

THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH HỆ SỐ KHUẾCH TÁN ẨM CỦA SÂM BỒ CHÍNH TRONG THIẾT BỊ SẤY BƠM NHIỆT KẾT HỢP SÓNG SIÊU ÂM

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MOISTURE DIFFUSION COEFFICIENT OF BO CHINH GINSENG IN A HEAT PUMP DRYER COMBINED WITH ULTRASOUND WAVE

Nguyễn Hay¹, Lê Quang Huy^{2*}, Lê Thanh Đạt², Lê Đình Trung², Trần Thị Ngọc Diệp²

¹Trường Đại học Nông Lâm Tp. Hồ Chí Minh

²Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng

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

(Nhận bài: 10/10/2022; Chấp nhận đăng: 11/01/2023)

Tóm tắt - Hệ số khuếch tán ẩm là thông số đặc trưng cho tốc độ dịch chuyển ẩm của vật liệu trong quá trình sấy. Đây là thông số cần thiết để xác định thời gian sấy. Trong nghiên cứu này, trên cơ sở nghiệm của bài toán khuếch tán ẩm một chiều với điều kiện biên loại 3 đối xứng của Fick, nhóm tác giả sẽ trình bày phương pháp, thực nghiệm và kết quả xác định hệ số hệ số khuếch tán ẩm cũng như quan hệ hàm gần đúng $D_{\text{eff}} = f(t, P)$ của sâm Bồ Chính ở các mức nhiệt độ tác nhân sấy T là 40°C, 45°C, 50°C; mức công suất sóng siêu âm P là: 80, 120, 160W trong thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm. Kết quả nghiên cứu đã xây dựng được hàm gần đúng biểu diễn mối quan hệ của hệ số khuếch tán ẩm theo nhiệt độ tác nhân sấy, công suất sóng siêu âm: $D_{\text{eff}} = -7,53417 + 0,321167T + 0,0120625P - 0,0018T^2 + 0,0001375TP - 0,00004375P^2$ cũng như quan hệ của hệ số khuếch tán ẩm với năng lượng liên kết theo công thức Arrhenius của sâm Bồ Chính.

Từ khóa - Bơm nhiệt; sóng siêu âm; công suất; hệ số khuếch tán ẩm; sâm Bồ Chính

1. Đặt vấn đề

Với sự phong phú về hàm lượng dinh dưỡng và các hoạt chất sinh học, cây sâm Bồ Chính (*Abelmoschus sagittifolius*) được đánh giá là một vị thuốc quý. Các kết quả nghiên cứu của y học hiện đại cho thấy sâm Bồ Chính có dược tính rất cao, tương đương với nhân sâm Hàn Quốc và chỉ sau dược tính của sâm Ngọc Linh. Vì vậy nhu cầu sấy khô để bảo toàn chất lượng sản phẩm với chi phí sấy hợp lý là rất cần thiết.

Sấy là quá trình làm khô vật liệu, trong quá trình sấy, ẩm từ trong lòng vật liệu sẽ di chuyển ra bề mặt và từ bề mặt bay hơi vào môi trường. Quá trình sấy gồm 3 giai đoạn: Giai đoạn đốt nóng vật, giai đoạn tốc độ sấy không đổi và giai đoạn tốc độ sấy giảm dần. Ở giai đoạn đốt nóng vật, nhiệt độ vật liệu sấy tăng rất nhanh nhưng độ ẩm trung bình của vật giảm không đáng kể, ở giai đoạn tốc độ sấy không đổi, nhiệt độ ở tâm và ở bề mặt vật liệu nói riêng đạt đến một giá trị nhất định xấp xỉ nhiệt độ nhiệt kế ướt, trong giai đoạn này chủ yếu làm bay hơi nước tự do trong vật liệu. Vì vậy, trong hai giai đoạn đầu, với tất cả các vật liệu ẩm là gần như nhau [1]. Đến giai đoạn cuối tốc độ sấy giảm dần, ẩm bay hơi là ẩm liên kết, do đó phụ thuộc dạng liên kết ẩm mà tốc độ sấy có thể giảm khác nhau.

Hệ số khuếch tán ẩm (D_{eff}) là một chỉ số quan trọng trong quá trình sấy, có ý nghĩa lớn để ước tính thời gian

Abstract - The moisture diffusion coefficient is a characteristic parameter for the moisture displacement rate of the material during the drying process. This parameter is required to determine the drying time. In this study, based on the solution of one-dimensional moisture diffusion problem with Fick's symmetric type 3 boundary condition, we present experiment method and results of determining the moisture diffusion coefficient as well as the approximation relationship function $D_{\text{eff}} = f(T, P)$ of Bo chinh Ginseng at drying temperatures $t = 40^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$; Ultrasound power levels $P = 80\text{W}, 120\text{W}, 160\text{W}$ in the heat pump dryer combined with ultrasound. The research results showed the relationship between the moisture diffusion coefficient according to the drying temperature and ultrasound power: $D_{\text{eff}} = -7.53417 + 0.321167T + 0.0120625P - 0.0018T^2 + 0.0001375TP - 0.00004375P^2$ as well as the relationship of moisture diffusion coefficient with binding energy according to Arrhenius formula of Bo Chinh ginseng.

Key words - Heat pump; ultrasound; power; moisture diffusion coefficient; Bo Chinh ginseng

sấy trong giai đoạn tốc độ giảm [2]. Đã có nhiều công trình nghiên cứu về hệ số khuếch tán ẩm và mô hình truyền ẩm đã được công bố như lúa mì [3], ca cao [4], cà chua [5], cà rốt [6], khoai tây, tỏi và dưa đỏ [7], Đẳng sâm [8], hạt đậu [9],... Tuy nhiên, chưa có công trình nghiên cứu nào về sâm Bồ Chính, do đó trong bài báo này nhóm tác giả sẽ trình bày về phương pháp lý thuyết, thực nghiệm và kết quả xác định hệ số khuếch tán ẩm D_{eff} cũng như hàm quan hệ gần đúng $D_{\text{eff}} = f(T, P)$ của sâm Bồ Chính.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu và thiết bị thí nghiệm

2.1.1. Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu sấy là sâm Bồ Chính tươi được trồng tại huyện Đức Huệ, tỉnh Long An bởi công ty Hoàng Ngọc Global. Sâm được thu hoạch sau 12 tháng tuổi, đường kính của củ từ 25-30 mm. Sau khi rửa sạch, để ráo nước, các mẫu vật liệu sấy được bảo quản trong túi chân không kín ở điều kiện $8 \pm 0,5^\circ\text{C}$ trong tủ mát khoảng 3 - 5 ngày để ẩm độ phân bố đồng đều trên toàn bộ thể tích mẫu vật liệu thực nghiệm.

Độ dày của các lát sâm đồng đều và hạn chế sai số, vật liệu sấy được thái lát bằng máy thái lát thực phẩm thương hiệu Ritter (Model: RITTER E16 515000, xuất xứ Đức) với độ dày 6mm. Trước khi tiến hành thực nghiệm, các mẫu sâm được làm ẩm cho tới khi đạt nhiệt độ môi

¹ Nong Lam University – Ho Chi Minh City (Nguyen Hay)

² Cao Thang Technical College (Le Quang Huy, Le Thanh Dat, Le Dinh Trung, Tran Thi Ngọc Diệp)

trường thí nghiệm rồi cho vào buồng sấy.

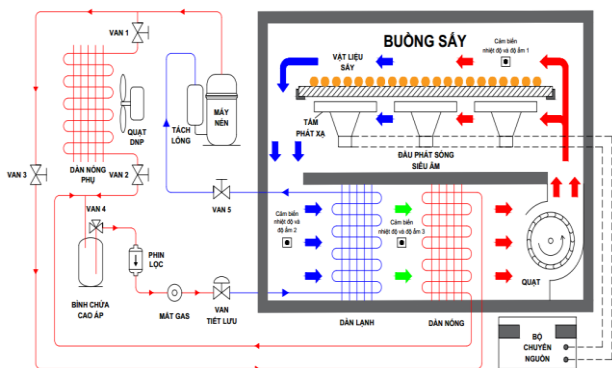
Âm độ ban đầu của vật liệu được xác định bằng cân sấy ẩm hồng ngoại thương hiệu Kett (Model: FD-720, xuất xứ Nhật), thực nghiệm 5 lần cân cho 5 mẫu ngẫu nhiên rồi lấy giá trị trung bình, kết quả xác định được ẩm độ của sản phẩm: $\omega_1 \approx 4,56 \text{ kg/kg}_{\text{vlk}}$

Âm độ sản phẩm được xác định theo tiêu chuẩn chất lượng của Dược điển Việt Nam V: $\omega_2 \approx 0,15 \text{ kg/kg}_{\text{vlk}}$

Trong quá trình sấy, ẩm độ trung bình của vật liệu được ghi lại liên tục nhờ hệ thống giám sát tự động thông qua cảm biến khối lượng Loadcell thương hiệu CAS (Model: BCL-20L, xuất xứ Hàn Quốc) đặt trong buồng sấy, tín hiệu được xử lý và lưu trữ lại bằng PLC thương hiệu Wecon (Model: LX3V-1212MT-A, xuất xứ Trung Quốc).

2.1.2. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm được sử dụng trong thí nghiệm là sản phẩm do nhóm tác giả tự thiết kế, chế tạo. Sơ đồ nguyên lý thiết bị sấy được thể hiện ở Hình 1 và mô hình thiết bị sấy thực tế thể hiện ở Hình 2.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống sấy



Hình 2. Thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm

Thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm cấu tạo gồm 3 thành phần: Hệ thống bơm nhiệt, hệ thống sấy đối lưu và hệ thống siêu âm. Hệ thống bơm nhiệt sử dụng môi chất lạnh R22 bao gồm máy nén thương hiệu Tecumseh với công suất động cơ 400W (Model: AE4460E, xuất xứ Pháp), dàn lạnh, dàn nóng chính, dàn nóng phụ, van tiết lưu,... với mục đích tách ẩm và gia nhiệt tác nhân sấy đến nhiệt độ yêu cầu. Hệ thống sấy hồi lưu toàn phần bao gồm buồng sấy, động cơ quạt, cảm biến nhiệt độ ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) độ ẩm ($\pm 3\%$), cảm biến vận tốc không khí ($0-10\text{m/s}$, $\pm 0,1 \text{ m/s}$), cảm biến khối lượng ($0-20\text{kg}$, $\pm 0,1\text{kg}$). Hệ thống siêu âm bao gồm máy phát siêu âm (Model: KMD-M4,

xuất xứ Trung Quốc), đầu phát sóng siêu âm, tấm phát xạ,... Ngoài ra, thiết bị sấy sử dụng PLC kết hợp với màn hình giám sát điều khiển HMI, biến tần và các cảm biến tín hiệu để cài đặt điều khiển các thông số nhiệt độ sấy, vận tốc tác nhân sấy, thời gian sấy, công suất sóng siêu âm,...

2.2. Phương pháp

2.2.1. Hệ số khuếch tán ẩm

Hệ số khuếch tán ẩm D_{eff} được xác định dựa trên nghiệm giải tích gần đúng của bài toán khuếch tán ẩm 1 chiều trong nửa tấm phẳng có chiều dày $2L$ [10].

Xét quá trình truyền ẩm với các giả thiết:

- Quá trình truyền ẩm là 1 chiều.
- Bỏ qua ảnh hưởng truyền nhiệt đến quá trình truyền ẩm.
- Nhiệt độ của vật liệu không thay đổi trong suốt quá trình.

Theo định luật thứ 2 của Fick, phương trình vi phân truyền ẩm trong nửa vách phẳng có chiều dày $2L$, với điều kiện biên loại 3 đối xứng với các giả thiết trên là:

$$\frac{\partial M_k(x, \tau)}{\partial \tau} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 M_k(x, \tau)}{\partial x^2}; 0 \leq x \leq L, \tau > 0 \quad (1)$$

Với điều kiện đơn trị:

$$\tau = 0 \quad M_k(x, 0) = M_{k0} = \text{const} \quad (2)$$

$$\tau > 0 \quad -D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial M(L, \tau)}{\partial x} \right) = h_m (M_k - M_{k0}) \quad (3)$$

$$\tau > 0 \quad \left(\frac{\partial M_k(0, \tau)}{\partial x} \right) = 0 \quad (4)$$

Và nghiệm giải tích gần đúng của phương trình (1) với các điều kiện (2), (3), (4) như sau:

$$MR = \frac{M_{kt} - M_{ke}}{M_{k0} - M_{ke}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} \tau}{4L^2}\right) \quad (5)$$

Trong đó, M_k là độ ẩm của vật liệu (% , $\text{kg/kg}_{\text{vlk}}$). M_{k0} là độ ẩm cân bằng của vật liệu (% , $\text{kg/kg}_{\text{vlk}}$). D_{eff} là hệ số khuếch tán ẩm (m^2/s). h_m là hệ số dẫn ẩm (m/s). L là nửa độ dày của mẫu (m). τ là thời gian (s) và n là số nguyên dương. Phương trình (5) này có thể được đơn giản hóa bằng cách lấy số hạng đầu tiên của nghiệm chuỗi:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} \tau}{4L^2}\right) \quad (6)$$

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} \tau}{4L^2} \quad (7)$$

Từ giá trị MR theo thời gian, sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất cho phương trình (7) tìm được các giá trị D_{eff} .

2.2.2. Năng lượng liên kết

D_{eff} là một hằng số phụ thuộc vào nhiệt độ và được biểu diễn theo mô hình của Arrhenius [11] như sau:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_k T}\right) \quad (8)$$

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

Phương trình (8) có thể đưa về dạng tuyến tính bằng cách lấy logarit

$$\ln D_{eff} = -\frac{E_a}{R_k T} + \ln D_0 \quad (9)$$

Từ giá trị D_{eff} theo nhiệt độ tìm được ở trên, sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất cho phương trình (9) tìm được các giá trị D_0 , E_a .

3. Nội dung và kết quả thực nghiệm

3.1. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

Để xác định hệ số khuếch tán âm D_{eff} của sâm Bồ Chính, kế thừa các kết quả nghiên cứu trước [12], nhóm tác giả thực nghiệm quá trình sấy ở các mức nhiệt độ tác nhân sấy t là 40, 45, 50°C, mức công suất sóng siêu âm P là: 80, 120, 160W. Thí nghiệm được tiến hành theo quy hoạch thực nghiệm bậc II dạng bất biến quay với số lượng thí nghiệm được xác định theo công thức sau:

$$N = 2^k + 2k + n_0 = 2^2 + 2.2 + 1 = 9 \quad (10)$$

Với mỗi lần sấy, sâm tươi thái lát với chiều dày $6 \pm 0,5\text{mm}$ được xếp đều trên khay với khối lượng 1,5kg/mẻ. Tác nhân sấy chuyển động song song với bề mặt khay với vận tốc 0,5m/s.

3.2. Kết quả

3.2.1. Hệ số khuếch tán âm D_{eff}

Từ số liệu thực nghiệm, sử dụng các công thức (6), (7) và phương pháp bình phương nhỏ nhất cùng phần mềm Excel, ta được bảng số liệu trung bình hệ số khuếch tán âm D_{eff} của sâm Bồ Chính trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị thực nghiệm hệ số khuếch tán âm D_{eff}

STT	T(°C)	P(W)	D_{eff} ($\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)
1	40	80	3,60
2	40	120	3,87
3	40	160	4,12
4	45	80	4,39
5	45	120	4,87
6	45	160	5,10
7	50	80	5,28
8	50	120	5,67
9	50	160	5,91

Từ các kết quả thực nghiệm trên, sử dụng phần mềm chuyên dụng Statgraphics 19 để tiến hành phân tích phương sai, phân tích hồi quy, đã tìm được quan hệ hàm gần đúng $D_{eff} = f(T, P)$ đảm bảo độ tin cậy.

Hệ số khuếch tán âm sâm Bồ Chính D_{eff} (m^2/s)

$$D_{eff} = -7,53417 + 0,321167T + 0,0120625P - 0,0018T^2 + 0,0001375TP - 0,00004375P^2 \quad (R^2 = 0,9980) \quad (11)$$

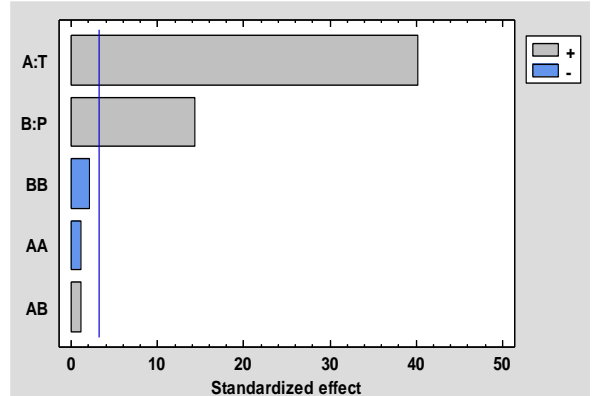
$$\text{Hàm điều kiện: } \begin{cases} 40 \leq t \leq 50(^\circ\text{C}) \\ 80 \leq P \leq 160(\text{W}) \end{cases}$$

Đồ thị ảnh hưởng của các hệ số hồi quy và ảnh hưởng của nhiệt độ, công suất đến hệ số khuếch tán âm được thể hiện ở Hình 3, 4.

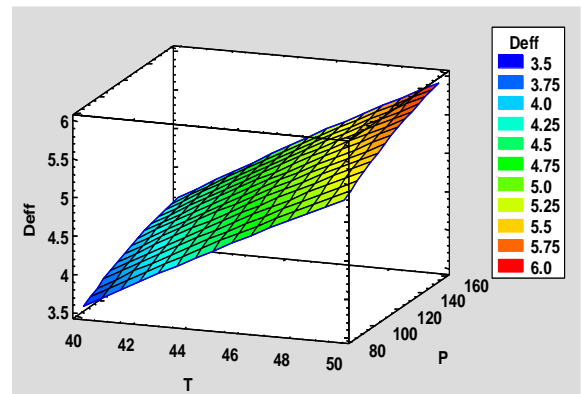
Căn cứ vào hàm hồi quy (11) và đồ thị Hình 3, 4, ta thấy:

- Hệ số khuếch tán âm D_{eff} chịu ảnh hưởng bậc 1, bậc 2 bởi nhiệt độ tác nhân sấy T , công suất sóng siêu âm P và chịu ảnh hưởng đồng thời của cặp thông số nhiệt độ, công suất. Mức độ và thứ tự ảnh hưởng các thông số trình bày trên Hình 3.

- Trong vùng khảo nghiệm, nhiệt độ ảnh hưởng mạnh nhất đến hệ số khuếch tán âm D_{eff} , nhiệt độ t tăng thì hệ số khuếch tán âm D_{eff} tăng. Mức độ ảnh hưởng tiếp theo là công suất sóng siêu âm P , khi công suất tăng thì D_{eff} cũng tăng.



Hình 3. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến hệ số khuếch tán âm D_{eff}



Hình 4. Ảnh hưởng nhiệt độ, công suất đến hệ số khuếch tán âm D_{eff}

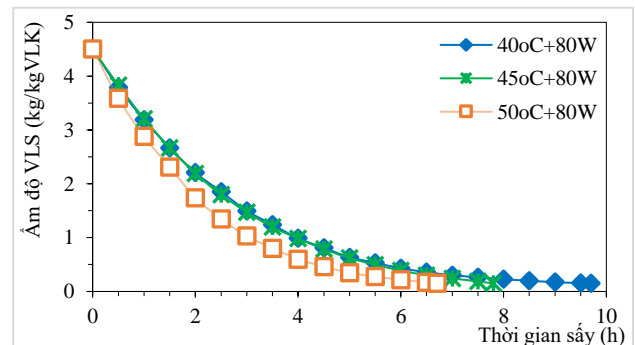
3.2.2. Năng lượng liên kết E_a :

Từ giá trị hệ số khuếch tán âm D_{eff} thực nghiệm theo nhiệt độ, công suất sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất và phần mềm Excel ta tìm được hệ số E_a , hệ số D_0 theo công thức của Arrhenius.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_k T}\right) \quad (12)$$

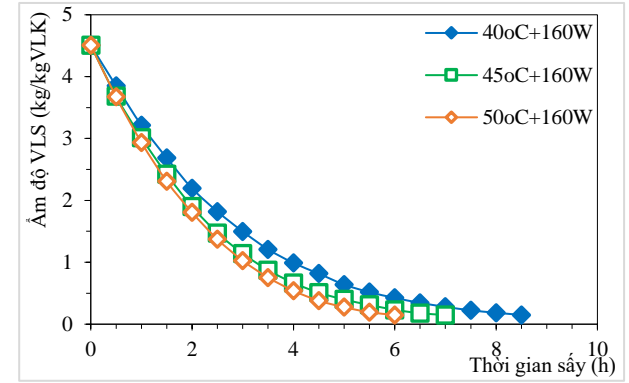
- **Năng lượng liên kết ở công suất $P = 80\text{W}$**

Đường cong sấy tại công suất 80W ở mức nhiệt độ 40-45-50°C được thể hiện ở Hình 5, mối quan hệ giữa E_a và D_{eff} được biểu diễn bằng đồ thị Hình 6.

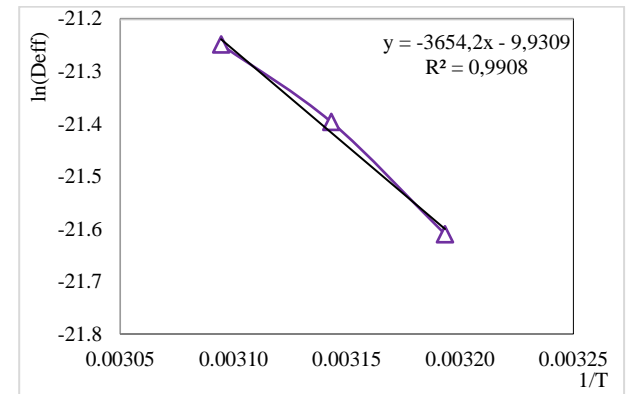


Hình 5. Đồ thị đường cong sấy ở công suất 80W

40-45-50°C được thể hiện ở Hình 9, mối quan hệ giữa E_a và D_{eff} được biểu diễn bằng đồ thị Hình 10.



Hình 9. Đồ thị đường cong sấy ở công suất 160W

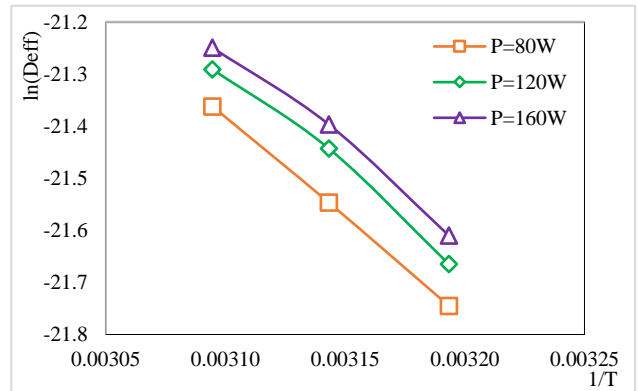


Hình 10. Đồ thị quan hệ E_a và D_{eff} tại $P=160W$

Phương trình mối quan hệ E_a và D_{eff} :

$$D_{eff} = 4,865 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{30,381}{R_k T}\right) \quad (15)$$

Vậy $D_o = 4,865 \times 10^{-5}$; $E_a = 30,381$ kJ/mol.

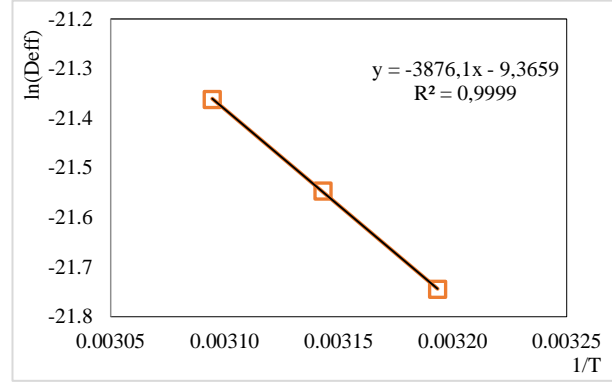


Hình 11. Đồ thị quan hệ E_a và D_{eff} các mức công suất sóng siêu âm khác nhau

Bảng 2. Giá trị E_a , D_o phụ thuộc vào công suất sóng siêu âm

P (W)	80	120	160
E_a (kJ/mol)	32,226	32,165	30,381
D_o (m ² /s)	$8,559 \times 10^{-5}$	$9,084 \times 10^{-5}$	$4,865 \times 10^{-5}$

Căn cứ vào đồ thị Hình 11 và Bảng 2, ta thấy trong khoảng nhiệt độ từ 40-50°C, năng lượng kích hoạt E_a xảy sầm Bổ Chính khi có sóng siêu âm hỗ trợ sấy là 30,381 - 32,226 kJ/mol, khi công suất sóng siêu âm tăng thì năng



Hình 6. Đồ thị quan hệ E_a và D_{eff} tại $P=80W$

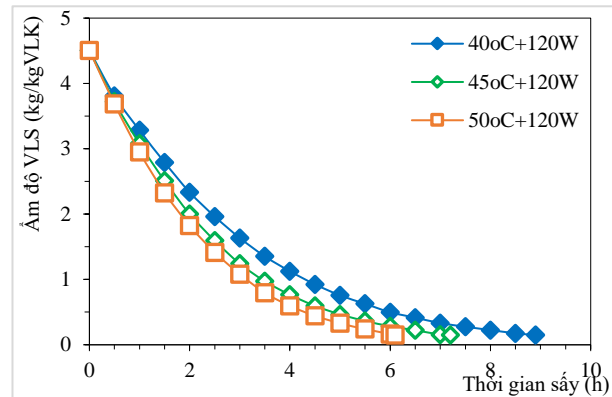
Phương trình mối quan hệ E_a và D_{eff} :

$$D_{eff} = 8,559 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{32,226}{R_k T}\right) \quad (13)$$

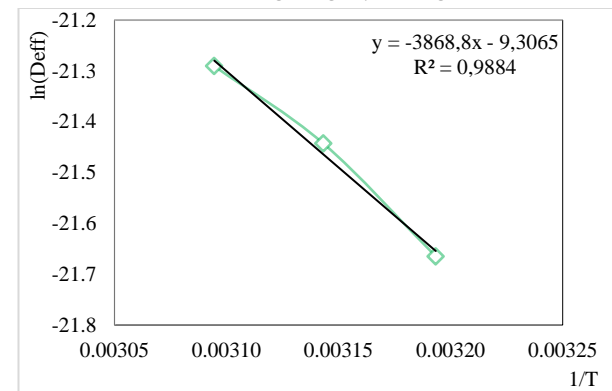
Vậy $D_o = 8,559 \times 10^{-5}$; $E_a = 32,226$ kJ/mol.

• **Năng lượng liên kết ở công suất P = 120W**

Đường cong sấy tại công suất 120W ở mức nhiệt độ 40-45-50°C được thể hiện ở Hình 7, mối quan hệ giữa E_a và D_{eff} được biểu diễn bằng đồ thị Hình 8.



Hình 7. Đồ thị đường cong sấy ở công suất 120W



Hình 8. Đồ thị quan hệ E_a và D_{eff} tại $P=120W$

Phương trình mối quan hệ E_a và D_{eff} :

$$D_{eff} = 9,084 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{32,165}{R_k T}\right) \quad (14)$$

Vậy $D_o = 9,084 \times 10^{-5}$; $E_a = 32,165$ kJ/mol.

• **Năng lượng liên kết ở công suất P = 160W**

Đường cong sấy tại công suất 160W ở mức nhiệt độ

lượng kích hoạt có xu hướng giảm. Điều này có thể do dao động cơ học của sóng siêu âm trong hỗ trợ sấy làm cho liên kết phân tử giữa vật liệu cấu thành nên sẫm Bó Chính và các phân tử nước yếu hơn, khi công suất siêu âm tăng thì hiệu quả càng rõ rệt, vì vậy năng lượng cần thiết để tách ẩm ra khỏi vật liệu sẽ ít hơn.

4. Kết luận

Hệ số khuếch tán ẩm và năng lượng cần thiết cho quá trình khuếch tán ẩm trong sẫm Bó Chính theo mô hình Arrhenius của quá trình sấy theo nguyên lý bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm đã được xác định. Đây là các yếu tố quan trọng khi phân tích đánh giá quá trình bốc hơi ẩm trong vật liệu sấy.

Qua các thực nghiệm và tính toán, nhóm tác giả đã đưa ra đường cong sấy và hàm biểu diễn mối quan hệ của hệ số khuếch tán ẩm D_{eff} theo nhiệt độ tác nhân sấy, công suất sóng siêu âm cũng như quan hệ của hệ số khuếch tán ẩm với năng lượng liên kết của sẫm Bó Chính như sau:

$$D_{\text{eff}} = -7,53417 + 0,321167T + 0,0120625P - 0,0018T^2 + 0,0001375TP - 0,00004375P^2 \quad (R^2 = 0,9980)$$

$$\text{Hàm điều kiện: } \begin{cases} 40 \leq t \leq 50(^{\circ}\text{C}) \\ 80 \leq P \leq 160(\text{W}) \end{cases}$$

Phương trình năng lượng liên kết dựa trên công thức Arrhenius:

$$P = 80\text{W: } D_{\text{eff}} = 8,559 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{32,226}{R_k T}\right)$$

$$P = 120\text{W: } D_{\text{eff}} = 9,084 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{32,165}{R_k T}\right)$$

$$P = 160\text{W: } D_{\text{eff}} = 4,865 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{30,381}{R_k T}\right)$$

Lời cảm ơn: Nghiên cứu được thực hiện bởi sự tài trợ kinh phí từ Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam (B2021-NLS-01). Nhóm tác giả chân thành cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam và Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Văn Phú. *Kỹ thuật Sấy*. NXB Giáo Dục Hà Nội, 2008.
- [2] Cuevas, M., Martinezcartas, M. L., Perezvillarejo, L., Hernandez, L., GarciaMartin, J. F., & Sanchez, S. "Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning". *Renewable Energy*, 132, 2019, 911–920.
- [3] Shahin Rafiee, Alireza Keyhani, and Ali Jafari. "Modeling Effective Moisture Diffusivity of Wheat (Tajan) During Air Drying". *International Journal of Food Properties*, 11, 2008, 223 – 232.
- [4] C.L. Hii, C.L. Law, M. Cloke. "Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa". *Journal of Food Engineering* 90, 2009, 191 –198.
- [5] Amin Taheri - Garavand, Shahin. Rafiee, Alireza Keyhani. "Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy of Tomato in Thin Layer Dryer during Hot Air Drying". *International Transaction Journal of Engineering*. Vol.2 No.2, 2011, 239 – 248.
- [6] Chen, Q., Bi, J., Chen, R., Liu, X., Wu, X., & Zhou, M. "Comparative study on drying characteristic, moisture diffusivity, and some physical and nutritional attributes of blanched carrot slices". *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13201, 2017.
- [7] Kaveh, M., Sharabiani, V. R., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad, E., Abbaspour-Gilaneh, Y., & Golpour, I. "ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer". *Information Processing in Agriculture*, 5(3), 2018, 372–387.
- [8] Xuan-Quang Nguyen, Anh-Duc Le, Ngoc-Phuong Nguyen and Hay Nguyen, "Thermal Diffusivity, Moisture Diffusivity, and Color Change of *Codonopsis javanica* with the Support of the Ultrasound for Drying", *Journal of Food Quality*, Volume 2019, Article ID 2623404, 13 pages.
- [9] Zongyu Yang, Zhao Yang, Fei Yu, Zhichao Tao. "Ultrasound-assisted heat pump intermittent drying of adzuki bean seeds: Drying characteristics and parameter optimization". *Journal of Food Processing Engineering* 43(10), 2020, 1-13.
- [10] J. Crank. *The Mathematics of Diffusion*, second edition. Oxford University Press, 1975.
- [11] Palacios, T. R., L. B. Potes, R. A. Montenegro and S. A. Giner. "Peanut drying kinetics: determination of the effective diffusivity for in-shell and shelled peanuts by applying a short-time analytical model to measured data". *Proceeding of the 14th International Drying Symposium B*, 2004, 1448-1455.
- [12] Nguyễn Hay, Lê Quang Huy, Lê Thanh Đạt, Ngô Thị Minh Hiếu. "Nghiên cứu thực nghiệm xác định chế độ sấy thích hợp trong thiết bị sấy sẫm bó chính bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm". *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn* kỳ 2, 12/2021, 92 – 99.