

ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ SẤY BƠM NHIỆT ĐẾN ĐỘ ẨM, MÀU SẮC, HÀM LƯỢNG POLYPHENOL VÀ SAPONIN TỔNG SỐ CỦA BỘT DÂY RAU MÁ THỦY CANH

NGUYỄN TRUNG TÍNH¹ - VÕ THỊ THU THÚY¹ - VƯƠNG BẢO THY¹
- VÕ THANH BEO¹ - TRẦN HỮU THANH HUY¹ - BÙI THẾ VINH^{1*}

¹Trường Đại học Cửu Long

Mekong University

*Email: btvinhvnm@yahoo.com.vn

Ngày nhận bài: 9/7/2026

Ngày sửa bài: 24/7/2026

Ngày duyệt đăng bài: 10/8/2026

Tóm tắt:

Nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ sấy bơm nhiệt (40, 45, 50 và 55°C) đến độ ẩm, các chỉ tiêu màu sắc (L^* , a^* , b^*), hàm lượng polyphenol tổng số (TPC) và saponin tổng số (TSC) của bột dây rau má thủy canh (*Centella asiatica* (L.) Urban). Kết quả cho thấy, nhiệt độ sấy có ảnh hưởng rõ rệt đến chất lượng sản phẩm: với độ sáng L^* giảm từ $64,07 \pm 0,07$ xuống $59,26 \pm 0,09$; sắc xanh a^* nhạt dần với giá trị tăng từ $(-6,74 \pm 0,07)$ lên $(-5,25 \pm 0,08)$; sắc vàng b^* giảm dần từ $27,55 \pm 0,11$ xuống $22,17 \pm 0,10$. Hàm lượng TPC giảm tuyến tính, từ $18,40 \pm 0,26$ xuống $16,87 \pm 0,32$ mg GAE/g khi nhiệt độ sấy tăng, trong khi TSC biến đổi theo quy luật phi tuyến tính, đạt cao nhất 5,15% tại 50 °C. Độ ẩm sản phẩm cuối cùng ổn định trong khoảng 9,9-10,8%. Trên cơ sở tổng hợp các chỉ tiêu khảo sát, nhiệt độ sấy khoảng 45°C - 50°C được đề xuất là thông số công nghệ phù hợp, cân bằng giữa giá trị cảm quan và hoạt tính sinh học, làm cơ sở khoa học cho việc xây dựng quy trình sản xuất bột rau má thủy canh ứng dụng trong thực phẩm chức năng.

Từ khóa: *Centella asiatica* (L.) Urban, sấy bơm nhiệt, hàm ẩm, màu sắc, polyphenol tổng số, saponin tổng số

Effects of heat-pump drying temperature on moisture content, color, total polyphenol content, and total saponin content of hydroponic pennywort vine powder

Abstract:

This study evaluates the effects of heat-pump drying temperatures of 40, 45, 50, and 55°C on moisture content, color parameters, total polyphenol content (TPC), and total saponin content (TSC) of hydroponic pennywort (*Centella asiatica* (L.) Urban) vine powder. Increasing temperature reduced lightness, green coloration, yellow coloration, and TPC, which declined from 18.40 ± 0.26 to 16.87 ± 0.32 mg GAE/g. In contrast, TSC followed a nonlinear pattern and reached a maximum of 5.15% at 50°C. Final moisture content remained within 9.9 - 10.8%. Considering both sensory attributes and bioactive-compound retention, a drying temperature range of 45 - 50°C is recommended as suitable for producing hydroponic pennywort vine powder for potential functional-food applications.

Keywords: *Centella asiatica* (L.) Urban, heat-pump drying, moisture content, color, total polyphenol content, total saponin content

1. Đặt vấn đề

Rau má (*Centella asiatica* (L.) Urban) là một trong những cây dược liệu truyền thống được sử dụng rộng rãi trong y học cổ truyền phương Đông cũng như trong công nghiệp dược phẩm và mỹ phẩm hiện đại. Giá trị dược tính của rau má chủ yếu được quy cho 2 nhóm hợp chất sinh học chính: các saponin triterpenoid (điển hình là asiaticoside và madecassoside cùng các aglycon tương ứng asiatic acid, madecassic acid) và các hợp chất polyphenol, có phổ hoạt tính sinh học đa dạng như chống oxy hóa, kháng viêm, bảo vệ thần kinh, thúc đẩy làm lành vết thương và tổng hợp collagen (Bandopadhyay et al., 2023). Nhờ các đặc tính này, rau má được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất thực phẩm chức năng, dược phẩm và mỹ phẩm chăm sóc da.

Trong những năm gần đây, mô hình canh tác thủy canh ngày càng được ứng dụng phổ biến để sản xuất rau ăn lá và cây dược liệu nhờ khả năng kiểm soát chặt chẽ dinh dưỡng, môi trường sinh trưởng, hạn chế tồn dư hóa chất bảo vệ thực vật và rút ngắn chu kỳ canh tác. Nhiều nghiên cứu cho thấy điều kiện thủy canh, đặc biệt là thành phần và nồng độ dung dịch dinh dưỡng cùng các yếu tố stress sinh lý được kiểm soát có chủ đích, có thể làm gia tăng đáng kể khả năng tích lũy các hợp chất chuyển hóa thứ cấp có hoạt tính sinh học ở thực vật so với phương thức canh tác trên đất truyền thống (Aires, 2018). Tuy nhiên, cũng như nhiều loại rau dược liệu khác, rau má thủy canh sau thu hoạch có hàm lượng nước cao, dễ bị hư hỏng do hô hấp, vi sinh vật và enzyme nội bào, gây khó khăn cho việc bảo quản, vận chuyển và chế biến ở quy mô công nghiệp.

Sấy khô là công đoạn then chốt trong quy trình chế biến bột dược liệu, giúp hạ thấp hoạt độ nước của nguyên liệu xuống ngưỡng an toàn cho bảo quản dài ngày, đồng thời phải hạn chế tối đa sự tổn thất các hợp chất có hoạt tính sinh học vốn nhạy cảm với nhiệt độ (Jin et al., 2018). Trong số các kỹ thuật sấy hiện có, công nghệ sấy bơm nhiệt (heat pump drying - HPD) được đánh giá là giải pháp phù hợp cho các nguyên liệu chứa hợp chất sinh học nhạy nhiệt nhờ khả năng kiểm soát đồng thời và độc lập nhiệt độ, độ ẩm tương đối của tác nhân sấy trong dải nhiệt độ thấp đến trung bình, qua đó giảm thiểu tổn thất chất lượng cảm quan và dinh dưỡng so với sấy đối lưu nhiệt độ cao thông thường, đồng thời tiết kiệm năng lượng tiêu thụ trên một đơn vị ẩm bốc hơi. Nhờ đó, công nghệ này có thể nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và hạn chế tổn thất chất lượng của nguyên liệu thực vật trong quá trình sấy (Uthpala et al., 2020; Salehi, 2021; Sun et al., 2025).

Mặc dù đã có một số công bố về ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến chất lượng các loại rau lá và dược liệu khác nhau, các nghiên cứu chuyên biệt về ảnh hưởng của nhiệt độ sấy bơm nhiệt đến chất lượng bột dây rau má thủy canh, phụ phẩm trong sản xuất và chế biến rau má vẫn còn hạn chế. Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm: đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ sấy bơm nhiệt đến độ ẩm, các chỉ tiêu màu sắc, hàm lượng polyphenol tổng số và saponin tổng số của bột rau má thủy canh; và xác định khoảng nhiệt độ sấy phù hợp, cân bằng giữa giá trị cảm quan và giá trị dược tính của sản phẩm, làm cơ sở khoa học cho việc hoàn thiện quy trình công nghệ sản xuất bột rau má thủy canh giàu hoạt chất sinh học, hướng đến ứng dụng trong các sản phẩm thực phẩm chức năng.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Nguyên liệu sử dụng trong nghiên cứu là dây rau má (*Centella asiatica* (L.) Urban) trồng theo hệ thống thủy canh hồi lưu dinh dưỡng, được thu hoạch ở giai đoạn sinh trưởng sinh dưỡng ổn định, cây phát triển đồng đều, không sâu bệnh. Sau thu hoạch, nguyên liệu được vận chuyển về phòng thí nghiệm trong khoảng 4 giờ và tiến hành thí nghiệm trong vòng 24 giờ nhằm hạn chế biến đổi chất lượng.

Các hóa chất phân tích sử dụng gồm thuốc thử Folin-Ciocalteu, natri carbonat (Na_2CO_3), acid gallic chuẩn; vanillin, acid sulfuric đậm đặc và chất chuẩn oleanolic acid. Thiết bị chính sử dụng trong nghiên cứu gồm hệ thống sấy bơm nhiệt có khả năng kiểm soát nhiệt độ và tốc độ gió, máy đo màu cầm tay theo hệ CIELab, máy quang phổ hấp thụ UV-Vis, tủ sấy đối lưu và cân phân tích.

2.2. Bố trí thí nghiệm

Nguyên liệu dây rau má thủy canh sau khi phân loại, loại bỏ phần dập úa, được rửa sạch, để ráo nước tự nhiên và cắt thành đoạn có chiều dài khoảng 2-3 cm. Nguyên liệu sau xử lý sơ bộ được trải đều thành lớp mỏng trên khay sấy với mật độ khối lượng đồng nhất giữa các nghiệm thức, sau đó tiến hành sấy trực tiếp bằng thiết bị sấy bơm nhiệt ở 4 mức nhiệt độ khảo sát: 40°C, 45°C, 50°C và 55°C, tốc độ tác nhân sấy được duy trì ổn định giữa các nghiệm thức. Quá trình sấy được thực hiện đến khi khối lượng mẫu không đổi giữa 2 lần cân liên tiếp. Bột dây rau má sau sấy được nghiền mịn bằng cối nghiền khô, rây qua rây có kích thước lỗ phù hợp để thu bột đồng nhất, sau đó bảo quản trong bao bì kín, tránh ánh sáng cho đến khi phân tích.

2.3. Phương pháp phân tích các chỉ tiêu

Xác định hàm lượng ẩm: Hàm lượng ẩm, % (AOAC 950.46), được tính theo công thức:

$$X(\%) = \frac{G1 - G2}{m} \times 100$$

Trong đó: X: hàm lượng nước trong mẫu (%); G1: khối lượng cốc và mẫu trước khi sấy (g); G2: khối lượng cốc và mẫu sau khi sấy (g); m: khối lượng nguyên liệu (g).

Xác định chỉ tiêu màu sắc: 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 dây rau má. Ở mỗi lần đo, giá trị màu sắc được xác định ngẫu nhiên tại 3 vị trí khác nhau của dây rau má.

Xác định hàm lượng polyphenol tổng số (TPC): Hàm lượng saponin tổng được xác định theo phương pháp của Chen et al. (2007) với một số thay đổi. Hút 2,00mL dịch chiết bột dây rau má được cô đến cạn, thêm lần lượt 0,40 mL vanillin - acetic acid (5%) và 2,40 mL HClO_4 , ủ ở 80°C trong bể điều nhiệt 20 phút và được làm lạnh nhanh trong 2 phút ngay sau đó, tiếp theo ethyl acetate được bổ sung sao cho tổng thể tích là 10 mL. Lắc đều để thu được dung dịch có màu tím hoa cà. Tổng hàm lượng saponin triterpenoid được phân tích dựa trên phương pháp đo độ hấp thụ quang phổ ở bước sóng 560 nm. Hàm lượng saponin tổng được xác định bằng số gram oleanolic acid có trong 100 gram chất khô nguyên liệu (%).

Xác định hàm lượng polyphenol: Hàm lượng polyphenol tổng có trong dịch chiết được xác định bằng phương pháp so màu dựa trên phản ứng thuốc thử Folin-Ciocalteu theo mô tả của Haida et al. (2021) có hiệu chỉnh. Cho 0,10 mL dung dịch mẫu sau trích ly phản ứng với 1,50 mL thuốc thử Folin - Ciocalteu 10% và để yên trong 5 phút. Sau đó, 4 mL Na_2CO_3 20% được thêm vào và 4,40 mL nước cất để điều chỉnh thể tích cuối cùng thành 10 mL. Hỗn hợp được giữ trong bóng tối 30 phút. Độ hấp thụ được đo ở bước sóng 738 nm. Hàm lượng polyphenol tổng số được tính dựa vào đường chuẩn của gallic acid ở dãy nồng độ từ 10-100 $\mu\text{g/mL}$ và được biểu thị bằng hàm lượng gallic acid đương lượng (mgGAE/g).

2.4. Phương pháp xử lý số liệu

Số liệu được trình bày dưới dạng giá trị trung bình của 3 lần lặp lại. Sự khác biệt giữa các nghiệm thức được đánh giá bằng phân tích phương sai một nhân tố (one-way ANOVA), so sánh trung bình theo phép thử LSD ở mức ý nghĩa thống kê $p < 0,05$, sử dụng phần mềm Statgraphics Centurion XV.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến độ ẩm và các chỉ tiêu màu sắc của bột dây rau má thủy canh

Trong quy trình chế biến bột dây rau má thủy canh giàu hoạt chất sinh học, công đoạn sấy giữ vai trò quyết định trong việc hạ thấp độ ẩm nguyên liệu xuống ngưỡng an toàn cho bảo quản, đồng thời duy trì tối đa hàm lượng các hợp chất có hoạt tính sinh học và giá trị cảm quan của sản phẩm. Kết quả cho thấy, nhiệt độ sấy bơm nhiệt ảnh hưởng đáng kể đến giá trị cảm quan của sản phẩm (Bảng 1).

Bảng 1. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến độ ẩm và các chỉ tiêu màu sắc (L^* , a^* , b^*) của bột dây rau má thủy canh

Nhiệt độ sấy ($^{\circ}\text{C}$)	Độ ẩm (%)	L^*	a^*	b^*
40	$10,80 \pm 0,31^{bc}$	$63,81 \pm 0,06^b$	$-6,56 \pm 0,08^b$	$27,34 \pm 0,06^b$
45	$10,50 \pm 0,36^{bcd}$	$62,39 \pm 0,08^c$	$-6,27 \pm 0,08^c$	$26,45 \pm 0,11^c$
50	$10,20 \pm 0,35^{bcd}$	$60,57 \pm 0,08^d$	$-5,84 \pm 0,11^d$	$24,83 \pm 0,14^{ed}$
55	$9,90 \pm 0,40^{cd}$	$59,26 \pm 0,09^e$	$-5,25 \pm 0,08^e$	$22,17 \pm 0,10^e$
Dây rau má chưa qua sấy	$29,40 \pm 1,04^a$	$64,07 \pm 0,07^a$	$-6,74 \pm 0,07^a$	$27,55 \pm 0,11^a$

Ghi chú: Các giá trị trung bình trong cùng một cột mang chữ cái khác nhau thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Kết quả phân tích cho thấy, nguyên liệu dây rau má thủy canh tươi trước khi sấy có độ ẩm ban đầu cao, đạt 29,40%; sau khi sấy, độ ẩm giảm mạnh và ổn định trong khoảng 9,9-10,8% ở cả 4 mức nhiệt độ khảo sát (40-55 $^{\circ}\text{C}$), không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$) giữa các nghiệm thức. Hiện tượng độ ẩm cuối không khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các mức nhiệt độ sấy là quy luật phổ biến trong sấy đối lưu các nguyên liệu thân thảo. Khi thời gian sấy đủ dài để tiệm cận trạng thái cân bằng ẩm, tốc độ sấy ở giai đoạn giảm tốc bị chi phối chủ yếu bởi cơ chế khuếch tán ẩm nội bào hơn là bởi nhiệt độ sấy tuyệt đối, khiến độ ẩm cuối của các nghiệm thức tiệm cận nhau bất kể mức nhiệt độ áp dụng (Kaya & Aydın, 2009; Ghnimi et al, 2026). Độ ẩm cuối 9,9-10,8% ghi nhận ở cả 4 nghiệm thức được xem là phù hợp để đảm bảo ổn định vi sinh cho bột được liệu. Về bản chất, khả năng vi sinh vật sinh trưởng trong sản phẩm khô phụ thuộc chủ yếu vào hoạt độ nước (water activity, a_w) chứ không phải độ ẩm khối lượng. Theo Cơ quan Dược phẩm Châu Âu (EMA), nấm men và nấm mốc hầu như không phát triển được ở a_w dưới 0,60; trong khi dược liệu khô bảo quản ở điều kiện thông thường thường có a_w trong khoảng 0,50-0,60 cũng khuyến nghị không chế độ ẩm khi sấy dưới 12%, thậm chí dưới 10% đối với nguyên liệu dễ nhiễm nấm mốc, như một biện pháp kiểm soát nguy cơ vi sinh và độc tố nấm ngay từ khâu sau thu hoạch (EMA, 2024).

Nhiệt độ sấy cũng ảnh hưởng đáng kể đến giá trị độ sáng L^* . So với nguyên liệu tươi trước khi sấy ($L^* = 64,07 \pm 0,07$), tất cả các nghiệm thức sấy đều cho giá trị L^* thấp hơn, và mức giảm tỷ lệ thuận với nhiệt độ sấy: L^* giảm từ $63,81 \pm 0,06$ ở 40 $^{\circ}\text{C}$ xuống còn $59,26 \pm 0,09$ ở 55 $^{\circ}\text{C}$, khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$) so với các mức nhiệt độ còn lại. Giá trị a^* mang dấu âm ở tất cả các nghiệm thức, đặc trưng cho sắc xanh của bột dây rau má, và có xu hướng dịch chuyển về phía trục dương (giảm sắc xanh) khi tăng nhiệt độ sấy, từ $-6,56 \pm 0,08$ ở 40 $^{\circ}\text{C}$ lên $-5,25 \pm 0,08$ ở 55 $^{\circ}\text{C}$.

Sự dịch chuyển này là minh chứng cho quá trình phân hủy hệ sắc tố chlorophyll, dưới tác động đồng thời của nhiệt độ cao và các acid hữu cơ được giải phóng từ dịch bào trong quá trình sấy kéo dài, chlorophyll bị chuyển hóa thành pheophytin có màu vàng nâu hoặc xám, làm sắc xanh của sản phẩm suy giảm rõ rệt,

đặc biệt ở nhiệt độ 55°C. Cơ chế chuyển hóa chlorophyll thành pheophytin dưới tác động nhiệt và pH thấp trong mô thực vật cũng được ghi nhận có động học phân hủy bậc nhất tuân theo phương trình Arrhenius, với tốc độ phân hủy tăng nhanh theo nhiệt độ sấy (Nayak et al., 2021). Giá trị b^* dương thể hiện sắc thái vàng của mẫu và giảm đáng kể khi tăng nhiệt độ sấy từ 40 đến 55°C, từ $27,34 \pm 0,06$ xuống còn $22,17 \pm 0,10$. Sự sụt giảm này cho thấy các sắc tố carotenoid, nhóm sắc tố tạo màu vàng đóng vai trò như chất chống oxy hóa phụ, cũng bị oxy hóa hoặc biến đổi cấu trúc đáng kể khi tiếp xúc với nhiệt độ cao trong thời gian sấy kéo dài.

Quá trình oxy hóa carotenoid trong điều kiện sấy nhiệt thường đi kèm với các phản ứng Maillard giữa đường khử và acid amin tự do được giải phóng trong mô thực vật, càng làm gia tăng mức độ biến đổi màu sắc ở nhiệt độ sấy cao (Murata, 2021; Meléndez-Martínez et al., 2023). Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Trần Chí Nhân và ctv (2024) trên lá tía tô sấy chân không ở 45°C, trong đó việc tăng nhiệt độ sấy cũng làm giảm giá trị L^* , giảm sắc xanh (a^* dịch chuyển về phía dương) và giảm b^* . Nhìn chung, kết quả về màu sắc trong nghiên cứu này cho thấy nhiệt độ sấy càng thấp càng có lợi cho việc duy trì chất lượng cảm quan của bột rau má thủy canh, tuy nhiên cần cân nhắc đồng thời với thời gian sấy kéo dài tương ứng và nguy cơ hư hỏng vi sinh nếu sấy ở nhiệt độ quá thấp.

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến hàm lượng polyphenol tổng số và saponin tổng số

Kết quả nghiên cứu cho thấy, nhiệt độ sấy cũng ảnh hưởng đáng kể đến các thành phần được tính trong bột dây rau má thủy canh (Bảng 2).

Bảng 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến hàm lượng TPC và TSC của bột dây rau má thủy canh

Nhiệt độ sấy (°C)	TPC (mg GAE/g chất khô)	TSC (%)
40	$18,40 \pm 0,26^{ab}$	$4,63 \pm 0,02^d$
45	$17,81 \pm 0,27^c$	$4,79 \pm 0,04^c$
50	$17,53 \pm 0,26^c$	$5,15 \pm 0,02^a$
55	$16,87 \pm 0,32^d$	$4,95 \pm 0,04^b$
Dây rau má chưa qua sấy	$18,98 \pm 0,34^a$	$4,43 \pm 0,03^e$

Ghi chú: Các giá trị trung bình trong cùng một cột mang chữ cái khác nhau thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Hàm lượng polyphenol tổng trong bột rau má giảm dần khi nhiệt độ sấy tăng lên, từ $18,40 \pm 0,26$ mg GAE/g ở 40°C xuống còn $16,87 \pm 0,32$ mg GAE/g ở 55°C, khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức ($p < 0,05$); hàm lượng TPC ở các mức nhiệt độ sấy đều thấp hơn so với nguyên liệu chưa qua sấy ($18,98 \pm 0,34$) (Bảng 2). Xu hướng này đã được ghi nhận trên đối tượng rau má trong nghiên cứu so sánh năm phương pháp sấy (phơi nắng, sấy bóng râm, sấy đông khô, sấy tủ đối lưu và sấy vi sóng) của Mohapatra et al. (2022), cho thấy hàm lượng các hợp chất phenolic (chlorogenic acid, rutin, kaempferol, quercetin) ở tất cả các mẫu sau sấy đều thấp hơn có ý nghĩa so với mẫu tươi, với mức độ tổn thất tỉ lệ thuận với cường độ và thời gian tác động nhiệt của từng phương pháp.

Xu hướng suy giảm gần như tuyến tính này phản ánh bản chất kém bền nhiệt của các hợp chất phenolic, vốn dễ bị oxy hóa hoặc phân hủy nhiệt trong quá trình sấy kéo dài ở nhiệt độ cao (Mouhoubi et al., 2022). Kết quả này tương đồng với công bố của Li et al. (2021) trên quả hắc mai biển (*Hippophae rhamnoides*), trong đó các hợp chất phenolic và hoạt tính chống oxy hóa suy giảm rõ rệt khi nhiệt độ sấy

tăng, do độ nhạy cảm nhiệt cao của nhóm hợp chất này trong thời gian xử lý kéo dài. Kết quả tương tự cũng được ghi nhận trên lá trà (*Camellia sinensis*), trong đó hàm lượng polyphenol và hoạt tính chống oxy hóa đạt giá trị thấp nhất ở các nghiệm thức sấy nhiệt độ cao, được cho là hệ quả của sự suy giảm hoặc biến đổi cấu trúc polyphenol dưới tác động nhiệt kéo dài (Roslan và ctv, 2020). Kết quả này cũng có cơ sở khoa học cho việc lựa chọn nhiệt độ sấy càng thấp càng có lợi cho việc bảo toàn polyphenol; tuy nhiên, quyết định lựa chọn nhiệt độ sấy trong thực tế sản xuất cần cân đối đồng thời với thời gian sấy, chi phí năng lượng và nguy cơ hư hỏng vi sinh vật nếu sấy ở nhiệt độ quá thấp trong thời gian quá dài, phù hợp với nhận định chung về tương quan giữa chất lượng và hiệu quả năng lượng của công nghệ sấy bơm nhiệt (Salehi, 2021).

Khác với polyphenol, hàm lượng TSC trong bột rau má không biến đổi theo quy luật tuyến tính với nhiệt độ sấy. Phân tích cho thấy hàm lượng saponin tăng dần khi sấy từ 40°C đến 50°C, và đạt giá trị cao nhất ở 50°C ($5,15 \pm 0,02\%$), sau đó giảm nhẹ khi sấy ở 55°C ($4,95 \pm 0,04\%$); tuy nhiên các giá trị đạt được đều cao hơn so với dây rau má chưa sấy ($4,43 \pm 0,03$) (Bảng 2). Xu hướng này có thể giải thích là hàm lượng saponin tăng theo mức độ mất nước, thay vì giảm đơn điệu theo nhiệt độ như polyphenol. Quá trình khử nước sau thu hoạch được chứng minh làm tăng đáng kể hàm lượng các glycoside triterpene chủ đạo (asiaticoside và madecassoside) trong lá rau má so với mẫu tươi (Plengmuankhae & Tantitadapitak, 2015).

Cơ chế được lý giải là do stress mất nước kích hoạt con đường sinh tổng hợp triterpenoid như một phản ứng phòng vệ sinh lý của mô thực vật, đồng thời hiện tượng cô đặc chất khô khi nước bay hơi cũng góp phần làm tăng nồng độ saponin tính trên khối lượng chất khô. Tuy nhiên, khi nhiệt độ sấy tiếp tục tăng lên 55°C, tốc độ sinh tổng hợp không còn đủ bù đắp tốc độ phân hủy nhiệt của các glycoside này, dẫn đến hàm lượng saponin tổng giảm nhẹ so với đỉnh ghi nhận ở 50°C. Lá rau má sấy ở nhiệt độ cao mà không qua xử lý tiền thích nghi thường chứa hàm lượng triterpene glycoside thấp hơn so với điều kiện xử lý ôn hòa (Plengmuankhae & Tantitadapitak, 2015). Như vậy, 50°C thể hiện là mức nhiệt cân bằng tối ưu giữa việc kích thích sinh tổng hợp saponin và hạn chế phân hủy nhiệt trong khoảng khảo sát của nghiên cứu.

4. Kết luận

Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ sấy bơm nhiệt (40°C, 45°C, 50°C và 55°C) đến độ ẩm, màu sắc, hàm lượng polyphenol tổng số (TPC) và saponin tổng số (TSC) của bột củ rau má thủy canh sau chân. Kết quả cho thấy, độ ẩm sản phẩm giảm từ 29,40% xuống 9,9-10,8% ở nằm trong ngưỡng an toàn vi sinh. Nhiệt độ sấy ảnh hưởng rõ rệt đến màu sắc: độ sáng L^* , sắc xanh a^* và sắc vàng b^* đều giảm, phản ánh sự phân hủy sắc tố dưới tác động nhiệt. Hàm lượng TPC giảm tuyến tính từ $18,40 \pm 0,26$ xuống $16,87 \pm 0,32$ mg GAE/g khi nhiệt độ tăng, trong khi TSC biến đổi phi tuyến tính và đạt giá trị cao nhất $5,15 \pm 0,02\%$ tại 50°C. Trên cơ sở tổng hợp các chỉ tiêu, nhiệt độ sấy 45°C - 50°C được đề xuất là thông số tối ưu cho sản xuất bột dây rau má thủy canh, cân bằng giữa chất lượng cảm quan và hoạt tính sinh học. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc hoàn thiện quy trình công nghệ sản xuất bột dược liệu giàu hoạt chất quy mô lớn ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

Trần Chí Nhân, Lê Uyên Nhi, Nguyễn Tuấn Anh, Kiều Minh Vương, Lưu Thái Danh, & Nguyễn Nhật Minh Phương. (2024). Ảnh hưởng của kỹ thuật sấy đến độ ẩm, màu sắc và các hợp chất sinh học của lá tía tô. Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, (9), 66-73.

Aires, A. (2018). Hydroponic production systems: Impact on nutritional status and bioactive compounds of fresh vegetables. In Vegetables - Importance of Quality Vegetables to Human Health. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73011>.

- Bandopadhyay, S., Mandal, S., Ghorai, M., Jha, N. K., Kumar, M., Radha, Ghosh, A., Proćkó, J., Pérez de la Lastra, J. M., & Dey, A. (2023). Therapeutic properties and pharmacological activities of asiaticoside and madecassoside: A review. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 27(5), 593-608. <https://doi.org/10.1111/jcmm.17635>.
- Chen, Y., Xie, M. Y., & Gong, X. F. (2007). Microwave-assisted extraction used for the isolation of total triterpenoid saponins from *Ganoderma atrum*. *Journal of food engineering*, 81(1), 162-170.
- European Medicines Agency - EMA (2024). Questions and answers on quality of herbal medicinal products/traditional herbal medicinal products: Revision 7 (EMA/HMPC/41500/2010 Rev.7)
- Ghnimi, T., Hassini, L., Bettaieb, E., & Trabelsi, Y. (2026). Characterization of heat and mass transfer in beetroot during convective drying: New insights into hygroscopic behavior and moisture diffusivity. *Heat and Mass Transfer*, 62(6), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00231-026-03709-1>.
- Haida, Z., Maziah, M., & Hakiman, M. (2021). Primary metabolites, phenolics content and antioxidant activities of *Hydrocotyle bonariensis* and *Centella asiatica*. *Fundamental and Applied Agriculture*, 6(1), 27-34. <https://doi.org/10.5455/faa.32251>.
- Jin, W., Mujumdar, A. S., Zhang, M., & Shi, W. (2018). Novel drying techniques for spices and herbs: A review. *Food Engineering Reviews*, 10(1), 34-45. <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9165-7>.
- Kaya, A., & Aydin, O. (2009). An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*, 50(1), 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.024>.
- 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>.
- Meléndez-Martínez, A. J., Esquivel, P., & Rodríguez-Amaya, D. B. (2023). Comprehensive review on carotenoid composition: Transformations during processing and storage of foods. *Food Research International*, 169, 112773. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112773>.
- Mohapatra, P., Ray, A., Jena, S., Nayak, S., & Mohanty, S. (2022). Influence of various drying methods on physicochemical characteristics, antioxidant activity, and bioactive compounds in *Centella asiatica* L. leaves: A comparative study. *BioTechnologia*, 103(3), 235-247. <https://doi.org/10.5114/bta.2022.118666>.
- Mouhoubi, K., Boulekbache-Makhlouf, L., Madani, K., Palatzidi, A., Perez-Jimenez, J., Mateos-Aparicio, I., & Garcia-Alonso, A. (2022). Phenolic compounds and antioxidant activity are differentially affected by drying processes in celery, coriander and parsley leaves. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(6), 3467-3476. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15670>.
- Murata, M. (2021). Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction. *Glycoconjugate Journal*, 38(3), 283-292. <https://doi.org/10.1007/s10719-020-09943-x>.
- Nayak, P. K., Chandrasekar, C. M., Haque, A., & Kesavan, R. K. (2021). Influence of pre-treatments on the degradation kinetics of chlorophylls in *Amaranthus caudatus* leaves after microwave drying. *Journal of Food Process Engineering*, 44(9), e13790. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13790>.
- Plengmuankhae, W., & Tantitadapitak, C. (2015). Low temperature and water dehydration increase the levels of asiaticoside and madecassoside in *Centella asiatica* (L.) Urban. *South African Journal of Botany*, 97, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.013>.
- Roslan, A. S., Ismail, A., Ando, Y., & Azlan, A. (2020). Effect of drying methods and parameters on the antioxidant properties of tea (*Camellia sinensis*) leaves. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-00022-0>.
- Salehi, F. (2021). Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 546-555. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>.
- Sun, Z., Chen, J., Dai, T., Wang, Y., Liang, R., Liu, W., Liu, C., & Deng, L. (2025). Recent advances in heat pump drying system for the food industry: Structure, system optimization, applications, and prospects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70238>.
- Uthpala, T. G. G., Navaratne, S. B., & Thibbotuwawa, A. (2020). Review on low-temperature heat pump drying applications in food industry: Cooling with dehumidification drying method. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), e13502. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13502>.