Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Phần B: Nông nghiệp, Thủy sản và Công nghệ Sinh học
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.020

ẢNH HƯỞNG CỦA PECTINASE VÀ CHẾ ĐỘ CÔ ĐẶC CHÂN KHÔNG ĐẾN HÀM LƯỢNG BETACYANIN TRONG DỊCH QUẢ THANH LONG RUỘT ĐỎ *(Hylocereus Polyrhizus)*

Hồ Quốc Việt[1,2*], Nguyễn Thị Kim Tuyến[2], Nguyễn Hữu Thanh[3] và Hà Thanh Toàn[1]
[1]*Viện Công nghệ sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ, Việt Nam*
[2]*Khoa Khoa học thực phẩm và Sức khoẻ, Trường Đại học Kiên Giang, Việt Nam*
[3]*Khoa Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, Trường Đại học An Giang, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): hqviet@vnkgu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 04/11/2025
Sửa bài (Revised): 02/12/2025
Duyệt đăng (Accepted): 30/01/2026

Title: *The Effect of Pectinase and Vacuum Concentration Conditions on Betacyanin Content in Red Dragon Fruit (Hylocereus polyrhizus) Juice*

Author(s): *Ho Quoc Viet[1,2*], Nguyen Thi Kim Tuyen[2], Nguyen Huu Thanh[3] và Ha Thanh Toan[1]*

Affiliation(s): *[1]Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University, Vietnam; [2]Faculty of Food Science and Health, Kien Giang University, Vietnam; [3]Faculty of Agriculture and Natural Resources, An Giang University, Viet Nam National University, Vietnam*

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của enzyme pectinase và điều kiện cô đặc chân không đến hàm lượng betacyanin, hoạt tính chống oxy hóa trong dịch quả thanh long ruột đỏ (Hylocereus polyrhizus). Mẫu được xử lý với các nồng độ pectinase 0,05 – 0,10% trong 15 – 60 phút ở 30 – 40°C, sau đó cô đặc ở áp suất chân không 560 – 680 mmHg đến mức chất khô 18 – 24°Brix. Kết quả cho thấy, điều kiện xử lý với 0,075% enzyme trong 45 – 60 phút, cho hiệu suất thu hồi khoảng 80%, hàm lượng betacyanin 339–345 mg/L và hoạt tính chống oxy hóa cao nhất (IC_{50} = 7,59%). Theo thời gian cô đặc, hàm lượng betacyanin có xu hướng tăng lên do hiện tượng tập trung chất màu, trong khi thay đổi áp suất chân không không ảnh hưởng đáng kể. Việc kết hợp xử lý enzyme ở nồng độ thích hợp với cô đặc chân không cho phép nâng cao hiệu suất thu hồi, bảo toàn sắc tố tự nhiên và hoạt tính sinh học, góp phần nâng cao giá trị sản phẩm từ thanh long ruột đỏ.

Từ khóa: *Betacyanin, cô đặc chân không, hoạt tính chống oxy hóa, pectinase, thanh long ruột đỏ*

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effects of pectinase enzyme treatment and vacuum concentration conditions on the betacyanin content and antioxidant activity of red dragon fruit (Hylocereus polyrhizus) juice. The samples were treated with pectinase at concentrations of 0.05 – 0.10% for 15 – 60 minutes at 30 – 40°C, followed by concentration under vacuum pressures of 560 – 680 mmHg to achieve total soluble solids of 18 – 24°Brix. The results showed that treatment with 0.075% pectinase for 45 – 60 minutes yielded approximately 80% juice recovery, betacyanin contents of 339 – 345 mg/L, and the highest antioxidant activity (IC_{50} = 7.59%). During vacuum concentration, the betacyanin content increased due to pigment concentration, while variations in vacuum pressure had no significant effect. The combination of enzyme treatment at an appropriate concentration and vacuum concentration effectively enhanced juice yield, preserved natural pigments and bioactivity, and contributed to improving the value of red dragon fruit products.

Keywords: *Antioxidant activity, betacyanin, pectinase, red dragon fruit, vacuum concentration*

1. GIỚI THIỆU

Thanh long *(Hylocereus spp.)* là loại trái cây nhiệt đới có giá trị kinh tế và dinh dưỡng cao, được trồng phổ biến tại các quốc gia Đông Nam Á như Việt Nam, Thái Lan, Malaysia, Philippines, Indonesia, cũng như ở miền Nam Trung Quốc và Đài Loan (Sonawane, 2017; Ha et al., 2023). Ở Việt Nam, hai giống thanh long chủ yếu là thanh long ruột trắng *(Hylocereus undatus)* và thanh long ruột đỏ *(Hylocereus polyrhizus)*. Diện tích trồng thanh long tăng nhanh từ 5.512 ha vào năm 2000 lên 55.419 ha vào năm 2018, với sản lượng đạt hơn 1,07 triệu tấn và giá trị xuất khẩu khoảng 1,1 tỷ USD (Trinh et al., 2018; Phan, 2020). Tuy nhiên, sau khi đạt mức diện tích cao nhất khoảng 65.000 ha vào năm 2020, diện tích trồng đã giảm xuống còn khoảng 55.000 ha vào năm 2023, chủ yếu do biến động thị trường và các biện pháp kiểm soát nhập khẩu từ phía Trung Quốc (AGROINFO, 2024).

Thanh long ruột đỏ không chỉ có màu sắc bắt mắt (Liaotrakoon et al., 2013a) mà còn chứa nhiều hợp chất có lợi cho sức khỏe, đặc biệt là betacyanin, nhóm sắc tố tự nhiên tan trong nước (Phan et al., 2017), có khả năng chống oxy hóa mạnh, loại trừ gốc tự do và ức chế sự phát triển của tế bào ung thư (Stintzing et al., 2002; Zou et al., 2005; Wu et al., 2006; Phebe et al., 2009). Tuy nhiên, betacyanin rất dễ bị phân hủy trong quá trình bảo quản và chế biến do chịu ảnh hưởng của nhiệt độ, oxy, ánh sáng, pH,... (Woo et al., 2011). Điều này làm suy giảm màu sắc, giá trị cảm quan cũng như hoạt tính sinh học đặc trưng của sản phẩm từ thanh long (Liu et al., 2008).

Trong công nghệ chế biến dịch quả, việc ứng dụng enzyme pectinase giúp tăng hiệu suất thu hồi dịch, đồng thời cải thiện tính chất cảm quan (Sharma et al., 2017). Bên cạnh đó, công nghệ cô đặc chân không được xem là phù hợp với các sản phẩm giàu betacyanin vì điều kiện áp suất thấp giúp hạ thấp nhiệt độ sôi, hạn chế sự tiếp xúc của dịch quả với oxy và rút ngắn thời gian tiếp xúc nhiệt. Nhờ đó, sự phân hủy nhiệt và oxy hóa betacyanin được hạn chế đáng kể, góp phần bảo toàn giá trị dinh dưỡng và sinh học của sản phẩm (Rosemary et al., 2025). Tuy nhiên, sự ảnh hưởng của hai yếu tố này đến sự ổn định của betacyanin trong dịch quả thanh long ruột đỏ vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của enzyme pectinase và chế độ cô đặc chân không đến hàm lượng betacyanin và hoạt tính chống oxy hóa trong dịch quả thanh long ruột đỏ *(Hylocereus polyrhizus)*. Kết quả nghiên cứu giúp cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng kết hợp enzyme và công nghệ cô đặc phù hợp trong chế biến, điều này góp phần nâng cao chất lượng và giá trị kinh tế của sản phẩm thanh long ruột đỏ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguyên vật liệu

Nguyên liệu được sử dụng trong nghiên cứu là quả thanh long ruột đỏ *(Hylocereus polyrhizus)* được trồng tại tỉnh Trà Vinh, Việt Nam. Thanh long ruột đỏ được thu hoạch ở thời điểm 28 - 30 ngày sau khi hoa nở, khối lượng 300 - 400 g, quả có độ chín đồng đều, vỏ đỏ sậm, không bị nứt hoặc dập nát được chọn làm mẫu thí nghiệm. Sau khi thu hoạch, quả được bảo quản ở nhiệt độ 10 – 12°C và độ ẩm 85 – 90%, thời gian không quá 7 ngày, nhằm duy trì độ tươi và chất lượng ban đầu cho đến khi tiến hành thí nghiệm.

Enzyme pectinase được sử dụng trong nghiên cứu là chế phẩm Pectinex Ultra SP-L (Dittingen, Thụy Sĩ). Thành phần: polygalacturonase, pectinesterase và pectin transeliminase, hoạt tính đạt 26.000 (PG/mL).

Các hóa chất được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: axit citric (Trung Quốc), natri phosphate (Trung Quốc), 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) (Nhật Bản) và dimethyl sulfoxide (DMSO) (Ba Lan). Các hóa chất này được cung cấp bởi Công ty Cổ phần Hóa chất Miền Nam, Thành phố Cần Thơ.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Khảo sát ảnh hưởng của enzyme pectinase đến sự thay đổi betacyanin trong quá trình thu nhận dịch quả thanh long ruột đỏ

Nguyên liệu thanh long ruột đỏ thu mua từ nhà vườn với độ chín phù hợp được bóc bỏ vỏ quả. Phần thịt quả được chà nhuyễn, cho vào keo thuỷ tinh (được gói kín bằng giấy bạc), sau đó enzyme pectinase được bổ sung và khuấy đều. Thí nghiệm được bố trí hoàn toàn ngẫu nhiên với hai nhân tố: thời gian xử lý gồm 15, 30, 45 và 60 phút; và nồng độ pectinase theo tỷ lệ thể tích dịch nghiền (v/v) gồm 0,05%, 0,075% và 0,10%. Nhiệt độ xử lý enzyme pectinase 35±0,5ºC, pH 5÷6 và các thông số thí nghiệm được lựa chọn dựa trên kết quả nghiên cứu đã được công bố của Nur ‘Aliaa et al. (2010), Nguyen et al. (2013), KC et al. (2020) và các thử nghiệm thăm dò trên trái thanh long ruột đỏ cũng đã được thực hiện. Sau thời gian xử lý enzyme, mẫu

được ép và lọc lấy dịch quả và tiến hành phân tích các chỉ tiêu theo dõi.

2.2.2. Khảo sát sự thay đổi betacyanin dịch thanh long ruột đỏ trong quá trình cô đặc chân không

Quá trình cô đặc được thực hiện bằng thiết bị cô đặc chân không kiểu buồng tĩnh (Việt Nam), dung tích 10 L, gia nhiệt bằng nước nóng, có đồng hồ đo nhiệt độ (độ chính xác ±1°C). Áp suất chân không được điều chỉnh bằng bơm chân không, đồng hồ đo áp suất (độ chính xác ±5 mmHg). Mỗi mẻ cô đặc sử dụng 5 L dịch thanh long ruột đỏ, với tỷ lệ nạp đầy buồng cô đặc là 50% dung tích.

Dịch thanh long ruột đỏ được bố trí cô đặc hoàn toàn ngẫu nhiên với ba lần lặp lại ở các áp suất chân không 560, 620 và 680 mmHg, tương ứng với các nhiệt độ sôi xấp xỉ 65 – 68°C, 57 – 60°C và 46 – 49°C (phụ thuộc vào TSS dịch quả tại thời điểm cô đặc). Các mức áp suất được chọn dựa trên khả năng vận hành thực tế của thiết bị và giá trị khuyến nghị trong các nghiên cứu trước đây nhằm giảm thiểu tổn thất sắc tố betacyanin và hợp chất dễ bay hơi (Bozkir & Tekgül, 2022). Nồng độ dịch quả sau cô đặc đạt 18, 21 và 24°Brix, phù hợp làm nguyên liệu cho quá trình chế biến các sản phẩm từ thanh long ruột đỏ, như nước giải khát, rượu vang,...

Quá trình cô đặc được duy trì cho đến khi mẫu đạt nồng độ TSS yêu cầu (18 –2 4°Brix). Sau khi kết thúc, mẫu được làm nguội nhanh đến nhiệt độ phòng, và phân tích các chỉ tiêu theo dõi.

2.3. Phương pháp phân tích

2.3.1. Xác định hiệu suất thu hồi

Hiệu suất thu hồi được xác định theo công thức (Nguyen et al., 2023):

$$\text{Hiệu suất thu hồi (\%)} = \frac{m}{m_0}100$$

Trong đó: m là khối lượng dịch quả thu được (g) và m_o là khối lượng nguyên liệu ban đầu (g).

2.3.2. Phương pháp xác định hàm lượng chất khô hoà tan tổng số (TSS)

Hàm lượng chất khô hòa tan tổng số được xác định bằng phương pháp đo chỉ số khúc xạ, sử dụng khúc xạ kế cầm tay (ATC-1E, Atago, Nhật Bản) với dải đo 0 – 32%, độ phân giải 0,2% và độ chính xác ±0,2%. Quy trình phân tích được thực hiện theo tiêu chuẩn quốc gia TCVN 10375: 2014 (ISO 1743:1982).

2.3.3. Xác định hàm lượng betacyanin

Hàm lượng betacyanin tổng số trong thanh long ruột đỏ được xác định theo phương pháp của Wong and Siow (2015). Trái thanh long sau thời gian bố trí thí nghiệm được tách lấy thịt quả, xay nhuyễn và lọc lấy dịch quả. Mẫu dịch quả thanh long được pha loãng trong dung dịch đệm 0,1 M axit citric (30 mL) và 0,2 M natri phosphate (70 mL) (pH 6,5). Tất cả mẫu thí nghiệm được đo độ hấp thu bằng máy đo quang phổ ở bước sóng 537 nm. Hàm lượng betacyanin tổng số được tính theo công thức:

$$Bc = \frac{Abs*DF*MW*1000}{\varepsilon}; \text{(mg/L)}$$

Trong đó: Bc là hàm lượng betacyanin tổng số (mg/L), Abs là giá trị hấp thụ tại bước sóng 537 nm, DF là hệ số pha loãng, MW là khối lượng phân tử của betacyanin (550 g/mol) và ε là độ hấp thụ phân tử của betacyanin trong nước (60.000 L/mol.cm)

2.3.4. Xác định hoạt tính chống oxy hóa (DPPH-IC_{50})

Hoạt tính chống oxy hóa của dịch quả thanh long ruột đỏ được xác định theo phương pháp của Audina (2019) có bổ sung bước hiệu chỉnh nền màu. Mỗi nồng độ dịch chiết được chuẩn bị ba loại dung dịch:

– Mẫu đối chứng ($A_{control}$) bao gồm: 3,9 mL dung dịch DPPH 0,6 mM trong ethanol 80% và 0,1 mL ethanol 80%.

– Mẫu thử ($A_{test\text{-}raw}$) bao gồm: 3,9 mL dung dịch DPPH 0,6 mM và 0,1 mL dịch chiết.

– Mẫu nền màu ($A_{sample\text{-}blank}$) bao gồm: 3,9 mL ethanol 80% và 0,1 mL dịch chiết để hiệu chỉnh độ hấp thụ do màu tự nhiên của dịch chiết.

Hỗn hợp được ủ ở nhiệt độ phòng trong 60 phút, không ánh sáng và đo độ hấp thụ quang phổ ở bước sóng 515 nm.

Độ hấp thụ của mẫu thử được hiệu chỉnh theo công thức: $A_{test\text{-}corrected} = A_{test\text{-}raw} - A_{sample\text{-}blank}$

Tỷ lệ phần trăm ức chế gốc tự do DPPH được tính theo công thức:

$$\text{\% Inhibition} = \frac{A_{control} - A_{\text{test_corrected}}}{A_{control}}100$$

Dựa vào tỷ lệ % hoạt tính ức chế gốc tự do DPPH, giá trị IC_{50} được tính từ đường hồi quy tuyến tính biểu diễn mối quan hệ giữa % hoạt tính bắt gốc tự do và nồng độ mẫu thử.

Trong nghiên cứu này, hoạt tính bắt gốc tự do DPPH của mẫu rượu vang được đánh giá thông qua giá trị IC_{50}, được định nghĩa là tỷ lệ pha loãng của

mẫu cần thiết để ức chế 50% gốc DPPH ban đầu. Do mẫu thử là sản phẩm thực phẩm dạng lỏng phức hợp và được sử dụng trực tiếp mà không qua bước chiết xuất hay chuyển đổi sang dạng chất khô. Do đó, giá trị IC_{50} được biểu thị theo phần trăm thể tích (% v/v), tương ứng với thể tích mẫu rượu vang trong tổng thể tích dung dịch phản ứng.

Cách biểu thị này phản ánh hiệu quả chống oxy hóa tổng thể của mẫu trong trạng thái nguyên bản, đồng thời cho phép so sánh trực tiếp khả năng bắt gốc DPPH giữa các mẫu rượu vang trong cùng điều kiện thí nghiệm. Giá trị IC_{50} (% v/v) càng thấp cho thấy lượng mẫu cần thiết để đạt 50% khả năng bắt gốc càng nhỏ, đồng nghĩa với hoạt tính chống oxy hóa càng cao.

2.3.5. Phương pháp đo màu

Các thông số màu sắc (L*, a*, b*) được đo bằng máy đo màu Minolta (Model CM-2500D). Giá trị L* tương ứng với độ sáng và dao động từ 0 cho màu đen đến 100 cho màu trắng hoàn hảo, giá trị a* đo mức đỏ khi là số dương, màu xám khi là số không và màu xanh khi là số âm và giá trị b* biểu thị màu vàng khi là số dương, màu xám khi là số không và màu lam khi là số âm (Liaotrakoon et al., 2013b).

2.3.6. Phương pháp thu thập và xử lý số liệu

Phần mềm Microsoft Excel (phiên bản 2021) được sử dụng để tính toán và vẽ các đồ thị. Kết quả thu được trong các thí nghiệm được biểu thị bằng giá trị trung bình. Phần mềm thống kê Statgraphic Centurion (phiên bản 19.01.0002) được sử dụng để phân tích phương sai (Analysis of variance - ANOVA) nhằm thấy được mức độ ảnh hưởng của từng nhân tố cũng như tương tác của các nhân tố đến chỉ tiêu thu nhận và kiểm định mức độ khác biệt ý nghĩa của các nghiệm thức thông qua LSD (Least significant difference: khác biệt có ý nghĩa nhỏ nhất) ở độ tin cậy 95% (giá trị P (Probability - xác suất) nhỏ hơn 0,05).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của enzyme pectinase đến sự thay đổi betacyanin trong quá trình thu nhận dịch quả thanh long ruột đỏ

3.1.1. Hiệu suất thu hồi

Kết quả ở Bảng 1 cho thấy hiệu suất thu hồi dịch quả thanh long ruột đỏ tăng theo thời gian xử lý, từ 15 đến 60 phút, với giá trị trung bình lần lượt 67,58% đến 80,59% (P < 0,05). Điều này chứng tỏ thời gian là yếu tố ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng giải phóng dịch quả. Trong khi đó, các mức nồng độ pectinase 0,05 – 0,1% chỉ tạo ra khác biệt nhỏ về hiệu suất, với giá trị trung bình dao động từ 75,03% đến 77,27%. Đáng chú ý, kết quả phân tích thống kê cho thấy không có sự tương tác giữa nồng độ enzyme và thời gian xử lý, nghĩa là tác động của enzyme không phụ thuộc vào thời gian, và ngược lại.

Bảng 1. Hiệu suất thu hồi (%) dịch quả thanh long ruột đỏ sau khi xử lý enzyme pectinase

Nồng độ enzyme (N)	Thời gian (T)					F-test
	15 phút	30 phút	45 phút	60 phút	Trung bình	
0,05%	66,77±0,15^{a}	75,73±0,15^{b}	79,03±1,07^{cde}	78,57±1,17^{cd}	75,03^{a}	T: *
0,075%	68,10±0,61^{a}	78,73±2,11^{cd}	80,13±1,19^{def}	82,10±0,53^{f}	77,27^{b}	N: *
0,1%	67,87±0,64^{a}	77,57±2,28^{bc}	81,63±0,59^{f}	81,10±1,80^{ef}	77,04^{b}	T × N: ns
Trung bình	67,58^{a}	77,34^{b}	80,27^{c}	80,59^{c}		

*Ghi chú: Các ký tự khác nhau đi kèm theo trung bình nghiệm thức trong cùng một cột hoặc dòng thể hiện sự khác biệt ở mức ý nghĩa (p < 0,05), ns: p > 0,05 và *: p < 0,05.*

Xu hướng này phù hợp với cơ chế thủy phân pectin, trong đó enzyme pectinase cắt đứt các liên kết glycoside trong thành tế bào và lớp trung gian giữa các tế bào, giúp giải phóng dịch bào và giảm độ nhớt (Kashyap et al., 2001). Trong giai đoạn đầu (15 – 45 phút), hiệu suất tăng nhanh (P < 0,05), nhưng khi thời gian xử lý kéo dài (từ 45 đến 60 phút) thì không có sự thay đổi đáng kể. Khi nồng độ enzyme tăng từ 0,05% lên 0,1%, hiệu suất không tăng đáng kể, điều này cho thấy phản ứng đã đạt mức bão hòa enzyme, tương tự cơ chế đã được mô tả trong nghiên cứu enzyme học (Nelson & Cox, 2017).

Kết quả này tương đồng với nhiều nghiên cứu trên các loại trái cây khác. Trong nghiên cứu xử lý xoài bằng enzyme pectinase, Reddy et al. (2020) ghi nhận hiệu suất thu hồi dịch quả đạt trên 90% sau 60 phút khi kết hợp siêu âm với enzyme, tuy nhiên trong điều kiện chỉ sử dụng enzyme, tốc độ gia tăng hiệu suất sau 45 phút cũng giảm rõ rệt. Điều này cho thấy thời gian xử lý có vai trò then chốt nhưng tác động của nồng độ enzyme bị giới hạn khi phản ứng tiến gần trạng thái bão hòa. Trên quả khóm, Tochi

et al. (2009) cho thấy việc bổ sung pectinase ở mức nồng độ thấp (0,03%) đã cải thiện hiệu suất thu hồi dịch quả, song khi kéo dài thời gian phản ứng, mức tăng thêm không đáng kể, khẳng định sự tồn tại của điểm bão hòa trong quá trình thủy phân pectin. Tuy nhiên, khi nồng độ enzyme đạt mức cao, hiệu quả cải thiện không còn rõ rệt, cho thấy ảnh hưởng của enzyme chỉ phát huy trong một phạm vi nhất định trước khi tiến tới trạng thái bão hòa.

Như vậy, kết quả nghiên cứu này không chỉ khẳng định vai trò quan trọng của thời gian xử lý mà còn chỉ ra rằng việc gia tăng nồng độ enzyme trên 0,075% không mang lại hiệu quả đáng kể. Trong quy trình sản xuất thực tế, mức enzyme pectinase vừa phải (0,075%) có thể được lựa chọn để kết hợp với thời gian xử lý khoảng 45 – 60 phút để vừa đảm bảo hiệu suất thu hồi cao (khoảng 80%) vừa tiết kiệm chi phí.

3.1.2. Hàm lượng betacyanin

Kết quả ở Bảng 2 khẳng định rằng hàm lượng betacyanin thu nhận từ dịch quả thanh long ruột đỏ chịu ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê bởi cả hai nhân tố nồng độ pectinase và thời gian xử lý, đồng thời tồn tại tác động tương tác giữa hai yếu tố này. Cụ thể, tại nồng độ 0,075%, hàm lượng betacyanin đạt cao nhất ở thời gian 45 – 60 phút (339,07 – 345,03 mg/L), trong khi ở nồng độ 0,1%, khoảng thời gian xử lý từ 30 đến 60 phút không làm tăng đáng kể. Điều này cho thấy hiệu quả giải phóng sắc tố không phải là kết quả tuyến tính của từng nhân tố riêng lẻ, mà phụ thuộc vào sự kết hợp tối ưu giữa nồng độ enzyme pectinase và thời gian xử lý tác động.

Bảng 2. Hàm lượng betacyanin (mg/L) dịch quả thanh long ruột đỏ sau khi xử lý enzyme pectinase

Nồng độ enzyme (N)	Thời gian (T)					F-test
	15 phút	30 phút	45 phút	60 phút	Trung bình	
0,05%	321,70±4,10^{a}	334,67±5,53^{cd}	344,57±6,81^{e}	329,17±6,75^{abc}	332,53^{b}	T: *
0,075%	328,07±1,45^{abc}	339,07±4,84^{de}	339,07±2,28^{de}	345,03±4,22^{e}	337,81^{c}	N: *
0,1%	327,93±1,81^{abc}	326,40±3,30^{ab}	332,07±3,70^{bcd}	328,07±6,21^{abc}	328,62^{a}	T × N: *
Trung bình	325,90^{a}	333,38^{b}	338,57^{c}	334,09^{bc}		

*Ghi chú: Các ký tự khác nhau đi kèm theo trung bình nghiệm thức trong cùng một cột hoặc dòng thể hiện sự khác biệt ở mức ý nghĩa ($p < 0,05$), ns: $p > 0,05$ và *: $p < 0,05$.*

Về cơ chế, pectinase làm phân giải pectin và các polysaccharide thành tế bào, giảm độ nhớt và phá vỡ cấu trúc nhầy của mô quả, từ đó tăng khả năng giải phóng sắc tố betacyanin vào dịch chiết (Gengatharan et al., 2021). Tuy nhiên, khi nồng độ enzyme hoặc thời gian xử lý vượt ngưỡng tối ưu, có thể xuất hiện sự thoái hóa sắc tố do oxy hóa xảy ra trong môi trường giàu enzyme, tương tự như hiện tượng được ghi nhận trong chiết tách betalain từ củ dền, khi kéo dài thời gian hoặc tăng cường độ xử lý dẫn đến sự phân hủy màu (Eyshi et al., 2024).

Kết quả các nghiên cứu trước đây cũng ghi nhận rằng việc gia tăng quá mức nồng độ pectinase hoặc kéo dài thời gian xử lý có thể dẫn đến suy giảm độ ổn định màu, làm giảm hiệu suất thu hồi betacyanin (Gengatharan et al., 2012; Gengatharan et al., 2021; Calva-Estrada et al., 2022). Như vậy, có thể kết luận rằng điều kiện xử lý tối ưu trong nghiên cứu này là 0,075% pectinase trong khoảng 45 – 60 phút, điều này vừa đảm bảo hiệu suất chiết cao, vừa hạn chế nguy cơ suy giảm chất lượng sắc tố.

3.1.3. Hoạt tính chống oxy hóa DDPH (IC_{50})

Kết quả ở Bảng 3 cho thấy giá trị IC_{50} của dịch quả thanh long ruột đỏ chịu ảnh hưởng đáng kể bởi cả hai yếu tố nồng độ enzyme pectinase và thời gian xử lý, đồng thời tồn tại sự tương tác có ý nghĩa thống kê giữa hai nhân tố này.

IC_{50} dao động từ 7,59 đến 8,26% (v/v), với giá trị thấp nhất đạt ở nồng độ 0,075% (7,59%), cho thấy đây là điều kiện xử lý tạo ra dịch quả có khả năng chống oxy hóa mạnh nhất và khác biệt có ý nghĩa so với nồng độ 0,05% và 0,1% (với giá trị IC_{50} ghi nhận được lần lượt là 7,97% và 8,26%). Điều này phản ánh rằng, việc xử lý enzyme pectinase ở nồng độ quá thấp hoặc quá cao đều không mạng lại hiệu quả tối ưu cho việc bảo toàn và giải phóng hợp chất chống oxy hóa.

Khi xét theo thời gian xử lý, IC_{50} giảm dần từ 15 phút (8,41%) xuống thấp nhất ở 45 phút (7,55%), sau đó tăng nhẹ trở lại ở 60 phút (7,85%). Điều này cho thấy rằng khả năng chống oxy hóa của dịch quả đạt cực đại khi thời gian thủy phân bằng enzyme phù hợp. Hiện tượng này có thể giải thích do thời gian xử lý ngắn (15 – 30 phút) chưa giải phóng hết betacyanin và các hợp chất sinh học, đây những hợp chất chính đóng góp vào khả năng khử gốc tự do. Ngược lại, khi thời gian xử lý được kéo dài đến 60 phút thì có thể xảy ra hiện tượng phân hủy hoặc oxy hóa thứ cấp các hợp chất này làm suy giảm hoạt tính chống oxy hoá (Herbach et al., 2006).

Bảng 3. Giá trị IC_{50} (% v/v) dịch quả thanh long ruột đỏ sau khi xử lý enzyme pectinase

Nồng độ enzyme (N)	Thời gian (T)					F-test
	15 phút	30 phút	45 phút	60 phút	Trung bình	
0,05%	8,69±0,28^{e}	7,92±0,37^{bcd}	7,06±0,62^{a}	8,22±0,27^{de}	7,97^{b}	T: *
0,075%	8,29±0,11^{de}	7,57±0,60^{abc}	7,47±0,50^{ab}	7,03±0,31^{a}	7,59^{a}	N: *
0,1%	8,28±0,12^{de}	8,33±0,11^{de}	8,12±0,14^{cde}	8,29±0,24^{de}	8,26^{c}	T × N: *
Trung bình	8,41^{c}	7,94^{b}	7,55^{a}	7,85^{ab}		

*Ghi chú: Các ký tự khác nhau đi kèm theo trung bình nghiệm thức trong cùng một cột hoặc dòng thể hiện sự khác biệt ở mức ý nghĩa ($p < 0,05$), ns: $p > 0,05$ và *: $p < 0,05$.*

Đáng chú ý, tại nồng độ trung bình (0,075%), IC_{50} giảm dần theo thời gian từ 8,29 (15 phút) xuống mức thấp nhất 7,03 (60 phút), thể hiện hiệu ứng tích cực của việc kéo dài xử lý trong khoảng điều kiện này. Ngược lại, ở nồng độ enzyme cao (0,1%), IC_{50} hầu như ổn định (dao động trong khoảng 8,12 – 8,33%), điều này chứng tỏ việc tăng thêm thời gian xử lý không mang lại lợi ích rõ rệt. Những kết quả này cho thấy, có sự tương tác ý nghĩa giữa nồng độ pectinase và thời gian. Sự tương tác này có thể được lý giải dựa trên cơ chế động học enzyme và cơ chất. Khi lượng enzyme tăng cao, hệ phản ứng có thể tiến gần trạng thái bão hòa cơ chất, khiến cho việc kéo dài thời gian xử lý không mang lại lợi ích bổ sung mà thậm chí có thể gây thoái hóa các hợp chất sinh học hoạt tính, dẫn đến IC_{50} tăng trở lại (Le & Le, 2012). Ngoài ra, việc xử lý kéo dài còn có khả năng thúc đẩy quá trình oxy hóa hoặc phân giải betacyanin và các chất chống oxy hóa, làm giảm hiệu quả sinh học của dịch quả. Điều này phù hợp với nhận định của Yuliarti et al. (2015) khi nghiên trên dịch quả kiwi, tác giả cho rằng nồng độ enzyme quá cao có thể gây thủy phân phân tử, dẫn đến giảm chất lượng sản phẩm. Trong ứng dụng enzyme chế biến nước ép, việc tăng nồng độ và kéo dài thời gian xử lý chỉ có lợi đến một giới hạn nhất định, sau đó hiệu quả giảm do sự phân hủy polyphenol và biến đổi chất nền (Ajila et al., 2011).

Tóm lại, việc bổ sung enzyme pectinase có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất thu hồi dịch quả, hàm lượng betacyanin và khả năng chống oxy hóa của nước quả thanh long ruột đỏ. Hiệu suất thu hồi tăng rõ rệt khi gia tăng thời gian xử lý, đạt giá trị cao nhất trong khoảng 45 – 60 phút, với nồng độ enzyme tối ưu khoảng 0,075%. Với điều kiện xử lý đó, hàm lượng betacyanin và khả năng chống oxy hóa cũng được cải thiện rõ rệt nhờ tác động thủy phân của pectinase. Kết quả này này cho thấy vai trò ứng dụng của enzyme pectinase trong việc nâng cao giá trị các sản phẩm từ thanh long ruột đỏ.

3.2. Sự thay đổi betacyanin dịch thanh long ruột đỏ trong quá trình cô đặc chân không

3.2.1. Hiệu suất thu hồi

Kết quả được trình bày ở Bảng 4 cho thấy hiệu suất thu hồi giảm dần khi nồng độ sau cô đặc tăng từ 18 đến 24°Brix. Ở tất cả các mức áp suất chân không khảo sát, hiệu suất cao nhất đạt được tại 18°Brix (79,42%), giảm còn 69,71% ở 21°Brix và thấp nhất ở 24°Brix (59,89%). Hiện tượng này có thể được lý giải bởi bản chất của quá trình cô đặc, lượng nước bị loại bỏ càng lớn thì khối lượng sản phẩm cuối cùng càng giảm, dẫn đến hiệu suất thấp hơn khi cô đặc đến nồng độ cao hơn. Bên cạnh đó, sự gia tăng độ nhớt ở nồng độ chất khô cao làm hạn chế quá trình truyền nhiệt và truyền khối, đồng thời làm tăng nguy cơ bám cặn trên thành thiết bị (Muram et al., 2014). Ngoài ra, hiện tượng chất khô bị kéo theo hơi nước khi cô đặc ở nồng độ cao có thể hao hụt sản phẩm, giảm hiệu suất thu hồi. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận trong nghiên cứu của Ruby-Figueroa et al. (2023) khi khảo sát quá trình cô đặc hỗn hợp nước ép trái cây bằng thẩm thấu màng đã nhận thấy rằng hiệu suất bay hơi và thông lượng khối giảm rõ rệt ở nồng độ cao do hiện tượng fouling và cản trở truyền khối. Hameed et al. (2023) cũng báo cáo rằng trong quá trình cô đặc nước nho bằng kỹ thuật vi sóng kết hợp chân không, tốc độ bay hơi và hiệu suất thu hồi giảm khi TSS sau cô đặc tăng, đồng thời làm suy giảm các chỉ tiêu chất lượng cảm quan.

Ảnh hưởng của áp suất chân không đến hiệu suất thu hồi không có sự khác biệt rõ rệt về mặt thống kê giữa các mức từ 560 đến 680 mmHg, giá trị trung bình dao động từ 68,39 đến 70,69%, kết quả này cho thấy sự thay đổi áp suất không tạo ra tác động đáng kể đến hiệu suất cô đặc. Kết quả này có thể được giải thích bởi việc tất cả các mẫu đều được điều chỉnh về cùng một nồng độ chất khô cuối cùng. Điều này cho thấy yếu tố chi phối chính là TSS sau cô đặc (°Brix), áp suất vận hành không tạo ra khác biệt đáng kể.

Bảng 4. Hiệu suất thu hồi (%) dịch quả thanh long ruột đỏ ở các mức áp suất chân không và TSS sau cô đặc khác nhau

Áp suất chân không (P)	TSS sau cô đặc (M)				F-test
	18°Brix	21°Brix	24°Brix	Trung bình	
560 mmHg	78,61±4,09[c]	67,85±3,08[b]	58,70±3,42[a]	68,39[a]	M: *
620 mmHg	79,32±4,25[c]	70,42±4,02[b]	60,07±2,40[a]	69,94[a]	P: ns
680 mmHg	80,33±4,51[c]	70,85±3,31[b]	60,90±1,39[a]	70,69[a]	M × P: ns
Trung bình	79,42[c]	69,71[b]	59,89[a]		

*Ghi chú: Các ký tự khác nhau đi kèm theo trung bình nghiệm thức trong cùng một cột hoặc dòng thể hiện sự khác biệt ở mức ý nghĩa (p < 0,05), ns: p > 0,05 và *: p < 0,05.*

3.2.2. Hàm lượng betacyanin

Kết quả nghiên cứu cho thấy hàm lượng betacyanin tăng dần theo mức độ cô đặc của dịch quả, sự tập trung chất màu cùng các hợp chất sinh học trong pha lỏng khi hàm lượng chất khô tăng.

Kết quả ở Bảng 5 cho thấy khi nồng độ chất khô sau cô đặc cao hơn, hàm lượng betacyanin tăng rõ rệt ở tất cả các mức áp suất chân không. Giá trị trung bình dao động từ 248,69 mg/L ở 18°Brix đến 293,95 mg/L ở 24°Brix (p < 0,05). Điều này phản ánh tác động trực tiếp của quá trình cô đặc, khi hàm lượng chất rắn hòa tan tăng, hàm lượng betacyanin cũng tăng theo. Hiện tượng này có thể được giải thích là do quá trình loại bỏ nước trong giai đoạn cô đặc làm tăng tỷ lệ tương đối của các hợp chất hòa tan, đồng thời giảm hoạt động của enzyme oxy hóa và mức độ tiếp xúc với oxy, giúp hạn chế sự phân hủy của sắc tố. Kết quả này tương đồng với nghiên của Siow and Wong (2017) khi khảo sát nước ép và sản phẩm cô đặc của thanh long ruột đỏ, tác giả nhận thấy rằng mẫu cô đặc có hàm lượng betacyanin cao hơn đáng kể và duy trì ổn định màu tốt hơn trong quá trình bảo quản. Bazaria and Kumar (2016) cũng ghi nhận xu hướng tương tự khi cô đặc nước ép củ dền bằng phương pháp chân không, tác giả ghi nhận hàm lượng betalain tăng theo mức cô đặc đến một giới hạn nhất định trước khi bắt đầu suy giảm do ảnh hưởng nhiệt. Ngoài ra, Bredun et al. (2023) báo cáo rằng phương pháp cô đặc lạnh giúp tăng nồng độ các hợp chất sinh học như polyphenol và betalain, đồng thời nâng cao hoạt tính chống oxy hóa của sản phẩm so với dịch ban đầu. Như vậy, kết quả của nghiên cứu này phù hợp với xu hướng chung được ghi nhận trong các công trình trước, khẳng định rằng việc gia tăng nồng độ chất khô trong giai đoạn cô đặc có thể góp phần làm tăng hàm lượng và khả năng bảo toàn của betacyanin và các hoạt chất sinh học khác.

Bảng 5. Hàm lượng betacyanin (mg/L) dịch quả thanh long ruột đỏ ở các mức áp suất chân không và TSS sau cô đặc khác nhau

Áp suất chân không (P)	TSS sau cô đặc (M)				F-test
	18°Brix	21°Brix	24°Brix	Trung bình	
560 mmHg	248,69±3,65[a]	272,65±0,53[b]	276,74±0,19[bc]	266,03[a]	M: *
620 mmHg	268,65±5,05[b]	271,67±2,75[b]	281,33±1,06[cd]	273,88[b]	P: *
680 mmHg	272,13±1,42[b]	289,15±0,50[de]	293,95±12,87[e]	285,07[c]	M × P: *
Trung bình	263,16[a]	277,82[b]	284,01[c]		

*Ghi chú: Các ký tự khác nhau đi kèm theo trung bình nghiệm thức trong cùng một cột hoặc dòng thể hiện sự khác biệt ở mức ý nghĩa (p < 0,05), ns: p > 0,05 và *: p < 0,05.*

Bên cạnh nồng độ chất khô, áp suất chân không cũng ảnh hưởng đến sự ổn định của betacyanin. Ở cùng mức TSS sau cô đặc, các mẫu cô đặc ở áp suất chân không cao (680 mmHg) ghi nhận hàm lượng betacyanin cao hơn so mẫu cô đặc ở áp suất chân không thấp (560 mmHg). Cụ thể, tại TSS sau cô đặc là 24°Brix, hàm lượng betacyanin đạt 293,95 mg/L ở 680 mmHg khác biệt có ý nghĩa so với 276,74 mg/L (mẫu bố trí với TSS sau cô đặc là 24°Brix, 560 mmHg). Cơ chế này có thể được lý giải là do áp suất thấp (áp suất chân không cao) làm giảm điểm sôi của dung dịch, từ đó giảm mức độ phân huỷ do nhiệt của betacyanin. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Shofinita et al. (2023) khi đánh giá ảnh hưởng của các kỹ thuật sấy và cô đặc áp suất thấp cũng ghi nhận rằng điều kiện nhiệt độ thấp và chân không cao giúp giảm sự phân hủy betalain, dẫn đến hàm lượng sắc tố và hoạt chất sinh học cao hơn so với các quy trình sử dụng nhiệt độ cao. Tương tự, quá trình cô đặc nước ép thanh long ruột đỏ được thực hiện ở

35°C giúp bảo toàn hàm lượng betacyanin tốt hơn so với cô đặc ở nhiệt độ cao hơn (Nguyen et al., 2021). Ngoài ra, Juvvi et al. (2016) khi nghiên cứu sản xuất chip củ dền (*Beta vulgaris*) ở các mức áp suất tuyệt đối khác nhau cũng ghi nhận hàm lượng betalain cao hơn rõ rệt ở áp suất thấp (1,3 kPa) so với điều kiện áp suất cao hơn (9,7 kPa), điều này khẳng định vai trò của áp suất thấp trong việc bảo vệ cấu trúc và độ bền màu của sắc tố tự nhiên.

3.2.3. Hoạt tính chống oxy hóa DPPH (IC_{50})

Kết quả ở Bảng 6 cho thấy giá trị IC_{50} của dịch thanh long ruột đỏ sau cô đặc dao động từ 9,87 đến 10,08%. Khi TSS sau cô đặc tăng từ 18 lên 24°Brix, giá trị IC_{50} trung bình giảm có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$), từ 10,03 xuống 9,91%. Điều này phản ánh hoạt tính chống oxy hóa được cải thiện khi nồng độ chất khô cao hơn, chủ yếu nhờ sự gia tăng hàm lượng của các hợp chất chống oxy hóa, đặc biệt là betacyanin. Kết quả đối chiếu với số liệu về betacyanin ở Bảng 5 cho thấy hoạt tính bắt gốc tự do của dịch quả thanh long ruột đỏ có mối tương quan chặt chẽ với hàm lượng betacyanin, điều này gợi ý rằng các sắc tố này là yếu tố chính đóng góp vào khả năng chống oxy hóa tổng thể. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu trước đó của Cai et al. (2005) và Taira et al. (2015), trong đó betacyanin, đặc biệt là betanin và betanidin đã được chứng minh rằng hoạt tính bắt gốc peroxyl và nitric oxide mạnh mẽ, qua đó đóng vai trò chủ yếu trong khả năng chống oxy hóa của các sản phẩm giàu betalain. Tương tự, Kusznierewicz et al. (2021) đã so sánh hoạt tính chống oxy hóa của sản phẩm chứa betalain từ củ dền cũng xác định rằng nhóm betacyanin có đóng góp cao nhất vào tổng hoạt tính chống oxy hóa, so với các hợp chất phenolic hoặc flavonoid khác.

Bảng 6. Giá trị IC_{50} (% v/v) dịch quả thanh long ruột đỏ ở các mức áp suất chân không và TSS sau cô đặc khác nhau

Áp suất chân không (P)	TSS sau cô đặc (M)				F-test
	18°Brix	21°Brix	24°Brix	Trung bình	
560 mmHg	10,08±0,12^{e}	9,97±0,12^{cd}	9,94±0,01^{bc}	9,99^{b}	M: *
620 mmHg	10,01±0,05^{d}	10,00±0,05^{d}	9,91±0,02^{ab}	9,97^{b}	P: *
680 mmHg	9,99±0,03^{d}	9,87±0,01^{a}	9,88±0,04^{ab}	9,92^{a}	M × P: *
Trung bình	10,03^{c}	9,95^{b}	9,91^{a}		

*Ghi chú: Các ký tự khác nhau đi kèm theo trung bình nghiệm thức trong cùng một cột hoặc dòng thể hiện sự khác biệt ở mức ý nghĩa ($p < 0,05$), ns: $p > 0,05$ và *: $p < 0,05$.*

Bên cạnh đó, áp suất chân không cũng cho thấy ảnh hưởng rõ rệt đến hoạt tính chống oxy hóa. Ở cùng mức TSS sau cô đặc, các mẫu cô đặc ở 680 mmHg thường có giá trị IC_{50} thấp hơn so với 560 mmHg. Đáng chú ý, giá trị IC_{50} của dịch thanh long ruột đỏ sau cô đặc chân không nằm trong khoảng 9,87 đến 10,08%, cao hơn rõ rệt so với mẫu dịch quả tươi (6,43 ± 0,26%). Điều này cho thấy quá trình cô đặc đã làm suy giảm hoạt tính chống oxy hóa của sản phẩm. Mặt khác, số liệu ở Bảng 5 chỉ ra rằng hàm lượng betacyanin có xu hướng tăng sau khi cô đặc chân không. Kết quả này gợi ý rằng ngoài betacyanin, các hợp chất có khả năng chống oxy hóa khác như vitamin C, acid phenolic và flavonoid có thể đã bị phân hủy hoặc biến tính trong quá trình cô đặc, dẫn đến sự suy giảm tổng thể khả năng bắt gốc tự do của dịch quả thanh long. Nhận định này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Galaverna et al. (2008), trong đó hoạt tính chống oxy hóa của nước cam giảm trong giai đoạn cô đặc do sự phân hủy vitamin C và anthocyanin. Tương tự, Nindo et al. (2007) cũng ghi nhận hàm lượng vitamin C trong nước việt quất giảm 32 đến 48% khi nhiệt độ sản phẩm đạt 55,5 đến 59,0°C trong quá trình bốc hơi.

3.2.4. Màu sắc

Kết quả được trình bày ở Bảng 7 cho thấy giá trị màu sắc của dịch quả thanh long ruột đỏ thay đổi rõ rệt khi TSS sau cô đặc tăng, thể hiện qua sự giảm dần giá trị L* và a*, cùng với sự biến động của b*. Cụ thể, khi TSS tăng từ 18 lên 24°Brix, giá trị L* giảm mạnh từ 40,93 xuống 25,08, phản ánh sự giảm độ sáng của mẫu dịch quả. Hiện tượng này có thể được giải thích do sự tích tụ sắc tố tự nhiên và hiện tượng phản xạ ánh sáng bị hạn chế trong môi trường có độ nhớt cao, làm giảm độ sáng biểu kiến của mẫu (McNeil & French, 2001). Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Assawarachan and Noomhorm (2010) khi khảo sát biến đổi màu sắc của nước khóm cô đặc, tác giả đã ghi nhận rằng giá trị L* giảm theo thời gian cô đặc ở cả hai phương pháp bay hơi thông thường và bay hơi chân không, cho thấy sản phẩm trở nên tối màu hơn khi hàm lượng chất khô tăng. Tương tự, Hwang et al. (2022) nghiên cứu về quá trình cô đặc chân không nước cam cũng nhận thấy sự suy giảm đáng kể của giá trị L*, phản ánh mức

độ giảm sáng và biến đổi màu tự nhiên do tác động của nhiệt và nồng độ. Ngoài ra, khi theo dõi sự thay đổi màu trong nước mía tinh lọc trong quá trình cô đặc chân không, Han et al. (2025) xác định rằng L* giảm dần theo thời gian xử lý, chủ yếu do sự hình thành melanoidin từ phản ứng Maillard.

Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy giá trị a* có xu hướng giảm dần khi nồng độ cô đặc tăng, phản ánh sự suy giảm cường độ đỏ do một phần betacyanin bị biến đổi dưới tác động nhiệt trong quá trình cô đặc. Hiện tượng này không mâu thuẫn với việc hàm lượng betacyanin tăng theo mức độ cô đặc, vì giá trị betacyanin (mg/L) chỉ phản ánh nồng độ hóa học của sắc tố sau khi nước bị loại bỏ, trong khi giá trị a phụ thuộc vào biểu hiện màu quang học của toàn hệ cô đặc (Moßhammer et al., 2005). Khi TSS tăng, độ nhớt cao làm tăng tán xạ ánh sáng và làm tối mẫu (Herbach et al., 2007), đồng thời một phần betacyanin có thể chuyển hóa sang các dạng đỏ – tím hoặc hơi nâu như neobetanin, khiến cường độ đỏ giảm dù nồng độ sắc tố tổng số tăng (Herbach et al., 2004). Thêm vào đó, việc cô đặc ở áp suất chân không cao (680 mmHg) cho thấy mẫu duy trì giá trị a* (63,92) cao và khác biệt có ý nghĩa so với hai mức áp suất chân không thấp hơn (Bảng 8). Điều này cho thấy áp suất chân không cao góp phần bảo vệ betacyanin tốt hơn nhờ làm giảm nhiệt độ sôi của dung dịch, từ đó hạn chế tác động bất lợi của nhiệt lên sắc tố. Kết quả này tương đồng với ghi nhận của Elik et al. (2016) khi nghiên cứu quá trình cô đặc nước ép việt quất bằng nhiều phương pháp khác nhau, trong đó giá trị a* giảm đáng kể ở tất cả các phương pháp, đặc biệt là trong điều kiện chân không kéo dài. Tương tự, kết quả nghiên cứu của Zhang et al. (2024) về nước ép hắc mai biển (sea buckthorn) cũng cho thấy a* giảm trong suốt quá trình cô đặc chân không. Ngoài ra, việc nghiên cứu nước ép củ dền cô đặc chân không Bazaria and Kumar (2016) cũng nhận thấy giá trị a* giảm, nguyên nhân được giải thích là do sự thoái hóa nhiệt và oxy hóa sắc tố.

Bảng 7. Thông số màu sắc (L*, a*, b*) của dịch quả thanh long ruột đỏ cô đặc bằng phương pháp chân không theo TSS sau cô đặc

TSS sau cô đặc (°Brix)	L*	a*	b*
DC	50,8±0,59	70,8±1,61	-21,9±0,55
18	40,93±0,54[c]	62,80±3,45[b]	-22,05±0,83[b]
21	33,80±0,22[b]	60,14±2,01[ab]	-23,65±0,42[a]
24	25,08±0,72[a]	57,52±2,22[a]	-23,83±1,08[a]

Ghi chú: Các ký tự khác nhau đi kèm theo trung bình nghiệm thức trong cùng một cột thể hiện sự khác biệt ở mức ý nghĩa ($p < 0,05$).

Về chỉ số b* (thể hiện mức độ màu từ vàng đến xanh dương), giá trị dao động từ −23,83 đến −22,05, có xu hướng giảm nhẹ về phía âm khi độ TSS sau cô đặc tăng, tức là màu chuyển sang tông đỏ - tím đậm hơn (Bảng 7). Tuy nhiên, giá trị b* ghi nhận sự tăng nhẹ từ -23,83 đến -22,56 khi tăng áp suất chân không (Bảng 8). Hiện tượng này có thể được giải thích bởi sự tập trung các sắc tố đỏ như betacyanin và sự phân hủy một phần của các sắc tố màu vàng (như betaxanthin, carotenoid,…) dưới tác động của nhiệt độ và thời gian gia nhiệt. Khi hàm lượng chất khô tăng cao, sự cô đặc mạnh làm giảm khả năng khuếch tán nhiệt và tăng tốc quá trình oxy hóa, dẫn đến dịch cô đặc sẫm màu và chỉ số b* giảm đáng kể. Kết quả này phù hợp với báo cáo của Elik et al. (2016) khi nghiên cứu quá trình cô đặc nước ép việt quất bằng ba phương pháp khác nhau, trong đó giá trị b* giảm rõ rệt khi TSS tăng. Tương tự, Hameed et al. (2023) cũng ghi nhận xu hướng giảm b* trong quá trình cô đặc nước nho, đồng thời nhấn mạnh rằng mức độ chân không là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến sự biến đổi màu sắc. Đáng chú ý, Liu et al. (2021) nhận thấy b* có thể tăng nhẹ khi tăng độ chân không, do điều kiện này giúp hạn chế quá trình oxy hóa và phân hủy nhiệt của sắc tố vàng, góp phần duy trì độ tươi sáng của sản phẩm. Những kết quả trên cho thấy xu hướng biến đổi b* phụ thuộc chặt chẽ vào nồng độ TSS và điều kiện áp suất trong quá trình cô đặc.

Tóm lại, quá trình cô đặc chân không ảnh hưởng đáng kể đến các chỉ tiêu hóa – lý, betacyanin của dịch quả thanh long ruột đỏ. Hiệu suất thu hồi giảm dần khi nồng độ chất khô tăng, chủ yếu do sự thoát hơi nước và tổn thất cơ học. Ngược lại, hàm lượng betacyanin tăng có ý nghĩa thống kê khi tăng TSS sau cô đặc hoặc khi áp suất chân không cao hơn (680 mmHg), phản ánh sự tập trung các hợp chất hòa tan và khả năng bảo toàn sắc tố tốt hơn nhờ giảm nhiệt độ sôi. Hoạt tính chống oxy hóa (IC_{50}) có mối tương quan nghịch với hàm lượng betacyanin, cho thấy vai

trò chính của sắc tố này trong việc bắt gốc tự do DPPH. Về đặc tính màu sắc, việc cô đặc chân không làm giảm rõ rệt giá trị L* và a*, khiến mẫu trở nên tối và giảm cường độ đỏ do sự thoái hóa nhiệt của betacyanin và sự hình thành các sản phẩm phản ứng Maillard. Dù vậy, điều kiện chân không cao (680 mmHg) giúp duy trì sắc đỏ tốt hơn và hạn chế biến đổi màu không mong muốn.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy enzyme pectinase và điều kiện cô đặc chân không có ảnh hưởng rõ rệt đến hàm lượng betacyanin, hiệu suất thu hồi và hoạt tính chống oxy hóa của dịch quả thanh long ruột đỏ *(Hylocereus polyrhizus)*. Trong giai đoạn xử lý enzyme, nồng độ pectinase 0,075% kết hợp với thời gian 45 – 60 phút được xác định là phù hợp, điều này giúp nâng cao hiệu suất thu hồi dịch quả (khoảng 80%), đồng thời đạt hàm lượng betacyanin cao nhất (339 – 345 mg/L) và khả năng chống oxy hóa mạnh nhất (IC_{50} = 7,59%). Trong quá trình cô đặc chân không, khi hàm lượng chất khô hòa tan (TSS) tăng từ 18°Brix lên 24°Brix, hàm lượng betacyanin tăng tương ứng do hiệu ứng tập trung chất màu. Đồng thời, áp suất chân không cao hơn, từ 560 mmHg lên 680 mmHg, cũng góp phần gia tăng hàm lượng sắc tố này. Sự kết hợp hợp lý giữa xử lý enzyme pectinase và công nghệ cô đặc chân không mang lại lợi ích đáng kể trong việc cải thiện hiệu suất thu hồi, duy trì màu sắc tự nhiên và bảo toàn hoạt tính sinh học của sản phẩm thanh long ruột đỏ.

Kết quả này cung cấp cơ sở ban đầu cho việc nghiên cứu và tối ưu hóa các quy trình chế biến thanh long ruột đỏ, có tiềm năng ứng dụng trong sản xuất nước ép, dịch cô đặc, rượu vang và các sản phẩm thực phẩm chức năng, tuy nhiên cần thêm các nghiên cứu ở quy mô công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

AGROINFO. (2024). *No expansion of dragon fruit cultivation area, priority given to quality improvement (in Vietnamese)*. https://agro.gov.vn/vn/tID33143_Khong-tang-dien-tich-thanh-long-uu-tien-nang-chat-luong.html.

Ajila, C., Brar, S., Verma, M., Tyagi, R., Godbout, S., & Valéro, J. (2011). Extraction and analysis of polyphenols: recent trends. *Critical reviews in biotechnology*, *31*(3), 227-249. https://doi.org/10.3109/07388551.2010.513677

Assawarachan, R., & Noomhorm, A. (2010). Changes in color and rheological behavior of pineapple concentrate through various evaporation methods. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *3*(1), 74-84.

Bazaria, B., & Kumar, P. (2016). Compositional changes in functional attributes of vacuum concentrated beetroot juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *40*(6), 1215-1222. https://doi.org/10.1111/jfpp.12705

Bozkir, H., & Tekgül, Y. (2022). Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of Food Processing and Preservation*, *46*(6), e15902. https://doi.org/10.1111/jfpp.15902

Bredun, M. A., Prestes, A. A., Panceri, C. P., Prudencio, E. S., & Burin, V. M. (2023). Bioactive compounds recovery by freeze concentration process from winemaking by-product. *Food Research International*, *173*, 113220. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113220

Cai, Y.-Z., Sun, M., & Corke, H. (2005). Characterization and application of betalain pigments from plants of the Amaranthaceae. *Trends in Food Science & Technology*, *16*(9), 370-376. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.03.020

Calva-Estrada, S., Jiménez-Fernández, M., & Lugo-Cervantes, E. (2022). Betalains and their applications in food: The current state of processing, stability and future opportunities in the industry. *Food chemistry: molecular sciences*, *4*, 100089. https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100089

Elik, A., Yanık, D. K., Maskan, M., & Göğüş, F. (2016). Influence of three different concentration techniques on evaporation rate, color and phenolics content of blueberry juice. *Journal of Food Science and Technology*, *53*(5), 2389-2395. https://doi.org/10.1007/s13197-016-2213-0

Eveline & Audina, M. (2019). Utilization of Super Red Dragon Fruit Peel (Hylocereus Costaricensis (FAC Weber) Britton & Rose) in the Making of Fermented Beverage. *International Conference on Food Science & Technology – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 292* (p. 012037). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/292/1/012037.

Eyshi, S., Ghareaghajlou, N., Afshar Mogaddam, M. R., & Ghasempour, Z. (2024). Red beet betalains extraction process: A comprehensive review of methods, applications, and physicochemical

properties. *Food Science & Nutrition*, *12*(11), 8540-8558. https://doi.org/10.1002/fsn3.4458

Galaverna, G., Di Silvestro, G., Cassano, A., Sforza, S., Dossena, A., Drioli, E., & Marchelli, R. (2008). A new integrated membrane process for the production of concentrated blood orange juice: Effect on bioactive compounds and antioxidant activity. *Food Chemistry*, *106*(3), 1021-1030. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.018

Gengatharan, A., Choo, W.-S., & Dykes, G. (2012). *Pectinase assisted extraction of betalains from Hylocereus polyrhizus*.

Gengatharan, A., Dykes, G. A., & Choo, W. S. (2021). Fermentation of red pitahaya extracts using Lactobacillus spp. and Saccharomyces cerevisiae for reduction of sugar content and concentration of betacyanin content. *Journal of Food Science and Technology*, *58*(9), 3611-3621. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05116-2

Hameed, A., Maan, A. A., Khan, M. K. I., Mahmood Khan, I., Niazi, S., Waheed Iqbal, M., Riaz, T., Failsal Manzoor, M., & Abdalla, M. (2023). Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. *International Journal of Food Properties*, *26*(1), 1596-1611. https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062

Han, M., Zhao, H., Liu, Z., Liu, J., Liu, X., Hang, F., Li, K., & Xie, C. (2025). Color Development Characteristic and Kinetic Modeling of Maillard Reaction in Membrane-Clarified Sugarcane Juice During Vacuum Evaporation Process. *Foods*, *14*(12), 2136. https://doi.org/10.3390/foods14122136

Hanh, N. T., Trang, V. T., & Hung, N. V. (2023). Effects of pectinase enzyme treatment on juice recovery efficiency of red dragon fruit (Hylocereus polyrhizus) grown in Vinh Phuc province. *Section B, Vietnam Journal of Science and Technology, 65*(9), 69-72 *(in Vietnamese).* https://doi.org/10.31276/VJST.65(9).69-72.

Herbach, K. M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Betalain stability and degradation—structural and chromatic aspects. *Journal of Food Science*, *71*(4), R41-R50. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x

Hien, P. T. T. (2019). The dragon fruit export challenge and experiences in Vietnam. *Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region (FFTC-AP)*. https://ap.fftc.org.tw/article/1598.

Hwang, J. H., Jung, A. H., & Park, S. H. (2022). Efficacy of ohmic vacuum concentration for orange juice concentrates and their physicochemical properties under different voltage gradients. *LWT*, *154*, 112750. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112750

Juvvi, P., Chakkaravarthi, A., & Debnath, S. (2016). Emerging technique for healthier frying for production of reduced-fat beetroot (Beta vulgaris) chips. *Journal of Food Science and Technology*, *53*(9), 3502-3511. https://doi.org/10.1007/s13197-016-2326-5

Kashyap, D., Vohra, P., Chopra, S., & Tewari, R. (2001). Applications of pectinases in the commercial sector: a review. *Bioresource technology*, *77*(3), 215-227. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00118-8

KC, S., Upadhyaya, J., Joshi, D. R., Lekhak, B., Kumar Chaudhary, D., Raj Pant, B., Raj Bajgai, T., Dhital, R., Khanal, S., Koirala, N., & Raghavan, V. (2020). Production, characterization, and industrial application of pectinase enzyme isolated from fungal strains. *Fermentation*, *6*(2), 59. https://doi.org/10.3390/fermentation6020059

Kusznierewicz, B., Mróz, M., Koss-Mikołajczyk, I., & Namieśnik, J. (2021). Comparative evaluation of different methods for determining phytochemicals and antioxidant activity in products containing betalains–Verification of beetroot samples. *Food Chemistry*, *362*, 130132. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130132

Liaotrakoon, W., De Clercq, N., Van Hoed, V., Van de Walle, D., Lewille, B., & Dewettinck, K. (2013a). Impact of thermal treatment on physicochemical, antioxidative and rheological properties of white-flesh and red-flesh dragon fruit (Hylocereus spp.) purees. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(2), 416-430. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0722-4

Liaotrakoon, W., De Clercq, N., Van Hoed, V., Van de Walle, D., Lewille, B., & Dewettinck, K. (2013b). Impact of thermal treatment on physicochemical, antioxidative and rheological properties of white-flesh and red-flesh dragon fruit (Hylocereus spp.) purees. *Food and Bioprocess Technology*, *6*, 416-430. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0722-4

Liu, X., Gao, Y., Xu, H., Wang, Q., & Yang, B. (2008). Impact of high-pressure carbon dioxide combined with thermal treatment on degradation of red beet (Beta vulgaris L.) pigments. *Journal of agricultural and food chemistry*, *56*(15), 6480-6487. https://doi.org/10.1021/jf800727q

Liu, Y., Sabadash, S., & Duan, Z. (2021). Research of physicochemical properties and antioxidant activity of beetroots as affected by vacuum microwave drying conditions. *Technology audit and production reserves*, *5*(3/61), 40-45. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.243069

Mura, E., Åkesjö, A., Jongsma, A., Innings, F., Gourdon, M., & Vamling, L. (2014). Experimental study of the heat transfer in a falling film evaporator: Influence of the co-flowing vapor. *Proceedings of the 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics* (pp. 1938–1944).

Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Lehninger: Principles of Biochemistry* (7th edition). New York: W.H. Freeman.

Nguyen, T. T. H., Pham, D. C., Chu, T. P., Vu, N. H., Samhaber, W. M., & Nguyen, M. T. (2021). Impact of jeva evaporation on storage stability and physiochemical characteristics of Vietnam red dragon fruit (hylocereus Polyrhizus). *Chemical Engineering Transactions*, *87*, 169-174.

Nindo, C., Powers, J., & Tang, J. (2007). Influence of Refractance Window evaporation on quality of juices from small fruits. *LWT-Food Science and Technology*, *40*(6), 1000-1007. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.07.006

Nur 'Aliaa, A., Siti Mazlina, M., Taip, F., & Liew Abdullah, A. (2010). Response surface optimization for clarification of white pitaya juice using a commercial enzyme. *Journal of Food Process Engineering*, *33*(2), 333-347. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00277.x

Phebe, D., Chew, M. K., Suraini, A., Lai, O. M., & Janna, O. (2009). Red-fleshed pitaya (Hylocereus polyrhizus) fruit colour and betacyanin content depend on maturity. *International Food Research Journal, 16*(2), 233-242.

Que, P. T. T., Thuy, N. T. T., & Ngoc, T. T. A. (2017). Effects of processing and storage conditions on betacyanin color stability in juice from red dragon fruit (Hylocereus polyrhizus). *Can Tho University Journal of Science,* 51, 16-23 *(in Vietnamese).* https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.074

Reddy, L. V., Kim, Y.-M., & Wee, Y.-J. (2020). Rapid and enhanced liquefaction of pulp from mango (Mangifera indica L.) cv. Totapuri using ultrasound-assisted enzyme pretreatment. *Processes*, *8*(6), 718. https://doi.org/10.3390/pr8060718

Rosemary, M., Suresh, G., Venugopalan, R., Vasudeva, K., Sadananda, G., Karunakaran, G., & Swamy, G. (2025). Optimization of process variables viz., temperature and time for vacuum concentration of pitahaya (Hylocereus polyrhizus) fruit juice, its effect on total soluble solids, water activity, total betalain content and antioxidant activity. *Discover Food*, *5*(1), 53. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00313-w

Ruby-Figueroa, R., Morelli, R., Conidi, C., & Cassano, A. (2023). Red fruit juice concentration by osmotic distillation: optimization of operating conditions by response surface methodology. *Membranes*, *13*(5), 496. https://doi.org/10.3390/membranes13050496

Sharma, H. P., Patel, H., & Sugandha. (2017). Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices–A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, *57*(6), 1215-1227. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434

Sharma, O. P., & Bhat, T. K. (2009). DPPH antioxidant assay revisited. *Food Chemistry*, *113*(4), 1202-1205. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.008

Shofinita, D., Fawwaz, M., & Achmadi, A. B. (2023). Betalain extracts: Drying techniques, encapsulation, and application in food industry. *Food Frontiers*, *4*(2), 576-623. https://doi.org/10.1002/fft2.227

Siow, L.-F., & Wong, Y.-M. (2017). Effect of juice concentration on storage stability, betacyanin degradation kinetics, and sensory acceptance of red-fleshed dragon fruit (Hylocereus polyrhizus) juice. *International Journal of Food Properties*, *20*(3), 623-632. https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1172086

Sonawane, M. S. (2017). Nutritive and medicinal value of dragon fruit. *Asian Journal of Horticulture*, *12*(2), 267-271. https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1172086

Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2002). Betacyanins in fruits from red-purple pitaya, Hylocereus polyrhizus (Weber) Britton & Rose. *Food Chemistry*, *77*(1), 101-106. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00374-0

Taira, J., Tsuchida, E., Katoh, M. C., Uehara, M., & Ogi, T. (2015). Antioxidant capacity of betacyanins as radical scavengers for peroxyl radical and nitric oxide. *Food Chemistry, 166*, 531-536. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.102

Ministry of Science and Technology. (2014). *Glucose syrup - Determination of dry matter content - Refractometric method (TCVN 10375:2014) (in Vietnamese)*. https://isocert.org.vn/iso-17431982-ve-syro-glucose-xac-dinh-ham-luong-chat-kho-phuong-phap-do-chi-so-khuc-xa.

Thuy, N. M., Cuong, N. P., Thanh, H. H., Nep, N. T., Dinh, D. C., & Tuyen, N. T. M. (2013). Effect of added ingredients and treatment conditions on quality of passion-pineapple juice. *Can Tho University Journal of Science, 27,* 48–55 *(in Vietnamese)*. https://ctujsvn.ctu.edu.vn/index.php/ctujsvn/article/view/1589.

Toan, H. T., Chau, L. M., My, N. N., Nhi, T. T. Y., Phat, D. T., Thanh, N. N., & Phong, H. X. (2023). Optimization of fermentation conditions of cider from red dragon fruit (Hylocereus polyrhizus) using yeast Saccharomyces cerevisiae BV818. *Can Tho University Journal of Science, 59*(2), 94–103 *(in Vietnamese)*. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2023.069.

Tochi, B. N., Wang, Z., Xu, S.-Y., & Zhang, W. (2009). The influence of a pectinase and pectinase/hemicellulases enzyme preparations on percentage pineapple juice recovery, particulates and sensory attributes. *Pakistan Journal of Nutrition*, *8*(8), 1184-1189. https://doi.org/10.3923/pjn.2009.1184.1189

Trinh, X., Mai, V., Nguyen, T., Nguyen, T., Ha, M., & Nguyen, V. (2018). Dragon fruit production in Vietnam: Achievements and challenges. *Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region (FFTC-AP)*. https://ap.fftc.org.tw/article/1401.

Le, V. H., & Le, V. V. M. (2012). Comparison of enzyme-assisted and ultrasound-assisted extraction of vitamin C and phenolic compounds from acerola (Malpighia emarginata DC.) fruit. *International Journal of Food Science and Technology*, *47*(6), 1206-1214. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02960.x

Wong, Y.-M., & Siow, L.-F. (2015). Effects of heat, pH, antioxidant, agitation and light on betacyanin stability using red-fleshed dragon fruit (Hylocereus polyrhizus) juice and concentrate as models. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(5), 3086-3092. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1362-2

Woo, K., Ngou, F., Ngo, L., Soong, W., & Tang, P. (2011). Stability of betalain pigment from red dragon fruit (Hylocereus polyrhizus). *American Journal of Food Technology*, *6*(2), 140-148. https://doi.org/10.3923/ajft.2011.140.148

Wu, L. C., Hsu, H. W., Chen, Y. C., Chiu, C. C., Lin, Y. I., & Ho, J. A. (2006). Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chemistry*, *95*(2), 319-327. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.002

Yuliarti, O., Goh, K. K., Matia-Merino, L., Mawson, J., & Brennan, C. (2015). Extraction and characterisation of pomace pectin from gold kiwifruit (Actinidia chinensis). *Food Chemistry*, *187*, 290-296. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.148

Zhang, Z., Cheng, Y., Gao, Z., Zhang, M., Yang, X., Mu, S., & Qu, K. (2024). Effects of different concentration methods on the quality and volatile components of sea buckthorn clear juice. *LWT*, *206*, 116556. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116556

Zou, D., Brewer, M., Garcia, F., Feugang, J. M., Wang, J., Zang, R., Liu, H,. & Zou, C. (2005). Cactus pear: a natural product in cancer chemoprevention. *Nutrition journal*, *4*(1), 1-12. https://doi.org/10.1186/1475-2891-4-25

Herbach, K., Maier, C., Stintzing, F., & Carle, R. (2007). Effects of processing and storage on juice colour and betacyanin stability of purple pitaya (Hylocereus polyrhizus) juice. *European food research and technology*, *224*, 649-658. https://doi.org/10.1007/s00217-006-0354-5

Herbach, M., Kirsten, Stintzing, C., Florian, Carle, & Reinhold. (2004). Thermal degradation of betacyanins in juices from purple pitaya [Hylocereus polyrhizus (Weber) Britton & Rose] monitored by high-performance liquid chromatography–tandem mass spectometric analyses. *European Food Research and Technology*, *219*(4), 377-385. https://doi.org/10.1007/s00217-004-0948-8

McNeil, L. E., & French, R. H. (2001). Light scattering from red pigment particles: Multiple scattering in a strongly absorbing system. *Journal of Applied Physics*, *89*(1), 283-293. https://doi.org/10.1063/1.1331344

Moßhammer, M., Stintzing, F., & Carle, R. (2005). Colour studies on fruit juice blends from Opuntia and Hylocereus cacti and betalain-containing model solutions derived therefrom. *Food Research International*, *38*(8-9), 975-981. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.01.015