

Ứng dụng công nghệ sấy bơm nhiệt trong sản xuất bột xoài bổ sung lợi khuẩn: Đánh giá chất lượng và khả năng sống sót của probiotics

Trần Thị Yên Nhi^{1,*}, Vũ Đức Ngọc¹, Phạm Bình An¹, Phạm Trí Nhật², Nguyễn Hữu Nghĩa¹, Nguyễn Ngọc Quý³, Nguyễn Minh Tiến³

¹Viện Ứng dụng Công nghệ và Phát triển bền vững, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh,

²Viện Sau đại học Công nghệ Nông nghiệp Quốc tế, Đại học Quốc gia Seoul, Hàn Quốc

³Khoa Dược, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: ttynhicntp2024@gmail.com

Tóm tắt

Nghiên cứu đánh giá các chỉ số AIC và BIC trong mô hình hóa động học thoát ẩm của purée xoài bổ sung *Lactobacillus casei* trong quá trình sấy bơm nhiệt có tạo bọt. Thí nghiệm được thực hiện ở bốn mức nhiệt (30-45) °C, theo dõi sự giảm ẩm từ 70,59 % xuống 2,50 % với thời gian sấy tương ứng 390-290 phút để thiết lập phương trình MR và xác định mật độ lợi khuẩn sau sấy. Dữ liệu được mô phỏng bằng các mô hình sấy phổ biến và đánh giá thông qua SSE, AIC và BIC nhằm lựa chọn mô hình tối ưu. Kết quả cho thấy mô hình Page cho độ phù hợp tốt nhất ở tất cả các nhiệt độ, trong khi sấy ở 35 °C duy trì mật độ *L. casei* trên 10^6 CFU/g. Sản phẩm cuối cùng đáp ứng đầy đủ các chỉ tiêu TCVN về dinh dưỡng và vi sinh, với mật độ lợi khuẩn đạt $2,4 \times 10^6$ CFU/g. Do đó, kỹ thuật sấy bơm nhiệt kết hợp tạo bọt cho thấy tiềm năng cao trong sản xuất bột xoài lợi khuẩn chất lượng.

Nhận 25/08/2025

Được duyệt 21/11/2025

Công bố 30/11/2025

Từ khóa

AIC, BIC, bột xoài, sấy bơm nhiệt, lợi khuẩn

© 2025 Journal of Science and Technology - NTTU

1. Mở đầu

Quá trình sấy được biết đến và ứng dụng rộng rãi, kéo theo các nghiên cứu tập trung nhiều về quá trình biến đổi chất lượng vật liệu sấy mà chưa tập trung nhiều vào cơ chế thay đổi và thông số đánh giá chất lượng mô hình sấy [1]. Hơn nữa, việc chuẩn bị bột xộp và đánh giá thoát ẩm trong công nghệ sấy bơm nhiệt chưa được thực hiện [2]. Một số công trình trước đây về sấy bột xộp xoài chủ yếu khảo sát tính chất lý hóa, mà chưa phân tích chuyên sâu tính phù hợp mô hình bằng các chỉ số Tiêu chí thông tin Akaike (AIC) và tiêu chí Thông tin Bayes (BIC), cũng như chưa đánh giá động học thoát ẩm trong điều kiện sấy bơm nhiệt có tạo bọt. Trong phân tích thống kê mô hình động học thoát ẩm như SSE hay R^2 , việc đánh giá chỉ số AIC và BIC là cần thiết để xác định mô hình mô tả tối ưu và giảm sai số. Hai chỉ số này giúp so sánh mức độ phù hợp của mô hình dưới các điều kiện sấy khác nhau, từ đó nâng cao độ tin cậy của quá trình mô phỏng [3]. Đối với vật liệu trái cây giàu đường và chất khô hòa tan như xoài, AIC/BIC có ý nghĩa thực tiễn đặc biệt, vì cơ chế khuếch tán ẩm phức tạp dễ làm mô hình hóa sai lệch nếu không có tiêu chí lựa chọn thích hợp [4]. Ngoài ra, mỗi mô hình có số lượng biến và mức độ phức tạp khác nhau, vì vậy, hai giá trị này cần được tập trung đánh giá để sàng lọc các biến nhiễu [5].

Nghiên cứu được thực hiện trên vật liệu sấy là purée xoài. Xoài (*Mangifera indica* L.) là loại quả nhiệt đới giàu dinh dưỡng và phổ biến tại Việt Nam [6]. Tuy nhiên, sản phẩm tươi dễ hư hỏng nên việc chuyển đổi thành dạng bột hòa tan được xem là giải pháp hiệu quả nhằm kéo dài thời gian bảo quản [7]. Mặt khác, bổ sung *Lactobacillus casei* giúp tăng giá trị chức năng của sản phẩm nhờ khả năng tồn tại trong đường tiêu hóa [8]. Sự kết hợp này không chỉ nâng cao tính ổn định mà còn cải thiện lợi ích sức khỏe của bột xoài lợi khuẩn. Với mục tiêu tổng quát của nghiên cứu là đánh giá động học thoát ẩm của purée xoài bổ sung *Lactobacillus casei* trong quá trình sấy bơm nhiệt có tạo bọt bằng cách (i) phân tích mức độ phù hợp của các mô hình động học thông qua chỉ số AIC và BIC nhằm lựa chọn mô hình mô tả chính xác nhất; (ii) xây dựng phương trình MR tại các nhiệt độ sấy khác nhau; (iii) đánh giá khả năng sống sót của *L. casei* sau sấy; và (iv) kiểm tra các chỉ tiêu chất lượng theo TCVN để xác định tính ứng dụng của sản phẩm.

Do đó, nghiên cứu tập trung đánh giá mức độ phù hợp của các mô hình động học thông qua chỉ số AIC và BIC nhằm xác định phương trình MR mô tả chính xác quá trình thoát ẩm. Đồng thời, khả năng sống sót của *L. casei* sau sấy được xem xét để phản ánh hiệu quả bảo toàn lợi khuẩn. Kết quả thu được không chỉ góp phần

hoàn thiện mô hình mô phỏng thoát ẩm mà còn làm rõ ảnh hưởng của điều kiện sấy đến chất lượng vi sinh và các chỉ tiêu tiêu chuẩn theo TCVN. Những phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc lựa chọn nhiệt độ sấy tối ưu và tăng cường tính ứng dụng của bột xoài probiotic trong sản xuất thực phẩm chức năng.

2. Nguyên liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu hóa chất

Purée xoài: xoài Tứ Quý thu hoạch tại Thanh Phú – Bến Tre được phân loại độ chín và sử dụng những quả chín mềm, không còn phù hợp để ăn tươi. Xoài được rửa, bỏ vỏ và hạt, nghiền thành purée và xử lý nhiệt ở 85 °C trong 10 phút. Hỗn hợp sau đó được phối trộn với 10 % albumin, 1 % glyceryl monostearate, 0,003 % tricalcium phosphate và bổ sung 10 % *Lactobacillus casei* (tỷ lệ 10 % w/w) nhằm duy trì mật độ $\geq 10^6$ CFU/g sau sấy. Bột được tạo bằng máy đánh trong 3 phút, sau đó dàn lên khay với độ dày khoảng 0,6 cm được đo bằng thước kẹp (Tolsen 35053, China) và sấy ở nhiệt độ quy định [9]. Độ ẩm được kiểm tra định kỳ cho đến khi ổn định. Điều kiện không khí ngoài phòng là $(77 \pm 2) \% RH$ ở $(29 \pm 2) ^\circ C$, còn trong buồng sấy sau điều chỉnh đạt $(10 \pm 2) \% RH$.

Lactobacillus casei: có mật độ lợi khuẩn $\geq 1,0 \times 10^{10}$ CFU/g được cung cấp bởi công ty NANI International biology.

2.2. Phương pháp thí nghiệm

Các thí nghiệm được thực hiện với ba lần lặp nhằm đáp ứng yêu cầu phân tích ANOVA. Dữ liệu được xử lý bằng phần mềm thống kê SPSS 23.0. Các phép kiểm định Tukey và LSD được áp dụng để xác định sự khác biệt có ý nghĩa giữa các giá trị ở mức $P < 0,05$.

Các thí nghiệm lần lượt được bố trí và thí hành như sau: Thí nghiệm 1: đánh giá chỉ số phù hợp của mô hình động học thoát ẩm

Sau khi đã có đường cong sấy và thông số thống kê mô hình. Giá trị AIC và BIC được đánh giá. Tiêu chí Thông tin Akaike (AIC) [3], thể hiện sự cân bằng giữa độ chính xác (dựa trên tổng bình phương sai số – SSE) và mức độ phức tạp (số lượng tham số, k), và được xác định như sau:

$$AIC = -2l_i + 2k_i \quad (1)$$

Tiêu chí Thông tin Bayes (BIC) [3] áp dụng mức phạt nghiêm ngặt hơn dựa trên độ phức tạp của mô hình, xét đến cả số lượng tham số ước tính và kích thước mẫu, và được tính theo phương trình (2):

$$BIC = -2l_i + \log(p)k_i \quad (2)$$

Trong đó, l_i là giá trị cực đại của log-likelihood của mô hình thứ i , k_i là số lượng tham số của mô hình thứ i , và p là kích thước mẫu.

Giá trị AIC và BIC càng thấp trong các phương trình (1) và (2) thì mô hình càng phù hợp [5].

Thí nghiệm 2: khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng sống của lợi khuẩn

Tiến hành bằng cách trải hỗn hợp đã tạo bột lên khay khô, sau đó điều chỉnh thiết bị sấy tại (30, 35, 40 và 45) °C. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy được đánh giá dựa trên sự thay đổi mật độ lợi khuẩn trước và sau sấy theo phương pháp đánh giá của Eratte *et al.*, (2015).

Thí nghiệm 3: đánh giá chất lượng sản phẩm

Sản phẩm được gửi tới Công ty Cổ phần Dịch vụ Khoa học Công nghệ Thế Kỷ Mới đánh giá dựa trên Tiêu chuẩn cơ sở (TCCS) có viện dẫn Tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN) 13368:2021; Quyết định (QĐ) 46-8-3:2018/Bộ Y tế (BYT); Quy chuẩn Việt Nam (QCVN) 8-2:2011/BYT

Sáu mô hình sấy lớp mỏng gồm Lewis, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Midilli và Kucuk, và Weibull (Bảng 1) được lựa chọn vì chúng được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu sấy rau quả và có khả năng mô tả tốt cả cơ sở lý thuyết lẫn đặc tính thực nghiệm của quá trình khuếch tán và bay hơi ẩm [10, 11]

Bảng 1. Các mô hình đánh giá AIC và BIC

TT	Mô hình	Phương trình	
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(3)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(4)
3	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(5)
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(6)
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(7)
6	Weibull	$MR = \alpha - b \exp(-k_0 t^n)$	(8)

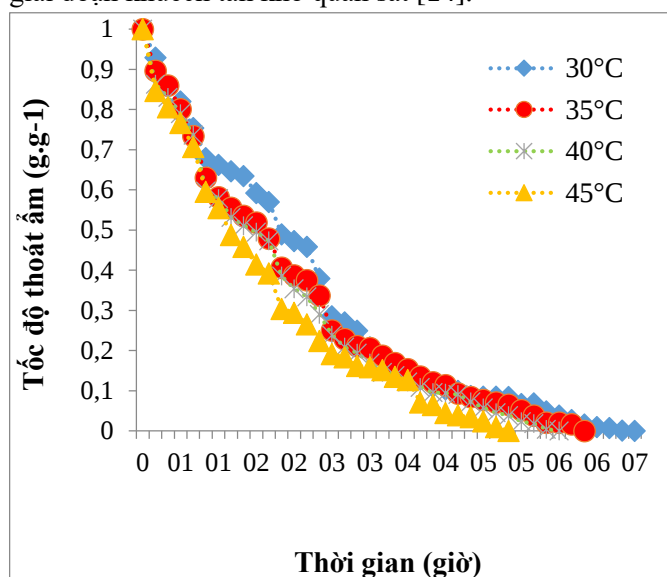
2.3. Các chỉ tiêu theo dõi và phương pháp phân tích

Bảng 2: Các phương pháp phân tích

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp phân tích
1	AIC và BIC	Theo Yesilova <i>et al.</i> (2010) [3]
2	Mật độ lợi khuẩn	Theo Eratte <i>et al.</i> , (2015) [12]
3	Chất lượng cho sản phẩm bột xoài lợi khuẩn	TCCS có viện dẫn TCVN 13368:2021; QĐ 46-8-3:2018/BYT; QCVN 8-2:2011/BYT

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá thông số mô hình động học thoát ẩm
 Hình 1 cho thấy độ ẩm giảm nhanh hơn khi nhiệt độ tăng, với thời gian sấy rút ngắn còn (390, 350, 330 và 290) phút lần lượt ở (30-45) °C. Như vậy, thời gian sấy ở 30 °C dài hơn 1,34 lần so với 45 °C, khẳng định nhiệt độ là yếu tố then chốt ảnh hưởng tốc độ thoát ẩm [13]. Đường cong sấy cho thấy độ dốc lớn hơn ở 45 °C, biểu thị tốc độ mất nước nhanh và ổn định hơn, trong khi ở (30-35) °C xuất hiện giai đoạn chậm do năng lượng không đủ để duy trì truyền ẩm liên tục. Ở 45 °C, nhiệt cao thúc đẩy co tế bào và khuếch tán ẩm mạnh, khiến giai đoạn khuếch tán khó quan sát [14].



Hình 1. Đường cong tốc độ sấy

Kết quả Bảng 3 cho thấy mô hình Page đạt SSE thấp nhất và đồng thời có giá trị AIC, BIC âm lớn nhất ở tất cả các mức nhiệt, cụ thể tại 30 °C mô hình này có SSE đạt 0,975, AIC đạt -94,354 và BIC đạt -91,132, thấp hơn so với các mô hình khác.

So sánh với Midilli tại cùng mức nhiệt ($SSE = 0,85$; $AIC = -92,384$), mặc dù Midilli có SSE nhỏ hơn, mô hình Page vẫn được ưu tiên theo tiêu chí AIC/BIC do ưu thế về mức độ đơn giản ($k = 2$ so với $k = 4$). Xu hướng tương tự được quan sát tại 35 °C, nơi Page tiếp tục có AIC–BIC thấp nhất ($AIC = -92,924$; $BIC = -89,774$), cho thấy khả năng mô tả ổn định và nhất quán của mô hình này. Khi nhiệt độ tăng lên (40-45) °C, Page vẫn duy trì vị trí tối ưu với AIC nhỏ nhất, chẳng hạn tại 45 °C giá trị AIC của Page là -77,256, tốt hơn các mô hình Midilli (-75,476) và Weibull (-75,388). Như vậy, Page được xem là mô hình phù hợp nhất cho mô tả động học thoát ẩm purée xoài, nhờ sự cân bằng giữa độ chính xác và số tham số, phù hợp với khuyến nghị lựa chọn mô hình theo AIC/BIC [15].

Kết quả trong bảng cho thấy hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng (D_{eff}) được thể hiện trong Bảng 4 tăng dần theo nhiệt độ, từ $2,70 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ở 30 °C lên $3,29 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ tại 45 °C, phù hợp với xu hướng tăng tính linh động của phân tử nước khi nhiệt độ cao hơn, tương tự các báo cáo trước đây về vật liệu trái cây [11], [16].

Bảng 3. Chỉ số đánh giá mô hình

Nhiệt độ (°C)	Mô hình	k	p	SSE	AIC	BIC
30	Henderson and Pabis	2	37	3,012	-51,796	-48,574
	Page	2	37	0,975	-94,354	-91,132
	Midilli	4	37	0,85	-92,384	-86,717
	Logarithmic	3	37	1,105	-87,316	-82,872
	Wang and Singh	2	37	1,956	-72,556	-69,334
	Weibull	4	37	0,862	-91,94	-86,273
35	Henderson and Pabis	2	35	2,345	-52,332	-49,182
	Page	2	35	0,725	-92,924	-89,774
	Midilli	4	35	0,614	-92,09	-86,514
	Logarithmic	3	35	0,682	-89,642	-85,216
	Wang and Singh	2	35	1,678	-67,63	-64,48
	Weibull	4	35	0,623	-91,718	-86,142
40	Henderson and Pabis	2	32	2,178	-46,664	-43,672
	Page	2	32	0,678	-84,774	-81,782
	Midilli	4	32	0,592	-82,714	-77,496
	Logarithmic	3	32	0,645	-81,568	-77,228
	Wang and Singh	2	32	1,456	-62,176	-59,184
	Weibull	4	32	0,598	-82,458	-77,24
45	Henderson and Pabis	2	29	1,987	-40,79	-38,014
	Page	2	29	0,624	-77,256	-74,48
	Midilli	4	29	0,548	-75,476	-70,688
	Logarithmic	3	29	0,592	-74,236	-70,298
	Wang and Singh	2	29	1,234	-56,766	-53,99
	Weibull	4	29	0,55	-75,388	-70,6

Giá trị slope âm giảm mạnh từ -0,00018508 xuống -0,000225726 cũng phản ánh tốc độ thoát ẩm nhanh hơn ở nhiệt độ cao. Đồng thời, hằng số sấy k tăng từ 0,35911 lên 0,58969 cho thấy quá trình sấy diễn ra mạnh hơn, rút ngắn thời gian đạt cân bằng ẩm. Chỉ số $[Ta.R]^{-1}$ giảm dần khi nhiệt độ sấy tăng, hàm ý năng lượng hoạt hóa cần thiết cho quá trình khuếch tán ẩm thấp hơn, qua đó hỗ trợ sự chuyển dịch ẩm ra bề mặt dễ dàng hơn [17].

Nhìn chung, các thông số động học thoát ẩm đều nhất quán, chứng minh rằng tăng nhiệt độ sấy trong phạm vi khảo sát cải thiện đáng kể hiệu quả khuếch tán và tốc độ sấy của purée xoài.

Bảng 4. Thông số D_{eff} của mô hình Page tại các nhiệt độ khác nhau

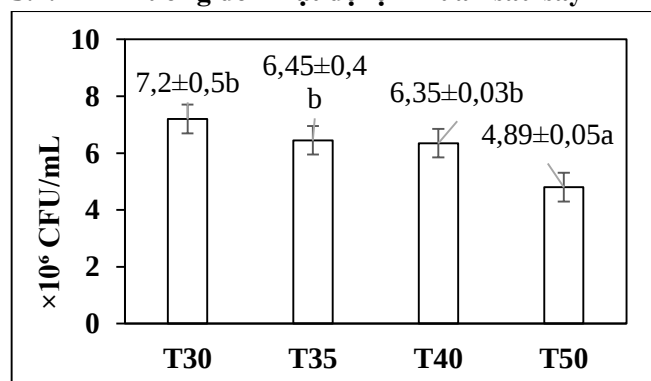
Nhiệt độ (°C)	30	35	40	45
Slope	-0,00019	-0,00018	-0,00021	-0,00023
D_{eff} (m ² /s)	2,70E-09	2,67E-09	3,07E-09	3,29E-09
k	0,35911	0,46973	0,50648	0,58969
$[Ta \cdot R]^{-1}$	0,396764	0,390326	0,384094	0,378058
R^2	0,98747	0,9932	0,99116	0,99265

Bảng 5. Phương trình động học thoát ẩm qua quá trình sấy bơm nhiệt tại các nhiệt độ sấy

Nhiệt độ (°C)	Phương trình động học thoát ẩm
30	$MR_{30} = \exp(-0,35911t^{1,27858})$
35	$MR_{35} = \exp(-0,46973t^{1,1148})$
40	$MR_{40} = \exp(-0,50648t^{1,11925})$
45	$MR_{45} = \exp(-0,58969t^{1,09294})$

Các phương trình động học Bảng 5 cho thấy hệ số k tăng từ 0,35911 lên 0,58969 khi nhiệt độ tăng từ (30-45) °C, phản ánh tốc độ thoát ẩm nhanh hơn ở nhiệt độ cao. Đồng thời, giá trị n giảm dần (1,27858 giảm khoảng 1,09 đến 1,12), cho thấy đường cong sấy trở nên gần tuyến tính theo hàm mũ hơn ở các mức nhiệt cao. Sự thay đổi đồng thời của k và n phù hợp với xu hướng tăng D_{eff} và độ dốc âm, khẳng định vai trò của nhiệt độ trong việc thúc đẩy quá trình khuếch tán ẩm. Nhìn chung, các phương trình này mô tả tốt động học thoát ẩm trong từng điều kiện sấy và có thể dùng để dự đoán xu hướng giảm ẩm trong giai đoạn sấy ổn định [18].

3.2. Ảnh hưởng đến mật độ lợi khuẩn sau sấy



Hình 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng sống của lợi khuẩn

Ghi chú: khác biệt có ý nghĩa thống kê $P < 0,05$ ($n = 3$)
Sự biến đổi mật độ lợi khuẩn theo các mức nhiệt độ sấy bơm nhiệt được thể hiện trong Hình 2. Kết quả cho thấy khi nhiệt độ sấy tăng, mật độ lợi khuẩn trong bột giảm

tương ứng. Nguyên nhân là ở nhiệt độ cao, các cấu trúc sinh học như enzyme và protein của vi sinh vật dễ bị biến tính khi tiếp xúc trực tiếp với dòng khí nóng. Xét đồng thời hiệu quả mô hình thoát ẩm và mật độ lợi khuẩn, mức 35 °C ($6,45 \times 10^6$ CFU/g) được đánh giá là phù hợp để tạo bột probiotic, duy trì mật độ lợi khuẩn trên 10^6 CFU/g.

Các quan sát này phù hợp với báo cáo của Alves *et al.* (2016), trong đó *L. casei* NRRL B-442 cho thấy khả năng sống sót cao hơn khi được xử lý ở nhiệt độ sấy thấp so với sấy phun [19]. Do *L. casei* là chủng nhạy cảm với nhiệt, sự ổn định của nó phụ thuộc mạnh vào điều kiện nhiệt trong quá trình sấy. Nhận định này cũng thống nhất với kết quả của Rodrigues *et al.* (2018) khi phát triển sản phẩm snack táo sấy chứa cùng chủng lợi khuẩn [20]. Mô hình có hệ số xác định R^2 cao nhất (0,9932) tại 35 °C chứng tỏ mức độ phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm

3.3. Đánh giá chất lượng sản phẩm bột xoài lợi khuẩn

Bảng 6. Mức chất lượng cho sản phẩm bột xoài lợi khuẩn theo TCCS.

STT	Chỉ tiêu thử nghiệm (đơn vị)	Kết quả
1	Năng lượng (Kcal/100 g)	392
2	Carbohydrate (g/100 g)	73,9
3	Protein – N x 6,25 (g/100 g)	6,91
4	Chất béo (g/100 g)	7,65
5	Đường tổng (g/100 g)	61,8
6	Độ ẩm (g/100 g)	2,50
7	Chì – Pb (mg/kg)	KPH
8	Thủy ngân – Hg (mg/kg)	KPH
9	Salmonella spp (/25 g)	KPH
10	<i>Escherichia coli</i> đường tinh β -glucuronidase (CFU/g)	< 10
11	Coliforms (CFU/g)	< 10
12	<i>Clostridium perfringens</i> (CFU/g)	< 10
13	Tổng số vi sinh hiếu khí (CFU/g)	$6,3 \times 10^2$
14	Nấm men và nấm mốc (CFU/g)	< 10
15	<i>Lactobacillus</i> (CFU/g)	$2,4 \times 10^6$

Kết quả phân tích Bảng 6 cho thấy sản phẩm có thành phần dinh dưỡng cân đối. Năng lượng đạt 392 Kcal/100 g, trong đó carbohydrate chiếm tỷ lệ lớn (73,9 g/100 g), phù hợp với các thực phẩm cần cung cấp nhiều năng lượng. Hàm lượng protein (6,91 g/100 g) và chất béo (7,65 g/100 g) ở mức trung bình. Tổng lượng đường 61,8 g/100 g là khá cao, cần được lưu ý đối với người có nhu cầu kiểm soát đường. Kết quả kiểm tra kim loại nặng cho thấy chì (Pb) và thủy ngân (Hg) đều ở mức “KPH”, tức không phát hiện hoặc dưới giới hạn cho phép, đảm bảo an toàn. Các chỉ tiêu vi sinh như *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Coliforms* và

Clostridium perfringens đều dưới ngưỡng phát hiện (< 10 CFU/g), chúng tỏ sản phẩm đạt yêu cầu vệ sinh. Hơn nữa, *Lactobacillus* còn lại ở mức $2,4 \times 10^6$ CFU/g, góp phần hỗ trợ sức khỏe đường ruột. Hơn nữa, sản phẩm đáp ứng yêu cầu chất lượng của bột xoài lợi khuẩn theo TCCS có viện dẫn TCVN 13368:2021, QĐ 46-8-3:2018/BYT và QCVN 8-2:2011/BYT.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình Page là mô hình tối ưu theo các chỉ số AIC và BIC, nhờ sai số thấp và khả năng mô tả chính xác động học thoát ẩm của purée xoài ở tất cả các mức nhiệt. Điều kiện sấy thích hợp được xác định ở 35°C , trong đó quá trình thoát ẩm được thể hiện rõ qua sự gia tăng hệ số k và D_{eff} khi nhiệt độ tăng, đồng thời vẫn duy trì được mật độ *L. casei* sau sấy ở mức $2,4 \times 10^6$ CFU/g. Chất lượng sản phẩm cuối cùng đáp ứng đầy đủ các tiêu chuẩn TCVN về dinh dưỡng,

vệ sinh và kim loại nặng, với các chỉ tiêu *Salmonella*, *E. coli*, *Coliforms*, nấm men, nấm mốc dưới ngưỡng phát hiện, và Pb/Hg không phát hiện. Nhìn chung, sấy bơm nhiệt bột xốp cho thấy khả năng tạo ra bột xoài lợi khuẩn chất lượng cao; tuy nhiên, cần tiếp tục kiểm chứng mô hình ở quy mô pilot và tối ưu hóa thêm các thông số vận hành để hướng đến ứng dụng công nghiệp.

Lời cảm ơn

Đề tài được thực hiện bằng nguồn kinh phí hỗ trợ từ Chương trình Vườn Ươm Khoa học và Công nghệ trẻ, được quản lý bởi Trung tâm Phát triển Khoa học và Công nghệ Trẻ - Thành Đoàn Thành phố Hồ Chí Minh và Sở Khoa học và Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh, theo hợp đồng số “18/2024/HĐ-KHCNT-VU”. Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam theo số tài trợ 2024.01.13.

Tài liệu tham khảo

- [1] T. V. L. Nguyen, Thi Yen Nhi Tran, Duc Tri Lam, Long Giang Bach and D. C. Nguyen “Effects of microwave blanching conditions on the quality of green asparagus (*Asparagus officinalis* L .) butt segment,” *Food Sci. Nutr.*, vol. 00, no. January, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1002/fsn3.1199.
- [2] E. F. Fordjour, D. K., Sarpong, F., Owusu-Kwarteng, J., & Boateng, “Drying kinetics and mathematical modeling of coconut meat slices: Insight into pretreatment and drying synergic effect.,” *Heliyon*, vol. 10, no. 20, 2024.
- [3] Y. Yesilova, A., Kaydan, M. B., & Kaya, “Modeling insect-egg data with excess zeros using zero-inflated regression models.,” *Hacetatepe J. Math. Stat.*, vol. 39, no. 1, pp. 273-282., 2010.
- [4] A. Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Maghsoodi, V., & Moheb, “Infrared thin layer drying of saffron (*Crocus sativus* L.) stigmas: Mass transfer parameters and quality assessment,” *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 426–432, 2017.
- [5] A. Field, *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. 2024.
- [6] M. A. Ullah, A. Khanal, P. Joyce, N. White, A. Macnish, and D. Joyce, “Internal Disorders of Mango Fruit and Their Management—Physiology, Biochemistry, and Role of Mineral Nutrients,” *Plants*, vol. 13, no. 18, p. 2596, Sep. 2024, doi: 10.3390/plants13182596.
- [7] J. C. Albuquerque *et al.*, “Processing of Maranhão mango peels by convective drying and freeze-drying: kinetic study, functional and thermal properties,” *J. Food Meas. Charact.*, vol. 18, no. 7, pp. 6295–6309, Jul. 2024, doi: 10.1007/s11694-024-02648-x.
- [8] H. C. S. Araujo, M. S. de Jesus, R. D. D. Sandes, M. T. S. Leite Neta, and N. Narain, “Functional Cheeses: Updates on Probiotic Preservation Methods,” *Fermentation*, vol. 10, no. 1, p. 8, Dec. 2023, doi: 10.3390/fermentation10010008.
- [9] T. P. Tran, N. T. Y., Le, T. T. T., Nghia, N. H., Nhu, D. B., Huynh, L. B., Nguyen, T. X. T., Huynh, X. P., & Dao, “Developing mango powders by foam mat drying technology,” *Food Sci. Nutr.*, vol. 11, no. 7, pp. 4084–4092., 2023.
- [10] I. Doymaz, “Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer,” *J. Food Process Eng.*, vol. 32, no. 2009, pp. 112–125, 2007, doi: 10.1111/j.1745-4530.2007.00205.x.
- [11] K. Onwude, D.I.; Hashim, N.; Janius, R.B.; Nawi, N.M.; Abdan, “Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review: Thin-layer models of fruits and vegetables.,” *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 15, pp. 599–618., 2016.
- [12] D. Eratte, S. McKnight, T. R. Gengenbach, K. Dowling, C. J. Barrow, and B. P. Adhikari, “Co-encapsulation and characterisation of omega-3 fatty acids and probiotic bacteria in whey protein isolate–gum Arabic complex coacervates,” *J. Funct. Foods*, vol. 19, pp. 882–892, 2015.
- [13] D.-J. Zheng, Y.-Q. Cheng, H.-J. Liu, and L.-T. Li, “Investigation of EHD-enhanced water evaporation and a novel empirical model,” *Int. J. Food Eng.*, vol. 7, no. 2, 2011.
- [14] L. Taşeri, M. Aktaş, S. Şevik, M. Gülcü, G. U. Seckin, and B. Aktekel, “Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer,” *Food Chem.*, vol. 260, pp. 152–159,

- 2018.
- [15] A. M. Chaux-Gutiérrez, A. B. Santos, D. M. Granda-Restrepo, and M. A. Mauro, “Foam mat drying of mango: Effect of processing parameters on the drying kinetic and product quality,” *Dry. Technol.*, vol. 35, no. 5, pp. 631–641, 2017, doi: 10.1080/07373937.2016.1201486.
 - [16] M. Z. Ertekin, C., & Firat, “A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products,” *Crit. Rev. food Sci. Nutr.*, vol. 57, no. 4, pp. 701–717, 2017.
 - [17] T. S. Li, R. Sulaiman, Y. Rukayadi, and S. Ramli, “Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of foam mat drying of cantaloupe,” *Food Hydrocoll.*, vol. 116, p. 106492, 2021.
 - [18] M. Ibrahim, K. Sopian, and W. R. W. Daud, “Study of the Drying Kinetics of Lemon Grass,” *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 1070–1075, 2009.
 - [19] N. N. Alves, G. Ben Messaoud, S. Desobry, J. M. C. Costa, and S. Rodrigues, “Effect of drying technique and feed flow rate on bacterial survival and physicochemical properties of a non-dairy fermented probiotic juice powder,” *J. Food Eng.*, vol. 189, pp. 45–54, 2016.
 - [20] O. Santos, S. Rodrigues, and F. A. N. Fernandes, “Improvements on the Stability and Vitamin Content of Acerola Juice Obtained by Ultrasonic Processing,” *Food*, vol. 7, no. April, p. 68, 2018, doi: 10.3390/foods7050068.

Application of heat-pump drying technology in the production of probiotic-enriched mango powder: quality assessment and probiotic viability evaluation

Tran Thi Yen Nhi^{1,*}, Vu Duc Ngoc¹, Pham Binh An¹, Pham Tri Nhut², Nguyen Huu Nghia¹, Nguyen Ngoc Quy³, Nguyen Minh Tien³

¹Institute of Applied Technology and Sustainable Development, Nguyen Tat Thanh University, Ho Chi Minh City.

²Graduate School of International Agricultural Technology, Seoul National University, South Korea

³Faculty of Pharmacy, Nguyen Tat Thanh University, Ho Chi Minh City

*Email: ttynhicntp2024@gmail.com

Abstract The study evaluated AIC and BIC model selection criteria for the moisture-removal kinetics of mango purée enriched with *Lactobacillus casei* during foam-mat heat pump drying. Drying experiments were conducted at four temperatures (30, 35, 40, and 45) °C, where moisture changes were recorded to establish MR equations and assess probiotic viability after drying. The data were fitted to common thin-layer models and analyzed using SSE, AIC, and BIC to identify the most suitable kinetic model. Results showed that the Page model achieved the best fit across all temperatures, while drying at 35 °C maintained *L. casei* counts above 10⁶ CFU/g. The final probiotic-enriched mango powder met all TCVN nutritional and microbiological requirements, with viable counts of 2.4 × 10⁶ CFU/g. These findings confirm the potential of foam-mat heat pump drying for producing high-quality probiotic-enriched mango powder.

Keywords AIC, BIC, mango powder, heat pump drying, probiotics