

Ảnh hưởng của phương pháp sấy đến thành phần hóa học và đặc tính hóa lý của tảo xoắn *Spirulina platensis*

Nguyễn Trọng Bách^{1,2*}, Trần Bảo Duy¹, Lê Bền², Đinh Văn Hiện³

¹Khoa Công nghệ Thực phẩm, Trường Đại học Nha Trang, 2 Nguyễn Đình Chiểu, phường Bắc Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa, Việt Nam

²Trung tâm Phát triển Công nghệ Rong biển, Công ty TNHH Trí Tín, 35 Võ Trú, phường Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa, Việt Nam

³Trung tâm Kỹ thuật Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng, Sở Khoa học và Công nghệ Khánh Hòa, 37 Hùng Vương, phường Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa, Việt Nam

Ngày nhận bài 11/3/2025; ngày chuyển phản biện 13/3/2025; ngày nhận phản biện 5/4/2025; ngày chấp nhận đăng 10/4/2025

Tóm tắt:

Phương pháp sấy ảnh hưởng đến trạng thái, cấu trúc và thành phần hóa học, đặc biệt là các chất đặc trưng màu sắc có hoạt tính chống oxy hóa của tảo xoắn. Nghiên cứu này có ý nghĩa định hướng sử dụng phương pháp làm khô giúp gia tăng chuỗi giá trị tảo xoắn. Kết quả chỉ ra rằng, thành phần hóa học và một số đặc tính hóa lý khác của tảo *Spirulina platensis* bị ảnh hưởng ít nhất bởi phương pháp sấy thăng hoa ở 30°C, tiếp đến là sấy lạnh bơm nhiệt ở 50°C và nhiều nhất là sấy bằng không khí nóng ở 50°C. Trong phạm vi nghiên cứu, tảo xoắn sấy bằng không khí nóng có trị số peroxit cao và tốc độ lắng đọng trong nước nhanh nhất. Trong số các phương pháp được sử dụng trong nghiên cứu này, sấy thăng hoa tảo xoắn là phương pháp phù hợp nhất để giữ lại các chất chuyển hóa thứ cấp như sắc tố phycocyanin. Tuy nhiên, phương pháp sấy lạnh bơm nhiệt hoàn toàn có thể sử dụng để thay thế cho phương pháp sấy thăng hoa nhằm mục đích giảm chi phí sản xuất, nhưng vẫn giữ được giá trị ứng dụng của tảo *Spirulina platensis* nếu như hoạt tính chống oxy hóa không phải là mối quan tâm chính như màu sắc hay giá trị dinh dưỡng.

Từ khóa: phycocyanin, sấy lạnh, sấy thăng hoa, *Spirulina platensis*, thành phần hóa học.

Chỉ số phân loại: 2.8, 2.10

Effects of drying method on chemical composition and physicochemical properties of *Spirulina platensis*

Trong Bach Nguyen^{1,2*}, Bao Duy Tran¹, Ben Le², Van Hien Dinh³

¹Faculty of Food Technology, Nha Trang University, 2 Nguyen Dinh Chieu Street, Bac Nha Trang Ward, Khanh Hoa Province, Vietnam

²Center for Seaweed Technology, Tri Tin Company Ltd, 35 Vo Tru Street, Nha Trang Ward, Khanh Hoa Province, Vietnam

³Quality Assurance And Testing Center, Department of Science and Technology of Khanh Hoa Province,

37 Hung Vuong Street, Nha Trang Ward, Khanh Hoa Province, Vietnam

Received 11 March 2025; revised 5 April 2025; accepted 10 April 2025

Abstract:

The drying method affects the physical state, structure and chemical composition of *Spirulina platensis*, particularly its colour-related compounds exhibiting antioxidant activity. This study provides guidance on using drying methods to enhance the value chain of Spirulina. The results of the study demonstrated that the chemical composition and other physicochemical properties of *Spirulina platensis* were the least affected by freeze-drying at 30°C, followed by heat pump drying at 50°C, whereas hot-air drying at 50°C had the greatest impact. Within the scope of the study, hot-air-dried *Spirulina platensis* exhibited the highest peroxide value and the fastest sedimentation rate in water. Among the used methods in this study, freeze-drying is the most suitable method to retain secondary metabolites such as phycocyanin in *Spirulina platensis*. However, heat pump drying can be effectively used as an alternative to freeze-drying to reduce production costs while maintaining the application value of *Spirulina platensis*, provided that antioxidant activity is not the primary concern compared with colour or nutritional value.

Keywords: chemical composition, freeze-drying, heat pump drying, phycocyanin, *Spirulina platensis*.

Classification numbers: 2.8, 2.10

*Tác giả liên hệ: Email: ntbachnt@ntu.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Tảo biển nói chung và tảo xoắn nói riêng có vai trò quan trọng trong nhiều ngành kinh tế, đặc biệt là trong lĩnh vực thực phẩm và y dược [1-4]. Tảo xoắn có tên khoa học là *Spirulina platensis*, dạng sợi xoắn màu xanh lục có giá trị dinh dưỡng và đặc tính dược phẩm được công nhận. Loại vi khuẩn lam này chứa một lượng protein rất cao, có thể đạt tới 75% trọng lượng (theo khối lượng khô), bao gồm tất cả các axit amin thiết yếu [5]. *Spirulina platensis* có nhiều loại vitamin (như A, E, K, C, B) và các khoáng chất như kali, sắt, canxi, photpho, mangan, đồng, kẽm và magiê [6, 7]. Các sắc tố của tảo xoắn bao gồm: carotenoids, chlorophyll a, b và phycocyanin, trong đó phycocyanin là một hợp chất chống oxy hóa và chống viêm được sử dụng trong ngành công nghiệp mỹ phẩm và sắc tố [1-3, 7, 8].

Sinh khối của *Spirulina platensis* có thể được tiêu thụ dưới dạng sệt nhão tươi, hoặc dạng sản phẩm khô tùy theo ứng dụng. Sau khi nuôi cấy và thu hoạch, sinh khối tảo xoắn thường được làm khô bằng cách sấy nhằm giảm hàm lượng nước trong dạng sệt nhão. Mục đích chính là giảm thiểu các thay đổi sinh hóa và hoạt động của vi sinh vật, để tăng độ bền và tính ổn định của sản phẩm cuối cùng [9]. Các hợp chất trong sinh khối tảo tươi rất nhạy cảm với nhiệt độ, ánh sáng, hoạt động của enzyme và quá trình oxy hóa khi có ẩm hay không khí, vì vậy chúng có thể bị phân hủy trong quá trình sấy khô [9]. Ngoài mục đích bảo quản, mất nước làm giảm khối lượng và thể tích sản phẩm xuống đáng kể, đồng thời cải thiện hiệu quả việc vận chuyển và lưu trữ.

Nhiều công nghệ khác nhau được sử dụng để sấy khô tảo xoắn [10] như phương pháp sấy truyền thống là dùng không khí nóng [11-16], sấy bằng bơm nhiệt [17, 18], sấy thăng hoa [15], hay một số công nghệ mới như sấy bằng vi sóng kết hợp chân không [19] nhằm giúp nâng cao chất lượng sản phẩm tảo khô. Các kỹ thuật sấy khác nhau ảnh hưởng đến chi phí, năng lượng, thời gian, hình dạng của sản phẩm cuối cùng và khả năng duy trì hàm lượng dinh dưỡng so với tảo tươi. Trong quá trình sấy khô, giá trị dinh dưỡng giảm xuống do protein, lipid, sắc tố và các chất dinh dưỡng khác bị biến đổi do thời gian, nhiệt độ và sự tiếp xúc với không khí [10]. Hiện nhiều nghiên cứu về tảo khô chủ yếu tập trung khảo sát ảnh hưởng của điều kiện sấy như: các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình làm khô tảo xoắn bằng không khí nóng (sấy phun, sấy trống quay) [12, 13, 15, 16, 19] hay sấy bơm nhiệt [17, 18], sấy chân không thăng hoa [19], cũng như một số kỹ thuật sấy tiên tiến như: sấy bằng vi sóng [19], sấy hồng ngoại [20]. Trong số đó, có một số nghiên cứu đánh giá ảnh

hưởng của phương pháp sấy đến hàm lượng phycocyanin. E.G. Oliveira và cs (2009) [12] xác định được hàm lượng phycocyanin của tảo sấy khô bằng không khí nóng đạt tới 12,6%. R.C. Bruna và cs (2015a) [17] chỉ ra rằng, tảo sấy khô bằng phương pháp sấy bơm nhiệt tốt hơn sấy khay bằng không khí nóng ở 60°C; phương pháp sấy bơm nhiệt ở 50°C có tổn thất phycocyanin thấp nhất (20,5%). M. Demarco và cs (2021) [15] chỉ ra rằng, phương pháp sấy bằng không khí nóng ở nhiệt độ 60°C và sấy đông khô đều làm giảm hàm lượng phycocyanin của tảo *Arthrospira platensis* xuống còn khoảng 80-90% sau 100 phút sấy, nhưng phương pháp sấy đông khô giữ được màu xanh của tảo tốt hơn phương pháp sấy nhiệt độ cao. Thực tế, không có nhiều nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của các phương pháp sấy đến chất lượng của cùng một đối tượng tảo xoắn cụ thể - một vấn đề đáng được quan tâm liên quan đến chọn công nghệ làm khô để giảm chi phí sản xuất nhưng vẫn phải đảm bảo được chất lượng sản phẩm cuối cùng.

Do đó, ở nghiên cứu này chúng tôi tập trung khảo sát, so sánh một số thành phần cơ bản, những thay đổi hóa lý của tảo xoắn được làm khô bằng phương pháp dùng không khí nóng, sấy lạnh bơm nhiệt và sấy thăng hoa. Kết quả thu được góp phần định hướng kỹ thuật xử lý làm khô trong chuỗi cung ứng tảo xoắn, và khả năng sử dụng tảo khô phù hợp đối với một số lĩnh vực cụ thể như trong sản xuất sản phẩm thực phẩm, hay y dược.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng

Tảo xoắn (*Spirulina platensis*) được thu hoạch tại trại nuôi tảo xoắn ở xã Ninh Thọ, thị xã Ninh Hòa, tỉnh Khánh Hòa (trước sáp nhập). Tảo sau khi thu hoạch được rửa qua nước sạch 3 lần và được ép ráo đến độ ẩm $92,07 \pm 0,45\%$. Tảo tươi đựng trong túi PE được bảo quản lạnh bằng nước đá lạnh và đưa ngay về phòng thí nghiệm để tiến hành nghiên cứu.

2.2. Chuẩn bị tảo xoắn khô

Sấy bằng không khí nóng: Lớp tảo tươi được dàn đều 1 cm trên khay sấy có lỗ trên lớp vải lọc 0,5 μm và được sấy khô bằng không khí nóng ở nhiệt độ 50°C trong thời gian 12 giờ bằng tủ sấy Sunsay (Model SS-5710CD, Việt Nam).

Sấy lạnh bơm nhiệt: Lớp tảo tươi được dàn đều 1 cm trên khay sấy có lỗ trên lớp vải lọc 0,5 μm và được sấy lạnh ở nhiệt độ 50°C trong thời gian 10 giờ bằng tủ sấy lạnh Sunsay (Model SS-5720HP, Việt Nam).

Sấy thăng hoa: Lớp tảo tươi được dàn đều dày 1 cm trên khay sấy inox và được sấy thăng hoa ở nhiệt độ -30°C trong thời gian 24 giờ bằng tủ sấy thăng hoa Telstar (LyoBeta 35, Tây Ban Nha).

Tảo xoắn khô được đựng trong túi PA có hút chân không, bảo quản trong hộp tối ở nhiệt độ phòng để phục vụ nghiên cứu.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp xác định thành phần cơ bản: Hàm lượng ẩm của tảo được xác định theo AOAC 2012, method 950.46. Xác định hàm lượng protein theo AOAC 2012, method 928.08. Hàm lượng protein: $N \times 6,25$ (%). Hàm lượng lipid tổng được thực hiện theo AOAC 2012, method 948.04. Hàm lượng tro được xác định theo AOAC 2012, method 920.153. Xác định trị số peroxit được thực hiện theo TCVN 9532: 2012.

Hàm lượng phycocyanin và độ tinh khiết: Xác định hàm lượng phycocyanin (PC) và độ tinh khiết (PP) của phycocyanin tách chiết theo phương pháp của S.C. Silva và cs (2019) [14] với một số điều chỉnh. Hòa tan 500 mg (theo chất khô) mẫu tảo xoắn sấy khô trong 50 ml nước ấm (40°C) đựng trong lọ thủy tinh nắp kín, dùng cá từ khuấy trong 15 phút cho hỗn hợp tan hoàn toàn. Để mẫu ở ngăn mát tủ lạnh (4-5°C) trong 24 giờ, sau đó lắc đều dung dịch trước khi làm đông ở nhiệt độ -20°C trong 24 giờ tiếp theo. Phycocyanin được chiết xuất bằng phương pháp đông lạnh và rã đông theo ba chu kỳ (cấp đông - rã đông) được thực hiện như sau: Mẫu đã làm đông được rã đông ở nhiệt độ phòng trong 15 phút, tiếp theo đưa vào cấp đông 1 giờ ở chu kỳ thứ hai và rã đông trong 30 phút, chu kỳ cuối cùng được cấp đông 1 giờ và rã đông 45 phút. Sau chu kỳ rã đông thứ ba, mẫu được ly tâm ở 6000 vòng/phút trong 15 phút, sau đó lấy phần dung dịch phía trên mẫu đã ly tâm đi xác định độ hấp thụ (Abs) ở các bước sóng 280, 615 và 652 nm.

Hàm lượng phycocyanin (PC) được tính toán bằng công thức (1).

$$PC = \frac{(Abs_{615} - 0,474 \times Abs_{652})}{5,43} \quad (\text{mg/ml}) \quad (1)$$

Độ tinh khiết của phycocyanin (PP) tách chiết được tính bằng công thức (2).

$$PP = \frac{Abs_{615}}{Abs_{280}} \quad (2)$$

Phương pháp đo màu tảo xoắn khô: Sự thay đổi màu của tảo xoắn khô được xác định thông qua đặc trưng về độ sáng (L^*) và giá trị a^* và b^* của hệ màu CIE bằng thiết bị đo

màu Chroma Meter CR-400 (Konica Minolta, Nhật Bản). Mẫu tảo khô được đặt vào đĩa sứ trắng phẳng ($L=85,66$; $a^*=-4,16$; $b^*=-2,08$) với chiều dày lớp tảo là 1 cm để tránh ảnh hưởng của màu đĩa đựng cũng như ánh sáng môi trường xung quanh làm ảnh hưởng đến kết quả đo. Việc chụp màu mẫu tảo khô được thực hiện ở nhiệt độ phòng.

Các tham số ($L^*/a^*/b^*$) được chuyển đổi thành các giá trị số của độ lệch màu (ΔE) được tính bằng công thức (3).

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (3)$$

trong đó: $\Delta L = L - L_0$, $\Delta a = a - a_0$, $\Delta b = b - b_0$ là sự chênh lệch giữa các giá trị tọa độ L, a, b của mẫu tươi với mẫu khô [18].

Phương pháp xác định độ lắng tách lớp: Cân 50 mg (theo chất khô) mẫu tảo xoắn khô hòa trong 100 ml nước ấm (40°C) đựng trong lọ thủy tinh nắp kín, dùng cá từ khuấy trong 15 phút. Để theo dõi mức độ tách lớp do lắng được tiến hành bằng cách rót dịch tảo vừa hòa tan đồng nhất vào cuvet thạch anh 1 cm, và đo độ hấp thụ tại bước sóng 440 nm bằng thiết bị đo UV-Vis (Labomed, model: UVS-2800, Mỹ). Sự tách lớp của tảo khô hòa tan được đánh giá bằng cách so sánh độ hấp thụ bước sóng (Abs) ở các mốc thời gian (5, 10, 15, 20, 25, 30) phút.

Quan sát hình thái học của tảo: Hình thái học của tảo *Spirulina* được quan sát bằng kính hiển vi DMK1000T gắn camera model RS-500C, với độ phóng đại của kính hiển vi tối đa 1000 lần, độ điều chỉnh tiêu cự ± 5 diop, sử dụng vật kính với độ tụ quang NA 1,25. Nhỏ một giọt mẫu tảo phân tán trong nước lên trên lam kính và tiến hành quan sát.

2.4. Phương pháp xử lý số liệu

Tất cả các thí nghiệm được thực hiện 3 lần, kết quả thu được là giá trị trung bình của các lần đo. Số liệu được xử lý bằng phần mềm IBM SPSS Statistics 22 để phân tích ANOVA và biểu đồ kết quả được vẽ bằng phần mềm SigmaPlot 14.5.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Thành phần hóa học của tảo khô

Kết quả phân tích thành phần hóa học của tảo khô bằng các phương pháp làm khô được trình bày tại bảng 1. Sự khác biệt về giá trị protein, lipid do ảnh hưởng của điều kiện làm khô giữa các phương pháp sấy, hàm lượng của chúng giảm do sự biến đổi bởi điều kiện sấy ở nhiệt độ cao và tác dụng của sự tiếp xúc với tác nhân sấy là không khí [9]. Hàm

lượng protein, lipid bị biến đổi một phần bởi quá trình sấy, đặc biệt là phương pháp sấy bằng không khí nóng. Hàm lượng protein cho kết quả tương đương trong tảo xoắn xác định bởi B. Shahid và cs (2016) [5] nhưng cao hơn trong tảo xoắn được nuôi ở Maroc được xác định bởi A. Rahim và cs (2021) [6] ($53,31 \pm 0,67\%$). Trong khi đó, hàm lượng lipid trong tảo xoắn được xác định lại thấp hơn ($9,25 \pm 0,09\%$).

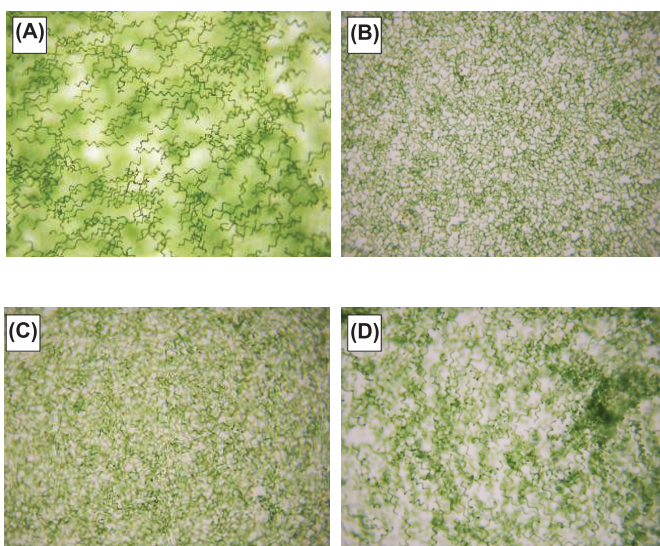
Bảng 1. Thành phần hóa học của tảo.

TT	Thành phần	Tảo tươi	Tảo khô		
			Sấy thăng hoa	Sấy lạnh	Sấy không khí nóng
1	Ẩm (%)	$92,07 \pm 0,45^a$	$4,93 \pm 0,21^c$	$11,10 \pm 0,92^b$	$11,34 \pm 1,07^b$
2	Protein* (Nx6,25) (%)	$78,9 \pm 0,87^a$	$77,7 \pm 0,73^b$	$76,9 \pm 0,22^b$	$73,3 \pm 1,29^c$
3	Lipid tổng* (%)	$4,62 \pm 0,08^c$	$4,46 \pm 0,09^b$	$4,41 \pm 0,33^b$	$3,26 \pm 0,44^a$
4	Tro* (%)	$5,22 \pm 1,69^a$	$5,68 \pm 0,18^b$	$5,17 \pm 0,26^a$	$6,30 \pm 0,28^b$

*: Được tính theo khối lượng chất khô. Các giá trị trung bình mang chữ cái khác nhau ở cùng một dòng chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

3.2. Hình thái học của tảo khô

Quan sát hình thái học của tảo phân tán trong nước bằng kính quang học (hình 1) cho thấy, hình thái cấu tạo xoắn của tảo vẫn được giữ nguyên bởi các phương pháp sấy khác nhau. Tuy nhiên, đối với mẫu tảo sấy nóng có hiện tượng kết tụ, vón cục, không có sự phân tán đồng nhất trong nước. Phương pháp sấy thăng hoa cho kết quả giữ lại cấu trúc xoắn tốt nhất nếu so sánh với cấu trúc của tảo tươi. Như vậy có thể thấy, cơ chế tách nước ra khỏi tảo khi làm khô ảnh hưởng nhiều đến hình thái học của tảo sau khi được làm

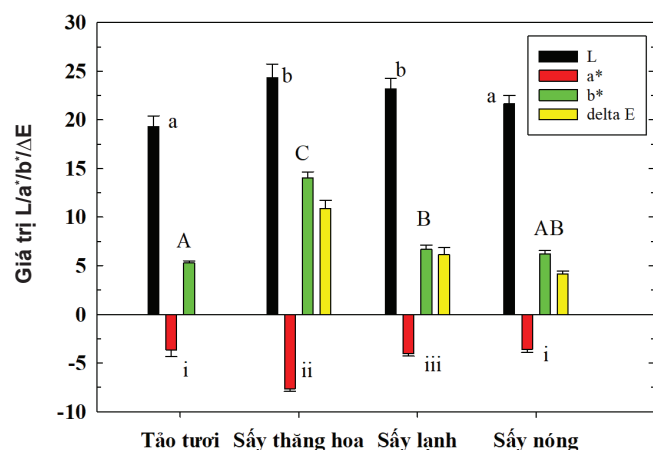


Hình 1. Hình thái học của tảo tươi (A), tảo khô sấy thăng hoa (B), sấy lạnh bơm nhiệt (C) và sấy bằng không khí nóng (D).

khô. Sự thăng hoa nước đã để làm khô tảo ở phương pháp sấy đông khô tốt hơn đối với sự bay hơi nước dưới tác động của không khí có độ khô cao (sấy lạnh bơm nhiệt), hay nhiệt độ sấy cao (sấy không khí nóng) [15, 21]. Điều này có thể ảnh hưởng đến một số tính chất hóa lý được xem xét ở các phần sau.

3.3. Đặc tính hóa lý của tảo khô

Màu sắc: Giá trị đặc trưng màu của tảo khô được biểu diễn ở biểu đồ hình 2. Kết quả đo màu cho thấy, giá trị độ sáng L của tảo sấy thăng hoa là cao nhất ($24,35 \pm 1,38$) còn tảo sấy bằng không khí nóng có giá trị L thấp nhất ($21,65 \pm 0,88$), sự khác biệt này cũng có thể quan sát thấy rõ bằng mắt thường. Tương tự với giá trị a^* thể hiện màu xanh cao nhất, đạt $-7,64 \pm 0,30$, tảo khô có màu xanh tối hơn chính là tảo sấy bằng không khí nóng, a^* đạt $-3,59 \pm 0,35$. Kết quả thu được tương đồng với kết quả nghiên cứu của M. Demarco và cs (2021) [15] khi so sánh giữa tảo xoắn *Arthrospira platensis* được sấy thăng hoa và sấy bằng không khí nóng ở nhiệt độ 40 hay 60°C ; hay nghiên cứu của R.C. Bruna và cs (2015a) [17] trên đối tượng tảo xoắn *Spirulina* sp. được sấy bằng không khí nóng ($50, 60^\circ\text{C}$) và sấy lạnh bơm nhiệt (50°C). Độ lệch màu ΔE của tảo sấy thăng hoa cao nhất ($10,88 \pm 0,84$), tiếp theo là của tảo sấy lạnh ($6,12 \pm 0,73$) và thấp nhất là của tảo sấy bằng không khí nóng ($4,1 \pm 0,73$).

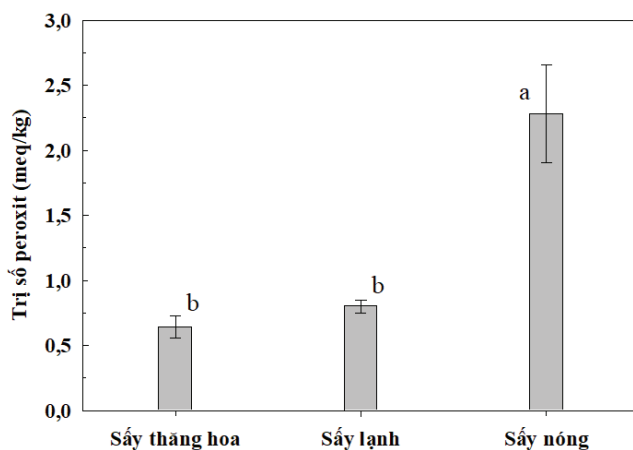


Hình 2. Giá trị $L/a^*/b^*/\Delta E$ của tảo khô từ các phương pháp sấy. Các giá trị trung bình mang chữ cái khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Với kết quả phân tích sự sai lệch có ý nghĩa thì giá trị đại diện cho độ sáng của mẫu sấy lạnh bơm nhiệt và sấy thăng hoa là không có sự khác biệt, nhưng khác với mẫu sấy bằng không khí nóng và mẫu tảo tươi. Giá trị a^* của mẫu tảo ở ba phương pháp sấy là khác nhau, giá trị b^* của mẫu sấy lạnh bơm nhiệt và sấy bằng không khí nóng không có sự khác

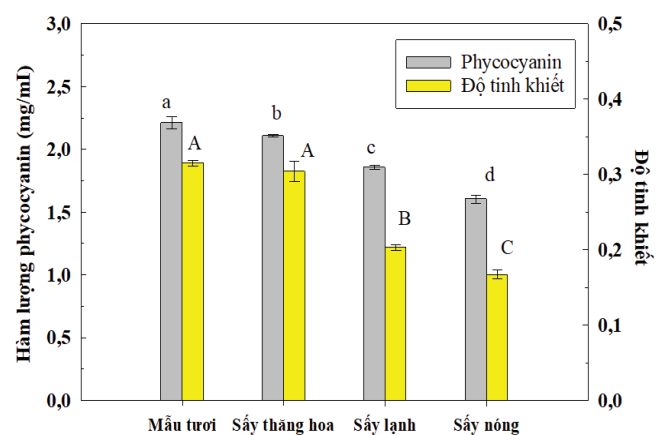
biệt nhưng khác biệt rõ rệt với mẫu sấy thăng hoa. Như vậy, mẫu sấy thăng hoa và mẫu sấy lạnh bơm nhiệt có màu sắc xanh, sáng và đẹp hơn mẫu sấy bằng không khí nóng. Dưới tác động của nhiệt độ cao làm thay đổi màu sắc của tảo khô, có thể là do sự phân hủy của các hợp chất diệp lục và carotenoid [15], hay phycocyanin [15, 17].

Trị số peroxit: Trong quá trình chế biến và bảo quản tảo, lipid có thể trải qua các biến đổi bởi phản ứng thủy phân hoặc oxy hóa dưới tác dụng của enzyme hay tiếp xúc với oxy trong không khí. Điều này có thể dẫn đến giảm giá trị dinh dưỡng của chúng, gây mùi vị lạ hoặc thậm chí góp phần hình thành các chất có hại. Hình 3 trình bày kết quả phân tích trị số peroxit của tảo được làm khô bởi các phương pháp sấy khác nhau. Kết quả cho thấy sự chênh lệch khá lớn về trị số peroxit tạo thành trong tảo khô giữa các phương pháp sấy. Trị số peroxit trong tảo khô sấy bằng không khí nóng ($2,28 \pm 0,38$ meq/kg) cao gấp 2,9 hay 3,6 lần, lần lượt so với trong tảo sấy lạnh ($0,8 \pm 0,05$ meq/kg) hay sấy thăng hoa ($0,64 \pm 0,09$ meq/kg). Sự ảnh hưởng của phương pháp sấy này tương tự nghiên cứu của M. Mroz và cs (2024) [20] trên đối tượng tảo *Arthrospira platensis*, khi so sánh giữa sấy chân không thăng hoa và sấy bằng không khí nóng ở 75°C . Mặc dù sấy lạnh bơm nhiệt hay sấy thăng hoa có trị số peroxit thấp hơn, nhưng thực tế vẫn xảy ra quá trình biến đổi lipid trong hai phương pháp sấy này. Sở dĩ sản phẩm tảo khô sấy lạnh bơm nhiệt, đặc biệt là tảo khô sấy thăng hoa vẫn xảy ra quá trình oxy hóa, mặc dù điều này được diễn ra ở điều kiện chân không, đó là do sự biến đổi lipid bởi enzyme nội tại trong tảo tươi [22].



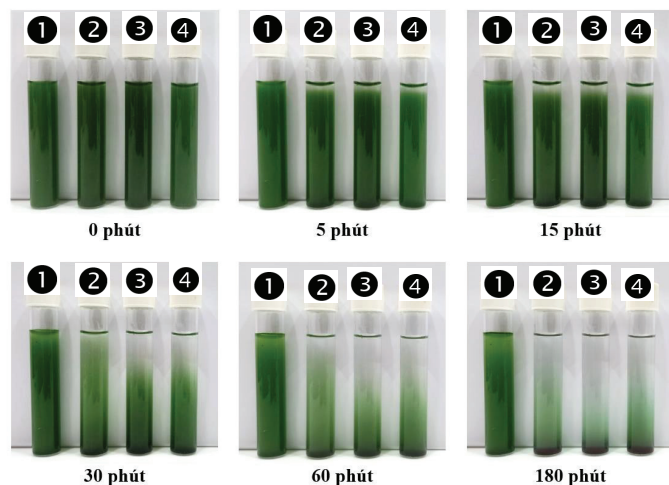
Hình 3. Trị số peroxit của tảo khô từ các phương pháp sấy. Các giá trị trung bình mang chữ cái khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Hàm lượng phycocyanin và độ tinh khiết: Hàm lượng phycocyanin và độ tinh khiết phycocyanin tách chiết từ tảo xoắn làm khô bằng các phương pháp sấy được trình bày ở hình 4. Kết quả chỉ ra rằng, hàm lượng phycocyanin trong mẫu tảo tươi bị giảm đi khi sấy, giá trị giảm đáng kể ngay cả đối với phương pháp sấy thăng hoa. Hàm lượng phycocyanin có trong tảo sấy thăng hoa ($2,11 \pm 0,01$ mg/ml) với độ tinh khiết 0,30 cao hơn tảo được làm khô bằng không khí nóng ($1,61 \pm 0,03$ mg/ml) với độ tinh khiết 0,17 và sấy lạnh ($1,86 \pm 0,02$ mg/ml) với độ tinh khiết là 0,20. Nghiên cứu của S.C. Silva và cs (2019) [14] dùng phương pháp sấy phun tảo *Spirulina platensis* cho hàm lượng phycocyanin $1,44 \pm 0,01$ mg/ml, kết quả này có sự tương đồng với kết quả của tảo sấy bằng không khí nóng ở nghiên cứu hiện tại. Điều kiện sấy, phương pháp sấy ảnh hưởng lớn đến sự biến đổi các thành phần có hoạt tính chống oxy hóa của tảo xoắn, một trong số đó là phycocyanin. R.C. Bruna và cs (2015b) [18] đã chỉ ra rằng, hàm lượng phycocyanin tổn thất 15-83% tùy theo nhiệt độ hay độ dày lớp tảo *Spirulina* sp. khi sấy bằng bơm nhiệt, trong đó ở điều kiện nhiệt độ 50°C và chiều dày lớp tảo 5 mm có tổn thất hàm lượng phycocyanin thấp hơn ở 60°C . Ở một nghiên cứu khác, ảnh hưởng của điều kiện sấy được R.C. Bruna và cs (2015a) [17] chỉ ra rằng, hàm lượng phycocyanin của tảo *Spirulina* sp. sấy bằng bơm nhiệt cao hơn sấy khay bằng không khí nóng ở 50°C . Rõ ràng trong các phương pháp sấy thì phương pháp sấy thăng hoa cho chất lượng tảo khô giữ được hàm lượng phycocyanin cao nhất, điều này có ý nghĩa lớn cho những ứng dụng cần thể hiện hoạt tính chống oxy hóa của tảo xoắn.



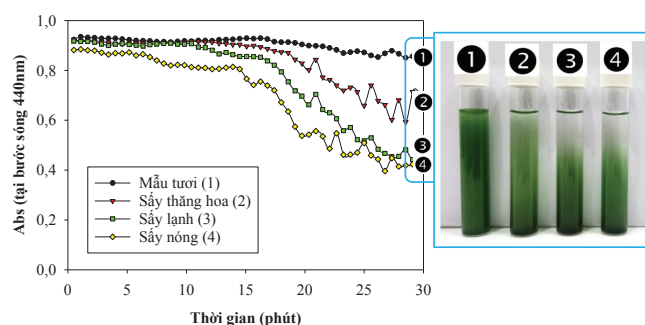
Hình 4. Hàm lượng phycocyanin và độ tinh khiết của tảo tươi, tảo khô từ các phương pháp sấy. Các giá trị trung bình mang chữ cái khác nhau chỉ sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Độ lắng đọng: Tảo khô được hòa phân tán trong nước để ứng dụng vào sản xuất các sản phẩm thực phẩm dạng lỏng hay uống trực tiếp. Do đó, sự lắng đọng của tảo trong nước nhanh hay chậm rất quan trọng trong thiết kế công nghệ hay hướng dẫn sử dụng, vì chúng ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị cảm quan. Để đánh giá ảnh hưởng này thì “Độ lắng đọng” của tảo được coi là một chỉ tiêu đánh giá cần thiết. Qua quan sát sự lắng đọng của các mẫu tảo hòa tan trong nước ở nhiệt độ phòng (hình 5), cho thấy rằng thời gian dưới 5 phút, không có sự thay đổi đáng kể về độ lắng của tảo được sấy bằng các phương pháp khác nhau. Tuy nhiên, sau 5 phút, các mẫu tảo sấy đã bắt đầu lắng nhẹ, trong khi tảo tươi vẫn giữ nguyên trạng thái phân tán ban đầu. Sự ổn định trạng thái phân tán đều vẫn kéo dài sau 30 phút đối với tảo tươi, nhưng xuất hiện sự lắng đọng đáng kể đối với tảo được sấy khô, đặc biệt là tảo sấy lạnh bơm nhiệt và tảo sấy bằng không khí nóng. Sở dĩ quá trình lắng của tảo sấy thăng hoa chậm hơn tảo sấy lạnh bơm nhiệt và tảo sấy bằng không khí nóng là do phương pháp sấy đông khô có khả năng tái tạo tốt cấu trúc tự nhiên của tảo, do đó bột tảo khô có tính đồng nhất nên có độ hòa tan cao, làm chậm quá trình lắng [21]. Sau 60 phút, các mẫu tảo sấy lắng đáng kể và lắng gần như triệt để sau 180 phút, màu xanh quan sát thấy có thể chủ yếu do màu của phycocyanin hòa tan trong nước. Trong khi đó, mẫu tảo tươi vẫn cho thấy sự phân tán tốt trong nước, điều đó cho thấy rằng tảo sấy chịu ảnh hưởng đáng kể bởi các yếu tố công nghệ làm khô tảo.



Hình 5. Mẫu tảo tươi (1), tảo sấy thăng hoa (2), sấy lạnh bơm nhiệt (3) và sấy bằng không khí nóng (4) được theo dõi lắng ở điều kiện nhiệt độ phòng.

Để đánh giá chính xác hơn sự lắng đọng của tảo phân tán trong nước, kết quả xác định độ hấp thụ sóng UV (Abs) ở bước sóng 440 nm đối với các mẫu tảo theo thời gian được thể hiện ở hình 6.



Hình 6. Độ hấp thụ sóng UV tại bước sóng 440 nm của tảo xoắn theo thời gian.

Kết quả đo Abs của các mẫu tảo sấy so với mẫu tươi đã cho thấy sự khác biệt rõ rệt. Độ hấp thụ giảm sau 15 phút đối với mẫu tảo sấy lạnh bơm nhiệt và sấy thăng hoa, trong khi mẫu sấy bằng không khí nóng có độ hấp thụ giảm ngay sau 5 phút. Điều này cho thấy rằng, phương pháp sấy bằng không khí nóng tạo ra tảo khô lắng nhanh hơn, nguyên nhân có thể do sự kết tụ của tảo nên kích thước và khối lượng tảo lớn hơn, khả năng hòa tan phân tán trong nước kém (hình 1). Trong khi đó, tảo khô dùng phương pháp sấy lạnh bơm nhiệt và sấy thăng hoa cũng cho thấy có sự lắng đọng, nhưng mức độ lắng chậm hơn so với tảo làm khô bằng không khí nóng. Kết quả này chỉ ra rằng, tảo sấy bằng không khí nóng có tốc độ lắng nhanh nhất, tiếp theo là tảo sấy lạnh và tảo sấy thăng hoa.

4. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu, rõ ràng việc lựa chọn phương pháp sấy có thể ảnh hưởng đáng kể đến thành phần định tính và định lượng của các chất chuyển hóa trong sản phẩm tảo *Spirulina platensis* sấy khô cuối cùng. Các phân tích chỉ ra rằng, thành phần hóa học và một số đặc tính hóa lý của tảo *Spirulina platensis* bị ảnh hưởng ít nhất bởi phương pháp sấy thăng hoa, tiếp đến là sấy lạnh và nhiều nhất là sấy bằng không khí nóng. Tảo xoắn khô sấy bằng không khí nóng có tốc độ lắng đọng trong nước cao nhất và có trị số peroxit cao lần lượt gấp 2,9 hoặc 3,6 lần trị số peroxit của tảo xoắn khô sấy lạnh bơm nhiệt hoặc sấy đông khô. Trong nghiên cứu này, sấy thăng hoa tảo xoắn là phương pháp phù hợp nhất để giữ lại các chất chuyển hóa thứ cấp như sắc tố phycocyanin. Tuy nhiên, phương pháp sấy lạnh bơm nhiệt hoàn toàn có thể sử dụng để tạo sản phẩm tảo khô thay thế cho phương pháp sấy thăng hoa để giảm chi phí sản xuất, nhưng vẫn giữ được giá trị ứng dụng của tảo xoắn nếu như hoạt tính chống oxy hóa của tảo xoắn khô không phải là mối quan tâm chính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.R. Chia, K.W. Chew, P.L. Show, et al. (2019), “*Spirulina platensis* based biorefinery for the production of value-added products for food and pharmaceutical applications”, *Bioresour. Technol.*, **289**, DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121727.
- [2] T. Lafarga, F.G. Acién-Fernández, M. Castellari, et al. (2019), “Effect of microalgae incorporation on the physicochemical, nutritional, and sensorial properties of an innovative broccoli soup”, *LWT - Food Sci. Technol.*, **111**, pp.167-174, DOI: 10.1016/j.lwt.2019.05.037.
- [3] A. Adjali, I. Clarot, Z. Chen, et al. (2022), “Physicochemical degradation of phycocyanin and means to improve its stability: A short review”, *Journal of Pharmaceutical Analysis*, **12(3)**, pp.406-414, DOI: 10.1016/j.jpha.2021.12.005.
- [4] B. Yuan, Z. Li, H. Shan, et al. (2022), “A review of recent strategies to improve the physical stability of phycocyanin”, *Current Research in Food Science*, **5**, pp.2329-2337, DOI: 10.1016/j.crf.2022.11.019.
- [5] B. Shahid, K.S. Mian, S.B. Masood, et al. (2016), “Functional properties and amino acid profile of *Spirulina platensis* protein isolates”, *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series B: Biological Sciences*, **59(1)**, pp.12-19, DOI: 10.52763/PJSIR.BIOL.SCI.59.1.2016.12.19.
- [6] A. Rahim, C. Çakir, M. Ozturk, et al. (2021), “Chemical characterization and nutritional value of *Spirulina platensis* cultivated in natural conditions of Chichaoua region (Morocco)”, *South African Journal of Botany*, **141**, pp.235-242, DOI: 10.1016/j.sajb.2021.05.006.
- [7] N. Albert, R. Wague, M. Mbailao, et al. (2012), “Changes in the physico-chemical properties of *Spirulina platensis* from three production sites in Chad”, *Journal of Animal & Plant Sciences*, **13(3)**, pp.1811-1822.
- [8] T. Uzlaşır, H.K. Şaşmaz, H. Kelebek (2024), “Comparison of extraction techniques for determining bioactive compounds and antioxidant activity of *Spirulina platensis*”, *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, **12(4)**, pp.554-560, DOI: 10.24925/turjaf.v12i4.554-560.6677.
- [9] S.J.P. Siqueira, R.R.V. Carlos, B.M.A. Souza, et al. (2021), “Indirect solar drying of *Spirulina platensis* and the effect of operating conditions on product quality”, *Algal Research*, **60**, DOI: 10.1016/j.algal.2021.102521.
- [10] N.F. Farias, M. Demarco, G. Tribuzi (2019), *Chapter Drying and Quality of Microalgal Powders for Human Alimentation Microalgae - From Physiology to Application*, Intech Open, pp.1-20.
- [11] H. Desmorieux, N. Decaen (2005), “Convective drying of spirulina in thin layer”, *Journal of Food Engineering*, **66(4)**, pp.497-503, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.04.021.
- [12] E.G. Oliveira, G.S. Rosa, M.A. Moraes, et al. (2009), “Characterization of thin layer drying of *Spirulina platensis* utilizing perpendicular air flow”, *Bioresour. Technol.*, **100(3)**, pp.1297-1303, DOI: 10.1016/j.biortech.2008.05.052.
- [13] N.C. Silva, T.C. Silva, A.O. Santos, et al. (2018), “Drying of microalga *Spirulina platensis* in a rotary dryer with inert bed”, *Proceedings of 21th International Drying Symposium*, Valencia, Spain.
- [14] S.C. Silva, I.P. Fernandes, L. Barros, et al. (2019), “Spray-dried *Spirulina platensis* as an effective ingredient to improve yogurt formulations: Testing different encapsulating solutions”, *J. of Funct. Foods.*, **60**, DOI: 10.1016/j.jff.2019.103427.
- [15] M. Demarco, J.O. Moraes, M.C. Ferrari, et al. (2021), “Production of *Spirulina (Arthrospira platensis)* powder by innovative and traditional drying techniques”, *Journal of Food Process Engineering*, **45(1)**, DOI: 10.1111/jfpe.13919.
- [16] R.T. Hoskin, M.H. Grace, A. Guiotto, et al. (2023), “Development of spray dried *Spirulina* protein-berry pomace polyphenol particles to attenuate pollution-induced skin damage: A convergent food-beauty approach”, *Antioxidants (Basel)*, **12(7)**, DOI: 10.3390/antiox12071431.
- [17] R.C. Bruna, F.R. Silva, C.K.R. Marla, et al. (2015a), “Physicochemical characteristics of the *Spirulina* sp. dried in heat pump and conventional tray dryers”, *International Journal of Food Science & Technology*, **50(12)**, pp.2614-2620, DOI: 10.1111/ijfs.12930.
- [18] R.C. Bruna, C.K.R. Marla, F.R. Silva, et al. (2015b), “Optimization of *Spirulina* sp. drying in heat pump: Effects on the physicochemical properties and color parameters”, *Journal of Food Processing and Preservation*, **40(5)**, pp.934-942, DOI: 10.1111/jfpp.12672.
- [19] K. Ittikorn, P. Kuarthongsri, Y. Chananya, et al. (2017), “Sensory descriptive analysis and physicochemical properties of *Spirulina platensis* from different drying processes hot air drying and microwave vacuum drying”, *Current Applied Science and Technology*, **17(2)**, pp.191-199.
- [20] M. Mroz, K. Parchem, J. Jozwik, et al. (2024), “The impact of different drying methods on the metabolomic and lipidomic profiles of *Arthrospira platensis*”, *Molecules*, **29(8)**, DOI: 10.3390/molecules29081747.
- [21] D. Hélène, H. Fabiola (2004), “Biochemical and physical criteria of spirulina after different drying processes, drying 2004”, *Proceedings of The 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil, pp.900-907.
- [22] B.S. Demir, S.S. Tükel (2010), “Purification and characterization of lipase from *Spirulina platensis*”, *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, **64(3-4)**, pp.123-128, DOI: 10.1016/j.molcatb.2009.09.011.