

Research Article**Assessment of the impact of enzymatic hydrolysis temperature and time on recovery yield, anthocyanin content, and sensory quality of sterilized purple rice milk****Nhan Minh Tri*, Nguyen Thi Thu Huynh***Postharvest Technology Department, Institute of Food and Biotechnology,
Can Tho University, Can Tho, Vietnam**(Received: 11 Jul 2025; Revised: 19 Sep 2025; Accepted: 20 Sep 2025)***Abstract**

Purple brown rice is a highly nutritious food source, rich in bioactive compounds, particularly anthocyanins - powerful antioxidants that play a crucial role in health protection. The production of sterilized purple rice milk in glass bottles not only provides a convenient, safe product with an extended shelf life but is also environmentally friendly. This study aimed to evaluate the effects of enzymatic hydrolysis temperature (75, 80, and 85°C) and time (5, 15, and 25 minutes) on the physicochemical properties of hydrolysates (soluble solids content, insoluble solids content, reducing sugar content, anthocyanin content, recovery yield, transmittance, and color values L, a*, b*, and H°), as well as the sensory attributes of sterilized purple rice milk. The results showed that hydrolysis temperature had a significant impact on recovery yield, transmittance, and color values, whereas hydrolysis time clearly influenced soluble solids content, insoluble solids content, reducing sugars, and anthocyanin content. Under optimal conditions (80°C for 15 minutes), the purple rice hydrolysate achieved a soluble solid content (7.27%), recovery yield (65.6%), reducing sugar content (29.2 mg/L), and anthocyanin content (11.8 mg/L). Furthermore, rice milk produced from this hydrolysate exhibited the highest sensory quality.

Keywords: Anthocyanin, enzymatic hydrolysis, sensory attributes, recovery yield, purple rice milks.

*Corresponding author: Nhan Minh Tri (E-mail: nhanmtri@ctu.edu.vn)

<https://doi.org/10.47866/2615-9252/vjfc.4549>

Copyright © 2025 The author(s). This article is licensed under [CC BY-NC 4.0](#)

Đánh giá tác động của nhiệt độ và thời gian thủy phân enzyme đến hiệu suất thu hồi, hàm lượng anthocyanin và giá trị cảm quan của sữa gạo tím tiết trùng

Nhan Minh Trí, Nguyễn Thị Thu Huỳnh

Bộ môn Công nghệ sau thu hoạch, Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm,
Trường Đại học Cần Thơ, Cần Thơ, Việt Nam

Tóm tắt

Gạo lứt tím than là nguồn thực phẩm giàu dinh dưỡng và chứa nhiều hợp chất hoạt tính sinh học, đặc biệt là anthocyanin - một chất chống oxy hóa quan trọng giúp bảo vệ sức khỏe. Việc sản xuất sữa gạo tím than tiết trùng đóng chai thủy tinh không chỉ mang lại sản phẩm tiện dụng, an toàn và có thời gian bảo quản dài, mà còn thân thiện với môi trường. Nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ (75, 80 và 85°C) và thời gian thủy phân (5, 15 và 25 phút) đến các chỉ tiêu hóa lý của dịch thủy phân (hàm lượng chất khô hòa tan, chất khô không tan, đường khử, anthocyanin, hiệu suất thu hồi, độ truyền quang, các giá trị màu L, a*, b* và H_o) cũng như giá trị cảm quan của sữa gạo lứt tím than tiết trùng. Kết quả cho thấy, nhiệt độ thủy phân có ảnh hưởng lớn đến hiệu suất thu hồi, độ truyền quang và giá trị màu, trong khi thời gian thủy phân tác động rõ rệt đến hàm lượng chất khô hòa tan, chất khô không tan, đường khử và anthocyanin. Khi được thủy phân ở 80°C trong 15 phút, dịch gạo tím than thủy phân đạt hàm lượng chất khô hòa tan (7,27%), hiệu suất thu hồi (65,6%), hàm lượng đường khử (29,2 mg/L) và hàm lượng anthocyanin (11,8 mg/L). Đồng thời, dịch gạo này được sử dụng chế biến sữa gạo lứt tím than đạt chất lượng cảm quan cao nhất.

Từ khóa: anthocyanin, enzyme thủy phân, giá trị cảm quan, hiệu suất thu hồi, sữa gạo tím than.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gạo lứt tím than (*Oryza sativa* L.) không chỉ là một nguồn thực phẩm phổ biến mà còn được xem như một “siêu thực phẩm” giàu giá trị dinh dưỡng và chứa nhiều hợp chất hoạt tính sinh học, đặc biệt là anthocyanin - một sắc tố tự nhiên có khả năng chống oxy hóa mạnh, giúp bảo vệ tế bào khỏi các gốc tự do và hỗ trợ nâng cao sức khỏe tổng thể [1, 2]. Gạo lứt tím than cung cấp các thành phần dinh dưỡng thiết yếu như carbohydrate, chất xơ, protein, vitamin nhóm B, vitamin E, cùng các khoáng chất quan trọng như kali, magnesium và sắt, giúp hỗ trợ hệ miễn dịch và duy trì cân bằng dinh dưỡng [3, 4].

Trong bối cảnh nhu cầu tiêu thụ các sản phẩm thực phẩm chức năng và đồ uống có nguồn gốc tự nhiên ngày càng gia tăng, gạo lứt tím than trở thành nguyên liệu tiềm năng để phát triển các sản phẩm mới, đặc biệt là sữa gạo tím than. Sữa gạo tím than không chỉ mang lại hương vị thơm ngon, an toàn và tiện lợi mà còn đáp ứng xu hướng tiêu dùng hướng tới sức khỏe và thân thiện môi trường [5].

Quy trình sản xuất sữa gạo tím than, đặc biệt là công đoạn thủy phân tinh bột, đóng vai trò quan trọng nhằm chuyển đổi tinh bột thành các sản phẩm dễ hòa tan như dextrin, maltose và glucose. Quá trình này góp phần cải thiện độ sánh, tạo vị ngọt tự nhiên và nâng cao giá trị cảm quan của sản phẩm [6]. Hiện nay, phương pháp thủy phân enzyme được ưu tiên sử dụng thay thế phương pháp hóa học, nhằm đảm bảo an toàn thực phẩm, đồng thời bảo tồn các hoạt chất sinh học có lợi.

Hiệu quả thủy phân phụ thuộc vào nhiều yếu tố công nghệ, trong đó nhiệt độ và thời gian là các thông số then chốt quyết định hoạt tính và tính ổn định của enzyme. Mỗi loại enzyme có nhiệt độ tối ưu riêng để đạt hiệu suất cao nhất; nếu vượt quá mức này, enzyme có thể bị biến tính hoặc bất hoạt, dẫn đến giảm hiệu quả thủy phân [7]. Thời gian thủy phân dài hơn có thể giúp enzyme tiếp xúc tốt hơn với cơ chất, nâng cao khả năng phân giải tinh bột, nhưng đồng thời có thể gây tích lũy sản phẩm kìm hãm hoạt động enzyme [8].

Bên cạnh đó, các điều kiện thủy phân còn ảnh hưởng trực tiếp đến các chỉ tiêu chức năng và cảm quan của dịch gạo thủy phân, chẳng hạn như hàm lượng anthocyanin, chất khô hòa tan, đường khử, màu sắc và độ trong. Việc kiểm soát tối ưu các thông số này góp phần cân bằng giữa khả năng giải phóng chất dinh dưỡng, bảo toàn hợp chất hoạt tính sinh học và nâng cao chất lượng cảm quan của sản phẩm cuối cùng [2, 9, 10].

Ngoài ra, việc bổ sung sữa bột gầy giúp tăng cường hàm lượng protein, cải thiện giá trị dinh dưỡng và mang lại hương vị sữa tự nhiên đặc trưng [11]. Sự hiện diện của xanthan gum đóng vai trò ổn định cấu trúc, ngăn ngừa hiện tượng phân lớp và tách pha, đồng thời góp phần tạo cấu trúc và đặc tính lưu biến mong muốn nhờ khả năng tương tác với protein và polysaccharide khác [12].

Nhằm nâng cao chất lượng sữa gạo tím than tiết trùng, nghiên cứu này được thực hiện để đánh giá mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ (75, 80 và 85°C) và thời gian thủy phân (5, 15 và 25 phút) đến các chỉ tiêu chất lượng như (hàm lượng anthocyanin, giá trị màu sắc (L^* , a^* , b^* và H^o), hàm lượng chất khô hòa tan (CKHT), hàm lượng chất khô không tan (CKKT), hiệu suất thu hồi (HSTH), hàm lượng đường khử (HLĐK), độ truyền quang (ĐTQ, để đánh giá độ trong) của dịch thủy phân từ gạo lứt tím than. Đồng thời, giá trị cảm quan (màu sắc, mùi, vị và trạng thái) của sản phẩm sữa gạo tím than tiết trùng đóng chai cũng được đánh giá. Từ đó, điều kiện thủy phân tối ưu được đề xuất để giữ được màu sắc và hương vị đặc trưng, đảm bảo chất lượng dinh dưỡng, sự an toàn và ổn định sản phẩm [9].

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguyên liệu

Gạo tím than ST (Sóc trắng) của DNTN Hồ Quang Trí (còn có tên Gạo Ông Cua) từ Sóc Trăng. Gạo được đóng túi 2 kg với chất lượng tốt (không bị mốc, côn trùng, màu sắc, mùi bình thường, gạo nguyên hạt). Các nguyên liệu phụ (đường saccharose, và sữa gầy) được mua ở Coopmart Cần Thơ. Xanthan gum và enzyme alpha amylase (từ vi khuẩn *Bacillus licheniformis*) được mua ở Công ty Cemaco, Cần Thơ.

2.2. Chuẩn bị mẫu

Gạo tím than được xay nhuyễn và được rây qua lỗ có đường kính 0,5 mm. Bột gạo (150 g) được trộn đều với nước với tỉ lệ 1: 9 và được bổ sung 0,15% enzyme alpha amylase. Hỗn hợp được thủy phân ở nhiệt độ (75, 80, và 85°C) trong (5, 15 và 25 phút) ở pH 6,7 - 7,0. Hỗn hợp thủy phân được làm nguội nhanh đến nhiệt độ phòng để sử dụng phân tích các chỉ tiêu (hàm lượng đường khử, anthocyanin, hiệu suất thu hồi). Dịch thủy phân được lọc lần một để loại bỏ cám gạo không tan bằng vải lọc nylon NMO 120 mesh. Dịch gạo được bổ sung phụ liệu (2% sữa gầy, 0,15% xanthan gum và đường saccharose) đến khi độ brix đạt 12%. Độ brix của dịch sữa gạo được kiểm tra bằng chiết quang kế để biết nồng độ chất khô hòa tan ($C_{\text{dịch sữa}}$) và cân tổng khối lượng dịch sữa (mdịch sữa). Khối lượng đường saccharose được bổ sung (mđường) được tính công thức:

$$m_{\text{đường}} = m_{\text{dịch sữa}} \times \frac{(12 - 100 \times C_{\text{dịch sữa}})}{(100 - 12)} \quad (1)$$

Sau khi điều chỉnh hàm lượng chất khô tan, dịch sữa gạo được lọc lần hai cũng bằng vải lọc nylon NMO 120 mesh để loại bỏ tạp chất từ các phụ liệu. Dịch sữa gạo tiếp tục được đồng hóa với áp suất 30 Mpa trong thiết bị đồng hóa (GJB30-40). Sữa gạo được gia nhiệt đến 70°C và rót vào chai thủy tinh 200 mL. Các chai đã được rửa sạch và để khô ráo trước khi chiết rót. Sau khi đóng nút, chai sữa gạo được tiệt trùng với $T_{\text{ref}} = 121^\circ\text{C}$ và $z = 10^\circ\text{C}$ đạt thời gian chết nhiệt $F = 7,71$ phút.

2.3. Độ ẩm, chất khô hòa tan và chất khô không tan

Độ ẩm của mẫu được xác định bằng phương pháp sấy ở 105°C theo hướng dẫn của Luigi (2004) [13]. Hàm lượng chất khô hòa tan (CKHT) được đo bằng chiết quang kế [14].

Hàm lượng chất khô không tan (CKKT) được tính bằng cách lấy tổng hàm lượng chất khô trừ đi hàm lượng chất khô hòa tan. Tổng hàm lượng chất khô được xác định bằng cách lấy khối lượng mẫu ban đầu trừ khối lượng nước (độ ẩm) trong mẫu.

2.4. Hàm lượng đường khử

Mức độ thủy phân được đo dựa trên sự tăng hàm lượng đường khử. Việc đo này được thực hiện bằng phương pháp acid dinitrosalicylic [15]. Glucose được sử dụng làm chuẩn. Độ hấp thụ được đo ở bước sóng 540 nm bằng máy quang phổ tử ngoại/khả kiến (Thermo Scientific Evolution One Plus UV-Vis).

2.5. Hàm lượng anthocyanin

Nguyên liệu được chuẩn bị và nghiền nhỏ, ngâm trong 200 mL dung môi ethanol/nước = 1:1 có 1% HCl, thời gian 60 phút, sau đó được lọc để thu phần dung dịch. Dịch lọc được ly tâm tốc độ 5000 vòng/phút, thời gian 10 phút, tách dịch trong để phân tích. Mẫu được pha loãng trong hai dung dịch đệm. Dung đệm pH = 1,0 được chuẩn bị bằng cách sử dụng kali clorua 0,025M và HCl; trong khi đó, dung dịch đệm pH 4,5 được bao gồm natri acetat 0,4M với HCl. Hàm lượng anthocyanin được xác định theo phương pháp vi sai [16]. Độ hấp thụ màu anthocyanin trong dung dịch đệm khác nhau (pH 1,0 và pH 4,5) được đo tại các bước sóng lần lượt tương ứng 510 và 700 nm với máy hấp thụ quang phổ Evolution 260 Bio (Thermo Scientific, USA).

Hàm lượng anthocyanin tổng được tính theo cyanidin-3-glucoside:

$$a = \frac{A.M.K.V}{\epsilon.l} \quad (2)$$

Trong đó, $A = (A_{\lambda_{\max}, pH=1} - A_{700nm, pH=1}) - (A_{\lambda_{\max}, pH=4,5} - A_{700nm, pH=4,5})$; $A_{\lambda_{\max}}$, A_{700nm} : là độ hấp thụ tại bước sóng cực đại và 700 nm, ở pH 1 và pH 4,5; M là khối lượng phân tử của anthocyanin, $M = 449,2$ (g/mol); l: Chiều dày cuvet, (cm); K là độ pha loãng; V là thể tích dịch chiết, (lit). Từ đó tính được hàm lượng anthocyanin theo phần trăm/ mẫu khô Trong đó, m: khối lượng nguyên liệu ban đầu, (g); w: độ ẩm nguyên liệu, (%).

$$C\% = \frac{a}{m.(100-w).10^{-2}} \times 100 \quad (3)$$

2.6. Hiệu suất thu hồi dịch thủy phân

Dịch thủy phân gạo lứt được sấy khô ở 45°C trong 24 giờ, sau đó được làm nguội ở nhiệt độ phòng (25°C) trong 30 phút trước khi cân. Hiệu suất dịch thủy phân gạo lứt được tính trên cơ sở trọng lượng khô bằng cách sử dụng công thức theo phương pháp của Pinyo et al. (2016) [17]:

$$HSTH = \frac{m_{ck} \times 100 \times 100}{m_{NL} \times (100 - W)} (\%) \quad (4)$$

Trong đó:

HSTH: hiệu suất thu hồi dịch thủy phân (%),

m_{ck} : Khối lượng chất khô tan có trong dịch thủy phân (g),

m_{NL} : Khối lượng ban đầu của nguyên liệu trước khi thủy phân (g),

W: độ ẩm của bột gạo (%).

2.7. Độ truyền quang (T%) và giá trị màu (L^* , a^* , b^* và H°)

Sữa gạo tím than được xác định độ trong thông qua phần trăm độ truyền quang qua dịch sữa ở bước sóng 650 nm bằng máy đo quang phổ hấp thụ Evolution 260 Bio (Thermo Scientific, USA) theo phương pháp của Hardesty và Attili [18]. Giá trị màu (L^* , a^* và b^*) của sữa gạo tím than được đo bằng Colorimeter R310 (Minolta, Nhật). Giá trị màu L^* , a^* và b^* là các thông số trong hệ màu CIELAB, thường dùng để đánh giá màu sắc trong các lĩnh vực như thực phẩm. Trong đó, L^* : thể hiện độ sáng của màu, dao động từ 0 đến 100 với $L^*=0$: đen hoàn toàn và $L^*=100$: trắng hoàn toàn. Giá trị dương ($+a^*$): màu đỏ và giá trị âm ($-a^*$): màu xanh lục. Giá trị dương ($+b^*$): màu vàng và giá trị âm ($-b^*$): màu xanh lam. Góc màu H° (hue angle) được tính theo công thức [19] cho các sản phẩm có màu tím:

$$H^\circ = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (5)$$

2.8. Đánh giá cảm quan

Đánh giá cảm quan sữa theo phương pháp QDA (Quantitative Descriptive Analysis) được mô tả bởi Abou-Dobara và cộng sự (2016) [20]. Các thành viên đánh giá cảm quan đã được huấn luyện. Mười thành viên tham đánh giá điểm từ 1 - 5 cho từng chỉ tiêu (màu sắc, mùi, vị và trạng thái). Trong đó, giá trị cảm quan cao nhất của mỗi chỉ tiêu được cho điểm 5 (rất thích), và ngược lại là điểm 1 (rất chán). Thang điểm của từng chỉ tiêu cảm quan được mô tả. Các mẫu được mã hóa.

2.9. Phân tích số liệu

Tất cả thí nghiệm được lặp lại 3 lần. Số liệu được thống kê bằng chương trình Stagraphic Centurion 15 để tính ANOVA, kiểm định bằng Fisher t test, sự khác biệt có ý nghĩa (LSD), hệ số tương quan Pearson ở mức $\alpha = 0,05$.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Trong quá trình sản xuất sữa gạo, công đoạn thủy phân tinh bột đóng vai trò đặc biệt quan trọng. Hiện nay, trong lĩnh vực thực phẩm các phương pháp thủy phân tinh bột bằng biện pháp sinh học - enzyme đã được sử dụng để thay thế phương pháp xử lý bằng hóa chất với mục đích đảm bảo sức khỏe cho người tiêu dùng. Hiệu quả thủy phân tinh bột của enzyme phụ thuộc vào nhiều điều kiện, đặc biệt là nhiệt độ, nồng độ sử dụng và thời gian thủy phân [6].

Nhiệt độ là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng lớn đến quá trình thủy phân của enzyme, sự biến đổi về nhiệt độ có ảnh hưởng đến cấu trúc và hoạt động của enzyme, do đó ảnh hưởng đến tốc độ của quá trình thủy phân. Tốc độ enzyme chỉ tăng đến một giới hạn nhiệt độ nhất định, vượt quá giới hạn đó tốc độ enzyme sẽ giảm và dẫn đến mức triệt tiêu [8]. Mỗi enzyme đều có một nhiệt độ tối ưu.

Thời gian thủy phân dài có thể tạo điều kiện tiếp xúc giữa cơ chất và enzyme làm cho quá trình thủy phân xảy ra tốt hơn, tạo ra nhiều sản phẩm. Sau đó, các sản phẩm sinh ra sẽ đóng vai trò như chất kìm hãm không cạnh tranh và kìm hãm hoạt động của enzyme [8].

Các chỉ tiêu chất lượng như hàm lượng anthocyanin, giá trị màu sắc (L^* , a^* , b^* và H^o), CKHT, CKKT, HSTH, HLĐK, và ĐTQ được thống kê để kiểm tra tác động (được trình bày ở **Bảng 1**) và đánh giá mức độ ảnh hưởng (được trình bày ở **Hình 1**) của nhiệt độ và thời gian chần cũng như sự tương tác của chúng đối với sự thay đổi của các chỉ tiêu chất lượng và hiệu suất thu hồi của dịch thủy phân gạo tím than.

3.1. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian thủy phân đến các chỉ tiêu của dịch gạo tím ST thủy phân

Kết quả ở **Bảng 1** cho thấy, cả nhiệt độ và thời gian thủy phân đều ảnh hưởng đáng kể đến các chỉ tiêu chất lượng của dịch thủy phân, bao gồm nồng độ chất khô hòa tan, chất khô không tan, hiệu suất thu hồi, hàm lượng đường khử, hàm lượng anthocyanin, độ truyền quang và các thông số màu sắc.

Nhiệt độ thủy phân có tác động rất mạnh đến hiệu suất thu hồi, độ truyền quang cũng như giá trị màu a^* và b^* , với mức ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$). Bên cạnh đó, thời gian thủy phân cũng ảnh hưởng rõ rệt đến nồng độ chất khô hòa tan, chất khô không tan, hiệu suất thu hồi, hàm lượng đường khử, hàm lượng anthocyanin, độ truyền quang và giá trị a^* , cũng ở mức ý nghĩa cao ($p < 0,001$). Sự tương tác giữa nhiệt độ và thời gian thủy phân tác động đáng kể đến hiệu suất thu hồi, hàm lượng đường khử và độ truyền quang, đồng thời ảnh hưởng ở mức trung bình đến giá trị L^* .

Nhìn chung, việc tăng nhiệt độ và kéo dài thời gian thủy phân dẫn đến tăng nồng độ các hợp chất hòa tan, khiến dịch thủy phân trở nên đục hơn. Đồng thời, anthocyanin dễ bị phân hủy ở điều kiện nhiệt độ cao, làm giảm độ ổn định màu sắc của dịch thủy phân.

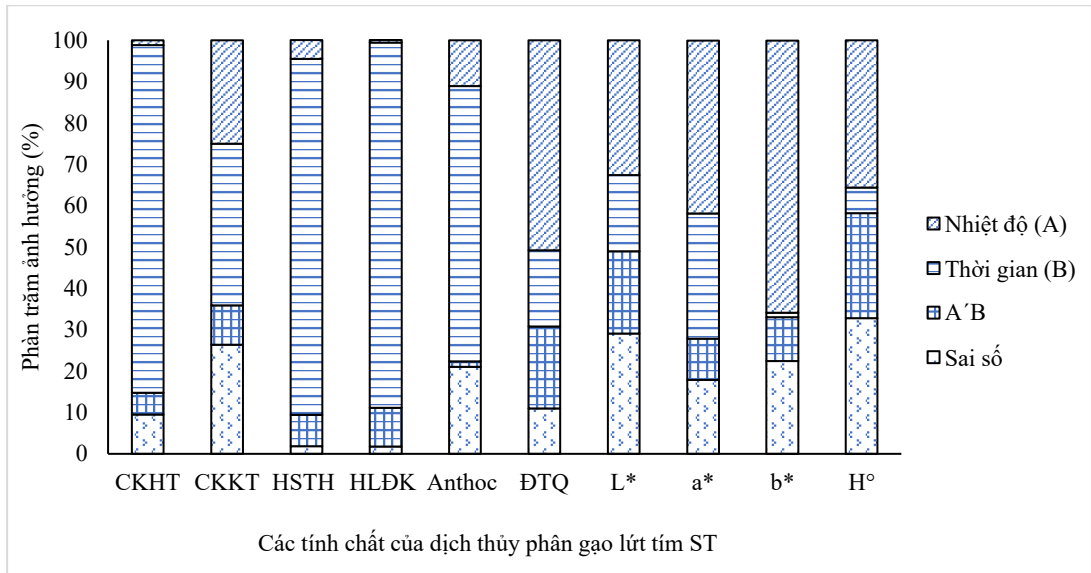
Bảng 1. Trung bình bình phương các chỉ tiêu của dịch thủy phân theo nhiệt độ và thời gian thủy phân

Trung bình bình phương										
Nhân tố	CKHT	CKKT	HSTH	HLĐK	Anthoc	ĐTQ	L^*	a^*	b^*	H^o
Nhiệt độ (A)	0,07	0,49**	18,2***	4,59	2,62*	0,02***	19,6**	32,5***	11,2***	183**
Thời gian (B)	5,21***	0,77***	345***	649***	15,6***	0,01***	11,0*	23,6***	0,19	31,9
A x B	0,16	0,09	15,2***	34,4***	0,16	0,003 ***	5,96*	3,86	0,91	65,5*
Sai số	0,07	0,06	0,83	1,43	0,55	0,0004	1,94	1,56	0,43	18,8

Chú thích: ***: $p < 0,001$; **: $0,001 < p < 0,01$; *: $0,01 < p < 0,05$; CKHT: chất khô hòa tan; CKKT: chất khô không tan; HSTH: hiệu suất thu hồi; HLĐK: hàm lượng đường khử; Anthoc.: hàm lượng anthocyanin; ĐTQ: độ truyền quang

Dựa trên số liệu ở **Hình 1**, nhiệt độ thủy phân thể hiện mức độ ảnh hưởng lớn đến các chỉ tiêu màu sắc và độ trong của dịch thủy phân. Cụ thể, nhiệt độ tác động mạnh nhất đến giá trị b^* (65,78%), tiếp theo là độ truyền quang (50,8%) và giá trị a^* (41,8%). Ngoài ra, nhiệt độ còn ảnh hưởng ở mức trung bình đến thông số màu H^o (35,6%), nồng độ chất khô không tan (25,0%), giá trị L^* (32,6%) và hàm lượng anthocyanin (11,1%).

Trong khi đó, thời gian thủy phân ảnh hưởng mạnh đến hàm lượng đường khử (88,3%), hiệu suất thu hồi (86,1%), nồng độ chất khô hòa tan (84,1%) và hàm lượng anthocyanin (66,5%). Thời gian cũng tác động ở mức trung bình đến nồng độ chất khô không tan (39,1%), giá trị a^* (30,3%), giá trị L^* (18,4%) và độ truyền quang (18,4%). Bên cạnh đó, sự tương tác giữa nhiệt độ và thời gian thủy phân có ảnh hưởng ở mức trung bình đến giá trị L^* (29,3%), thông số màu H^o (25,4%) và độ truyền quang (19,8%).



Hình 1. Phần trăm ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian thủy phân đến màu, hàm lượng anthocyanin và các chỉ tiêu chất lượng của dịch thủy phân gạo lứt tím than (Chủ thích: ***: $p < 0,001$; **: $0,001 < p < 0,01$; *: $0,01 < p < 0,05$; CKHT: chất khô hòa tan; CKKT: chất khô không tan; HSTH: hiệu suất thu hồi; HLĐK: hàm lượng đường khử; Anthoc.: hàm lượng anthocyanin; ĐTQ: độ truyền quang)

Nhìn chung, kết quả này cho thấy nhiệt độ chủ yếu chi phối các chỉ tiêu liên quan đến màu sắc và độ trong, trong khi thời gian thủy phân lại đóng vai trò quan trọng đối với khả năng thủy phân tinh bột, giải phóng đường khử và hiệu suất thu hồi anthocyanin. Sự phối hợp giữa hai yếu tố này giúp kiểm soát tối ưu chất lượng dịch thủy phân, đáp ứng yêu cầu về giá trị dinh dưỡng và cảm quan.

3.1.1. Hàm lượng chất khô hòa tan (CKHT) và không tan (CKKT)

Bảng 2 trình bày ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian thủy phân đến các chỉ tiêu chất lượng của dịch thủy phân gạo lứt tím than, bao gồm hàm lượng chất khô hòa tan (CKHT), chất khô không tan (CKKT), hiệu suất thu hồi (HSTH), hàm lượng đường khử (HLĐK) và hàm lượng anthocyanin.

Kết quả cho thấy, ở cùng một thời gian thủy phân, khi nhiệt độ tăng, hàm lượng CKHT (độ Brix) trong dịch thủy phân có xu hướng tăng, trong khi CKKT giảm dần. Tương tự, ở cùng một mức nhiệt độ, khi thời gian thủy phân tăng, hàm lượng CKHT tiếp tục tăng và CKKT giảm dần. Điều này có thể giải thích là enzyme thủy phân tinh bột nên làm tăng CKHT và giảm CKKT trong khoảng nhiệt độ và thời gian khảo sát

Bảng 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian thủy phân đến CKHT, CKKT, HSTH, HLĐK, và hàm lượng anthocyanin trong dịch thủy phân gạo lứt tím than

Chỉ tiêu	Nhiệt độ (°C)	Thời gian thủy phân (phút)			Trung bình
		5	15	25	
CKHT (%)	75	6,47±0,12	7,40±0,40	8,13±0,31	7,33 ^a ±0,77
	80	6,80±0,20	7,27±0,31	7,93±0,12	7,33 ^a ±0,53
	85	6,47±0,31	7,80±0,20	8,20±0,20	7,49 ^a ±0,81
	Trung bình	6,58 ^A ±0,67	7,49 ^B ±0,62	8,09 ^C ±0,68	
CKKT (%)	75	1,00±0,26	1,21±0,35	0,37±0,29	0,86 ^b ±0,46
	80	0,43±0,19	0,96±0,31	0,39±0,13	0,59 ^a ±0,34
	85	0,39±0,22	0,57±0,20	0,22±0,12	0,39 ^a ±0,22
	Trung bình	0,60 ^B ±0,41	0,91 ^C ±0,38	0,32 ^A ±0,29	
HSTH (%)	75	58,1±1,59	64,7±1,59	66,4±0,44	63,1 ^b ±3,99
	80	53,8±0,07	65,6±0,01	64,7±0,15	61,4 ^a ±5,68
	85	55,6±1,11	65,9±0,29	71,2±0,94	64,2 ^c ±6,90
	Trung bình	55,9 ^A ±5,07	65,4 ^B ±5,07	67,5 ^C ±5,95	

HLĐK (mg/mL)	75	24,1±0,54	25,9±0,66	43,4±0,70	31,1 ^{ab} ±9,23
	80	20,5±0,80	29,2±1,62	40,3±1,63	30,0 ^a ±8,66
	85	27,2±1,50	29,5±1,27	37,3±1,38	31,3 ^b ±4,73
Trung bình		24,0 ^A ±8,13	28,2 ^B ±7,76	40,3 ^C ±7,75	
Anthocyanin (mg/L)	75	14,3±0,42	12,3±0,49	11,5±0,46	12,7 ^b ±1,30
	80	13,0±0,55	11,8±1,17	10,4±0,94	11,8 ^a ±1,42
	85	13,1±0,70	11,6±0,85	10,7±0,74	11,7 ^a ±1,24
Trung bình		13,5 ^A ±1,36	11,9 ^B ±1,12	10,9 ^A ±1,20	

Ghi chú: Số liệu trong bảng là giá trị trung bình của 3 lần lặp lại. Các giá trị có ký hiệu A, B, và C trong cùng hàng thì không khác nhau ở mức ý nghĩa 5% hoặc các giá trị có ký hiệu a, b và c trong cùng cột thì không khác nhau ở mức ý nghĩa 5%. CKHT: chất khô hòa tan; CKKT: chất khô không tan; HSTH: hiệu suất thu hồi; HLĐK: hàm lượng đường khô

Giá trị CKHT tăng dần khi kéo dài thời gian thủy phân, từ 6,58% (5 phút) lên 8,09% (25 phút), và cũng có xu hướng tăng nhẹ khi tăng nhiệt độ. Điều này có thể lý giải do sự phá vỡ cấu trúc tinh bột và màng tế bào ở điều kiện nhiệt độ và thời gian cao, giúp giải phóng nhiều hợp chất hòa tan hơn vào dịch thủy phân [21]. Sự gia tăng CKHT do tăng cường giải phóng đường, acid amin tự do và hợp chất tan khác. Hàm lượng chất khô hòa tan thu được trong nghiên cứu này cao hơn đáng kể so với giá trị 3% (Brix) trong dịch thủy phân bột gạo đen đã nấu chín [22]. Tuy nhiên, kết quả này lại thấp hơn so với hàm lượng chất khô hòa tan đạt 14% (Brix) từ dịch thủy phân bột gạo tím than được xử lý bằng α -amylase và glucoamylase [7]. Sự khác biệt này có thể bắt nguồn từ điều kiện thủy phân (nhiệt độ, thời gian, pH), loại nguyên liệu, cũng như hoạt tính và loại enzyme sử dụng, làm ảnh hưởng đến mức độ phân giải tinh bột và khả năng giải phóng các chất hòa tan.

Ngược lại, CKKT có xu hướng giảm khi kéo dài thời gian thủy phân, từ 0,91% xuống còn 0,32%. Nhiệt độ cao hơn (85°C) kết hợp thời gian dài (25 phút) cho giá trị CKKT thấp nhất (0,22%), cho thấy quá trình thủy phân diễn ra triệt để, các phần tử không tan bị phá vỡ hoặc chuyển hóa thành dạng hòa tan. Điều này được giải thích bởi khả năng hoạt động mạnh hơn của enzyme hoặc khả năng phá vỡ mạng lưới tinh bột ở nhiệt độ cao, giúp giảm lượng chất không tan còn lại [6].

Cùng nhiệt độ thủy phân, nồng độ chất khô hòa tan tăng theo chiều thuận của thời gian thủy phân. Enzyme α -amylase có khả năng phân cắt ngẫu nhiên liên kết α -1,4 glycoside của phân tử hồ tinh bột nhanh chóng để tạo ra các thành phần đơn giản hơn (dextrin phân tử lượng thấp, maltose, glucose). Vì bản chất của quá trình thủy phân bằng enzyme α -amylase chính là tinh bột bị chuyển thành maltotetrose, maltose, glucose và dextrin phân tử thấp. Điều này đã làm cho nồng độ chất khô tăng. Nhưng tăng đến một giới hạn nào đó thì sẽ tăng không đáng kể vì enzyme amylase thủy phân ở vị trí α -1,4-glycoside tuy nhiên càng kéo dài thời gian thì vị trí này ngày càng giảm vì thể enzyme không còn thủy phân được nhiều như lúc đầu nữa [23].

3.1.2. Hiệu suất thu hồi (HSTH)

Quá trình thủy phân do enzyme alpha amylase chủ yếu chuyển tinh bột thành hòa tan (dextrin, maltose và glucose) giúp tăng hàm lượng chất khô hòa tan từ đó làm tăng hiệu suất thu hồi. **Bảng 2** cho thấy rằng hiệu suất thu hồi tăng dần theo thời gian và nhiệt độ, đạt cao nhất ở 85°C, 25 phút (71,2%). Sự gia tăng này phản ánh hiệu quả chuyển hóa tinh bột thành các sản phẩm hòa tan, đồng thời cho thấy điều kiện nhiệt độ và thời gian thích hợp giúp tăng khả năng thu hồi dịch thủy phân. Tuy nhiên, ở mức nhiệt quá cao, enzyme có thể bị bất hoạt hoặc biến tính, nhưng trong trường hợp này, nhiệt độ 85°C vẫn nằm trong giới hạn tối ưu.

Tương tự Dias et al. (2017) [24], bột gạo đen sau hồ hóa được thủy phân trong 2,5 - 4,0 giờ ở 80°C với nồng độ enzyme 0,2% thì hiệu suất thủy phân tăng mạnh từ 65,7% (2,5 giờ) lên 90,34% (3,0 giờ), tương ứng mức tăng gần 25% trong 30 phút. So với kết quả hiện tại (71,2%), sự khác biệt có thể do khác biệt về nguyên liệu, thời gian, loại và nguồn gốc enzyme. Đặc biệt, thời gian thủy phân dài hơn giúp tinh bột trương nở và phân rã tốt hơn, làm giảm lượng bã và tăng hiệu suất thu hồi sản phẩm. Sự khác biệt này có thể giải thích rằng khi nguyên liệu thủy phân khác nhau và các yếu tố khác như thời gian thủy phân, nồng độ enzyme, loại enzyme và nguồn gốc của enzyme, cũng ảnh hưởng rất lớn đến hiệu suất thủy phân. Điều khác biệt nhìn thấy rõ là thời gian thủy phân, khi thời gian càng dài thì các hạt tinh bột được hút nước trương nở ban đầu sẽ dần dần bị phá vỡ chia nhỏ ra, vậy nên lượng bã sau quá trình thủy phân thu được khá ít, dẫn đến hiệu suất thu hồi sản phẩm tăng.

3.1.3. Hàm lượng đường khử (HLĐK)

Bảng 2 cho thấy rằng HLĐK tăng mạnh từ 24,0 mg/mL (5 phút) lên 40,3 mg/mL (25 phút). Thời gian thủy phân dài tạo điều kiện cho quá trình phân cắt các liên kết α -1,4-glucosidic, giải phóng nhiều glucose và maltose hơn. Tuy nhiên, khi so sánh giữa các nhiệt độ, mức tăng HLĐK không hoàn toàn tỷ lệ thuận với nhiệt độ cao nhất. Cụ thể, ở 85°C và 25 phút, HLĐK (37,3 mg/mL) thấp hơn so với 75°C (43,4 mg/mL), có thể do đường khử bị phân hủy hoặc phản ứng Maillard xảy ra ở nhiệt độ cao [25].

Kết quả có sự tương đồng với nghiên cứu khác cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ, thời gian và nồng độ của α -amylase trong quá trình thủy phân tinh bột từ gạo huyết rồng [26]. Nghiên cứu cho thấy độ Brix và hàm lượng đường khử của dịch thủy phân tăng có ý nghĩa khi tăng thời gian thủy phân từ 10 lên 40 phút và đạt giá trị cao nhất sau khi thủy phân ở thời gian 40 phút, cụ thể độ Brix là 12,45% và hàm lượng đường khử là 9,32%. Hàm lượng đường khử luôn được theo dõi trong suốt quá trình thủy phân và có xu hướng tăng lên tương tự như nồng độ chất khô hòa tan (độ Brix). Hàm lượng chất khô hòa tan và hàm lượng đường khử có mối quan hệ mật thiết với nhau vì khi đường khử glucose được sinh ra trong quá trình thủy phân thì làm tăng nồng độ chất khô hòa tan trong dung dịch và độ ngọt sẽ tăng dần theo hàm lượng đường glucose.

3.1.4. Hàm lượng anthocyanin

Bảng 2 cho thấy rằng hàm lượng anthocyanin giảm dần theo cả nhiệt độ và thời gian, từ 13,5 mg/L (5 phút) xuống 10,9 mg/L (25 phút). Anthocyanin vốn nhạy cảm với nhiệt, dễ bị phân hủy hoặc biến đổi cấu trúc, dẫn đến suy giảm nồng độ khi xử lý ở nhiệt độ cao hoặc thời gian dài [9]. Ngoài ra, hiện tượng oxy hóa cũng có thể góp phần làm giảm anthocyanin, đồng thời ảnh hưởng đến màu sắc và giá trị dinh dưỡng của dịch thủy phân.

Mỗi hợp chất anthocyanin sẽ có cấu tạo khác nhau và tương ứng độ bền nhiệt độ khác nhau, kể từ 75°C trở đi thì các hợp chất màu anthocyanin có trong gạo tím than có xu hướng bị biến tính, phân hủy, mất màu. Khi đun nóng lâu với khoảng thời gian nhất định và nhiệt độ tăng dần dần đến hàm lượng anthocyanin có thể bị biến tính, phân hủy, mất màu và giảm [1]. Hàm lượng anthocyanin thu được trong sữa tím than ST nghiên cứu này (10,9 - 14,3 mg/L) cao hơn đáng kể so với giá trị 1,32% và 2,89 mg/L trong sữa gạo tím than [7].

3.1.5. Độ truyền quang

Độ truyền quang (T%) biểu thị phần trăm tia sáng xuyên qua dung dịch, qua đó thể hiện độ trong của dung dịch [18]. **Bảng 3** cho thấy cả nhiệt độ và thời gian thủy phân ảnh hưởng đáng kể đến các chỉ tiêu màu sắc (L^* , a^* , b^* , H^o) và độ truyền quang (%T) của dịch thủy phân gạo lứt tím than. Độ truyền quang giảm khi kéo dài thời gian thủy phân, từ trung bình 0,19%T (5 phút) xuống 0,15%T (15 và 25 phút). Nhiệt độ cao hơn (80°C và 85°C) nhìn chung có độ truyền quang thấp hơn so với 75°C, đặc biệt ở 80°C (trung bình 0,12%T), cho thấy dịch thủy phân trở nên đục hơn khi gia tăng nhiệt độ và thời gian.

Điều này có thể được lý giải do sự gia tăng nồng độ các hợp chất hòa tan (CKHT) và giải phóng các chất keo, polyphenol, và protein hòa tan, làm cản trở đường truyền sáng [9] và [27]. Ngoài ra, sự biến tính protein hoặc kết tủa polysaccharide cũng góp phần làm giảm độ trong. Trong quá trình thủy phân, các phân tử tinh bột được phân cắt thành các phân tử nhỏ (dextrin, maltose, glucose) từ đó giúp dịch thủy phân trong và tăng độ truyền quang [28]. Mặt khác, một số phân tử khác như protein và lipid có thể liên kết với nhau và làm giảm độ trong và khả năng truyền quang [29].

Bảng 3. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian thủy phân đến giá trị màu sắc (L^* , a^* , b^* , và H^o) và độ truyền quang

Chỉ tiêu	Nhiệt độ (°C)	Thời gian thủy phân (phút)			Trung bình
		5	15	25	
ĐTQ (%T)	75	0,22±0,025	0,20±0,040	0,18±0,016	0,21±0,031
	80	0,12±0,018	0,11±0,005	0,13±0,026	0,12±0,019
	85	0,24±0,010	0,12±0,015	0,14±0,012	0,17±0,054
	Trung bình	0,19 ^B ±0,054	0,15 ^A ±0,051	0,15 ^A ±0,045	
L^*	75	16,5±1,24	16,7±1,43	16,9±1,18	16,7±1,13
	80	16,6±1,41	17,5±1,39	18,9±1,79	17,7±1,68
	85	17,1±0,94	22,1±0,87	19,6±1,95	19,6±2,45

Trung bình		16,7 ^A ±1,40	18,8 ^B ±2,18	18,5 ^B ±2,20	
a*	75	14,3±0,89	11,7±1,62	9,31±1,49	11,7 ^b ±2,46
	80	9,19±0,06	10,7±0,90	7,71±1,95	9,19 ^a ±1,67
	85	9,34±0,50	8,26±0,70	6,47±1,73	8,03 ^a ±1,58
Trung bình		10,9 ^B ±2,28	10,2 ^B ±1,63	7,83 ^A ±1,65	
b*	75	2,77±0,83	3,17±0,48	3,03±0,92	2,99 ^b ±0,69
	80	1,05±0,28	0,85±0,60	1,71±0,90	1,21 ^a ±0,68
	85	0,93±0,77	1,58±0,41	0,28±0,22	0,93 ^a ±0,72
Trung bình		1,58 ^A ±1,15	1,87 ^A ±1,08	1,68 ^A ±1,00	
Góc màu H°	75	10,9±2,51	15,2±0,20	18,4±6,67	14,8 ^b ±4,86
	80	6,54±1,78	4,64±3,48	13,4±8,65	8,21 ^a ±6,21
	85	5,67±4,76	10,8±1,90	2,24±1,29	6,22 ^a ±4,55
Trung bình		7,69 ^A ±6,44	10,2 ^A ±6,41	11,4 ^A ±6,73	

Ghi chú: Số liệu trong bảng là giá trị trung bình của 3 lần lặp lại. Các giá trị có ký hiệu A, B, và C trong cùng hàng thì không khác nhau ở mức ý nghĩa 5% hoặc các giá trị có ký hiệu a, b và c trong cùng cột thì không khác nhau ở mức ý nghĩa 5%. ĐTQ, độ truyền quang

3.1.6. Giá trị màu (L*, a*, b*, và H°)

Kết quả thống kê các giá trị màu (L*, a*, b* và H°) của dịch gạo thủy phân cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các điều kiện nhiệt độ và thời gian thủy phân, đặc biệt nhiệt độ đóng vai trò quyết định (**Hình 1** và **Bảng 3**).

3.1.6.1. Giá trị L* (độ sáng)

Giá trị L* có xu hướng tăng nhẹ khi kéo dài thời gian, từ 16,7 (5 phút) lên 18,5 - 18,8 (15 và 25 phút), và tăng đáng kể khi nhiệt độ tăng, đặc biệt tại 85°C (19,6). Sự gia tăng độ sáng này có thể liên quan đến sự giảm anthocyanin (hợp chất tạo màu tím đặc trưng), dẫn đến dịch thủy phân có màu sáng hơn. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Patras và cộng sự (2010) [9], khi anthocyanin bị phân hủy nhiệt dẫn đến giá trị L* tăng.

3.1.6.2. Giá trị a* (màu đỏ)

Giá trị a* giảm dần khi kéo dài thời gian, từ trung bình 10,9 (5 phút) xuống 7,83 (25 phút), và thấp hơn rõ rệt ở nhiệt độ cao hơn. Tại 85°C, a* giảm còn 6,47 sau 25 phút. Điều này phản ánh sự suy giảm anthocyanin, vốn là nhóm sắc tố chính tạo màu đỏ-tím trong gạo lứt tím than [2]. Sự suy giảm này được lý giải do quá trình phân hủy cấu trúc anthocyanin hoặc phản ứng oxy hóa, làm mất màu đặc trưng [30].

3.1.6.3. Giá trị b* (màu vàng)

Giá trị b* nhìn chung không thay đổi nhiều và duy trì ở mức thấp (1,58 - 1,87), không có xu hướng rõ rệt theo thời gian hoặc nhiệt độ. Điều này có thể do b* chủ yếu chịu ảnh hưởng của các hợp chất carotenoid hoặc sản phẩm oxy hóa màu nâu, nhưng các hợp chất này ít hiện diện trong gạo lứt tím than [26].

3.1.6.4. Góc màu H° (hue angle)

Giá trị H° thể hiện góc màu với độ lớn dao động khá lớn (7,69 - 11,4) và không có sự khác biệt thống kê rõ rệt giữa các mức thời gian ($p > 0,05$). Tuy nhiên, giá trị H° có xu hướng tăng khi kéo dài thời gian ở 75°C (từ 10,9 lên 18,4), phản ánh sự chuyển dịch từ tông đỏ sang tông vàng nhẹ, do mất anthocyanin và thay đổi tỉ lệ các sắc tố [31].

3.1.7. Mối tương quan giữa các chỉ tiêu chất lượng của dịch gạo tím than thủy phân

Các hệ số tương quan Pearson để kiểm tra mối quan hệ giữa các chỉ tiêu chất lượng (hàm lượng chất khô hòa tan, hàm lượng chất khô không tan, hiệu suất thu hồi, hàm lượng đường khử, hàm lượng anthocyanin, độ truyền quang, giá trị màu L*, a*, b* và H°) các nhân tố nhiệt độ và thời gian thủy phân được trình bày trong **Bảng 4**. Các hệ số tương quan (r) giúp minh bạch mối liên hệ giữa thành phần hóa học, hiệu suất và các chỉ tiêu màu sắc.

Thời gian thủy phân có mối tương quan rất mạnh ($p < 0,001$) và thuận chiều với CKHT ($r = 0,91$), HSTH ($r = 0,87$), và HLĐK ($r = 0,91$). Điều này chứng tỏ kéo dài thời gian thủy phân giúp tăng giải phóng các hợp chất hòa tan, tăng hiệu suất thu hồi và tăng lượng đường khử [25]. Ngược lại, thời gian có tương quan nghịch chiều mạnh với anthocyanin ($r = -0,81$), cho thấy kéo dài thủy phân làm giảm hàm lượng anthocyanin do phân hủy nhiệt và oxy hóa [2].

Bảng 4. Hệ số tương quan giữa các chỉ tiêu chất lượng dịch gạo lứt tím than thủy phân ở nhiệt độ và thời gian thủy phân khác nhau

	Nhiệt độ	Thời gian	CKHT	CKKT	HSTH	HLĐK	ĐTQ	Anthoc	L	a	b
CKHT	0,09										
CKKT	-0,50**	0,91***									
HSTH	0,09	0,87***	-0,45*								
HLĐK	0,01	0,91***	0,85***	-0,06							
ĐTQ	-0,30	-0,34	-0,42*	0,22	0,69***						
Anthoc.	-0,28	-0,81***	-0,71***	0,27	-0,31	-0,14					
L	0,56**	0,34	0,44*	-0,21	-0,68***	-0,67***	0,46*				
a	-0,63***	-0,53**	-0,56**	0,64***	0,46*	0,24	-0,29	-0,44*			
b	-0,75***	0,03	0,02	0,38	-0,37	-0,50**	0,50**	0,59**	-0,35		
H°	-0,57**	0,24	0,23	0,16	-0,01	0,04	0,37	0,22	-0,29	0,48*	
					0,10	0,26	0,15	-0,03	-0,18	0,10	0,90***

Chú thích: ***: $p < 0,001$; **: $0,001 < p < 0,01$; *: $0,01 < p < 0,05$; CKHT, chất khô hòa tan; CKKT, chất khô không tan; HSTH, hiệu suất thu hồi; HLĐK, hàm lượng đường khử; Anthoc., hàm lượng anthocyanin; ĐTQ, độ truyền quang

CKHT có tương quan thuận chiều mạnh với HSTH ($r = 0,85$), phù hợp với cơ chế: tăng chất khô hòa tan làm tăng tổng hiệu suất thu hồi. Ngoài ra, CKHT cũng tương quan thuận chiều mạnh với HLĐK ($r = 0,78$), phản ánh sự giải phóng đồng thời các oligosaccharide và đường khử [10]. CKKT lại có tương quan nghịch chiều với CKHT ($r = -0,45$; $p < 0,05$) và với HSTH ($r = -0,71$; $p < 0,001$), cho thấy khi các thành phần không tan giảm, thành phần hòa tan và hiệu suất tăng.

Anthocyanin tương quan nghịch chiều mạnh với thời gian ($r = -0,81$), CKHT ($r = -0,71$), và HSTH ($r = -0,71$). Điều này nhấn mạnh sự thoái hóa anthocyanin khi quá trình thủy phân kéo dài, cùng lúc tăng giải phóng tinh bột và đường [29]. Ngoài ra, anthocyanin có tương quan thuận chiều với a^* ($r = 0,50$; $p < 0,01$) và L^* ($r = 0,46$; $p < 0,05$), cho thấy mức độ đỏ (a^*) và sáng (L^*) chịu tác động trực tiếp bởi hàm lượng anthocyanin. Khi anthocyanin giảm, dịch thủy phân trở nên ít đỏ và sáng hơn [31].

Giá trị màu a^* quan hệ thuận chiều mạnh với HLĐK ($r = 0,64***$), nhưng nghịch chiều với nhiệt độ ($r = -0,63$) và thời gian ($r = -0,53$; $p < 0,01$). Điều này phản ánh rằng ở điều kiện nhẹ hơn, anthocyanin và màu đỏ được bảo toàn tốt hơn. Ngược lại, b^* và H° có tương quan nghịch chiều rõ rệt với nhiệt độ (b^* : $r = -0,75$; $p < 0,001$; H° : $r = -0,57$; $p < 0,01$), điều này cho thấy nhiệt độ cao không những làm giảm anthocyanin mà còn chuyển màu dịch thủy phân sang tông xám hoặc ít bão hòa hơn. Đặc biệt, H° có tương quan thuận chiều rất mạnh với b^* ($r = 0,90$; $p < 0,001$), khẳng định góc màu phụ thuộc nhiều vào thành phần màu vàng và các biến đổi oxi hóa của sắc tố.

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian thủy phân dịch gạo đến giá trị cảm quan của sữa gạo tím than đóng chai tiệt trùng

Các mẫu dịch gạo thủy phân được bổ sung với các phụ liệu giống nhau về thành phần (xanthan gum, sữa gầy, đường saccharose) với cùng hàm lượng. Sau khi lọc, đồng hóa và bài khí, các chai sữa gạo được tiệt trùng với $T_{ref} = 121^\circ\text{C}$ và $z = 10^\circ\text{C}$ đạt thời gian chết nhiệt $F = 7,71$ phút. Sau khi tiệt trùng và làm nguội, sữa gạo được đánh giá cảm quan và thống kê như **Bảng 5**.

Bảng 5 cho thấy tác động của nhiệt độ và thời gian thủy phân đến các chỉ tiêu cảm quan (trạng thái, màu sắc, mùi và vị) của sản phẩm dịch gạo lứt tím than.

Điểm trạng thái dao động từ 4,27 đến 4,83, trong đó mẫu thủy phân ở 80°C trong 15 phút đạt giá trị cao nhất (4,83), khác biệt có ý nghĩa so với nhiều mẫu khác ($p < 0,05$). Ở nhiệt độ và thời gian thích hợp, dịch có trạng thái mịn, đồng nhất, ít lợn cợn, điều này có thể liên quan đến mức giải phóng polysaccharide và protein, giúp cải thiện độ sánh và kết cấu [21]. Ngược lại, ở thời gian quá ngắn hoặc quá dài, trạng thái giảm nhẹ, có thể do chưa đủ thủy phân hoặc sản phẩm phụ tích tụ làm dịch kém mịn hơn.

Điểm màu sắc dao động từ 4,29 đến 4,90, mẫu 80°C - 15 phút đạt điểm cao nhất (4,90). Nhiệt độ và thời gian vừa phải giúp giữ được màu tím đặc trưng do anthocyanin, nhưng tránh phân hủy mạnh. Nếu thời gian kéo dài (25 phút), anthocyanin bị phân hủy đáng kể, dẫn đến màu nhạt hơn [2] và [9].

Điểm mùi dao động từ 4,13 đến 4,91, với điểm cao nhất cũng ở 80°C trong 15 phút (4,91). Điều này cho thấy mức thủy phân vừa phải giúp giải phóng hợp chất thơm từ gạo lứt tím than mà không phát sinh mùi phụ do phản ứng Maillard hay biến tính protein quá mức [25].

Bảng 5. Giá trị cảm quan sản phẩm từ dịch gạo lứt tím than thủy phân ở nhiệt độ và thời gian khác nhau

Nhiệt độ (°C)	Thời gian (phút)	Chỉ tiêu			
		Trạng thái	Màu sắc	Mùi	Vị
75	5	4,27 ^a ±0,25	4,33 ^a ±0,31	4,30 ^{ab} ±0,30	4,51 ^{bc} ±0,08
	15	4,50 ^{ab} ±0,30	4,34 ^{ab} ±0,08	4,49 ^{ab} ±0,33	4,38 ^{ab} ±0,13
	25	4,42 ^{ab} ±0,20	4,39 ^{ab} ±0,14	4,40 ^{ab} ±0,18	4,36 ^{ab} ±0,24
80	5	4,37 ^a ±0,32	4,47 ^{ab} ±0,42	4,20 ^{ab} ±0,17	4,53 ^{bc} ±0,06
	15	4,83 ^b ±0,11	4,90 ^c ±0,10	4,91 ^c ±0,08	4,88 ^c ±0,07
	25	4,29 ^a ±0,26	4,29 ^a ±0,30	4,13 ^a ±0,15	4,44 ^{ab} ±0,19
85	5	4,40 ^a ±0,10	4,73 ^{bc} ±0,15	4,30 ^{ab} ±0,26	4,27 ^{ab} ±0,25
	15	4,33 ^a ±0,06	4,40 ^{ab} ±0,20	4,20 ^{ab} ±0,20	4,10 ^a ±0,53
	25	4,57 ^{ab} ±0,38	4,47 ^{ab} ±0,12	4,57 ^{bc} ±0,15	4,56 ^{bc} ±0,11

Ghi chú: Số liệu trong bảng là giá trị trung bình của 3 lần lặp lại. Các giá trị trung bình có cùng chữ cái đi kèm a, b, và c trong cùng một cột thì không khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức 5%

Điểm vị dao động từ 4,10 đến 4,88, cao nhất ở 80°C - 15 phút (4,88). Đặc biệt, thời gian và nhiệt độ quá dài có thể tạo vị đắng hoặc chua nhẹ do phân giải anthocyanin và hình thành các sản phẩm phụ [28]. Ngược lại, điều kiện tối ưu giúp tạo ra vị ngọt dịu cho dịch nhờ lượng đường khử được hình thành từ quá trình thủy phân tinh bột [21]. Ngoài ra, quá trình thủy phân làm giảm độ nhớt, tăng khả năng trích ly các hợp chất hòa tan khác như acid amin và vitamin, từ đó góp phần cải thiện cảm nhận vị giác của sản phẩm [22].

Nhìn chung, kết quả cảm quan cho thấy dịch gạo tím than thủy phân ở 80°C trong 15 phút là điều kiện thích hợp nhất để chế biến sữa gạo, đạt điểm cao nhất ở cả bốn chỉ tiêu cảm quan. Kết quả này thể hiện sự cân bằng giữa khả năng giải phóng các thành phần hòa tan, đồng thời vẫn duy trì được màu sắc và mùi đặc trưng của gạo lứt tím than. Nếu thủy phân ở nhiệt độ 80°C trong 15 phút, dịch gạo tím than được phối trộn và chế biến thì sản phẩm sữa gạo tím than đóng chai tiệt trùng đạt giá trị cảm quan tốt nhất và hàm lượng anthocyanin 8 mg/L. Hàm lượng anthocyanin trong sữa gạo tím đóng chai tiệt trùng của nghiên cứu này vẫn cao hơn so với hàm lượng anthocyanin (1,32 mg/L và 2,89 mg/L) được báo cáo trong sữa gạo tím của [7].

Điều kiện quá ngắn (5 phút) có thể chưa đủ để tạo vị và trạng thái mong muốn, trong khi thời gian dài (25 phút) dễ làm giảm chất lượng cảm quan do mất màu, xuất hiện mùi và vị không mong muốn. Xu hướng này phù hợp với các nghiên cứu cho thấy mức thủy phân trung bình (moderate hydrolysis) thường giúp cải thiện cảm quan, nhờ cân bằng giữa biến đổi cấu trúc và bảo toàn hợp chất chức năng [2, 9].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chứng minh rằng nhiệt độ và thời gian thủy phân đóng vai trò then chốt trong việc kiểm soát các chỉ tiêu chất lượng của dịch thủy phân gạo tím ST, đồng thời ảnh hưởng trực tiếp đến đặc tính cảm quan của sản phẩm sữa gạo tím tiệt trùng. Việc tăng nhiệt độ và kéo dài thời gian thủy phân giúp nâng cao hàm lượng chất khô hòa tan, đường khử và hiệu suất thu hồi, nhưng cũng dẫn đến giảm hàm lượng anthocyanin và độ trong do hiện tượng phân hủy nhiệt và biến tính cấu trúc.

Trong các điều kiện khảo sát, mẫu thủy phân ở 80°C trong 15 phút cho kết quả cảm quan tốt nhất, cân bằng giữa hàm lượng anthocyanin, hiệu quả thủy phân và duy trì màu sắc, mùi, vị đặc trưng của gạo tím. Điều này khẳng định rằng việc tối ưu hóa điều kiện thủy phân là cần thiết để vừa đạt giá trị dinh dưỡng cao, vừa nâng cao chất lượng cảm quan, hướng đến phát triển các sản phẩm sữa gạo tím giàu giá trị thương mại và sức khỏe.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Phòng Kinh Tế, Quận Ninh Kiều, theo mã số 492HD-PKT đề tài nghiên cứu. Trân trọng cảm ơn các tổ chức, cơ quan và cá nhân đã tham gia hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. E.-S. M. Abdel-Aal, J. C. Young, and I. Rabalski, "Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains," *Journal of agricultural and food chemistry*, vol.54, no.13, pp. 4696-4704, 2006
- [2]. J. He and M. M. Giusti, "Anthocyanins: Natural colorants with health-promoting properties," *Annual Review of Food Science and Technology*, vol.1, pp.163–187, 2010.
- [3]. M. U. Ukwuru and A. C. Ogbodo, "Effect of processing treatment on the quality of tigernut milk," *Pakistan Journal of Nutrition*, vol.10, no.1, pp.95-100, 2011.
- [4]. H. Zhaohua, Q. Peiyu, Z. Yan, C. Songhuan and R. Guixing, "Identification of anthocyanins isolated from black rice (*Oryza sativa* L.) and their degradation kinetics," *Food Research International*, vol.50, pp. 691–697, 2013.
- [5]. C. Cheowtiraku, P. Chaijany, P. Jirathumkitku, K. Kriangkraiphapha, M. Ampunsang and D. Ruangcha, "A study on rice-milk production," *Australia Journal of technology*, vol. 4, no. 3, pp. 143-156, 2001.
- [6]. M. J. E. C. Van der Maarel, B. Van der Veen, J. C. M. Uitdehaag, H. Leemhuis and L. Dijkhuizen, "Properties and applications of starch-converting enzymes of the α -amylase family," *Journal of Biotechnology*, vol. 94, no. 2, pp. 137–155, 2002.
- [7]. A. Banyavongsa, T. T. T. Linh, N. Van Tai and N. M. Thuy, "Response surface optimization of enzymatic hydrolysis of purple rice (cultivated in Soc Trang, Vietnam) using amylases and formulation of healthy rice milk," *International Journal of Advances in Agricultural Science and Technology*, vol. 6, no.10, pp. 17-28, 2019.
- [8]. Nguyen Duc Luong. Enzyme Technology, *Ho Chi Minh City University Publishing House*, 2004 [in Vietnamese].
- [9]. A. Patras, N. P. Brunton, C. O'Donnell and B. K. Tiwari, "Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 3–11, 2010.
- [10]. A. B. Arif, K. S. Sasmitaloka and C. Winarti, "Effect of liquefaction time and enzyme addition on liquid sugar production from sweet sorghum starch by enzymatic hydrolysis," *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 250, no. 1, pp. 012042, 2019.
- [11]. E. K. Hadde, T. M. Nicholson & J. A. Y. Cichero, "Rheological characterisation of thickened fluids under different temperature, pH and fat contents," *Nutrition & Food Science*, vol. 45, no. 2, pp. 270-285, 2015
- [12]. J. Gajdoš Kljusurić, M. Benković and I. Bauman "Classification and processing optimization of barley milk production using NIR spectroscopy, particle size, and total dissolved solids analysis," *Journal of Chemistry*, vol.1, pp. 1-7, 2015.
- [13]. O. Luigi. AOAC: Official methods of Analysis, AOAC 967.21 IFU Method No 17. The Association of official chemists 18th ed. Arlington, USA, 2004.
- [14]. V. Paul, A. Singh & R. Pandey, "Estimation of total soluble solids (TSS) laboratory manual on post-harvest physiology of fruits and flowers," *Indian Agricultural Research Institute*, pp. 41-43, 2010.
- [15]. A. Negrulescu, V. Patrutea, M. M. Mincea, C. Ionascu, B. A. Vlad-Oros & V. Ostafe, "Adapting the reducing sugars method with dinitrosalicylic acid to microtiter plates and microwave heating," *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 23, pp. 2176-2182, 2012.
- [16]. J. Lee, R. W. Durst and R. E. Wrolstad, "Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: Collaborative study," *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, Vol. 88, Iss. 5, pp. 1269–1278, 2005.
- [17]. J. Pinyo, P. Luangpituksa, M. Supphantharika, C. Hansawasdi and R. Wongsagonsup, "Effect of enzymatic pretreatment on the extraction yield and physicochemical properties of sago starch," *Starch-Stärke*, vol. 68, no, 1-2, pp. 47-56, 2016.
- [18]. J. H. Hardesty and B. Attili, "Spectrophotometry and the Beer-Lambert Law: An important analytical technique in chemistry," *Collin College, Department of Chemistry*, pp. 1-6, 2010.
- [19]. A. Rodríguez-Mena, L. A.°Choa-Martínez, S. M. González-Herrera, O. M. Rutiaga-Quñones, R. F. González-Laredo, B. Olmedilla-Alonso and S. Vega-Maturino, "Coloring potential of anthocyanins from purple sweet potato paste: Ultrasound-assisted extraction, enzymatic activity, color and its application in ice pops," *Food Chemistry Advances*, vol.3, 2023.

- [20]. M. I. Abou-Dobara, M. M. Ismail & N. M. Refaat, "Chemical composition, sensory evaluation and starter activity in cow, soy, peanut and rice milk," *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 1 - 8, 2016.
- [21]. S. L. Hii, J. S. Tan, T. C. Ling and A. B. Ariff, "Pullulanase: role in starch hydrolysis and potential industrial applications," *Enzyme Research*, vol. 1, 2012.
- [22]. S. R. Pillai, N. Venkatachalapathy, K. S. Kumar and A. Pare, "Effect of roasting and cooking on physiochemical properties of black rice soluble extract," *International Journal of Chemical Studies*, vol. 9, no. 1, pp. 2848-2852, 2021.
- [23]. G. Pereira-Caro, S. Watanabe, A. Crozier, T. Fujimura, T. Yokota and H. Ashihara, H, "Phytochemical profile of a Japanese black–purple rice," *Food Chemistry*, vol. 141, no. 3, pp. 2821-2827, 2013.
- [24]. A. L. D. S. Dias, B. Pachikian, Y. Larondelle and J. Quetin-Leclercq, "Recent advances on bioactivities of black rice, " *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, vol. 20, no. 6, pp. 470-476, 2017.
- [25]. S. I. F. S Martins, W. M. F. Jongen and M. A. J. S. van Boekel, "A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 11, no. 9-10, pp. 364–373, 2000.
- [26]. Duong Thi Ngoc Hanh and Nguyen Minh Thuy, "Use of enzyme – amylase in the hydrolysis of starch from dragon's blood rice starch," *Journal of Science of Can Tho University*, pp. 61-67, 2014 [in Vietnamese].
- [27]. H. Wang, G. Cao and R. L. Prior, "Oxygen radical absorbing capacity of anthocyanins," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 45, no.2, pp. 304–309, 2013.
- [28]. S. Ngamsuk, J. L. Hsu, T. C. Huang and P. Suwannaporn, "Ultrasonication of milky stage rice milk with bioactive peptides from rice bran: Its bioactivities and absorption," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 13, pp. 462-474, 2020.
- [29]. J. Y. Kim, Y. K. Lee and Y. H. Chang, "Structure and digestibility properties of resistant rice starch cross-linked with citric acid," *International Journal of Food Properties*, vol. 20, no.2, pp. 2166-2177, 2017.
- [30]. A. Castañeda-Ovando, M. D. L. Pacheco-Hernández, M. E. Páez-Hernández, J. A. Rodríguez and C. A. Galán-Vidal, "Chemical studies of anthocyanins: A review," *Food Chemistry*, vol.113, no. 4, pp. 859–871, 2009.
- [31]. G. Mazza and E. Miniati, "Anthocyanins in fruits, vegetables, and grains," *CRC Press*, 1993.