

# NGHIÊN CỨU ĐỘNG HỌC QUÁ TRÌNH SẤY DƯỢC LIỆU BẰNG THIẾT BỊ SẤY BƠM NHIỆT CÓ HỖ TRỢ SÓNG SIÊU ÂM

Nguyễn Hay <sup>a</sup>, Lê Quang Huy <sup>b,\*</sup>, Lê Thanh Đạt <sup>b</sup>,

Đặng Thị Trúc Linh <sup>b</sup>, Võ Bình Phước <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh

<sup>b</sup> Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng, TP. Hồ Chí Minh

\* Tác giả liên hệ: lequanghuy@caothang.edu.vn

## Tóm tắt

Nghiên cứu này tổng hợp chuỗi kết quả thực nghiệm công bố trong giai đoạn 2021–2025 về sấy dược liệu bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm, trên hai đối tượng là sâm Bồ Chính (*Abelmoschus sagittifolius*) và rễ Đinh Lăng (*Polyscias fruticosa*). Các kết quả được đánh giá toàn diện bao gồm: cơ chế tác động của sóng siêu âm lên hai thành phần động lực sấy; ảnh hưởng của nhiệt độ, công suất và tỷ lệ gián đoạn đến hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng và năng lượng hoạt hóa; kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu; so sánh hiệu quả hỗ trợ sấy của sóng siêu âm trên hai dược liệu khác nhau.

Ở nhiệt độ tác nhân sấy 45 °C, việc bổ sung sóng siêu âm công suất 120 W rút ngắn thời gian sấy sâm Bồ Chính từ 9,9 giờ xuống 7,2 giờ, tương ứng 27,3 %; hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng tăng từ 3,69 lên  $4,87 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  và hàm lượng saponin còn lại tăng từ 51,7 % lên 95,2 %. Năng lượng hoạt hóa của quá trình khuếch tán ẩm giảm từ 32,226 xuống 30,381 kJ/mol khi công suất tăng từ 80 lên 160 W. Chế độ công nghệ phù hợp xác định được là 45,1 °C; 122,7 W; tỷ lệ gián đoạn 0,18, với sai lệch giữa giá trị dự đoán và kiểm chứng thực nghiệm dưới 7 % ở cả ba chỉ tiêu. Khi quy về cường độ sóng danh nghĩa, chế độ phù hợp của hai loại dược liệu hội tụ ở 1,12–1,13 kW/m<sup>2</sup>, nhiệt độ 44,7–45,1 °C và tỷ lệ gián đoạn 0,18.

**Từ khóa:** sấy bơm nhiệt, sóng siêu âm, động học sấy, hệ số khuếch tán ẩm, năng lượng hoạt hóa, dược liệu.

## 1. Giới thiệu

Sấy là công đoạn bắt buộc trong chuỗi chế biến dược liệu sau thu hoạch, không chỉ nhằm làm khô mà còn phải bảo toàn hoạt chất, màu sắc và giá trị cảm quan của sản phẩm với chi phí năng lượng hợp lý. Với các loại dược liệu quý như sâm Bồ Chính, rễ Đinh Lăng, ... hoạt chất chính là nhóm saponin triterpenoid vốn nhạy cảm với nhiệt, nên phương pháp sấy đối lưu nhiệt độ cao truyền thống làm thất thoát đáng kể hoạt chất và biến đổi màu sắc sản phẩm [1].

Sấy bơm nhiệt khắc phục được nhược điểm này nhờ khả năng tách ẩm tác nhân sấy tại dàn lạnh, tạo tác nhân sấy có độ chứa ẩm thấp ở nhiệt độ vừa phải. Xét theo cơ chế truyền chất, gọi  $P_v$ ,  $P_{bm}$  và  $P_h$  lần lượt là phân áp suất hơi nước trong lòng vật liệu, trên bề mặt vật liệu và trong môi trường, động lực quá trình sấy là:

$$L = L_1 + L_2 \sim (P_v - P_h) \quad (1)$$

Trong đó  $L_1 \sim (P_v - P_{bm})$  là động lực dịch chuyển ẩm từ tâm ra bề mặt, còn  $L_2 \sim (P_{bm} - P_h)$  là động lực dịch chuyển ẩm từ bề mặt ra môi trường. Bơm nhiệt tác động chủ yếu lên  $L_2$  thông qua việc giảm  $P_h$ . Tuy nhiên, do tác nhân sấy được gia nhiệt bằng nhiệt thải tại dàn nóng nên nhiệt độ sấy thấp, dẫn đến  $L_1$  nhỏ và quá trình khuếch tán ẩm từ trong lòng vật liệu ra bề mặt diễn ra chậm. Đây là nguyên nhân khiến thời gian sấy bơm nhiệt thường kéo dài, đặc biệt ở giai đoạn cuối.

Sóng siêu âm công suất cao, tần số thấp được xem là giải pháp hỗ trợ phù hợp cho hạn chế nêu trên. Khác với vi sóng hay sóng radio vốn gia nhiệt thể tích mạnh, sóng siêu âm có hiệu ứng nhiệt yếu nên thích hợp với vật liệu nhạy nhiệt [2]. Nhiều công trình quốc tế đã ghi nhận hiệu quả của sấy có hỗ trợ siêu âm trên khoai tây, cà tím, táo, mâm xôi, tiêu xanh, cà rốt và hạt đậu Azuki, với kết luận chung là rút ngắn thời gian sấy và cải thiện chất lượng sản phẩm [3, 4, 5]. Zhang và Abatzoglou đánh giá siêu âm là công cụ có tiềm năng giảm đồng thời chi phí chế biến và nhiệt độ sấy đối với vật liệu nhạy nhiệt [6].

Tại Việt Nam, hướng nghiên cứu này còn mới. Nguyễn Xuân Quang đã thực nghiệm sấy Đảng sâm bằng bơm nhiệt kết hợp siêu âm và xác định cường độ sóng phù hợp  $2,1 \text{ kW/m}^2$  [7], song quy mô mẻ sấy còn rất nhỏ. Từ năm 2021 đến 2025, nhóm tác giả đã công bố một chuỗi kết quả thực nghiệm trên thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm quy mô pilot, lần lượt xác định hệ số khuếch tán ẩm và năng lượng hoạt hóa của sâm Bồ Chính [8], ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ, công suất và tỷ lệ gián đoạn đến các chỉ tiêu chất lượng [9], và chế độ sấy phù hợp cho rễ Đinh Lăng [10].

Tuy vậy, mỗi công bố nêu trên chỉ giải quyết một khía cạnh trên một đối tượng vật liệu. Chưa có công trình nào tổng hợp toàn bộ các quy luật động học vào một khung phân tích thống nhất, do đó nghiên cứu này nhằm bốn mục tiêu:

1. Tổng hợp ảnh hưởng của nhiệt độ tác nhân sấy, công suất và chế độ phát sóng gián đoạn đến ba đại lượng động học là thời gian sấy, hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng và năng lượng hoạt hóa;
2. Trình bày kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu
3. So sánh chế độ công nghệ phù hợp của hai loại dược liệu có cấu trúc và độ ẩm ban đầu khác biệt trên cùng một thiết bị;
4. Làm rõ sự biến thiên của hiệu quả hỗ trợ sấy của siêu âm theo tiến trình tách ẩm.

Đây là bài nghiên cứu tổng hợp, toàn bộ dữ liệu được kế thừa từ các công trình đã công bố của nhóm tác giả [8], [9], [10] và từ báo cáo tổng kết đề tài B2021-NLS-01 [12]. Đóng góp của bài nằm ở việc đưa các kết quả rời rạc về cùng một khung phân tích, quy chuẩn các đại lượng để so sánh được giữa hai vật liệu, kiểm tra chéo tính nhất quán giữa các mô hình đã xây dựng và chỉ ra giới hạn áp dụng của chúng.

## 2. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Cơ chế hỗ trợ sấy của sóng siêu âm

Sóng siêu âm là sóng cơ học có tần số trên 20 kHz. Khi lan truyền trong môi trường đàn hồi, sóng gây ra các chu kỳ co – giãn lặp lại của các phân tử cấu thành vật liệu, tạo nên một ứng suất cơ học có chu kỳ. Trong quá trình sấy, ứng suất này tác động theo hai hướng đồng thời.

- Tại bề mặt vật liệu, các vi dao động cơ học phá vỡ hoặc làm mỏng lớp biên truyền ẩm ngăn cách giữa vật liệu và tác nhân sấy, qua đó làm giảm trở kháng ngoại. Tác động này cũng tương tự như giải pháp làm tăng diện tích tiếp xúc của vật liệu và tác nhân sấy trong phương pháp sấy đối lưu cưỡng bức và phương pháp sấy tầng sôi, nhưng tác động của sóng siêu âm mạnh hơn vì khả năng xâm thực của các vi dao động và hiệu quả hơn ở điều kiện nhiệt độ sấy thấp.

- Trong lòng vật liệu, chu kỳ co – giãn tạo ra hoặc khai thông các vi kênh, đồng thời làm suy yếu liên kết giữa phân tử nước và chất khô. Hiện tượng này thường được mô tả bằng hiệu ứng “bọt biển”. Kết quả là trở kháng nội giảm, ẩm từ tâm dịch chuyển ra bề mặt nhanh hơn, tốc độ lực  $L_1$  được cải thiện.

Vai trò của hai thành phần công nghệ trong thiết bị được tóm tắt ở Bảng 1.

**Bảng 1. Vai trò của bơm nhiệt và sóng siêu âm trong động lực quá trình sấy**

| Bơm nhiệt                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Sóng siêu âm                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>– Tách ẩm tác nhân sấy tại dàn lạnh, giảm phân áp suất <math>P_h</math>.</li><li>– Gia nhiệt đẳng dung ẩm tại dàn nóng, đưa độ ẩm tương đối <math>\phi</math> xuống dưới 100 % ở nhiệt độ yêu cầu.</li></ul> $\Rightarrow$ Tác động chủ yếu lên $L_2$ . | <ul style="list-style-type: none"><li>– Trong lòng vật liệu: tạo vi kênh, suy yếu liên kết ẩm, giảm trở kháng nội.</li><li>– Tại bề mặt: phá vỡ hoặc làm mỏng lớp biên ẩm, giảm trở kháng ngoại.</li></ul> $\Rightarrow$ Tác động lên $L_1$ và hỗ trợ thêm $L_2$ . |

Như vậy hai thành phần công nghệ tác động lên hai thành phần khác nhau của động lực sấy. Đây là cơ sở lý thuyết của việc kết hợp hai phương pháp.

### 2.2. Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng

Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng  $D_{eff}$  đặc trưng cho tốc độ dịch chuyển ẩm bên trong vật liệu và là thông số cần thiết để ước tính thời gian sấy trong giai đoạn tốc độ sấy giảm dần [14].

Hệ số khuếch tán ẩm trong tấm phẳng chiều dày  $2L$  được xác định bởi nghiệm giải tích gần đúng của phương trình vi phân sau [13]

$$\frac{\partial M_k(x, \tau)}{\partial \tau} = D_{eff} \frac{\partial^2 M_k(x, \tau)}{\partial x^2}, 0 \leq x \leq L, \tau > 0 \quad (2)$$

Và nghiệm giải tích gần đúng của bài toán:

$$MR = \frac{M_{kt} - M_{ke}}{M_{k0} - M_{ke}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right) \quad (3)$$

Trong đó: MR là tỷ số ẩm không thứ nguyên,  $M_{k0}$  là độ ẩm ban đầu của vật liệu (% , kg/kgVLK),  $M_{kt}$  là độ ẩm tại thời điểm  $\tau$  (% , kg/kgVLK),  $M_k$  là độ ẩm của vật liệu (% , kg/kgVLK),  $M_{ke}$  là độ ẩm cân bằng của vật liệu (% , kg/kgVLK),  $D_{eff}$  là hệ số khuếch tán ẩm ( $m^2/s$ ),  $L$  là nửa độ dày của mẫu (m),  $\tau$  là thời gian (s) và  $n$  là số nguyên dương.

Phương trình (3) này có thể được đơn giản hóa bằng cách lấy số hạng đầu tiên của nghiệm chuỗi:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right) \quad (4)$$

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2} \quad (5)$$

Từ giá trị MR theo thời gian, sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất cho phương trình (5) tìm được các giá trị  $D_{eff}$

### 2.3. Năng lượng hoạt hóa

$D_{eff}$  là một hằng số phụ thuộc vào nhiệt độ và được biểu diễn theo mô hình của Arrhenius [15] như sau:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_k T}\right) \quad (6)$$

Trong đó :  $D_0$  : hệ số của phương trình ;  $R_k$ : hằng số khí,  $R = 8,314 \times 10^{-3}$  kJ/K.mol ;  $E_a$ : năng lượng kích hoạt cho quá trình khuếch tán ẩm (kJ/mol);  $T$ : Nhiệt độ Kenvin (K)

Phương trình (6) có thể đưa về dạng tuyến tính bằng cách lấy logarit

$$\ln D_{eff} = -\frac{E_a}{R_k T} + \ln D_0 \quad (7)$$

Từ giá trị  $D_{eff}$  theo nhiệt độ tìm được ở trên, sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất cho phương trình (7) tìm được các giá trị  $D_0$ ,  $E_a$ .

### 2.4. Cường độ sóng siêu âm danh nghĩa

Để so sánh các thí nghiệm có số khay và số tấm phát xạ khác nhau, công suất phát sóng được quy về đơn vị diện tích phát xạ:

$$I_U = P_U / S_R \quad (8)$$

Trong đó  $P_U$  là công suất của nguồn phát sóng siêu âm (kW),  $S_R$  là tổng diện tích bề mặt các tấm phát xạ tham gia vào mẻ sấy ( $m^2$ ),  $I_U$  là cường độ sóng siêu âm danh nghĩa ( $kW/m^2$ ).

Cần lưu ý đây là đại lượng quy ước dùng để so sánh, không phải cường độ âm thực truyền vào vật liệu, vì phép tính chưa xét đến hiệu suất biến đổi điện – cơ của phần

từ áp điện, tổn thất tại mỗi ghép và phản sóng phản xạ do chênh lệch trở kháng âm giữa tấm phát xạ và lớp vật liệu.

## 2.5. Hàm lượng saponin: Sp

Hàm lượng saponin (g/100g chất khô): được xác định với phương pháp thử nghiệm SAPONIN/01/2019 tại Viện nghiên cứu Công nghệ sinh học và Môi trường (Trường ĐH Nông Lâm TP. HCM).

Hàm lượng saponin Sp (%) được sử dụng trong bài báo này được hiểu là phần trăm saponin còn lại của sản phẩm so với mẫu sẫm tươi ban đầu và được tính theo công

thức sau:

$$Sp = \frac{Sp_2}{Sp_1} \cdot 100 (\%) \quad (9)$$

Trong đó: Sp<sub>1</sub>: Hàm lượng saponin ban đầu (g/100g chất khô).

Sp<sub>2</sub>: Hàm lượng saponin sau khi sấy (g/100g chất khô).

## 2.6. Sự thay đổi màu sắc: dE

Màu sắc của vật liệu sấy có thể được đánh giá bằng cảm quan hoặc dựa vào thông số màu sắc. Trong nghiên cứu này, thông số màu CIE Lab (L\*, a\*, b\*) được sử dụng để mô tả sự thay đổi màu sắc trong quá trình sấy, các giá trị L\*, a\*, b\* được đo bởi máy đo màu CHN SPEC CS-10. Mức độ thay đổi màu sắc so với giá trị chuẩn được đánh giá thông qua thông số dE xác định theo công thức:

$$dE = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2} \quad (10)$$

Trong đó, L\*<sub>ref</sub>, a\*<sub>ref</sub>, b\*<sub>ref</sub> là các giá trị chuẩn, sử dụng các giá trị ban đầu của vật liệu tươi (trước khi sấy) làm giá trị chuẩn.

## 2.7. Chụp hiển vi cấu trúc vật liệu SEM

Để nghiên cứu cấu trúc vi mô sẫm Bồ Chính và những thay đổi cấu trúc gây ra bởi siêu âm, sản phẩm sấy đã được quan sát và chụp lại bằng kính hiển vi điện tử quét JSM-IT100 của hãng JEOL, xuất xứ Nhật Bản.

Các mẫu sấy được quét electron để chụp ảnh cấu trúc bề mặt mức độ phóng đại 200 lần với các tỷ lệ gián đoạn khác nhau và so sánh với mẫu sấy ở cùng điều kiện nhưng không có hỗ trợ của sóng siêu âm.

# 3. Quy trình thực nghiệm

## 3.1. Vật liệu

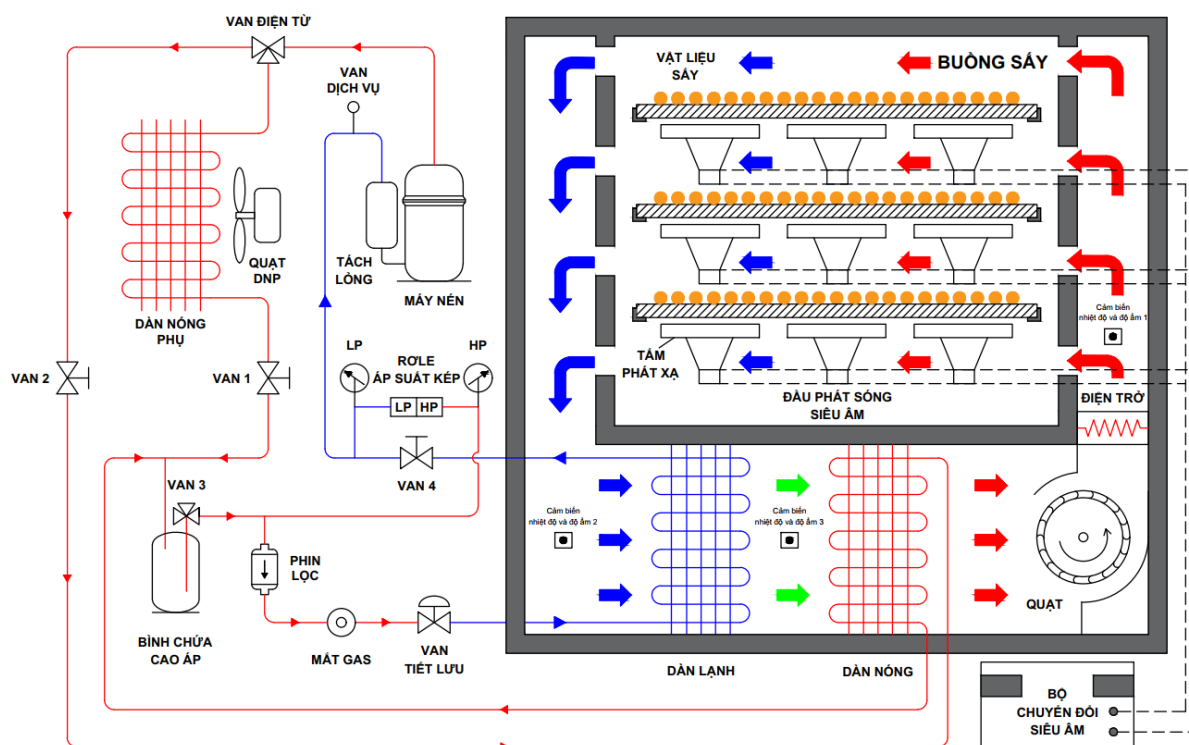
Sẫm Bồ Chính tươi được trồng tại huyện Đức Huệ, tỉnh Long An, thu hoạch sau 12 tháng tuổi, đường kính củ 25–30 mm. Rễ Đinh Lăng tươi khoảng 5 năm tuổi.

Sau khi rửa sạch và để ráo, mẫu được bảo quản trong túi chân không kín ở  $8 \pm 0,5$  °C trong 3–5 ngày nhằm phân bố đều ẩm trên toàn bộ thể tích. Trước thí nghiệm, mẫu được làm ẩm đến nhiệt độ môi trường rồi thái lát bằng máy thái lát thực phẩm với chiều dày  $6 \pm 0,5$  mm.

Độ ẩm ban đầu xác định bằng cân sấy ẩm hồng ngoại, lặp 5 lần trên 5 mẫu ngẫu nhiên: sẫm Bồ Chính  $\omega_1 \approx 4,56 \text{ kg/kgVLC}$  (tương đương 82 % cơ sở ướt); rễ Đinh Lăng  $\omega_1 \approx 2,13 \text{ kg/kgVLC}$  (tương đương 68 % cơ sở ướt). Độ ẩm sản phẩm yêu cầu theo Dược điển Việt Nam V [11]:  $\omega_2 \approx 0,15 \text{ kg/kgVLC}$  (tương đương 13 % cơ sở ướt).

### 3.2. Thiết bị

Thiết bị sử dụng là máy sấy dược liệu theo nguyên lý bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm quy mô pilot, gồm ba hệ thống: bơm nhiệt, sấy đối lưu hồi lưu toàn phần và phát sóng siêu âm. Sơ đồ nguyên lý và hình ảnh thiết bị được trình bày ở Hình 1 và Hình 2



**Hình 1. Sơ đồ nguyên lý thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm**



**Hình 2. Máy sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm quy mô pilot**

Buồng sấy có kích thước DxRxC: 1000x440x750 (mm), có thể chứa 3÷5 kg vật liệu mỗi mẻ sấy. Máy sấy được tích hợp hệ thống phát sóng siêu âm công suất tối đa 600 W, tần số 28 kHz. Tấm phát xạ dạng tấm bậc được đặt ngay dưới đáy lớp vật liệu với khoảng cách rất nhỏ nhằm hạn chế suy giảm năng lượng sóng. Hệ thống điều khiển sử dụng PLC kết hợp màn hình HMI và biến tần, cho phép cài đặt nhiệt độ sấy, vận tốc tác nhân sấy, mức công suất siêu âm và chế độ phát sóng liên tục hoặc gián đoạn theo chu kỳ thời gian. Độ ẩm trung bình của vật liệu trong quá trình sấy được ghi nhận liên tục qua loadcell, tín hiệu được xử lý và lưu trữ bằng PLC.

Các dụng cụ đo được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm:

- + Cân sấy ẩm hồng ngoại thương hiệu Kett (Model: FD-720, xuất xứ Nhật): thang đo 3 ÷ 50 g, độ chính xác  $\pm 0,5\%$
- + Cân điện tử WH-B20: giới hạn đo 10000g, với sai số cho phép  $\pm 1$  g
- + Cảm biến loadcell thương hiệu CAS (Model: BCL-20L, xuất xứ Hàn Quốc): giới hạn đo 10 kg, với sai số  $\pm 0,03$  %kgf
- + Cảm biến nhiệt độ, độ ẩm TH10S-B-PE (xuất xứ: Trung Quốc):  $-40 \div 80^{\circ}\text{C}$ ,  $0 \sim 100$  %RH. Độ chính xác:  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  và  $\pm 3\%$  RH.

- + Cảm biến đo tốc độ gió ES-WS-01(xuất xứ: Trung Quốc): Dải đo  $0 \div 30$  m/s, độ chính xác  $\pm (0,2 + 2\%FS)$  m/s
- + Bộ xử lý PLC thương hiệu Wecon (Model: LX3V-1212MT-A, xuất xứ Trung Quốc)
- + Đồng hồ đo điện năng PZEM-016 (xuất xứ: Trung Quốc): Dòng điện  $0 \div 100A$ , sai số 0.01. Công suất:  $0 \div 26000W$ . Năng lượng:  $0 \sim 9999kWh$
- + Máy đo màu CHN SPEC (Model: CS-10, xuất xứ Trung Quốc): Dải đo: L \*: 1-100.

### 3.3. Bố trí thí nghiệm

Máy sấy được thiết kế cho mẻ 3–5 kg trên 3 khay. Sau khảo nghiệm có tải đúng thông số thiết kế, để giảm chi phí nghiên cứu mà vẫn bảo đảm độ tin cậy, các thí nghiệm xác định thông số công nghệ trên sâm Bồ Chính được tiến hành với 1,5 kg/mẻ trên một khay sấy, tương ứng 3 tấm phát xạ. Các thí nghiệm trên rễ Đinh Lăng và các thí nghiệm kiểm chứng ở chế độ phù hợp được tiến hành với 4 kg/mẻ trên cả 3 khay, tương ứng 9 tấm phát xạ. Quy mô mẻ được ghi rõ trong chú thích của từng bảng số liệu.

Với mỗi mẻ, vật liệu thái lát được xếp đều trên khay, tác nhân sấy chuyển động song song với bề mặt khay ở vận tốc 0,5 m/s. Quá trình sấy diễn ra liên tục cho đến khi độ ẩm vật liệu đạt 0,15 kg/kgVLK thì dừng theo chương trình cài đặt trước.

Phương pháp thực nghiệm đơn yếu tố được dùng để khảo sát ảnh hưởng riêng của từng yếu tố đầu vào, với các mức: nhiệt độ tác nhân sấy 35–40–45–50–55 °C; công suất sóng siêu âm 0–40–80–120–160 W; tỷ lệ gián đoạn 0–0,2–0,4–0,6–0,8. Sau khi xác định được vùng thí nghiệm thích hợp, thực nghiệm đa yếu tố được tiến hành theo quy hoạch Box–Behnken. Riêng thí nghiệm xác định hệ số khuếch tán ẩm được bố trí theo quy hoạch bậc II dạng bất biến quay với  $N = 9$ .

Số liệu được nhập, lưu trữ và xử lý bằng phần mềm Statgraphics 19; phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) được dùng để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ, các hệ số hồi quy không bảo đảm độ tin cậy ( $P\text{-value} > 0,05$ ) bị loại khỏi mô hình.

Tỷ lệ gián đoạn A được định nghĩa  $A = T_{OFF} / (T_{ON} + T_{OFF})$ , trong đó  $T_{ON}$  là thời gian phát sóng và  $T_{OFF}$  là thời gian ngắt sóng trong một chu kỳ. Các mức khảo sát tương ứng:  $A = 0$  (phát liên tục);  $A = 0,2$  (bật 60 s, ngắt 15 s);  $A = 0,4$  (bật 60 s, ngắt 40 s);  $A = 0,6$  (bật 60 s, ngắt 90 s);  $A = 0,8$  (bật 60 s, ngắt 240 s).

## 4. Kết quả và thảo luận

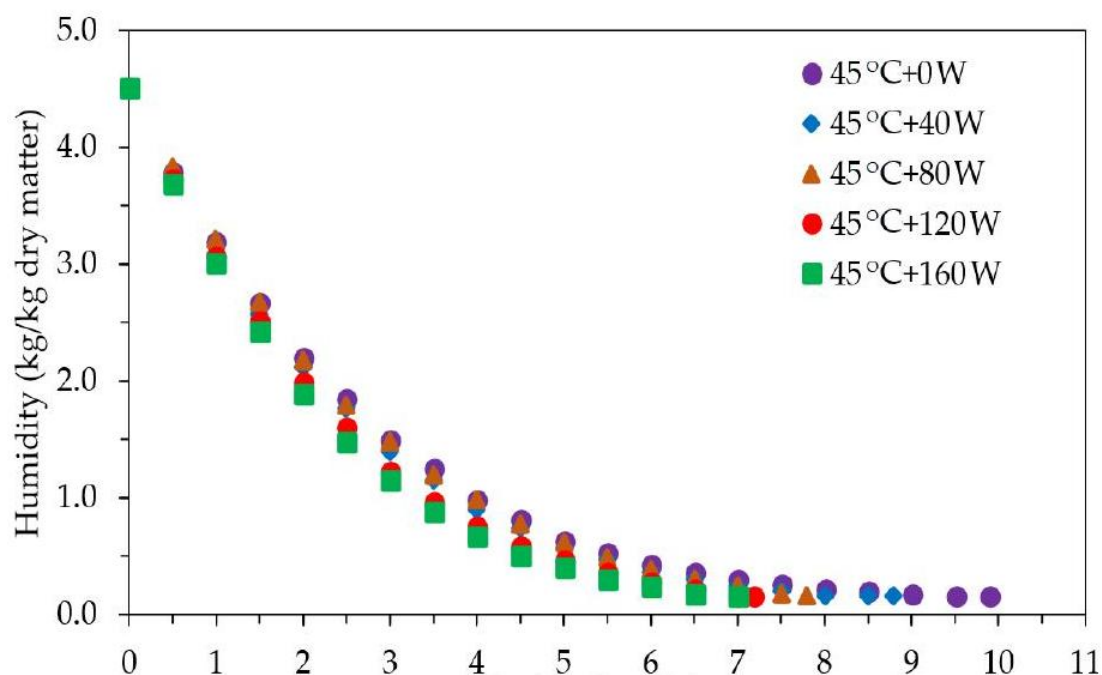
### 4.1. Ảnh hưởng của công suất sóng siêu âm

Khảo sát trên sâm Bồ Chính được thực hiện ở nhiệt độ tác nhân sấy 45 °C với các mức công suất 0, 40, 80, 120 và 160 W (Bảng 2).

**Bảng 2. Các chỉ tiêu động học và chất lượng theo công suất sóng siêu âm**

| P (W)                                                   | 0     | 40    | 80   | 120  | 160   |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|------|------|-------|
| Thời gian sấy $\tau$ (h)                                | 9,9   | 8,8   | 7,8  | 7,2  | 7,0   |
| Mức rút ngắn so với mức trước (h)                       | –     | –1,1  | –1,0 | –0,6 | –0,2  |
| $D_{\text{eff}} (\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$ | 3,69  | 4,16  | 4,39 | 4,87 | 5,10  |
| Hàm lượng saponin còn lại Sp (%)                        | 51,7  | 89,2  | 94,1 | 95,2 | 90,5  |
| Độ lệch màu dE                                          | 13,42 | 11,26 | 9,07 | 8,51 | 11,14 |

Nguồn: [9]. Điều kiện: sâm Bồ Chính;  $T = 45^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ;  $1,5 \text{ kg/m}^2$  – 1 khay ( $I_U = 0 \div 1,65 \text{ kW/m}^2$ ).



**Hình 3. Đường cong sấy sâm Bồ Chính ở  $45^\circ\text{C}$  với các mức công suất sóng siêu âm khác nhau [9]**

Sự có mặt của sóng siêu âm làm thay đổi rõ rệt cả động học lẫn chất lượng sản phẩm. So với sấy bơm nhiệt thuần túy, chế độ kết hợp ở 120 W rút ngắn thời gian sấy từ 9,9 giờ xuống 7,2 giờ, tương ứng 27,3 %. Đáng chú ý hơn là hàm lượng saponin còn lại tăng từ 51,7 % lên 95,2 %; phần chênh lệch này chủ yếu do thời gian tiếp xúc nhiệt của vật liệu giảm gần một phần ba, chứ không phải do sóng siêu âm bảo vệ hoạt chất một cách trực tiếp.

Hiệu quả rút ngắn thời gian sấy không tuyến tính theo công suất. Mức cải thiện giảm dần từ 1,1 giờ khi đưa công suất từ 0 lên 40 W xuống chỉ còn 0,2 giờ khi tăng từ 120 lên 160 W. Xét theo cơ chế truyền chất, kết quả này phù hợp với bản chất hai tác động cơ học đã nêu ở mục 2.1: khi lớp biên truyền âm tại bề mặt đã bị phá vỡ và hệ vi kênh trong lòng vật liệu đã hình thành, năng lượng sóng bổ sung không tạo thêm đường thoát ẩm mới mà phần lớn chuyển hóa thành nội năng.

Hệ quả của phần năng lượng chuyển hóa thành nhiệt thể hiện ở hai chỉ tiêu chất lượng. Hàm lượng saponin đạt cực đại tại 120 W rồi giảm xuống 90,5 % ở 160 W; độ

lệch màu đạt cực tiểu tại 120 W rồi tăng lên 11,14 ở 160 W [9]. Như vậy, trong dải khảo sát tồn tại một điểm cực trị công nghệ quanh 120 W; vượt mức này, tác động nhiệt cùng với ứng suất cơ học đủ lớn để phá vỡ cấu trúc vi mô của vật liệu, làm mất hiệu ứng hỗ trợ truyền ẩm.

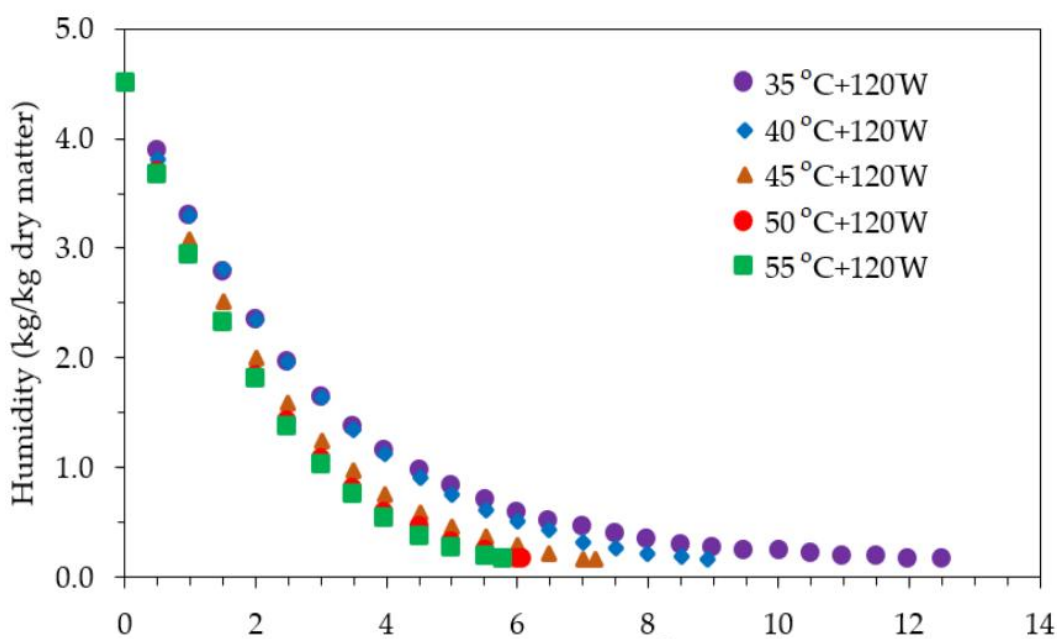
#### 4.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ tác nhân sấy

Khảo sát được thực hiện ở năm mức nhiệt độ 35–55 °C với công suất sóng siêu âm giữ cố định 120 W (Bảng 3).

**Bảng 3. Các chỉ tiêu động học và chất lượng theo nhiệt độ tác nhân sấy**

| T (°C)                                                  | 35   | 40   | 45   | 50    | 55    |
|---------------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| Thời gian sấy $\tau$ (h)                                | 12,5 | 8,9  | 7,2  | 6,1   | 5,8   |
| $D_{\text{eff}}$ ( $\times 10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s) | 2,82 | 3,87 | 4,87 | 5,67  | 5,98  |
| Hàm lượng saponin còn lại Sp (%)                        | 59,1 | 83,1 | 95,2 | 78,1  | 33,2  |
| Độ lệch màu dE                                          | 5,36 | 5,92 | 8,51 | 12,17 | 18,25 |

Nguồn: [9]. Điều kiện: sâm Bồ Chính;  $P = 120$  W;  $v = 0,5$  m/s; 1,5 kg/mẻ – 1 khay.



**Hình 4. Đường cong sấy sâm Bồ Chính ở các mức nhiệt độ tác nhân sấy, công suất 120 W [9]**

Nhiệt độ tăng làm tăng phân áp suất hơi nước trong lòng vật liệu, do đó tăng động lực sấy và rút ngắn thời gian sấy. Tuy nhiên mức cải thiện cũng giảm dần: cùng một bước tăng 5 °C, đoạn 35–40 °C rút ngắn thời gian sấy 28,8 %, còn đoạn 50–55 °C chỉ rút ngắn 4,9 % [9].

Hai chỉ tiêu chất lượng diễn biến khác dạng nhau. Độ lệch màu tăng đơn điệu theo nhiệt độ, từ 5,36 ở 35 °C lên 18,25 ở 55 °C. Hàm lượng saponin lại có cực đại rõ rệt tại

45 °C (95,2 %), giảm xuống 78,1 % ở 50 °C và chỉ còn 33,2 % ở 55 °C. Diễn biến này là kết quả của hai cơ chế đối kháng: tăng nhiệt độ rút ngắn thời gian tiếp xúc nhiệt của vật liệu, có lợi cho saponin; nhưng đồng thời làm tăng tốc độ phân hủy nhiệt của saponin. Dưới 45 °C cơ chế thứ nhất chiếm ưu thế vì thời gian sấy giảm mạnh; trên 45 °C thời gian sấy gần như không giảm thêm trong khi nhiệt độ đã đủ cao để phân hủy hoạt chất, nên cơ chế thứ hai chiếm ưu thế. Xu hướng này thống nhất với kết quả của Ning và cộng sự trên nhân sâm trắng [1].

Trên cơ sở đó, miền 40–50 °C được chọn cho quy hoạch thực nghiệm đa yếu tố.

### 4.3. Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng

Thí nghiệm bố trí theo quy hoạch bậc II bất biến quay với  $N = 9$ , kết quả ở Bảng 4.

**Bảng 4. Giá trị thực nghiệm hệ số khuếch tán ẩm  $D_{eff}$  của sâm Bó Chính ( $\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ )**

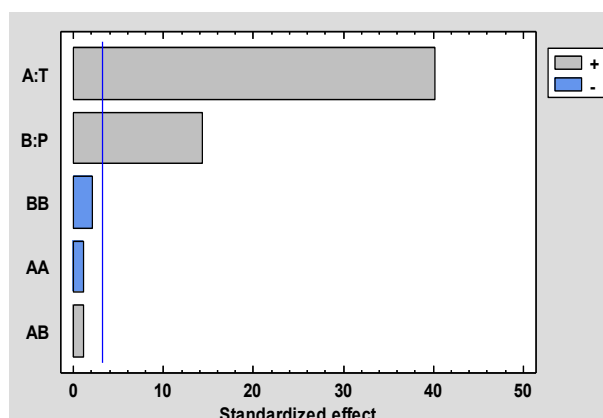
| T (°C) | P = 80 W | P = 120 W | P = 160 W |
|--------|----------|-----------|-----------|
| 40     | 3,60     | 3,87      | 4,12      |
| 45     | 4,39     | 4,87      | 5,10      |
| 50     | 5,28     | 5,67      | 5,91      |

Nguồn: [8]. Điều kiện: sâm Bó Chính;  $A = 0$ ;  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ;  $1,5 \text{ kg/m}^2 - 1 \text{ khay}$ .

Phân tích hồi quy cho quan hệ:

$$D_{eff} = -7,53417 + 0,321167T + 0,0120625P - 0,0018T^2 + 0,0001375TP - 0,00004375P^2 \quad (11)$$

với  $R^2 = 0,9980$ , miền áp dụng  $40 \leq T \leq 50 \text{ °C}$  và  $80 \leq P \leq 160 \text{ W}$ ,  $D_{eff}$  tính theo  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  [8].



**Hình 5. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng  $D_{eff}$**

Biểu đồ Pareto chuẩn hóa (Hình 5) cho thấy nhiệt độ là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất, tiếp đến là công suất sóng siêu âm; cặp thông số T–P cũng có tác động đồng thời [8]. Định lượng mức đóng góp trong miền khảo sát: tăng nhiệt độ từ 40 lên 50 °C làm  $D_{eff}$  tăng 43–47 % tùy mức công suất, trong khi tăng công suất từ 80 lên 160 W ở nhiệt

độ cố định chỉ làm  $D_{\text{eff}}$  tăng 12–16 %. Kết quả này khẳng định sóng siêu âm là tác nhân hỗ trợ chứ không thay thế được vai trò của nhiệt, nhưng cho phép đạt cùng tốc độ khuếch tán ở nhiệt độ thấp hơn — chính là ưu điểm cần khai thác với vật liệu nhạy nhiệt.

Một nhận xét đáng lưu ý khi đối chiếu hai bộ số liệu: tại 45 °C, việc tăng công suất từ 0 lên 160 W làm  $D_{\text{eff}}$  tăng 38,2 % trong khi thời gian sấy chỉ rút ngắn 29,3 %. Chênh lệch này cho thấy sóng siêu âm không chỉ tác động lên khuếch tán nội — đại lượng mà  $D_{\text{eff}}$  phản ánh — mà một phần tác động lên trở kháng ngoại tại bề mặt vật liệu. Đồng thời, nó cũng phản ánh rằng mô hình một chiều với giả thiết  $D_{\text{eff}}$  không đổi theo độ ẩm chỉ mô tả gần đúng giai đoạn tốc độ sấy giảm dần, không bao trùm toàn bộ quá trình.

#### 4.4. Năng lượng hoạt hóa của quá trình khuếch tán ẩm

Áp dụng mô hình Arrhenius cho  $D_{\text{eff}}$  trong khoảng 40–50 °C tại từng mức công suất, thu được các cặp giá trị ở Bảng 5.

**Bảng 5. Năng lượng hoạt hóa  $E_a$  và hệ số  $D_0$  của sâm Bồ Chính theo công suất sóng siêu âm**

| Đại lượng                 | P = 80 W               | P = 120 W              | P = 160 W              |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $E_a$ (kJ/mol)            | 32,226                 | 32,165                 | 30,381                 |
| $D_0$ (m <sup>2</sup> /s) | $8,559 \times 10^{-5}$ | $9,084 \times 10^{-5}$ | $4,865 \times 10^{-5}$ |

Nguồn: [8]. Miền áp dụng:  $40 \leq T \leq 50$  °C.

Năng lượng hoạt hóa giảm khi công suất tăng, nghĩa là năng lượng cần thiết để tách một mol ẩm ra khỏi vật liệu giảm khi có sóng siêu âm hỗ trợ mạnh hơn. Đây là bằng chứng định lượng cho cơ chế làm suy yếu liên kết giữa phân tử nước và thành phần khô do ứng suất cơ học chu kỳ gây ra, cơ chế mà các phân tích trước đó chủ yếu mô tả định tính.

Tuy nhiên, xu hướng giảm này không tuyến tính. Từ 80 W lên 120 W,  $E_a$  gần như không đổi, giảm 0,19 % — nằm trong phạm vi sai số thực nghiệm; mức giảm chỉ trở nên rõ rệt khi công suất đạt 160 W, giảm 5,7 % so với mức 80 W. Kết quả gợi ý tồn tại một ngưỡng cường độ sóng: dưới ngưỡng, siêu âm chủ yếu tác động lên cơ chế đối lưu bề mặt và tạo vi kênh; chỉ khi vượt ngưỡng, tác động làm suy yếu liên kết ẩm bên trong mới trở nên đáng kể. Ghi nhận này cần được kiểm chứng thêm trên dải công suất rộng hơn ba mức.

Tính nhất quán giữa hai mô hình đã được kiểm tra độc lập. Thay  $P = 80$  W,  $T = 318,15$  K vào phương trình Arrhenius tương ứng cho  $D_{\text{eff}} = 4,38 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, so với giá trị thực nghiệm  $4,39 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, sai lệch 0,2 %; tại  $P = 160$  W, kết quả là 4,99 so với  $5,10 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, sai lệch 2,2 %. Hàm hồi quy bậc hai (11) tại  $T = 45$  °C,  $P = 120$  W cho 4,83 so với  $4,87 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s thực nghiệm, sai lệch 0,8 %. Hai mô hình được xây dựng độc lập nhưng cho kết quả sai khác dưới 2,5 %, do đó có thể sử dụng thay thế nhau trong miền khảo sát.

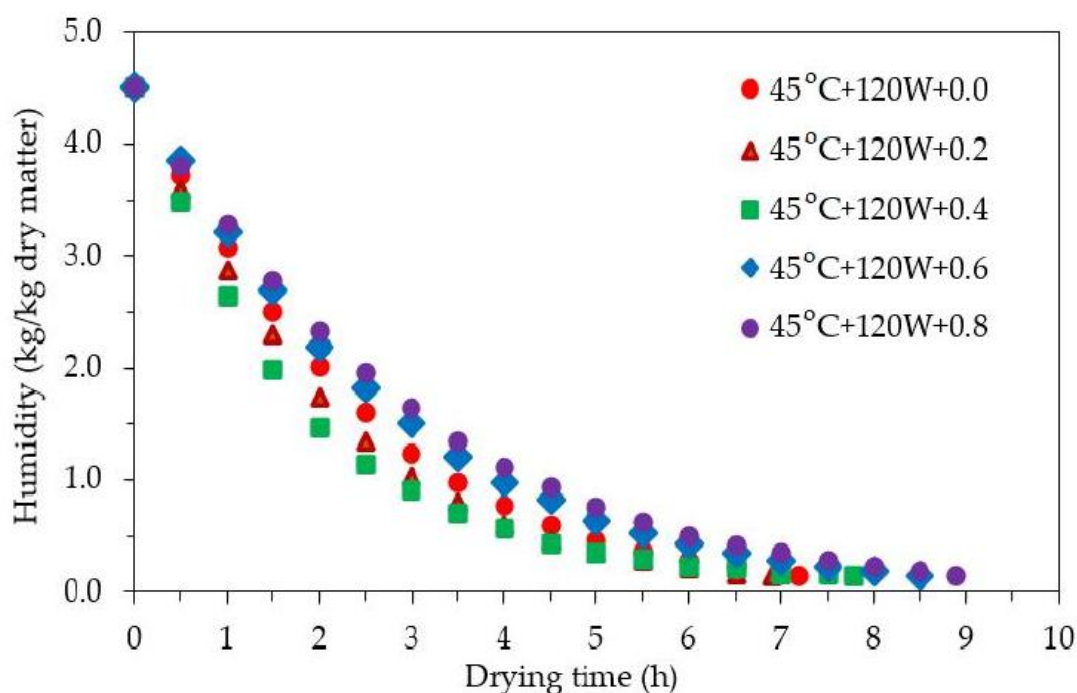
#### 4.5. Ảnh hưởng của chế độ phát sóng gián đoạn

Kết quả khảo sát tỷ lệ gián đoạn trình bày ở Bảng 6.

**Bảng 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ gián đoạn đến các chỉ tiêu đầu ra**

| A                                                       | 0    | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8   |
|---------------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|
| $D_{\text{eff}} (\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$ | 4,87 | 5,17 | 4,56 | 4,12 | 3,86  |
| Hàm lượng saponin còn lại<br>Sp (%)                     | 95,2 | 96,4 | 87,5 | 67,9 | 55,4  |
| Độ lệch màu dE                                          | 8,51 | 5,38 | 6,83 | 8,61 | 10,67 |

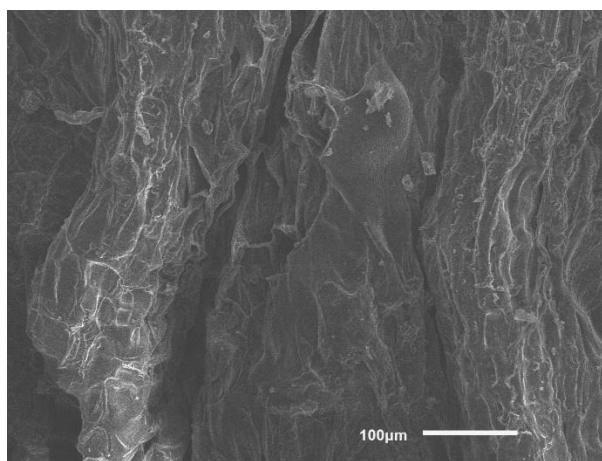
Nguồn: [9]. Điều kiện: sâm Bô Chính;  $T = 45^\circ\text{C}$ ;  $P = 120 \text{ W}$ ;  $1,5 \text{ kg/mẻ} - 1 \text{ khay}$ .



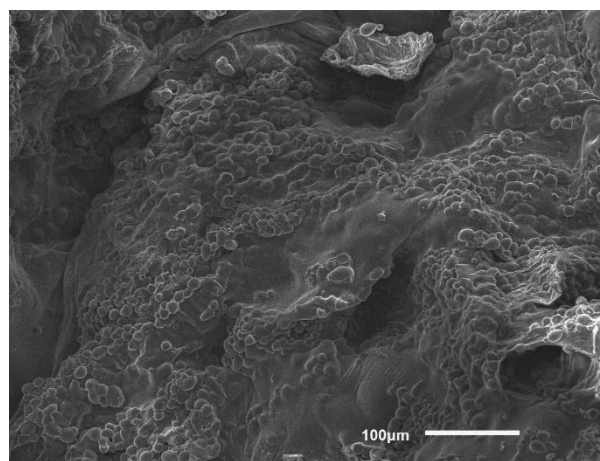
**Hình 6. Đường cong sấy sâm Bô Chính ở  $45^\circ\text{C}$ ,  $120 \text{ W}$  với các tỷ lệ gián đoạn khác nhau [9]**

Kết quả cho thấy chế độ phát sóng liên tục ( $A = 0$ ) không phải là chế độ tốt nhất. Cả ba chỉ tiêu đều đạt giá trị thuận lợi nhất tại  $A = 0,2$ :  $D_{\text{eff}}$  cao nhất, saponin còn lại cao nhất và độ lệch màu thấp nhất. Vượt qua  $A = 0,2$ , cả ba chỉ tiêu đều xấu đi nhanh, đặc biệt là saponin — chỉ còn 55,4 % tại  $A = 0,8$ , tức thấp hơn cả chế độ sấy bơm nhiệt không có siêu âm.

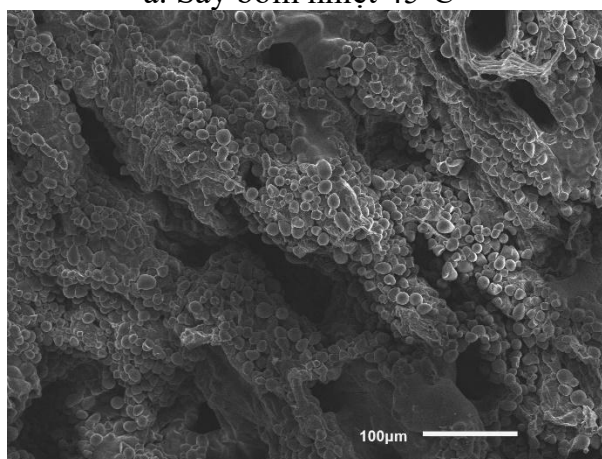
Diễn biến này được giải thích bằng hai tác động ngược chiều của thời gian ngắt sóng. Sóng siêu âm khi lan truyền trong vật liệu làm tăng nhiệt độ vật liệu do dao động cơ học; theo Colucci và cộng sự, mức gia tăng nằm trong khoảng  $1\text{--}10^\circ\text{C}$  tùy điều kiện sấy cụ thể [2]. Trong thời gian nghỉ, quá trình truyền năng lượng dừng lại, nhiệt tích lũy được giải phóng và ẩm bên trong vật liệu được tái phân bố; cả hai đều có lợi. Nhưng nếu thời gian nghỉ quá dài, tổng năng lượng sóng đưa vào giảm mạnh, thời gian sấy kéo dài trở lại và vật liệu tiếp xúc nhiệt lâu hơn, làm tổn thất saponin và biến đổi màu tăng lên.



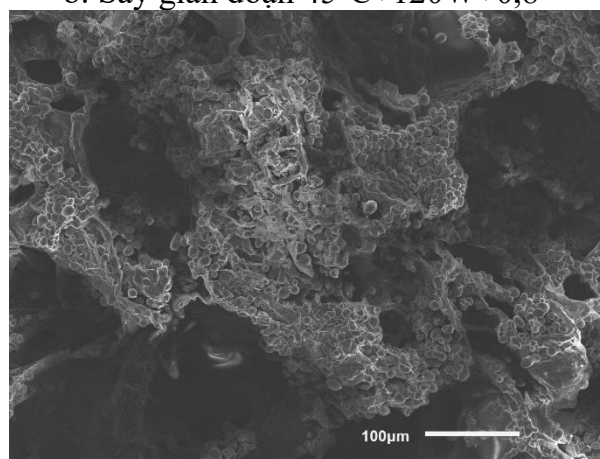
a. Sấy bơm nhiệt 45°C



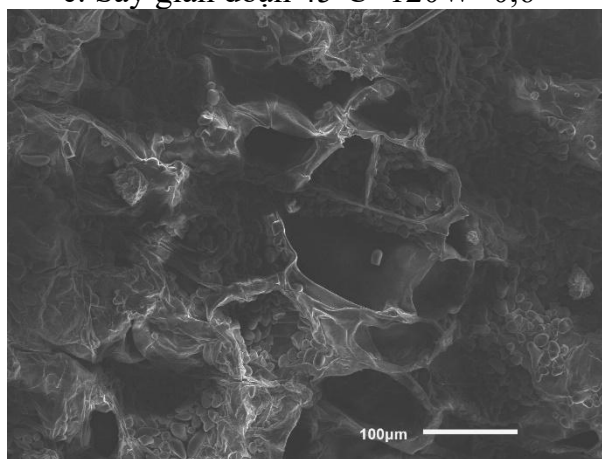
b. Sấy gián đoạn 45°C+120W+0,8



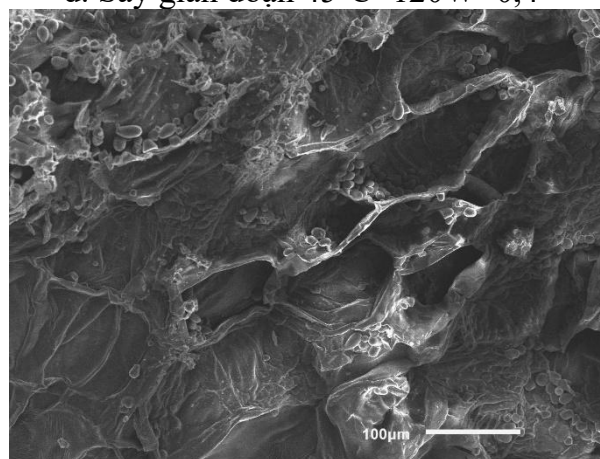
c. Sấy gián đoạn 45°C+120W+0,6



d. Sấy gián đoạn 45°C+120W+0,4



e. Sấy gián đoạn 45°C+120W+0,2



f. Sấy liên tục 45°C+120W+0

**Hình 7. Ảnh SEM sâp Bô Chính sau khi sấy ở các tỷ lệ gián đoạn khác nhau [9]**

Ảnh chụp bằng kính hiển vi điện tử quét độ phóng đại 200 lần (Hình 7) cùng có cách giải thích này: mẫu sấy bơm nhiệt thuần túy có bề mặt gần như không lỗ xốp, trong khi các mẫu có siêu âm hỗ trợ đều xuất hiện hệ vi kênh; mật độ và kích thước lỗ đạt giá trị lớn nhất tại  $A = 0,2$  [9]. Trên cơ sở đó, miền  $A = 0,0-0,4$  được chọn cho quy hoạch đa yếu tố.

#### 4.6. Tối ưu hóa đa mục tiêu thông số công nghệ

Sau khi thu hẹp miền khảo sát về  $40 \leq T \leq 50$  °C,  $80 \leq P \leq 160$  W và  $0 \leq A \leq 0,4$ , thực nghiệm đa yếu tố được tiến hành theo ma trận bậc II quy hoạch Box–Behnken gồm 15 thí nghiệm. Ba chỉ tiêu đầu ra được chọn đại diện cho tiêu chí kinh tế và tiêu chí kỹ thuật: chi phí điện năng riêng  $Ar$  (kWh/kg), hàm lượng saponin còn lại  $Sp$  (%) và độ lệch màu  $dE$ . Sau hai lần phân tích phương sai và loại các hệ số không bảo đảm độ tin cậy, thu được ba hàm hồi quy:

$$Ar = 30,9883 - 0,90325T - 0,0505P - 1,53542A + 0,00776667T^2 + 0,0005375TP + 0,000104167P^2 - 0,0096875PA + 7,60417A^2 \quad (12)$$

với  $R^2 = 0,9864$ .

$$Sp = -603,693 + 31,7698T - 0,123125P + 294,048A - 0,355692T^2 - 6,325TA + 0,615625PA - 285,433A^2 \quad (13)$$

với  $R^2 = 0,9553$ .

$$dE = 170,483 - 6,83975T - 0,428875P - 0,122917A + 0,0845667T^2 - 0,0010125TP + 0,00207292P^2 - 0,115313PA + 32,4792A^2 \quad (14)$$

với  $R^2 = 0,9990$ .

Miền áp dụng của cả ba hàm:  $40 \leq T \leq 50$  °C;  $80 \leq P \leq 160$  W;  $0 \leq A \leq 0,4$  [12].

Mức độ ảnh hưởng của các thông số khác nhau theo từng chỉ tiêu. Với  $dE$ , nhiệt độ tác nhân sấy ảnh hưởng mạnh nhất; với  $Sp$ , tỷ lệ gián đoạn  $A$  mới là yếu tố tác động mạnh nhất, tiếp đến là nhiệt độ [9]. Đáng chú ý, quan hệ giữa công suất và hàm lượng saponin đổi chiều theo tỷ lệ gián đoạn: tại  $A = 0$  là hàm nghịch biến, còn tại  $A = 0,4$  lại là hàm đồng biến [9]. Điều này cho thấy  $A$  không đơn thuần là biện pháp tiết kiệm năng lượng mà là thông số điều khiển cân bằng nhiệt của quá trình.

Giải bài toán tối ưu đa mục tiêu theo hướng  $Ar \rightarrow \min$ ,  $Sp \rightarrow \max$ ,  $dE \rightarrow \min$  bằng phần mềm Statgraphics 19, chế độ công nghệ phù hợp xác định được là  $T = 45,1$  °C;  $P = 122,7$  W;  $A = 0,18$ . Kiểm chứng bằng 3 mẻ thực nghiệm ở quy mô 4 kg/mẻ cho kết quả ở Bảng 7.

**Bảng 7. Đối chiếu giá trị dự đoán và thực nghiệm tại chế độ công nghệ phù hợp**

| Chỉ tiêu      | Giá trị dự đoán | Giá trị thực nghiệm | Sai lệch (%) |
|---------------|-----------------|---------------------|--------------|
| $Ar$ (kWh/kg) | 4,15            | 4,20                | 1,2          |
| $Sp$ (%)      | 96,4            | 89,9                | 6,7          |
| $dE$          | 5,51            | 5,76                | 4,5          |

Nguồn: [12]. Chế độ:  $T = 45,1$  °C;  $P = 122,7$  W;  $A = 0,18$ ; trung bình 3 mẻ.

Sai lệch dưới 7 % ở cả ba chỉ tiêu cho thấy mô hình đủ tin cậy để sử dụng trong thiết kế chế độ vận hành. Sai lệch lớn nhất rơi vào hàm lượng saponin, phù hợp với thực

tế rằng đây là chỉ tiêu có  $R^2$  thấp nhất trong ba hàm hồi quy và chịu ảnh hưởng của cả điều kiện bảo quản mẫu lẫn quy trình phân tích hóa học.

Đổi chiều chéo hai bộ hàm mục tiêu. Trên cùng bộ 15 thí nghiệm, công bố [9] đã giải bài toán tối ưu với bộ chỉ tiêu ( $D_{\text{eff}}$ , Sp, dE) thay cho (Ar, Sp, dE) và thu được chế độ  $T = 45,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 127,7\text{ W}$ ;  $A = 0,18$ . kết quả tính chéo trình bày ở Bảng 8.

**Bảng 8. Giá trị bốn chỉ tiêu tại hai chế độ công nghệ theo hai bộ hàm mục tiêu**

| Chỉ tiêu                                               | Chế độ theo (Ar, Sp, dE):<br>45,1 $^{\circ}\text{C}$ ; 122,7 W; A = 0,18 | Chế độ theo ( $D_{\text{eff}}$ , Sp, dE):<br>45,2 $^{\circ}\text{C}$ ; 127,7 W; A = 0,18 |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ar (kWh/kg)                                            | 4,152                                                                    | 4,129                                                                                    |
| Sp (%)                                                 | 96,47                                                                    | 96,26                                                                                    |
| dE                                                     | 5,486                                                                    | 5,671                                                                                    |
| $D_{\text{eff}} (\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s})$ | 5,188                                                                    | 5,239                                                                                    |

Hai chế độ chênh nhau 0,1  $^{\circ}\text{C}$  về nhiệt độ và 5 W về công suất, tức 0,2 % và 4,1 %, đều nằm trong sai số điều khiển của thiết bị. Kết quả tính chéo cho thấy không chế độ nào trội hoàn toàn: chế độ theo ( $D_{\text{eff}}$ , Sp, dE) cho chi phí điện năng riêng thấp hơn 0,6 % và hệ số khuếch tán ẩm cao hơn 1,0 %, đổi lại độ lệch màu cao hơn 3,4 % và hàm lượng saponin thấp hơn 0,2 %. Đây là đánh đổi thông thường của bài toán tối ưu đa mục tiêu khi thay đổi hàm mục tiêu, không phải mâu thuẫn số liệu. Khi vận hành, việc chọn chế độ nào phụ thuộc vào ưu tiên cụ thể: nếu ưu tiên màu sắc sản phẩm thì chọn chế độ thứ nhất, nếu ưu tiên năng suất và chi phí điện thì chọn chế độ thứ hai.

#### 4.7. So sánh hai loại dược liệu có cấu trúc khác nhau

Để đánh giá mức độ phổ quát của các quy luật nêu trên, phương pháp sấy đã được áp dụng cho rễ Đinh Lăng — loại dược liệu có cấu trúc và độ ẩm ban đầu khác hẳn sâm Bô Chính (Bảng 9).

**Bảng 9. Đặc trưng vật liệu và chế độ công nghệ phù hợp của hai loại dược liệu**

| Đặc trưng                                               | Sâm Bô Chính                     | Rễ Đinh Lăng                     |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Độ ẩm ban đầu $\omega_1$ (kg/kgVLK)                     | 4,56 ( $\approx 82\%$ cơ sở ướt) | 2,13 ( $\approx 68\%$ cơ sở ướt) |
| Khối lượng riêng thể tích khi tươi (kg/m <sup>3</sup> ) | 1090                             | 1305                             |
| Đặc điểm cấu trúc                                       | Củ mềm, xốp                      | Rễ hóa gỗ, cứng                  |
| Cấu hình thí nghiệm                                     | 1 khay, 1,5 kg/mẻ                | 3 khay, 4 kg/mẻ                  |
| Miền khảo sát công suất (W)                             | 80 – 160                         | 220 – 420                        |
| Nhiệt độ tác nhân sấy phù hợp T ( $^{\circ}\text{C}$ )  | 45,1                             | 44,7                             |
| Công suất sóng siêu âm phù hợp P (W)                    | 122,7                            | 325,8                            |

|                                                     |      |      |
|-----------------------------------------------------|------|------|
| Cường độ sóng danh nghĩa $I_U$ (kW/m <sup>2</sup> ) | 1,27 | 1,12 |
| Tỷ lệ gián đoạn phù hợp A                           | 0,18 | 0,18 |

Nguồn: [10] và [12]. Cường độ  $I_U$  tính theo (8) với diện tích phát xạ mỗi khay  $S_R = 3 \times (0,260 \times 0,124) = 0,0967 \text{ m}^2$  và ba khay  $S_R = 0,2902 \text{ m}^2$ .

#### • Thảo luận

Thứ nhất, chế độ công nghệ phù hợp của hai vật liệu rất gần nhau khi quy về cùng đơn vị. Nhiệt độ tác nhân sấy lệch 0,4 °C, cường độ sóng lệch 12 %, còn tỷ lệ gián đoạn trùng khớp ở  $A = 0,18$ . Sự hội tụ này cho thấy vùng công nghệ phù hợp của phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp siêu âm đối với nhóm dược liệu dạng củ và rễ là tương đối ổn định, ít nhạy với bản chất vật liệu trong phạm vi khảo sát.

Thứ hai, cường độ sóng phù hợp cho rễ Đinh Lăng thấp hơn sâm Bồ Chính. Kết quả này nhất quán với số liệu ở Bảng 9 [12]: rễ Đinh Lăng có khối lượng riêng lớn hơn 20 % và tỷ lệ mô gỗ cao, nên trở kháng âm lớn hơn, năng lượng sóng bị suy giảm nhiều hơn khi lan truyền, đồng thời phần năng lượng bị hấp thụ chuyển hóa thành nhiệt cũng lớn hơn. Tuy nhiên, dữ liệu hiện có chưa đủ để kết luận chắc chắn về cơ chế; cần đo trực tiếp vận tốc truyền sóng và hệ số suy giảm của từng vật liệu để kiểm chứng.

Thứ ba, thứ tự ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau giữa hai vật liệu. Với sâm Bồ Chính, nhiệt độ tác nhân sấy ảnh hưởng mạnh nhất đến hệ số khuếch tán ẩm [8]. Với rễ Đinh Lăng, tỷ lệ gián đoạn A lại là yếu tố tác động mạnh nhất đến hàm lượng saponin còn lại, tiếp đến mới là nhiệt độ [10]. Đáng chú ý, quan hệ giữa công suất phát sóng và hàm lượng saponin của rễ Đinh Lăng đổi dấu theo tỷ lệ gián đoạn: tại  $A = 0$  là quan hệ nghịch biến, còn tại  $A = 0,4$  lại là quan hệ đồng biến [10]. Điều này củng cố nhận định ở mục 4.5 rằng chế độ gián đoạn không đơn thuần là biện pháp tiết kiệm năng lượng, mà là thông số điều khiển cân bằng nhiệt của quá trình.

#### 4.8. Biến thiên hiệu quả hỗ trợ theo tiến trình sấy

Các mục trên đánh giá hiệu quả của sóng siêu âm qua các đại lượng tổng hợp cho cả mẻ sấy. Phân tích chi tiết đường cong sấy ở quy mô 4 kg/mẻ cho thấy hiệu quả này không phải hằng số mà giảm dần theo tiến trình tách ẩm (Bảng 10).

**Bảng 10. Thời gian đạt các mốc ẩm độ và mức rút ngắn tương ứng**

| $\omega$ (kg/kgVLK)     | HP (h) | HP+US (h) | Rút ngắn (%) | HP+US(A) (h) | Rút ngắn (%) |
|-------------------------|--------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 2,28 (50 % $\omega_0$ ) | 3,16   | 2,09      | 33,8         | 1,79         | 43,3         |
| 1,00                    | 5,94   | 4,14      | 30,3         | 3,59         | 39,6         |
| 0,50                    | 8,06   | 5,68      | 29,5         | 5,09         | 36,9         |
| 0,15 (kết thúc)         | 11,30  | 8,70      | 23,0         | 8,30         | 26,5         |

*Nguồn: tính từ số liệu gốc [12]. Điều kiện: sâm Bồ Chính;  $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 0,5\text{ m/s}$ ;  $4\text{ kg/m}^2 - 3\text{ khay}$ . HP — sấy bơm nhiệt; HP+US — kết hợp siêu âm liên tục  $320\text{ W}$ ; HP+US(A) — kết hợp siêu âm gián đoạn  $327,2\text{ W}$ ,  $A = 0,18$ .*

Ở nửa đầu quá trình, khi vật liệu còn nhiều ẩm tự do, sóng siêu âm rút ngắn thời gian tới 33,8 % ở chế độ liên tục và 43,3 % ở chế độ gián đoạn. Đến giai đoạn cuối, mức rút ngắn chỉ còn 23,0 % và 26,5 %.

Về mặt truyền nhiệt – truyền chất, hiện tượng này liên quan đến bản chất liên kết của ẩm. Sóng siêu âm tác động chủ yếu bằng cơ chế cơ học lên ẩm tự do và ẩm mao dẫn, trong khi ở vùng ẩm độ thấp phần ẩm còn lại chủ yếu là ẩm hấp phụ và ẩm liên kết hóa lý, đòi hỏi năng lượng tách cao hơn nhiều so với năng lượng mà trường âm cung cấp. Ngoài ra, sự co ngót của lát vật liệu ở giai đoạn cuối có thể làm thu hẹp các vi kênh đã hình thành. Số liệu hiện có chưa đủ để phân định giữa hai cơ chế này; cần bổ sung khảo sát đường đẳng nhiệt hấp phụ và ảnh SEM tại nhiều mốc ẩm độ trong cùng một mẻ sấy.

Kết quả này bổ sung cho nhận định về tính bão hòa ở mục 4.1 theo một chiều khác: ở đó tính bão hòa được xét theo công suất, còn ở đây theo thời gian. Cả hai cùng dẫn tới một hệ quả ứng dụng: thay vì duy trì công suất sóng siêu âm không đổi trong toàn mẻ, có thể áp dụng chế độ điều khiển công suất giảm dần hoặc ngắt sóng ở giai đoạn cuối, khi mức đóng góp của siêu âm vào tốc độ sấy đã suy giảm trong khi điện năng tiêu thụ của bộ phát sóng vẫn giữ nguyên.

## **5. Kết luận và hướng phát triển**

Từ việc tổng hợp và phân tích chuỗi kết quả thực nghiệm trên thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm quy mô pilot, có thể rút ra các kết luận sau.

Sóng siêu âm cải thiện rõ rệt động học quá trình sấy dược liệu ở nhiệt độ thấp. Ở  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , công suất  $120\text{ W}$  rút ngắn thời gian sấy sâm Bồ Chính 27,3 %, tăng hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng 32 % và nâng hàm lượng saponin còn lại từ 51,7 % lên 95,2 %.

Hiệu quả hỗ trợ của sóng siêu âm có tính bão hòa theo cả hai chiều. Theo công suất: mức rút ngắn thời gian sấy giảm từ 1,1 giờ ở bước 0–40 W xuống 0,2 giờ ở bước 120–160 W; vượt quá 120 W, chi phí nhiệt và tác động phá vỡ cấu trúc vi mô lấn át lợi ích về truyền ẩm. Theo thời gian: mức rút ngắn giảm từ 33,8–43,3 % ở nửa đầu quá trình xuống 23,0–26,5 % ở thời điểm kết thúc. Cả hai cùng dẫn tới khuyến nghị điều khiển công suất phát sóng thay đổi theo tiến trình sấy.

Năng lượng hoạt hóa của quá trình khuếch tán ẩm trong sâm Bồ Chính nằm trong khoảng 30,381–32,226 kJ/mol và giảm khi công suất sóng tăng, xác nhận về mặt định lượng cơ chế làm suy yếu liên kết ẩm của sóng siêu âm. Tuy nhiên xu hướng giảm không tuyến tính, chỉ rõ rệt từ mức 160 W, gợi ý sự tồn tại của một ngưỡng cường độ sóng cần được nghiên cứu riêng.

Chế độ phát sóng gián đoạn với tỷ lệ  $A = 0,18-0,2$  cho kết quả tốt hơn chế độ phát liên tục ở cả ba chỉ tiêu, nhờ hạn chế tích nhiệt trong vật liệu và tạo điều kiện tái phân bố ẩm trong thời gian nghỉ.

Bảng quy hoạch thực nghiệm Box–Behnken, chế độ công nghệ phù hợp cho sâm Bồ Chính xác định được là  $45,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $122,7\text{ W}$ ;  $A = 0,18$ , với sai lệch giữa dự đoán và kiểm chứng thực nghiệm dưới  $7\%$  ở cả ba chỉ tiêu. Khi thay bộ hàm mục tiêu (Ar, Sp, dE) bằng (Deff, Sp, dE), chế độ phù hợp dịch chuyển sang  $45,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $127,7\text{ W}$ ;  $A = 0,18$  — chênh lệch nằm trong sai số điều khiển của thiết bị, và không chế độ nào trội hoàn toàn trên cả bốn chỉ tiêu.

Chế độ công nghệ phù hợp của hai loại dược liệu có cấu trúc khác nhau hội tụ về cùng một vùng khi quy về cường độ sóng danh nghĩa:  $1,12-1,13\text{ kW/m}^2$ , nhiệt độ  $44,7-45,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  và tỷ lệ gián đoạn  $A = 0,18$ . Mức rút ngắn thời gian sấy đạt  $26,5\%$  với sâm Bồ Chính và  $25,4\%$  với rễ Đinh Lăng, chênh lệch nằm trong biên sai số thực nghiệm.

Hướng nghiên cứu tiếp theo nên tập trung vào bốn nội dung: xác định trực tiếp vận tốc truyền sóng và hệ số suy giảm của từng loại dược liệu để chuyển từ cường độ danh nghĩa sang cường độ âm thực; khảo sát ngưỡng cường độ sóng trên dải công suất rộng hơn nhằm làm rõ điểm chuyển của năng lượng hoạt hóa; xây dựng chế độ điều khiển công suất siêu âm thích nghi theo ẩm độ vật liệu thời gian thực; và đánh giá hiệu quả kinh tế – kỹ thuật khi vận hành đầy tải ba khay trong điều kiện sản xuất thực tế.

Giới hạn áp dụng. Các kết luận trên chỉ có giá trị trong phạm vi thực nghiệm đã khảo sát: vật liệu thái lát  $6 \pm 0,5\text{ mm}$ ;  $T = 35-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 0,5\text{ m/s}$ ;  $f = 28\text{ kHz}$ ;  $I_U$  đến  $1,65\text{ kW/m}^2$ . Hệ số  $D_{\text{eff}}$  được xác định với giả thiết truyền ẩm một chiều,  $D_{\text{eff}}$  không đổi theo ẩm độ và bỏ qua co ngót, nên mang ý nghĩa hệ số biểu kiến phục vụ tính toán thời gian sấy chứ không phải hệ số khuếch tán thuần vật lý.

## Lời cảm ơn

Các kết quả thực nghiệm được tổng hợp trong bài báo này thuộc đề tài mã số B2021-NLS-01 do Bộ Giáo dục và Đào tạo tài trợ, thực hiện tại Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo, Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng và các đồng tác giả của những công trình được trích dẫn.

## Tài liệu tham khảo

1. Ning X., Feng Y., Gong Y., Chen Y., Qin J., Wang D. (2019). Drying features of microwave and far-infrared combination drying on white ginseng slices. Food Science and Biotechnology, 28, 1065–1072.
2. Colucci D., Fissore D., Rossello C., Carcel J.A. (2018). On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant. Food Research International, 106, 580–588.

3. Szadzińska J., Łechtańska J., Kowalski S.J., Stasiak M. (2017). The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 531–539.
4. Kroehnke J., Szadzińska J., Stasiak M., Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R., Musielak G. (2018). Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots – Process kinetics and product's quality analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 249–258.
5. Yang Z., Yang Z., Yu F., Tao Z. (2020). Ultrasound-assisted heat pump intermittent drying of adzuki bean seeds: Drying characteristics and parameter optimization. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), e13501.
6. Zhang Y., Abatzoglou N. (2020). Review: Fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying. *Chemical Engineering Research and Design*, 154, 21–46.
7. Nguyễn Xuân Quang (2020). Nghiên cứu kỹ thuật sấy nông sản thực phẩm sử dụng sóng siêu âm. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh.
8. Nguyễn Hay, Lê Quang Huy, Lê Thanh Đạt, Lê Đình Trung, Trần Thị Ngọc Diệp (2023). Thực nghiệm xác định hệ số khuếch tán ẩm của sâm Bồ Chính trong thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng*, Tập 21, Số 1, tr. 33–37.
9. Nguyen H., Le Q.-H., Le T.-D., Pham V.-K. (2022). Experimental Research to Determine the Effect of Ultrasound in Drying Bo Chinh Ginseng by Ultrasound-Assisted Heat Pump Drying Method. *Applied Sciences*, 12(22), 11525.
10. Nguyễn Hay, Nguyễn Hữu Quyền, Lê Quang Huy, Đặng Thị Trúc Linh, Lê Thanh Đạt (2025). Nghiên cứu xác định chế độ sấy phù hợp cho rễ Đinh Lăng trên máy sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Tập 61, Số 5A.
11. Bộ Y tế (2017). Dược điển Việt Nam V. NXB Y học, Hà Nội.
12. Nguyễn Hay và cộng sự (2023). Nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp với sóng siêu âm dùng cho sấy dược liệu quy mô pilot. Báo cáo tổng kết đề tài B2021-NLS-01, Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh.
13. Crank J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*, 2nd edition. Oxford University Press.
14. Cuevas M., Martínez-Cartas M.L., Pérez-Villarejo L., Hernández L., García-Martín J.F., Sánchez S. (2019). Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. *Renewable Energy*, 132, 911–920.
15. Palacios T.R., Potes L.B., Montenegro R.A., Giner S.A. (2004). Peanut drying kinetics: determination of the effective diffusivity for in-shell and shelled peanuts by

applying a short-time analytical model to measured data. Proceedings of the 14th International Drying Symposium B, 1448–1455.