^{0.88} \times \rho_k^{0.006}}$	(8)
Kunii- Levenspiel [18]	$\frac{1.75}{\phi \times \varepsilon_{mf}^3} \times \frac{(d_p \times V_{mf} \times \rho_k)^2}{\mu_k} + \frac{150 \times (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \times \varepsilon_{mf}^3} \times \frac{d_p \times V_{mf} \times \rho_k}{\mu_k} = \frac{d_p^3 \times \rho_k \times (\rho_s - \rho_k) \times g}{\mu_k^2}$	(9)
Kozeny-Carman [19]	$V_{mf} = \frac{g \times (\rho_v - \rho_g)}{150 \times \mu_k} \times \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \times \phi^2 \times d_p^2$	(10)
Bena [19]	$V_{mf} = \frac{\mu_k}{\rho_k \times d_p} \times \left(\frac{1.38 \times 10^{-3} \times Ar}{(Ar + 19)^{0.11}} \right)$	(11)

2.2. Vật liệu sấy

Đậu Hà Lan sử dụng trong nghiên cứu này, được trồng tại huyện Đơn Dương, tỉnh Lâm Đồng. Sau khi tách vỏ quả, chọn hạt với đường kính 7 ± 0.5 mm. Lượng đậu Hà Lan mỗi mẻ sấy phụ thuộc vào chiều cao lớp hạt. Độ ẩm ban đầu của đậu Hà Lan được xác định bằng máy cân sấy ẩm MX 50, xác định được ẩm độ ban đầu của mẫu là 69%. Khối lượng riêng thực của đậu Hà Lan $\rho_v = 1088$ kg/m³, độ xốp của hạt $\varepsilon = 42\%$, độ cầu tròn của hạt $\phi = 86\%$ [16].

2.3. Phương pháp lấy số liệu

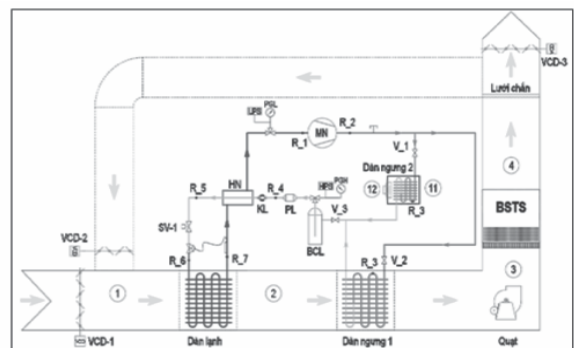
Độ ẩm vật liệu sấy theo cơ sở ướt:

$$\omega_a = \frac{G_a}{G} \cdot 100\% = \frac{G_a}{G_k + G_a} \cdot 100\% \quad (12)$$

Độ ẩm của mẫu được đo sau mỗi 30 phút cho đến khi kết thúc quá trình sấy.

2.4. Mô hình thực nghiệm

Sơ đồ nguyên lý bơm nhiệt tăng sôi được bố trí như trong hình 1. Với công suất máy nén 0,532kW, năng suất dàn lạnh 2,37kW, hai dàn nóng năng suất lần lượt là 2,37kW và 0,472kW, tác nhân R134A được sử dụng trong hệ thống.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống bơm nhiệt tăng sôi

Nguyên lý hoạt động: Tác nhân sấy (TNS) được đưa qua dàn lạnh giảm nhiệt độ để

tách ẩm, sau đó đưa qua dàn nóng chính tăng nhiệt độ đến nhiệt độ sấy sau đó được dẫn qua quạt cao áp để tạo chế độ sôi cho vật liệu sấy (VLS) và thực hiện quá trình sấy tại buồng sấy. Một lưới chắn được bố trí ở đầu ra của buồng sấy để ngăn VLS bay theo TNS. Hệ thống có các chế độ hồi lưu: hồi lưu hoàn toàn (VCD-2 mở, VCD-1, 3 đóng), hồi lưu một phần (VCD-1, 3 mở tùy lưu lượng TNS hồi lưu, VCD-2 mở hoàn toàn), và không hồi lưu (VCD-1,3 mở hoàn toàn, VCD-2 đóng). Khi bơm nhiệt hoạt động, van V₁, 2, 3 mở hoàn toàn. Van V₁ được dùng để điều chỉnh môi chất lạnh vào dàn ngưng 2 nhằm điều chỉnh nhiệt độ TNS vào buồng sấy, có thể điều chỉnh nhiệt độ TNS từ 33°C đến 60°C.

2.5. Bố trí thí nghiệm và dụng cụ đo

Thực nghiệm được bố trí với ba biến đầu vào:

- Chiều cao lớp hạt: 2cm; 3cm; 4 cm;
- Nhiệt độ sấy: 45°C; 50°C; 55°C;
- Tốc độ sấy: 6÷20 m/s.

Dụng cụ đo sử dụng trong nghiên cứu được liệt kê trong bảng 2.

Bảng 2. dụng cụ đo

Dụng cụ đo	Mã	Sai số
Ẩm vật liệu	AND MX-50	± 0,1%
Khối lượng	AND FEH-1000	± 0.1 g
Tốc độ gió	Testo 425	± 0,3 m/s
Tổn thất áp suất	TSI 9565	± 1 Pa
Nhiệt độ	Extech 4 kênh	± 0.1°C
Chiều cao	Thước 20 cm	± 1 mm

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tính toán vận tốc sôi tối thiểu và so sánh với thực nghiệm

Vận tốc sôi tối thiểu cục bộ đo được ở bề dày lớp hạt tươi 3 cm là 15.8 m/s với đường kính hạt 7.5 mm và nhiệt độ sấy là nhiệt độ môi trường. Mối quan hệ giữa vận tốc thực tế và vận tốc biểu kiến là:

$$V_t = \frac{Q}{A_{\text{rỗng}}} = \frac{Q}{\varepsilon \times A} = \frac{V}{\varepsilon} \quad (13)$$

Với độ xốp lớp hạt là 0.42 và độ xốp khi sôi là 0.462. Vận vận tốc biểu kiến của lớp hạt khi sôi theo thực nghiệm là 7.3 m/s. Kết quả được giải thích do đối với hạt nhóm D, khí thường đi tắt qua vùng trung tâm thay vì phân bố đều, đòi hỏi vận tốc khí phải đủ mạnh để nâng toàn bộ hạt, gần bằng vận tốc cuốn trôi hạt. Bảng 3 tóm tắt kết quả tính toán vận tốc sôi tối thiểu V_{mf} từ các mô hình và sai số so với thực nghiệm. Dựa trên kết quả trên, có thể thấy các mô hình của Wen và Yu có độ tương thích cao với thực nghiệm với sai số dưới 5%.

Bảng 3. Kết quả tính toán V_{mf} từ các mô hình khác nhau và sai số so với giá trị thực nghiệm

Phương pháp lý thuyết	V_{mf}	Chênh lệch so với thực nghiệm
Thực nghiệm ($d_m = 0.0075$, $H_0 = 3$ cm)	7.3	Tham chiếu
Re và Ar	1.54	79%
Wen và Yu	7.65	4.8%
Goro	1.652	77%
Leva	7.23	0.96%
Kunni và Levenspiel	26.27	259.9%
Kozeny-Carman	19.4	168.8%
Bena	4.68	36%



3.2. Tính toán tổn áp lý thuyết và so sánh với thực nghiệm

Kết quả được thể hiện trong Bảng 4, cho thấy mô hình Sheed cho ra kết quả tốt nhất tại các mức chiều cao lớp hạt tĩnh. Mỗi quan hệ giữa tổn áp và vận tốc biểu kiến được biểu diễn như sau:

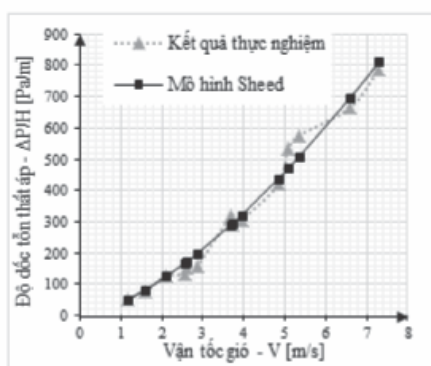
$$\frac{\Delta P}{H_0} = 40.84 \times V^{1.503} \quad (14)$$

Với hệ số xác định $R^2 = 0.979$ và sai số phần trăm trung bình $e = 9.08\%$, mô hình được xem là có khả năng ứng dụng tốt trong thực tế.

Bảng 4. Mô hình tính toán tổn áp tiền sôi

Mô hình toán	A	B	R^2	e
Sheed	40.84	1.503	0.979	9.08
Hukill và Ives	31.83	0.953	0.976	10.37
Ergun cải tiến	42.54	9.55	0.974	12.01

So sánh độ dốc tổn áp lý thuyết và thực nghiệm theo vận tốc được thể hiện qua Hình 2.



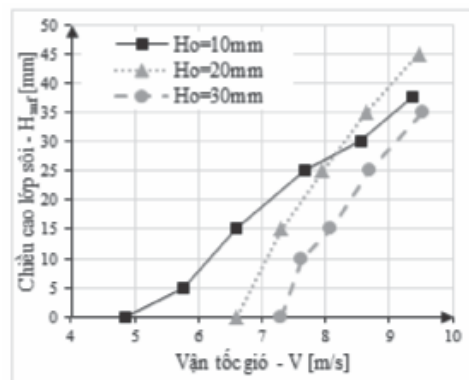
Hình 2. So sánh tổn áp qua lớp hạt giữa lý thuyết và thực nghiệm theo vận tốc

3.3. Mối quan hệ tổn áp – vận tốc gió – chiều cao lớp hạt

Các thí nghiệm sau đây được thực hiện

khi không mở bộ sấy bơm nhiệt mà chỉ có quạt ly tâm hoạt động để khảo sát mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào (chiều cao lớp hạt tĩnh H_0 , vận tốc gió V) đối với các yếu tố đầu ra (chiều cao lớp sôi H_{mf} , tổn thất áp suất Δp).

3.3.1. Mối quan hệ vận tốc sôi tối thiểu và chiều cao lớp sôi của hạt đậu tươi



Hình 3. Chiều cao lớp sôi của hạt đậu tươi theo vận tốc gió

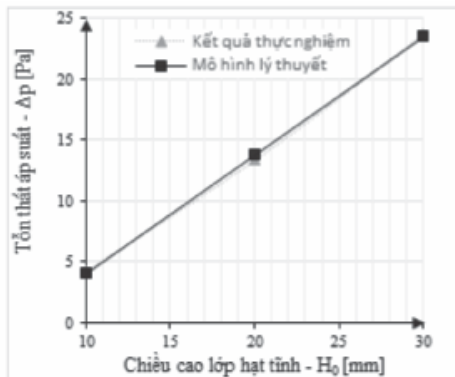
Thực nghiệm sấy đậu Hà Lan tươi ở ba mức chiều cao lớp hạt tĩnh là 1, 2, 3 cm, lần lượt thu được vận tốc sôi tối thiểu V_{mf} là 4.85; 6.61; 7.30 m/s. Dựa vào kết quả thực nghiệm được trình bày trên Hình 3, ta có thể thấy chiều cao lớp hạt tĩnh (H_0) càng lớn thì vận tốc tối thiểu để hạt bắt đầu sôi càng cao.

3.3.2. Mối quan hệ giữa tổn áp và chiều cao lớp hạt

Tổn thất áp suất qua lớp hạt tươi đo được thể hiện trên Hình 4. Qua kết quả thực nghiệm ta có thể thấy, tổn thất áp suất dòng khí qua lớp hạt đậu tươi phụ thuộc theo chiều cao lớp hạt tĩnh và chúng có quan hệ tuyến tính như sau:

$$\Delta P = 972.5 \times H_0 - 5.73 \quad (15)$$

Với hệ số xác định $R^2 = 0.9987$ giải thích trong 100% sự biến động của ΔP so với trung bình của nó thì có 99.87% là do H_0 gây ra. Trong mô hình hồi quy tuyến tính đơn $r^2 = R^2$, ta được hệ số tương quan mẫu $|r| > 0.9993$ do đó, ΔP và H_0 có quan hệ tuyến tính mạnh.



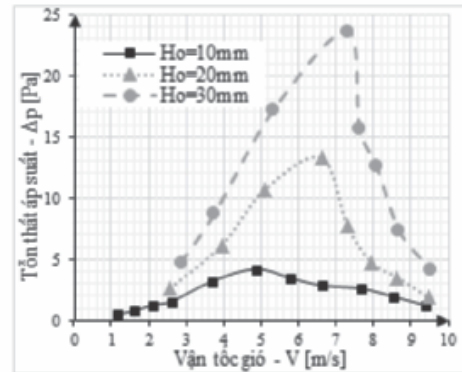
Hình 4. So sánh tổn thất áp suất qua lớp hạt tươi theo chiều cao lớp hạt

3.3.3. Mối quan hệ giữa tổn áp và vận tốc gió

Theo kết quả trong Hình 5, tại đỉnh của các đường cong thể hiện sự biến đổi của tổn áp theo vận tốc gió, tổn thất áp suất đạt giá trị lớn nhất ứng với giá trị vận tốc sôi tối thiểu. Theo chiều tăng của vận tốc, tổn áp có thể tăng hoặc giảm, chia làm hai giai đoạn.

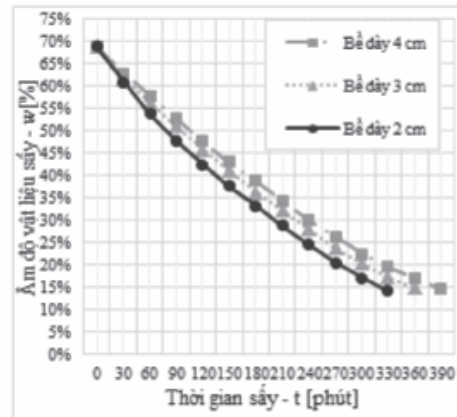
- Giai đoạn chưa sôi ($V < V_{mf}$): Theo lý thuyết, tổn áp tăng theo bình phương vận tốc. Tuy nhiên, thực nghiệm cho thấy tổn áp thấp hơn và đường cong có dạng đa thức bậc hai, có thể do các yếu tố như phân bố khí không đều, ma sát thành, sai số đo, hạt không đồng đều hoặc một số hạt đã sôi nhẹ làm giảm sức cản.

- Giai đoạn sau khi sôi ($V > V_{mf}$): Vận tốc tăng làm lớp hạt dao động mạnh, chiều cao lớp sôi tăng, mật độ hạt giảm, khí lưu thông dễ hơn nên tổn áp giảm dần.



Hình 5. Đồ thị tổn thất áp suất theo vận tốc gió.

3.4. Ảnh hưởng của bề dày lớp hạt đến quá trình sấy



Hình 6. Sấy bom nhiệt tăng sôi khi thay đổi bề dày lớp hạt ban đầu.

Thực nghiệm xác định ảnh hưởng của bề dày lớp hạt đến quá trình sấy được thực hiện ở nhiệt độ 50°C với bề dày 2 cm, 3 cm, 4 cm. Kết quả Hình 6 cho thấy, bề dày lớp hạt 2 cm cho tốc độ tách ẩm nhanh nhất do lớp hạt mỏng giúp không khí nóng dễ dàng xuyên qua. Tuy nhiên, sự ổn định của quá trình sấy bị ảnh hưởng bởi điều kiện lưu lượng gió do chiều cao vật liệu sấy thấp. Ở bề dày lớp hạt 4 cm, thời gian tách ẩm chậm nhất do bề dày vật liệu lớn cản trở luồng không khí nóng, làm giảm hiệu quả tách ẩm. Chiều cao lớp hạt 3 cm cho kết quả cân bằng giữa tốc độ giảm ẩm và độ

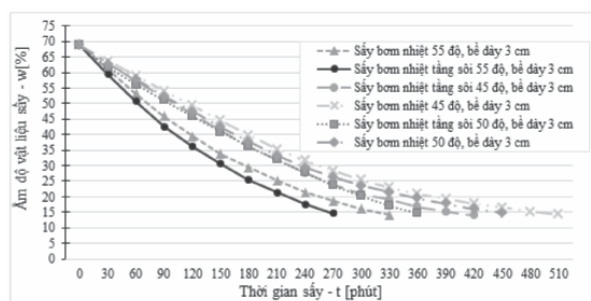
ổn định cao. Chiều cao này đảm bảo hiệu quả truyền nhiệt và trạng thái tầng sôi ổn định trong suốt quá trình sấy.

3.5. So sánh quá trình sấy trên hệ thống bơm nhiệt tầng sôi và hệ thống bơm nhiệt

Đường cong tốc độ sấy khi sử dụng máy sấy bơm nhiệt tầng sôi luôn nằm dưới và giảm nhanh hơn so với máy sấy bơm nhiệt thể hiện trong Hình 7, chứng tỏ hiệu quả truyền nhiệt – truyền ẩm vượt trội của phương pháp này. Cụ thể, việc sử dụng phương pháp sấy bơm nhiệt tầng sôi giúp sản phẩm giảm độ ẩm nhanh hơn và đạt độ ẩm mong muốn sớm hơn khoảng 60-90 phút so với sấy bơm nhiệt truyền thống tại cùng một mức nhiệt. Điều này khẳng định bơm nhiệt tầng sôi là phương pháp sấy hiệu quả hơn.

3.6. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến quá trình sấy

Với chiều cao lớp hạt cố định 3 cm, khi tăng nhiệt độ từ 45°C, 50°C, 55°C, tốc độ sấy tăng rõ rệt. Mẫu sấy ở 55°C luôn cho độ giảm ẩm thấp hơn so với 45°C và 50°C, cho thấy nhiệt độ cao giúp quá trình bay hơi diễn ra nhanh hơn và rút ngắn thời gian sấy. Tuy nhiên, sấy ở nhiệt độ 55°C gây ra một số vấn đề về chất lượng sản phẩm, bao gồm hiện tượng nứt, biến dạng bề mặt và màu sắc không tươi ở một vài hạt. Nguyên nhân là do quá trình bốc tách ẩm bề mặt diễn ra quá nhanh, trong khi độ ẩm bên trong chưa kịp khuếch tán ra ngoài, gây ra lực căng lớn và hư hại sản phẩm. Vì vậy, mặc dù 55°C rút ngắn thời gian sấy, nhưng nó ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng. 50°C được xác định là mức nhiệt độ tối ưu cho quá trình sấy bơm nhiệt tầng sôi.



Hình 7. Tốc độ sấy của máy sấy bơm nhiệt tầng sôi và máy sấy bơm nhiệt tại các mức nhiệt độ khác nhau

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thành công trong việc làm rõ các thông số vận hành tối ưu cho quá trình sấy đậu Hà Lan bằng hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi. Cụ thể, chiều cao lớp hạt 3 cm và nhiệt độ sấy 50°C được xác định là tối ưu nhất, đảm bảo tốc độ sấy phù hợp, giữ gìn cấu trúc và tránh các vấn đề chất lượng do sấy ở nhiệt độ cao. So với phương pháp sấy bơm nhiệt truyền thống, sấy bơm nhiệt tầng sôi cho thấy hiệu quả truyền nhiệt và truyền ẩm cao hơn, rút ngắn khoảng 60-90 phút khi sử dụng cùng mức nhiệt. Mô hình Leva và Wen-Yu dự đoán kết quả vận tốc sôi tối thiểu sát với thực nghiệm, trong khi mô hình Sheed cho kết quả tổn thất áp suất tốt nhất. Những kết quả này cung cấp cơ sở dữ liệu cho thiết kế và vận hành máy sấy, góp phần giảm tiêu thụ năng lượng và thúc đẩy ứng dụng công nghệ hiện đại trong chế biến nông sản.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số SVTC-2024-CK-103. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

• **Danh mục viết tắt:**

A (m²): Diện tích phân phối khí;
 Ar (-): Chuẩn động dạng Archimedes;
 d_p (m): Đường kính trung bình của hạt;
 ε (-): Độ xốp của lớp hạt;
 ε_{mf} (-): Độ xốp của lớp hạt khi sôi;
 G_a (kg): Khối lượng nước chứa trong vật liệu ẩm;
 G (kg): Khối lượng của toàn bộ vật liệu ẩm;
 H₀ (m): Chiều cao lớp hạt tĩnh;
 H_{mf} (m): Chiều cao lớp hạt sôi;
 m (kg): Khối lượng hạt trong bộ phân phối khí;
 ρ_v (kg/m³): Khối lượng riêng thực của hạt;
 ρ_k (kg/m³): Khối lượng riêng của không khí trong buồng;
 μ_k (Ns/m²): Độ nhớt động học của không khí trong buồng;
 ΔP (Pa): Tổn thất áp suất dòng khí qua lớp hạt;
 φ (%): Độ cầu tròn của hạt;
 Re (-): Chuẩn động dạng Reynolds;
 V (m³/m².s): Vận tốc khí biểu kiến;
 V_t (m/s): Vận tốc khí thực tế.

• **Xung đột lợi ích:**

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

• **Đóng góp của các tác giả:**

Phan Thành Nhân đề xuất ý tưởng nghiên cứu, xây dựng kế hoạch thí nghiệm, thảo luận phương pháp, chỉnh sửa và kiểm tra các mô hình toán và đồng thời chịu trách nhiệm về nội dung bài báo.

Bùi Nguyễn Nhật Tài, Bùi Hoàng Gia Bảo, Nguyễn Tuấn Đạt tham gia thực hiện thí nghiệm, thu thập dữ liệu, phân tích kết quả và đề xuất mô hình toán học phù hợp. ❖

Ngày nhận bài: **21/7/2025**

Ngày phản biện: **06/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Tiwari, B.K. and Singh, N. (2012), “*Pulse chemistry and technology*”. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry.
- [2]. Wang, N., Hatcher, D.W. and Gawalko, E.J. (2008), “*Effect of variety and processing on nutrients and certain anti-nutrients in field peas (Pisum sativum L.)*”. Food Chemistry 111: 132-138.
- [3]. Nguyen, G.T., Gidley, M.J. and Sopade, P.A. (2015), “*Dependence of in-vitro starch and protein digestions on particle size of field peas (Pisum sativum L.)*”. LWT - Food Science and Technology 63: 541-549.
- [4]. Sharma, S., Singh, N., Singh Viridi, A. and Chand Rana, J. (2015), “*Quality traits analysis and protein profiling of field pea (Pisum sativum L.) germplasm from Himalayan region*”. Food Chemistry 172: 528-536.
- [5]. Nguyễn Minh Hạ và Hà Anh Tùng, “*Nghiên cứu thực nghiệm sấy chanh bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại*”, Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật, số 66, 2021.
- [6]. Dương Ngọc Khánh và Phan Thành Nhân, “*Nghiên cứu sấy trà hoa Lavender trên hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 309, 2023.
- [7]. Phạm Thị Hằng (2021), “*Nghiên cứu ứng dụng công nghệ sấy tầng sôi bơm nhiệt cho đậu Hà Lan*”. Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, 21(5): 85-90.
- [8]. Mohammadi, Z., et al. (2019), “*Fluidized bed drying: A comparative study on heat pump and conventional drying methods*”. Food Processing and Preservation Journal. Link truy cập: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218324654>
- [9]. Chen, X., et al. (2020), “*Advances in heat pump drying technology for green vegetables and legumes*”. Food Science & Technology International. Link truy cập: <https://www.intechopen.com/chapters/73182#B35>



- [10]. Kumar, A., et al. (2018), “*Drying of pulses using advanced techniques*”. Journal of Food Science and Technology, 55(10): 3711-3720.
- [11]. Folasayo Fayose, Zhongjie Huan, “*Heat Pump Drying of Fruits and Vegetables: Principles and Potentials for Sub-Saharan Africa*”. International Journal of Food Science, vol. 2016, Article. ID 9673029, 8 pages, 2016.
- [12]. Shedd, C. K. (1953), “*Resistance of Grains and Seeds to Airflow*”. Agric. Eng., 34(9): 616-619.
- [13]. Hukill, W. V., & Ives, S. J. (1955), “*Resistance of Grain and Seeds to Airflow*”. Transactions of the ASAE, 1(1), 61-64.
- [14]. Hunter, J. E., & Bajer-Arkema, B. (1986), “*Airflow resistance of wheat and barley as affected by airflow direction, moisture content, and bulk density*”. Transactions of the ASAE, 29(6), 1745-1750.
- [15]. Mohd Faizal Mohideen, Suzairin Md Seri and Vijay R. Raghavan (2011), “*Fluidization of Geldart Type-D Particles in a Swirling Fluidized Bed*”. Applied Mechanics and Materials, vol. 110-116, pp. 3720-3727.
- [16]. Ganjloo, A và cộng sự, (2018), “*Moisture-dependent physical properties of green peas (Pisum sativum L.)*”. International Food Research Journal 25(3): pp. 1246-1252.
- [17]. Bui T. T., “*Determination on Fluidization Velocity Types of the Continuous Refined Salt Fluidized Bed Drying*”, 2009.
- [18]. Phan T. N., “*Nghiên cứu thực nghiệm xác định chế độ sôi của hạt tiêu trong quá trình sấy tầng sôi*”, 2021.
- [19]. X. S. Wang and M. J. Rhodes (2005), “*Pulsed fluidization – A DEM study of a 144 fascinating phenomenon*”. Powder Technology, vol. 159, pp. 142-149.