

NGHIÊN CỨU ĐỘNG HỌC QUÁ TRÌNH SẤY SÂM ĐƯƠNG QUY

LÊ THỊ BÍCH NGUYỆT, PHẠM QUANG PHÚ*, TRẦN VIỆT HÙNG,
NGUYỄN HOÀNG KHÔI

Khoa Công Nghệ Nhiệt Lạnh, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

* Tác giả liên hệ: phamquangphu@iuh.edu.vn

DOIs: <https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v76i4.5534>

Tóm tắt. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy lên động học sấy sâm đương quy được nghiên cứu bằng phương pháp thực nghiệm sấy đối lưu, trong đó tác nhân sấy là không khí đã được gia nhiệt. Kết quả cho thấy đường cong sấy phù hợp với các mô hình toán của Wang & Singh và mô hình Logarithmic mô tả động học quá trình sấy. Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng có giá trị lần lượt là $4,56.10^{-11}$, $6,85.10^{-11}$ và $9,13.10^{-11}$ m²/s tương ứng với các mức nhiệt độ sấy 40, 50 và 60°C. Giá trị năng lượng hoạt hóa của các lát cắt sâm đương quy cũng được xác định là 30,1 kJ/mol dựa theo phương trình Arrhenius.

Từ khóa. Sâm đương quy, sấy đối lưu, động học sấy, hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng

1 GIỚI THIỆU

Đương quy (*Angelica sinensis*) là loại thảo dược phổ biến trong y học truyền thống phương Đông. Sâm đương quy chứa nhiều loại axit hữu cơ, tinh dầu, polysaccharides có hoạt tính chống oxy hóa, chống viêm và điều hòa miễn dịch [1]. Ngày nay, thực phẩm chức năng từ đương quy được sử dụng rộng rãi bổ sung vào chế độ dinh dưỡng hàng ngày [2]. Tuy nhiên, hàm lượng ẩm cao trong đương quy tươi là một trong những điều kiện thúc đẩy sự tăng cường của phản ứng enzyme và phi enzyme, làm giảm chất lượng cảm quan, giá trị dinh dưỡng, dược tính và giá trị thương mại của sản phẩm [3]. Vì vậy, việc sử dụng sản phẩm đương quy sấy khô là một trong những phương án nhằm đảm bảo nguồn cung cấp sâm chất lượng cao cho tiêu dùng và sản xuất.

Sấy là một trong số các phương pháp thông dụng giúp bảo quản thực phẩm và dược phẩm. Sâm đương quy được sấy với nhiều phương pháp khác nhau, phổ biến như sấy ở nhiệt độ không khí môi trường, sấy bằng không khí được gia nhiệt, sấy vi sóng, và sấy trong môi trường chân không. Mỗi phương pháp có những ưu điểm và hạn chế nhất định. Phương pháp sấy bằng không khí được gia nhiệt là phương pháp được sử dụng rộng rãi nhất hiện nay, do các thiết bị gia nhiệt không khí đơn giản hơn. Trong khi đó việc nghiên cứu động học của quá trình sấy là công cụ hữu ích trong kiểm soát và tối ưu hóa quy trình sấy đạt hiệu quả cao [4].

Nghiên cứu trình bày trong bài báo này hướng đến mục tiêu xác định ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến thời gian sấy, tốc độ sấy, hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng và năng lượng hoạt hóa của quá trình sấy sâm đương quy bằng phương pháp sấy không khí nóng, nhằm xây dựng cơ sở cho việc nghiên cứu chuyên sâu về quá trình sấy sâm đương quy nói riêng, cũng như các loại vật liệu dùng làm dược phẩm nói chung. Nghiên cứu này cũng đánh giá sự phù hợp của các mô hình toán học mô tả quá trình sấy sâm đương quy, đồng thời thực hiện tính toán hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng và năng lượng hoạt hóa của mẫu sấy, từ đó làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo bằng các phương pháp sấy sâm đương quy khác nhau.

2 VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1 Vật liệu sấy

Sâm đương quy có nguồn gốc từ Đà Lạt, được vận chuyển về Thành phố Hồ Chí Minh. Tại phòng thí nghiệm sâm đương quy được đóng gói cẩn thận và bảo quản trong ngăn mát tủ lạnh ở nhiệt độ 2 – 4°C. Sâm trước khi làm thí nghiệm sẽ được kiểm tra kỹ càng, rửa bằng nước sạch, các rễ nhỏ và đất cát sẽ được loại bỏ. Sau đó sử dụng giấy thấm để làm khô bề mặt sâm sau khi rửa. Sâm đương quy sau khi được vệ sinh sạch sẽ sẽ được cắt bằng một khuôn cắt với độ dày 3 mm. Khi khuôn được dập xuống sản phẩm sẽ chia đều thành những miếng mỏng có độ dày bằng nhau. Độ ẩm ban đầu của sâm được xác định bằng cân phân tích ẩm Kern (DAB 100-3, Germany).

2.2 Thiết bị và thiết kế thí nghiệm

Thực nghiệm được tiến hành với tủ sấy BINDER (Binder, FD 260, Tuttlingen, Germany, 2022). Kích thước tổng thể của tủ sấy 962 x 813 mm. Không khí được gia nhiệt bằng điện trở và nhiệt độ buồng sấy được lựa chọn ở ba mức 40°C, 50°C, 60°C, được điều chỉnh tự động thông qua thiết bị điều khiển tích hợp trong tủ sấy và được theo dõi bằng đồng hồ đo nhiệt độ. Sâm đương quy được xếp đều một lớp trên khay, khối lượng mỗi mẻ sấy khoảng 50 g, mật độ bố trí sâm đương quy trên khay đạt 2 kg/m². Sự thay đổi khối lượng vật liệu sấy được ghi nhận 30 phút/lần cho đến khi vật liệu sấy đạt đến độ ẩm yêu cầu (độ ẩm yêu cầu ≤ 14% theo QCVN 17:2015:BYT đối với sâm cắt lát sấy khô) [5]. Khối lượng vật liệu sấy được xác định bằng cân phân tích Kern (ADB 200-4, Germany). Độ ẩm của sâm đương quy được đo bằng thiết bị phân tích độ ẩm KERN mã hiệu DAB 100-3 với độ chính xác của của khối lượng/ độ ẩm là 0,001g/ 0,01%. Thí nghiệm lặp lại 3 lần ở mỗi điều kiện sấy.

2.3 Độ ẩm không thứ nguyên

Độ ẩm không thứ nguyên (Moisture ratio - MR) được tính toán theo phương trình (1) [5]:

$$MR = \frac{M_{\tau} - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Trong đó:

M_{τ} là độ ẩm của sâm đương quy tại thời điểm sấy τ (g ẩm/g VLK)

M_0 là độ ẩm ban đầu của sâm đương quy (g ẩm/g VLK)

M_e là độ ẩm cân bằng của sâm đương quy (g ẩm/g VLK)

Giá trị của M_e thường nhỏ hơn nhiều so với giá trị của M_{τ} , hoặc M_0 [6]. Do đó, tỷ lệ ẩm có thể được rút gọn:

$$MR = \frac{M_{\tau}}{M_0} \quad (2)$$

2.4 Tốc độ sấy

Tốc độ sấy của sâm đương quy được tính toán theo phương trình (3) [7]:

$$DR = \frac{M_{\tau 1} - M_{\tau 2}}{\tau_2 - \tau_1} \quad (3)$$

Trong đó:

$M_{\tau 1}, M_{\tau 2}$ (g ẩm/g VLK) là độ ẩm của sâm đương quy tại thời điểm sấy tương ứng τ_1 và τ_2

τ_1 và τ_2 biểu thị thời gian sấy (h)

2.5 Mô hình toán học

Sự thay đổi giá trị tỷ lệ ẩm có thể được mô tả bằng các mô hình toán học. Dựa trên giá trị thực nghiệm thu được, lựa chọn năm mô hình toán học để mô tả quá trình sấy sâm đương quy, được trình bày trong Bảng 1 [4].

Mức độ phù hợp của mô hình thực nghiệm được đánh giá thông qua giá trị hệ số tương quan (R^2), và tổng sai số bình phương (SSE), được xác định theo các công thức sau:

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n M_{\text{exp},i} M_{\text{mod},i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n M_{\text{exp},i}^2 \sum_{i=1}^n M_{\text{mod},i}^2} \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n \left(MR_{\text{mod},i} - MR_{\text{exp},i} \right)^2 \quad (5)$$

Với: $MR_{\text{exp},i}$, $MR_{\text{mod},i}$ là tỷ lệ độ ẩm tương ứng theo thực nghiệm và theo mô hình.
 n là số lần quan sát.

Bảng 1: Các mô hình toán học mô tả đường cong sấy

STT	Mô hình	Công thức toán học
1	Newton	$MR = \exp(-k\tau)$

2	Henderson and Pabis	$MR = a.exp(-k\tau)$
3	Wang and Singh	$MR = 1 + a\tau + b\tau^2$
4	Two-term model	$MR = a.exp(-k_1\tau) + b.exp(-k_2\tau)$
5	Logarithmic	$MR = a.exp(-k\tau) + b$

2.6 Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng và năng lượng hoạt hóa

Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng (D_{eff}) được mô tả thông qua định luật Fick II [4]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [D_{eff} (\nabla M)] \quad (6)$$

Phương trình được tính toán bằng cách tính phân tích cho tấm vô hạn:

$$MR = \frac{M_\tau - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \tau}{L^2}\right) \quad (7)$$

Trong đó:

D_{eff} là hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng (m^2/s),
 L là 1/2 độ dày của lát cắt sâm đương quy (m),
 τ là thời gian sấy (s).

Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng được tính toán từ độ dốc của một đường thẳng bằng cách vẽ dữ liệu sấy thực nghiệm theo $\ln(MR)$ so với thời gian sấy.

Mối liên hệ giữa D_{eff} và nhiệt độ được biểu diễn theo phương trình Arrhenius [6]:

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

Trong đó:

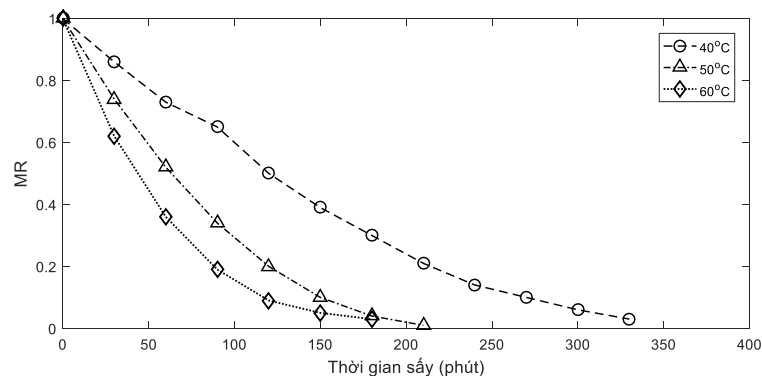
D_0 là thừa số Arrhenius (thừa số trước hàm mũ, D_0 tương đương với hệ số khuếch tán ẩm ở nhiệt độ cao vô hạn) (m^2/s)
 E_a là năng lượng hoạt hóa (kJ/mol)
 R là hằng số khí lý tưởng (8,314 kJ/mol K)
 T là nhiệt độ tuyệt đối (K)

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Đường cong sấy

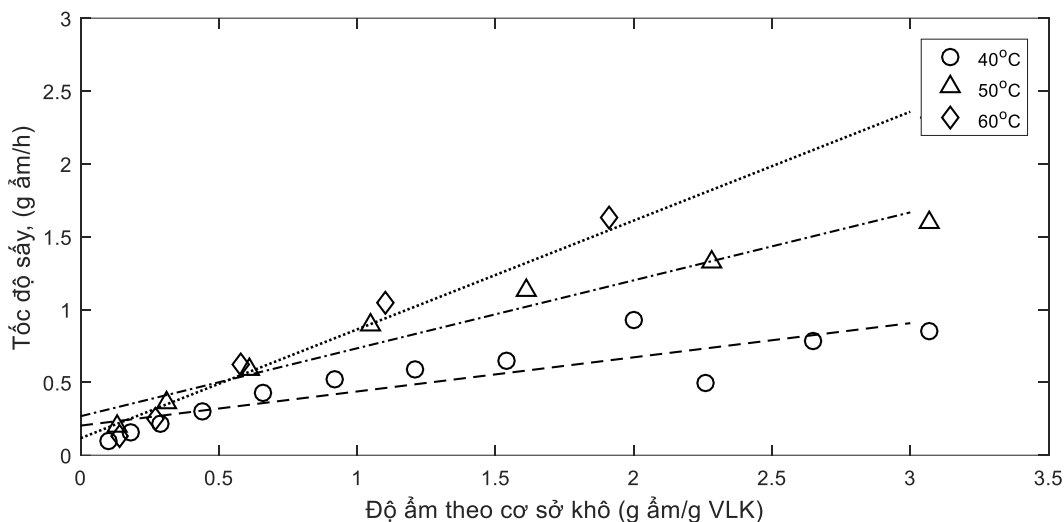
Đường cong sấy sâm đương quy thể hiện thông qua sự biến thiên của giá trị thực nghiệm của tỷ lệ ẩm so với thời gian sấy được trình bày ở Hình 1.

Có thể thấy, nhiệt độ sấy có tác động rõ ràng đến thời gian sấy, và sự tăng nhiệt độ sấy dẫn đến sự giảm tương ứng thời gian sấy đến khi độ ẩm yêu cầu để bảo quản sản phẩm sâm. Cụ thể ở nhiệt độ sấy tăng dần là 40, 50, 60 °C, thời gian sấy giảm tương ứng là 330, 210 và 180 phút. Tốc độ truyền nhiệt giữa không khí nóng và vật liệu cao hơn ở nhiệt độ cao hơn, dẫn đến độ ẩm bốc hơi nhanh hơn và thời gian sấy ngắn hơn. Các kết quả tương tự về ảnh hưởng của nhiệt độ đến thời gian sấy bằng phương pháp sấy bằng không khí nóng đối với các sản phẩm khác như táo cắt lát [4], kiwi cắt lát cũng đã được công bố [8].



Hình 1: Đường cong sấy của sâm đương quy bằng không khí nóng

Sự thay đổi tốc độ sấy theo độ ẩm cơ sở khô của sâm đương quy được thể hiện ở Hình 2. Tốc độ sấy giảm liên tục khi hàm lượng ẩm giảm hay tương ứng với sự tăng của thời gian sấy. Ngoài ra, có thể thấy rằng tốc độ sấy tăng khi nhiệt độ buồng sấy tăng. Ở cùng một giá trị độ ẩm trong vật liệu, tốc độ sấy có giá trị lớn hơn khi nhiệt độ sấy cao hơn. Hiện tượng này liên quan đến mối liên hệ giữa nhiệt độ và độ ẩm tương đối của không khí được gia nhiệt [9].

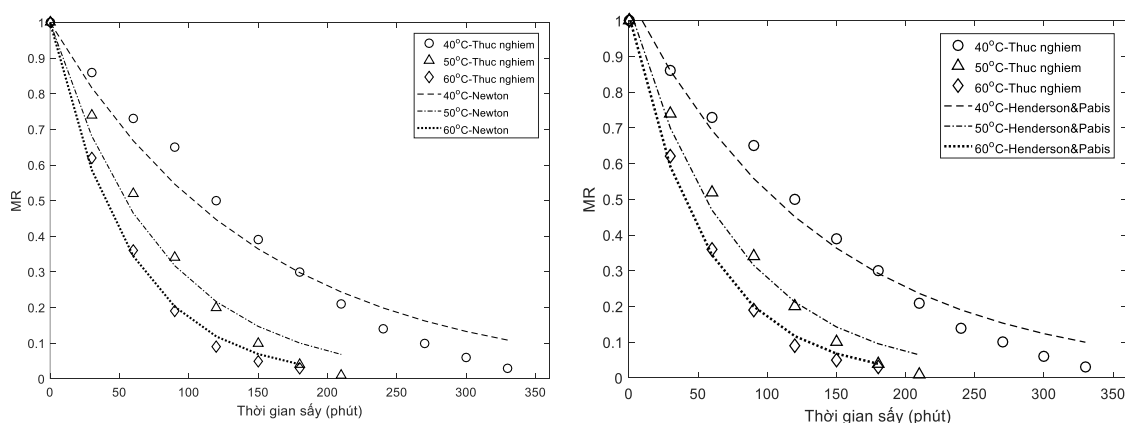


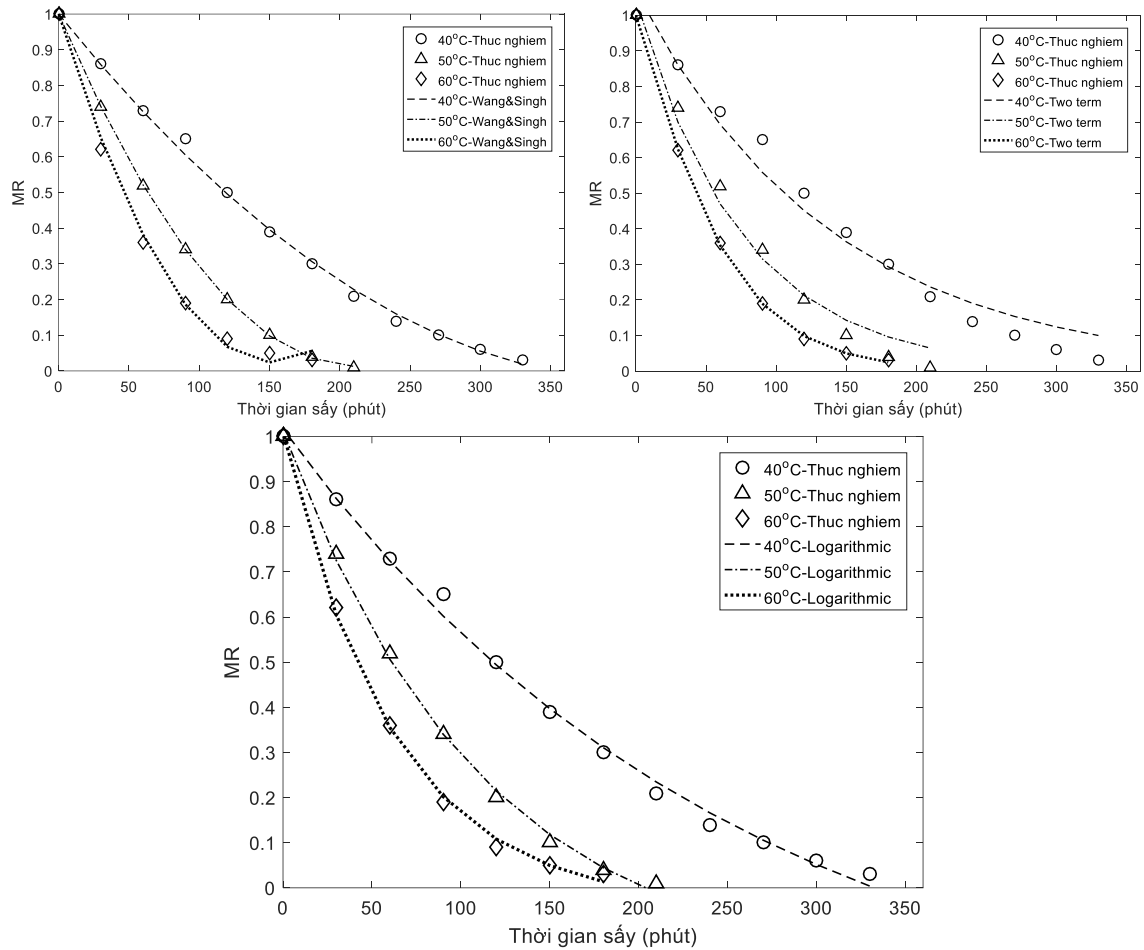
Hình 2: Sự thay đổi tốc độ sấy theo độ ẩm vật liệu sấy

Dữ liệu trên Hình 1 cũng cho thấy phần lớn ẩm giảm trong giai đoạn đẳng tốc, chứng tỏ rằng khuếch tán là cơ chế vật lý chính kiểm soát quá trình dịch chuyển ẩm của vật liệu sấy trong quá trình sấy. Trong giai đoạn giảm tốc, quá trình di chuyển nước từ bên trong ra bề mặt sản phẩm được kiểm soát bằng sự khuếch tán phân tử, trong đó nước di chuyển dựa từ vùng có độ ẩm cao hơn sang vùng có giá trị thấp hơn [4, 10].

3.2 Mô hình toán học

Đường cong biểu thị sự thay đổi của tỷ lệ ẩm theo thời gian sấy của sâm đương quy cắt lát được mô tả bằng các mô hình toán học thể hiện ở Hình 3.





Hình 3: Mô hình toán học mô tả quá trình sấy sâm đương quy

Các hằng số của mô hình và chỉ số so sánh sự phù hợp của mô hình với giá trị thực nghiệm được trình bày ở Bảng 2. Giá trị SSE càng thấp biểu hiện sự phù hợp tốt hơn giữa mô hình với dữ liệu thực nghiệm. Có thể thấy mô hình Wang & Singh là mô hình tốt nhất mô tả quá trình sấy khô sâm đương quy, tiếp theo là mô hình là mô hình Logarithmic. Các kết quả tương tự đã được báo cáo về khả năng áp dụng mô hình Logarithmic để mô phỏng các đường cong sấy khô của bã tảo sấy bằng không khí được gia nhiệt ở nhiệt độ 75, 85, 95 and 105°C [6].

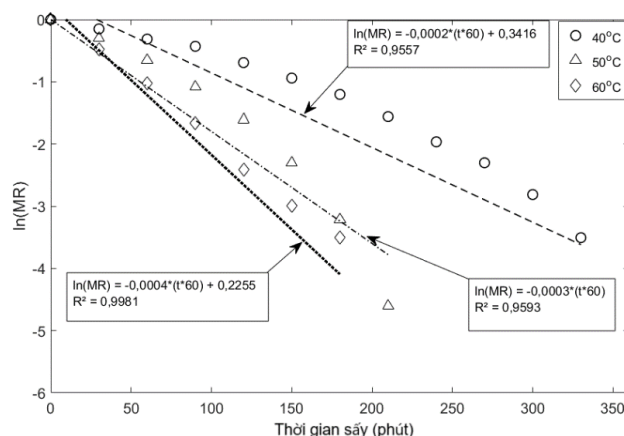
Bảng 2: Mô hình toán học mô tả quá trình sấy sâm đương quy

Mô hình	Nhiệt độ buồng sấy (°C)	Các hệ số trong phương trình	R ²	SSE (×10 ⁻²)
Newton	40	$k = 0,4035$	0,9668	4,011
	50	$k = 0,7661$	0,9816	1,653
	60	$k = 1,0662$	0,9964	0,280
Henderson & Pabis	40	$a = 1,0664$ $k = 0,4304$	0,9732	3,229
	50	$a = 1,0402$ $k = 0,7942$		1,444
	60	$a = 1,0151$ $k = 1,0805$	0,9964	0,255
Wang & Singh	40	$a = -0,2944$ $b = 0,0211$	0,9976	0,293

	50	$a = -0,5572$ $b = 0,0786$	0,9999	0,003
	60	$a = -0,7695$ $b = 0,1516$	0,9956	0,347
Two-term model	40	$a = 0,5453$ $b = 0,5211$ $k_1 = 0,4304$ $k_2 = 0,4304$	0,9732	3,229
	50	$a = 0,0135$ $b = 1,0267$ $k_1 = 0,7942$ $k_2 = 0,7942$	0,9839	1,444
	60	$a = -7,5982$ $b = 8,5979$ $k_1 = 1,7151$ $k_2 = 1,6087$	0,9998	0,015
Logarithmic	40	$a = 1,3989$ $k = 0,2341$ $b = -0,3821$	0,996	0,484
	50	$a = 1,2004$ $k = 0,5457$ $b = -0,1888$	0,9983	0,153
	60	$a = 1,0509$ $k = 0,9680$ $b = -0,0438$	0,9986	0,106

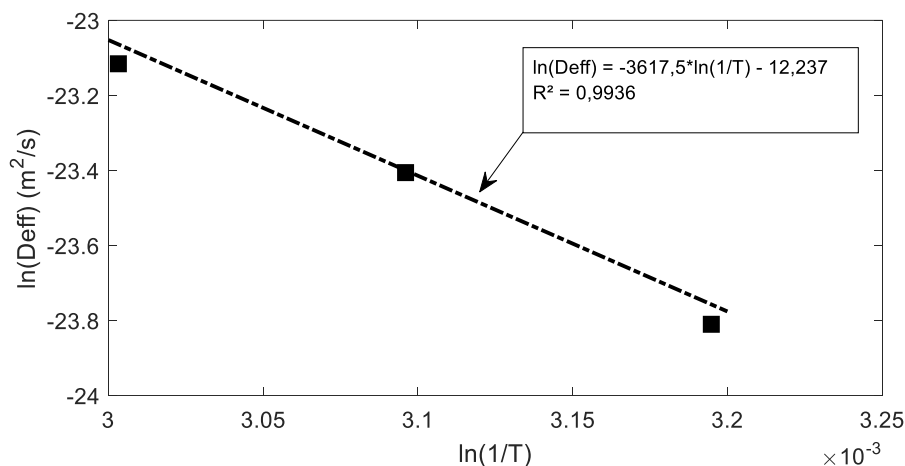
3.3 Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng và năng lượng hoạt hóa

Sự thay đổi giá trị $\ln(MR)$ của sâm đương quy theo thời gian sấy (τ) được thể hiện trên Hình 4. Dựa trên hệ số góc rút ra từ phương trình $\ln(MR) = f(\tau)$, tính toán được hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng D_{eff} đối với sâm đương quy. Ở các điều kiện sấy 40, 50 và 60°C, giá trị hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng tương ứng là $4,56.10^{-11}$; $6,85.10^{-11}$ và $9,13.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Các giá trị D_{eff} thu được đối với sâm đương quy là phù hợp với các giá trị được báo cáo trước đó. Theo Cavalcanti-Mata và cộng sự giá trị D_{eff} của sản phẩm thực phẩm nông nghiệp dao động từ 10^{-9} đến $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ [11]. Doymaz đã xác định các giá trị khuếch tán trong phạm vi $9,32.10^{-11}$ đến $1,76.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ đối với khoai lang sấy bằng không khí được gia nhiệt ở nhiệt độ 50 – 70°C [12]. Mohsen Beigi đã công bố giá trị D_{eff} trong phạm vi $7,03.10^{-10}$ đến $1,08.10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ đối với táo cắt lát được sấy bằng không khí được gia nhiệt ở nhiệt độ 50°C đến 70°C [4]. Các nghiên cứu đều cho thấy rằng sự gia tăng của nhiệt độ sấy làm tăng giá trị khuếch tán ẩm hiệu dụng của vật liệu sấy.



Hình 4: Hàm $\ln(MR)$ theo thời gian sấy của sâm đương quy

Hình 5 thể hiện đồ thị sự phụ thuộc của giá trị $\ln(D_{eff})$ vào giá trị nghịch đảo của nhiệt độ tuyệt đối $1/T$. Năng lượng hoạt hóa (E_a) được xác định dựa trên hệ số góc của phương trình tuyến tính $\ln(D_{eff}) = f(1/T)$. Giá trị E_a đối với sâm đương quy thu được là 30,1 kJ/mol, giá trị này là phù hợp với các công bố về vật liệu sấy thực phẩm dao động từ 12,70 đến 110 kJ/mol [4, 13]. Năng lượng hoạt hóa càng thấp thì sản phẩm thực phẩm càng cần ít năng lượng hơn để khuếch tán độ ẩm.



Hình 5: Phương trình hồi quy biểu diễn $\ln(D_{eff}) = f(1/T)$

4 KẾT LUẬN

Sâm đương quy cắt lát được sấy bằng phương pháp đối lưu với không khí được gia nhiệt ở các mức nhiệt độ 40, 50 và 60°C. Nhiệt độ sấy có ảnh hưởng đáng kể đến thời gian sấy. Mô hình của Wang & Singh là mô hình phù hợp nhất để mô tả đường cong sấy, tiếp theo là mô hình Logarithmic. Nhiệt độ sấy có ảnh hưởng đáng kể đến độ khuếch tán ẩm hiệu dụng của các mẫu, với các giá trị độ khuếch tán ẩm hiệu dụng tương ứng với các mức nhiệt độ sấy 40, 50 và 60°C là $4,56 \cdot 10^{-11}$, $6,85 \cdot 10^{-11}$ và $9,13 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2\text{/s}$. Giá trị năng lượng hoạt hóa của các lát sâm đương quy được xác định là 30,1 kJ/mol.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hou C., Yin M., Lan P., Wang H., Nie H., Ji X. Recent progress in the research of Angelica sinensis (Oliv.) Diels polysaccharides: Extraction, purification, structure and bioactivities, *Chemical and biological technologies in agriculture*, 8, pp. 1–14, 2021.
- [2] Bi S.-J., Fu R.-J., Li J.-J., Chen Y.-Y., Tang Y.-P. The Bioactivities and Potential Clinical Values of Angelica Sinensis Polysaccharides, *Natural Product Communications*, 16(3), pp. 1–18, 2021.
- [3] Nistor O.-V., Seremet L., Andronoiu D.G., Rudi L., Botez E. Influence of different drying methods on the physicochemical properties of red beetroot (Beta vulgaris L. var. Cyindra), *Food Chemistry*, 236, pp. 59–67, 2017.
- [4] Beigi, M. Hot air drying of apple slices: dehydration characteristics and quality assessment, *Heat and Mass Transfer*, 52(8), pp. 1435-1442, 2016.
- [5] QCVN 17:2015:BYT, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia đối với sản phẩm từ nhân sâm, 2015.
- [6] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., & Hu, X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace, *Food Research International*, 40(1), pp. 39–46, 2007.
- [7] Jiang, D., Xiao, H., Zielinska, M., Zhu, G., Bai, T., & Zheng, Z. Effect of pulsed vacuum drying on drying kinetics and quality of roots of Panax notoginseng (Burk.) FH Chen (Araliaceae), *Drying Technology*, 39(16), pp. 2234-2251, 2021.

- [8] Maskan, M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying, *Journal of food engineering*, 48(2), pp. 177–182, 2001.
- [9] Kaleemullah, S., & Kailappan, R. Monolayer moisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies, *Journal of Stored Products Research*, 43(2), pp. 104–110, 2007.
- [10] Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., & Sadeghi, M. Estimation of whole lemon mass transfer parameters during hot air drying using different modelling methods, *Heat and mass transfer*, 51, pp. 1121–1129, 2015.
- [11] Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., Duarte, M. E. M., Lira, V. V., de Oliveira, R. F., Costa, N. L., & Oliveira, H. M. L. A new approach to the traditional drying models for the thin-layer drying kinetics of chickpeas, *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), e13569, 2020.
- [12] Doymaz, İ. Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling, *Heat and Mass Transfer*, 47, pp. 277–285, 2011.
- [13] Aghbashlo, M., & Samimi-Akhijahani, H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae), *Energy Conversion and Management*, 49(10), pp. 2865–2871, 2008.

RESEARCH ON THE DRYING KINETICS OF *ANGELICA SINENSIS*

LE THI BICH NGUYET, PHAM QUANG PHU*, TRAN VIET HUNG,
NGUYEN HOANG KHOI

Faculty Of Heat and Refrigeration Engineering, Industrial university of Ho Chi Minh city

** Corresponding author: phamquangphu@iuh.edu.vn*

Abstract. The effect of drying temperature on the drying kinetics of *Angelica sinensis* was experimentally studied using the hot air drying method. The experimental data show that drying curves were fit to Wang and Singh model and the Logarithmic model to predict the drying kinetics of *Angelica sinensis*. The effective moisture diffusivity values are 4.56×10^{-11} , 6.85×10^{-11} , and 9.13×10^{-11} m²/s for drying temperatures of 40, 50, and 60°C, respectively. The activation energy value of *Angelica sinensis* slices was also determined to be 30.1 kJ/mol based on the Arrhenius equation.

Keywords. *Angelica sinensis*, convective hot air drying, drying kinetics, effective moisture diffusivity

Ngày nhận bài: 15/01/2025

Ngày chấp nhận đăng: 18/06/2025