

KHAI THÁC PHỤ PHẨM THỰC VẬT GIÀU ANTHOCYANIN KẾT HỢP TINH BỘT KHÁNG TÁI CẤU TRÚC TỪ KHOAI TÂY NHẪM PHÁT TRIỂN HỆ NGUYÊN LIỆU CHO THỰC PHẨM VÀ MỸ PHẨM

Đỗ Phương Khanh^{1*}, Nguyễn Thị Hương¹, Phạm Văn Vũ¹,
Trịnh Minh Khuê¹, Đinh Thị Quỳnh¹

*Tác giả liên hệ, Email: phuongkhanh@hou.edu.vn. ORCID:0009-0006-7418-2937

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 03/03/2026

Ngày phản biện đánh giá: 25/05/2026

Ngày bài báo được duyệt đăng: 25/06/2026

DOI: 10.59266/houjs.2026.1314

Tóm tắt: Tận dụng phụ phẩm nông nghiệp và thay thế màu tổng hợp bằng màu tự nhiên là xu hướng tất yếu trong ngành thực phẩm và mỹ phẩm. Nghiên cứu này thực hiện chiết xuất anthocyanin từ các nguồn phụ phẩm bao gồm vỏ thanh long, vỏ khoai lang tím và cánh/đài hoa đậu biếc phế phẩm bằng phương pháp hỗ trợ siêu âm, sau đó cố định lên nền ma trận tinh bột kháng tái cấu trúc từ khoai tây (RS type 3) bằng kỹ thuật đồng hóa áp suất cao kết hợp sấy thăng hoa. Hiệu suất bao gói đạt từ 78,5% đến 86,2% với hàm lượng anthocyanin tổng số trong phức hợp được định lượng rõ ràng. Hệ phức hợp giữ được độ bền sinh học cao với hơn 82,4% hàm lượng hoạt chất được bảo vệ nguyên vẹn trước tác động của nhiệt độ (80°C trong 3 giờ) và bức xạ UV-C. Đồng thời, hệ nguyên liệu này thể hiện năng lực định hình cấu trúc xuất sắc khi ứng dụng vào hai dòng sản phẩm mô hình là thạch bổ sung chất xơ và gel dưỡng da, mở ra tiềm năng ứng dụng kép linh hoạt.

Từ khóa: anthocyanin phụ phẩm, cố định hoạt chất, độ bền màu, tinh bột kháng

I. Đặt vấn đề

Xu hướng kinh tế tuần hoàn thúc đẩy việc nâng cấp chuỗi giá trị từ phụ phẩm nông nghiệp thành nguyên liệu sinh học có giá trị kinh tế cao (Nguyễn và cộng sự, 2023). Trong đó, vỏ thanh long ruột đỏ, vỏ khoai lang tím và hoa đậu biếc phế phẩm là nguồn sắc tố tự nhiên anthocyanin dồi dào, sở hữu khả năng chống oxy hóa,

kháng viêm và bảo vệ tế bào mạnh mẽ. Tuy nhiên, cấu trúc flavylium cation của anthocyanin kém bền, dễ bị mất màu hoặc chuyển nâu dưới tác động của nhiệt độ, ánh sáng (UV), pH và oxy hóa. Khi ứng dụng vào thực phẩm, sắc tố này bị phân hủy mạnh tại dạ dày (Mattoli và cộng sự, 2020); trong mỹ phẩm, chúng làm giảm hạn sử dụng và giá trị cảm quan sản phẩm (Ali và cộng sự, 2023).

¹ Trường Đại học Mở Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

Để khắc phục, việc sử dụng các hệ mang sinh học thân thiện với môi trường là giải pháp tối ưu (Enaru và cộng sự, 2022; Zhu, 2023). Tinh bột kháng (Resistant Starch - RS) từ khoai tây sau tái cấu trúc sở hữu mạng lưới gel bền vững nhờ quá trình hồi tinh amylose có kiểm soát, tạo ra các hốc vĩ mô và nhóm hydroxyl tự do dồi dào (Xia và cộng sự, 2021). Cấu trúc này lý tưởng để bẫy và cố định các phân tử anthocyanin (Enaru và cộng sự, 2021; Martinez & cộng sự, 2023). Mặc dù việc sử dụng các chất mang truyền thống như maltodextrin hay chitosan đã được khảo sát rộng rãi, khả năng ứng dụng tinh bột kháng tái cấu trúc từ khoai tây làm hệ nền mang sinh học bảo vệ hoạt chất nhạy cảm vẫn chưa được khai thác một cách toàn diện. Theo hiểu biết tốt nhất của chúng tôi, đây là nghiên cứu đầu tiên triển khai việc cố định đồng thời ba nguồn phụ phẩm giàu anthocyanin đại diện (vỏ quả thanh long, vỏ khoai lang tím, và cánh/đài hoa đậu biếc phế phẩm) lên cấu trúc tinh bột kháng khoai tây tái cấu trúc (RS type 3) trong cùng một công trình. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục tiêu đánh giá đồng thời khả năng ổn định hóa của nền RS tái cấu trúc từ khoai tây đối với 3 nguồn anthocyanin phụ phẩm, hướng đến phát triển hệ nguyên liệu đa năng. Điểm tiếp cận này khẳng định tính mới về khả năng ứng dụng kép linh hoạt cho cả phân khúc thực phẩm chức năng và mỹ phẩm.

II. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Nguyên liệu nền: Tinh bột kháng tái cấu trúc từ khoai tây dạng bột mịn (độ ẩm < 14%, hàm lượng RS $55 \pm 2\%$) do Công ty Cổ phần Chăm sóc Sức khỏe Đường ruột Việt Nam (DR. RUỘT) cung cấp.

Phụ phẩm giàu anthocyanin: Vỏ quả thanh long ruột đỏ (*Hylocereus costaricensis*) thu gom từ cơ sở sản xuất nước ép, rửa sạch, lạng bỏ bớt lớp vỏ xanh bên ngoài, giữ lại lớp vỏ đỏ, cắt nhỏ (0,5 x 0,5cm); Vỏ củ khoai lang tím (*Ipomoea batatas* L.) thu từ nhà máy chế biến nông sản, rửa sạch, làm khô; Đài và cánh dập của hoa đậu biếc (*Clitoria ternatea*) loại ra từ trang trại được liệu được làm sạch. Tất cả được sấy lạnh (35°C, độ ẩm < 8%), nghiền búa và rây qua lưới lỗ 0,25 mm, bảo quản trong túi nhôm hút chân không ở 4°C.

Hóa chất và chủng vi sinh: Ethanol phân tích, acid citric, thuốc thử Folin-Ciocalteu, DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), ABTS [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)], chuẩn Cyanidin-3-glucoside (Sigma-Aldrich, Mỹ). Các hóa chất đều đạt tiêu chuẩn tinh khiết phân tích. Các chủng vi khuẩn kiểm tra gồm *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *Escherichia coli* (ATCC 25922) và *Propionibacterium acnes* (ATCC 11827) được cung cấp bởi Viện Kiểm nghiệm Thuốc Trung ương.

2.2. Quy trình trích ly và thu nhận anthocyanin từ phụ phẩm

Bột phụ phẩm được trích ly bằng dung môi ethanol 50% có bổ sung 0,1% acid citric (để ổn định cấu trúc flavylum cation của anthocyanin) trong bể siêu âm (Elmason P300H, Elma, Đức) với tần số 40 kHz, công suất 300 W ở 45°C trong 40 phút, tỷ lệ lỏng/rắn 20:1 mL/g. Dịch chiết được lọc qua giấy lọc Whatman số 1, cô quay chân không (Thiết bị RV10 Digital, IKA, Đức) ở 40°C, áp suất 80 mbar để loại bỏ ethanol, thu dịch chiết anthocyanin đậm đặc. Hàm lượng anthocyanin tổng số

(TAC) được xác định bằng phương pháp vi sai pH theo tiêu chuẩn AOAC 2005.02.

2.3. Kỹ thuật cố định anthocyanin lên nền RS

Phân tán RS vào nước cất tạo dịch huyền phù 10% (w/v), khuấy từ trong 30 phút. Bổ sung dịch chiết anthocyanin đậm đặc vào dịch huyền phù theo tỷ lệ khối lượng chất khô dịch chiết : RS = 1:10 (w/w). Đồng hoá hệ bằng thiết bị cắt cao tốc (Model T25 Digital Ultra-Turrax, IKA, Đức) ở tốc độ 8000 vòng/phút trong 15 phút để các phân tử anthocyanin thâm nhập và hấp phụ vào cấu trúc xốp của RS. Hệ huyền phù sau đó được sấy thăng hoa (Thiết bị Alpha 1-2 LDplus, Christ, Đức) ở nhiệt độ ngưng -55°C, áp suất 0,05 mbar trong 36 giờ để thu được khối bột xốp, nghiền và rây thu được 3 hệ bột phức hợp: RS-TL (Tinh bột kháng cố định anthocyanin từ vỏ thanh long), RS-KT (Tinh bột kháng cố định anthocyanin từ vỏ khoai lang tím), và RS-ĐB (Tinh bột kháng cố định anthocyanin từ hoa đậu biếc). Mẫu đối chứng là dịch chiết anthocyanin tương ứng sấy thăng hoa không có nền RS.

2.4. Đánh giá đặc tính lý hóa và cấu trúc của hệ phức hợp

2.4.1. Hiệu suất cố định (Encapsulation Efficiency - EE%)

Hiệu suất cố định được xác định dựa trên lượng anthocyanin tự do bám bề mặt (C_{surface} súc rửa nhanh bằng ethanol tuyệt đối) và tổng lượng anthocyanin bên trong (C_{total}), phá huỷ hạt bằng dung dịch HCl 1M) theo công thức (Idham và cộng sự, 2012):

$$EE (\%) = \frac{C_{\text{total}} - C_{\text{surface}}}{C_{\text{total}}} \times 100$$

2.4.2. Phân tích tương tác cấu trúc

Trộn mẫu với KBr, ép viên mỏng, quét phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR) trên máy Bruker Tensor 27 (Bruker, Đức) trong dải số sóng 4000-400 cm^{-1} , độ phân giải 4 cm^{-1} .

2.5. Thử nghiệm áp lực đánh giá khả năng ổn định

Độ bền nhiệt: Lưu trữ mẫu trong tủ vi khí hậu (Mettler HPP110, Đức) ở 40°C, 60 °C, 80 °C (3 giờ) và 100 °C (10 phút). Lấy mẫu định lượng hàm lượng anthocyanin còn lại sau mỗi chu kỳ, theo phương pháp mô tả bởi Sui và cộng sự (2016).

Độ bền ánh sáng UV: Mẫu được rải thành lớp mỏng 1 mm trên đĩa petri và đặt trong buồng chiếu bức xạ UV-C (bước sóng 254 nm) liên tục trong 24 giờ, dựa trên quy trình chuẩn hoá của Ge và cộng sự (2012), Yinek và cộng sự (2020).

Độ bền màu theo pH: Hòa tan mẫu vào hệ đệm có pH 2,00-8,00. Đo tọa độ màu (L^* , a^* , b^*) bằng máy đo màu quang phổ (Chroma Meter CR-400, Konica Minolta, Nhật Bản) để xác định các giá trị L^* (độ sáng), a^* (độ đỏ/xanh lục), b^* (độ vàng/xanh lam). Tổng độ biến đổi màu (E) được tính theo công thức (Idham và cộng sự, 2012):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

2.6. Thử nghiệm giải phóng in vitro và hoạt tính sinh học

2.6.1. Tiêu hóa giả lập hướng thực phẩm

Áp dụng quy trình tiêu hóa tĩnh quốc tế (INFOGEST protocol) qua 3 giai đoạn (Brodkorb và cộng sự, 2019):

Miệng (Dịch nước bột giả lập, pH=6,80, 2 phút); Dạ dày (Dịch vị giả lập chứa pepsin, pH=2,00, 120 phút) và Ruột non (Dịch ruột giả lập chứa pancreatin và muối mật, pH=7,40, 120 phút). Lấy mẫu tại các mốc thời gian để ly tâm và xác định tỷ lệ anthocyanin được giải phóng ra môi trường dịch ly hợp.

2.6.2. Khuếch tán qua da giả lập hướng mỹ phẩm

Sử dụng thiết bị Franz Diffusion Cell (Hanson Research, Mỹ) với màng cellulose acetate giả lập màng sinh học trong môi trường đệm phosphate pH=5,50, duy trì ở $32 \pm 0,5^\circ\text{C}$ trong 8 giờ để xác định động học giải phóng hoạt chất, dựa trên phương pháp của Ng và cộng sự (2010).

2.6.3. Hoạt tính sinh học

Đo năng lực khử gốc tự do DPPH và ABTS để xác định giá trị IC_{50} . Khả năng kháng vi khuẩn được thử nghiệm bằng phương pháp khuếch tán trên thạch chống lại vi khuẩn *Propionibacterium acnes*.

2.7. Chế tạo sản phẩm mô hình

2.7.1. Mô hình thạch dinh dưỡng bổ sung chất xơ

Công thức thạch gồm: bột gelatin/agar (1,5%), đường isomalt (10%), acid citric (0,1%), nước cất (83,4%) và bột phức hợp RS-Anthocyanin (5%). Hỗn hợp được nấu chảy, hạ nhiệt độ xuống 60°C , bổ sung bột phức hợp, khuấy đều, rót khuôn

và thanh trùng ở 100°C trong 10 phút.

2.7.2. Mô hình gel dưỡng da

Tạo nên gel bằng cách phân tán chất tạo đặc Carbomer 940 (0,5%) trong nước, trung hòa bằng Triethanolamine. Pha dầu gồm caprylic/capric triglyceride (3%) và chất nhũ hóa polyglyceryl-3 methylglucose distearate (1,5%) được gia nhiệt và phối trộn vào pha gel bằng máy khuấy đồng hóa ở 60°C . Khi hệ nguội xuống 40°C , bổ sung 3% bột phức hợp RS-Anthocyanin. Hệ được ly tâm cấp tốc (4000 vòng/phút trong 30 phút và thử nghiệm đông - rã (3 chu kỳ) để đánh giá độ bền.

2.8. Phân tích thống kê

Thí nghiệm được lặp lại 3 lần ($n=3$). Số liệu được xử lý bằng phần mềm SPSS (phiên bản 26.0) (IBM Corp, Mỹ) bằng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) một nhân tố và kiểm định Duncan ($p < 0.05$).

III. Kết quả và thảo luận

3.1. Hàm lượng anthocyanin tổng số và hiệu suất bao gói

Kết quả định lượng hàm lượng anthocyanin tổng số (TAC) từ các nguồn phụ phẩm thu nhận và hiệu suất bao gói (EE%) trên nền ma trận tinh bột kháng tải cấu trúc từ khoai tây (RS) được thể hiện chi tiết tại Bảng 1.

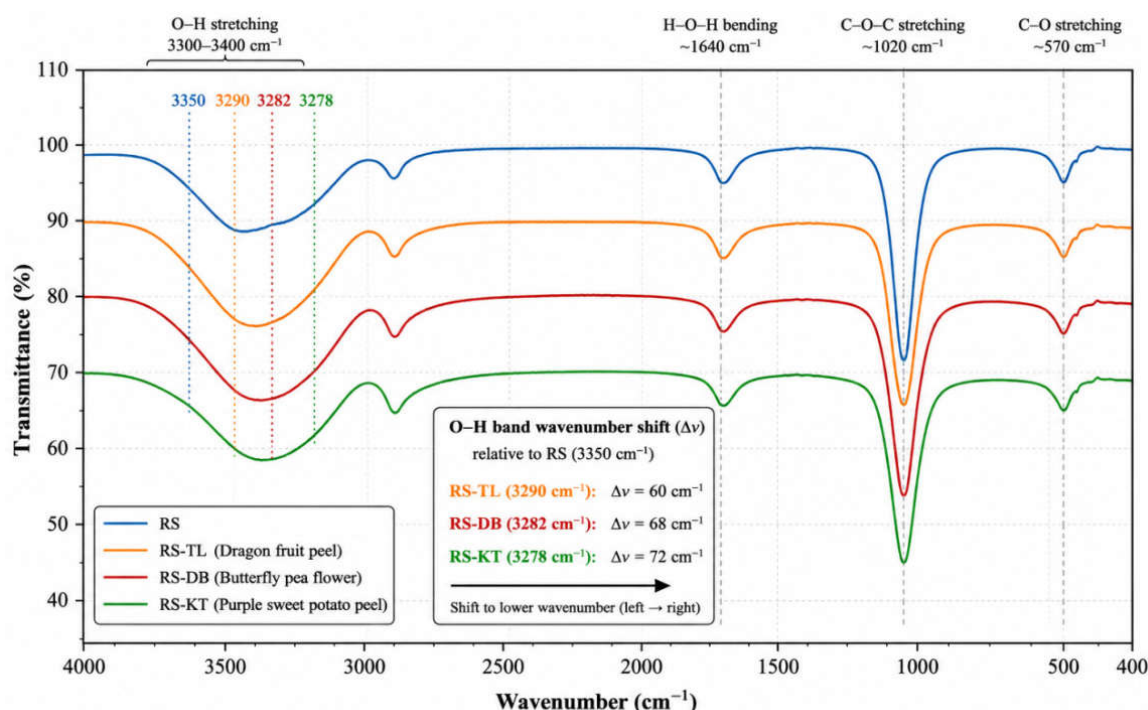
Bảng 1. Hàm lượng anthocyanin tổng số của nguyên liệu và hiệu suất bao gói trên nền RS khoai tây

Nguồn phụ phẩm thực vật	Hàm lượng anthocyanin tổng số (TAC, mg/100g)	Hiệu suất bao gói (EE, %)	Thành phần monomer cấu trúc chủ yếu
Vỏ thanh long	$32,45 \pm 1,12$	$78,50 \pm 1,45$	Betanin, Isobetanin
Vỏ khoai lang tím	$84,12 \pm 2,35$	$82,30 \pm 1,18$	Cyanidin, Peonidin acyl hoá
Hoa đậu biếc phế phẩm	$112,60 \pm 3,18$	$86,20 \pm 2,05$	Hệ Ternatin (Delphinidin glucosides)

Hàm lượng anthocyanin tổng số (TAC) trong nguyên liệu khô đạt: vỏ khoai lang tím $3,42 \pm 0,15$ mg/g; vỏ thanh long ruột đỏ $1,15 \pm 0,08$ mg/g; đài/vỏ hoa đậu biếc phé phẩm $5,84 \pm 0,22$ mg/g. Hiệu suất bao gói (EE%) của nền RS đạt mức cao từ $78,50 \pm 0,90\%$ đến $86,20 \pm 1,12\%$. Sự khác biệt về hiệu suất bao gói phụ thuộc lớn vào cấu trúc phân tử đặc trưng của từng nhóm chất màu. Hợp chất màu trong vỏ thanh long chủ yếu là betanin/isobetanin có cấu trúc mạch vòng kền, do đó hiệu suất cố định đạt 78,5%. Trong khi đó, các monomer thuộc hệ ternatin (delphinidin glucosides) của hoa đậu biếc và các dạng cyanidin/peonidin acyl hóa của vỏ khoai lang tím có cấu trúc phân tử tương thích cao hơn với các hốc liên kết cấu trúc của tinh bột kháng khoai tây dạng hạt tái cấu trúc (RS type 3), giúp hiệu suất bao gói tăng cao rõ rệt, đạt tương ứng 86,2% và 82,3%.

3.2. Đặc điểm cấu trúc hệ phức hợp

Phổ FTIR của tinh bột kháng xuất hiện đỉnh hấp thụ đặc trưng ở dải số sóng $3300 - 3400 \text{ cm}^{-1}$ (dao động kéo giãn của nhóm -OH) và 1020 cm^{-1} (dao động liên kết C-O-C vòng pyranose). Khi hình thành các hệ phức hợp (RS-TL, RS-KT, RS-ĐB), đỉnh phổ -OH dịch chuyển rõ rệt về vùng số sóng thấp hơn (khoảng 3280 cm^{-1}) và mở rộng biên độ. Sự dịch chuyển này là minh chứng cho hiện tượng hình thành các liên kết hydro liên phân tử bền vững giữa các nhóm hydroxyl phenolic của anthocyanin với mạch polysaccharide của hạt RS. Việc không xuất hiện các đỉnh phổ đặc trưng cho liên kết cộng hóa trị mới khẳng định quá trình cố định thuần túy là tương tác vật lý không hóa trị, giúp bảo toàn nguyên vẹn hoạt tính sinh học của sắc tố gốc.



Hình 1. Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) của tinh bột kháng nguyên bản (RS) và các hệ phức hợp RS-Anthocyanin

Sự hình thành liên kết hydro liên phân tử được minh chứng qua phổ FTIR cũng dẫn đến những thay đổi về đặc tính cảm quan của các hệ mẫu. Mẫu RS nguyên bản có dạng bột mịn, màu trắng tinh khiết đặc trưng. Sau quá trình đồng hóa áp suất cao kết hợp sấy thăng hoa cùng dịch chiết anthocyanin, các hệ phức hợp RS-TL, RS-ĐB và RS-KT chuyển sang các màu sắc đặc trưng của nguồn nguyên liệu (lần lượt hồng nhạt, xanh lam nhạt và tím nhạt) với độ đồng đều màu cao. Quan sát bằng mắt thường cho thấy các hạt bột phức hợp có cấu trúc toi xốp, mịn, không xuất hiện hiện tượng phân tách pha màu hoặc vón cục

cục bộ thường thấy ở các dịch chiết sấy khô thông thường. Trạng thái cơ lý đồng nhất này gián tiếp khẳng định các phân tử anthocyanin đã được phân tán cố định vào bên trong các hốc xốp hoặc bám dính đều trên bề mặt ma trận tinh bột kháng, tạo tiền đề cho khả năng định hình cấu trúc trong các sản phẩm ứng dụng.

3.3. Hiệu quả bảo vệ sắc tố trước các tác nhân áp lực

Độ bền màu của các hệ mẫu được theo dõi qua sự thay đổi hệ số màu sắc (L^* , a^* , b^*) và tổng độ biến đổi màu (ΔE) sau các chu kỳ thử nghiệm áp lực.

Bảng 2. Biến đổi màu sắc (ΔE) và tỷ lệ duy trì Anthocyanin (%) sau các tác nhân xử lý (n=3)

Hệ mẫu	Nhiệt độ (80°C/3 giờ)		Ánh sáng (UV/24 giờ)		Bảo quản (25°C/30 ngày)	
	ΔE	% Duy trì	ΔE	% Duy trì	ΔE	% Duy trì
Anthocyanin tự do	14,32 $\pm$ 0,45	41,20 $\pm$ 1,15	18,65 $\pm$ 0,62	32,50 $\pm$ 1,42	11,24 $\pm$ 0,38	53,80 $\pm$ 1,20
RS - TL	3,15 $\pm$ 0,12	82,40 $\pm$ 0,85	4,22 $\pm$ 0,18	79,80 $\pm$ 0,92	2,05 $\pm$ 0,09	88,50 $\pm$ 0,65
RS - KT	2,41 $\pm$ 0,08	88,90 $\pm$ 0,72	3,21 $\pm$ 0,17	85,40 $\pm$ 0,78	1,52 $\pm$ 0,05	92,10 $\pm$ 0,48
RS - ĐB	2,84 $\pm$ 0,10	85,60 $\pm$ 0,90	3,75 $\pm$ 0,15	82,10 $\pm$ 0,88	1,83 $\pm$ 0,07	90,40 $\pm$ 0,55

3.3.1. Tính bền nhiệt

Anthocyanin tự do bị phân hủy nhanh ở 80°C do cấu trúc flavylium cation (tạo màu đỏ/xanh bền) bị thủy phân thành dạng chalcone không màu hoặc carbinol base khiến mẫu chuyển dần sang sắc nâu xỉn ($\Delta E = 14,32 \pm 0,45$). Ngược lại, các hệ mẫu được cố định trên nền RS tái cấu trúc từ khoai tây có tỷ lệ duy trì hoạt chất đạt mức cao ổn định, đặc biệt hệ RS - KT đạt đến 88,90 $\pm$ 0,72%. Mạng lưới tinh bột đóng vai trò như một tấm khiên, làm giảm tốc độ truyền nhiệt trực tiếp vào phân tử anthocyanin và giữ cố định cấu trúc vòng phẳng của sắc tố, ngăn chặn phản ứng mở vòng tạo chalcone.

3.3.2. Tính bền ánh sáng

Dưới tác động chiếu xạ liên tục của tia UV-C trong 24 giờ, mẫu anthocyanin tự do bị đứt gãy các liên kết đôi liên hợp, làm mất đến 67,5% lượng sắc tố ban đầu (chỉ còn duy trì 32,5 $\pm$ 1,42%). Trong khi đó, hệ phức hợp RS-Anthocyanin thể hiện năng lực bảo vệ, giữ chỉ số biến đổi màu (ΔE) ở mức thấp (3,21 $\pm$ 0,17 đến 4,22 $\pm$ 0,18). Cấu trúc hạt RS bao bọc bên ngoài có khả năng tán xạ và hấp thụ phần lớn năng lượng từ tia bức xạ, bảo vệ cho lõi sắc tố bên trong.

3.4. Ảnh hưởng của pH đến sự biến đổi màu sắc của hệ phức hợp

Anthocyanin biến đổi cấu trúc liên tục theo pH: ở vùng pH = 1,00 - 3,00, tồn tại dạng flavylium cation ổn định

(màu đỏ cánh sen/hồng); vùng pH = 4,00 - 6,00, chuyển dịch cấu trúc sang dạng anhydrobase (màu tím/tím xanh); vùng pH = 7,00 - 8,00, biến đổi hẳn sang dạng chalcone mạch hở không màu hoặc kiềm màu xanh lục. Khi khảo sát trên hệ phức hợp RS-Anthocyanin, tốc độ chuyển màu diễn ra chậm hơn và dải màu duy trì ổn định hơn so với mẫu anthocyanin tự do. Ở vùng pH sinh lý của da từ 5,00 - 6,00, hệ mẫu RS-KT và RS-ĐB giữ được sắc tím hồng và xanh indigo sắc nét, lâu xỉn màu. Cấu trúc mạch amylose kết tinh chặt chẽ của RS tạo ra một vi môi trường đậm cục bộ, cản trở sự khuếch tán tự do của các ion H^+ và OH^- từ dung môi bên ngoài tiếp cận phân tử anthocyanin trong lõi, giúp kiểm soát tốt tốc độ đổi màu theo pH.

3.5. Động học giải phóng hoạt chất *in vitro*

3.5.1. Mô hình tiêu hóa giả lập hướng đến ứng dụng thực phẩm

Tại dạ dày (dịch vị giả lập, pH=2,00, chứa pepsin), chỉ 12- 15% lượng anthocyanin tự do bám dính ở bề mặt hạt bị giải phóng ra môi trường. Lượng hoạt chất chính vẫn nằm trong ma trận RS nhờ năng lực kháng lại sự thủy phân của acid và enzyme dạ dày của tinh bột kháng.

Tại ruột non (Dịch ruột giả lập, pH=7,40, chứa pancreatin), tốc độ giải phóng dưới 25%. Lượng RS-Anthocyanin còn nguyên vẹn di chuyển xuống ruột già, tại đây hệ vi sinh đường ruột lên men hoàn toàn RS, giải phóng toàn bộ sắc tố và hoạt chất chống oxy hóa tại đích. Đây là cơ chế mong muốn ở các dòng thực phẩm bảo vệ niêm mạc đại tràng.

3.5.2. Khả năng giải phóng kéo dài hướng đến ứng dụng mỹ phẩm

Tại môi trường đệm pH=5,50 (mô phỏng bề mặt da), hệ phức hợp RS-Anthocyanin thể hiện mô hình giải phóng chậm bền vững, giải phóng đều đặn 5-8% hoạt chất sau mỗi giờ và kéo dài 8 giờ. Cơ chế này giúp cung cấp dưỡng chất chống oxy hóa liên tục cho da, giảm thiểu nguy cơ kích ứng tế bào biểu bì do nồng độ hoạt chất tăng cao đột ngột.

3.6. Hoạt tính chống oxy hóa định hướng ứng dụng

Sự phân hủy cấu trúc anthocyanin làm mất các nhóm hydroxyl phenolic tự do vốn là nguồn cung cấp hydro chủ lực để dập tắt các gốc tự do. Vì vậy, khả năng duy trì hoạt tính chống oxy hóa là thước đo cho hiệu quả bảo vệ của nền RS. Giá trị IC₅₀ càng nhỏ thể hiện hoạt tính chống oxy hóa càng mạnh.

Bảng 3. Hoạt tính chống oxy hóa (IC₅₀, µg/mL) của các hệ mẫu sau 30 ngày bảo quản (n=3)

Hệ mẫu	Mẫu gốc (Ngày 0)		Sau 30 ngày bảo quản	
	DPPH	ABTS	DPPH	ABTS
Anthocyanin tự do	45,20 ± 1,22	32,10 ± 0,95	115,80 ± 3,45	98,40 ± 2,80
RS-TL	48,10 ± 0,98	34,50 ± 1,10	56,20 ± 1,05	42,10 ± 0,88
RS-KT	38,40 ± 0,65	26,80 ± 0,58	42,30 ± 0,78	31,20 ± 0,62
RS-ĐB	40,20 ± 0,82	28,50 ± 0,74	45,60 ± 0,91	33,70 ± 0,75

Sau 30 ngày bảo quản ở điều kiện thông thường (đựng trong lọ thủy tinh màu hồ phách, cất trong tối ở 25±2°C, độ ẩm không khí 60±5%), chỉ số IC₅₀ của mẫu anthocyanin tự do tăng gần 3 lần (từ 45,20±1,22 µg/mL lên 115,80±3,45 µg/mL), thể hiện sự suy giảm hoạt tính do phân hủy cấu trúc.

3.7. So sánh hiệu quả ổn định hóa với các công bố trong và ngoài nước

Bảng 4. So sánh hiệu quả bảo vệ anthocyanin của hệ nền RS với các hệ nền khác

Nguồn Anthocyanin	Vật liệu nền mang	Hiệu suất EE (%)	% Duy trì (Nhiệt độ/UV)	Nguồn tham khảo
Hoa đậu biếc	Chitosan / Alginate	65,4% - 72,0%	55,0% (80°C, 3 giờ)	Nguyễn và cộng sự (2022)
Vỏ khoai lang tím	Tinh bột bắp biến tính	70,5%	62,3% (Ánh sáng)	Zhang và cộng sự (2023)
Đài hoa búp giấm	Maltodextrin, Gum Arabic	68,0%	48,0% (80°C, 2 giờ)	Huỳnh và cộng sự (2024)
Vỏ thanh long, vỏ khoai lang tím, hoa đậu biếc phế phẩm	Tinh bột kháng tái cấu trúc từ khoai tây	78,5% - 86,2%	82,4% - 88,9%	Nghiên cứu này

Nghiên cứu này vượt hơn hệ Chitosan/Alginate của Nguyễn và cộng sự (2022) (EE = 65,4-72,0%) do cấu trúc gel cũ dễ bị co rút. Quy trình tái cấu trúc RS bằng phương pháp hồi tinh amylose có kiểm soát ở đây tạo ra mật độ hóc vĩ mô dày đặc, đồng đều hơn cấu trúc mạch thẳng của tinh bột bắp biến tính từ Zhang và cộng sự (2024). Hệ nền này cũng khắc phục nhược điểm dễ nát, bảo vệ kém của lớp vỏ vô định hình từ Maltodextrin-Gum arabic (Huỳnh và cộng sự, 2024). Việc cấu trúc RS có độ kết tinh cao dạng β tạo ra hàng rào cơ học cản trở sự truyền nhiệt và khuếch tán oxy tự do mạnh hơn các đại phân tử mạch nhánh vô định hình khác.

Các nghiên cứu bao gói anthocyanin phần lớn hướng đến mục tiêu đơn lẻ là bảo

Ngược lại, các hệ mẫu được cố định bằng RS bảo toàn năng lực quét gốc tự do (IC₅₀ chỉ biến động nhẹ). Đặc biệt, mẫu RS-KT thể hiện hoạt tính chống oxy hóa mạnh nhất nhờ sự hiệp lực giữa cấu trúc polyacyl hóa tự nhiên của khoai lang tím và sự bao bọc chắc chắn từ mạng lưới tinh bột kháng.

vệ sắc tố này đi qua hệ tiêu hóa nhằm ứng dụng cho thực phẩm chức năng (Zhang và cộng sự, 2024; Oidtmann và cộng sự, 2012) hoặc khai thác đặc tính nhạy pH của chúng để phát triển màng chỉ thị màu sinh học trong bao bì thông minh (Yong & Liu, 2021). Nghiên cứu này đã định hình một hệ nguyên liệu đáp ứng đồng thời hai phân khúc.

Đối với thực phẩm: So với mô hình giải phóng của Martinez và cộng sự (2023) sử dụng tinh bột gạo (hoạt chất bị giải phóng sớm 45% tại dạ dày), nền RS giữ an toàn hơn 85% anthocyanin đi qua dạ dày và giải phóng hướng đích tại ruột già, nâng cao giá trị cho thực phẩm chức năng.

Đối với mỹ phẩm: Khác với các công bố của Tan và cộng sự (2024) khi sử

dùng silica tổng hợp để kiềm dầu và giữ màu cho kem dưỡng da, hệ phức hợp RS-Anthocyanin vừa hỗ trợ kiểm soát bã nhờn sinh học dựa trên cấu trúc xốp tự nhiên, vừa giải phóng chậm hoạt chất giúp chống lão hóa da mà không sử dụng phụ gia hóa học nhân tạo.

IV. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh tính khả thi và hiệu quả của việc khai thác ba nguồn phụ phẩm thực vật giàu anthocyanin (vỏ thanh long, vỏ khoai lang tím, hoa đậu biếc) kết hợp với tinh bột kháng tái cấu trúc từ khoai tây (RS type 3). Quá trình đồng hóa áp suất cao kết hợp sấy thăng hoa giúp đạt hiệu suất bao gói cao (78,5% - 86,2%), bảo vệ bền vững hoạt chất với tỷ lệ sống sót vượt trên 82,4% dưới các tác nhân khắc nghiệt như nhiệt độ cao và tia UV-C. Việc định hình được cấu trúc của hai sản phẩm mô hình (thạch chức năng và gel mỹ phẩm) khẳng định hệ nguyên liệu này đáp ứng được các tiêu chuẩn công nghệ cho cả hai phân khúc thực phẩm và mỹ phẩm, đóng góp vào xu hướng phát triển kinh tế tuần hoàn và nguyên liệu xanh.

Tài liệu tham khảo

- Ali, A., Devarajan, S., & Riaz, M. (2023). Anthocyanins from dietary sources: A review on their biopharmaceutical properties and mechanisms against skin aging. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 22(4), 1125-1138.
- Enaru, B., Drețcanu, G., Pop, T. D., Stănișlău, A., Diaconeasa, Z. (2021). Anthocyanins: Factors affecting their stability and degradation. *Antioxidants*, 10(12), 1967.
- Ge, J., Yue, P., Li, J., & Chen, X. (2012). Effect of starch type on the physicochemical properties and photostability of anthocyanins microcapsules. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(27), 6920-6927.
- Huynh, Q.T., Nguyen, T.V.L. (2024). Động học phân huỷ sắc tố anthocyanin trong dịch trích đài hoa búp giấm (*Hibiscus sabdariffa* L.) dưới ảnh hưởng của maltodextrin, gum Arabic và gelatin. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 12(2024), 41-50.
- Idham, Z., Muhamad, I. I., & Setapar, S. H. M. (2012). Effect of maltodextrin concentration, inlet temperature and core-to-coating ratio on the encapsulation efficiency of anthocyanin from *Hibiscus sabdariffa* L. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 45(9), 708-715.
- Martinez, M. M., Li, C., & Okon, A. E. (2023). Extrusion-induced retrogradation of potato starch (RS3) as a novel bio-carrier. *Carbohydrate Polymers*, 315, 120952.
- Mattioli, R., Francioso, A., Mosca, L., & Silva, P. (2020). Anthocyanins: Inside and outside the plant cell. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(19), 7015.
- Nguyễn, T. T., Vũ, H. N., và Phạm, Q. T. (2022). Nghiên cứu hiệu suất vi bao hợp chất sinh học bằng hệ chất nền phức hợp chitosan/alginate. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 64(5), 45-51.
- Nguyễn, V. H., Trần, T. M., & Lê, Đ. P. (2023). Ứng dụng mô hình kinh tế tuần hoàn trong quản lý và tái chế phụ phẩm công nghiệp thực phẩm tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 146(5), 85-93.
- Oidtmann, J., Schantz, M., Mäder, K., Baum, M., Berg, S., Betz, M., Kulozik, U., Leick, S., Regold, M., Richling, E. (2012). Preparation and comparative characterization of anthocyanin-loaded chitosan-pectin and chitosan-alginate

- microcapsules or microparticles for gastrointestinal delivery. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(36), 8849-8861.
- Sui, X., Zhang, Y., & Zhou, W. (2016). *In vitro* digestion and thermal stability of anthocyanins is affected by the presence of alginate. *Food Hydrocolloids*, 54, 165-172.
- Tan, C., Zhang, Y., & McClements, D. J. (2024). Dual-functional applications of anthocyanin-loaded polysaccharide complexes in foods and cosmetics. *Trends in Food Science & Technology*, 148, 104510.
- Xia, C., Zhong, L., Wang, J., Zhang, L., Chen, X., Ji, H., Ma, S., Dong, W., Ye, X., Huang, Y., Li, Z., Cui, Z. (2021). Structural and digestion properties of potato starch modified using an efficient starch branching enzyme AqGBE. *Journal of Biological Macromolecules*, 184, 551-557.
- Yinek, M., Cemeroğlu, B., và Karaçam, S. (2020). Degradation kinetics of anthocyanins under UV-C radiation and its comparison with thermal processing. *Food Chemistry*, 310, 125800. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125800>
- Yong, H., & Liu, J. (2021). Active and intelligent packaging films containing anthocyanins: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 484-500.
- Zhang, M., Devahastin, S., & He, X. (2024). Structure and stability of anthocyanins encapsulated in starch-based matrices: A comprehensive review. *Food Hydrocolloids*, 146, 109220.
- Zhu, F. (2023). Interactions between starch and anthocyanins: Characterization, structures, and functions. *Food Chemistry*, 404, 134651.

VALORIZATION OF ANTHOCYANIN-RICH PLANT BY-PRODUCTS IMMOBILIZED ON RECONSTRUCTED POTATO RESISTANT STARCH FOR DEVELOPING FUNCTIONAL FOOD AND COSMETIC INGREDIENTS

Do Phuong Khanh¹, Nguyen Thi Huong¹, Pham Van Vu¹,
Trinh Minh Khue¹, Dinh Thi Quynh¹

Abstract: *The valorization of agricultural by-products and the substitution of synthetic colorants with natural alternatives represent an inevitable trend in the food and cosmetic industries. This study investigated the extraction of anthocyanins from various by-product sources including dragon fruit peels, purple sweet potato peels, and discarded butterfly pea petals/calyces using an ultrasound-assisted method, followed by immobilization onto a reconstructed potato resistant starch matrix (RS type 3) via high-pressure homogenization combined with freeze-drying. The encapsulation efficiency ranged from 78.5% to 86.2%, with the total anthocyanin content within the complexes precisely quantified. The fabricated complexes retained high bio-stability, protecting over 82.4% of the active compounds intact against thermal treatment (80°C for 3 hours) and UV-C radiation. Furthermore, this raw material system demonstrated excellent texturizing and structural properties when incorporated into two model products-fiber-enriched jelly and topical skincare gel thereby opening up flexible potential for dual-functional applications.*

Keywords: *bioactive encapsulation, by-product anthocyanins, color stability, resistant starch*

¹ Institute of Biological and Food Technology, Hanoi Open University, Hanoi, Vietnam