

NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM CẤU TRÚC BỘT VÀ MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC SẤY BỘT XỐP TẢO *Spirulina*

Phan Thế Duy^{1,*}, Nguyễn Thị Kim Chi¹,Trần Phú Quý¹, Lê Nguyễn Đoàn Duy¹¹ 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 và đánh giá các mô hình động học mô tả quá trình sấy bột xoắn tảo *Spirulina* ở các mức nhiệt độ khác nhau (50, 60, 70, 80°C). Tảo *Spirulina* được xử lý tạo bột bằng cách bổ sung CMC 0,75%, đánh bột 3 phút, lớp bột dày 4 mm và tiến hành sấy trong khoảng 3,5 - 5 giờ tùy nhiệt độ, các kết quả trên đã được kiểm tra bằng mô hình tối ưu hóa. Ba mô hình toán học gồm Lewis, Page và Henderson & Pabis được sử dụng để mô phỏng quá trình giảm ẩm. Các chỉ số thống kê (R^2 , χ^2 , $RMSE$) được dùng để đánh giá mức độ phù hợp giữa dữ liệu thực nghiệm và mô hình dự đoán. Kết quả cho thấy, mô hình Page là mô hình mô tả chính xác nhất động học sấy bột xoắn tảo *Spirulina*, với R^2 đạt từ 0,9976 - 0,9994, trong khi $RMSE$ và χ^2 đều ở mức rất thấp. Điều này cho thấy, quá trình thoát ẩm trong cấu trúc bột xoắn phức tạp không tuân theo quy luật hàm mũ đơn giản mà được phản ánh chính xác hơn bởi dạng phi tuyến của mô hình Page. Phân tích SEM, FT-IR và XRD cho thấy, nhiệt độ sấy ảnh hưởng đáng kể đến cấu trúc và đặc tính hóa lý của bột. Ở 70°C, mẫu bột có cấu trúc xốp ổn định, khả năng hòa tan tốt, ít biến tính protein và vẫn duy trì các đặc trưng hóa học cơ bản. Kết quả cho thấy, ở điều kiện sấy phù hợp, bột tảo có cấu trúc tơi xốp, ít bị co rút, từ đó cải thiện khả năng tái hòa tan so với các điều kiện sấy nhiệt độ cao hoặc thời gian kéo dài.

Từ khóa: Mô hình động học, tảo *Spirulina*, sấy bột xoắn.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cấu trúc độc đáo của tảo *Spirulina* là một trong những yếu tố quan trọng quyết định đến giá trị của nó. Không giống với những thành cellulose của các loại tảo lục thông thường, thành tế bào của *Spirulina* được cấu tạo chủ yếu từ peptidoglycan, một cấu trúc mỏng manh. Đây là một trong những điều giúp cho cơ thể con người cũng như là động vật dễ dàng tiêu hóa và hấp thụ các dưỡng chất bên trong tế bào mà không cần trải qua những bước xử lý phức tạp. Hàm lượng protein có trong tảo *Spirulina* chiếm từ 50 - 70% khối lượng khô của tảo, là một tỉ lệ đặc biệt cao so với các nguồn thực vật khác. Đây là một nguồn protein hoàn chỉnh, chứa tất cả các axit amin thiết yếu. Do đó, việc bảo quản tảo *Spirulina* ở dạng bột là vô cùng cần thiết [1, 2].

Nhiều kỹ thuật sấy đã được nghiên cứu và ứng dụng nhằm sản xuất bột tảo *Spirulina* phục vụ mục đích bảo quản và mở rộng khả năng ứng dụng của nguồn nguyên liệu giàu giá trị dinh dưỡng này. Các phương pháp sấy truyền thống bao gồm: Sấy đối lưu không khí nóng (50°C trong 12 giờ) [3, 4], sấy lạnh bơm nhiệt (50°C trong 10 giờ) [4, 5] và sấy thăng hoa (-30°C trong 24 giờ) [3]. Bên cạnh đó, một số kỹ thuật

sấy hiện đại cũng đã được phát triển như sấy vi sóng kết hợp chân không (4800 W trong 40 phút) [3] và sấy hồng ngoại (40 - 75°C) [6]. Ngoài ra, một số nghiên cứu còn tích hợp các phương pháp tiền xử lý nhằm phá vỡ cấu trúc sinh khối, chẳng hạn như nghiền mịn bằng thiết bị nghiền bi, xử lý vi sóng (120 giây, tần số 2.450 Hz, công suất 1.400 W), hoặc hấp tiệt trùng (121°C trong 30 phút, áp suất 200 kPa) [7].

Điểm chung của các nghiên cứu này là hướng đến việc giảm thiểu sự suy giảm hàm lượng phycocyanin trong tảo *Spirulina*, đồng thời kiểm soát chất lượng dinh dưỡng và màu sắc của sản phẩm bột. Tuy nhiên, nhiều phương pháp trong số đó chưa đảm bảo duy trì tối ưu chất lượng sản phẩm cuối, hoặc nếu đạt được hiệu quả bảo toàn các hợp chất có hoạt tính sinh học thường đòi hỏi chi phí đầu tư thiết bị cao, làm gia tăng đáng kể giá thành sản phẩm. Trong bối cảnh đó, phương pháp sấy bột xoắn nổi lên như một giải pháp tiềm năng nhờ quy trình đơn giản, kết hợp phá vỡ màng tế bào, tạo cấu trúc bột với các lỗ rỗng khí và tiến hành sấy trong thời gian ngắn, qua đó góp phần giảm chi phí và nâng cao hiệu quả kinh tế.

Sấy bột xoắn là quá trình chuyển đổi nguyên liệu dạng lỏng hoặc bán rắn thành hệ bột ổn định

thông qua việc bổ sung chất tạo bọt và chất ổn định, kết hợp với việc đưa một lượng không khí đáng kể vào hệ. Lớp bọt sau khi hình thành được trải mỏng trên khay và sấy bằng không khí nóng ở nhiệt độ thích hợp cho đến khi đạt độ ẩm yêu cầu. Cấu trúc bọt xốp với diện tích bề mặt tiếp xúc lớn làm gia tăng giao diện lỏng-khí, từ đó thúc đẩy quá trình thoát ẩm nhanh hơn ngay cả ở nhiệt độ sấy thấp. Kết quả của quá trình sấy là các tấm hoặc thảm vật liệu xốp mỏng, sau đó được nghiền nhẹ để thu nhận sản phẩm bột mịn [8]. Nhờ đó, sấy bột xốp không chỉ rút ngắn đáng kể thời gian sấy và tiết kiệm năng lượng mà còn góp phần bảo toàn cấu trúc vi mô và các hợp chất nhạy nhiệt, qua đó nâng cao chất lượng và khả năng tái hòa tan của sản phẩm bột.

Hiện tại, các nghiên cứu về sấy bột xốp đang tập trung vào việc tối ưu hóa các thông số kỹ thuật để nâng cao hiệu quả sấy và chất lượng sản phẩm. Trong nghiên cứu tối ưu hóa bột trong quá trình sấy bột xốp quả dâu tằm đã thể hiện các ảnh hưởng của thời gian đánh bọt, nồng độ albumin (6 - 10%), CMC (0,1 - 0,5%), thời gian sấy (50 - 70°C) đến các đặc tính của bột. Kết quả cho thấy, thời gian đánh bọt là yếu tố ảnh hưởng chính, tiếp theo là đến các chất ổn định bột và chất tạo bọt được khảo sát. Điều kiện tối ưu được thể hiện nồng độ albumin, giá trị CMC và nhiệt độ sấy lần lượt ở 9,07%, 0,39% và 62°C. Giá trị tối ưu của độ nở bột và độ ổn định bột lần lượt đạt được 467,90% và 97,02% [9]. Một số nghiên cứu khác đã đưa ra sự ảnh hưởng của sấy bột xốp đến các hợp chất có hoạt tính sinh học trong thực phẩm có nguồn gốc thực vật. Kết quả cho thấy, sấy bột xốp có thời gian sấy ngắn đã mang lại lợi ích cho việc giữ lại các hoạt tính sinh học. Trong quá trình thực hiện, ở nhiệt độ không khí 40 - 65°C, độ dày bột từ 0,2 - 1 cm và sử dụng chất tạo bọt là lòng trắng trứng dẫn đến khả năng giữ hoạt tính sinh học cao [10]. Các nghiên cứu trên đã thực hiện việc đánh giá các ảnh hưởng của quá trình tạo bọt nhưng chưa đưa ra được phương pháp để xác định thời gian sấy phù hợp theo nhiệt độ nếu áp dụng phương pháp sấy bột xốp với quy mô lớn hơn. Vì vậy, trong nghiên cứu này, đã đề xuất 3 mô hình toán học là Page, Lewis, Hederson và Pablic nhằm mô hình hóa động học quá trình sấy bột xốp từ nhiệt độ, từ đó kiểm soát được chất lượng sản phẩm bột tảo *Spirulina* thành phẩm bằng các phương pháp phân tích kỹ thuật vật liệu kính hiển vi điện tử quét (SEM, Scanning Electron Microscopy), quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy) và nhiễu xạ tia X (XRD, X-ray Diffraction).

2. NGUYÊN LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Quá trình tạo bọt và phương pháp sấy bột xốp

Tảo được cân 20 g cho mỗi mẫu sấy theo 4 mức nhiệt độ được khảo sát (50, 60, 70, 80°C). Pha loãng mẫu tảo với nước cất theo tỷ lệ 1: 25 (w/w chất khô), và siêu âm trong 40 phút nhằm phá vỡ tế bào tảo, hỗ trợ quá trình tạo bọt. Các mẫu dịch sau siêu âm được bổ sung CMC 0,75% (w/w tảo nguyên liệu), thời gian tạo bọt trong 3 phút bằng máy đánh trứng, độ dày bột 4 mm. Các yếu tố trên đã được khảo sát ở nghiên cứu trước đó [11]. Tiến hành sấy mẫu trong khoảng thời gian từ 5 giờ, 4,5 giờ, 4 giờ và 3,5 giờ, tương ứng với các mức nhiệt độ sấy trên.

2.2. Phương pháp phân tích

2.2.1. Mô hình động học sấy bột xốp

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

Tỉ lệ độ ẩm (MR - Moisture Ratio) của các mô hình trong bảng 1 được tính như sau:

Tỉ lệ độ ẩm (MR) có thể được đơn giản hóa thành M_t / M_o , với M_t là độ ẩm tại thời gian khảo sát ($\text{kg}_{\text{nước}}/\text{kg}_{\text{chất khô}}$) và M_o là độ ẩm ban đầu ($\text{kg}_{\text{nước}}/\text{kg}_{\text{chất khô}}$) [12].

Dữ liệu thực nghiệm của quá trình sấy khô được đánh giá bằng phân tích hồi quy và việc lựa chọn mô hình được tiến hành dựa trên hệ số xác định (R^2), chỉ bình phương trung bình (χ^2), sai số bình phương trung bình ($RMSE$) bằng phần mềm Excel. Thí nghiệm được tiến hành 3 lần lặp lại. Một mô hình được coi là phù hợp hơn khi giá trị R^2 cao và giá trị χ^2 , $RMSE$ càng thấp [13].

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

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

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

Trong đó: $MR_{exp,i}$ là tỉ lệ độ ẩm thực nghiệm; $MR_{pre,i}$ là tỉ lệ độ ẩm dự đoán của mô hình; N là số dữ liệu quan sát; Z là hằng số mô hình [14].

Các tham số trong mô hình: t là thời gian sấy (phút); k là hằng số sấy; a và n là hệ số mô hình; MR là tỉ lệ độ ẩm.

Bảng 1. Các mô hình toán học sử dụng mô hình hóa quá trình sấy bột xốp [6]

STT	Mô hình	Công thức tính	Các hệ số sau khi biến đổi mô hình dạng: $Y = AX + B$
1	Lewis	$MR = \exp(-k \times t)$	$Y = \ln(MR); X = t;$ $A = -k; B = 0$
2	Page	$MR = \exp(-k \times t^n)$	$Y = \ln(-\ln(MR)); X = \ln(t);$ $A = n; B = \ln(k)$
3	Henderson & Pabis	$MR = a \times \exp(-k \times t)$	$Y = \ln(MR); X = t;$ $A = -k; B = \ln(a)$

2.2.2. Phân tích cấu trúc vật liệu

Kính hiển vi điện tử quét (Scanning electron microscope, SEM): Là phương pháp chụp ảnh cấu trúc bề mặt của mẫu vật liệu rắn ở các chế độ phóng đại khác nhau. Các mẫu (nhiệt độ sấy khác nhau) được tiến hành kiểm tra cấu trúc vi mô bằng thiết bị kính hiển vi điện tử quét (Jeol, Nhật Bản), hình ảnh được thể hiện qua các mức độ phóng đại khác nhau ở 100, 500, 1.000, 2.000, 5.000, 7.000, 10.000 lần.

Quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR): Phương pháp cung cấp các thông tin có giá trị liên quan đến các liên kết hóa học và nhóm chức hóa học trong cấu trúc của phân tử hữu cơ. Mẫu bột tảo được phân tích bằng thiết bị quang phổ hồng ngoại (Jasco, Nhật Bản) với phạm vi quét của quang phổ hồng ngoại gần trong khoảng từ 500 - 4.000 cm^{-1} với độ phân giải (Resolution) được đặt ở 2 cm^{-1} .

Nhiễu xạ tia X (X-ray diffraction, XRD): Phương pháp đánh giá thêm những thay đổi về độ kết tinh và từ đó xác định được hình thái kết tụ của các phân tử trong bột. Mẫu được phân tích bằng thiết bị quang phổ nhiễu xạ tia X (Bruker, Đức) với nhiễu xạ quét (2θ) trong phạm vi từ 5 - 80° với bước đo 0,02°, dòng điện ống 10 mA, điện áp 30 kV và sử dụng đầu dò Lynxeye (1D mode).

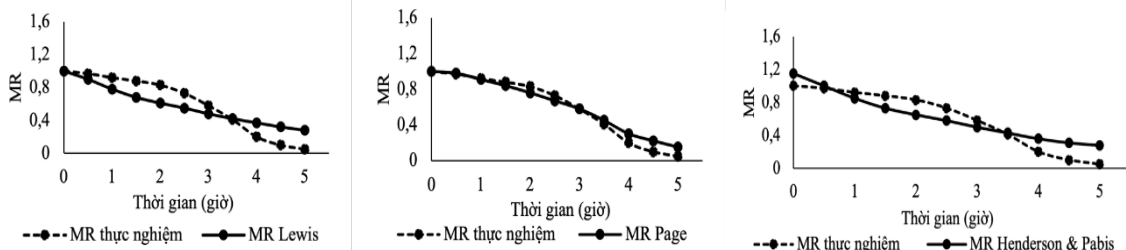
2.3. Phương pháp xử lý số liệu

Các thí nghiệm được lặp lại 3 lần để đảm bảo độ tin cậy. Kết quả được phân tích thống kê bằng phần mềm Microsoft Excel 2016 và Design Expert v13. Đối với mô hình động học sấy, độ phù hợp được đánh giá thông qua hệ số xác định (R^2), chỉ số RMSE và chỉ bình phương (χ^2). Mô hình có giá trị R^2 cao và RMSE, χ^2 thấp được lựa chọn để mô tả chính xác quá trình sấy bột xốp.

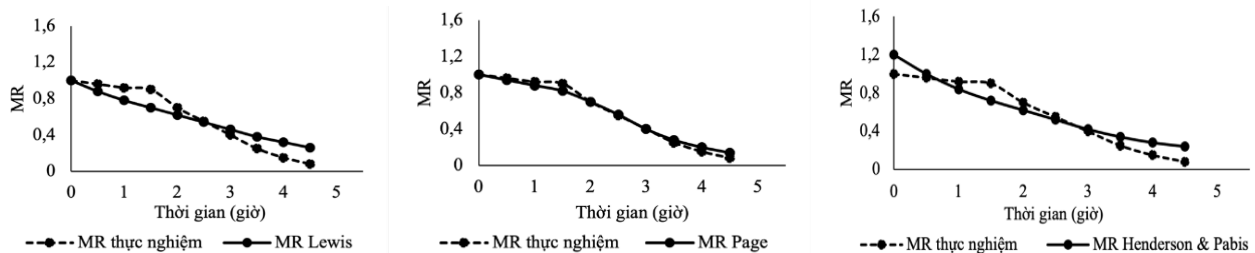
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình hóa đường cong sấy

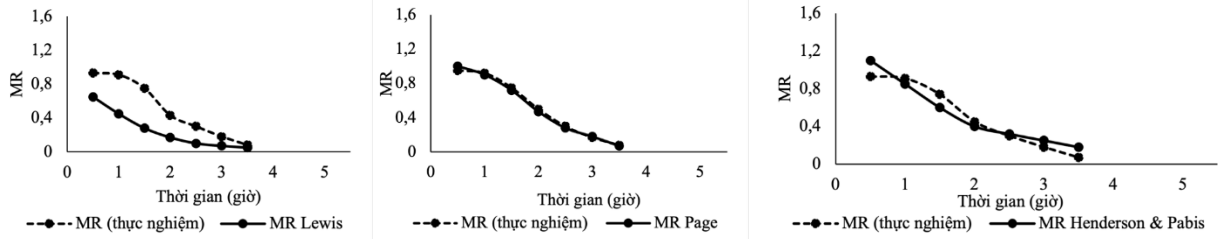
Quá trình sấy bột xốp tảo *Spirulina* được tiến hành khảo sát ở các mức nhiệt độ khác nhau (50, 60, 70, 80°C) nhằm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ đến tốc độ giảm ẩm cũng như xác định mô hình động học sấy phù hợp nhất. Kết quả cho thấy, khi nhiệt độ sấy tăng từ 50°C lên 70°C, thời gian cần thiết để mẫu đạt trạng thái gần cân bằng ẩm giảm rõ rệt, từ khoảng 300 phút xuống còn 180 phút, tương ứng mức rút ẩm khoảng 40%. Điều này chứng tỏ, việc tăng nhiệt độ sấy giúp thúc đẩy mạnh mẽ quá trình khuếch tán ẩm từ bên trong vật liệu ra bề mặt, đồng thời làm tăng chênh lệch áp suất hơi giữa vật liệu và môi trường xung quanh, từ đó gia tăng tốc độ bay hơi.



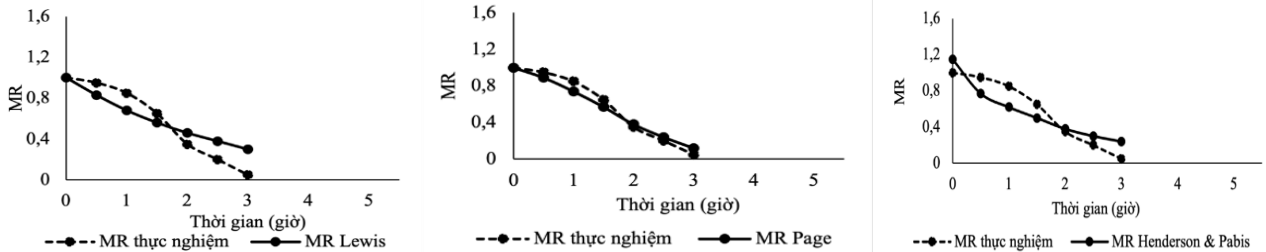
Hình 1. Mô hình Lewis, Page, Henderson & Pabis mô phỏng tỷ lệ độ ẩm theo thời gian sấy ở 50°C



Hình 2. Mô hình Lewis, Page, Henderson & Pabis mô phỏng tỷ lệ độ ẩm theo thời gian sấy ở 60°C



Hình 3. Mô hình Lewis, Page, Henderson & Pabis mô phỏng tỷ lệ độ ẩm theo thời gian sấy ở 70°C



Hình 4. Mô hình Lewis, Page, Henderson & Pabis phỏng đoán tỷ lệ độ ẩm theo thời gian sấy ở 80°C

Bảng 2. Ước tính các tham số mô hình được áp dụng để biểu diễn dữ liệu thực nghiệm

Mô hình	Nhiệt độ (°C)	Tham số từ mô hình			R^2	χ^2	RMSE
		a	k	n			
Lewis	50	-	0,2484	-	0,7827	0,02323	0,15444
	60	-	0,302	-	0,8846	0,02472	0,15504
	70	-	0,4476	-	0,7872	0,02263	0,08873
	80	-	0,4743	-	0,8286	0,03181	0,18270
Page	50	-	0,6973	1,2291	0,9994	0,00045	0,00638
	60	-	0,5898	1,5312	0,9988	0,00086	0,00976
	70	-	0,4283	2,3243	0,9990	0,00045	0,00844
	80	-	0,6775	1,9427	0,9976	0,00088	0,01255
Henderson & Pabis	50	1,1503	0,2966	-	0,8256	0,00318	0,01696
	60	0,9419	0,6923	-	0,9859	0,01971	0,14040
	70	1,1658	0,5236	-	0,8178	0,02782	0,16680
	80	0,9168	1,0116	-	0,9877	0,00459	0,02766

Qua phân tích và so sánh 3 mô hình động học, có thể khẳng định, mô hình Page là mô hình phù hợp và chính xác nhất để mô tả quá trình sấy bột xộp tảo *Spirulina*. Sự vượt trội này được chứng minh bằng hệ số xác định R^2 luôn tiến sát đến 1 (0,9976 - 0,9994) và các chỉ số sai số (χ^2 , RMSE) luôn ở mức thấp nhất tại mọi điều kiện nhiệt độ. Về mặt bản chất, sự phù hợp của mô hình Page cho thấy quá trình thoát ẩm từ cấu trúc bột xộp phức tạp của tảo không tuân theo quy luật giảm hàm mũ đơn giản và tham số n trong mô hình đã nắm bắt thành công sự thay đổi trong tốc độ sấy này. Việc xác định được mô hình chính xác không chỉ mang ý nghĩa học thuật mà còn có giá trị thực tiễn to lớn, cho phép tối ưu hóa thời gian, tiết kiệm năng lượng và kiểm soát chất lượng sản phẩm. Hơn nữa, khi xem xét yếu tố nhiệt độ, dù sấy ở 80°C cho thời gian nhanh nhất, nhưng luôn tồn tại rủi ro suy giảm chất lượng sản phẩm do nhiệt. Hơn thế, trong báo cáo nghiên cứu trước đây, mức nhiệt sấy ở 70°C còn cho thấy hàm lượng phycocyanin dường như vẫn duy trì gần bằng với mức sấy ở 50°C, đạt $91,53 \pm 3,52$ mg/g.

Trong khi, mức sấy 80°C thì giảm mạnh còn khoảng $60,32 \pm 0,07$ mg/g [11]. Vì vậy, mức nhiệt 70°C, với thời gian sấy đã được rút ngắn đáng kể và độ phù hợp mô hình rất cao, được xem là sự cân bằng tối ưu giữa hiệu suất sấy và việc bảo toàn chất lượng sản phẩm trong điều kiện nghiên cứu.

Khả năng phỏng đoán độ ẩm của bột tảo ở các thời gian sấy tại 70°C của mô hình Page và mô hình Henderson & Pabis, đường cong phỏng đoán của Page gần đạt mức chính xác so với đường cong của dữ liệu thực nghiệm. Tính chính xác phỏng đoán của mô hình Page cũng được chứng minh qua các nghiên cứu sấy nông sản [14].

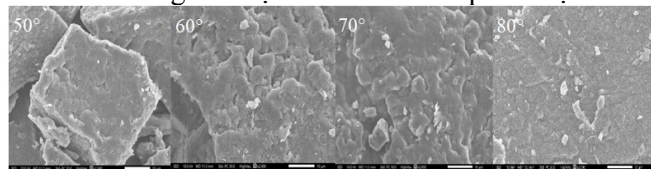
Kết quả phân tích cho thấy, mô hình Page có sai số nhỏ nhất trên cả 3 tiêu chí (MAE, SSE và Max Error), phản ánh độ khớp cao giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm. Mô hình Henderson & Pabis tuy có sai số nhỏ hơn Lewis nhưng vẫn kém chính xác ở các giai đoạn đầu và cuối. Mô hình Lewis đơn giản nhưng cho sai số lớn nhất, không phù hợp để mô tả chính xác quá trình sấy phi tuyến như trong thực tế.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, mô hình Page là mô hình phù hợp nhất để mô tả động học sấy của vật liệu nghiên cứu tại 70°C. Mô hình này thể hiện độ chính xác cao trong việc phỏng đoán sự thay đổi tỷ lệ độ ẩm theo thời gian, đồng thời cho thấy tính linh hoạt tốt khi áp dụng vào các điều kiện sấy thực tiễn. Việc lựa chọn mô hình Page không chỉ đáp ứng yêu cầu mô hình hóa chính xác quá trình sấy bột xốp mà còn góp phần làm cơ sở cho việc tối ưu hóa thông số công nghệ và kiểm soát chất lượng sản phẩm trong ứng dụng thực tế.

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến hình thái bột sản phẩm

3.2.1. Đánh giá qua SEM

Nhiệt độ sấy ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian sấy, khi thời gian sấy kéo dài lượng nước thoát ra từ thâm bột nhiều gây tác động trực tiếp đến cấu trúc của bột thành phẩm. Hình 5 cho thấy, khi sấy ở nhiệt độ 60°C làm cho cấu trúc của bột đặc hơn ít xốp hơn do lượng nước thoát ra từ thâm bột trong quá trình sấy làm ảnh hưởng đến độ hòa tan của sản phẩm bột.



Hình 5. Cấu trúc bề mặt phân tử bột ở độ phóng đại 2.000 lần (SEM)

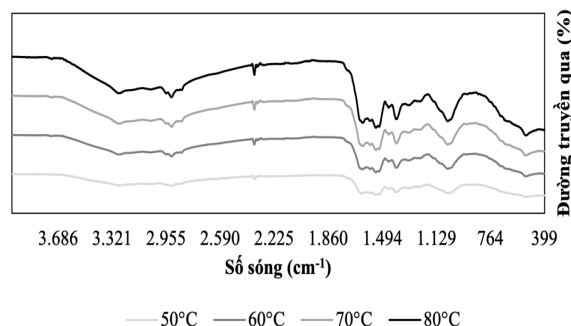
Khi sấy bột xốp ở nhiệt độ 70°C và 80°C làm rút ngắn thời gian sấy, lượng nước thoát ra từ thâm bột là không đáng kể từ đó giúp cho sản phẩm bột có cấu trúc xốp cải thiện được độ hòa tan. Qua các thí nghiệm kiểm tra về nhiệt độ sấy, có thể chọn nhiệt độ 70°C là nhiệt độ sấy cho quá trình để có được sản phẩm bột tảo có chất lượng cao nhất.

Kết quả phân tích SEM cung cấp bằng chứng trực quan cho thấy, nhiệt độ sấy ảnh hưởng trực tiếp đến cấu trúc vi mô và chất lượng của bột tảo. Quá trình sấy ở 70°C và 80°C diễn ra đủ nhanh để “khóa” lại cấu trúc bột ban đầu, tạo ra sản phẩm dạng mạng lưới xốp, thoáng giúp cải thiện độ hòa tan. Ngược lại, sấy ở 60°C với thời gian kéo dài khiến cấu trúc bị sụp đổ, trở nên đặc và ít xốp hơn, làm giảm khả năng hòa tan. Phát hiện này có sự tương đồng cao với kết quả nghiên cứu của Chaiklahan và cs (2012) [15], khi cũng quan sát thấy bột phycocyanin không ổn định và “dễ bị nứt gãy ở 60°C”. Do đó, có thể khẳng định, nhiệt độ sấy 70°C là lựa chọn tối ưu, tạo ra cấu trúc vi mô lý tưởng giúp nâng cao chất lượng bột tảo thành phẩm.

3.2.2. Đánh giá qua FT-IR

Phương pháp phân tích phổ hồng ngoại biến đổi Fourier cho thấy các đặc điểm khác biệt về cấu

trúc hóa học. Phân tích phổ FT-IR giúp nhận diện các nhóm chức chính và sự thay đổi cấu trúc của bột tảo sấy bột xốp sau quá trình sấy ở các mức nhiệt khác nhau.



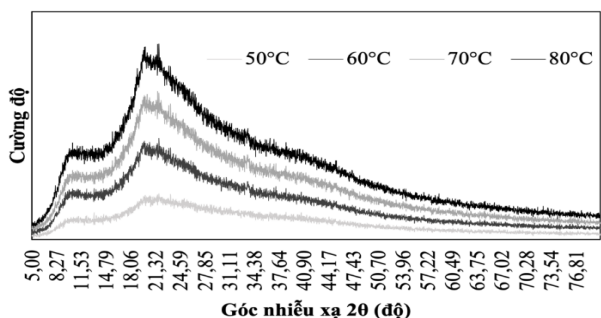
Hình 6. Phổ hồng ngoại (FT-IR) của bột tảo sấy bột xốp

Dựa vào phổ hồng ngoại ở hình 6 có thể thấy, các mẫu bột tảo sấy bột xốp ở các mức nhiệt độ 50°C, 60°C, 70°C, 80°C đều xuất hiện những dải hấp thụ đặc trưng tương tự nhau, chứng tỏ thành phần cấu trúc hóa học cơ bản của tảo không bị thay đổi đáng kể trong quá trình sấy. Tuy nhiên, cường độ và độ sắc nét của các đỉnh có sự khác biệt theo nhiệt độ. Ở nhiệt độ cao hơn (đặc biệt là 80°C), các đỉnh phổ có xu hướng giảm cường độ hoặc thay đổi hình dạng, phản ánh sự suy giảm về liên kết hydro, protein hoặc polysaccharide do tác động của nhiệt. Ngược lại, ở mức nhiệt thấp (50°C và 60°C), các tín hiệu phổ rõ ràng hơn, cho thấy cấu trúc hóa học ít bị biến đổi. Phổ FT-IR cho thấy, không có sự xuất hiện dải chức năng hoàn toàn mới mạnh (ví dụ dải carbonyl mới lớn $\sim 1.740\text{ cm}^{-1}$), nhưng có thay đổi rõ ràng ở các dải liên quan đến O–H/N–H (3.320 cm^{-1}), amide/CH ($\approx 1.494\text{ cm}^{-1}$) và C–O (1.129 cm^{-1}) khi tăng nhiệt độ. Những biến đổi này nhất quán với mất nước liên kết, suy giảm liên kết hydro và biến tính một phần protein; polysaccharide cũng chịu tác động nhẹ nhưng khung cấu trúc chính vẫn còn tương đối bảo tồn. Về mặt ứng dụng, sấy ở 80°C có nguy cơ làm giảm hoạt tính sinh học (đặc biệt cho các protein nhạy nhiệt như phycobiliprotein), trong khi sấy ở 50 - 60°C duy trì cấu trúc tốt hơn. Điều này chứng tỏ, quá trình sấy ở nhiệt độ cao có thể làm biến tính một số hợp chất sinh học nhạy nhiệt trong tảo, trong khi sấy ở nhiệt độ thấp giúp bảo toàn cấu trúc hóa học tốt hơn. So sánh với bảng phân tích FTIR của *Spirulina fusiformis* [16], kết quả có nhiều điểm tương đồng, đặc biệt ở sự hiện diện của –OH, C–H, C=O và C–N; tuy nhiên bảng này hệ thống hóa phổ theo dải rộng hơn, bao gồm cả dao động C=C, C=N ($2.260 - 2.100\text{ cm}^{-1}$) và C–Br ($690 - 515\text{ cm}^{-1}$), trong khi nghiên cứu này nhấn mạnh hơn đến các đỉnh đặc trưng của protein và phospholipid. Như vậy, nhìn chung kết

quả phổ FT-IR của tảo *Spirulina* đều cho thấy sự hiện diện của nhóm chức hydroxyl, carbonyl, amide, phosphat và alkyl, đây là những nhóm đóng vai trò quan trọng trong cấu trúc sinh học cũng như tiềm năng hoạt tính sinh học của tảo.

3.2.3. Cấu trúc XRD

Phổ nhiễu xạ tia X cung cấp thông tin về tính chất kết tinh của bột tảo *Spirulina* ở các mức nhiệt sấy bột xấp khác nhau. Dựa vào phân tích hình dạng và cường độ của các đỉnh nhiễu xạ, có thể đánh giá mức độ kết tinh hoặc vô định hình của các mẫu.



Hình 7. Phổ nhiễu xạ tia X (XRD) của bột tảo ở các mức nhiệt sấy bột xấp 50, 60, 70, 80°C

Kết quả phổ nhiễu xạ tia X (XRD) cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mức độ trật tự cấu trúc của bột tảo tại các điều kiện sấy bột xấp khác nhau. Ở 50°C, phổ xuất hiện với cường độ đỉnh thấp, biểu hiện đặc trưng của trạng thái vô định hình, nguyên nhân có thể do lượng ẩm còn cao, cản trở quá trình hình thành liên kết hydro và hạn chế sự sắp xếp trật tự trong khung polysaccharide. Khi tăng lên 60°C, cường độ đỉnh ở vùng $2\theta \approx 20 - 25^\circ$ gia tăng, cho thấy cấu trúc bắt đầu đạt mức độ bán kết tinh cao hơn nhờ quá trình loại ẩm hiệu quả, giúp các mạch cellulose và hemicellulose sắp xếp chặt chẽ hơn. Ở 70°C, xu hướng này tiếp tục thể hiện rõ, phổ XRD có cường độ cao hơn so với 60°C, chứng minh sự ổn định cấu trúc tốt hơn nhưng vẫn duy trì đặc tính vô định hình cần thiết để bảo toàn hoạt chất sinh học. Đặc biệt, ở 80°C, cường độ đỉnh đạt mức cao nhất, cho thấy sự gia tăng rõ rệt mức độ bán kết tinh. Tuy nhiên, sự tăng cường trật tự cấu trúc này có thể đi kèm với nguy cơ suy giảm thành phần sinh học nhạy nhiệt (protein, sắc tố hoặc polysaccharide hòa tan), dẫn đến sự đánh đổi giữa độ ổn định hình thái và giá trị dinh dưỡng.

Như vậy, có thể nhận thấy, nhiệt độ sấy càng cao thì cường độ nhiễu xạ càng lớn, phản ánh sự gia tăng tính bán kết tinh của bột tảo. Tuy nhiên, mức 60 - 70°C được xem là tối ưu, vì vừa đảm bảo cấu trúc tương đối bền vững vừa hạn chế ảnh hưởng bất lợi đến hoạt chất sinh học, trong khi ở 80°C mặc dù cho cường độ đỉnh mạnh nhất nhưng tiềm ẩn rủi ro mất mát chất lượng dinh dưỡng.

4. KẾT LUẬN

Mô hình Page là mô hình phù hợp nhất để mô tả động học sấy bột xấp tảo *Spirulina*, thể hiện độ tương thích cao giữa mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm. Trong các điều kiện khảo sát, nhiệt độ sấy 70°C được xác định là tối ưu, đảm bảo cân bằng giữa thời gian sấy, hiệu suất năng lượng và chất lượng sản phẩm. Ở điều kiện này, sản phẩm thu được có cấu trúc vi mô xấp, khả năng hòa tan cao, giữ được tính chất hóa học cơ bản. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng sấy bột xấp trong bảo quản và sản xuất bột tảo *Spirulina*, đồng thời tạo tiền đề cho các nghiên cứu mở rộng về tối ưu hóa năng lượng sấy và bảo toàn hoạt tính sinh học ở quy mô công nghiệp.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này do Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh bảo trợ và cấp kinh phí theo Hợp đồng số 125/HĐ-DCT ngày 15 tháng 7 năm 2024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Vo Thanh Sang, Ngo Dai Hung, Kim Se Kwon (2015). Chapter 19 - Nutritional and pharmaceutical properties of microalgal *Spirulina*. *Handbook of Marine Microalgae*, Academic Press, 299 - 308. DOI: 10.1016/B978-0-12-800776-1.00019-4.
2. Capelli, B. and Cysewski, G. R. (2010). Potential health benefits of *Spirulina* microalgae, *Nutrafoods*, 9(2): 19 - 26. DOI: 10.1007/bf03223332.
3. Kuatrakul, I., Kuarthongsri, P., Yabuuchi, C., Somsai, K. & Utama-ang, N. (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): 191 - 199.
4. Nguyễn Trọng Bách, Trần Bảo Duy, Lê Bền, Đinh Văn Hiện (2026). Ảnh hưởng của phương pháp sấy đến thành phần hóa học và đặc tính hóa lý của tảo xoắn *Spirulina platensis*. *Bản B - Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 68(2): 57 - 63. DOI: 10.31276/VJST.2025.3208.
5. Costa, B. R., Rocha, S. F., Rodrigues, M. C., Pohndorf, R. S., Larrosa, A. P. & Pinto, L. A. (2015). Physicochemical characteristics of the *Spirulina* sp. dried in heat pump and conventional tray dryers. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(12): 2614 - 2620.
6. Mróz, M., Parchem, K., Józwick, J., Domingues, M. R. & Kusznierevicz, B. (2024). The impact of different drying methods on the metabolomic and lipidomic profiles of *Arthrospira platensis*. *Molecules*, 29(8), 1747.

7. Larrosa, A. P., Camara, A. S., Moura, J. M. & Pinto, L. A. (2018). *Spirulina* sp. biomass dried/disrupted by different methods and their application in biofilms production. *Food science and Biotechnology*, 27(6):1659 - 1665.

8. Brar, A. S., Kaur, P., Kaur, G., Subramanian, J., Kumar, D. and Singh, A. (2020). Optimization of process parameters for foam-mat drying of peaches. *International Journal of Fruit Science*, 20(S3): S1495 - S1518. DOI: 10.1080/15538362.2020.1812017.

9. Hong Van Hao, Nguyen Minh Thuy, Tran Ngoc Giau, Ngo Van Tai and Vo Quang Minh (2024). Effect of foaming agents and drying temperature on drying rate and quality of foam-mat dried papaya powder. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 13(6): 1 - 7. DOI: 10.55251/jmbfs. 10725.

10. Reis, F. R., de Moraes, A. C. S. and Masson, M. L. (2021). Impact of foam-mat drying on plant-based foods bioactive compounds: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76(2): 153 - 160. DOI: 10.1007/s11130-021-00899-3.

11. Phan Thế Duy, Trần Phú Quý, Nguyễn Thị Kim Chi, Lê Nguyễn Đoàn Duy (2025). Nghiên cứu điều kiện sấy bột xốp sản xuất bột tảo *Spirulina*. Tập

chí Nông nghiệp và Môi trường, 24, 35 - 44. DOI: 10.71254/qv41qk61.

12. Midilli, A. (2001). Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*, 25(8): 715 - 725. DOI: 10.1002/er.715.

13. Bialik, M., Gondek, E., Wiktor, A., Latocha, P. and Witrowa-Rajchert, D. (2017). Mathematical modeling of *Actinidia arguta* (Kiwiberry) drying kinetics. *Agricultural Engineering*, 21(4): 5 - 13. DOI: 10.1515/agriceng-2017-0031.

14. Ruhanian, S. and Movagharnejad, K. (2016). Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(1): 84 - 91. DOI: 10.1016/j.eaef.2015.09.004.

15. Chaiklahan, R., Chirasuwan, N. and 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.

16. Theivandran, G., Ibrahim, S. M. and Murugan, M. (2015). Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopic analysis of *Spirulina fusiformis*. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 3(4): 30 - 32.

INVESTIGATION OF POWDER STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND KINETIC MODELING OF *Spirulina* FOAM DRYING

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

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

Abstract

This study aimed to develop and evaluate kinetic models describing the foam-drying process of *Spirulina* at different temperatures (50, 60, 70, 80°C). The *Spirulina* suspension was foamed by adding 0.75% CMC, whipping for 3 minutes, forming a foam layer of 4 mm thickness, and drying for 3.5 - 5 hours depending on temperature, the above results have been validated using an optimization model. Three mathematical models Lewis, Page and Henderson & Pabis were applied to simulate the moisture reduction process. Statistical indicators (R^2 , χ^2 , $RMSE$) were used to assess the goodness of fit between experimental and predicted data. The results indicated that the Page model provided the best description of the drying kinetics of *Spirulina* foam, with R^2 values ranging from 0.9976 to 0.9994, while $RMSE$ and χ^2 values remained very low. This suggests that moisture removal in the complex porous foam structure does not follow a simple exponential trend but is better represented by the nonlinear form of the Page model. SEM, FT-IR, and XRD analyses revealed that drying temperature significantly affected the structural and physicochemical properties of the powder. At 70°C, the powder exhibited a stable porous structure, good solubility, minimal protein denaturation, and retention of its fundamental chemical characteristics. The results indicate that, under appropriate drying conditions, the algal powder exhibited a porous and less compact structure with minimal shrinkage, thereby enhancing its rehydration capacity compared to samples dried at higher temperatures or for prolonged durations.

Keywords: Kinetic model, *Spirulina*, foam drying.

Ngày nhận bài: 5/01/2026

Ngày chuyển phản biện: 12/01/2026

Ngày thông qua phản biện: 6/02/2026

Ngày duyệt đăng: 11/3/2026