Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Phần B: Nông nghiệp, Thủy sản và Công nghệ Sinh học
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.018

ẢNH HƯỞNG CỦA ĐIỀU KIỆN CHẦN VI SÓNG ĐẾN HOẠT ĐỘ ENZYME PEROXIDASE, MÀU SẮC VÀ CÁC HỢP CHẤT SINH HỌC TRONG RAU MÁ (*Centella asiatica* (L.) Urb.)

Châu Văn Đan[1,2], Nguyễn Tuấn Anh[1], Huy Thị Tuyết Nga[1], Nguyễn Tuấn Khang[3] và Trần Chí Nhân[1*]
[1]*Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ, Việt Nam*
[2]*Khoa Công nghệ - Thủy sản, Trường Cao đẳng Kinh tế - Kỹ Thuật Cần Thơ, Việt Nam*
[3]*Khoa Nông nghiệp, 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): 17/05/2025
Sửa bài (Revised): 29/06/2025
Duyệt đăng (Accepted): 12/12/2025

Title: *Effect of microwave blanching conditions on peroxidase enzyme activity, color, and bioactive compounds in Centella asiatica (L.) Urb*

Author(s): *Chau Van Dan[1,2], Nguyen Tuan Anh[1], Huy Thi Tuyet Nga[1], Nguyen Tuan Khang[3] and Tran Chi Nhan[1*]*

Affiliation(s): *[1]Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University, Viet Nam; [2]Faculty of Fisheries-Technology, Can Tho Technical Economic College, Viet Nam; [3]Faculty of Agriculture, Can Tho Technical Economic College, Viet Nam*

TÓM TẮT

Công suất và thời gian chần vi sóng thích hợp nhằm vô hoạt enzyme peroxidase (POD), cải thiện màu sắc, duy trì hàm lượng hợp chất sinh học và khả năng kháng oxy hóa của rau má được xác định trong nghiên cứu. Rau má được chần trong lò vi sóng với hai nhân tố khảo sát là công suất (200, 300, 400, 500 và 600 W) và thời gian (0, 30, 45, 60, 75 và 90 giây). Chần rau má ở 500 W trong 60 giây có khả năng vô hoạt 90% POD và cải thiện tốt màu sắc (L = 55,73±0,69, a* = -4,74±0,13 và b* = 12,55±0,79). Đồng thời, điều kiện này cũng duy trì tốt hàm lượng polyphenol (TPC) (118,10±2,85 mg GAE/g), flavonoid (TFC) (110,10±0,44 mg QE/g) và khả năng loại gốc tự do DPPH (10,20±0,61 mg TE/g). Động học vô hoạt POD ở công suất 500 W tuân theo mô hình bậc nhất với hệ số xác định cao (R^2 = 0,9447), các thông số động học được ghi nhận lần lượt là k = 0,0377 s^{-1} và D = 61 giây. Ngoài ra, kết quả cũng ghi nhận sự tương quan cao giữa hoạt độ POD và giá trị L*, a*, TPC, TFC, khả năng loại gốc tự do DPPH (r = -0,740; 0,851; -0,812; -0,656 và -0,939, tương ứng).*

Từ khóa: *Chần vi sóng, enzyme peroxidase, hợp chất sinh học, màu sắc, rau má*

ABSTRACT

The study aimed to determine the appropriate microwave blanching power and time to inactivate peroxidase (POD) enzyme, improve color, and preserve the bioactive compound content and antioxidant capacity of Centella asiatica. The leaves were blanched in a microwave oven under two investigated factors: power (200, 300, 400, 500, and 600 W) and time (0, 30, 45, 60, 75 and 90 seconds). Blanching at 500 W for 61 seconds resulted in more than 90% POD inactivation and significantly improved color parameters (L = 55.73±0.69, a* = -4.74±0.13, and b* = 12.55±0.79). Under this condition, the contents of total polyphenols (TPC) (118.10±2.85 mg GAE/g), flavonoids (TFC) (110.10±0.44 mg QE/g), and DPPH radical scavenging capacity (10.20±0.61 mg TE/g) were well maintained. POD inactivation kinetics at 500 W followed a first-order model with a high coefficient of determination (R^2 = 0.9447), with kinetic parameters recorded as k = 0.0377 s^{-1} and D = 60 seconds. Furthermore, a strong correlation was observed between POD activity and L*, a*, TPC, TFC, and DPPH values (r = -0.740; 0.851; -0.812; -0.656; and -0.939, respectively).*

Keywords: *Bioactive compounds, Centella asiatica, color, microwave blanching, peroxidase enzyme*

1. GIỚI THIỆU

Rau má (*Centella asiatica* (L.) Urb.) là một loại rau thường được tiêu thụ ở dạng lá trong món salad hoặc nước uống ở một số quốc gia Đông Nam Á. Các thành phần hóa học chính của rau má gồm các hợp chất triterpen và triterpen glucoside. Ngoài ra, rau má còn chứa các hợp chất sinh học quý như polyacetylen, flavonoid, alkaloid, oligosacharid, vitamin C và tinh dầu với mùi thơm đặc trưng (Tripathi et al., 2015). Tuy nhiên, rau má trong quá trình bảo quản và chế biến rất dễ bị biến đổi về tính chất của nguyên liệu, ảnh hưởng đến màu sắc, thành phần các hợp chất sinh học có giá trị trong rau má. Nguyên nhân chính dẫn đến rau má dễ bị hư hỏng là do phương pháp chế biến, điều kiện xử lý và đặc biệt là ảnh hưởng từ các loại enzyme gây hóa nâu trên rau quả.

Enzyme peroxidase (POD) thuộc nhóm enzyme oxydoreductase, ảnh hưởng trực tiếp đến mùi vị và màu sắc của nhiều loài rau, củ và quả. Đồng thời, POD là loại enzyme có trong tất cả các loại rau và được xem là enzyme bền nhiệt. Vì lý do này, hoạt độ POD rất được quan tâm trong các lĩnh vực có liên quan và được xem như một chỉ số của quá trình chần (Pour et al., 2022). Quá trình xử lý nhiệt thường được sử dụng để khử hoạt tính của enzyme đang hoạt động. Tuy nhiên, POD có thể phục hồi hoạt động của nó sau khi xử lý nhiệt theo thời gian. Do đó, POD có thể là nguyên nhân làm giảm chất lượng của nguyên liệu do sự phát triển của mùi vị lạ trong rau (Mishra & Gamage, 2007).

Dựa trên đặc điểm kỹ thuật, quá trình chần có thể được phân loại thành: chần ướt, được thực hiện bằng cách nhúng thực phẩm vào nước nóng, dung dịch nóng (có chứa acid và/hoặc muối) hoặc hơi nước; chần khô, được thực hiện bằng vi sóng, bức xạ hồng ngoại hoặc áp suất cao (Ramesh et al., 2002). Trong nhiều thập kỷ qua, nhu cầu ngày càng tăng của người tiêu dùng đối với các sản phẩm thực phẩm đã dẫn đến ngành công nghiệp thực phẩm áp dụng các công nghệ mới trong việc vô hiệu hóa các loại enzyme có hoạt tính cao nhằm giảm thiểu tác động đến kết cấu, hương vị và giá trị dinh dưỡng của nguyên liệu (Demirdöven & Baysal, 2008). Trong đó, phương pháp chần vi sóng (MWB) rất được quan tâm cả về mặt học thuật và công nghiệp. MWB đã được áp dụng trên nhiều loại rau củ quả khác nhau như khoai tây (Severini et al., 2004), cà rốt (Soysal & Söylemez, 2005) và ớt chuông (Ramesh et al., 2002). So với phương pháp chần ướt thông thường, MWB giữ lại nhiều chất dinh dưỡng hơn do giảm tổn thất từ hiện tượng rửa trôi trong quá trình xử lý, tốc độ gia nhiệt nhanh (nhiệt được tạo ra bên trong, trong khi nhiệt độ chần thông thường được truyền bằng cách dẫn nhiệt từ bề mặt sản phẩm vào phần bên trong), độ thâm nhập lớn, hiệu quả kinh tế cao (Benlloch-Tinoco et al., 2015). Mặt khác, sự phân bố nhiệt độ không đồng đều trong quá trình gia nhiệt bằng vi sóng cũng đã được nghiên cứu rộng rãi (Vadivambal & Jayas, 2010). Đồng thời, hiệu quả của MWB phụ thuộc đáng kể vào điều kiện xử lý, khối lượng và tính di động của sản phẩm bên trong lò (quay/không quay); đặc điểm thực vật (độ ẩm, kích thước, độ dày, hình dạng, tỉ lệ bề mặt trên thể tích và nhiệt dung riêng). Trong nghiên cứu này, rau má sau khi chần bằng vi sóng sẽ được sấy khô và nghiền thành bột nhằm ứng dụng trong đa dạng hóa sản phẩm từ bột rau má (Trirattanapikul & Phoungchandang, 2014). Việc chần vi sóng đóng vai trò tiền xử lý giúp vô hoạt enzyme POD, ổn định màu sắc và hạn chế tổn thất các hợp chất sinh học trong quá trình sấy, từ đó nâng cao chất lượng và giá trị sinh học của bột rau má. Trên cơ sở đó, mục tiêu của nghiên cứu là xác định được sự ảnh hưởng của điều kiện chần bằng phương pháp chần vi sóng đến hoạt độ enzyme POD, giá trị màu sắc và các hợp chất sinh học có trong rau má.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chuẩn bị nguyên liệu

Rau má được thu mua cố định tại hợp tác xã Na Thái (xã Trường Thắng, huyện Thới Lai, thành phố Cần Thơ). Nguyên liệu được đóng gói cẩn thận trong bao bì PE (1 kg/túi) và được vận chuyển về phòng thí nghiệm (không quá 1 giờ). Sau đó, rau má được rửa sạch với nước nhằm loại bỏ bụi bẩn, tạp chất; đồng thời, loại bỏ gốc và rễ trước khi tiến hành thí nghiệm. Rau má được sử dụng trong nghiên cứu phải đảm bảo không bị dập nát, hư hỏng, không bị sâu bệnh, không quá già hay quá non, thời gian thu hoạch sau khi trồng khoảng 30-35 ngày.

Các chất chuẩn được sử dụng trong nghiên cứu được cung cấp từ Công ty TNHH Cemaco Việt Nam - Chi nhánh Cần Thơ, bao gồm: thuốc thử Folin-Ciocalteu, gallic acid ($C_7H_6O_5$), quercetin ($C_{15}H_{10}O_7$), thuốc thử 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) và 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid (Trolox) (Merck, Đức). Ngoài ra, các hóa chất như: sodium carbonate (Na_2CO_3), methanol (CH_3OH), aluminum chloride ($AlCl_3$), sodium acetate (CH_3COONa), polyvinylpolypyrrolidone (PVPP), sodium dihydrogen phosphate (NaH_2PO_4), disodium hydrogen phosphate (Na_2HPO_4), hydrogen peroxide (H_2O_2) và guaiacol ($C_7H_8O_2$) có nguồn gốc từ Công

ty Xilong Scientific (Trung Quốc), đáp ứng tiêu chuẩn kỹ thuật trong phân tích.

2.2. Bố trí thí nghiệm

Rau má (100 g) được cho vào hộp thủy tinh có đậy nắp (500 mL) và gia nhiệt trong lò vi sóng Sharp R-G52XVN-ST (Trung Quốc) ở công suất 200, 300, 400, 500 và 600 W trong khoảng thời gian khác nhau (30, 45, 60, 75 và 90 giây). Trong đó, mẫu đối chứng là mẫu rau má không trải qua quá trình chần. Sau mỗi lần chần, rau má được làm lạnh ngay bằng nước lạnh ở 0-4°C trong 60 giây. Tiếp theo, rau má được lấy ra và để ráo tự nhiên trong 120 giây. Dùng giấy thấm để loại nước thừa trên lá. Sau đó, rau má được phân tích các chỉ tiêu theo dõi như hoạt độ POD, các giá trị màu sắc, hàm lượng polyphenol, flavonoid tổng số và khả năng loại gốc tự do DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl).

2.3. Phương pháp phân tích

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 - 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.

Phương pháp trích ly dịch trích được thực hiện theo mô tả của Nguyen et al. (2019). Cụ thể, mẫu lá rau má (0,5 g) được đồng nhất trong 15 mL CH_3OH 80% bằng máy đồng hóa (D-500, Dlab, Trung Quốc). Hỗn hợp đồng nhất được giữ trong nước đá (khoảng 4°C) trong 15 phút, sau đó ly tâm ở 4000 vòng/phút trong 15 phút bằng máy ly tâm (DM0412, Dlab, Trung Quốc). Phần dịch nổi được thu vào bình định mức. Tương tự, phần cặn được trích lại bằng 10 mL CH_3OH 80% và lặp lại các bước tương tự. Hai phần dịch trích được trộn lại và được sử dụng trong phân tích hàm lượng polyphenol tổng số, flavonoid tổng số và khả năng loại gốc tự do DPPH. Tất cả các ống ly tâm và bình định mức sử dụng trong quá trình trích mẫu đều được bọc giấy nhôm nhằm giảm tiếp xúc với ánh sáng.

Hàm lượng polyphenol tổng số (TPC, mg GAE/g) được xác định dựa trên phản ứng khử hóa học của thuốc thử Folin - Ciocalteu có chứa vonfram và molypden với sự hiện diện của các hợp chất phenol, sản phẩm của sự khử này có màu xanh với quang phổ hấp thụ ánh sáng cực đại tại bước sóng 760 nm (Nguyen et al., 2019). Cụ thể, dịch trích được pha loãng 1 mL trong 1 mL nước cất, thêm 500 µL thuốc thử Folin-Ciocalteu 10% và để yên trong 6 phút. Sau đó, Na_2CO_3 20% 1,5 mL và 1 mL nước khử ion được thêm vào hỗn hợp phản ứng. Hỗn hợp được ủ tối trong 2 giờ ở nhiệt độ phòng. Hỗn hợp được tiến hành ly tâm trong 5 phút với tốc độ 4000 vòng/phút. Độ hấp thụ của hỗn hợp được đo ở bước sóng 760 nm bằng máy đo quang phổ (UV-1900i, Shimadzu, Nhật Bản). Đối với mẫu trắng, tất cả các thuốc thử được sử dụng ngoại trừ dung dịch chuẩn và dịch chiết thực vật được thay bằng 1 mL metanol 90%. Đồng thời, đường chuẩn acid gallic được xây dựng bằng cách chuẩn bị các nồng độ pha loãng (0-50 µg/mL) trong dung dịch CH_3OH 90% từ dung dịch acid gallic 400 µg/mL.

Hàm lượng flavonoid tổng số (TFC, mg QE/g) được xác định dựa vào phản ứng với $AlCl_3$ tạo sản phẩm có màu, độ hấp thụ quang phổ được xác định ở bước sóng 415 nm (Pham et al., 2020). Cụ thể, dịch trích 500 µL được thêm vào hỗn hợp gồm 1,5 mL dung dịch CH_3OH 90%, 100 µL $AlCl_3$ 10%, 100 µL CH_3COOK 1 M và 2,8 mL nước cất. Sau 45 phút ủ ở nhiệt độ phòng trong bóng tối, độ hấp thụ của hỗn hợp được đo ở bước sóng 415 nm bằng máy đo quang phổ (UV-1900i, Shimadzu, Nhật Bản). Mẫu trắng sử dụng tất cả các thuốc thử ngoại trừ dung dịch chuẩn và dịch chiết thực vật được thay bằng 500 µL metanol 90%. Đường chuẩn quercetin được xây dựng bằng cách chuẩn bị các nồng độ pha loãng (0-300 µg/mL) trong dung dịch CH_3OH 90% từ dung dịch quercetin 400 µg/mL.

Khả năng loại gốc tự do DPPH (mg TE/g) được xác định dựa trên sự thay đổi màu từ tím sang vàng nhạt bằng máy đo quang phổ ở bước sóng 517 nm (Thaipong et al., 2006). Cụ thể, dung dịch DPPH 0,1 mM được chuẩn bị bằng cách hòa tan 3,94 mg DPPH trong 100 mL CH_3OH tinh khiết. Dịch trích (100 µL) được cho phản ứng với 2 mL dung dịch DPPH trong 30 phút và ủ trong bóng tối ở nhiệt độ phòng. Sau đó, độ hấp thụ được xác định tại bước sóng 517 nm bằng máy đo quang phổ (UV-1900i, Shimadzu, Nhật Bản). Tương tự, đường chuẩn trolox cũng được xây dựng bằng cách chuẩn bị các nồng độ pha loãng (0-100 µg/mL) trong dung dịch CH_3OH 90% từ dung dịch trolox 1000 µg/mL.

Từ kết quả độ hấp thụ đo được, dựa vào phương trình đường chuẩn tính được TPC, TFC và khả năng loại gốc tự do DPPH theo công thức (1):

$$P = \frac{C \times V \times 10^{-3}}{m \times (100 - W)} \quad (1)$$

Trong đó:

P: là TPC (mg GAE/g) hoặc TFC (mg QE/g) hay khả năng loại gốc tự do DPPH (mg TE/g);

C: nồng độ acid gallic hoặc quercetin hay trolox suy ra từ phương trình đường chuẩn (µg/mL);

V: thể tích dịch trích (mL);

m: khối lượng mẫu (g);

W: độ ẩm của mẫu (%).

2.4. Hoạt độ enzyme peroxidase và động học bất hoạt enzyme

Hoạt độ enzyme peroxidase (µmol.min^{-1}) được xác định theo phương pháp của Sampedro et al. (2014). Mẫu lá rau má 10 g được hòa tan trong 20 mL PVPP 4% và đệm phosphate 0,2 M (pH 6,5), sau đó siêu âm (S60H, Elma, Đức) trong 15 phút ở nhiệt độ phòng và ủ trong 90 phút ở 4°C. Sau đó, hỗn hợp được ly tâm (DM0412, Dlab, Trung Quốc) với tốc độ 3000 vòng/phút trong 15 phút. Dịch trích là phần dịch nổi thu được sau quá trình ly tâm. Hỗn hợp phản ứng gồm 0,1 mL dịch trích, 0,2 mL H_2O_2 1,5% và 3,0 mL guaiacol 1,0% (hòa tan trong dung dịch đệm phosphate 0,2 M ở pH 6,5) được để yên ở nhiệt độ phòng trong 20 giây trước khi tiến hành theo dõi sự thay đổi độ hấp thụ ở bước sóng 470 nm trong 2 phút bằng máy đo quang phổ (UV-1900i, Shimadzu, Nhật Bản).

Phương trình xác định hoạt độ POD được thể hiện ở công thức (2):

$$U = \frac{\Delta A \times V \times 10^{6}}{\varepsilon \times d \times \Delta t} \quad (2)$$

Trong đó:

U: là hoạt độ POD (µmol.min^{-1});

ΔA: chênh lệch độ hấp thụ quang phổ theo thời gian ở bước sóng 470 nm;

V: thể tích dịch trích (L);

ε: hệ số hấp thụ phân tử mol đối với guaiacol ở 470 nm (2660 L.M^{-1}.mm^{-1});

d: chiều dày cuvette (mm);

Δt: chênh lệch thời gian giữa hai lần xác định độ hấp thụ quang phổ (phút).

Sự bất hoạt nhiệt POD từ rau má có thể được mô tả bằng mô hình bậc nhất (phương trình 3). Giá trị D hay thời gian giảm thập phân là thời gian cần thiết ở một nhiệt độ nhất định để làm giảm hoạt tính POD ban đầu xuống 90% hoặc một đơn vị logarit. Đối với các phản ứng bậc nhất, giá trị D tỷ lệ nghịch với hằng số tốc độ bất hoạt k (phương trình 4).

$$A_t = A_0 e^{-kt} \quad (3)$$

$$D = \frac{\ln(10)}{k} \quad (4)$$

Trong đó:

A_0: là giá trị của hoạt độ enzyme ban đầu;

A_t: là giá trị của hoạt độ enzyme tại thời điểm t;

D: thời gian giảm thập phân (giây);

k: hằng số tốc độ bất hoạt (giây^{-1}).

2.5. Phương pháp thu thập và xử lý số liệu

Số liệu được thu nhận và xử lý thống kê thông qua phân tích phương sai ANOVA từ chương trình Statgraphics Centurion 19.1 và 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 ± độ lệch chuẩn (n = 3) và vẽ đồ thị từ chương trình Microsoft Excel 2016.

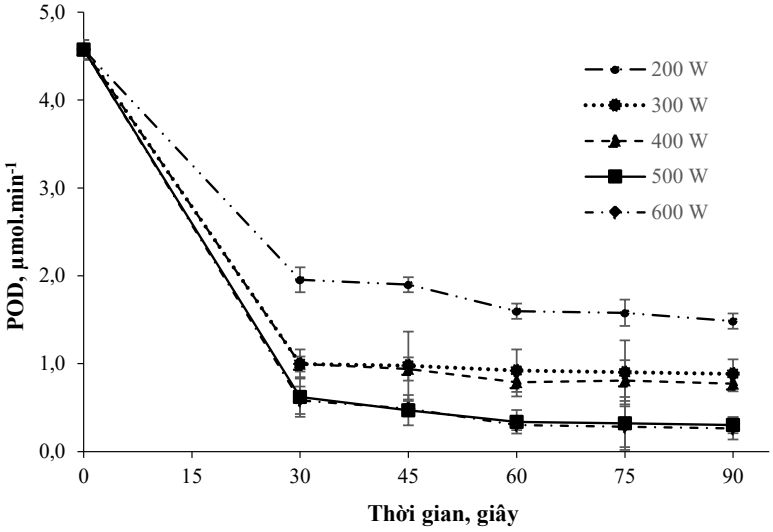
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của điều kiện chần vi sóng đến hoạt độ POD trong rau má và các thông số động học

Kết quả được trình bày ở Hình 1 cho thấy hoạt độ POD còn lại của rau má ở các mức công suất khác nhau theo thời gian chần. Thời gian và công suất chần có ảnh hưởng đáng kể đến sự vô hoạt POD của rau má, đồng thời có sự tương tác giữa thời gian và các mức công suất vô hoạt ($p<0,05$).

Hoạt độ POD còn lại sau khi chần đạt giá trị cao nhất ở 200 W trong 30 giây (1,95±0,14 µmol.min^{-1}), hoạt độ POD thấp nhất ở mẫu 600 W trong 90 giây (0,26±0,03 µmol.min^{-1}). Kết quả cho thấy hoạt độ POD giảm mạnh sau quá trình chần bằng phương pháp vi sóng, POD được vô hoạt đến 94,25% so với mẫu ban đầu ở mức công suất 600 W trong 90 giây, đồng thời khác biệt không có ý nghĩa thống kê so với mẫu chần ở 500 W trong 60 giây với 92,56% POD được vô hoạt. Zheng and Lu (2011) báo cáo rằng bất hoạt 90% POD là đủ để ngăn ngừa bất kỳ sự hư hỏng nào trong thực phẩm và được khuyến nghị như định mức tối ưu cho quá trình chần. Các

enzyme kém bền nhiệt khác như polyphenoloxidase (PPO) cũng bị vô hoạt nếu không tìm thấy có sự hoạt động của POD trong các điều kiện xử lý khác nhau như các quá trình xử lý nhiệt, chần nước hay chần vi sóng. Đồng thời ở cùng một mức công suất 200 W khi tăng thời gian chần từ 30 lên 90 giây thì hoạt độ POD giảm xuống từ 1,95±0,14 xuống 1,48±0,09 µmol.min^{-1}), khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p<0,05$). Hoạt độ enzyme cũng giảm tương tự ở các mức công suất khác nhau khi tăng thời gian chần. Tuy nhiên, trong cùng một mức công suất, hoạt độ POD khác biệt không có ý nghĩa thống kê ($p>0,05$) ở thời gian 60 giây và 90 giây. Bên cạnh đó, tại một thời gian cụ thể, mức công suất càng cao càng vô hoạt tốt POD, hoạt độ POD càng thấp (Hình 1). Điều này có thể được giải thích là do ở công suất cao, năng lượng vi sóng tạo ra các ứng suất nhiệt dẫn đến sự thay đổi cấu trúc bậc hai của enzyme, do đó làm giảm hoạt tính của chúng (Saini et al., 2023). Những phát hiện này phù hợp với kết quả của Wang et al. (2017), hoạt độ POD trong ớt chuông đỏ giảm đáng kể khi tăng các mức công suất chần từ 650 lên 900 W. Kết quả tương tự cũng ghi nhận bởi Liu et al. (2014), quá trình chần vi sóng có khả năng ức chế tốt hoạt động của POD trong khoai lang. Kết quả cho thấy sự tương đồng với nghiên cứu này, hoạt độ POD trong rau má giảm gần như tối đa khi tăng mức công suất từ 200 lên 600 W.



Hình 1. Ảnh hưởng của điều kiện chần đến hoạt độ POD trong rau má

Kết quả được thể hiện ở Hình 1 cũng cho thấy hoạt độ POD có xu hướng giảm mạnh khi tăng các mức công suất lên cao hơn, ở cùng một thời gian chần. Cụ thể, tại thời điểm 90 giây, hoạt độ enzyme giảm mạnh từ 1,48±0,09 µmol.min^{-1} ở 200 W xuống 0,26±0,03 µmol.min^{-1} ở 600 W, tuy nhiên bắt đầu từ mức công suất 500 W trong thời gian 60 giây hoạt độ POD có xu hướng giảm rất chậm và khác biệt không có ý nghĩa thống kê ($p>0,05$) khi tăng lên mức công suất 600 W ở các thời gian chần khác nhau. Khi vận hành ở công suất lớn, năng lượng vi sóng sinh ra các tác động nhiệt lớn dẫn đến sự thay đổi cấu trúc thứ cấp của enzyme và làm mất đi khả năng hoạt động của chúng. Do vậy, một khi POD đã bị vô hiệu hóa gần như hoàn toàn, hoạt độ của enzyme hầu như không còn biến đổi (Zhang et al., 2023).

Động học bất hoạt POD trong rau má bằng được khảo sát bằng phương pháp chần vi sóng ở các mức công suất khác nhau. Các thông số động học, bao gồm hằng số tốc độ bất hoạt (k), thời gian giảm thập phân (D) cùng với hệ số xác định (R^2) được trình bày trong Bảng 1. Kết quả cho thấy quá trình bất hoạt POD tuân theo mô hình phân hủy bậc nhất với $R^2 > 0,8$ (0,9061-0,9503) ở tất cả các mức công suất. Hằng số tốc độ bất hoạt (k) tăng tuyến tính với công suất vi sóng, cho thấy sự gia tăng hiệu quả bất hoạt POD ở công suất cao hơn. Cụ thể, hằng số tốc độ bất hoạt (k) tăng từ 0,0153 đến 0,0391 s^{-1} khi tăng mức công suất (200-600 W).

Bên cạnh đó, kết quả được thể hiện ở Bảng 1 cũng cho thấy mối tương quan nghịch chiều giữa hằng số k và giá trị D. Tại giá trị D, hoạt độ POD giảm xuống còn 10%, được thiết lập là ngưỡng để đảm bảo tính ổn định và phù hợp của sản phẩm chế biến đối với các yêu cầu của ngành công nghiệp thực phẩm, ngăn ngừa những thay đổi chất lượng không mong muốn trong quá trình chế biến tiếp theo (Mishra & Gamage, 2007). Như vậy, hằng số k càng

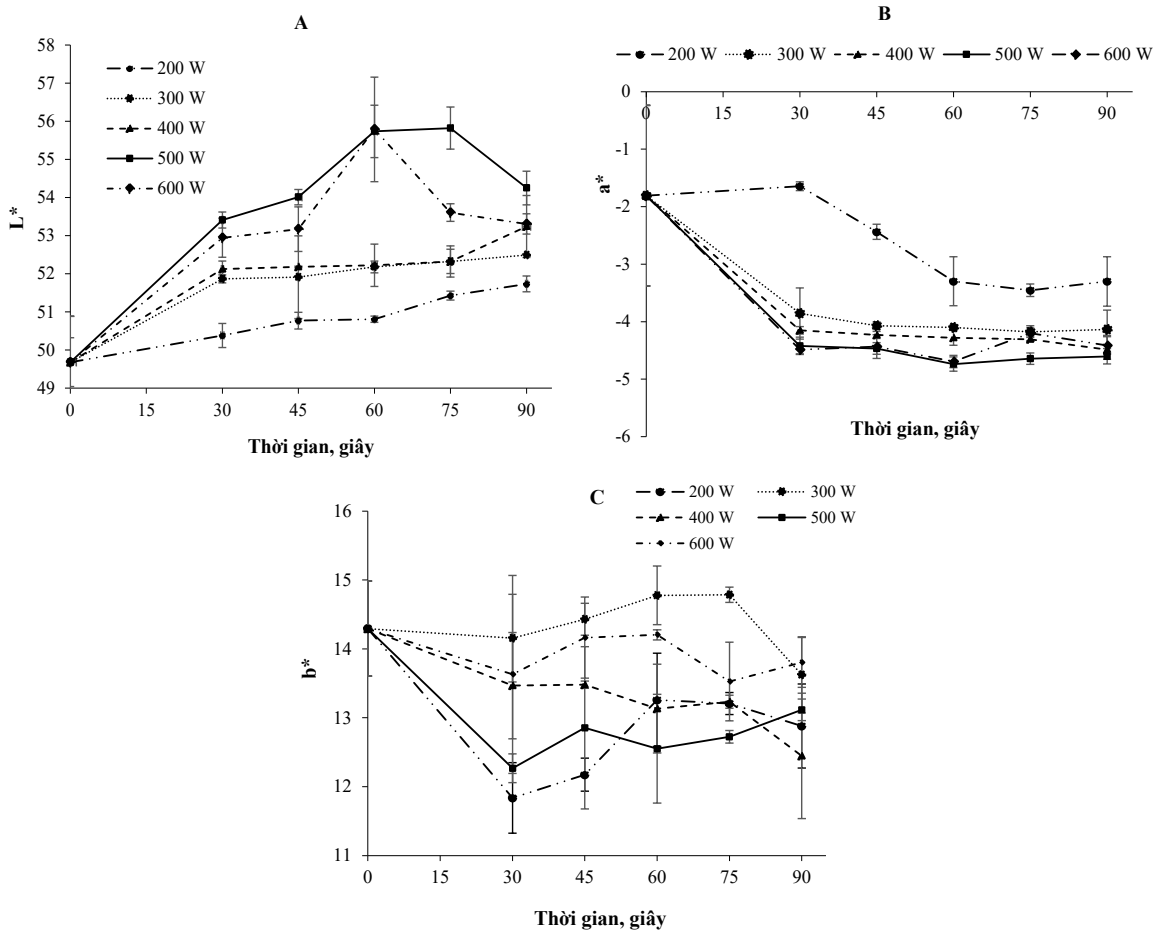
lớn thể hiện tốc độ vô hoạt POD càng cao, đồng nghĩa thời gian cần thiết (giá trị D) cho quá trình vô hoạt POD càng ngắn. Mức công suất vi sóng khác nhau dẫn đến giá trị D khác nhau ($p<0,05$), thời gian cần thiết để vô hoạt được POD giảm từ 151, 97, 91, 60 đến 59 giây tương ứng khi chần ở 200, 300, 400, 500 và 600 W. Những kết quả này chỉ ra rằng chần rau má ở 500 W (0,34±0,06 µmol.min^{-1}) và 600 W (0,30±0,13 µmol.min^{-1}) ở 60 giây là cách nhanh nhất để giảm hoạt độ POD xuống mức yêu cầu (10%).

Bảng 1. Các hằng số tốc độ bất hoạt ước tính (k) và giá trị D của quá trình bất hoạt POD trong rau má chần ở các mức công suất khác nhau

Thông số động học	Công suất (W)				
	200	300	400	500	600
Hằng số k (s^{-1})	0,0153	0,0238	0,0253	0,0377	0,0391
R^2	0,9444	0,9061	0,921	0,9447	0,9503
Giá trị D (giây)	151	97	91	61	59

3.2. Ảnh hưởng của điều kiện chần vi sóng đến màu sắc của rau má

Các giá trị màu sắc (L*, a*, b*) thay đổi đáng kể dưới sự tác động của các mức công suất từ 200 đến 600 W và được chần trong khoảng thời gian từ 30 giây đến 90 giây. Những thay đổi về màu sắc của rau má chần vi sóng được trình bày ở Hình 2 và Hình 3.



Hình 2. Ảnh hưởng của các mức công suất và thời gian đến giá trị màu sắc của rau má

Ghi chú: (A) Sự thay đổi giá trị L (B) Sự thay đổi giá trị a* (C) Sự thay đổi giá trị b**

Kết quả được trình bày ở Hình 2A cho thấy mức công suất và thời gian chần ảnh hưởng đáng kể đến giá trị độ sáng L* của rau má sau khi chần ($p<0,05$). Mặc dù các mẫu chần bằng vi sóng từ 200 đến 600

W nhìn chung đều làm tăng giá trị độ sáng (L*) đáng kể và khác biệt có ý nghĩa thống kê (p<0,05) so với mẫu không chần, cụ thể khi tăng mức công suất chần từ 200 W trong 30 giây (50,38±0,32) lên 600 W trong 30 giây (52,94±0,51), giá trị L* cũng tăng lên và khác biệt có ý nghĩa thống kê (p<0,05). Giá trị L* cao nhất được quan sát khi rau má chần ở mức công suất 500 W trong 75 giây (55,82±0,55) và không có ý nghĩa thống kê (p>0,05) so với mẫu 500 và 600 W trong 60 giây (55,73±0,69 và 55,79±1,37, tương ứng). Điều này có thể giải thích do quá trình xử lý nhiệt làm vô hoạt các enzyme gây hóa nâu như peroxidase (POD), ngăn chặn quá trình oxy hóa các hợp chất phenolic thành các sản phẩm có màu sẫm (Queiroz et al., 2008; He et al., 2018). Hơn nữa, quá trình chần còn làm phá hủy cấu trúc tế bào, đẩy khí ra khỏi không gian giữa các tế bào, làm thay đổi khúc xạ ánh sáng trên bề mặt tế bào, góp phần làm tăng độ sáng (Xiao et al., 2017). Việc tăng giá trị L* này cho thấy rau má đã được xử lý hiệu quả để bảo toàn các hợp chất chống oxy hóa quan trọng như TPC và TFC, đồng thời duy trì chất lượng cảm quan hấp dẫn hơn về mặt thị giác được quan sát qua Hình 3.

Tuy nhiên, kết quả cũng chỉ ra một xu hướng quan trọng khi ở khoảng thời gian chần 60-90 giây, với công suất 500 W và 600 W, giá trị L* lại có xu hướng giảm. Sự giảm độ sáng trong điều kiện vi sóng với cường độ cao và kéo dài này cho thấy quá trình quá nhiệt và các phản ứng thoái hóa đã xảy ra, vượt ra ngoài điểm thích hợp của quá trình chần. Nhiệt độ cao duy trì trong thời gian dài có thể thúc đẩy các phản ứng oxy hóa không enzyme hoặc phản ứng maillard, tạo ra các sản phẩm polyme hóa có màu nâu hoặc sẫm, làm giảm độ sáng tổng thể của mẫu (Nicoli et al., 1999). Ngoài ra, các sắc tố xanh như chlorophyll cũng rất nhạy cảm với nhiệt độ cao kéo dài, có thể bị phân hủy thành các dẫn xuất màu nâu (pheophytin), góp phần làm giảm giá trị L*. Điều này nhấn mạnh rằng việc thiết lập các thông số chần phù hợp (công suất và thời gian) là cực kỳ quan trọng để đạt được giá trị L* cao nhất đồng thời bảo toàn tốt nhất các thành phần có lợi và chất lượng tổng thể của rau má chần.

Kết quả được thể hiện tại Hình 2B cho thấy khi tăng các mức công suất chần, rau má có xu hướng trở nên xanh hơn, giá trị a* dao động từ -4,74±0,13 đến -1,64±0,08 ở các mức công suất từ 200 W đến 600 W. Quan sát thấy rằng mẫu xanh nhất là mẫu chần ở 500 W trong 60 giây, khác biệt không có ý nghĩa thống kê (p<0,05) khi tăng mức công suất chần lên 600 W trong cùng thời gian chần. Kết quả nghiên cứu cho thấy thời gian chần có ảnh hưởng đáng kể đến giá trị a* của rau má. Khi kéo dài thời gian chần từ 30 đến 90 giây ở các mức công suất khác nhau, giá trị a* thay đổi có ý nghĩa thống kê giữa các mẫu (p<0,05). Cụ thể, tại thời điểm 60 giây, giá trị a* giảm rõ rệt từ -3,30±0,43 (200 W) xuống -4,69±0,11 (600 W), cho thấy màu sắc có xu hướng xanh hơn khi tăng công suất vi sóng.

Bên cạnh đó, Hình 2C cho thấy giá trị b* thấp nhất (11,83±0,51) được ghi nhận ở mẫu chần 200 W trong 30 giây, trong khi giá trị cao nhất (14,78±0,42) thuộc về mẫu chần 300 W trong 60 giây. Nhìn chung, giá trị b* có xu hướng giảm so với mẫu đối chứng (14,29±0,69) sau 90 giây xử lý ở tất cả các mức công suất. Tuy nhiên, trong khoảng thời gian từ 45 đến 75 giây tại 300 W, giá trị b* dao động từ 14,43±0,23 đến 14,79±0,11, cao hơn mẫu đối chứng, nhưng sự khác biệt này không có ý nghĩa thống kê (p>0,05). Tương tự, De Ancos et al. (1999) cũng báo cáo rằng đu đủ có giá trị L* và b* tăng khi chần ở công suất 285-570 W nhưng giảm đáng kể ở 850 W. Ngoài ra, nghiên cứu này cũng cho phát hiện xu hướng gia tăng độ sáng và màu xanh của dâu tây và kiwi sau quá trình chần vi sóng.

Các thay đổi về màu sắc của rau má sau quá trình chần vi sóng, được biểu thị qua các giá trị L*, a*, b*, không chỉ là về mặt cảm quan mà còn phản ánh những biến đổi về chất lượng và thành phần hóa học. Khi giá trị L* tăng, đó là dấu hiệu tích cực cho thấy enzyme POD đã bị vô hoạt hiệu quả, giúp bảo toàn các hợp chất chống oxy hóa quan trọng như polyphenol và flavonoid. Điều này ngăn chặn quá trình oxy hóa các hợp chất phenolic thành sản phẩm sẫm màu (He et al., 2018; Queiroz et al., 2008), duy trì cả giá trị sinh học lẫn sự hấp dẫn về mặt thị giác của rau. Việc phá vỡ cấu trúc tế bào và đẩy khí ra cũng góp phần làm tăng độ sáng (Xiao et al., 2017). Ngược lại, L* giảm ở điều kiện chần với công suất quá cao làm suy giảm chất lượng rau má, có thể do các phản ứng thoái hóa tạo sản phẩm màu sẫm (Nicoli et al., 1999) hoặc sự phân hủy sắc tố chlorophyll thành pheophytin (Méndez-Lagunas et al., 2017). Về giá trị a*, việc chuyển sang âm hơn (xanh hơn) là dấu hiệu mong muốn, cho thấy chlorophyll được bảo toàn tốt. Điều này thường là do enzyme chlorophyllase bị vô hoạt, giúp giữ được màu xanh đặc trưng của rau má (Paciulli et al., 2016). Đồng thời, sự thay đổi của giá trị b* có thể liên quan đến sự ảnh hưởng lên các sắc tố vàng như carotenoid hoặc sự thoái hóa không đồng đều của các sắc tố khác. Tóm lại, các thông số màu sắc là chỉ thị quan trọng cho mức độ bảo toàn các enzyme, sắc tố (chlorophyll, carotenoid) và các hợp chất chống

oxy hóa, giúp đánh giá hiệu quả của quá trình xử lý và chất lượng tổng thể của rau má.

Hình 3. Ảnh hưởng của công suất và thời gian chần vi sóng đến màu sắc của rau má

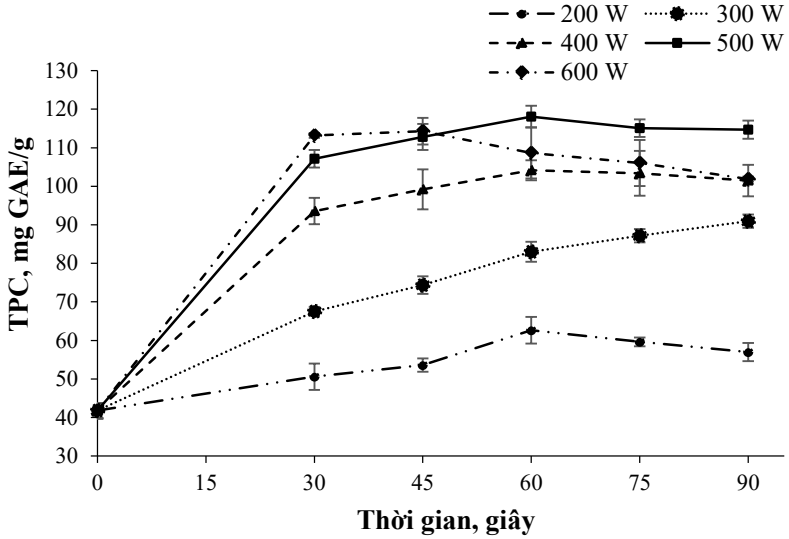
Ghi chú: A (200 W – 60 giây) B (300 W – 60 giây) C (400 W – 60 giây) D (500 W – 60 giây) E (600 W – 60 giây)

3.3. Ảnh hưởng của điều kiện chần vi sóng đến các hợp chất sinh học và khả năng loại gốc tự do DPPH trong rau má

3.3.1. Ảnh hưởng của điều kiện chần vi sóng đến TPC trong rau má

Kết quả nghiên cứu về hàm lượng các chất chống oxy hóa như TPC, TFC và khả năng loại gốc tự do DPPH của rau má chần vi sóng được trình bày ở Hình 4, 5 và 6.

Công suất sử dụng và thời gian chần ảnh hưởng đáng kể đến sự thay đổi hàm lượng polyphenol ($p<0,05$). Kết quả được trình bày ở Hình 4 cho thấy TPC thấp nhất ở mẫu 200 W trong 30 giây (50,58±3,39 mg GAE/g) và cao nhất ở mẫu 500 W trong 60 giây (118,1±2,85 mg GAE/g). Ở cùng thời gian chần (60 giây), khi tăng các mức công suất từ 200 lên 600 W thì TPC tăng rõ rệt từ 62,65±3,46 lên 108,7±6,63 mg GAE/g. Tuy nhiên, khi tăng mức công suất lên quá cao và thời gian chần dài, TPC có xu hướng giảm. Cụ thể, TPC giảm khi tăng mức công suất từ 500 lên 600 W ở cùng thời gian 90 giây, TPC giảm từ 114,7±2,36 xuống 101,9±0,65 mg GAE/g. Ismail et al. (2004) phát hiện ra rằng việc tăng các mức công suất hay thời gian khi xử lý nhiệt có thể làm giảm TPC trong tất cả các loại rau như cải xoăn, rau bina, bắp cải, bắp cải và hẹ tây. Mức độ thay đổi của các hợp chất sinh học ở thực vật trong quá trình chế biến phụ thuộc vào độ nhạy cảm của chúng đối với sự biến đổi hoặc suy thoái và thời gian tiếp xúc với kỹ thuật chế biến (Ismail et al., 2004).



Hình 4. Ảnh hưởng của chần vi sóng đến TPC trong rau má

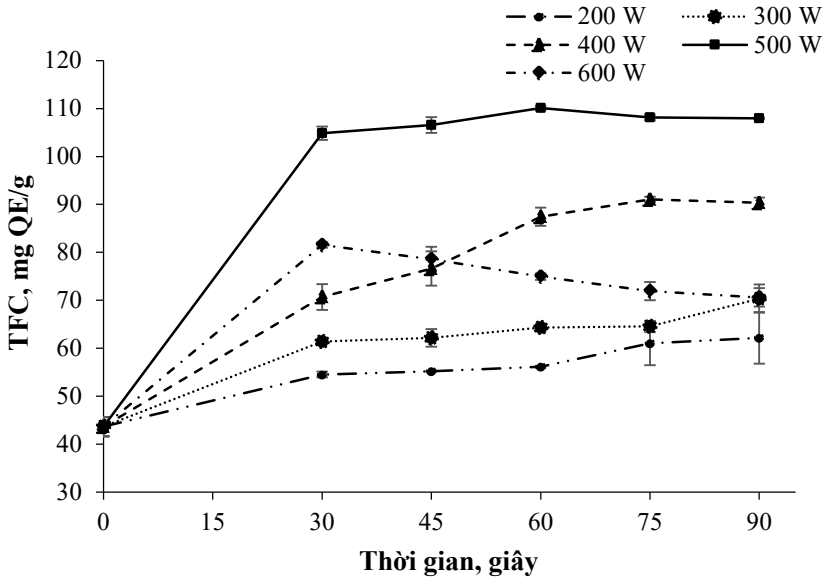
Đồng thời, kết quả cũng cho thấy khi tăng thời gian chần từ 30 lên 90 giây ở cùng mức công suất, TPC có xu hướng tăng. Cụ thể, ở công suất 400 W, TPC tăng từ 93,57±3,39 mg GAE/g ở 30 giây lên 101,5±4,08 mg GAE/g ở 90 giây. Điều này được giải thích rằng xử lý nhiệt làm phá vỡ cấu trúc thành tế bào, giúp giải phóng các hợp chất polyphenol ở dạng liên kết hoặc bị giữ trong mô thực vật. Đồng thời, nhiệt độ cao vô hoạt các enzyme oxy hóa dẫn đến hạn chế sự phân hủy các

hợp chất polyphenol. Đồng thời, nhiệt độ cao cũng có thể thủy phân các liên kết ester hoặc glycoside, giải phóng polyphenol liên kết thành dạng tự do, góp phần làm tăng TPC trong nguyên liệu thực phẩm. Nghiên cứu chần vi sóng trên bông cải xanh ở công suất 1000 W trong 90 giây cũng cho thấy TPC tăng từ 12,04 đến 15,10 mg GAE/g (Turkmen et al., 2005). Do đó, rau má chần bằng phương pháp vi sóng hầu hết đều làm tăng đáng kể TPC so với mẫu rau má không chần. Kết quả nghiên cứu này phù hợp với phát hiện của Chávez-Reyes et al. (2013), quá trình tiền xử lý bằng vi sóng cải thiện việc chiết xuất các hợp chất polyphenol từ quả sơn trà, tuy nhiên khi kéo dài thời gian chần sẽ làm gia tăng việc phá hủy các hợp chất sinh học.

Kết quả cho thấy sự thay đổi TPC có mối liên hệ mật thiết với quá trình vô hoạt enzyme và phân hủy nhiệt. Ở các nghiệm thức chần, khi tăng công suất và thời gian, năng lượng vi sóng giúp vô hoạt hiệu quả enzyme POD. Cụ thể, hoạt độ POD giảm mạnh từ 1,95 xuống 0,26 µmol.min^{-1} khi tăng công suất từ 200 W lên 600 W, tương ứng với sự gia tăng rõ rệt của TPC từ 62,65 lên 108,7 mg GAE/g. Tuy nhiên, khi enzyme đã bị vô hoạt gần như hoàn toàn (trên 90% ở nghiệm thức 500 W trong 60 giây), việc tiếp tục tăng công suất lên 600 W không làm giảm hoạt độ POD thêm đáng kể mà lại gây ra sự giảm TPC từ 114,7 xuống 101,9 mg GAE/g. Điều này chứng minh rằng khi enzyme đã được kiểm soát, việc xử lý nhiệt quá mức sẽ dẫn đến sự phá hủy các hợp chất polyphenol, khẳng định sự tồn tại của một ngưỡng chần tối ưu để vừa bảo vệ polyphenol bằng cách vô hoạt enzyme vừa tránh sự phân hủy do nhiệt.

3.3.2. Ảnh hưởng của điều kiện chần vi sóng đến TFC trong rau má

Kết quả được thể hiện ở Hình 5 cho thấy công suất vi sóng và thời gian chần cũng ảnh hưởng đáng kể đến sự thay đổi TFC ($p<0,05$).



Hình 5. Ảnh hưởng của chần vi sóng đến TFC trong rau má

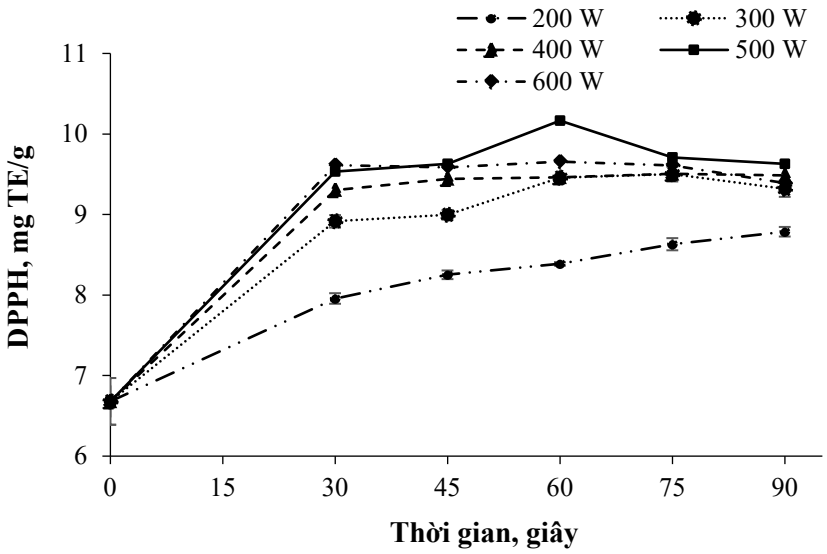
Kết quả cho thấy TFC thấp nhất được tìm thấy ở mẫu chần bằng vi sóng là 200 W trong 30 giây với TFC đạt 54,54±0,59 mg QE/g và tăng lên cao nhất ở mẫu 500 W trong 60 giây và 500 W trong 75 giây, hai mẫu này khác biệt không có ý nghĩa thống kê ($p>0,05$), với hàm lượng lần lượt là 110,1±0,44 và 108,1±0,58 mg QE/g. Tương tự TPC, TFC cũng tăng lên khi tăng các mức công suất, cụ thể TFC tăng từ 70,37±2,96 mg QE/g ở 300 W trong 90 giây lên 107,9±0,20 mg QE/g ở 500 W trong cùng thời gian chần. Heras-Ramírez et al. (2011) cũng quan sát thấy sự gia tăng hàm lượng phenolic trong đó có flavonoid đối với táo chần, nguyên nhân chủ yếu là do sự bất hoạt của enzyme. Tuy nhiên, TFC giảm mạnh khi tăng lên đến mức công suất cao, ở 600 W trong 90 giây, TFC đạt 70,61±1,92 mg QE/g và khác biệt không có ý nghĩa thống kê với mẫu 300 W trong 90 giây (70,37±2,96 mg QE/g), kết quả cho thấy khi tăng các mức công suất lên quá cao thì TFC giảm mạnh. Điều này có thể được giải thích rằng dưới tác động của vi sóng ở mức công suất cao, nhiệt độ tại một số vị trí trong nguyên liệu có thể tăng cao làm phá vỡ liên kết glycoside và oxy hóa các nhóm

hydroxyl trong cấu trúc flavonoid, dẫn đến xu hướng giảm TFC trong nguyên liệu rau má (Turkmen et al., 2005).

Nhìn chung, hầu hết các mẫu rau má chần vi sóng đều làm tăng TFC và khác biệt có ý nghĩa thống kê (p<0,05) so với mẫu không chần. Sự gia tăng công suất vi sóng ở mức thích hợp dẫn đến gia tăng độ linh động của các phân tử phân cực trong dung dịch trích ly, từ đó làm nhiệt độ của dung dịch tăng lên và thúc đẩy quá trình phân hủy các hợp chất cao phân tử thành các hợp chất flavonoid (Guzik et al., 2022). Theo nghiên cứu của Erihemu et al. (2021), TFC trong khoai tây tăng đáng kể khi tăng công suất từ 100 đến 300 W. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng công suất đến 900 W thì hàm lượng các hợp chất sinh học giảm đến 14,9%. Trong nghiên cứu này, hàm lượng hợp chất flavonoid đã được cải thiện đáng kể so với mẫu không chần (43,66±2,01) sau quá trình tiền xử lý vi sóng.

3.3.3. Ảnh hưởng của điều kiện chần vi sóng đến khả năng loại gốc tự do DPPH có trong rau má

Tương tự với TPC và TFC, công suất vi sóng và thời gian chần cũng có ảnh hưởng đáng kể đến sự thay đổi khả năng loại gốc tự do DPPH (p<0,05). Khả năng kháng oxy hóa được xác định dựa theo cơ chế quét gốc tự do và làm giảm DPPH. Từ kết quả thể hiện ở Hình 6 có thể thấy khả năng chống oxy hóa của rau má sau khi chần có xu hướng tăng, khi tiến hành tăng mức độ xử lý ở mức công suất từ 200 đến 600 W và khác biệt có ý nghĩa thống kê (p<0,05). Ở mức công suất 500 W trong 60 giây, hoạt tính chống oxy hóa DPPH cao nhất (10,2±0,61 mg TE/g) và tăng lên 52,70% so với mẫu không chần. Theo Puupponen-Pimiä et al. (2003), quá trình chần làm tăng 9% khả năng chống oxy đối với bắp cải. Đồng thời, Wu et al. (2004) nhận thấy khả năng trung hòa gốc oxy hóa cũng tăng 41% đối với bắp cải khi nấu chín. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng các mức công suất và thời gian có khả năng làm tăng hàm lượng các chất chống oxy hóa cũng như hoạt tính của chúng, nhưng khi tăng công suất quá cao và thời gian chần quá dài có thể làm giảm hàm lượng đáng kể các hợp chất chống oxy hóa của rau má dẫn đến khả năng loại gốc tự do giảm theo. Cụ thể, khả năng chống oxy hóa tăng từ 7,96±0,07 mg TE/g (200 W – 30 giây) đến 9,39±0,04 mg TE/g (600 W – 90 giây) khi tăng cả mức công suất và thời gian xử lý. Việc đánh giá ảnh hưởng của quá trình chế biến thực phẩm là yếu tố then chốt trong khi thiết lập các điều kiện công nghệ cho phép bảo quản hoặc cải thiện hoạt tính ban đầu và khả dụng sinh học của các hợp chất tự nhiên có trong thực phẩm (Kusznierewicz et al., 2008). Vì vậy, điều quan trọng là phải lựa chọn các điều kiện phù hợp sao cho sản phẩm chế biến vẫn giữ được các đặc tính, tăng cường khả năng chống oxy hóa của nguyên liệu. Việc kết hợp đúng thời gian và nhiệt độ trong các phương pháp chế biến như chần hoặc cho vào lò vi sóng là rất quan trọng để giảm thiểu tổn thất chất lượng trong quá trình chế biến.



Hình 6. Ảnh hưởng của chần vi sóng đến khả năng loại gốc tự do DPPH trong rau má

Theo Erihemu et al. (2021), so với các phương pháp chần thông thường, chần bằng vi sóng là kỹ thuật phù hợp nhất để giữ lại các hợp chất flavonoid, anthocyanin, phenolic và acid ascorbic ở công suất vừa phải từ 300 W. Tuy nhiên, khi tăng mức công suất quá cao có liên quan đến việc tăng khả năng sinh nhiệt, ảnh hưởng đến các chất hóa học thực vật không bền với nhiệt. Mặt khác, mức công suất thấp hơn 100 W không hiệu quả để vô hoạt POD. Như vậy, kết quả nghiên cứu phù hợp với nghiên cứu này khi chần rau má với sự hỗ trợ của vi sóng từ 200 đến 600 W. Do đó, các kết quả trong nghiên cứu này cung cấp cơ sở tổng quan về phương pháp chần vi sóng rau má. Một phương pháp thích hợp phải có khả năng vô hiệu hóa enzyme hóa nâu trong khi vẫn giữ được màu sắc và giá trị dinh dưỡng ban đầu của nguyên liệu.

3.4. Mối tương quan giữa hoạt độ POD, màu sắc, các hợp chất sinh học và khả năng loại gốc tự do DPPH trong rau má

Nghiên cứu về rau má đã chỉ ra mối tương quan chặt chẽ và có ý nghĩa thống kê giữa hoạt độ enzyme peroxidase (POD), màu sắc, hàm lượng các hợp chất sinh học và khả năng loại gốc tự do. Bảng 2 cho thấy sự tương quan cao có ý nghĩa giữa các chỉ tiêu ($p<0,01$), khẳng định vai trò trung tâm của POD trong các biến đổi này. Cụ thể, hoạt độ POD biến thiên ngược chiều với độ sáng L* (r = -0,740), TPC (r = -0,812), TFC (r = -0,656) và khả năng loại gốc tự do DPPH (r = -0,939). Ngược lại, POD lại tỷ lệ thuận với độ đỏ/xanh a* (r = 0,851). Điều này cho thấy rằng, sự suy giảm hoạt độ POD đi kèm với sự gia tăng độ sáng, hàm lượng các hợp chất TPC, TFC, khả năng chống oxy hóa và xu hướng chuyển màu sang xanh của mẫu.

POD xúc tác quá trình oxy hóa các hợp chất phenolic bằng cách sử dụng hydrogen peroxide (H_2O_2) (Pour et al., 2022). Cơ chế bao gồm việc enzyme phản ứng với H_2O_2 để tạo thành các trạng thái oxy hóa cao (hợp chất I và II), sau đó sẽ oxy hóa trực tiếp hợp chất flavonoid và polyphenol tạo thành các gốc tự do phenolic không bền vững. Các gốc tự do này dễ dàng trải qua quá trình trùng hợp, tạo thành các polymer lớn hơn, thường là các sắc tố màu nâu sẫm, gây ra hiện tượng hóa nâu do enzyme (Queiroz et al., 2008). Quá trình oxy hóa và polymer hóa này không chỉ làm giảm trực tiếp TPC và TFC đo được mà còn làm suy giảm đáng kể khả năng nhường electron hoặc proton của chúng, từ đó giảm khả năng chống oxy hóa của mẫu (He et al., 2018).

Bảng 2 còn cho thấy mối liên hệ chặt chẽ giữa màu sắc (L*, a*) và khả năng loại gốc tự do DPPH, đây là hệ quả trực tiếp của sự thay đổi hàm lượng các hợp chất polyphenol. Các hợp chất polyphenol và flavonoid là những chất chống oxy hóa mạnh mẽ, quyết định phần lớn khả năng loại gốc tự do DPPH của rau má. Đồng thời, chính các hợp chất này lại là cơ chất cho quá trình hóa nâu enzyme do POD xúc tác. Khi POD hoạt động mạnh, chúng phân hủy các hợp chất polyphenol và flavonoid, làm giảm khả năng chống oxy hóa (thể hiện qua sự giảm khả năng loại gốc tự do DPPH). Cùng lúc đó, các sản phẩm oxy hóa của chúng lại tạo ra các sắc tố màu nâu hoặc đỏ, làm giảm độ sáng L* và tăng độ đỏ a*. Do đó, độ sáng L* có tương quan dương với TPC (r = 0,810), TFC (r = 0,765) và DPPH (r = 0,784), trong khi độ đỏ/xanh a* lại cho thấy mối tương quan nghịch đảo với các chỉ tiêu này (TPC: r = -0,871; TFC: r = -0,712; DPPH: r = -0,905). Điều này nhấn mạnh rằng màu sắc của mẫu có thể được xem như một chỉ thị trực quan cho mức độ suy giảm của các hợp chất sinh học và khả năng chống oxy hóa của rau má. Hơn nữa, kết quả cũng khẳng định TPC và TFC có sự tương quan tuyến tính mạnh (r = 0,837) và cùng tỷ lệ thuận với khả năng loại gốc tự do DPPH (TPC: r = 0,877; TFC: r = 0,734), phản ánh mối liên hệ mật thiết giữa hàm lượng các hợp chất này và hoạt tính chống oxy hóa của mẫu. Tóm lại, các kết quả này nhấn mạnh sự tương quan chặt chẽ giữa các chỉ tiêu hóa học và đặc tính màu sắc của mẫu rau má.

Bảng 2. Hệ số tương quan giữa các chỉ tiêu

Chỉ tiêu	POD	L*	a*	TPC	TFC	DPPH
POD	1	-0,740*	0,851**	-0,812**	-0,656	-0,939**
L*		1	-0,767*	0,810**	0,765*	0,784*
a*			1	-0,871**	-0,712*	-0,905**
TPC				1	0,837**	0,877**
TFC					1	0,734*
DPPH						1

Ghi chú: N = 78; (*) kết quả biểu thị sự tương quan ở mức 5%; (**) kết quả biểu thị sự tương quan ở mức 1%.

4. KẾT LUẬN

Công suất 500 W trong thời gian 60 giây được xác định là điều kiện phù hợp để bất hoạt enzyme peroxidase trong quá trình chần rau má bằng vi sóng. Ở điều kiện này, hoạt tính POD bị ức chế đến hơn 90% so với mẫu không xử lý nhiệt. Bên cạnh đó, TPC, TFC, khả năng loại gốc tự do DPPH, cùng với các giá trị màu sắc L*, a* và b* của rau má cũng được cải thiện rõ rệt so với các mẫu chần ở điều kiện khác hoặc mẫu không chần. Hơn nữa, kết quả còn cho thấy sự tương quan chặt chẽ giữa hoạt độ POD, TPC, TFC, khả năng loại gốc tự do DPPH, giá trị L* và a* của rau má trong quá trình chần. Chần vi sóng không chỉ nâng cao chất lượng cảm quan về màu sắc mà còn giúp bảo toàn các hợp chất sinh học quý giá trong rau má, qua đó góp phần nâng cao giá trị sản phẩm. Ngoài ra, các thông số thu được từ nghiên cứu còn có thể được sử dụng làm cơ sở khoa học để xây dựng các quy trình sấy phù hợp, hướng tới sản xuất bột rau má đạt chất lượng cao về màu sắc và hàm lượng hợp chất sinh học, từ đó mở ra tiềm năng phát triển thương mại lớn cho nguồn nguyên liệu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

Benlloch-Tinoco, M., Carranza-Concha, J., Camacho, M. M., & Martínez-Navarrete, N. (2015). Production of raisins and its impact on active compounds. *In Processing and impact on active components in food* (pp. 181-187). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00022-6

Chávez-Reyes, Y., Dorantes-Alvarez, L., Arrieta-Baez, D., Osorio-Esquivel, O., & Ortiz-Moreno, A. (2013). Polyphenol oxidase inactivation by microwave oven and its effect on phenolic profile of loquat (*Eriobotrya japonica*) fruit. *Food and Nutrition Sciences*, *4*(9), 87-94. https://doi.org/10.4236/fns.2013.49a2012

De Ancos, B., Cano, M. P., Hernandez, A., & Monreal, M. (1999). Effects of microwave heating on pigment composition and colour of fruit purees. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 79*(5), 663-670. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199904)79:5<663::AID-JSFA232>3.0.CO;2-L

Demirdöven, A., & Baysal, T. (2008). Novel applications in vegetable and fruit processing industry. *Turkey 10th food congress*, 21-23 May, Erzurum, Turkey.

Erihemu, Wang, M., Zhang, F., Wang, D., Zhao, M., Cui, N., Gao, G., Guo, J., & Zhang, Q. (2021). Optimization of the process parameters of ultrasound on inhibition of polyphenol oxidase activity in whole potato tuber by response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology, 144,* 111-232. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111232

Guzik, P., Kulawik, P., Zając, M., & Migdał, W. (2022). Microwave applications in the food industry: An overview of recent developments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62*(29), 7989-8008. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871

He, L., Liu, Y., Wu, X., & Liu, S. (2018). Effects of blanching on enzymatic browning and physicochemical properties of fresh-cut lotus root slices. *Food Chemistry*, *245*, 660–666. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.087

Heras-Ramírez, M. E., Quintero-Ramos, A., Camacho-Dávila, A. A., Barnard, J., Talamás-Abbud, R., Torres-Muñoz, J. V., & Salas-Muñoz, E. (2011). Effect of blanching and drying temperature on polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace. *Food and Bioprocess Technology, 5*(6), 2201-2210. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0583-x

Ismail, A., Marjan, Z. M., & Foong, C. W. (2004). Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetables. *Food chemistry, 87(4),* 581-586. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.010

Kusznierewicz, B., Bartoszek, A., Wolska, L., Drzewiecki, J., Gorinstein, S., & Namieśnik, J. (2008). Partial characterization of white cabbages (*Brassica oleracea* var. capitata f. alba) from different regions by glucosinolates, bioactive compounds, total antioxidant activities and proteins. *LWT-Food Science and Technology*, *41*(1), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.02.007

Liu, P., Mujumdar, A. S., Zhang, M., & Jiang, H. (2014). Comparison of Three Blanching Treatments on the Color and Anthocyanin Level of the Microwave-Assisted Spouted Bed Drying of Purple Flesh Sweet Potato. *Drying Technology, 33*(1), 66-71. https://doi.org/10.1080 /07373937.2014.936558

Méndez-Lagunas, L. L., Rodríguez-Ramírez, J., Cruz-Castañón, J. R., & Chávez-González, M. L. (2017). Kinetic study of chlorophyll degradation in spinach (Spinacia oleracea L.) during hot air drying. *Food Science and Technology International*, *23*(3), 209-216. https://doi.org/10.1177/1082013216670860

Mishra, V. K., & Gamage, T. V. (2007). Postharvest physiology of fruit and vegetables. In *Handbook of food preservation* (pp. 37-66). CRC press. https://doi.org/10.1201/9781420017373-8

Nicoli, M. C., Anese, M., & Parpinel, M. T. (1999). Influence of enzymatic browning and pH on the stability of fruit juices phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *47*(3), 856–860. https://doi.org/10.1021/jf980836e

Nguyen, N. M. P., Le, T. T., Vissenaekens, H., Gonzales, G. B., Van Camp, J., Smagghe, 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/ijfs.14093

Paciulli, M., Rinaldi, M., Castaldo, D., & Limbo, S. (2016). Combined effect of blanching and packaging on the quality retention of fresh-cut cauliflower. *Journal of Food Engineering*, *180*, 66-74. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.013

Pour, A. K., Khorram, S., Ehsani, A., Ostadrahimi, A., & Ghasempour, Z. (2022). Atmospheric cold plasma effect on quality attributes of banana slices: Its potential use in blanching process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *76*, 102-945. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102945

Puupponen-Pimiä, R., Häkkinen, S. T., Aarni, M., Suortti, T., Lampi, A. M., Eurola, M., & Oksman-Caldentey, K. M. (2003). Blanching and long-term freezing affect various bioactive compounds of vegetables in different ways. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 83*(14), 1389-1402. https://doi.org/10.1002/jsfa.1589

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

Queiroz, C., Mendes, L. P., Fialho, E., & Olga, M. (2008). Polyphenol oxidase and peroxidase in foods: an overview. *Journal of Food Quality*, *31*(6), 723–736. https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2008.00222.x

Ramesh, M. N., Wolf, W., Tevini, D., & Bognár, A. (2002). Microwave blanching of vegetables. *Journal of Food Science*, *67*(1), 390-398. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11416.x

Saini, R., Kaur, S., Aggarwal, P., & Dhiman, A. (2023). The influence of conventional and novel blanching methods on potato granules, phytochemicals, and thermal properties of colored varieties. *Frontiers in Nutrition*, *10*, 117-141. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1178797

Sampedro, F., Phillips, J., & Fan, X. (2014). Use of response surface methodology to study the combined effects of UV-C and thermal processing on vegetable oxidative enzymes. *LWT-Food Science and Technology*, *55*(1), 189-196. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.07.010

Severini, C., Baiano, A., De Pilli, T., Romaniello, R., & Derossi, A. (2004). Microwave blanching of sliced potatoes dipped in saline solutions to prevent enzymatic browning. *Journal of Food Biochemistry, 28,* 75-89. https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2004.tb00056.x

Soysal, Ç., & Söylemez, Z. (2005). Kinetics and inactivation of carrot peroxidase by heat treatment. *Journal of Food Engineering, 68,* 349-356. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.009

Turkmen, N., Sari, F., & Velioglu, Y. S. (2005). The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. *Food chemistry, 93*(4), 713-718. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.038

Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L., & Byrne, D. H. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, *19*(6-7), 669-675. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003

Tripathi, G., Mishra, S., Upadhyay, P., Purohit, S., & Dubey, G. P. (2015). Ethnopharmacological importance of *Centella asiatica* with special reference to neuroprotective activity. *Asian Journal of Pharmacology and Toxicology*, *3*(10), 49-53.

Trirattanapikul, W., & Phoungchandang, S. (2014). Microwave blanching and drying characteristics of *Centella asiatica* (L.) Urban leaves using tray and heat pump-assisted dehumidified drying. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(12), 3623-3634. https://doi.org/10.1007/s13197-012-0876-8

Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2010). Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials - a review. *Food and Bioprocess Technology, 3*, 161-171. https://doi.org/10.1007/s11947-008-0136-0

Wang, J., Yang, X. H., Mujumdar, A. S., Wang, D., Zhao, J. H., Fang, X. M., Zhang, Q., Xie, L., Gao, Z. J., & Xiao, H.W. (2017). Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying

kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *LWT - Food Science and Technology, 77*, 337-347. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.070

Wu, X., Beecher, G. R., Holden, J. M., Haytowitz, D. B., Gebhardt, S. E., & Prior, R. L. (2004). Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *Journal of Agricultural and Food chemistry, 52*(12), 4026-4037. https://doi.org/10.1021/jf049696w

Xiao, H. W., Pan, Z., Deng, L. Z., El-Mashad, H. M., Yang, X. H., Mujumdar, A. S., Gao, Z. J., & Zhang, Q. (2017). Recent developments and trends in thermal blanching–A comprehensive review. *Information processing in Agriculture, 4*(2), 101-127. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.02.001

Zhang, C., Lyu, X., Aadil, R. M., Tong, Y., Zhao, W., & Yang, R. (2023). Microwave heating instead of blanching to produce low-fat French fries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 84,* 103-298. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103298

Zheng, H., & Lu, H. (2011). Effect of microwave pretreatment on the kinetics of ascorbic acid degradation and peroxidase inactivation in different parts of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) during water blanching. *Food Chemistry, 128*(4), 1087-1093. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.130