

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA ĐIỀU KIỆN SẤY BỌT XỐP ĐẾN TỐC ĐỘ SẤY VÀ HÀM LƯỢNG POLYPHENOL TRONG BỘT KHOAI LANG RUỘT TRẮNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP BỀ MẶT ĐÁP ỨNG

**Nguyễn Chí Dũng¹, Nguyễn Minh Thủy^{1,*}, Trần Ngọc Giàu¹,
Hong Văn Hào¹, Phạm Thị Kim Quyên^{1,2}**

¹ Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ

² Khoa Khoa học Thực phẩm và Sức khỏe, Trường Đại học Kiên Giang

*Email: nmthuy@ctu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm mục đích tối ưu hóa các thông số sấy bột xốp để sản xuất bột từ khoai lang ruột trắng (WFSP). Albumin trứng (EA) (5 - 15%), xanthan gum (XG) (0,1 - 0,5%) và nhiệt độ sấy (50 - 70°C) được sử dụng làm các biến độc lập để tối ưu hóa thông qua phương pháp bề mặt đáp ứng với thiết kế Box-Behnken (BBD). Các biến đáp ứng (tốc độ sấy và hàm lượng polyphenol) được đánh giá bằng 18 phương pháp xử lý, bao gồm: 6 điểm trung tâm và 3 lần lặp lại. Phân tích phương sai cho thấy, hệ số xác định cao (> 93%) giữa các giá trị dự đoán và thực nghiệm trên tất cả các mô hình. Điều kiện sấy bột xốp tối ưu là 12,4% EA; 0,31% XG và nhiệt độ sấy 62,4°C. Những điều kiện này đạt được tốc độ sấy cao nhất (2,359 g nước/g chất khô/phút) và hàm lượng polyphenol cao nhất (2,07 mg gallic axit equivalent (GAE)/g). Các thông số tối ưu đã được xác nhận, với sai số giữa giá trị thực nghiệm và dự đoán dưới 5%. Sau 3,5 giờ sấy ở 62,4°C, bột WFSP sấy bột xốp có hàm lượng ẩm thấp (4,38%) và độ hoạt động của nước (0,27). Chỉ số hấp thụ nước, chỉ số hòa tan trong nước, lần lượt là 4,60 g/g; 54,75%.

Từ khóa: Hàm lượng polyphenol, tốc độ sấy, sấy bột xốp, tối ưu hóa, phương pháp bề mặt đáp ứng.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khoai lang là một trong những loại cây lương thực quan trọng sau lúa, lúa mì và bắp [1]. Khoai lang chứa hàm lượng tinh bột cao (58 - 76% căn bản khô) và nhiều thành phần dinh dưỡng quan trọng như: Ascorbic axit, niacin, riboflavin, thiamin và khoáng chất [2]. Trong số đó, giống WFSP nổi bật như một loại cây lương thực thiết yếu, được trồng rộng rãi trên nhiều vùng nông nghiệp khác nhau nhờ khả năng thích nghi thuận lợi, năng suất ổn định và giá trị dinh dưỡng cao. So với khoai lang cam, vàng và tím, WFSP thường có giá trị thương mại thấp hơn do màu sắc kém hấp dẫn và hạn chế ứng dụng trong các sản phẩm chế biến có giá trị cao. Tuy nhiên, WFSP nổi trội với hàm lượng tinh bột cao, cấu trúc phù hợp cho chế biến bột, cùng khả năng ít làm thay đổi màu sắc sản phẩm cuối, giúp dễ dàng ứng dụng trong nhiều loại thực phẩm.

Sấy khô là một kỹ thuật giúp giảm thiểu tác hại của vi sinh vật và kéo dài thời hạn sử dụng của sản phẩm. Bột khoai có thể được tạo ra từ kỹ thuật sấy, trong đó kỹ thuật sấy bột xốp có thể phù hợp với các sản phẩm chứa các thành phần nhạy cảm với nhiệt, nhớt và dính không thể sấy bằng các phương pháp sấy khác. Sấy bột xốp cũng đã được quan tâm nhiều hơn vì tính đơn giản, hiệu quả về chi phí, tốc độ sấy cao và chất lượng sản phẩm được cải thiện do nó mang lại. Quy trình này sử dụng các nồng độ khác nhau của chất tạo bọt và chất ổn định bột, sau đó được sấy ở nhiệt độ 50 - 80°C [3]. Quá trình sấy tạo bọt làm giảm độ ẩm nhanh chóng và hiệu quả, đồng thời giảm tiêu thụ năng lượng và nâng cao hiệu suất sản xuất. Bên cạnh đó, kỹ thuật này tạo ra sản phẩm có chất lượng vượt trội so với sấy truyền thống hoặc sấy phun. Nghiên cứu của Dhara và cs (2023) [4] đã đánh giá phương pháp sấy ảnh hưởng đến cả tốc độ sấy và hàm lượng

chất chống oxy hóa. Theo Loh và cs (2018) [5], nhiệt độ và môi trường trong quá trình sấy khô có thể làm suy giảm các hợp chất phenolic. Ngoài ra, phương pháp bề mặt đáp ứng cũng được sử dụng để tối ưu hóa các thông số công nghệ để bảo toàn hàm lượng polyphenol. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào đánh giá hoặc tối ưu hóa từng mục tiêu riêng lẻ, mà chưa đánh giá đồng thời mối quan hệ giữa tốc độ sấy và bảo toàn polyphenol. Do đó, kết hợp tốc độ sấy và hàm lượng polyphenol trong một mô hình cho phép xác định các điều kiện tối ưu nhằm cân bằng giữa hiệu quả của quá trình sấy và chất có hoạt tính sinh học, điều này ở các nghiên cứu trước chưa đề cập đầy đủ. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm tối ưu hóa nồng độ chất tạo bột, chất ổn định bột và nhiệt độ sấy để chế tạo bột WFSP có hàm lượng hợp chất hoạt tính sinh học cao với tốc độ sấy cao và thời gian ngắn.

2. NGUYÊN LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Nguyên liệu

WFSP được thu hoạch từ vùng trồng tại tỉnh Vĩnh Long. Sau khi thu hoạch, nguyên liệu được làm sạch và gọt vỏ. Hàm lượng ẩm và hàm lượng polyphenol tổng số (Total polyphenol content - TPC) của WFSP được thực hiện phân tích ban đầu, lần lượt là 68,89% và 1,58 mg GAE/g (tính theo cơ sở ướt (fresh weight – FW)).

2.2. Thiết kế thí nghiệm cho quá trình tạo bột và sấy khô

Trong nghiên cứu này, thiết kế BBD kết hợp với phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface methodology - RSM) được áp dụng để tối ưu hóa quy trình. Các yếu tố đầu vào bao gồm: Nồng độ EA, XG và nhiệt độ sấy, với giá trị lần lượt là 5 - 15%, 0,1 - 0,5% và 50 - 70°C. Mức thấp và cao của mỗi yếu tố được mã hóa tương ứng là -1 và +1, với 0 thể hiện giá trị trung tâm (Bảng 1). Tốc độ sấy và TPC được chọn làm các biến phụ thuộc. Phương pháp RSM được thực hiện trong 18 lần thử nghiệm nhằm đánh giá sự tương tác giữa EA, XG và nhiệt độ sấy, với 6 lần diễn ra tại điểm trung tâm.

Bảng 1. Các nhân tố và các mức độ khảo sát

Nhân tố	Ký hiệu	Mức độ khảo sát		
		-1	0	1
Albumin trứng (%)	X ₁	5	10	15
Xanthan gum (%)	X ₂	0,1	0,3	0,5
Nhiệt độ sấy (°C)	X ₃	50	60	70

2.3. Chuẩn bị mẫu và sấy bột xộp

WFSP (200 g) được phối hợp với nước theo tỷ lệ 1: 2 (w/v) và được nghiền trong 2 phút bằng máy xay (Panasonic, Nhật Bản). Sau đó, mẫu được chuyển vào cốc thủy tinh 1.000 mL, đồng thời, EA và XG được bổ sung theo tỷ lệ như đã được bố trí. Hỗn hợp được đánh bông bằng máy trộn (Philips HR3705, 300 W, Trung Quốc) ở tốc độ cao nhất trong 5,8 phút [6]. Sau đó, hỗn hợp bột được dàn đều trên khay thép không gỉ (mẫu 100 g/khay) với độ dày bột là 4 mm. Mẫu được sấy trong tủ sấy đối lưu (Memmert, UN260, Đức) ở các nhiệt độ thay đổi từ 50 - 70°C cho đến khi độ ẩm cuối cùng đạt khoảng 4 - 5% (< 10%) [7]. Các mẫu đã sấy khô được nghiền nhỏ và sàng qua rây 100 mesh để thu được bột mịn dùng cho phân tích tiếp theo.

2.4. Phân tích các tính chất vật lý và hóa học

Hàm lượng ẩm (%) được xác định theo phương pháp của AOAC (2005) [8]. Tốc độ sấy

được tính theo công thức được trình bày trong nghiên cứu của Thuy và cs (2021) [9]. Hoạt độ nước (water activity - a_w) được đo bằng thiết bị AQUALAB 4 TE (Mỹ). Tỷ lệ tái hấp nước (Rehydration ratio - RR) được ghi nhận theo phương pháp của Kadam và cs (2010) [10]. Chỉ số hòa tan trong nước (Water solubility index - WSI) và chỉ số hấp thụ nước (Water absorption index - WAI) được tính toán theo phương pháp của Grabowski và cs (2006) [11]. Độ trắng được ghi nhận theo phương pháp của Wang và cs (2013) [12]. Cấu trúc vi mô của các mẫu bột sấy xộp được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscope - SEM) (Hitachi S - 4800, Nhật Bản). TPC được xác định theo phương pháp Folin - Ciocalteu [13].

2.5. Phương pháp xử lý số liệu

Các thí nghiệm được lặp lại 3 lần và kết quả được trình bày dưới dạng giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn (Santdard deviation - STD). Các

phương trình hồi quy được thiết lập bằng cách phù hợp dữ liệu trung bình thực nghiệm với mô hình đa thức bậc hai sử dụng phần mềm Statgraphics XV.I. Phân tích phương sai được áp dụng để xác định mức ý nghĩa thống kê của các hệ số trong mô hình ở mức xác suất 5%. Các giá trị hệ số xác định (R^2) được sử dụng để đánh giá

khả năng mô tả chính xác các biến phản hồi của mô hình.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của albumin trứng, xanthan gum và nhiệt độ sấy đến tốc độ sấy và TPC của bột WFSP sấy bột xốp

Bảng 2. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho tốc độ sấy và TPC

Nguồn	df	Tốc độ sấy			TPC		
		Tổng bình phương	Tỷ số F	Giá trị P	Tổng bình phương	Tỷ số F	Giá trị P
X_1 : EA	1	1,1619	131,56	0,0000*	0,2446	38,06	0,0000*
X_2 : XG	1	0,0468	5,30	0,0264*	0,0566	8,82	0,0050*
X_3 : Nhiệt độ sấy	1	4,1728	472,48	0,0000*	0,0968	15,07	0,0004*
X_1X_1	1	0,1424	16,12	0,0002*	0,4954	77,10	0,0000*
X_1X_2	1	0,0015	0,17	0,6785	0,0359	5,60	0,0228*
X_1X_3	1	0,0843	9,54	0,0036*	0,0159	2,48	0,1233
X_2X_2	1	0,1457	16,50	0,0002*	0,2228	34,68	0,0000*
X_2X_3	1	0,0083	0,94	0,3373	0,0001	0,02	0,8944
X_3X_3	1	0,2566	29,05	0,0000*	5,9853	931,54	0,0000*
Sự thiếu phù hợp (Lack-of-fit)	3	0,0571	2,16	0,1080 ^{ns}	0,0505	2,62	0,0635 ^{ns}
Sai số thuần	41	0,3621			0,2634		
Total (corr.)	53	6,55724			8,24525		
R^2		93,60%			96,19%		
R^2 (adj. for d.f.)		92,30%			95,41%		
Sai số chuẩn		0,093			0,08		

*Ghi chú: *: Có ý nghĩa thống kê ở mức 5%, ns: Không có ý nghĩa thống kê ở mức 5%, EA (albumin trứng) và XG (xanthan gum).*

Bảng 2 cho thấy, các mô hình xây dựng cho cả tốc độ sấy và TPC đều có ý nghĩa thống kê cao ($P < 0,05$) với hệ số xác định tương quan R^2 lần lượt là 93,60% và 96,19%, cùng với R^2 hiệu chỉnh cao, chứng tỏ mô hình giải thích tốt sự biến thiên của dữ liệu thực nghiệm. Đồng thời, kiểm định sự thiếu phù hợp (Lack-of-fit) không có ý nghĩa [$P > 0,05 = 0,1080$ (tốc độ sấy) và 0,0635 (TPC)], đã khẳng định sự phù hợp của mô hình. Đối với tốc độ sấy, nhiệt độ sấy (X_3) là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất ($F = 472,48$), tiếp theo là EA (X_1) và XG (X_2). Trong khi đó, đối với TPC thì EA (X_1) thể hiện ảnh hưởng lớn nhất ($F = 38,06$), sau đó là nhiệt độ sấy (X_3) và XG (X_2). Các hệ số

bậc hai (X_1X_1 , X_2X_2 , X_3X_3) đều có thể biểu hiện sự tác động có ý nghĩa thống kê, cho thấy mối quan hệ phi tuyến giữa các biến độc lập và đáp ứng, đồng thời có sự tồn tại của điểm tối ưu. Ngoài ra, một số tương tác giữa các yếu tố cũng có ý nghĩa, cụ thể là X_1X_3 đối với tốc độ sấy và X_1X_2 đối với TPC, trong khi các tương tác khác không có ý nghĩa thống kê ($P > 0,05$), cho thấy mức độ ảnh hưởng khác nhau giữa các yếu tố.

Các hệ số không có ý nghĩa thống kê ($P > 0,05$), bao gồm các tương tác X_1X_2 và X_2X_3 đối với tốc độ sấy, cũng như X_1X_3 và X_2X_3 đối với TPC, đã được loại bỏ khỏi mô hình nhằm nâng cao độ phù hợp và tính chính xác. Trên cơ sở đó,

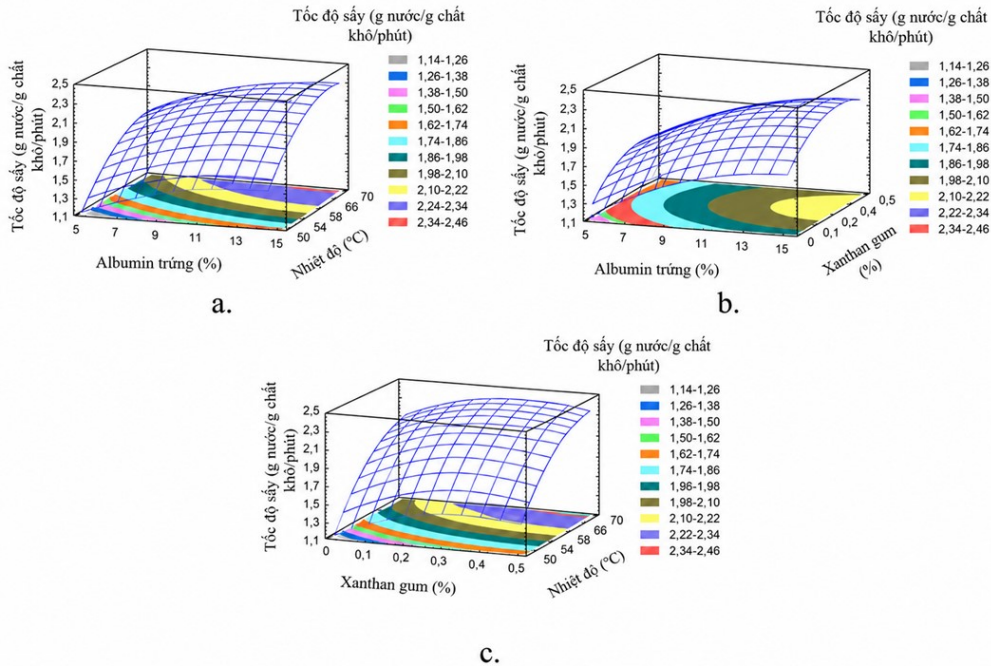
các mô hình hồi quy rút gọn được thiết lập để dự đoán tốc độ sấy (Y_1 , Phương trình 1) và TPC (Y_2 , Phương trình 2) được thể hiện như sau:

$$Y_1 = -7,518 + 0,228X_1 + 1,803X_2 + 0,226X_3 - 0,004X_1^2 + 0,002X_1X_3 - 2,637X_2^2 - 0,001X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = -23,666 + 0,159X_1 + 1,167X_2 + 0,818X_3 - 0,008X_1^2 + 0,055X_1X_2 - 3,262X_2^2 - 0,007X_3^2 \quad (2)$$

Trong đó: Y_1 là tốc độ sấy (g nước/g chất khô/phút), Y_2 là TPC (mg GAE/g), X_1 là nồng độ EA (%), X_2 là nồng độ XG (%) và X_3 là nhiệt độ sấy ($^{\circ}\text{C}$).

3.1.1. Tốc độ sấy



Hình 1. Biểu đồ bề mặt đáp ứng và đường đồng mức cho tốc độ sấy; (a) XG ở mức 0,3%, (b) nhiệt độ sấy ở 60 $^{\circ}\text{C}$ và (c) EA ở mức 10%

Hình 1 cho thấy, nồng độ của chất tạo bột (EA), chất ổn định bột (XG) và nhiệt độ sấy đều ảnh hưởng đến tốc độ sấy. Nhìn chung, tốc độ sấy dao động trong khoảng từ 1,3 - 2,62 g nước/g chất khô/phút và các bề mặt có dạng cong, điều này cho thấy mối quan hệ phi tuyến giữa các biến phù hợp với mô hình hồi quy bậc hai đã xây dựng. Ở hình 1a, khi khảo sát đồng thời ảnh hưởng của EA (5 - 15%) và nhiệt độ sấy (50 - 70 $^{\circ}\text{C}$), tốc độ sấy tăng rõ rệt từ khoảng 1,3 - 1,5 lên đến 2,5 - 2,62 g nước/g chất khô/phút khi cả hai yếu tố cùng tăng. Ở vùng nồng độ EA được sử dụng khoảng 5 - 7% và nhiệt độ sấy 50 - 53 $^{\circ}\text{C}$, tốc độ sấy có giá trị thấp nhất (khoảng 1,3 - 1,5 g nước/g chất khô/phút). Ngược lại, tại vùng có nồng độ EA sử dụng (> 11%) và nhiệt độ sấy (> 65 $^{\circ}\text{C}$) cao hơn thì tốc độ sấy đạt giá trị cực đại (khoảng 2,5 - 2,62 g nước/g chất khô/phút). Điều này cho thấy, khi nhiệt độ sấy tương quan thuận

với tốc độ sấy, nhiệt độ sấy tăng thì tốc độ sấy càng tăng. Hiện tượng này xảy ra do tốc độ khuếch tán và bay hơi ẩm trên bề mặt sản phẩm tăng lên do nhiệt độ cao. Nhiệt độ sấy càng cao làm khả năng thoát ẩm của nguyên liệu càng nhanh do thúc đẩy sự di chuyển của các phân tử nước trong thực phẩm, dẫn đến thời gian sấy được rút ngắn khi tăng nhiệt độ sấy. Kết quả nghiên cứu của Dehghanian và cs (2019) [14] cho thấy, khi nhiệt độ sấy tăng từ 50 - 70 $^{\circ}\text{C}$ thì tốc độ sấy tăng 20,23%. Nghiên cứu của Sritongtae và cs (2017) [15] cũng cho rằng, ở cùng một tỷ lệ độ ẩm, tốc độ sấy ở 70 $^{\circ}\text{C}$ của cả dịch thủy phân đậu gạo được nảy mầm và không mầm đều cao hơn ở 60 $^{\circ}\text{C}$.

Ở hình 1b, khi xét ảnh hưởng của EA (5 - 15%) và XG (0 - 0,5%) tại nhiệt độ sấy cố định ở 60 $^{\circ}\text{C}$, tốc độ sấy tăng từ khoảng 1,54 lên 2,38 g nước/g chất khô/phút khi tăng EA và XG. Chất

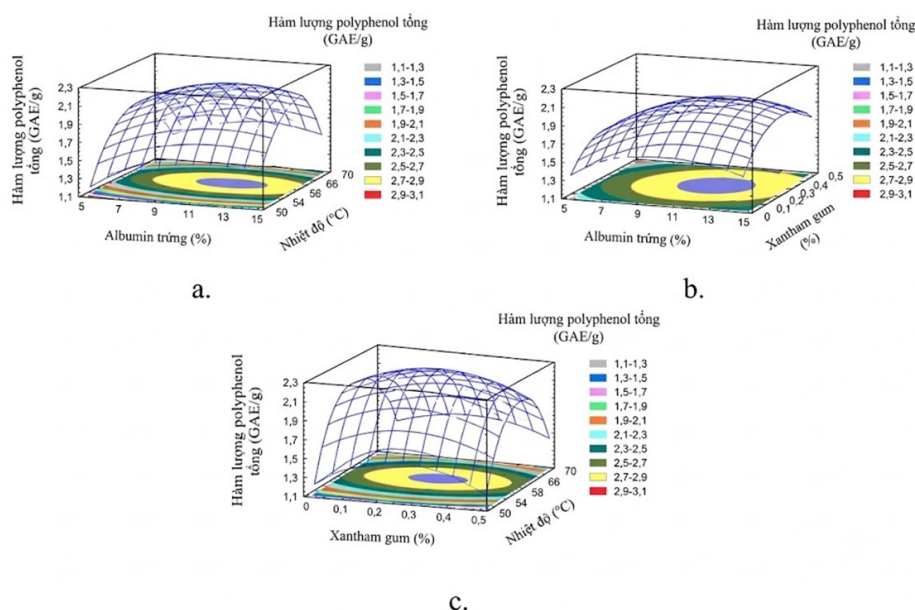
tạo bọt (EA) tạo cấu trúc xốp với nhiều lỗ rỗng, làm tăng thể tích và diện tích bề mặt tiếp xúc của vật liệu, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình truyền nhiệt và khuếch tán ẩm, làm tăng tốc độ sấy, dẫn đến rút ngắn thời gian sấy. Kết quả nghiên cứu của Susanti và cs (2021) [16] và Rajkumar và Kailappan (2006) [17] cũng xác định xu hướng tương tự của EA khi sử dụng phương pháp sấy bọt xốp cho chiết xuất của lúa miến đỏ và xoài.

Ở hình 1c, khi khảo sát XG (0 - 0,5%) và nhiệt độ sấy (50 - 70°C), tốc độ sấy tăng mạnh theo nhiệt độ, từ khoảng 1,3 - 1,5 g nước/g chất khô/phút (50°C) lên khoảng 2,1 - 2,5 g nước/g chất khô/phút (70°C). Tuy nhiên, khi XG sử dụng cao hơn khoảng 0,3% thì tốc độ sấy có xu hướng cân bằng hoặc giảm nhẹ, đặc biệt rõ ở vùng nhiệt độ cao. XG đóng vai trò như một chất ổn định, giúp hạn chế sự phá vỡ và duy trì cấu trúc bọt, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình di chuyển của nước tự do vào môi trường không khí khô và góp phần làm tăng tốc độ sấy. Tuy nhiên, khi nồng độ XG tăng cao, tốc độ sấy có xu hướng cân

bằng hoặc giảm là do sự gia tăng độ nhớt của hệ bọt, làm cản trở quá trình khuếch tán ẩm. Ngoài ra, XG có khả năng hình thành một lớp màng bao phủ trên bề mặt vật liệu. Khi ở nồng độ sử dụng cao, lớp màng này trở nên dày đặc hơn, hạn chế sự bay hơi nước và làm tăng trở lực đối với quá trình di chuyển ẩm, từ đó làm chậm quá trình sấy, dẫn đến thời gian sấy kéo dài. Việc tối ưu hóa các đáp ứng được thực hiện dựa trên dữ liệu thực nghiệm bằng phần mềm Statgraphics. Kết quả cho thấy, tốc độ sấy đạt giá trị cực đại là 2,52 g nước/g chất khô/phút ở điều kiện tối ưu gồm nồng độ EA và XG là 13,27% và 0,34% ở nhiệt độ sấy 70°C.

3.1.2. Hàm lượng polyphenol tổng số (TPC)

Các biểu đồ bề mặt đáp ứng và đường đồng mức (Hình 2) thể hiện ảnh hưởng của nồng độ EA, XG và nhiệt độ sấy đến TPC. Nhìn chung, TPC dao động trong khoảng 1,0 - 2,2 mg GAE/g và các bề mặt có dạng cong (parabol úp ngược) rõ rệt, cho thấy mối quan hệ phi tuyến tính và sự tồn tại của vùng tối ưu.



Hình 2. Biểu đồ bề mặt đáp ứng và đường đồng mức cho TPC; (a) XG ở mức 0,3%, (b) nhiệt độ sấy ở 60°C và (c) EA ở mức 10%

Khi xem xét ảnh hưởng của EA (5 - 15%) và nhiệt độ sấy (50 - 70°C) tại XG cố định (0,3%) (Hình 2a), TPC duy trì ở mức cao (khoảng 2,0 - 2,2 mg GAE/g) tại vùng EA 10 - 13% và nhiệt độ sấy khoảng 58 - 62°C, so với mức nồng độ EA và nhiệt độ thấp ban đầu (1,0 - 1,2 mg GAE/g). Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng nhiệt độ lên 65 - 70°C,

TPC có xu hướng giảm (còn khoảng 1,4 - 1,8 mg GAE/g), cho thấy sự phân hủy nhiệt của các hợp chất phenolic khi ở nhiệt độ cao. Đồng thời, khi EA vượt quá 13%, TPC cũng giảm nhẹ, có thể do hiệu ứng pha loãng hoặc biến tính protein ảnh hưởng đến khả năng bảo vệ hợp chất phenolic trong ma trận bọt. Nghiên cứu của Shaari và cs

(2018) [18] cho rằng, việc tăng nồng độ EA giúp nâng cao khả năng lưu giữ các hợp chất phenolic trong ma trận. Albumin trứng (khi được sử dụng làm chất tạo bọt) thể hiện khả năng duy trì hoạt tính sinh học. EA là protein có tính hoạt động bề mặt cao, giảm sức căng bề mặt, tạo bọt khí và phân bố đều. Sau khi tiến hành đánh bọt, EA tạo mạng lưới protein bao quanh bọt khí và hình thành cấu trúc xốp ổn định hơn, tạo phức với phenolic. Do EA thúc đẩy quá trình tạo bọt, làm tăng diện tích bề mặt và rút ngắn thời gian sấy, từ đó hạn chế sự phân hủy phenolic do nhiệt độ và oxy không khí. Tuy nhiên, ở nồng độ quá cao, EA có thể làm giảm hàm lượng phenolic, như báo cáo của Vasudevan và cs (2020) [19], do hiệu ứng pha loãng. Do đó, nồng độ EA cần được tối ưu trong một khoảng thích hợp, đủ để hình thành cấu trúc bọt ổn định nhưng không quá cao để tránh hiệu ứng pha loãng.

Ở hình 2b, với nhiệt độ cố định (60°C), TPC duy trì ở mức cao khi EA tăng từ 5% đến khoảng 11 - 13%, đạt cực đại khoảng 2,0 - 2,2 mg GAE/g, sau đó giảm nhẹ ở mức EA cao hơn. Ngược lại, khi XG tăng cao hơn 0,3% thì TPC có xu hướng giảm (khoảng 1,6 - 1,8 mg GAE/g). Điều này cho thấy, XG ảnh hưởng đến TPC theo 2 xu hướng trái chiều tùy theo nồng độ. Ở mức thấp, XG đóng vai trò như một polysaccharide tự nhiên có khả năng ổn định cấu trúc bọt, không khí nóng dễ dàng len lỏi để lấy ẩm khỏi hệ bọt, làm rút ngắn thời gian tiếp xúc của TPC với oxy không khí. Mặt khác, XG còn giúp bao bọc các hợp chất hoạt tính sinh học, từ đó góp phần hạn chế sự suy giảm TPC trong quá trình sấy. Cấu trúc bọt được ổn định đã cải thiện tốc độ truyền nhiệt, giúp bọt khô nhanh hơn và hiệu quả hơn, đồng thời hạn chế sự mất mát hàm lượng polyphenol. Tuy nhiên, khi nồng độ XG tăng cao, độ nhớt của hệ tăng lên, làm cản trở quá trình khuếch tán ẩm và truyền nhiệt, đồng thời có thể hình thành lớp màng trên bề mặt vật liệu, hạn chế sự giải phóng hoặc chiết xuất các hợp chất phenolic. Ngoài ra, hàm lượng XG cao còn gây hiệu ứng pha loãng, dẫn đến sự giảm TPC trong sản phẩm. Do đó, nồng độ XG cần được kiểm soát ở mức thích hợp để vừa đảm bảo ổn định cấu trúc bọt vừa hạn chế những tác động bất lợi đến TPC. Sự kết hợp của hai tác nhân EA và XG tạo hiệu ứng bảo toàn TPC được cải thiện rõ rệt.

Ở hình 2c, khi EA cố định ở mức 10%, nồng độ XG và nhiệt độ sấy thay đổi, TPC đạt giá trị cao nhất ($\sim 2,0 - 2,2$ mg GAE/g) ở vùng nhiệt độ và XG trung bình khoảng $58 - 62^{\circ}\text{C}$ và 0,2 - 0,3%, tương ứng. Khi nhiệt độ tăng cao hơn hoặc nồng độ XG sử dụng nhiều hơn, TPC có xu hướng giảm xuống còn khoảng 1,3 - 1,7 mg GAE/g. Điều này tiếp tục khẳng định rằng, nhiệt độ cao gây phân hủy polyphenol, trong khi XG ở nồng độ cao làm cản trở quá trình bảo toàn hoặc giải phóng các hợp chất này. Garau và cs (2007) [20] đã báo cáo sự suy giảm hàm lượng phenolic khi sấy ở 50°C , nguyên nhân chủ yếu là do thời gian sấy kéo dài, làm gia tăng sự phân hủy các hợp chất phenolic. Đồng thời, tác động phá hủy của quá trình sấy đối với các hợp chất này có xu hướng tăng theo thời gian xử lý nhiệt. Ngược lại, việc tăng nhiệt độ sấy có thể làm duy trì hoặc làm tăng TPC cao trong một số trường hợp, do quá trình xử lý nhiệt làm phá vỡ cấu trúc tế bào, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho việc giải phóng và chiết xuất các hợp chất phenolic. Bên cạnh đó, kỹ thuật sấy bọt xốp giúp gia tăng đáng kể tốc độ sấy, rút ngắn thời gian xử lý và hạn chế quá trình oxy hóa cũng như tác động bất lợi của nhiệt lên các hợp chất phenolic. Tuy nhiên, khi nhiệt độ sấy tăng quá cao (từ 60 lên 70°C), sự suy giảm của các hợp chất phenolic lại gia tăng do tính nhạy cảm nhiệt của các hợp chất này, dẫn đến phân hủy mạnh hơn. Nghiên cứu của Sritongtae và cs (2017) [15] đã báo cáo rằng, sấy ở 60°C giúp duy trì đáng kể các hợp chất có hoạt tính sinh học và hoạt tính chống oxy hóa tốt hơn so với 70°C . Trong khi đó, Jakkranuhwat và Kunchansombat (2021) [21] đã báo cáo rằng, quá trình sấy bọt xốp khoai lang tím ở nhiệt độ 70°C vẫn duy trì tốt các hợp chất có hoạt tính sinh học.

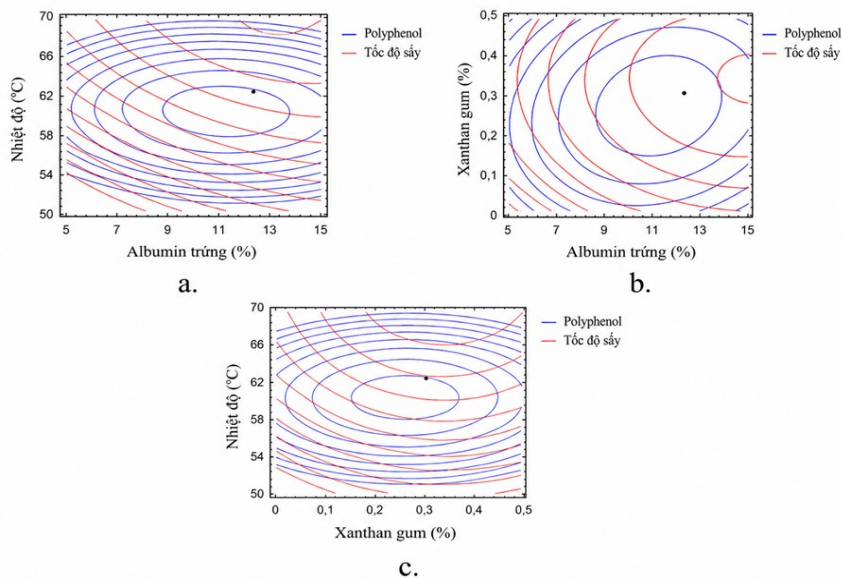
Kết quả tối ưu hóa cho thấy, TPC đạt giá trị cực đại 2,11 mg GAE/g tại điều kiện gồm nồng độ EA 11,20%, XG 0,27% và nhiệt độ sấy 60°C . Ở điều kiện này, sự kết hợp giữa mức EA và XG trung bình giúp hình thành cấu trúc bọt ổn định, đồng thời hạn chế hiện tượng tăng độ nhớt quá mức, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình truyền nhiệt và khuếch tán ẩm. Bên cạnh đó, nhiệt độ sấy 60°C được xem là nhiệt độ phù hợp, vừa đủ để rút ngắn thời gian sấy, hạn chế quá trình oxy hóa do thời gian sấy kéo dài, vừa không quá cao để gây phân hủy nhiệt các hợp chất phenolic.

3.1.3. Tối ưu hóa đồng thời

Các biến đáp ứng (tốc độ sấy và TPC) ban đầu được phân tích và tối ưu hóa riêng biệt, do đó kết quả cho thấy, mỗi biến có điều kiện tối ưu khác nhau do chịu ảnh hưởng khác nhau từ các biến độc lập (EA, XG và nhiệt độ sấy). Tuy nhiên, trong thực tế, việc tối ưu riêng lẻ từng biến không đảm bảo đạt được hiệu quả tổng thể của quá trình. Do đó, cần tiến hành tối ưu hóa đồng thời các đáp ứng nhằm xác định điều kiện tối ưu chung. Vì vậy, phương pháp hàm mong muốn (Desirability function) kết hợp với thiết kế thực

thực nghiệm đã được sử dụng để tối ưu hóa đồng thời tốc độ sấy và TPC.

Biểu đồ chồng lấp (overlay plot) thể hiện vùng tối ưu chung của các yếu tố được trình bày trong hình 3, trong đó điểm tối ưu được ký hiệu bằng dấu (*). Kết quả từ công cụ Optimize Response (sử dụng phần mềm Statgraphics Centurion XV.I) cho thấy, điều kiện tối ưu đạt được tại nồng độ EA 12,4%, XG 0,31% và nhiệt độ sấy 62,4°C. Ở điều kiện này, tốc độ sấy đạt 2,359 g nước/g chất khô/phút và TPC duy trì ở mức cao 2,07 mg GAE/g.



Hình 3. Biểu đồ chồng lấp thể hiện ảnh hưởng của điều kiện sấy bột xốp đến tốc độ sấy và TPC của bột WFSP; (a) XG ở mức 0,3%, (b) nhiệt độ sấy 60°C và (c) EA ở mức 10%; điểm tối ưu được ký hiệu bằng dấu (*)

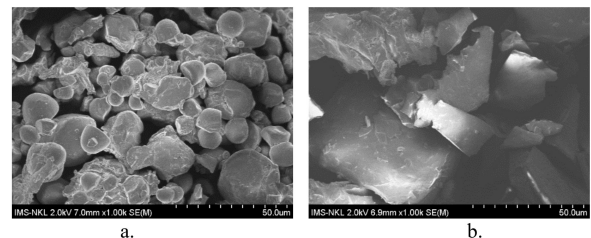
Để đánh giá độ tin cậy của mô hình, thí nghiệm kiểm chứng đã được thực hiện ở điều kiện tối ưu của EA, XG và nhiệt độ sấy lần lượt là 12,4%, 0,31% và 62,4°C. Kết quả cho thấy sự phù hợp tốt giữa giá trị dự đoán và thực nghiệm, với sai số nhỏ hơn 5%, cụ thể là 3,65% ($2,273 \pm 0,146$) đối với tốc độ sấy và 4,35% ($1,98 \pm 0,05$) đối với TPC.

3.2. Cấu trúc vi mô và đặc tính lý hóa học của bột WFSP sấy bột xốp

3.2.1. Đặc điểm vi cấu trúc

Đặc điểm hình thái của bột WFSP sấy bột xốp ở điều kiện tối ưu được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) và so sánh với phương pháp sấy đối lưu (không tạo bột) ở cùng độ phóng đại x 1.000 (Hình 4). Ở mẫu sấy đối lưu (Hình 4a), các hạt bột có kích thước tương đối nhỏ và

phân bố khá đồng đều, chủ yếu có dạng đa giác hoặc bầu dục. Bề mặt hạt tương đối nhẵn nhưng có hiện tượng kết tụ và một số vết nứt nhỏ. Cấu trúc này hình thành do quá trình mất nước chậm, dẫn đến co rút tế bào và làm vật liệu trở nên đặc hơn, ít lỗ rỗng.



Hình 4. Cấu trúc vi mô của bột WFSP được sấy bằng phương pháp sấy đối lưu (a) và sấy bột xốp (b) ở độ phóng đại x 1.000

Ngược lại, mẫu bột WFSP sấy bột xốp (Hình 4b) được quan sát thấy có cấu trúc dạng mảnh,

vảy lớn với hình dạng không đồng nhất và bề mặt thô ráp hơn. Đặc biệt, có thể quan sát thấy các khoảng rỗng và khe hở lớn, cho thấy vật liệu có độ xốp cao. Cấu trúc này được hình thành do sự tạo bọt ban đầu và quá trình thoát ẩm nhanh chóng trong quá trình sấy bột xốp, làm hình thành mạng lưới lỗ rỗng liên thông. Sự hiện diện của EA và XG giúp tạo bọt và ổn định hệ bọt, duy trì cấu trúc xốp trong suốt quá trình sấy. Những đặc điểm cấu trúc xốp và hình thái không đồng nhất này cũng đã được phát hiện trong các nghiên cứu trước đây trên các sản phẩm sấy bột xốp.

3.2.2. Đặc tính lý hóa học



Quá trình sấy bột xốp diễn ra trong thời gian ngắn (3,5 giờ), giúp sản phẩm duy trì màu trắng sáng đặc trưng, với giá trị độ trắng là $91,01 \pm 0,16$. Bên cạnh đó, bột thu được có độ ẩm và hoạt độ nước (a_w) thấp lần lượt là $4,38 \pm 0,21\%$ và $0,27$, cho thấy khả năng bảo quản tốt ở nhiệt độ thường. Bên cạnh đó, chỉ số hấp thụ nước (WAI) và chỉ số hòa tan trong nước (WSI) lần lượt là $4,60 \pm 0,02$ g/g; $54,75 \pm 0,37\%$, cho thấy bột có khả năng hút nước và hòa tan tốt. Những đặc tính này có liên quan đến cấu trúc xốp của sản phẩm bột WFSP thu được từ phương pháp sấy bột xốp (Hình 5), giúp tăng diện tích bề mặt và khả năng tương tác với nước.



Hình 5. Bột WFSP sấy bột xốp

4. KẾT LUẬN

Thiết kế thí nghiệm thống kê BBD kết hợp với RSM đã được áp dụng thành công để mô hình hóa và tối ưu hóa các thông số của quá trình sấy bột xốp WFSP. Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc bổ sung EA và XG, cũng như nhiệt độ sấy, đã ảnh hưởng rõ rệt đến tốc độ sấy và nồng độ polyphenol trong bột WFSP thu được bằng phương pháp sấy bột xốp. Để sản xuất bột WFSP với tốc độ sấy cao và hàm lượng polyphenol cao trong sản phẩm thành phẩm với EA (12,4%), XG (0,31%) và nhiệt độ sấy ($62,4^{\circ}\text{C}$). Bột WFSP giữ được màu trắng tự nhiên với các đặc tính vật lý - hóa học tốt, có thể được ứng dụng tiếp trong nhiều công thức chế biến thực phẩm dinh dưỡng và có hoạt tính chống oxy hóa cao, góp phần tăng cường hệ miễn dịch và cải thiện chất lượng cuộc sống cộng đồng khi bổ sung thường xuyên vào khẩu phần ăn hàng ngày. Khả năng mở rộng và thương mại hóa cao, công nghệ sử dụng sấy bột xốp khoai lang có thể ứng dụng ở các quy mô doanh nghiệp vừa và nhỏ, tận dụng thiết bị sẵn có và chuyển giao công nghệ thuận lợi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hsiao-Feng, L., Kuan-Hung, L., Yung-Chung, L., Kuan-Yee, C., Yen-Fu, C. & Shih-Ying, H. (2007). Improving breeding efficiency for quality and yield of sweet potato. *Botanical Studies*, 48, 283 - 292.
- [2]. Ambarsari, I., Sarjana, S. & Choliq, A. (2009). Rekomendasi dalam penetapan standar mutu tepung ubi jalar. *Jurnal standardisasi*, 11(3), 212 - 219.
- [3]. Febrianto A., Kumalaningsih S. & Aswari A. W. (2012). Process engineering of drying milk powder with foam mat drying method. *A Study on the Effect of the Concentration and Types of Filler*, 2(4): 3588 - 3592.
- [4]. Dhara, J., kumar Saha, S., Saha, M. & Chakraborty, R. (2023). Study on drying kinetics, antioxidant activity, total bioactive compounds, physicochemical properties and microstructural characteristics of dehydrated star fruits (*Averrhoa carambola*) by different drying methods. *Sustainable Food Technology*, 1(4), 590 - 602.

- [5]. Loh, Z. H., Oh, H. K. F. & Lim, Y. Y. (2018). Relationship between polyphenol oxidase activity and phenolics degradation on ambient air - drying of herbal plants. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(7), e13672.
- [6]. Thuy N. M., Tien V. Q., Tai N. V., Minh V. Q. (2022). Effect of foaming conditions on foam properties and drying behavior of powder from magenta (*Peristrophe roxburghiana*) leaves extracts. *Horticulturae*, 8(6), 546.
- [7]. Jakkranuhwat N. & Kunchansombat P. (2021). Effect of foam-mat drying conditions on antioxidant activity, total phenolic compound, anthocyanin content and color of purple-fleshed sweet potato powder. *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, 20(2), e2021045.
- [8]. AOAC (2005). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (18th ed.). Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- [9]. Thuy, N. M., Minh, V. Q., Ben, T. C., Ha, H. T. N. & Tai, N. V. (2021). Impact of different thin layer drying temperatures on the drying time and quality of butterfly pea flowers. *Food Research*, 5(6), 197 - 203.
- [10]. Kadam, D. M., Wilson, R. A. & Kaur, S. (2010). Determination of biochemical properties of foam-mat dried mango powder. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(8), 1626 - 1632.
- [11]. Grabowski, J. A., Truong, V. D. & Daubert, C. R. (2006). Spray - drying of amylase hydrolyzed sweetpotato puree and physicochemical properties of powder. *Journal of Food science*, 71(5), E209 - E217.
- [12]. Wang, C., Dong, Y., Cheng, H., He, Y., Ye, J. & Zhou, H. (2013). Physicochemical properties of lacquer berries and decolorization of lacquer wax by physical adsorption and UV irradiation. *Advances in Biological Chemistry*, 3, 329 - 337.
- [13]. Teixeira, B., Marques, A., Ramos, C., Serrano, C., Matos, O., Neng, N. R. ... & Nunes, M. L. (2013). Chemical composition and bioactivity of different oregano extracts and essential oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(11), 2707 - 2714.
- [14]. Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B. & Ghaffari, H. (2019). Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 135, 30 - 43.
- [15]. Sritongtae, B., Morgan, M. R. & Duangmal, K. (2017). Drying kinetics, physico - chemical properties, antioxidant activity and phenolic composition of foam - mat dried germinated rice bean hydrolysate. *International Journal of Food science & Technology*, 52(7), 1710 - 1721.
- [16]. Susanti, D. Y., Sediawan, W. B., Fahrurrozi, M. & Hidayat, M. (2021). Foam-mat drying in the encapsulation of red sorghum extract: Effects of xanthan gum addition on foam properties and drying kinetics. *Journal of the Saudi society of Agricultural Sciences*, 20(4), 270 - 279.
- [17]. Rajkumar, P. & Kailappan, R. (2006). Optimizing the process parameters for foam mat drying of totapuri mango pulp. *Madras Agricultural Journal*, 93(jan-jun), 86 - 98.
- [18]. Shaari, N. A., Sulaiman, R., Rahman, R. A. & Bakar, J. (2018). Production of pineapple fruit (*Ananas comosus*) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen concentration. *Journal of Food processing and Preservation*, 42(2), e13467.
- [19]. Vasudevan, N., Sulaiman, R., Chong, G. H., Adzahan, N. A. & Shaari, N. A. (2020). Development of foam mat dried soursop powder using Arabic gum and fish gelatin as foaming agent. *Food Research*, 4(1), 237 - 243.
- [20]. Garau, M. C., Simal, S., Rossello, C. & Femenia, A. (2007). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. Canoneta) by-products. *Food chemistry*, 104(3), 1014 - 1024.
- [21]. Jakkranuhwat, N. & Kunchansombat, P. (2021). Effect of foam-mat drying conditions on antioxidant activity, total phenolic compound, anthocyanin content and color of purple-fleshed sweet potato powder. *Nat. Sci*, 20(2), e2021045.

STUDY ON THE EFFECTS OF FOAM-MAT DRYING CONDITIONS ON DRYING RATE AND POLYPHENOL CONTENT IN WHITE-FRESH SWEET POTATO POWDER USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

**Nguyen Chi Dung¹, Nguyen Minh Thuy¹, Tran Ngoc Giau¹,
Hong Van Hao¹, Pham Thi Kim Quyen^{1,2}**

¹Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University

²Faculty of Food Science and Health, Kien Giang University

Abstract

The study aimed to optimize foam-mat drying parameters for producing white-fleshed sweet potato (WFSP) powder. Egg albumin (EA) (5 - 15%), xanthan gum (XG) (0.1 - 0.5%) and drying temperature (50 - 70°C) were used as independent variables, optimized via the response surface methodology with a Box-Behnken design (BBD). Response variables (drying rate and polyphenol content) were evaluated across 18 treatments, including 6 center points and three replicates. Analysis of variance revealed high coefficients of determination (> 93%) between predicted and experimental values across all models. The optimal foam-mat drying conditions were 12.4% EA, 0.31% XG and a drying temperature of 62.4°C. These conditions achieved the highest drying rate (2.359 g water/g dry matter/min) and polyphenol content (2.07 mg GAE/g). The optimal parameters were validated, with experimental values deviating from predictions by less than 5%. After 3.5 hours of drying at 62.4°C, the foam-mat dried WFSP powder exhibited low moisture content (4.38%) and water activity (0.27). Water absorption index and water solubility index were 4.60 g/g and 54.75%, respectively.

Keywords: *Polyphenol content, drying rate, foam drying, optimization, response surface method.*

Ngày nhận bài: 24/02/2026

Ngày chuyển phản biện: 3/3/2026

Ngày thông qua phản biện: 19/3/2026

Ngày duyệt đăng: 13/4/2026