



DOI:10.22144/ctujos.2025.220

ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ ĐẾN ĐỘNG HỌC VÀ ĐẶC TÍNH LÝ HÓA CỦA BỘT RAU MÁ (*Centella asiatica* (L.) Urb.) SẤY CHÂN KHÔNG

Châu Văn Đan^{1,2} và Trần Chí Nhân^{1*}

¹Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Khoa Công nghệ - Thủy sản, Trường Cao đẳng Kinh tế - Kỹ thuật Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): tcnhan@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 18/06/2025

Sửa bài (Revised): 05/08/2025

Duyệt đăng (Accepted): 30/10/2025

Title: Effect of temperature on vacuum drying kinetics and physicochemical characteristics of dried *Centella asiatica* powder

Author: Chau Van Dan^{1,2}, and Tran Chi Nhan^{1*}

Affiliation(s): ¹Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University, Viet Nam; ²Faculty of Fisheries-Technology, Can Tho Technical Economic College, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm xác định mô hình động học và sự biến đổi chất lượng bột rau má sấy chân không ($96 \pm 0,5$ kPa) ở 40, 45 và 50°C. Kết quả cho thấy nhiệt độ tăng thúc đẩy tốc độ quá trình sấy. Mô hình Lewis được xác định là phù hợp để mô tả động học sấy chân không rau má, đặc biệt tại 45°C, với giá trị R^2 , χ^2 và RMSE lần lượt là 0,9978; 0,0002 và 0,0141. Tại 45°C, hệ số khuếch tán ẩm (D_{eff}) đạt $7,72 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ và năng lượng hoạt hóa (E_a) là $40,89 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Bên cạnh đó, bột rau má sấy chân không ở 45°C duy trì tốt về chất lượng với màu sắc ổn định ($L^* = 62,91 \pm 0,38$; $a^* = -6,19 \pm 0,17$; $b^* = 27,05 \pm 0,80$), độ hoạt động của nước ở cuối quá trình sấy (a_w) là $0,457 \pm 0,02$. Hàm lượng hợp chất chống oxy hóa, khả năng trung hòa gốc tự do cao (TPC = $67,33 \pm 0,69 \text{ mg GAE/g}$, TFC = $36,86 \pm 0,87 \text{ mg QE/g}$, DPPH = $8,86 \pm 0,21 \text{ mg TE/g}$). Ngoài ra, kết quả cũng ghi nhận sự tương quan cao giá trị L^* , a^* , b^* , TPC, TFC, DPPH và a_w ($r = -0,8179$; $0,9505$; $0,9824$; $0,7631$; $0,5698$ và $0,5919$; tương ứng).

Từ khóa: Động học sấy, flavonoid, hoạt độ nước, màu sắc, phenolic, rau má, sấy chân không

ABSTRACT

A study aimed to determine the drying kinetics model and quality changes of vacuum-dried *Centella asiatica* powder under a vacuum pressure of 96 ± 0.5 kPa at temperatures of 40, 45, and 50°C. The results showed that increasing the temperature accelerated the drying process. The Lewis model was identified as the most suitable for describing the vacuum drying kinetics of *Centella asiatica*, particularly at 45°C, with R^2 , χ^2 , and RMSE values of 0.9978, 0.0002, and 0.0141, respectively. At 45°C, the effective moisture diffusivity (D_{eff}) reached $7.72 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, and the activation energy (E_a) was $40.89 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Moreover, the vacuum-dried powder at 45°C maintained good quality, exhibiting stable color parameters ($L^* = 62.91 \pm 0.38$; $a^* = -6.19 \pm 0.17$; $b^* = 27.05 \pm 0.80$) and a final water activity (a_w) of 0.457 ± 0.02 . The powder also retained high levels of antioxidant compounds and radical scavenging capacity (TPC = $67.33 \pm 0.69 \text{ mg GAE/g}$, TFC = $36.86 \pm 0.87 \text{ mg QE/g}$, DPPH = $8.86 \pm 0.21 \text{ mg TE/g}$). Additionally, a strong correlation was observed between L^* , a^* , b^* , TPC, TFC, DPPH, and a_w values, with correlation coefficients (r) of -0.8179 ; 0.9505 ; 0.9824 ; 0.7631 ; 0.5698 ; and 0.5919 , respectively.

Keywords: *Centella asiatica*, color, drying kinetics, flavonoid, phenolic content, vacuum drying, water activity

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, với nhận thức về tầm quan trọng của chế độ ăn uống cân bằng, hỗ trợ sức khỏe đã thay đổi thói quen tiêu dùng nông sản chất lượng (giá trị dinh dưỡng cao, thuộc tính cảm quan tốt) và an toàn. Trong đó, các sản phẩm bột trái cây và rau quả chế biến sẵn đang trở thành lựa chọn ưu tiên do sự tiện lợi và giá trị dinh dưỡng được duy trì, đáp ứng yêu cầu của lối sống hiện đại (Santos et al., 2014).

Rau má (*Centella asiatica* (L.) Urb.) thuộc loại thực vật thân thảo và phân bố rộng khắp Việt Nam, đặc biệt là ở khu vực đồng bằng sông Cửu Long. Rau má chứa nhiều hợp chất chống oxy hóa mạnh như saponin triterpenoid, flavonoid, vitamin C, beta-carotene và polyphenol giúp bảo vệ cơ thể khỏi tác hại của gốc tự do, hỗ trợ chống viêm và làm chậm quá trình lão hóa (Hashim et al., 2011). Mặc dù rau má được thu hoạch với sản lượng lớn; tuy nhiên, hầu như được tiêu thụ dưới dạng tươi hoặc uống như trà hàng ngày. Do đó, rau má được canh tác chủ yếu là tự phát và tiêu thụ tại chỗ; từ đó, tiềm năng thương mại của loài rau này chưa được khai thác hiệu quả, các sản phẩm chế biến từ rau má trên thị trường chưa đa dạng.

Ngày nay, các sản phẩm bột sấy từ nông sản như rau, quả, ... đang ngày càng phổ biến, giá trị kinh tế từ nguồn nguyên liệu này được nâng cao. Tuy nhiên, việc đánh giá chất lượng của các sản phẩm sấy khô thường dựa trên sự biến đổi của màu sắc, khả năng phục hồi nước và sự co ngót của sản phẩm. Trong quá trình sấy, sự co ngót về thể tích, diện tích bề mặt giảm do sự mất ẩm đã tác động đáng kể đến động học quá trình sấy và các thuộc tính chất lượng cuối cùng như khả năng phục hồi nước, cấu trúc, độ ẩm, độ hoạt động của nước, khả năng bảo quản sản phẩm (Koua et al., 2017). Bên cạnh đó, màu sắc, hàm lượng các hợp chất chống oxy hóa cũng bị tác động tiêu cực trong suốt quá trình sấy; từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng của sản phẩm sấy. Do đó, các giá trị màu sắc và hàm lượng các hợp chất sinh học có thể là một chỉ tiêu đánh giá mức độ nghiêm trọng của quá trình xử lý nhiệt, giúp dự đoán sự suy giảm chất lượng tương ứng (Pathare et al., 2013).

Để khắc phục những hạn chế của các phương pháp sấy truyền thống, sấy chân không ngày càng được sử dụng rộng rãi như một công nghệ sấy khô tiên tiến. Phương pháp này được tiến hành bằng cách sử dụng sự thay đổi áp suất chân không liên tục trong buồng sấy, nhằm tăng cường quá trình truyền ẩm trong điều kiện nhiệt độ thấp. Môi trường chân

không, nhiệt độ sấy thấp có khả năng hạn chế sự oxy hóa, giảm thiểu các phản ứng hóa nâu, từ đó cải thiện đáng kể chất lượng sản phẩm sấy khô (Xie et al., 2017). Nhờ những ưu điểm vượt trội này, phương pháp sấy chân không đã được ứng dụng thành công cho nhiều loại nguyên liệu như quả kỷ tử (Xie et al., 2017), lá tía tô (Tran et al., 2024), lá xạ đen (Tran et al., 2023) và nho không hạt (Bai, 2014). Việc ứng dụng phương pháp sấy chân không vào sản xuất bột rau má là một hướng đi cần thiết để xây dựng quy trình hiệu quả và có khả năng áp dụng vào thực tiễn. Do đó, nghiên cứu này khi được thực hiện đã tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của sấy chân không đến động học của quá trình sấy nhằm xây dựng mô hình sấy phù hợp; đồng thời, duy trì tối đa màu sắc và khả năng chống oxy hóa của bột rau má.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chuẩn bị nguyên liệu

Rau má thìa được thu mua từ Hợp tác xã Na Thái (xã Trường Thắng, huyện Thới Lai, thành phố Cần Thơ) có độ tuổi thu hoạch trung bình 30 - 35 ngày trồng. Sau khi thu hoạch, việc loại bỏ lá bị dập nát, hư hỏng, có dấu hiệu sâu bệnh đã được tiến hành và rau má được đóng gói cẩn thận trong túi polyethylene (PE) với khối lượng 1 kg/túi và nhanh chóng vận chuyển về phòng thí nghiệm trong vòng 1 giờ để đảm bảo độ tươi. Sau đó, rau má được rửa sạch bằng nước để loại bỏ bụi bẩn và tạp chất sau đó được làm ráo. Phần gốc và rễ sau đó cũng được loại bỏ trước khi tiến hành thực hiện thí nghiệm.

2.2. Bố trí thí nghiệm

Rau má (100 g) được cho vào hộp thủy tinh có nắp đậy (500 mL) và gia nhiệt bằng lò vi sóng (Model R-G52XVN-ST, Sharp, Nhật Bản) ở công suất 500 W trong 60 giây. Sau đó, mẫu được làm lạnh nhanh chóng bằng nước đá ở nhiệt độ 0 - 4°C trong 60 giây, quá trình được lặp lại nhằm đảm bảo đủ nguyên liệu cho công đoạn sấy. Quá trình sấy được thực hiện trong máy sấy chân không (Model VORD-800W-CL-057, Thermoline, Úc). Rau má (200 g) được trải vào khay sấy với độ dày khoảng 2 mm. Rau má được sấy ở nhiệt độ từ 40, 45 và 50 (°C) là nhân tố khảo sát. Trong đó, mẫu đối chứng là mẫu không trải qua quá trình sấy. Đồng thời, áp suất chân không được cố định ở 96±0,5 kPa. Khối lượng mẫu rau má được ghi nhận định kỳ sau mỗi 15 phút và quá trình sấy dừng lại khi độ ẩm của rau má đạt mức 3 - 6% (Tran et al., 2024). Sau đó, nguyên liệu được nghiền thành bột bằng máy nghiền khô (Yamafuji 2500, Nhật Bản). Bột sau khi xay sẽ được rây qua thiết bị rây bột có kích thước lỗ lưới là

100 mesh. Tiếp theo, các hệ số và tham số của mô hình động học sấy được xác định và trình bày chi tiết trong Bảng 1. Song song đó, nhằm tìm ra nhiệt độ sấy phù hợp cho nguyên liệu này, các chỉ tiêu

chất lượng quan trọng của bột rau má cũng được phân tích, bao gồm hoạt độ nước (a_w), giá trị màu sắc, hàm lượng polyphenol tổng số (TPC), flavonoid tổng số (TFC) và khả năng khử gốc tự do DPPH.

Bảng 1. Các mô hình toán học được áp dụng trong quá trình sấy chân không rau má

| STT | Mô hình | Phương trình | Tài liệu tham khảo |
|-----|--------------------------|---|----------------------------|
| 1 | Henderson và Pabis | $MR = a \cdot \exp(-kt)$ | Henderson and Pabis (1961) |
| 2 | Logarithmic | $MR = a \cdot \exp(-kt) + c$ | Toğrul and Pehlivan (2002) |
| 3 | Midilli | $MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$ | Sacilik and Elicin (2006) |
| 4 | Page hiệu chỉnh | $MR = \exp(-kt)^n$ | White et al. (1981) |
| 5 | Lewis | $MR = \exp(-kt)$ | Ayensu (1997) |
| 6 | Page | $MR = \exp(-kt^n)$ | Page (1949) |
| 7 | Hai giai đoạn | $MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-k_0t)$ | Sharaf-Elden et al. (1980) |
| 8 | Hai giai đoạn hiệu chỉnh | $MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \cdot \exp(-kat)$ | Alara et al. (2019) |
| 9 | Verma | $MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \cdot \exp(-gt)$ | Verma et al. (1985) |
| 10 | Wang và Singh | $MR = 1 + at + bt^2$ | Wang and Singh (1978) |

2.3. Phương pháp phân tích

Hàm lượng ẩm, % (AOAC 950.46). Hoạt độ nước (a_w) của mẫu được đo bằng Meter Group TDL (Aqualab, Hoa Kỳ). Giá trị màu sắc được áp dụng theo hệ thống CIELAB (L^* , a^* và b^*) và được xác định bằng máy đo màu kỹ thuật số cầm tay (WR10QC, FRU®, Trung Quốc) với khẩu độ 4 mm và đèn chiếu sáng D65 để xác định tọa độ không gian màu CIE. Trong đó, giá trị L^* chỉ độ sáng có giá trị từ 0 đến 100, tương ứng với màu từ đen đến trắng; giá trị a^* đi từ -a đến +a, tương ứng với màu từ xanh lá đến đỏ; giá trị b^* đi từ -b đến +b, tương ứng với màu từ xanh dương đến vàng. Phương pháp đo màu được thực hiện bằng cách đặt đầu cảm biến của máy tiếp xúc với bề mặt lá rau má. Ở mỗi lần đo, giá trị màu sắc được xác định ngẫu nhiên tại 3 vị trí khác nhau của lá rau má. Hàm lượng polyphenol tổng số (TPC) được biểu thị bằng mg GAE/g, cùng với khả năng -khử gốc tự do DPPH (mg TE/g), được phân tích theo phương pháp đã được mô tả bởi Nguyen et al. (2019). Đối với hàm lượng flavonoid tổng số (TFC), kết quả được thể hiện bằng mg QE/g và được xác định dựa trên quy trình được trình bày bởi Pham et al. (2020).

2.4. Phương pháp thu thập và xử lý số liệu

2.4.1. Phương pháp xác định động học sấy

Tỷ lệ độ ẩm (MR) của rau má trong quá trình sấy được tính toán theo công thức (1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

Trong đó: M_t , M_o là độ ẩm tại thời điểm t và ban đầu trên cân bản khô, M_e là độ ẩm cân bằng, vì M_e

tương đối nhỏ so với M_t và M_o . Do đó, công thức (1) được đơn giản hóa thành $MR = M_t/M_o$.

Đường cong sấy được kiểm tra sự phù hợp với 10 mô hình sấy được sử dụng rộng rãi trong hầu hết các vật liệu từ rau quả. Các mô hình toán học được sử dụng trong nghiên cứu này được liệt kê trong Bảng 1. Việc phân tích hồi quy tuyến tính và phi tuyến tính được thực hiện bằng phần mềm Statgraphics Centurion (19.1, Statgraphics Tech., Inc., Virginia) để ước tính hệ số của các mô hình. Mô hình phù hợp nhất được kiểm tra bằng cách tính toán các tham số thống kê như hệ số xác định (R^2), chi bình phương (χ^2) và sai số trung bình (RMSE) giữa dữ liệu mô hình và thực nghiệm. Giá trị R^2 cao nhất, χ^2 và RMSE thấp nhất là những tham số quyết định mô hình phù hợp. Các tham số này có thể được tính toán bằng cách sử dụng các phương trình sau:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]} \quad (4)$$

Trong đó: $MR_{pre,i}$, $MR_{exp,i}$, \overline{MR}_{pre} lần lượt là tỷ lệ độ ẩm dự đoán thứ i, tỷ lệ độ ẩm thực nghiệm thứ i, tỷ lệ độ ẩm dự đoán trung bình, N và n tương ứng là số dữ liệu và số hằng số của mô hình.

2.4.2. Phương pháp xác định hệ số khuếch tán ẩm

Quá trình sấy xảy ra chủ yếu trong giai đoạn sấy giảm tốc và sự truyền ẩm trong quá trình sấy được kiểm soát bằng sự khuếch tán bên trong chất rắn. Hệ số độ ẩm khuếch tán ẩm của rau má trong quá trình sấy chân không được giải thích bằng cách sử dụng mô hình khuếch tán Fick đơn giản. Phương trình tổng quát của định luật Fick thứ hai với các giả định về sự di chuyển độ ẩm bằng khuếch tán, co rút không đáng kể, hệ số khuếch tán ẩm và nhiệt độ không đổi được thể hiện ở phương trình (5) (Tran et al., 2024).

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

Trong đó: D_{eff} là hệ số khuếch tán độ ẩm ($m^2 \cdot s^{-1}$), L là phân nửa chiều dày của các mẫu (m) chiều dày của mẫu được đo bằng thước panme (micrometer), là giá trị trung bình của 30 lần lặp lại, n : số nguyên dương, t là thời gian sấy (giờ). Đối với quá trình sấy kéo dài, chuỗi vô hạn trong công thức trên có thể được xấp xỉ bằng số hạng đầu tiên (tức là lấy $n = 0$) mà không ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của dự đoán, đặc biệt công thức này giúp tính toán nhanh hơn và vẫn đảm bảo mô tả tốt sự suy giảm hàm lượng ẩm trong vật liệu (phương trình (6)). Phương trình trên có thể được chuyển thành dạng logarit tự nhiên như phương trình (7); từ đó, D_{eff} được ước tính dựa trên hệ số góc thu được bằng phân tích hồi quy tuyến tính.

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

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

2.4.3. Phương pháp xác định năng lượng hoạt hóa

Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của D_{eff} có thể được mô tả bằng phương trình Arrhenius (8).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273,15)}\right) \quad (8)$$

Trong đó: D_0 là hằng số trước mũ ($m^2 \cdot s^{-1}$), E_a : năng lượng hoạt hoá ($kJ \cdot mol^{-1}$), T là nhiệt độ ($^{\circ}C$) và R là hằng số khí lí tưởng ($8,314 \times 10^{-3} kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$).

Logarit hai vế của phương trình (8) ta được phương trình (9).

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R(T+273,15)} \quad (9)$$

Phương trình (9) có dạng phương trình hàm số mũ với nhiệt độ với độ dốc bằng $(-E_a/R)$. Từ đó, E_a được ước tính dựa trên hệ số góc thu được bằng phân tích hồi quy tuyến tính phương trình (9).

2.5. Phương pháp phân tích thống kê số liệu

Số liệu được thu nhận, xử lý thống kê thông qua phân tích phương sai ANOVA và tính toán các tham số của mô hình từ chương trình Statgraphics Centurion 19.1. Phần mềm cũng được sử dụng để kiểm tra sự khác biệt ý nghĩa giữa các nghiệm thức thông qua LSD (Least Significant Difference); số liệu được trình bày dưới dạng trung bình \pm độ lệch chuẩn ($n = 3$) và đồ thị được vẽ bằng chương trình Microsoft Excel 2016.

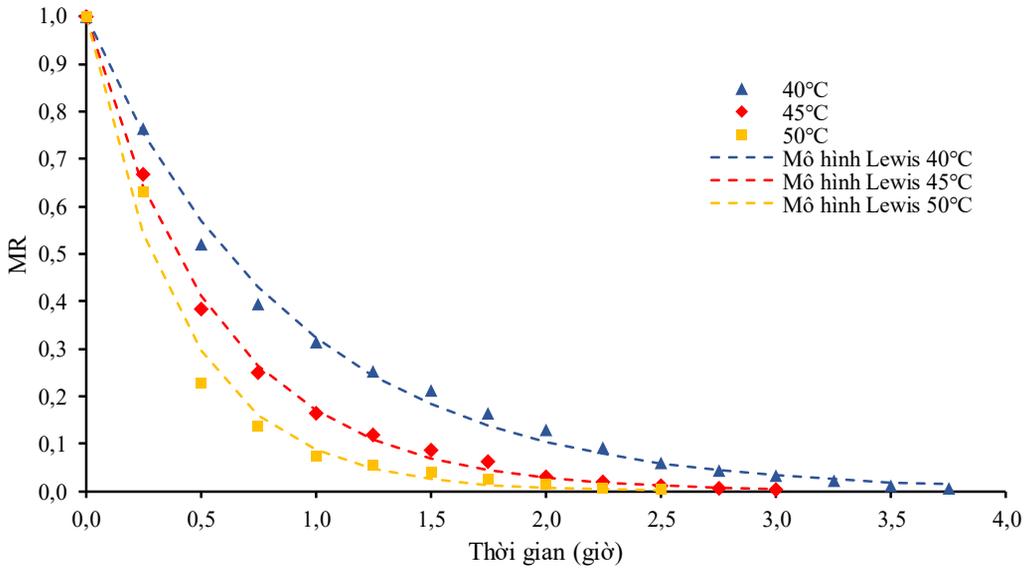
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Động học của quá trình sấy rau má trong điều kiện chân không

3.1.1. Xây dựng đường cong sấy và xác định mô hình sấy

Biểu đồ (Hình 1) được trình bày thể hiện sự biến đổi của tỷ lệ ẩm theo thời gian sấy dưới các điều kiện nhiệt độ khác nhau của phương pháp sấy chân không. Hình 1 cho thấy quá trình thoát ẩm diễn ra một cách liên tục ở cả ba mức nhiệt độ khảo sát là $40^{\circ}C$, $45^{\circ}C$ và $50^{\circ}C$. Trong đó, đường cong biểu diễn ở nhiệt độ $50^{\circ}C$ có độ dốc cao nhất, cho thấy tốc độ bay hơi nước diễn ra nhanh nhất. Điều này nhất quán với nguyên lý vật lý, khi nhiệt độ tăng, động năng của các phân tử nước tăng lên, thúc đẩy quá trình khuếch tán và bay hơi mạnh mẽ hơn (Nguyen et al., 2015).

Trong điều kiện sấy chân không, gradient áp suất riêng phần của hơi nước tăng, thúc đẩy quá trình bay hơi của nước. Bên cạnh đó, yếu tố nhiệt độ cũng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định thời gian cần thiết để đạt được độ ẩm mong muốn. Khi nhiệt độ tăng, tốc độ bay hơi nước tăng dẫn đến tăng động lực của quá trình sấy. Cụ thể, để rau má đạt độ ẩm từ 3 đến 6%, mẫu được sấy ở $50^{\circ}C$ chỉ mất khoảng 2,5 giờ. Tuy nhiên, nếu giảm xuống $45^{\circ}C$, thời gian sấy kéo dài lên 3 giờ và ở $40^{\circ}C$, quá trình này cần tới 3,75 giờ (Hình 1). Sự chênh lệch đáng kể về thời gian này không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm mà còn tác động trực tiếp đến năng suất sấy. Do đó, việc điều chỉnh nhiệt độ cũng góp phần cân bằng giữa tốc độ sấy và bảo toàn chất lượng sản phẩm.



Hình 1. Sự thay đổi MR của rau má theo thời gian sấy chân không ở các nhiệt độ khảo sát

Việc áp dụng các mô hình toán học mang lại lợi ích đáng kể trong việc xây dựng quy trình chế biến cũng như bảo quản sản phẩm thực phẩm. Đối với nghiên cứu hiện tại, sự biến đổi của độ ẩm rau má theo từng mức nhiệt độ đã được đánh giá thông qua phân tích thống kê dựa trên các mô hình sấy phù hợp, với chi tiết các thông số được tổng hợp trong Bảng 2.

Việc đánh giá các tham số này là cần thiết để xác định mô hình phù hợp nhất trong việc mô tả động học quá trình sấy thực nghiệm. Khi xem xét hằng số tốc độ sấy (k), các mô hình khác nhau cho thấy xu hướng đa dạng. Chẳng hạn, các mô hình như Henderson và Pabis (k tăng từ 1,1115 lên 2,4795) hay Logarithmic (k tăng từ 1,1397 lên 1,8185) thể hiện sự gia tăng của hằng số tốc độ sấy (k) khi nhiệt độ sấy tăng từ 40 lên 50°C, điều này phù hợp với việc nhiệt độ cao hơn làm tăng tốc độ truyền nhiệt và khuếch tán ẩm. Tran et al. (2024) đã khẳng định mối liên hệ này khi đề cập đến nhiệt độ sấy và khả năng truyền nhiệt của không khí nóng. Tuy nhiên, một số mô hình phức tạp hơn có thể có sự biến động khác trong giá trị k , phụ thuộc vào tương tác giữa các tham số riêng biệt của mô hình.

Quan trọng hơn, để xác định mô hình phù hợp nhất, các tham số thống kê như R^2 (hệ số xác định), χ^2 (chi-squared) và RMSE (Root Mean Square Error) cần được xem xét kỹ lưỡng. Kết quả ở Bảng 2 chỉ ra rằng tất cả các mô hình khảo sát đều đạt giá trị R^2 cao, dao động trong khoảng từ 0,8787 đến 0,9982, thể hiện khả năng giải thích tốt sự biến thiên

của dữ liệu thực nghiệm. Các giá trị χ^2 (từ 0,0002 đến 0,0028) và RMSE (từ 0,0141 đến 0,1178) cũng cho thấy mức độ sai số thấp giữa dữ liệu dự đoán và thực nghiệm. Đây là những chỉ số tiêu chuẩn được sử dụng rộng rãi để đánh giá độ chính xác của mô hình trong các nghiên cứu động học sấy (Alara et al., 2019, Doymaz, 2004).

Đặc biệt, dựa trên các tiêu chí về R^2 cao nhất, cùng với χ^2 và RMSE thấp nhất, mô hình Lewis nổi bật và được lựa chọn là mô hình phù hợp để mô tả quá trình sấy rau má trong điều kiện chân không. Cụ thể, tại nhiệt độ 45°C, mô hình này đạt R^2 là 0,9978, kèm theo giá trị χ^2 rất thấp là 0,0002 và RMSE là 0,0141. Ở mô hình hai giai đoạn, hệ số xác định R^2 có giá trị cao hơn (0,9982) khi so với mô hình Lewis (0,9978), tuy nhiên lại không khác biệt quá lớn chỉ 0,04% khi so sánh giữa 2 mô hình. Mặt khác, hai giá trị χ^2 và RMSE của mô hình Lewis lại thấp nhất so với tất cả các mô hình được khảo sát. Kết quả còn cho thấy hằng số k của mô hình Lewis cũng có xu hướng tăng lên khi tăng nhiệt độ sấy từ 40 lên 50°C (1,1272 - 2,4334). Theo Tran et al. (2024), kết quả nghiên cứu trên lá tía tô sấy chân không cũng cho thấy hằng số k tăng khi tăng nhiệt độ sấy từ 35°C (1,2692) lên 55°C (2,5739). Những chỉ số này chứng tỏ mô hình Lewis có khả năng dự đoán và mô tả động học quá trình sấy với độ chính xác cao nhất trong số các mô hình được khảo sát. Mô hình Lewis cũng được áp dụng trên nhiều các nguyên liệu khác nhau với độ tin cậy cao như trên hạt nho Concord, đậu nành (Roberts et al., 2008; Matias et al., 2019).

Bảng 2. Hằng số tốc độ sấy, hệ số và tham số thống kê của các mô hình sấy chân không rau má

| Mô hình | Nhiệt độ (°C) | Hằng số mô hình | R ² | χ ² | RMSE |
|--------------------------|---------------|---|----------------|----------------|--------|
| Handerson và Pabis | 40 | k = 1,1115; a = 0,98624 | 0,9953 | 0,0005 | 0,0206 |
| | 45 | k = 1,7760; a = 1,00348 | 0,9978 | 0,0003 | 0,0147 |
| | 50 | k = 2,4795; a = 1,02206 | 0,9878 | 0,0017 | 0,0373 |
| Logarithmic | 40 | k = 1,1397; a = 0,9825; c = 0,0074 | 0,9955 | 0,0005 | 0,0211 |
| | 45 | k = 1,4208; a = 0,9989; c = 0,0075 | 0,9981 | 0,0003 | 0,0146 |
| | 50 | k = 1,8185; a = 2,5148; c = 0,0047 | 0,9879 | 0,0021 | 0,0394 |
| Midilli | 40 | k = 1,1166; a = 1,0083 n = 0,8866; b = 0,0053 | 0,9969 | 0,0004 | 0,0180 |
| | 45 | k = 1,7998; a = 1,0050 n = 1,0039; b = 0,0025 | 0,9980 | 0,0004 | 0,0157 |
| | 50 | k = 3,1962; a = 1,0061 n = 1,3136; b = 0,0107 | 0,9936 | 0,0015 | 0,0307 |
| Page hiệu chỉnh | 40 | k = 3,3573; n = 0,3357 | 0,9951 | 0,0005 | 0,0211 |
| | 45 | k = 4,2071; n = 0,4207 | 0,9978 | 0,0003 | 0,0147 |
| | 50 | k = 4,9332; n = 0,4933 | 0,9873 | 0,0018 | 0,0381 |
| Lewis | 40 | k = 1,1272 | 0,9951 | 0,0004 | 0,0203 |
| | 45 | k = 1,7701 | 0,9978 | 0,0002 | 0,0141 |
| | 50 | k = 2,4334 | 0,9873 | 0,0014 | 0,0361 |
| Page | 40 | k = 1,1360; n = 0,9321 | 0,9964 | 0,0004 | 0,0179 |
| | 45 | k = 1,7639; n = 0,9900 | 0,9978 | 0,0003 | 0,0147 |
| | 50 | k = 2,9116; n = 1,2410 | 0,9914 | 0,0012 | 0,0314 |
| Hai giai đoạn | 40 | k = 1,853; k ₀ = 0,9280 a = 0,8331; b = 0,1749 | 0,9968 | 0,0004 | 0,0183 |
| | 45 | k = 1,9592; k ₀ = 0,9301 a = 0,8961; b = 0,1124 | 0,9982 | 0,0003 | 0,0150 |
| | 50 | k = 2,4478; k ₀ = 1,4812 a = 0,5110; b = 0,5110 | 0,9878 | 0,0028 | 0,0423 |
| Hai giai đoạn hiệu chỉnh | 40 | k = 1,6630; a = 0,4943 | 0,9964 | 0,0004 | 0,0181 |
| | 45 | k = 2,7900; a = 0,4623 | 0,9972 | 0,0003 | 0,0168 |
| | 50 | k = 3,6791; a = 1,9374 | 0,9928 | 0,0010 | 0,0286 |
| Verma | 40 | k = 0,9856; a = 0,8317; g = 2,8796 | 0,9968 | 0,0004 | 0,0177 |
| | 45 | k = 1,9009; a = 0,9227; g = 0,8407 | 0,9981 | 0,0003 | 0,0145 |
| | 50 | k = 2,0426; a = 7,0055; g = 1,9854 | 0,9875 | 0,0022 | 0,0401 |
| Wang và Singh | 40 | a = -0,7201; b = 0,1280 | 0,9343 | 0,0068 | 0,0771 |
| | 45 | a = -0,9958; b = 0,2334 | 0,9065 | 0,0094 | 0,0967 |
| | 50 | a = -1,2598; b = 0,3652 | 0,8787 | 0,0139 | 0,1178 |

Ghi chú: k, k₀ là hằng số tốc độ sấy (giờ⁻¹) và a, b, c, g, n là hệ số của mô hình.

3.1.2. Hệ số khuếch tán ẩm và năng lượng hoạt hóa

Bảng 3 trình bày các giá trị của hệ số khuếch tán ẩm (D_{eff}) và năng lượng hoạt hóa (E_a) của rau má khi được sấy chân không ở ba mức nhiệt độ: 40, 45 và 50°C. Đây là những tham số quan trọng giúp hiểu rõ cơ chế và tốc độ di chuyển ẩm trong vật liệu sấy. Các giá trị D_{eff}, có thể thấy rõ một xu hướng tăng tỷ lệ thuận với nhiệt độ sấy. Cụ thể, D_{eff} tăng từ 5,51×10⁻¹² m².s⁻¹ ở 40°C, lên 7,72×10⁻¹² m².s⁻¹ ở

45°C, và đạt mức cao nhất là 8,96×10⁻¹² m².s⁻¹ ở 50°C. Sự gia tăng này phản ánh mối quan hệ trực tiếp giữa nhiệt độ và khả năng khuếch tán của nước bên trong rau má. Nhiệt độ cao hơn cung cấp năng lượng nhiệt lớn hơn, giúp các phân tử nước di chuyển linh hoạt và dễ dàng hơn qua các mao quản và cấu trúc tế bào của vật liệu, từ đó đẩy nhanh quá trình thoát ẩm. Điều này là đặc trưng cơ bản của hầu hết các quá trình sấy, nhiệt độ đóng vai trò chủ đạo trong việc tăng động lực truyền ẩm. Giá trị D_{eff} trên

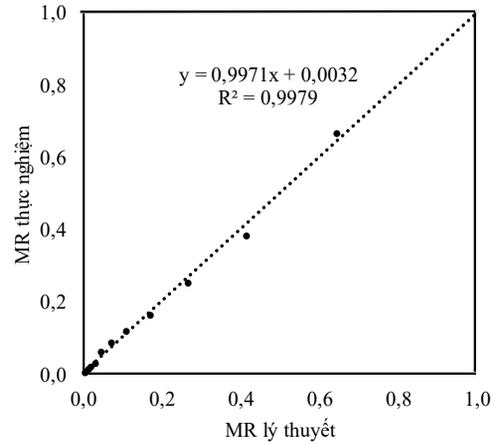
các nguyên liệu khác nhau cũng có xu hướng tăng lên khi tăng nhiệt độ sấy tương tự. Alara et al. (2019) đã nghiên cứu trên cây lá đắng về hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng (D_{eff}) cũng có xu hướng tăng lên khi tăng nhiệt độ sấy 40 - 60°C được tìm thấy trong khoảng từ $4,55 \times 10^{-12}$ đến $5,48 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Tương tự, Doymaz (2004) đã nghiên cứu trên lá nguyệt quế sấy chân không với hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng (D_{eff}) tăng theo nhiệt độ từ 50 đến 65°C, dao động từ $1,304 \times 10^{-9}$ đến $2,072 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Sự khác biệt về D_{eff} giữa các nguyên liệu này cho thấy mỗi loại vật liệu có cấu trúc và tính chất riêng, dẫn đến khả năng truyền ẩm khác nhau. Rau má có hệ số khuếch tán ẩm nhỏ hơn so với lá nguyệt quế, tuy nhiên lại cao hơn so với cây lá đắng, điều này có thể liên quan đến cấu trúc vật lý và hóa học của từng loại nguyên liệu khác nhau dẫn đến sự khác biệt này.

Bảng 3. Hệ số khuếch tán và năng lượng hoạt hóa ở các nhiệt độ sấy chân không khác nhau

| Nhiệt độ sấy (°C) | $D_{eff} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | $E_a (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ |
|-------------------|--|---|
| 40 | $5,51 \times 10^{-12}$ | 40,89 |
| 45 | $7,72 \times 10^{-12}$ | |
| 50 | $8,96 \times 10^{-12}$ | |

Về năng lượng hoạt hóa (E_a), giá trị được ghi nhận khi sấy rau má trong điều kiện chân không là 40,89 kJ.mol⁻¹. Năng lượng hoạt hóa là năng lượng tối thiểu cần thiết để các phân tử nước bên trong vật liệu có thể vượt qua các rào cản năng lượng và di chuyển ra khỏi vật liệu. Giá trị E_a này cho thấy mức độ khó khăn của quá trình khuếch tán ẩm. Ở nghiên cứu này giá trị E_a tương đối thấp hơn so với một số vật liệu khác như năng lượng hoạt hóa (E_a) ước tính là 64,56 kJ.mol⁻¹ đối với lá nguyệt quế sấy chân không (Doymaz, 2004) và 57,98 kJ.mol⁻¹ đối với lá bạc hà (Guo et al., 2022), có thể thấy rằng rau má không yêu cầu quá nhiều năng lượng để nước thoát ra ngoài trong điều kiện sấy chân không, góp phần vào hiệu quả của quá trình sấy. Tuy nhiên, ở một nghiên cứu khác về quá trình sấy các loài thực vật tương tự cũng đã báo cáo các giá trị năng lượng hoạt hóa thấp hơn. Cụ thể, các giá trị được ghi nhận ở hạt cảm quỳ là 33,53 kJ.mol⁻¹ (Correa et al., 2011), 35,82 kJ.mol⁻¹ đối với mô mềm của dưa chuột (Pala & Ergin, 2021). Đồng thời, giá trị năng lượng hoạt hóa của nghiên cứu này tương đồng với các nghiên cứu khác sử dụng vật liệu tương tự. Cụ thể, Tran et

al. (2024) đã báo cáo giá trị E_a là 39,44 kJ.mol⁻¹ cho lá tía tô sấy chân không, 40,55 kJ.mol⁻¹ đối với lá cây đào châu Phi (Adeyi et al., 2018) và 40,80 kJ.mol⁻¹ đối với ớt chuông đỏ (Vega-gálvez et al., 2008).



Hình 2. Sự tương thích giữa MR thực nghiệm và lý thuyết theo mô hình Lewis ở 45°C

Để khẳng định độ tin cậy và khả năng ứng dụng của mô hình Lewis trong việc biểu diễn động học sấy rau má trong điều kiện chân không, việc đánh giá kết quả thực nghiệm thông qua mô hình dự đoán lý thuyết đã được tiến hành trong nghiên cứu. Kết quả này, bao gồm việc so sánh tỷ lệ ẩm thu được từ thực nghiệm với các giá trị tỷ lệ ẩm được tính toán dựa trên mô hình Lewis. Việc so sánh này được thực hiện cụ thể tại nhiệt độ 45°C, nhiệt độ được xác định là phù hợp cho quá trình sấy rau má trong điều kiện chân không.

Kết quả của phân tích cho thấy sự tương đồng cao giữa dữ liệu thực nghiệm và dự đoán của mô hình. Các điểm dữ liệu thực nghiệm phân bố rất gần với một đường thẳng lý tưởng có độ dốc 45 độ, cho thấy mối quan hệ tuyến tính mạnh và sự phù hợp giữa kết quả thực nghiệm với mô hình Lewis dự đoán. Hệ số xác định R^2 đạt mức rất cao là 0,9979, điều này chứng minh rằng mô hình Lewis có khả năng ứng dụng gần như hoàn toàn sự biến thiên của độ ẩm theo thời gian trong quá trình sấy chân không rau má ở 45°C, kết quả đã khẳng định tính chính xác và hiệu quả của nghiên cứu.

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy chân không đến hoạt độ nước, màu sắc, các hợp chất sinh học của bột rau má và khả năng khử gốc tự do DPPH của bột rau má

3.2.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy chân không đến hoạt độ nước và màu sắc của bột rau má

Kết quả Bảng 4 cho thấy ảnh hưởng của sấy chân không đến hoạt độ nước của bột rau má, nhiệt độ sấy là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ hoạt động của nước (a_w) của sản phẩm cuối cùng. Cụ thể, khi tăng nhiệt độ sấy từ 40 lên 50°C, giá trị a_w của bột rau má giảm đáng kể ($p < 0,05$). Kết quả cho thấy, tại nhiệt độ 40°C, a_w của bột rau má là 0,476, trong khi ở 50°C, a_w giảm xuống 0,440.

Bảng 4. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy chân không đến hoạt độ nước và màu sắc của bột rau má

| Nhiệt độ sấy (°C) | a_w | Giá trị màu sắc | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | L^* | a^* | b^* |
| Rau má sau chân | - | 64,02±0,12 ^a | -6,86±0,12 ^c | 27,48±0,05 ^a |
| 40 | 0,476±0,01 ^a | 63,29±0,44 ^{ab} | -6,65±0,11 ^{bc} | 27,12±1,42 ^a |
| 45 | 0,457±0,02 ^{ab} | 62,91±0,38 ^b | -6,46±0,17 ^b | 27,05±0,80 ^a |
| 50 | 0,440±0,02 ^b | 59,98±0,67 ^c | -5,56±0,34 ^a | 19,32±0,33 ^b |

Ghi chú: (-) Không xác định, Các giá trị trung bình có cùng chữ cái đi kèm trong cùng một cột thì khác biệt không có ý nghĩa thống kê ở mức 5%.

Kết quả nghiên cứu (Bảng 4) cho thấy các giá trị màu sắc L^* , a^* , b^* của rau má được sấy bằng phương pháp sấy chân không khác biệt có ý nghĩa thống kê ở các nhiệt độ sấy ($p < 0,05$). Hầu hết các mẫu sau sấy ở các mức nhiệt độ khác nhau đều cho thấy các giá trị màu sắc có xu hướng giảm kém hơn so với mẫu trước khi sấy (rau má sau chân), mục tiêu chính là duy trì tối đa các đặc tính màu sắc của sản phẩm đặc biệt là độ sáng (L^*) và độ xanh của mẫu (a^*) sau khi sấy ở các mức nhiệt độ khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho thấy các giá trị màu sắc được duy trì tốt nhất ở mức nhiệt độ 40°C và khác biệt không có ý nghĩa thống kê so với mẫu đối chứng, độ sáng (L^*) cao nhất với (63,29±0,44), a^* đạt -6,65±0,11 và b^* đạt 27,12±1,42. Tuy nhiên, mẫu được sấy ở 45°C cho thấy sự khác biệt không có ý nghĩa thống kê so với mẫu 40°C ($p > 0,05$). Theo báo cáo của Tran et al. (2024), lá tía tô được sấy trong điều kiện chân không ở 45°C, hầu hết các giá trị màu sắc đều kém hơn so với nghiên cứu này với độ sáng L^* là 48,41±0,91, a^* là 0,75±0,05 và b^* là 8,89±0,54. Đồng thời, kết quả báo cáo này cũng cho thấy khi tăng nhiệt độ trong môi trường chân không từ 35 đến 55°C làm giảm đáng kể các giá trị màu sắc. Khi tăng các mức nhiệt độ sấy dẫn đến giá trị

Độ hoạt động của nước (a_w) là một thông số quan trọng trong việc thiết kế và kiểm soát các quá trình sấy khô, chịu ảnh hưởng bởi nhiệt độ và môi trường xử lý (Ozdemir et al., 2004). Sự giảm a_w được ghi nhận là do hiệu quả loại bỏ ẩm cao hơn ở nhiệt độ sấy cao trong điều kiện chân không, giúp ức chế hoạt động của nước tự do và kéo dài thời gian bảo quản của bột rau má. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Tripathy and Srivastav (2023) về ảnh hưởng của nhiệt độ sấy chân không đến rau má, kết quả nghiên cứu cho thấy xu hướng giảm a_w của rau má sau sấy, a_w giảm từ 0,381 xuống 0,332 khi nhiệt độ sấy tăng (40 - 50°C) do tốc độ bay hơi nước tự do tăng lên trong quá trình sấy.

độ sáng L^* giảm, a^* tăng lên (kém xanh lá hơn) và b^* giảm, nguyên nhân có thể được giải thích thời gian sấy kéo dài dẫn đến sự thay đổi màu sắc có thể là do sự phân hủy các sắc tố như chlorophyll và carotenoids, cũng như sự hình thành các hợp chất màu nâu do phản ứng Maillard hoặc oxy hóa ở nhiệt độ cao hơn (Senevirathna et al., 2021). Kết quả từ các nghiên cứu khác cũng chỉ ra xu hướng tương tự, Widjaja and Wijayapala (2020) đã báo cáo rằng các phương pháp sấy ảnh hưởng đến màu sắc của bột rau má, với xu hướng mất màu xanh lá và tăng độ sẫm màu khi nhiệt độ sấy tăng. Tương tự, Das and Singh (2018) đã sấy chân không rau bina (spinach) cũng nhận thấy sự giảm L^* và thay đổi a^* , b^* khi nhiệt độ sấy tăng.

3.2.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy chân không đến hàm lượng các hoạt chất sinh học và khả năng khử gốc tự do DPPH của bột rau má

Kết quả từ Bảng 5 cho thấy sấy chân không ở các nhiệt độ khảo sát có ảnh hưởng đáng kể đến các hàm lượng các chất chống oxy hóa và khả năng khử gốc tự do DPPH của sản phẩm ($p < 0,05$).

Bảng 5. TPC, TFC và khả năng khử gốc tự do DPPH của bột rau má ở các nhiệt độ sấy khác nhau

| Nhiệt độ sấy (°C) | TPC (mg GAE/g) | TFC (mg QE/g) | DPPH (mg TE/g) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Rau má sau chần | 118,10±2,85 ^a | 110,10±0,44 ^a | 10,20±0,61 ^a |
| 40 | 69,21±2,28 ^b | 37,01±1,41 ^b | 9,01±0,02 ^b |
| 45 | 67,33±0,69 ^b | 36,86±0,87 ^b | 8,86±0,21 ^b |
| 50 | 57,72±1,03 ^c | 35,04±0,34 ^c | 8,55±0,28 ^b |

Ghi chú: Các giá trị trung bình có cùng chữ cái đi kèm trong cùng một cột thì khác biệt không có ý nghĩa thống kê ở mức 5%

Bảng 5 cho thấy, TPC trong bột rau má giảm dần khi nhiệt độ sấy chân không tăng lên. Cụ thể, ở 40°C TPC đạt 69,21±2,28 mg GAE/g, trong khi ở 45°C là 67,33±0,69 mg GAE/g, và giảm xuống còn 57,72±1,03 mg GAE/g khi nhiệt độ đạt 50°C, khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$). TPC của bột rau má duy trì trong khoảng 48,87 - 58,60% khi so với mẫu đối chứng qua các mức nhiệt độ sấy. Kết quả này tương đồng với báo cáo trên quả hắc mai biển của Li et al. (2021) khi cho rằng hầu hết các hoạt tính sinh học rất nhạy cảm với nhiệt độ trong thời gian dài, dẫn đến sự phá hủy các hoạt tính sinh học. Việc sấy chân không được thực hiện trong điều kiện hạn chế oxy, giúp ngăn chặn quá trình oxy hóa của phenolic, do đó sấy chân không giữ lại TPC cao hơn sấy đối lưu được báo cáo trên lá tía tô (TPC duy trì trong khoảng 40,60 - 44,16%) (Tran et al., 2024). Tuy nhiên, việc tăng nhiệt độ vẫn có thể thúc đẩy quá trình phân hủy các hợp chất phenolic, làm giảm hàm lượng tổng số các hợp chất này.

Tương tự như TPC, TFC trong bột rau má cũng có xu hướng giảm khi nhiệt độ sấy chân không tăng. Cụ thể, TFC đạt 37,01±1,41 mg QE/g ở 40°C, giảm nhẹ xuống 36,86±0,87 mg QE/g ở 45°C, và có sự giảm đáng kể hơn ở 50°C với 35,04±0,34 mg QE/g. Sự khác biệt giữa 40°C và 50°C là có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$). Theo nghiên cứu của Tran et al. (2024), kết quả cho thấy khi tăng nhiệt độ sấy chân không từ 35 lên 55°C, TFC cũng có xu hướng giảm từ 55,84±0,50 xuống còn 50,43±1,62 mg QE/g, đồng thời TFC của báo cáo này đối với lá tía tô cao hơn so với nghiên cứu hiện tại. Kết quả nghiên cứu của Xu et al. (2022) trên hoa cúc cho thấy TFC cũng cao hơn so với nghiên cứu hiện tại với TFC dao động trong khoảng từ 38,67±0,85 đến 53,75±0,11 mg QE/g. Kết quả báo cáo của Arabshahi et al. (2007) trên lá chùm ngây cho thấy quá trình xử lý nhiệt có thể tạo ra sự hình thành các hợp chất với đặc tính chống oxy hóa hoặc cải thiện khả năng chống oxy hóa của các chất chống oxy hóa tự nhiên; tuy nhiên trong trường hợp này, việc tăng nhiệt độ đã dẫn đến sự suy giảm đáng kể. Mặc dù môi trường ít oxy của sấy chân không có lợi sản phẩm trong quá trình sấy, nhưng khi nhiệt độ tăng, dù chỉ trong phạm vi hẹp

từ 40 đến 50°C, vẫn có thể gây ra sự suy giảm các hợp chất flavonoid, ảnh hưởng đến chất lượng tổng thể của rau má.

Khả năng khử gốc tự do DPPH của bột rau má cũng giảm theo nhiệt độ sấy chân không. Ở 40°C, khả năng khử gốc tự do DPPH là 9,01±0,02 mg TE/g, giảm xuống 8,86±0,21 mg TE/g ở 45°C và đạt mức thấp nhất là 8,55±0,28 mg TE/g ở 50°C và khác biệt có ý nghĩa thống kê so với mẫu đối chứng ($p < 0,05$), đồng thời khả năng khử gốc tự do DPPH cũng được duy trì khoảng 83,82 - 88,33% so với mẫu đối chứng. Kết quả này cao hơn so với nghiên cứu trên hoa cúc được báo cáo bởi Xu et al. (2022) với khả năng khử gốc tự do khi sấy trong điều kiện chân không từ 35 đến 55°C trong 3 - 4 giờ sấy, khả năng khử gốc tự do DPPH đạt từ 7,02±0,31 đến 7,37±0,30 mg TE/g. Điều này phản ánh sự suy giảm của TPC và TFC, vì các hợp chất phenolic và flavonoid là những chất chống oxy hóa chính đóng góp vào khả năng khử gốc tự do (Xu et al., 2022). Kết quả nghiên cứu của How and Siow (2020) trên bột đậu dòi về ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến khả năng trung hòa DPPH cũng chỉ ra rằng việc tăng nhiệt độ quá mức có thể làm suy giảm khả năng khử gốc tự do và khả năng chống oxy hóa của sản phẩm.

Tóm lại, mặc dù nhiệt độ sấy ở 40°C đã ghi nhận hàm lượng TPC, TFC cao và khả năng khử gốc tự do DPPH tốt, nhưng sự khác biệt này lại không có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$) so với mẫu được sấy ở 45°C. Mặt khác, việc sấy ở 45°C có thể rút ngắn đáng kể là thời gian sấy, cụ thể là chỉ mất 3 giờ, trong khi sấy ở 40°C cần tới 3,75 giờ. Việc giảm thời gian sấy không chỉ giúp tiết kiệm năng lượng mà còn có thể hạn chế nguy cơ phát sinh các phản ứng phân hủy không mong muốn kéo dài. Ngược lại, khi nhiệt độ tăng lên 50°C trong quá trình sấy chân không, các hợp chất chống oxy hóa đã bị phân hủy đáng kể, dẫn đến hiệu quả loại bỏ gốc tự do giảm đi rõ rệt, với sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$). Vì vậy, dựa trên sự cân bằng giữa hiệu quả bảo toàn hoạt chất và rút ngắn thời gian sấy, nhiệt độ 45°C được xem là nhiệt độ phù hợp cho quá trình sấy chân không rau má, giúp ổn định màu sắc, duy trì các hợp

chất chống oxy hóa và khả năng khử gốc tự do DPPH của bột rau má.

3.3. Mối tương quan giữa các giá trị màu sắc, độ hoạt động của nước, các hợp chất sinh học và khả năng khử gốc tự do DPPH của bột rau má sấy chân không

Kết quả Bảng 6 trình bày các hệ số tương quan Pearson (*r*) giữa các chỉ tiêu màu sắc (*L**, *a**, *b**), TPC, TFC, khả năng khử gốc tự do DPPH và độ hoạt động của nước (*a_w*) trong rau má sấy chân không. Các chỉ tiêu màu sắc có mối tương quan mạnh mẽ với nhau và với hàm lượng các hợp chất chống oxy hóa: độ sáng (*L**) và độ vàng (*b**) có tương quan thuận với TPC và TFC (*L**, TPC: *r* = 0,9824; *b**, TPC: *r* = 0,9676), trong khi độ xanh của lá (*a**) tương quan nghịch với TPC (*r* = -0,8379). Điều này thể hiện rằng sự thay đổi về màu sắc trong quá trình sấy có thể phản ánh sự biến đổi của TPC và TFC. Về khả năng khử gốc tự do DPPH, chỉ tiêu *a** (*r* = -0,7783) và *b** (*r* = 0,7329) cho thấy mối tương quan rõ ràng với DPPH, cụ thể rau má càng xanh (*a** âm hơn) hoặc càng vàng (*b** tăng) có xu hướng thể hiện

khả năng khử gốc tự do DPPH tốt hơn. TPC và TFC có xu hướng tương quan thuận với DPPH. Đối với độ hoạt động của nước (*a_w*), các hệ số tương quan cho thấy *a_w* có mối liên hệ với các chỉ tiêu màu sắc như *L** (*r* = 0,5939), *a** (*r* = -0,4536), và *b** (*r* = 0,5728). Ngoài ra, *a_w* cũng có mối liên hệ với TPC (*r* = 0,6023), TFC (*r* = 0,5821) và DPPH (*r* = 0,5442). Theo báo cáo trên một số nguyên liệu như vỏ bưởi da xanh, lá rau sam và vỏ bã nho đỏ, sự gia tăng nhiệt độ sấy làm suy giảm các hoạt chất sinh học, từ đó dẫn đến giảm suy giảm khả năng khử gốc tự do DPPH, đồng thời sự suy giảm của các hợp chất này thường dẫn đến sự thay đổi về màu sắc làm màu sắc nguyên liệu giảm đi, đồng thời thể hiện tương quan giữa các chỉ tiêu này (Tran et al., 2021; Youssef and Mokhtar, 2014; Larrauri et al., 1997). Các mối liên hệ này cho thấy rằng các thay đổi về màu sắc và hàm lượng hợp chất sinh học có thể đi kèm với sự biến đổi của độ ẩm tự do trong sản phẩm sấy. Việc nắm rõ các mối tương quan này là cần thiết để điều chỉnh quá trình sấy, nhằm đạt được sản phẩm rau má sấy có chất lượng mong muốn về màu sắc, hàm lượng các hoạt chất của vật liệu sau sấy.

Bảng 6. Hệ số tương quan giữa các chỉ tiêu

| Chỉ tiêu | <i>L*</i> | <i>a*</i> | <i>b*</i> | TPC | TFC | DPPH | <i>a_w</i> |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------------------|
| <i>L*</i> | 1 | -0,8179** | 0,9505** | 0,9824** | 0,7631* | 0,5698 | 0,5939 |
| <i>a*</i> | | 1 | -0,8085** | -0,8379** | -0,6379 | -0,7783* | -0,4536 |
| <i>b*</i> | | | 1 | 0,9676** | 0,7575* | 0,7329* | 0,5728 |
| TPC | | | | 1 | 0,8185** | 0,6632 | 0,6023 |
| TFC | | | | | 1 | 0,6188 | 0,5821 |
| DPPH | | | | | | 1 | 0,5442 |
| <i>a_w</i> | | | | | | | 1 |

Ghi chú: *N* = 9; (*) kết quả biểu thị sự tương quan ở mức ý nghĩa 5%; (**) 1% và DPPH: Khả năng khử gốc tự do DPPH.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã xác định được mô hình Lewis phỏng đoán là phù hợp để mô tả quá trình sấy chân không rau má, với điều kiện sấy ở 45°C không chỉ đẩy nhanh tốc độ thoát ẩm, rút ngắn thời gian sấy mà còn duy trì được màu sắc, hàm lượng các hợp chất chống oxy hóa (TPC, TFC) và khả năng khử

gốc tự do DPPH. Các kết quả cũng chỉ ra mối liên hệ chặt chẽ giữa các chỉ tiêu chất lượng. Do đó, phương pháp sấy chân không ở 45°C có tiềm năng lớn để sản xuất bột rau má chất lượng cao, đóng góp vào việc phát triển các sản phẩm thực phẩm. Đồng thời, cần có các nghiên cứu được thực hiện thêm để đánh giá sự ổn định của sản phẩm bột rau má trong quá trình bảo quản.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

Adeyi, O., Adeyi, A. J., & Oke, E. O. (2018). Empirical modeling of thin layer drying characteristics of nauclea latifolia leaves. *Journal of the Nigerian Society of Chemical Engineers*, 13(10), 17-25.

Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Olalere, O. A. (2019). Mathematical modelling and

morphological properties of thin layer oven drying of Vernonia amygdalina leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(3), 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.09.003>

Arabshahi-D, S., Devi, D. V., & Urooj, A. (2007). Evaluation of antioxidant activity of some plant

- extracts and their heat, pH and storage stability. *Food Chemistry*, 100(3), 1100-1105. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.014>
- Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4-6), 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00130-2)
- Bai, J. (2014). Drying characteristics and quality of seedless grapes under vacuum drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1), 170-177. <https://doi.org/10.1111/j.1745.4549.2012.00770.x>
- Correa, R. A., Resende, O., Goneli, A. L. D., & Mauger, C. L. R. (2011). Drying kinetics and energy activation of jatropha curcas L. seeds. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54, 671-678. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i4.7079>
- Das, S. K., & Singh, B. (2018). Effect of vacuum drying on physicochemical and antioxidant properties of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(3), e13550. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13550>
- Doymaz, I. (2004). Drying characteristics of laurel leaves under vacuum. *Journal of Food Engineering*, 62(1), 67-73. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00142-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00142-0)
- Guo, H.-L., Chen, Y., Xu, W., Xu, M.-T., Sun, Y., Wang, X.-C., Wang, X.-Y., Luo, J., Zhang, H., & Xiong, Y.-K. (2022). Assessment of drying kinetics, textural and aroma attributes of Mentha haplocalyx leaves during the hot air thin-layer drying process. *Foods*, 11(6), 784. <https://doi.org/10.3390/foods11060784>
- Hashim, P., Sidek, H., Helan, M. H. M., Sabariah, M. N., & Khoo, Y. C. (2011). In vitro antioxidant activity, total phenolic and flavonoid content of *Centella asiatica*. *International Food Research Journal*, 18(4), 1211-1215. <https://doi.org/10.3390/molecules16021310>
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), T69-T74. <https://doi.org/10.5555/19621700719>
- How, Y. K., & Siow, L. F. (2020). Effects of convection-, vacuum- and freeze-drying on antioxidant, physicochemical properties, functional properties and storage stability of stink bean (*Parkia speciosa*) powder. *Journal of Food Science and Technology*, 57(12), 4637-4648. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04501-7>
- Koua, K. B., Soro, D., & Kouame, G. (2017). Drying shrinkage of food materials: A review. *Food Reviews International*, 33(4), 387-410. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12375>
- Larrauri, J. A., Rupérez, P., & Saura-Calixto, F. (1997). Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peels. *Journal of agricultural and food chemistry*, 45(4), 1390-1393. <https://doi.org/10.1021/jf960282f>
- Li, Y., Li, P., Yang, K., He, Q., Wang, Y., Sun, Y., He, C., & Xiao, P. (2021). Impact of drying methods on phenolic components and antioxidant activity of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) berries from different varieties in China. *Molecules*, 26(23), 7189. <https://doi.org/10.3390/molecules26237189>
- Matias D. S., G., Bissaro, C. A., de Matos Jorge, L. M., & Rossoni, D. F. (2019). The fractional calculus in studies on drying: A new kinetic semi-empirical model for drying. *Journal of Food Process Engineering*, 42(1), e12955. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12955>
- Nguyen, N. M. P., Le, T. T., Vissenaekens, H., Gonzales, G. B., Van Camp, J., Smaghe, G. & Raes, K. (2019). In vitro antioxidant activity and phenolic profiles of tropical fruit by-products. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 1169-1178. <https://doi.org/10.1111/jifs.14093>
- Nguyen, T. V., Vuong, Q. V., Bowyer, C. M., Van Altena, A. I., & Scarlett, J. C. (2015). Effects of different drying methods on bioactive compound yield and antioxidant capacity of *Phyllanthus amarus*. *Drying Technology*, 33(8), 1006-1017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1022920>
- Ozdemir, M., & Floros, J. D. (2004). Active food packaging technologies. *Critical reviews in food science and nutrition*, 44(3), 185-193. <https://doi.org/10.1080/10408690490441578>
- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layers* (Unpublished master's thesis). Purdue University.
- Pala, M., & Ergin, D. (2021). Drying kinetics and effective moisture diffusivity of mint leaves in a vacuum dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1), e15082. <https://doi.org/10.3136/fstr.27.181>
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Pham, D. C., Nguyen, H. C., Nguyen, T. H. L., Ho, H. L., Trinh, T. K., Riyaphan, J., & Weng, C. F. (2020). Optimization of ultrasound - assisted extraction of flavonoids from *Celastrus hindsii* leaves using response surface methodology and evaluation of their antioxidant and antitumor

- activities. *BioMed Research International*, 1, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2020/3497107>
- Roberts, J. S., Kidd, D. R., & Padilla-Zakour, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030>
- Sacilik, K., & Elicin, A. K. (2006). *The thin layer drying characteristics of organic apple slices*. *Journal of Food Engineering*, 73, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.024>
- Santos, J., Herrero, M., Mendiola, J. A., Oliva-Teles, M. T., Ibáñez, E., Delerue-Matos, C., & Oliveira, M. B. P. P. (2014). Fresh-cut aromatic herbs: Nutritional quality stability during shelf-life. *LWT-Food Science and Technology*, 59(1), 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.019>
- Senevirathna, S. S. J., Ramli, N. S., Azman, E. M., Juhari, N. H., & Karim, R. (2021). Optimization of the drum drying parameters and citric acid level to produce purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) powder using response surface methodology. *Foods*, 10(6), 1378. <https://doi.org/10.3390/foods10061378>
- Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1980). *A model for ear corn drying*. *Transactions of the ASAE*, 5, 1261-1265. <https://doi.org/10.13031/2013.34757>
- Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209-216. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00065-1)
- Tran, N. C., Le, N. U., Kieu, V. M., Nguyen, A. T., Luu, D. T., & Nguyen P. M. N. (2024). Effects of drying techniques on moisture content, color and bioactive compounds of *Perilla frutescens* leaves. *Journal of Agriculture and Rural Development*, (9), 66–73 (in Vietnamese).
- Tran, N. C., Le, T. N., Tran, H. T. C., Tran, N. T., Luu, D. T., Nguyen, P. M. N., & Do, N. T. T. (2023). Influence of drying method on the quality of *Ehretia asperula* Zoll. & Mor. leaf powder. *Journal of Agriculture and Rural Development*, (2), 273–280 (in Vietnamese).
- Tran, N. T. Y., Dao, P. T., Tran, L. T. K., Nguyen, D. D., Ung, D. T., Huynh, L. B., Mai, C. H., Nguyen, D. T., Nguyen, A. V., Huynh, P. X., & Tran, Q. N. (2021). The effect of drying temperature on bioactive compounds in 'Da Xanh' pomelo peel (*Citrus maxima* Burm. Merr.). *Can Tho University Journal of Science*, 57, 177-182 (in Vietnamese). <https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2021.020>
- Tripathy, S., & Srivastav, P. P. (2023). Effect of dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma-activated water pre-treatment on the drying properties, kinetic parameters, and physicochemical and functional properties of *Centella asiatica* leaves. *Chemosphere*, 332, 138901. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138901>
- Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., Bilbao-Sáinz, C., Yagnam, F., & Rojas, A. (2008). Mass transfer kinetics during convective drying of red pepper var. Hungarian (*Capsicum annum* L.): Mathematical modeling and evaluation of kinetic parameters. *Journal of Food Process Engineering*, 31(1), 120-137. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00145.x>
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., & Wratten, F. T. (1985). *Effects of drying air parameters on rice drying models*. *Transactions of the ASAE*, 28, 296-301. <https://doi.org/10.13031/2013.32245>
- Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 11, 668-672.
- White, G. M., Ross, I. J., & Ponelert, R. (1981). Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*, 24, 466 - 468. <https://doi.org/10.13031/2013.34276>
- Widjaja, R., & Wijayapala, L. K. (2020). Effect of different drying methods on the physicochemical and antioxidant properties of *Centella asiatica* leaves. *Journal of Food Science and Technology*, 57(12), 4381-4390. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04473-5>
- Xie, L., Shi, X., Pu, H., Sun, D. W., & Wang, Y. (2017). Effects of vacuum drying on drying characteristics and quality of goji berries (*Lycium barbarum* L.). *Food and Bioprocess Technology*, 10(11), 1957-1967. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1959-1>
- Xu, H., Wu, M., Zhang, T., Gao, F., Zheng, Z., & Li, Y. (2022). Effects of different pulsed vacuum drying strategies on drying kinetics, phenolic composition, and antioxidant capacity of chrysanthemum (*Imperial chrysanthemum*). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(4), 236-242. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221504.7359>
- Youssef, K. M., & Mokhtar, S. M. (2014). Effect of drying methods on the antioxidant capacity, color and phytochemicals of *Portulaca oleracea* L. leaves. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 4(6), 1-6. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000322>