

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KIỆN SẤY BỘT XỐP SẢN XUẤT BỘT TẢO *Spirulina*

Phan Thế Duy^{1,*}, Trần Phú Quý¹, Nguyễn Thị Kim Chi¹, Lê Nguyễn Đoàn Duy¹

¹ Khoa Công nghệ thực phẩm, Trường Đại học Công Thương thành phố Hồ Chí Minh

*Email: duypt@huit.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm xây dựng quy trình sấy bột xốp thu nhận bột tảo *Spirulina* có chất lượng cao, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của một số thông số công nghệ quan trọng đến sản phẩm cuối cùng. Quy trình gồm hai giai đoạn: (i) tạo bột từ dịch tảo và (ii) sấy lớp bột xốp. Các yếu tố khảo sát bao gồm: Thời gian xử lý siêu âm dịch tảo (10, 20, 30, 40, 50 phút), tỷ lệ tảo: dung môi (1: 10; 1: 15; 1: 20; 1: 25; 1: 30 w/v), nồng độ chất tạo cấu trúc carboxymethyl cellulose (CMC) 0,25; 0,5; 0,75; 1%, thời gian đánh bột 1, 3, 5, 7, 9 phút, độ dày lớp bột 2, 3, 4, 5, 6 mm và nhiệt độ sấy 50, 60, 70, 80°C. Kết quả cho thấy, điều kiện thích hợp cho quá trình tạo bột là thời gian siêu âm 30 phút, tỷ lệ tảo: dung môi 1: 25 (w/v), nồng độ CMC 0,75% (so với khối lượng tảo) và thời gian đánh bột 3 phút. Trong giai đoạn sấy, lớp bột dày 3 - 4 mm ở 70°C cho thời gian sấy khoảng 200 - 220 phút, với hiệu suất thu hồi cao (~ 91%), độ hòa tan tốt và hàm lượng protein khoảng 66,6 g/100 g chất khô cùng hàm lượng phycocyanin xấp xỉ 93,6 mg/g chất khô. So sánh với sấy chân không ở cùng nhiệt độ cho thấy, sấy bột xốp giúp rút ngắn thời gian sấy, đồng thời bảo toàn phycocyanin tốt hơn đáng kể trong khi hiệu suất thu hồi tương đương, qua đó khẳng định tiềm năng ứng dụng của công nghệ này trong sản xuất bột tảo *Spirulina* giàu hoạt chất sinh học. Quy trình sấy bột xốp sản xuất được xây dựng đã đáp ứng tốt mục tiêu nghiên cứu. Việc tối ưu điều kiện đánh bột, tỷ lệ chất ổn định đã nâng cao hiệu quả sấy và bảo toàn hàm lượng protein, độ ẩm bột dưới 5%. Kết quả cho thấy, phương pháp sấy bột xốp phù hợp để xử lý tảo *Spirulina*, giúp cải thiện tốc độ sấy, chất lượng bột thu được và là cơ sở để phát triển quy mô lớn hơn.

Từ khóa: Tảo *Spirulina*, sấy bột xốp, phycocyanin, sấy chân không, bột tảo chức năng.

1. BẮT VẤN ĐỀ

Tảo *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) là một loài vi khuẩn lam (*Cyanobacteria*) dạng sợi, thường được xếp vào nhóm vi tảo sử dụng cho mục đích dinh dưỡng, có hàm lượng protein rất cao (50 - 70% khối lượng chất khô), giàu vitamin, khoáng chất và các hợp chất có hoạt tính sinh học, trong đó đáng chú ý là sắc tố protein phycocyanin [1], [2]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra tiềm năng ứng dụng của tảo *Spirulina* trong lĩnh vực thực phẩm, dược phẩm và mỹ phẩm nhờ các đặc tính chống oxy hóa, kháng viêm và hỗ trợ sức khỏe [1], [3]. Đã có những nghiên cứu trước đây cho thấy, ứng dụng của tảo *Spirulina* trong bao bì thực phẩm. Việc kết hợp sinh khối tảo *Spirulina* và các sản phẩm sinh học có giá trị cao như C-PC vào công thức đóng gói thực phẩm đã cho thấy những

ứng dụng khác biệt và đầy hứa hẹn [4]. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu của Yu và cs (2017) [5] đã phân lập các peptid chống oxy hóa từ tảo xoắn *Spirulina platensis* bằng siêu lọc, lọc gel sắc ký và sắc ký lỏng hiệu năng cao pha đảo có trình tự được xác định là Pro-Asn-Asn (343,15 Da) bằng electrospray sử dụng 1,1- diphenyl – picrylhydrazyl (DPPH) để đo hoạt tính chống oxy hóa của peptid này. Peptid này đã được tổng hợp để xác nhận tính chất chống oxy hóa của nó và nó thể hiện hoạt động rõ ở $81,44 \pm 0,43\%$ DPPH ở nồng độ 100 $\mu\text{g/ml}$ [5]. Các hoạt động chống gốc tự do và hoạt tính SOD của peptid là $47,84 \pm 0,49\%$, $54,01 \pm 0,82\%$ và $12,55 \pm 0,75\%$, tương ứng, ở mức 10 mg/ml. Những kết quả này chỉ ra rằng, tảo *Spirulina platensis* là một nguồn protein chống oxy hóa tốt có thể ứng dụng trong ngành dược phẩm và thực

phẩm. Tuy nhiên, nguyên liệu tảo tươi có hàm lượng nước lớn, dễ hư hỏng và khó bảo quản, do đó việc chuyển hóa thành dạng bột khô là cần thiết nhằm kéo dài thời gian sử dụng, thuận tiện cho vận chuyển, bảo quản và nâng cao giá trị kinh tế [1].

Trong số các phương pháp sấy, sấy bột xốp (foaming-mat drying) được xem là một giải pháp tiềm năng cho các nguyên liệu giàu hợp chất nhạy cảm, nhờ khả năng tạo lớp sản phẩm mỏng, xốp, có diện tích bề mặt lớn, giúp rút ngắn thời gian sấy và góp phần hạn chế tổn thất chất lượng. Nhiều công bố cho thấy, kỹ thuật này có thể giúp bảo toàn tốt hơn màu sắc, hương vị và khả năng hòa tan của các loại nước quả và dịch chiết từ thực vật so với một số phương pháp sấy truyền thống [3]. Ở Việt Nam, các nghiên cứu về sấy bột xốp chủ yếu tập trung vào nguyên liệu quả và lá như: Đu đủ, xoài, lá mận đỏ..., trong khi ứng dụng kỹ thuật này cho tảo *Spirulina* hầu như chưa được khai thác, đặc biệt là dưới góc độ bảo toàn phycocyanin - hoạt chất có giá trị sinh học và kinh tế nổi bật [6].

Công nghệ sấy bột xốp được xem là phương pháp tiềm năng để bảo toàn các hợp chất mang hoạt tính sinh học trong tảo *Spirulina*. Tuy nhiên, quá trình chế biến và điều kiện bảo quản đặt ra nhiều thách thức cần được kiểm soát chặt chẽ. Việc hình thành bột phụ thuộc vào loại và nồng độ chất tạo cấu trúc, thời gian và tốc độ đánh bột, cũng như độ nhớt của dịch tảo, các yếu tố này quyết định sự ổn định của bột trong suốt quá trình sấy. Nếu điều kiện tạo bột không tối ưu, lớp bột dễ xẹp, dẫn đến sự phân bố nhiệt không đồng đều và làm giảm hiệu suất thu hồi. Bên cạnh đó, độ dày lớp bột và nhiệt độ sấy là các thông số quan trọng vì lớp bột quá dày làm kéo dài thời gian sấy và gia tăng nguy cơ phân hủy các hợp chất nhạy nhiệt như phycocyanin, trong khi lớp bột quá mỏng có thể gây cháy hoặc biến tính protein. Sản phẩm thu được có cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn khiến cho dễ bị hút ẩm trở lại, do đó việc bảo quản bột cần được thực hiện trong bao bì tối, chống ẩm, hạn chế oxy để duy trì màu sắc, hoạt tính sinh học, chất lượng cảm quan và độ ẩm dưới 5%.

Trên thế giới, tảo *Spirulina* đã được nghiên cứu với nhiều công nghệ sấy khác nhau nhằm thu

nhận bột, song các nghiên cứu về sấy bột xốp cho đối tượng này còn hạn chế và ít khi xem xét đồng thời các yếu tố công nghệ quan trọng như điều kiện tạo bột, độ dày lớp bột và nhiệt độ sấy trong mối liên hệ với sự bảo toàn phycocyanin. Bên cạnh đó, dữ liệu so sánh trực tiếp giữa sấy bột xốp và một phương pháp sấy nhiệt độ thấp phổ biến như sấy chân không ở cùng điều kiện nhiệt độ vẫn còn thiếu.

Xuất phát từ những khoảng trống nêu trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đề xuất quy trình sấy bột xốp thu nhận bột tảo *Spirulina* từ nguyên liệu tảo tươi. Cụ thể, nghiên cứu tập trung khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tạo bột và quá trình sấy (đặc biệt là độ dày lớp bột và nhiệt độ sấy) đối với các chỉ tiêu quan trọng như: Hàm lượng phycocyanin, hàm lượng protein, hiệu suất thu hồi và độ hòa tan, đồng thời so sánh chất lượng sản phẩm thu được bằng sấy bột xốp với sấy chân không ở cùng nhiệt độ. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng công nghệ sấy bột xốp trong sản xuất bột tảo *Spirulina* tại Việt Nam, hướng tới những sản phẩm có giá trị gia tăng cao.

2. NGUYÊN LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Nguyên liệu

Nguyên liệu chính là tảo *Spirulina* tươi do Công ty Cổ phần Tảo *Spirulina* Vinh Hảo (tỉnh Lâm Đồng) cung cấp. Tảo tươi *Spirulina* được cấp đông theo 1 kg/túi và được vận chuyển đến Phòng thí nghiệm của Trường Đại học Công thương thành phố Hồ Chí Minh. Carboxymethyl cellulose (CMC) được chọn làm chất ổn định bột trong quá trình sấy.

2.2. Quy trình nghiên cứu

Trong nghiên cứu, mỗi thí nghiệm sử dụng 20 g tảo *Spirulina* tươi (với độ ẩm là 85%), nguyên liệu được bổ sung nước cất, xử lý siêu âm, thêm CMC ủ trong 10 phút và đánh bông bằng máy đánh trứng. Hỗn hợp bột sau đó được rót vào khay, sấy ở các mức nhiệt độ và thời gian khảo sát, sau sấy tiến hành nghiền mịn để thu nhận bột tảo *Spirulina* bằng phương pháp sấy bột xốp. Các thí nghiệm được tiến hành theo phương pháp đơn yếu tố, bao gồm: Thời gian siêu âm (10 - 50 phút)

nhằm đánh giá hiệu quả phá vỡ tế bào và giải phóng hoạt chất; tỷ lệ bổ sung dung môi (1: 10 - 1: 30, w/v chất khô) và tỷ lệ CMC (0,25 - 1,00% khối lượng tảo nguyên liệu) nhằm tối ưu hóa khả năng tạo bọt và độ ổn định; thời gian đánh bọt (1 - 9 phút) để xác định điều kiện tối ưu cho kết cấu bọt; độ dày lớp bọt (2 - 6 mm) thông qua việc sử dụng cố định diện tích khay sấy và khảo sát nhiệt độ sấy (50 - 80°C) nhằm đánh giá ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm, bao gồm hiệu suất thu hồi, hàm lượng phycocyanin và protein.

2.3. Phương pháp phân tích

Hàm lượng protein tổng được xác định theo phương pháp Kjeldahl, dựa trên mô tả của Saéz-Plaza và cs (2013) [7]. Nitơ tổng được xác định sau khi vô cơ hoá mẫu, chưng cất và chuẩn độ, sau đó quy đổi sang protein bằng hệ số chuyển đổi 6,25; kết quả được biểu diễn dưới dạng g protein/100 g chất khô. Độ ẩm của mẫu được xác định bằng phương pháp sấy tử ở 105°C đến khối lượng không đổi và dùng làm cơ sở quy đổi về chất khô cho các chỉ tiêu liên quan.

Hàm lượng phycocyanin được phân tích theo Patel và cs (2005) [6]. Dịch chiết sau khi ly tâm được đo phổ hấp thụ UV-Vis (Thermo Scientific, Mỹ) bằng cuvet có bề dày quang trình 1 cm, trong vùng bước sóng 190 - 1.100 nm; giá trị hấp thụ tại 280, 620, 652 nm được sử dụng để tính hàm lượng phycocyanin, sau đó quy đổi và biểu diễn dưới dạng mg phycocyanin/g chất khô tảo. Hiệu suất thu hồi bọt sau sấy được xác định dưới dạng phần trăm khối lượng chất khô thu được trong sản phẩm so với tổng lượng chất khô có trong dịch tảo ban đầu trước khi sấy.

Các chỉ tiêu đặc trưng cho hệ bọt được xác định theo Nguyen Minh Thuy và cs (2022) [8]. Mật độ bọt được xác định bằng cách cân khối lượng một thể tích bọt xác định (100 mL) trong ống đong đã biết trước khối lượng và biểu diễn dưới dạng g/mL. Độ giãn nở bọt được tính dưới dạng phần trăm tăng thể tích của hệ sau khi đánh bọt so với thể tích dịch tảo ban đầu, dựa trên các giá trị thể tích đo bằng ống chia độ. Độ ổn định bọt được đánh giá thông qua thể tích bọt còn lại sau khi để yên 100 mL bọt trong 3 giờ ở nhiệt độ

phòng; kết quả được biểu diễn dưới dạng phần trăm so với thể tích bọt ban đầu.

Tất cả các phép đo được thực hiện ít nhất 3 lần độc lập; kết quả trình bày dưới dạng giá trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn. Phương pháp xử lý thống kê được mô tả ở mục 2.4.

2.4. Phương pháp xử lý số liệu

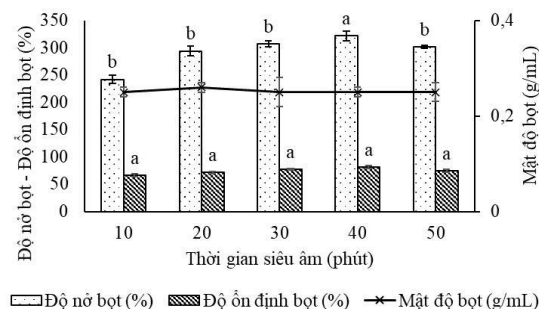
Các thí nghiệm được thực hiện lặp lại 3 lần độc lập; kết quả được trình bày dưới dạng giá trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn. Phân tích thống kê được thực hiện bằng phần mềm Minitab 19 với phân tích phương sai một yếu tố (one-way ANOVA) và phép thử so sánh trung bình Tukey ở mức ý nghĩa $p < 0,05$. Biểu đồ và hình minh họa số liệu được xây dựng bằng phần mềm OriginPro 2018.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tạo bọt

3.1.1. Ảnh hưởng của thời gian siêu âm đến khả năng tạo bọt

Mật độ bọt, độ giãn nở bọt và độ ổn định của bọt là cơ sở để lựa chọn thời gian siêu âm cho quá trình tạo bọt. Nước cất 1 lần được sử dụng để làm dung môi pha loãng cho quá trình siêu âm và CMC được dùng làm chất ổn định hệ bọt với tỷ lệ bổ sung 0,75% (trên tổng khối lượng chất khô). Các mốc thời gian siêu âm được khảo sát lần lượt là 10, 20, 30, 40, 50 phút. Đánh bọt các mẫu thử nghiệm sau khi đã xử lý siêu âm bằng máy đánh trứng trong vòng 3 phút và ghi nhận được các kết quả ở hình 1.



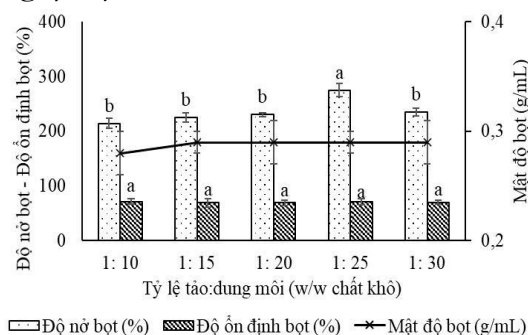
Hình 1. Ảnh hưởng của thời gian siêu âm

Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng hàng thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Kết quả ở hình 1 cho thấy, thời gian siêu âm trong khoảng 10 - 50 phút hầu như không làm thay đổi có ý nghĩa thống kê độ nở bột, độ ổn định bột và mật độ bột của huyền phù tảo *Spirulina* ($p > 0,05$). Độ nở bột dao động quanh 250 - 300%, có xu hướng tăng nhẹ và đạt giá trị cao nhất ở 30 - 40 phút, trong khi độ ổn định bột chỉ cải thiện không đáng kể theo thời gian xử lý. Mật độ bột duy trì gần như không đổi ($\approx 0,22 - 0,25$ g/mL), chứng tỏ cấu trúc bột thu được tương đối đồng nhất giữa các nghiệm thức. Điều này gợi ý tác dụng của siêu âm lên khả năng tạo và ổn định bột chủ yếu xảy ra ở giai đoạn đầu; kéo dài thời gian siêu âm trên 30 phút không mang lại lợi ích rõ rệt nhưng làm tăng chi phí năng lượng. Vì vậy, thời gian siêu âm 30 phút được xem là tối ưu cho quá trình tạo bột xốp cho dịch chiết tảo *Spirulina*.

Kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Hu và cs (2013) [9], khi xử lý siêu âm protein đậu nành, cho thấy thời gian siêu âm tối ưu giúp tăng hoạt tính tạo bột nhưng kéo dài quá mức làm suy giảm đáng kể.

3.1.2. Ảnh hưởng của tỷ lệ pha loãng đến khả năng tạo bột



Hình 2. Ảnh hưởng của tỷ lệ tảo: dung môi

Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng hàng thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Với mục đích tăng khả năng lan truyền sóng âm, tăng hiệu suất phá vỡ tế bào giúp hiệu suất thu hồi dịch chiết cao hơn. Mật độ bột, độ nở bột và độ ổn định của bột là cơ sở để lựa chọn tỷ lệ bổ sung dung môi cho quá trình tạo bột. Tỷ lệ tảo: nước bổ sung được khảo sát lần lượt ở các tỷ lệ 1: 10; 1: 15; 1: 20; 1: 25; 1: 30 (dựa trên hàm lượng chất khô của tảo). Sử dụng thời gian siêu âm ở kết quả của thực

th nghiệm trên là 30 phút và cố định lượng CMC là 0,75% (trên khối lượng nguyên liệu). Quá trình đánh bột cũng được thực hiện tương tự.

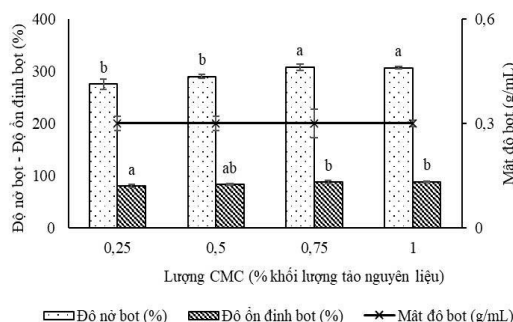
Kết quả ở hình 2 cho thấy, thay đổi tỷ lệ tảo: dung môi từ 1: 10 - 1: 30 không làm biến đổi có ý nghĩa thống kê độ nở bột, độ ổn định bột và mật độ bột của hệ huyền phù tảo *Spirulina* ($p > 0,05$). Độ nở bột dao động quanh 220 - 250% và có xu hướng tăng nhẹ khi pha loãng hơn, trong khi độ ổn định bột chỉ cải thiện không đáng kể giữa các tỷ lệ khảo sát. Mật độ bột duy trì gần như không đổi ($\approx 0,28 - 0,30$ g/mL), cho thấy cấu trúc bột hình thành tương đối đồng nhất bất kể mức pha loãng. Điều này chứng tỏ trong khoảng khảo sát, tỷ lệ pha loãng không phải là yếu tố quyết định đến khả năng tạo và ổn định bột, do đó có thể lựa chọn tỷ lệ tảo: dung môi khoảng 1: 20 - 1: 25 như một mức pha loãng hợp lý, vừa bảo đảm đặc tính bột, vừa hạn chế lượng dung môi sử dụng trong quá trình tạo bột xốp tảo *Spirulina*.

Dựa trên kết quả thực nghiệm và các công bố đã tham khảo, việc chọn tỷ lệ tảo: dung môi 1: 25 là phù hợp. Tỷ lệ này tạo ra sự cân bằng hoàn hảo: Dung dịch đủ loãng để giảm độ nhớt và tăng cường khả năng bắt khí, nhưng vẫn đủ đậm đặc để protein tạo thành một lớp màng bền vững quanh các bọt khí. Khi pha loãng hơn (1: 30), nồng độ protein không đủ, dẫn đến lớp màng yếu, khiến bọt khí dễ hợp nhất và cấu trúc bột nhanh chóng bị phá vỡ do hiện tượng thoát nước. Hiện tượng tồn tại một điểm tạo bột tối ưu này cũng phù hợp với các quan sát trong các hệ thống protein khác, như trong kết quả nghiên cứu của Amezuía-Arranz và cs (2024) [10]. Đồng thời, các yếu tố cố định như sóng siêu âm và chất ổn định CMC đóng vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ giải phóng protein và tăng cường độ bền cho cấu trúc bột cuối cùng, cơ chế đã được Belal và cs (2023) [11] mô tả chi tiết.

3.1.3. Ảnh hưởng của nồng độ CMC

CMC được lựa chọn làm chất ổn định cho quá trình tạo bột. Giá trị của các hàm mục tiêu độ nở bột, độ ổn định bột, mật độ bột là cơ sở để xác định lượng chất ổn định cần bổ sung. Hàm lượng CMC được bổ sung lần lượt theo tỷ lệ 0,25; 0,5;

0,75; 1% (tính theo khối lượng tảo nguyên liệu) với mục đích làm đặc và giữ nước cho hệ bột. Sử dụng kết quả của 2 thực nghiệm trước đó để cố định thời gian siêu âm tối đa là 30 phút, tỷ lệ tảo: dung môi là 1: 25. Quá trình đánh bông sau xử lý siêu âm được thực hiện tương tự như trên.



Hình 3. Ảnh hưởng của tỷ lệ bổ sung CMC

Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng hàng thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

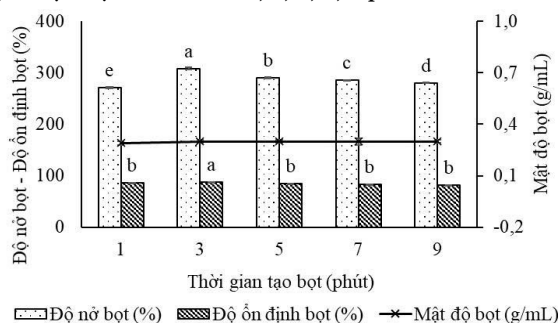
Kết quả ở hình cho thấy, lượng CMC bổ sung từ 0,25 - 1,0% không làm thay đổi có ý nghĩa thống kê độ nở bột và mật độ bột ($p > 0,05$): độ nở bột duy trì quanh 280 - 300%, mật độ bột khoảng 0,27 - 0,29 g/mL, chứng tỏ khả năng cuốn khí và cấu trúc xốp cơ bản của hệ bột hầu như không bị ảnh hưởng. Ngược lại, độ ổn định bột tăng rõ rệt theo hàm lượng CMC ($p < 0,05$): Mẫu 0,25% cho giá trị thấp nhất, 0,5% ở mức trung gian, trong khi 0,75 - 1,0% tạo bột ổn định hơn. Điều này gợi ý vai trò chính của CMC là gia tăng độ nhớt pha liên tục và hình thành màng polymer - protein bền hơn quanh bề mặt bột khí, giúp hạn chế thoát nước và đồng tụ bột mà không làm “nặng” bột. Việc mật độ bột gần như không đổi cho thấy hàm lượng CMC tới 1,0% vẫn chưa gây hiện tượng quá đặc làm sụp bột, do đó có thể khai thác lợi ích ổn định mà không hy sinh độ xốp. Xét giữa hai mức 0,75 và 1,0%, do không có khác biệt đáng kể về các chỉ tiêu bột, nồng độ 0,75% được xem là tối ưu hơn về mặt công nghệ và kinh tế cho quá trình tạo bột xốp tảo *Spirulina*.

Kết quả thực nghiệm hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu khoa học đã được công bố, cho thấy ảnh hưởng kép của Carboxymethyl cellulose (CMC) lên hệ bột. Một mặt, việc tăng nồng độ CMC giúp cải thiện đáng kể độ ổn định của bột.

Cơ chế chính đằng sau hiệu ứng này là sự gia tăng độ nhớt của pha lỏng, tạo ra một rào cản vật lý làm chậm quá trình thoát nước và giữ cho cấu trúc bột bền vững hơn. Quan sát này tương đồng với kết quả nghiên cứu của Belal và cs (2021) [11], ghi nhận độ ổn định bột cả chua tăng rõ rệt khi tăng nồng độ CMC. Mặt khác, chính sự gia tăng độ nhớt này lại tạo ra một sự “đánh đổi”: Nó cản trở quá trình tích hợp không khí vào dung dịch trong khi đánh trộn, dẫn đến độ nở của bột giảm và khối lượng riêng tăng lên. Mối quan hệ tỷ lệ nghịch này cũng được xác nhận trong kết quả nghiên cứu của Gao và cs (2024) [12]; Pirsá và Hafezi (2023) [13], theo đó bột có xu hướng co lại khi nồng độ CMC tăng lên và các hydrocolloid khác như xanthan gum cũng thể hiện xu hướng tương tự. Do đó, việc ứng dụng CMC trong thực tế không phải là tối đa hóa nồng độ, mà là tìm kiếm một điểm tối ưu, cân bằng giữa yêu cầu về độ ổn định cho quá trình chế biến và các đặc tính cảm quan mong muốn của sản phẩm cuối cùng như độ nhẹ và độ xốp [12, 13].

3.1.4. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của thời gian tạo bột

Trong quy trình sấy bột xốp, bước đầu tiên và quan trọng nhất là tạo ra một lớp bột đạt yêu cầu. Lớp bột này phải đủ xốp để quá trình sấy diễn ra nhanh chóng, đồng thời phải đủ bền để giữ nguyên cấu trúc trong suốt quá trình gia nhiệt. Thời gian đánh bột là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến cả hai đặc tính này. Nếu thời gian quá ngắn, bột sẽ không đủ nở; nếu quá dài, cấu trúc bột sẽ bị phá hủy và mất đi độ ổn định. Vì vậy, tiến hành khảo sát thời gian tạo bột ở các mốc 1, 3, 5, 7, 9 phút.



Hình 4. Ảnh hưởng của thời gian đánh bột

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

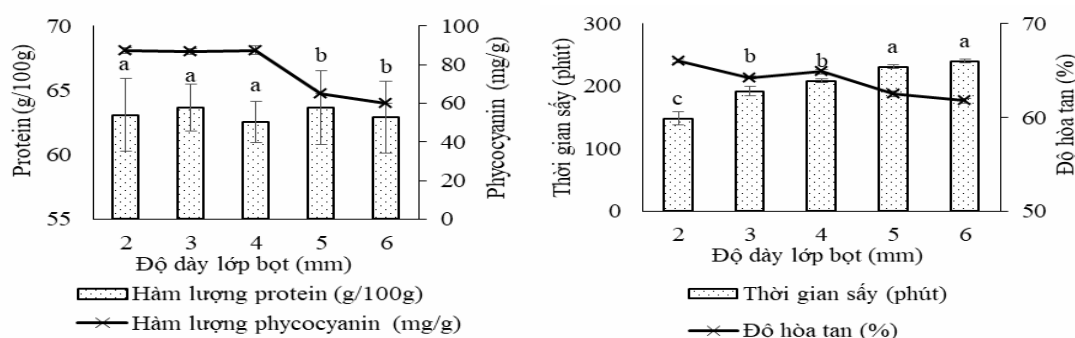
Dựa trên kết quả phân tích thống kê, có thể kết luận rằng, thời gian đánh bột tối ưu cho quá trình tạo bột là 3 phút. Tại thời điểm này, bột đạt chất lượng vượt trội khi độ nở bột đạt giá trị cực đại là $307,90 \pm 2,55\%$, một con số khác biệt có ý nghĩa thống kê so với tất cả các thời điểm khác. Song song đó, độ ổn định bột cũng đạt mức cao nhất là $86,97 \pm 0,15\%$, cao hơn đáng kể so với việc kéo dài thời gian đánh bột. Đáng chú ý, phân tích cho thấy, thời gian đánh bột không gây ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$) đến mật độ bột, vốn duy trì ổn định quanh mức $0,29 \text{ g/mL}$. Vì vậy, việc kéo dài thời gian đánh bột sau 3 phút sẽ làm suy giảm đáng kể các đặc tính cấu trúc quan trọng của bột mà không mang lại lợi ích nào, khẳng định 3 phút chính là thời gian lý tưởng nhất cho quá trình này. Có thể giải thích nguyên nhân là cấu trúc bột đã đạt tới trạng thái bão hoà nên bột không thể tăng thêm nữa. Kết quả này có sự tương đồng với

kết quả nghiên cứu của de Faria Cardoso và cs (2023) [14].

3.2. Các điều kiện ảnh hưởng trong quy trình sấy bột xốp

3.2.1. Ảnh hưởng độ dày bề mặt lớp bột đến thời gian sấy, hiệu suất thu hồi, hàm lượng phycocyanin, hàm lượng protein

Độ dày của lớp bột là một yếu tố then chốt, có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của quá trình sấy và chất lượng của sản phẩm cuối cùng. Lớp bột quá dày có thể làm tăng thời gian sấy, dẫn đến nguy cơ suy giảm các hợp chất nhạy nhiệt và làm biến tính các hợp chất. Ngược lại, một lớp bột quá mỏng sẽ làm thời gian sấy rút lại nhưng làm giảm năng suất của thiết bị. Do đó, ảnh hưởng của độ dày lớp bột đến các chỉ tiêu quan trọng được khảo sát ở các mức độ dày 2, 3, 4, 5, 6 mm



Hình 5. Ảnh hưởng của độ dày lớp bột

Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng hàng thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Kết quả ở hình 5 cho thấy, độ dày lớp bột ảnh hưởng rõ rệt đến hàm lượng phycocyanin và các chỉ tiêu công nghệ, trong khi hàm lượng protein hầu như không thay đổi. Hàm lượng protein dao động quanh 65 - 67 g/100 g chất khô và không khác biệt có ý nghĩa giữa các độ dày khảo sát ($p > 0,05$), cho thấy phần lớn protein tổng tương đối bền trước sự thay đổi độ dày lớp bột. Ngược lại, phycocyanin đạt giá trị cao và tương đương nhau khi độ dày nằm trong khoảng 2 - 4 mm ($\approx 80 \text{ mg/g}$ chất khô), nhưng giảm có ý nghĩa thống kê khi lớp bột dày từ 5 mm trở lên ($\approx 65 \text{ mg/g}$ chất khô, $p < 0,05$). Sự suy giảm này có thể liên quan đến việc lớp bột dày tạo nên vi môi trường dẫn nhiệt kém và vùng quá nhiệt cục bộ, thúc đẩy quá trình oxy hoá

và biến tính phức hợp protein - sắc tố phycocyanin, phù hợp với các kết quả về tính nhạy nhiệt và sự phân huỷ oxy hoá của phycocyanin đã được Patel và cs (2005) [6]; Moraes và cs (2011) [15] ghi nhận.

Xét dưới góc độ công nghệ, các nghiệm thức ở hai đầu khoảng khảo sát bộc lộ nhiều hạn chế. Ở độ dày 2 mm, thời gian sấy ngắn nhất và độ hoà tan đạt giá trị cao nhất (khoảng 66%), song lớp bột quá mỏng, giòn và dễ bám dính khay nên hiệu suất thu hồi thấp hơn ($90,50 \pm 0,30\%$) do tổn thất cơ học. Ngược lại, ở độ dày 5 - 6 mm, thời gian sấy kéo dài (tới khoảng 240 phút), độ hoà tan giảm đáng kể và sản phẩm có xu hướng dày, khó phân tán lại sau sấy. Nhóm độ dày 3 - 4 mm thể hiện sự

cân bằng tốt nhất giữa các chỉ tiêu: Hiệu suất thu hồi cao nhất và không khác biệt thống kê ($91,53 \pm 0,35\%$ và $91,80 \pm 0,30\%$, $p > 0,05$), thời gian sấy trung bình $191,67 \pm 7,64$ và $208,33 \pm 2,89$ phút thuộc cùng một nhóm thống kê, đồng thời vẫn duy trì hàm lượng phycocyanin ở mức cao và độ hòa tan chấp nhận được. Điều này cho thấy, lớp bột dày 3 - 4 mm vừa đủ mỏng để bảo vệ phycocyanin và rút ngắn thời gian sấy, vừa đủ dày để tạo tấm bột ổn định, dễ thu hồi. Kết quả này nhất quán với kết quả các nghiên cứu foam-mat khác, trong đó nghiên cứu của Rajkumar và cs (2007) [16] cũng nhấn mạnh sự tồn tại của một “độ dày tối ưu” giúp cân bằng giữa thời gian sấy và chất lượng sản phẩm.

3.2.2. Ảnh hưởng nhiệt độ sấy đến thời gian sấy, hiệu suất thu hồi, hàm lượng phycocyanin, hàm lượng protein

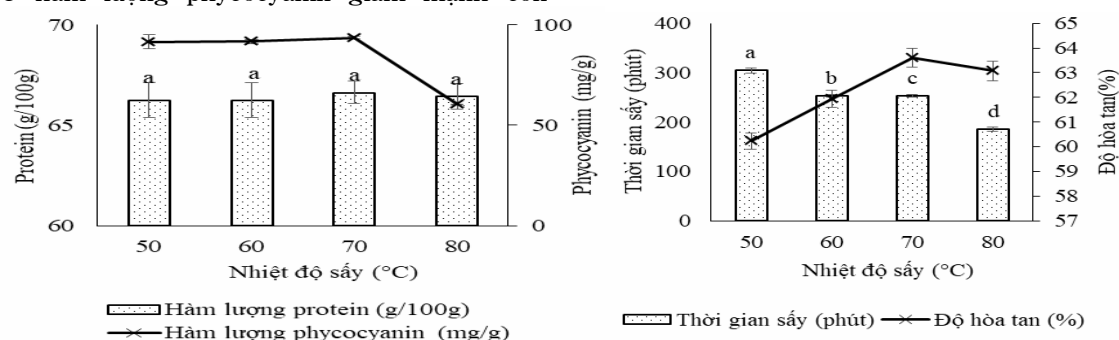
Dịch tảo sau khi được tạo bột ở điều kiện tối ưu được sấy ở 50, 60, 70, 80°C đến khi độ ẩm ẩm xấp xỉ còn < 5%. Kết quả cho thấy, hàm lượng protein của bột tảo dao động quanh 66 - 67 g/100 g và không khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các mức nhiệt độ khảo sát ($p > 0,05$). Điều này gợi ý rằng, các liên kết peptide trong protein của tảo *Spirulina* tương đối bền nhiệt trong khoảng 50 - 80°C, phù hợp với nhận định của Desmorieux và Decaen (2005) [17] khi nghiên cứu sấy vi tảo.

Ngược lại, phycocyanin thể hiện rõ vai trò là chỉ tiêu nhạy cảm nhất với tác động nhiệt. Ở 50°C, hàm lượng phycocyanin đạt $91,53 \pm 3,52$ mg/g và được duy trì ở mức cao khi tăng nhiệt độ lên 60 và 70°C (sự suy giảm chỉ ở mức nhẹ). Tuy nhiên, tại 80°C hàm lượng phycocyanin giảm mạnh còn

khoảng $60,32 \pm 0,07$ mg/g, khác biệt có ý nghĩa so với 3 mức nhiệt độ còn lại. Sự suy giảm đột ngột này có thể được giải thích bởi hiện tượng biến tính nhiệt và phá vỡ phức hợp sắc tố - protein làm mất màu và giảm hoạt tính sinh học của phycocyanin, tương tự quan sát của Sarada và cs (1999) [18], cũng như các nghiên cứu về tính ổn định nhiệt của phycocyanin [19].

Về khía cạnh công nghệ, khi nhiệt độ sấy tăng từ 50 lên 80°C, thời gian sấy giảm đáng kể; ở 80°C, thời gian sấy chỉ còn $185,67 \pm 4,04$ phút, phù hợp với nguyên lý rút ngắn thời gian nhờ tăng chênh lệch nhiệt ẩm trong kỹ thuật sấy bột xốp [19]. Hiệu suất thu hồi bột ở tất cả các mức nhiệt đều cao (khoảng 90 - 91%), với đạt giá trị 91,34% tại 80°C, nhưng không có khác biệt thống kê ($p > 0,05$), cho thấy tổn thất vật chất trong quá trình sấy là không đáng kể. Độ hòa tan của bột tăng từ 60,23% ở 50°C lên cực đại 63,59% tại 70°C rồi giảm nhẹ khi sấy ở 80°C, cho thấy nhiệt độ quá cao có thể gây biến tính và kết tụ một phần protein, làm suy giảm khả năng tái phân tán của bột.

Như vậy, mặc dù nhiệt độ 80°C cho thời gian sấy ngắn nhất, sự suy giảm mạnh hàm lượng phycocyanin và xu hướng giảm độ hòa tan cho thấy điều kiện này không phù hợp về mặt chất lượng. Nhiệt độ 70°C cung cấp sự cân bằng tốt hơn giữa hiệu quả sấy (thời gian sấy rút ngắn, hiệu suất thu hồi cao) và bảo toàn các đặc tính chức năng quan trọng của bột tảo (hàm lượng phycocyanin còn cao và độ hòa tan lớn nhất), do đó được đề xuất là nhiệt độ sấy thích hợp cho sản phẩm bột xốp tảo *Spirulina*.



Hình 6. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy

Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng hàng thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

3.3. So sánh hiệu suất sấy của phương pháp sấy bột xốp và sấy chân không

Sau khi thực hiện khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình sấy, có thể thấy mỗi phương pháp đều ưu điểm riêng. Số liệu tối ưu nhất sau khi khảo sát 2 phương pháp ở cùng nhiệt độ sấy 70°C được thể hiện ở bảng 1.

Ở cùng điều kiện nhiệt độ 70°C, hai phương pháp sấy bột xốp và sấy chân không cho hiệu suất thu hồi sản phẩm tương đương nhau, lần lượt 86,40

$\pm 0,30\%$ và $85,05 \pm 0,60\%$, sự khác biệt không có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$) (Bảng 1). Điều này cho thấy, việc thay đổi công nghệ sấy chủ yếu ảnh hưởng đến chất lượng hơn là lượng sản phẩm thu hồi. Tuy nhiên, thời gian sấy của phương pháp bột xốp chỉ khoảng 180 phút, ngắn hơn gần 30% so với sấy chân không (250 phút), phù hợp với nguyên lý tăng diện tích bay hơi và hệ số truyền khối của cấu trúc bột xốp [20].

Bảng 1. So sánh sản phẩm sấy của phương pháp sấy bột xốp và sấy chân không

Phương pháp sấy	Sấy bột xốp	Sấy chân không
Thời gian sấy (phút)	180	250
Hiệu suất thu hồi (%)	$86,40 \pm 0,30$	$85,05 \pm 0,60$
Hàm lượng protein (g/100 g chất khô)	$66,64 \pm 0,85$	$60,10 \pm 0,32$
Hàm lượng phycocyanin (mg/g chất khô)	$93,63 \pm 0,71$	$60,01 \pm 0,38$

Về chất lượng dinh dưỡng - chức năng, sấy bột xốp cho hàm lượng protein cao hơn có ý nghĩa thống kê so với sấy chân không ($66,64 \pm 0,85$ so với $60,10 \pm 0,32$ g/100 g chất khô, $p < 0,05$). Sự khác biệt càng rõ rệt hơn đối với phycocyanin: Mẫu sấy bột xốp đạt $93,63 \pm 0,71$ mg/g chất khô, trong khi mẫu sấy chân không chỉ đạt $60,01 \pm 0,38$ mg/g, tương ứng cao hơn khoảng 56% ($p < 0,05$). Điều này cho thấy, phycocyanin - sắc tố - protein nhạy cảm với nhiệt - được bảo toàn tốt hơn đáng kể khi áp dụng sấy bột xốp. Cơ chế này có thể liên quan đến việc giảm thời gian tiếp xúc với nhiệt và sự phân bố ẩm đồng đều hơn trong lớp bột, qua đó hạn chế biến tính và phân hủy phycocyanin so với quá trình sấy kéo dài trong điều kiện chân không [20].

Như vậy, trong cùng điều kiện nhiệt độ 70°C, mặc dù hiệu suất thu hồi của hai phương pháp tương đương nhau, sấy bột xốp tỏ ra ưu việt hơn về thời gian sấy và khả năng duy trì hàm lượng protein cũng như phycocyanin. Do đó, phương pháp sấy bột xốp được xem là lựa chọn phù hợp hơn để sản xuất bột tảo *Spirulina* giàu hoạt chất sinh học.

4. KẾT LUẬN

Đã xác định được các điều kiện công nghệ thích hợp cho quá trình sấy bột xốp tảo *Spirulina*, với giai đoạn tạo bột cho kết quả tốt nhất trong phạm vi khảo sát khi sử dụng thời gian siêu âm

dịch tảo 30 phút, tỷ lệ tảo: dung môi 1: 25 (w/v), nồng độ CMC 0,75% (so với khối lượng tảo) và thời gian đánh bột 3 phút. Trong giai đoạn sấy, nhiệt độ 70°C kết hợp với độ dày lớp bột 3 - 4 mm cho thấy sự thỏa hiệp hợp lý giữa thời gian sấy, hiệu suất thu hồi, độ hòa tan và khả năng bảo toàn protein, phycocyanin; trong đó độ dày 4 mm được đề xuất là điều kiện vận hành ưu tiên, với thời gian sấy trung bình 219,60 phút, hiệu suất thu hồi $91,35 \pm 0,35\%$, hàm lượng phycocyanin $93,62 \pm 0,70$ mg/g chất khô và hàm lượng protein $66,64 \pm 0,56$ g/100 g chất khô. Lớp bột quá mỏng (2 mm) tuy cho một số chỉ tiêu hóa lý cao hơn nhưng kém thuận lợi trong thao tác do dễ vỡ và khó thu hồi, trong khi lớp bột dày (≥ 5 mm) làm kéo dài thời gian sấy và suy giảm rõ rệt phycocyanin và độ hòa tan. So sánh với sấy chân không ở cùng nhiệt độ cho thấy, sấy bột xốp cho hiệu suất thu hồi tương đương nhưng rút ngắn thời gian sấy và bảo toàn phycocyanin tốt hơn, qua đó khẳng định đây là lựa chọn công nghệ phù hợp để sản xuất bột tảo *Spirulina* giàu hoạt chất sinh học cho các ứng dụng thực phẩm và thực phẩm chức năng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Becker, E. W. (2013). *Microalgae for human and animal nutrition*. London, UK: Springer.
2. Raja, R., Hemaiswarya, S., Kumar, N. A., Sridhar, S. & Rengasamy, R. (2008). A perspective on the biotechnological potential of microalgae.

Critical Reviews in Microbiology, 34(2), 77 - 88. DOI: 10.1080/10408410802086783.

3. Paiva, Y. F., Figueirêdo, R. M. F. D., Queiroz, A. J. D. M., Amadeu, L. T. S., Reis, C. G. D., Santos, F. S. D., ... & Lima, T. L. B. D. (2023). Tropical red fruit blend foam mat drying: Effect of combination of additives and drying temperatures. *Foods*, 12(13), 2508. DOI: 10.3390/foods12132508.

4. Nakamoto, M. M. M. A., Dun, Y. (2023). *Spirulina* application in food packaging: Gaps of knowledge and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 133, 138 - 147. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.02.001.

5. Yu, J., Hu, Y., Xue, M., Dun, Y., Li, S., Peng, N., Liang, Y. and Zhao, S. (2016). Purification and identification of antioxidant peptides from enzymatic hydrolysate of *Spirulina platensis*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26(7), 1216 - 1223. DOI: 10.4014/jmb.1601.01033.

6. Patel, A., Mishra, S., Pawar, R. & Ghosh, P. K. (2005). Purification and characterization of C-phycocyanin from cyanobacterial species of marine and freshwater habitat. *Protein Expression and Purification*, 40(2), 248 - 255. DOI:10.1016/j.pep.2004.10.028.

7. Saéz-Plaza, P., Michałowski, T. & García-Asuero, Á. G. (2013). An overview of the Kjeldahl method of nitrogen determination. Part I. Early history, chemistry of the procedure and titrimetric finish. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43(3), 178 - 223. DOI: 10.1080/10408347.2012.751786.

8. Nguyen Minh Thuy, Vo Quoc Tien, Ngo Van Tai, Vo Quang Minh (2022). Effect of foaming conditions on foam properties and drying behavior of powder from Magenta (*Peristropheoxburghiana*) leaves extracts. *Horticulturae*, 8(6), 546 - 562. DOI: 10.3390/horticulturae8060546.

9. Hu, H., Wu, J., Li-Chan, E. C., Zhu, L., Zhang, F., Xu, X., ... & Pan, S. (2013). Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions. *Food Hydrocoll*, 30(2), 647 - 655. DOI:10.1016/j.foodhyd.2012.08.001.

10. Amezá-Arranz, C., Salmazo, L. O., López-Gil, A. & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2024). Effect of egg white protein and water content on the stabilization mechanisms of natural rubber latex foams obtained from microwave radiation. *Advanced Engineering Materials*, 26(15), 2301922, DOI: 10.1002/adem.202301922.

11. Belal, M., Hossain, M. A., Mitra, S. & Zzaman, W. (2023). Effect of foaming agent concentration and foam stabilizer on the foaming capacity and physical properties of tomato powder at dried at different temperature: foam mat dried tomato powder. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 12(4), e4741 - e4741. DOI:10.55251/jmbfs.4741.

12. Gao, Y., Liu, R. & Liang, H. (2024). Food hydrocolloids: Structure, properties and applications. *Foods*, 13(7), 1077. DOI: 10.3390/foods13071077.

13. Pirsá, S., Hafezi, K. (2023). Hydrocolloids: Structure, preparation method and application in food industry. *Food Chemistry*, 399, 133967. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133967.

14. de Faria Cardoso, C. E., Trindade, M. E. F., Santana, M. G., Lobo, F. A. T. F. & Teodoro, A. J. (2023). Improvement of the phenolic composition and the antioxidant capacity of red guava (*Psidium guajava*) and watermelon (*Citrullus lanatus*) powders by means of foam blanket drying. *Food Chemistry Advances*, 3, 100368. DOI:10.1016/j.focha.2023.100368.

15. Moraes, C. C., Sala, L., Cerveira, G. P. & Kalil, S. J. (2011). C-phycocyanin extraction from *Spirulina platensis* wet biomass. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28, 45 - 49. DOI: 10.1590/S0104-66322011000100006.

16. Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G. S. V. & Ratti, C. (2007). Foam mat drying of alphonso mango pulp. *Drying Technology*, 25(2), 357 - 365. DOI: 10.1080/07373930601120126.

17. Desmorieux, H. & Decaen, N. (2005). Convective drying of *Spirulina* in thin layer. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 497 - 503. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.04.021.

18. Sarada, R. M. G. P., Pillai, M. G. & Ravishankar, G. A. (1999). Phycocyanin from *Spirulina* sp: Influence of processing of biomass on phycocyanin yield, analysis of efficacy of extraction methods and stability studies on phycocyanin. *Process biochemistry*, 34(8), 795 - 801. DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00153-8.
19. Hardy, Z. & Jideani, V. A. (2017). Foam-mat drying technology: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2560 - 2572. DOI: 10.1080/10408398.2015.1020359.
20. Chaiklahan, R., Chirasuwan, N. & Bunnag, B. (2012). Stability of phycocyanin extracted from *Spirulina* sp.: Influence of temperature, pH and preservatives. *Process Biochemistry*, 47(4), 659 - 664. DOI:10.1016/j.procbio.2012.01.010.

INVESTIGATION OF FOAM-MAT DRYING CONDITIONS FOR *Spirulina* POWDER PRODUCTION

Phan The Duy¹, Tran Phu Quy¹, Nguyen Thi Kim Chi¹, Le Nguyen Doan Duy¹

¹Faculty of Food Science and Technology, Ho Chi Minh University of Industry and Trade

Abstract

This study aimed to develop a foam-mat drying process for producing high-quality *Spirulina* powder and to evaluate the effects of key processing parameters on the final product. The process consisted of two main stages: Foam formation from a fresh *Spirulina* slurry and foam-mat drying. The investigated factors included ultrasonic treatment time of the algae slurry (10, 20, 30, 40, 50 minutes), algae-to-solvent ratios (1: 10, 1: 15, 1: 20, 1: 25, 1: 30 w/v), concentrations of the foaming stabilizer carboxymethyl cellulose (CMC) at 0.25, 0.5, 0.75, 1%, whipping times of 1, 3, 5, 7, 9 minutes, foam layer thicknesses of 2, 3, 4, 5, 6 mm, and drying temperatures of 50, 60, 70, 80°C. Optimal foaming conditions were achieved at 30 minutes of ultrasonication, a *Spirulina*-to-water ratio of 1: 25 (w/v), 0.75% CMC (based on the biomass) and 3 minutes of whipping. In the drying stage, foam layers 3 - 4 mm thick dried at 70 °C required approximately 200 - 220 min and yielded powders with high solids recovery (~ 91%), good solubility, a protein content of about 66.6 g/100 g dry weight and a phycocyanin content of approximately 93.6 mg/g dry weight. Compared with vacuum drying at the same temperature, foam-mat drying markedly shortened the drying time and preserved phycocyanin to a significantly greater extent, while maintaining similar recovery yields. This highlights its potential as a suitable technology for producing *Spirulina* powders enriched in bioactive compounds. The foam-mat drying process developed in this study satisfactorily met the research objectives. Optimization of whipping conditions and stabilizer ratios improved drying efficiency while preserving protein content and maintaining the final powder moisture below 5%. The results demonstrate that foam-mat drying is a suitable method for processing *Spirulina*, enhancing drying rate, improving powder quality, and providing a foundation for future scale-up.

Keywords: *Spirulina*, foam-mat drying, phycocyanin, vacuum drying, functional *Spirulina* powder.

Ngày nhận bài: 01/10/2025

Ngày chuyển phản biện: 9/10/2025

Ngày thông qua phản biện: 11/11/2025

Ngày duyệt đăng: 5/12/2025