

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA PHƯƠNG PHÁP TRÍCH LY VÀ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG POLYSACCHARIDE THU NHẬN TỪ XƯƠNG RỒNG NOPAL (*Opuntia* spp.)

Nguyễn Thị Lương^{1*}, Phan Thị Thanh Diệu¹, Võ Ngọc Mẫn¹,

Lê Ngọc Na¹, Đinh Thị Tâm Như¹, Lê Tú Ngọc¹

¹Trường Đại học Công thương Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: luongnt@huit.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả thu hồi polysaccharide từ xương rồng Nopal (*Opuntia* spp.) bằng ba phương pháp: ngâm chiết, trích ly hỗ trợ siêu âm (UAE) và trích ly enzyme kết hợp siêu âm (UAEE). Ở phương pháp ngâm chiết, khảo sát tỉ lệ nguyên liệu:dung môi và thời gian chiết cho thấy hiệu suất trích ly polysaccharide thô cao nhất đạt 7,92% và carbohydrate trong polysaccharide thô đạt 5,58%. Phương pháp UAE, với các điều kiện siêu âm khác nhau, cải thiện hiệu suất trích ly polysaccharide thô 9,01% và carbohydrate 6,44%. UAEE cho kết quả vượt trội, đặc biệt khi kết hợp 0,5% cellulase và 0,5% pectinase, thu được 18,12% polysaccharide thô và 13,02% carbohydrate. Phổ FTIR ghi nhận sự hiện diện của các nhóm chức đặc trưng của polysaccharide như -OH, -CH, -C=O, C=C và C-O-C. Kết quả cho thấy UAEE không chỉ tăng hàm lượng thu hồi mà còn bảo toàn cấu trúc hóa học, cho thấy tiềm năng ứng dụng trong phát triển vật liệu màng sinh học phân hủy tự nhiên.

Từ khóa: Cellulase, enzyme, ngâm chiết, pectinase, polysaccharide, siêu âm và xương rồng Nopal (*Opuntia* spp.).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, xu hướng khai thác và ứng dụng các hợp chất tự nhiên có hoạt tính sinh học từ thực vật ngày càng gia tăng trong các lĩnh vực thực phẩm, dược phẩm và mỹ phẩm, nhờ tính an toàn, bền vững và đa dạng chức năng [1]. Xương rồng Nopal (*Opuntia* spp.), một loài thuộc họ Cactaceae, được phân bố rộng rãi tại khu vực châu Mỹ và hiện đã được trồng ở nhiều nơi trên thế giới. Tại Việt Nam, xương rồng Nopal xuất hiện tại các tỉnh duyên hải miền Trung và Tây Nguyên, nơi có điều kiện khô hạn phù hợp đặc tính sinh thái của loài [2 - 4]. Từ lâu, xương rồng Nopal đã được sử dụng trong y học cổ truyền nhờ nhiều hoạt tính sinh học như chống oxy hóa, chống viêm, điều hòa đường huyết, bảo vệ gan và tim mạch [5].

Bên cạnh các hợp chất phenolic, flavonoid, betalain và vitamin, xương rồng Nopal còn chứa một lượng lớn polysaccharide, đặc biệt là *mucilage* - một heteropolysaccharide có cấu trúc phân nhánh cao, giàu arabinose, galactose, rhamnose, xylose và galacturonic acid, cùng khoáng chất như Ca^{2+} và K^{+} [6]. Mucilage nằm chủ yếu trong mô nhu mô và có khả năng giữ nước vượt trội, tạo gel, tăng độ nhớt, hình thành hệ keo bền và tương tác tốt với polymer, khiến chúng trở thành nguyên liệu giàu tiềm năng trong công nghiệp thực phẩm (chất ổn định, chất làm dày), dược phẩm (tá dược, chất mang thuốc) và vật liệu sinh học (màng polymer phân hủy sinh học, hydrogel cho tái tạo mô) [1]. Một số nghiên cứu cũng ghi nhận mucilage của *Opuntia* có hoạt tính chống viêm, kích thích tái tạo mô và kết dính sinh học, mở ra

hướng ứng dụng trong sản xuất vật liệu y sinh như màng vết thương [7].

Việc chiết xuất polysaccharide từ xương rồng Nopal thường gặp thách thức do cấu trúc mô dày, hàm lượng chất xơ cao và sự gắn kết giữa các polysaccharide với pectin, hemicellulose hoặc lignin [5]. Ba nhóm kỹ thuật chính được ứng dụng gồm: ngâm chiết dung môi truyền thống (ME), trích ly hỗ trợ siêu âm (UAE) và trích ly enzyme có hỗ trợ siêu âm (UAEE).

Mỗi phương pháp có cơ chế tác động khác nhau lên cấu trúc tế bào, dẫn đến sự thay đổi đáng kể về hiệu suất thu hồi và chất lượng polysaccharide. ME là phương pháp truyền thống sử dụng nước làm dung môi với điều kiện điển hình như tỷ lệ nguyên liệu/nước 1:5 - 1:7, nhiệt độ 40 - 70°C và thời gian chiết 4 - 16 giờ, cho phép mucilage hòa tan dần từ mô nhu mô [2]. Tuy nhiên, ME thường bị hạn chế bởi hiệu suất thấp, thời gian dài và nguy cơ đồng chiết tạp chất.

Trong khi đó, UAE sử dụng năng lượng siêu âm để tạo cavitation, phá vỡ vách tế bào và giải phóng mucilage nhanh hơn. Phương pháp này giúp cải thiện hiệu suất, rút ngắn thời gian chiết và giảm tiêu thụ dung môi, đặc biệt phù hợp với mucilage - loại polysaccharide có kích thước phân tử lớn và nhạy cảm với nhiệt [5]. Tuy nhiên, UAE đòi hỏi kiểm soát cường độ siêu âm để tránh phân cắt mạch polysaccharide. Bên cạnh đó, UAEE - phương pháp kết hợp enzyme thủy phân (pectinase, cellulase...) với cavitation siêu âm - được xem là kỹ thuật tiên tiến có khả năng phá vỡ liên kết cellulose - pectin hiệu quả nhất, từ đó nâng cao hiệu suất và độ tinh khiết polysaccharide thu được. Nghiên cứu giải phẫu cấu trúc mô nhu mô trong *Opuntia* cho thấy enzyme có thể hỗ trợ phân giải mạng polysaccharide phức tạp, giúp giải phóng mucilage nhanh hơn [8, 9].



Hình 1. Nguyên liệu xương rồng

Sự khác biệt giữa ME, UAE và UAEE cho thấy việc lựa chọn phương pháp trích ly đóng vai trò quyết định trong việc tăng hiệu suất trích ly, cũng như ảnh hưởng đến độ tinh khiết và cấu trúc phân tử của mucilage/polysaccharide từ Nopal. Mặc dù các nghiên cứu trên thế giới đã mô tả thành phần, tính chất và các điều kiện chiết xuất mucilage từ *Opuntia* spp., dữ liệu về ảnh hưởng của từng phương pháp chiết lên chất lượng polysaccharide, đặc biệt đối với Nopal trồng tại Việt Nam, vẫn còn hạn chế. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá và so sánh ba phương pháp chiết xuất ME, UAE và UAEE; đồng thời phân tích chất lượng polysaccharide thu được thông qua hiệu suất trích ly polysaccharide thô, carbohydrate trong polysaccharide thô từ xương rồng Nopal và đặc trưng cấu trúc bằng FTIR, góp phần xây dựng cơ sở khoa học cho ứng dụng mucilage trong phát triển vật liệu sinh học.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Địa điểm nghiên cứu

Nghiên cứu được tiến hành tại Khoa Công nghệ Hóa học, Trung tâm thí nghiệm thực hành - Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh.

2.2. Vật liệu và hoá chất nghiên cứu

2.2.1. Nguyên liệu

Thân cây xương rồng Nopal (*Opuntia* spp.), lựa chọn các nhánh có chiều dài 20 - 25 cm, được thu hái trong khoảng thời gian từ 10:00 đến 12:00 vào tháng 6 từ quần thể mọc hoang tại tỉnh Quảng Nam, Việt Nam (tọa độ 15°45'30.3"N 108°21'47.8"E). Mẫu sau khi thu được làm mát và vận chuyển ngay về phòng thí nghiệm để xử lý. Sau đó được sấy khô, nghiền nhỏ (0,5 - 1,0 mm) và bảo quản trong túi polyamide 50 g đã được hút chân không.

2.2.2. Hoá chất

D - glucose (100%); phenol ($\geq 99,0\%$); H_2SO_4 ($\geq 97,0\%$); ethanol (P $\geq 98,0\%$) và methanol ($\geq 99,0\%$) có xuất xứ Trung Quốc; cellulase (Sigma, Mỹ); pectinase (Novozyme, Đan Mạch).

2.3. Thiết kế và bố trí thí nghiệm

2.3.1. Quy trình trích ly polysaccharide bằng phương pháp ME

Bột xương rồng khô được chiết bằng ME trong nước với tỷ lệ nguyên liệu: Dung môi là (1 : 10/1 : 20/1 : 30 w/v) và thời gian (4/ 6/ 8 giờ). Dịch chiết thu được ly tâm (5000 v/p, 10 phút), sau đó cô đặc còn 1/3 thể tích. Chiết xuất này được kết tủa bằng ethanol/methanol, tiếp tục ly tâm (5000 v/p, 10 phút) để thu kết tủa. Cuối cùng, kết tủa được sấy khô đến khối lượng không đổi để thu nhận polysaccharide thô [10].

2.3.2. Quy trình trích ly polysaccharide bằng phương pháp UAE

Bột xương rồng khô được thêm vào dung môi nước với tỷ lệ nguyên liệu:dung môi trích ly 1:30 (w/v). Thực hiện tách chiết polysaccharide bằng phương pháp UAE, hỗ trợ sóng siêu âm bằng thiết bị Q1375 Qsonica, khảo sát ảnh hưởng của biên độ siêu âm (20%/ 40%/ 60%), thời gian siêu âm (10/ 30/ 50 phút) và tỷ lệ dung môi kết tủa ethanol: chiết xuất (2 : 1/ 3 : 1/ 4 : 1).

2.3.3. Quy trình trích ly polysaccharide bằng phương pháp UAE

Bột xương rồng khô được thêm vào dung môi nước với tỷ lệ nguyên liệu:dung môi 1:30 (w/v). Thực hiện đánh siêu âm với biên độ 40% và thời gian 30 phút. Bổ sung enzyme cellulase (0,5%/ 1%/ 2%/ 3%) / pectinase (0,5%/ 1%/ 1,5%) / (0,5% cellulase và 0,5% pectinase) vào dịch chiết, tiến hành hoạt hóa ở nhiệt độ 50°C, thời gian 30 phút, pH = 5; sau đó vô hoạt enzyme trong 1 phút ở nhiệt độ 80°C. Thu dịch chiết xương rồng và thực hiện tách chiết tương tự phương pháp ME.

2.4. Phương pháp đánh giá

2.4.1. Xác định hiệu suất trích ly polysaccharide thô từ xương rồng Nopal

Polysaccharide thô thu được từ quá trình trích ly, đem sấy đến khối lượng không đổi thu

polysaccharide. Tính toán hiệu suất trích ly polysaccharide thô (% g polysaccharide/g nguyên liệu khô) theo công thức sau [11]:

$$\text{Hiệu suất trích ly polysaccharide thô (\%)} = \frac{m_{\text{polysaccharide thô}}}{m_m} \times 100$$

2.4.2. Xác định hiệu suất trích ly carbohydrate trong polysaccharide thô từ xương rồng Nopal

Hiệu suất trích ly carbohydrate trong polysaccharide thô từ xương rồng Nopal (qui về % g glucose/g nguyên liệu khô) được xác định bằng phương pháp quang phổ lên màu phenol - sulfuric acid, sử dụng D - glucose làm chất chuẩn (tuyến tính 0 - 100 $\mu\text{g/mL}$) [12]. Polysaccharide thô thu được, đem hoà tan định mức thành 500 mL dung dịch 1. Lấy 0,25 mL dung dịch 1 trộn với 2,5 mL sulfuric axit đậm đặc và 0,1 mL thuốc thử phenol. Hỗn hợp được bổ sung nước cất thành 5 mL, sau đó ủ trong 20 phút và đo độ hấp thụ tại bước sóng 490 nm bằng máy quang phổ UV - Vis. Kết quả biểu thị hiệu suất trích ly là % khối lượng carbohydrate trong polysaccharide thô từ xương rồng Nopal tương đương gam glucose trên mỗi gam bột xương rồng khô (% g glucose/g nguyên liệu khô), tính theo công thức sau:

$$\text{Hiệu suất trích ly carbohydrate trong polysaccharide thô (\%)} = \frac{x \cdot V \cdot f \cdot 100}{10^6 \cdot m_m}$$

Trong đó: x là hàm lượng carbohydrate trong polysaccharide thô qui về gam glucose xác định theo đường chuẩn D - glucose ($\mu\text{g/mL}$); V là thể tích dịch chiết từ m(g) mẫu; f là hệ số pha loãng;

10^6 là hệ số chuyển đổi thành g; m_m là khối lượng mẫu khô đem đi chiết (g).

2.4.3. Phương pháp quang phổ hồng ngoại FTIR

Phổ FTIR được thực hiện trên thiết bị FTI IMPACT Nicolet 410 trong vùng 4.000 - 400 cm^{-1} . Mẫu polysaccharide thô được sấy khô 2 ngày trong tủ sấy chân không ở 50°C và sử dụng kỹ thuật ép viên với KBr.

2.5. Phân tích thống kê

Giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của các chỉ tiêu thu thập được tính toán bằng phần mềm Minitab 16. Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($P \leq 0,05$) của các nghiệm thức được phân tích bằng phương pháp ANOVA một yếu tố.

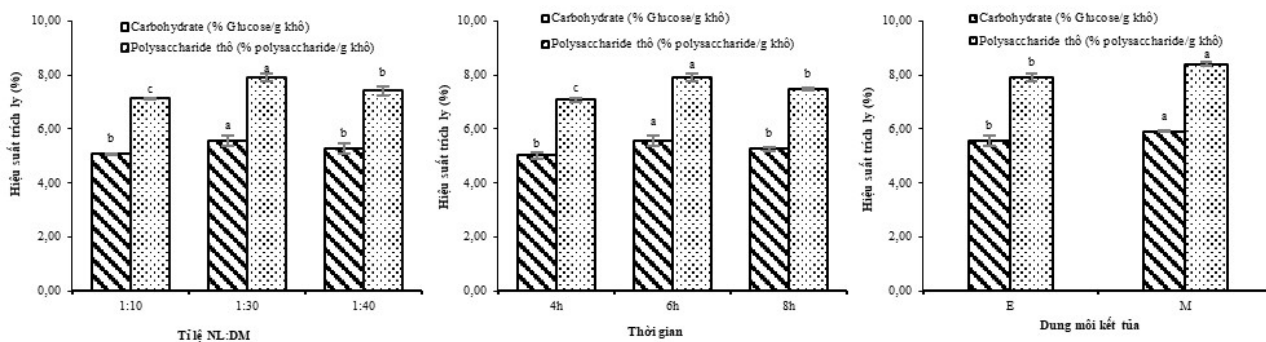
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1 Nghiên cứu trích ly polysaccharide bằng phương pháp ME

Nguyên liệu xương rồng dựa trên quá trình ngâm chiết phụ thuộc chủ yếu vào cơ chế khuếch tán hoạt chất từ ma trận thực vật ra dung môi, do đó thời gian tiếp xúc giữa nguyên liệu và dung môi quyết định mức độ giải phóng polysaccharide.

Kết quả khảo sát trình bày ở hình 2 cho thấy tỷ lệ nguyên liệu/dung môi 1:30 (w/v) là điều kiện tối ưu cho quá trình ngâm chiết polysaccharide từ xương rồng Nopal, tại đó hiệu suất trích ly đạt giá trị cao nhất. Xu hướng này phù hợp với cơ chế khuếch tán khối, trong đó việc gia tăng thể tích

dung môi ban đầu làm tăng gradient nồng độ giữa pha rắn và pha lỏng, từ đó thúc đẩy sự hòa tan và khuếch tán polysaccharide ra môi trường chiết. Tuy nhiên, khi vượt quá tỷ lệ tối ưu, hiệu suất trích ly polysaccharide và carbohydrate trong polysaccharide thô không tiếp tục tăng mà giảm nhẹ, có thể do hiện tượng bão hòa dung môi và sự tái kết tụ hoặc phân tán không hiệu quả của các phân tử polysaccharide có khối lượng phân tử lớn, làm hạn chế động lực khuếch tán [10]. Hiện tượng tương tự cũng được Zhonghai Tang và cs (2011) ghi nhận khi tối ưu trích ly polysaccharide từ lá *Morus alba*, trong đó tỷ lệ nguyên liệu/dung môi vượt ngưỡng tối ưu không mang lại lợi ích về hiệu quả trích ly [13].



Hình 2. Hiệu suất trích ly polysaccharide thô và carbohydrate bằng phương pháp ME

(a, b, c, d ($p \leq 0,05$): thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê, số liệu là trung bình của 3 lần lặp lại.)

Thời gian trích ly tối ưu được xác định là 6 giờ. Việc kéo dài thời gian ngâm chiết hơn mức này không cải thiện hiệu suất mà có thể gây bất lợi do hiện tượng over-extraction, dẫn đến sự phân hủy từng phần hoặc thay đổi cấu trúc không gian của polysaccharide, ảnh hưởng đến các đặc tính chức năng như độ nhớt và khả năng tạo gel. Các nghiên cứu về polysaccharide thực vật cũng chứng minh, thời gian chiết quá dài làm tăng nguy cơ cắt mạch polymer và giảm chất lượng sản phẩm thu nhận, [10, 14]. Nghiên cứu của Rodríguez - González và cs (2015) trên mucilage từ *Opuntia* tự nhiên cũng chỉ ra rằng thời gian chiết ngắn hoặc trung bình giúp bảo toàn cấu trúc polysaccharide tốt hơn so với kéo dài thời gian xử lý nhiệt [15].

Mặc dù methanol thường cho hiệu quả kết tủa polysaccharide cao hơn do độ phân cực mạnh, ethanol đã được lựa chọn làm dung môi kết tủa trong nghiên cứu này nhằm đảm bảo tính an toàn

sinh học, giảm nguy cơ tồn dư dung môi độc hại và phù hợp với định hướng trích ly xanh. Lựa chọn này hoàn toàn phù hợp với xu hướng hiện nay trong khai thác polysaccharide từ phụ phẩm nông nghiệp, đặc biệt đối với các ứng dụng trong thực phẩm, dược phẩm và vật liệu sinh học [14]. Các nghiên cứu gần đây trên *Opuntia ficus - indica* cũng ưu tiên sử dụng ethanol làm dung môi kết tủa do tính thân thiện môi trường và khả năng duy trì chất lượng polysaccharide thu được [16, 17].

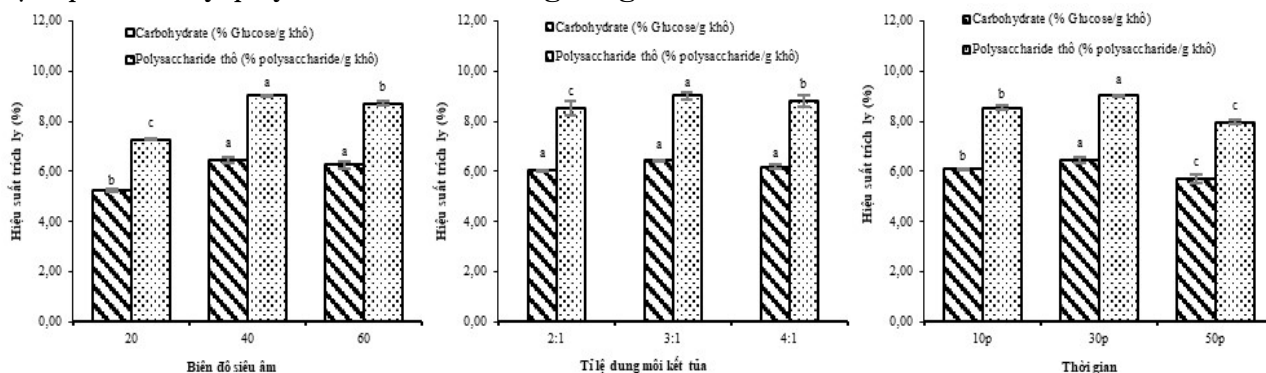
Dưới các điều kiện tối ưu gồm tỷ lệ nguyên liệu/dung môi 1:30, thời gian trích ly 6 giờ và dung môi kết tủa ethanol, hiệu suất trích ly polysaccharide thô thu được đạt $7,92 \pm 0,14\%$ (g polysaccharide/g chất khô), tương ứng carbohydrate trong polysaccharide thô từ xương rồng Nopal quy đổi glucose đạt $5,58 \pm 0,18\%$. Giá trị này cao hơn so với nhiều nghiên cứu sử dụng ngâm chiết truyền thống trên các nguồn polysaccharide thực vật khác như *Morus alba* hoặc

phụ phẩm củ cải đường, nhưng vẫn thấp hơn đáng kể so với các phương pháp tăng cường như siêu âm hoặc enzyme hỗ trợ siêu âm [18, 19].

3.2. Nghiên cứu trích ly polysaccharide bằng phương pháp UAE

Phương pháp hỗ trợ siêu âm (UAE) cho thấy hiệu quả trích ly polysaccharide từ xương rồng

Nopal cao hơn so với phương pháp ngâm chiết truyền thống, giảm đáng kể thời gian trích ly và gia tăng hàm lượng polysaccharide thu hồi. UAE được xem là một kỹ thuật trích ly tăng cường hiệu quả đối với polysaccharide thực vật, đặc biệt từ các nguyên liệu giàu mucilage và có cấu trúc polymer phức tạp [20]



Hình 3. Hiệu suất trích ly polysaccharide thô và carbohydrate bằng phương pháp UAE

a, b, c, d ($p \leq 0,05$: thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê, số liệu là trung bình của 3 lần lặp lại)

Kết quả trình bày ở hình 3 cho thấy, biên độ siêu âm có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả trích ly. Khi biên độ tăng từ 20% lên 40%, hiệu suất trích ly polysaccharide thô và carbohydrate trong polysaccharide thô đều tăng rõ rệt và sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p \leq 0,05$). Xu hướng này tương đồng với kết quả của Wei và cộng sự khi trích ly polysaccharide từ *Cercis chinensis*, trong đó các mức cường độ siêu âm trung bình cho hiệu suất thu hồi cao hơn đáng kể so với thấp [21, 18].

Thời gian siêu âm từ 30 lên 50 phút, hiệu suất trích ly không tiếp tục tăng mà có xu hướng giảm nhẹ. Kết quả này phù hợp với nhiều báo cáo trước đây, trong đó việc xử lý siêu âm kéo dài được ghi nhận là không mang lại lợi ích bổ sung về hiệu suất và thậm chí có thể làm suy giảm các đặc tính mong muốn của polysaccharide. Zhang và cs (2025) khi nghiên cứu polysaccharide từ *Brassica rapa* cũng ghi nhận rằng thời gian siêu âm quá dài làm giảm độ nhớt và thay đổi đặc tính polymer, dẫn đến hiệu quả thu hồi thấp hơn [20]. Tương tự, Abou - Elseoud và cs (2021) báo cáo rằng xử lý siêu âm quá mức trong trích ly pectin có thể ảnh hưởng bất lợi đến chất lượng polysaccharide thu được [19]. Những kết quả này cho thấy UAE đòi

hỏi sự cân bằng giữa cường độ và thời gian xử lý để đạt hiệu quả tối ưu.

Đồng thời, tỷ lệ dung môi kết tủa ethanol cũng ảnh hưởng rõ rệt đến hiệu suất trích ly polysaccharide. Việc tăng tỷ lệ ethanol từ 2 : 1 lên 3 : 1 giúp cải thiện đáng kể hiệu suất, trong khi tăng tiếp lên 4 : 1 không tạo ra sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Với các nghiên cứu về mucilage *Opuntia ficus - indica*, tỷ lệ ethanol trung bình (3 : 1) được xác định là đủ để đạt hiệu quả kết tủa tối ưu mà không cần sử dụng lượng dung môi dư thừa [15, 22].

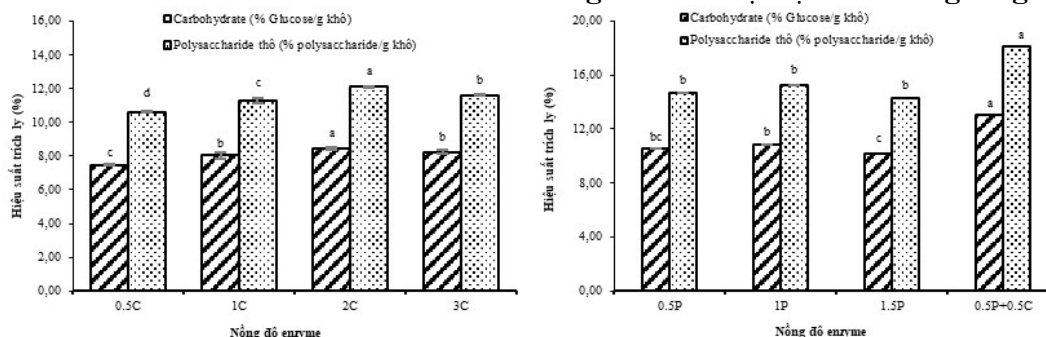
Dưới các điều kiện tối ưu của phương pháp UAE (biên độ 40%, thời gian 30 phút và tỷ lệ dung môi kết tủa ethanol 3 : 1), hiệu suất trích ly polysaccharide thô đạt 9,01% (g/g chất khô) và carbohydrate trong polysaccharide thô quy đổi glucose đạt 6,44% (g/g chất khô). Giá trị này cao hơn rõ rệt so với phương pháp ngâm chiết truyền thống, khẳng định ưu thế của UAE trong việc nâng cao hàm lượng và rút ngắn thời gian trích ly.

3.3. Nghiên cứu trích ly polysaccharide bằng phương pháp UAEE

Hiệu quả trích ly polysaccharide từ nguyên liệu thực vật phụ thuộc chặt chẽ vào đặc điểm cấu trúc thành tế bào, do được hình thành chủ yếu từ

cellulose, hemicellulose, lignin và pectin. Các cấu trúc này tạo nên một mạng lưới polymer bền vững, hạn chế khả năng khuếch tán của dung môi và sự giải phóng polysaccharide hòa tan. Do đó, việc sử dụng enzyme thủy phân như cellulase và pectinase đóng vai trò quan trọng trong việc phá vỡ liên kết β -1,4-glycosidic của cellulose và mạng pectin liên bào, qua đó làm suy yếu cấu trúc thành tế bào và tạo điều kiện giải phóng polysaccharide vào môi trường chiết [8]. Cơ chế này đã được ghi nhận rộng rãi trong các nghiên cứu về polysaccharide từ phụ phẩm thực vật, bao gồm lá *Morus alba* và vỏ trái cây họ Citrus.

Khi kết hợp enzyme với sóng siêu âm, hiệu quả trích ly được tăng cường rõ rệt nhờ hiệu ứng cavitation. Sự hình thành và sụp đổ của các bong bóng cavitation tạo ra áp suất và nhiệt độ cục bộ rất cao, dẫn đến phá vỡ cơ học mô thực vật, làm tăng diện tích bề mặt tiếp xúc và cải thiện khả năng thâm nhập của enzyme cũng như dung môi vào cấu trúc tế bào [23]. Nghiên cứu của Lin và cs (2023) trên polysaccharide từ vỏ bưởi Shatian cho thấy phương pháp enzyme hỗ trợ siêu âm cho hàm lượng cao vượt trội so với chiết nước nóng truyền thống, đồng thời cải thiện hàm lượng đường và acid uronic trong sản phẩm thu được [23]. Xu hướng này hoàn toàn phù hợp với kết quả của nghiên cứu hiện tại trên xương rồng Nopal.



Hình 4. Hiệu suất trích ly polysaccharide thô và carbohydrate bằng phương pháp UAE

a, b, c, d ($p \leq 0,05$: Thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê, số liệu là trung bình của 3 lần lặp lại)

Kết quả khảo sát (Hình 4) cho thấy với enzyme đơn lẻ, hiệu suất trích ly đạt cực đại tại 2% đối với cellulase (12,10%) và 1% đối với pectinase (15,24%). Nồng độ enzyme là yếu tố ảnh hưởng mang tính quyết định đến hiệu suất và chất lượng polysaccharide. Ở nồng độ enzyme thấp, số lượng trung tâm hoạt động không đủ để phá vỡ hiệu quả cấu trúc mô, dẫn đến hiệu quả trích ly còn hạn chế. Khi tăng nồng độ enzyme, sự kết hợp giữa quá trình thủy phân sinh học và tác động cơ học của cavitation giúp gia tăng tốc độ truyền khối và giải phóng polysaccharide. Tuy nhiên, khi nồng độ enzyme vượt quá ngưỡng tối ưu, hiện tượng thủy phân quá mức có thể xảy ra, làm giảm khối lượng phân tử polysaccharide, ảnh hưởng đến tính chất chức năng như độ nhớt, khả năng tạo gel, cũng như làm tăng chi phí xử lý mà không mang lại lợi ích tương ứng [3]. Hiện tượng này cũng được ghi nhận trong các nghiên cứu về polysaccharide từ vỏ bưởi và các nguồn thực vật giàu pectin khác, nơi

hiệu suất giảm khi enzyme được bổ sung quá mức do bão hòa cơ chất và ức chế ngược [23].

Pectinase cho hiệu quả cao hơn cellulase, điều này có thể được giải thích bởi vai trò trung tâm của pectin trong cấu trúc liên bào của mô xương rồng, nơi pectin hoạt động như “chất xi măng sinh học” gắn kết các tế bào thực vật. Việc phá vỡ pectin giúp mở rộng các kênh khuếch tán và thúc đẩy quá trình giải phóng polysaccharide hiệu quả hơn [24]. Kết quả này tương tự với các nghiên cứu về mucilage và gum từ *Opuntia ficus-indica*, trong đó pectin và polysaccharide giàu acid uronic được xác định là thành phần chính quyết định tính chất lưu biến và chức năng sinh học [25].

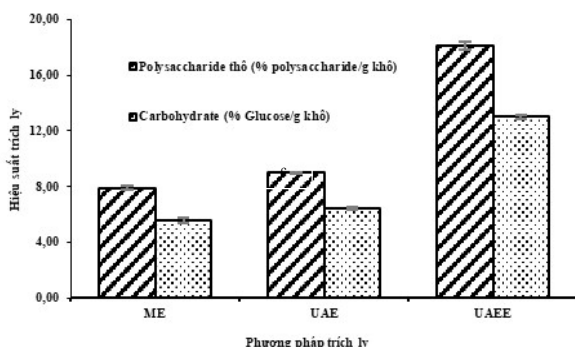
Đáng chú ý, hiệu suất trích ly cao nhất đạt được khi sử dụng tổ hợp 0,5% cellulase và 0,5% pectinase, với giá trị 18,12% polysaccharide thô, tương ứng 13,02% carbohydrate trong polysaccharide thô quy đổi glucose. Sự gia tăng vượt trội này khẳng định hiệu ứng cộng hưởng

enzyme, trong đó cellulase phá vỡ khung cellulose sơ cấp, trong khi pectinase đồng thời phá vỡ lớp pectin liên bào, dẫn đến sự suy yếu toàn diện cấu trúc thành tế bào và giảm đáng kể trở lực khuếch tán. Cơ chế cộng hưởng này đã được nhiều nghiên cứu quốc tế ghi nhận, đặc biệt trong trích ly polysaccharide từ vỏ quả và phụ phẩm nông nghiệp, nơi tổ hợp enzyme thường cho hiệu quả cao hơn đáng kể so với enzyme đơn lẻ [23].

So sánh với các nghiên cứu trước đây trên *Opuntia ficus - indica*, hiệu suất trích ly polysaccharide đạt được trong nghiên cứu này cao hơn các phương pháp trích ly tiên tiến như vi sóng hoặc enzyme đơn thuần, đồng thời vẫn bảo toàn cấu trúc polymer cần thiết cho các ứng dụng công nghệ thực phẩm và vật liệu sinh học [15].

3.4. Đánh giá chất lượng polysaccharide thu nhận từ xương rồng Nopal bằng các phương pháp trích ly

Trích ly polysaccharide từ xương rồng Nopal (*Opuntia* spp.) cho thấy hiệu quả của quá trình chiết phụ thuộc mạnh vào phương pháp áp dụng, trong đó phương pháp enzyme hỗ trợ siêu âm (UAEE) thể hiện ưu thế rõ rệt so với ngâm chiết (ME) và siêu âm đơn thuần (UAE).



Hình 5. Hiệu suất trích ly polysaccharide thô và carbohydrate phương pháp ME, UAE và UAEE

a, b, c, d ($p \leq 0.05$: thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê, số liệu là trung bình của 3 lần lặp lại)

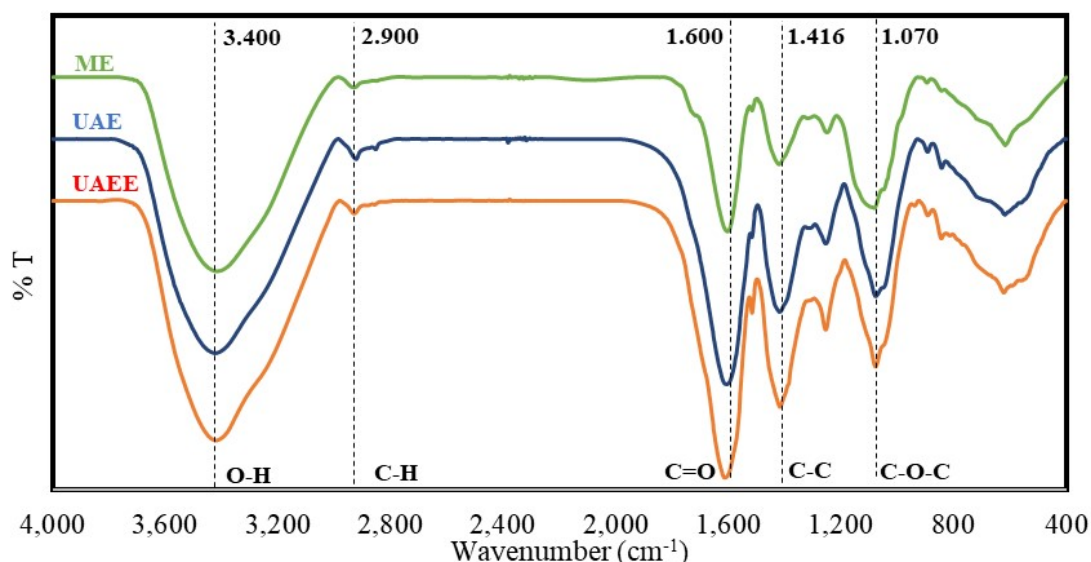
Kết quả so sánh ở hình 5 cho thấy hiệu quả trích ly polysaccharide từ xương rồng Nopal (*Opuntia* spp.) tăng dần theo mức độ cải tiến của phương pháp, với thứ tự $ME < UAE < UAEE$. Phương pháp ngâm chiết (ME) cho hàm lượng thấp nhất do giới hạn nội tại của cơ chế chiết truyền

thống, phù hợp với nhiều báo cáo trước đây về polysaccharide *Opuntia* có cấu trúc polymer lớn và mạng liên kết bền vững, khó giải phóng hoàn toàn bằng các phương pháp đơn giản [26, 17]. Việc áp dụng sóng siêu âm trong UAE giúp cải thiện đáng kể hiệu suất so với ME, khẳng định vai trò của các kỹ thuật chiết tăng cường trong khai thác polysaccharide từ nguyên liệu thực vật, tương đồng với các nghiên cứu trên *Cercis chinensis*, *Brassica rapa* và nhiều nguồn polysaccharide khác [18, 20].

Tuy nhiên, phương pháp UAEE cho thấy sự vượt trội rõ rệt cả về hiệu suất trích ly polysaccharide thô và carbohydrate trong polysaccharide thô, đạt giá trị cao hơn hơn hai lần so với ME và gần hai lần so với UAE. Kết quả này phù hợp với xu hướng chung của các nghiên cứu gần đây, trong đó phương pháp enzyme hỗ trợ siêu âm được xem là chiến lược hiệu quả nhất để nâng cao hiệu suất trích ly polysaccharide đồng thời hạn chế các bất lợi của từng phương pháp riêng lẻ [23, 3]. Việc đạt hiệu suất cao ở điều kiện enzyme thấp cũng cho thấy tính khả thi về mặt kinh tế và bền vững của phương pháp UAEE, đặc biệt đối với các nguyên liệu giàu mucilage như *Opuntia* [27, 28].

Sự khác biệt về hiệu quả trích ly polysaccharide giữa ba phương pháp ME, UAE và UAEE được củng cố rõ rệt thông qua phân tích phổ FTIR của các mẫu thu nhận (Hình 6). Phổ FTIR của tất cả các mẫu đều cho thấy sự hiện diện của các dải hấp thụ đặc trưng cho polysaccharide xương rồng, bao gồm nhóm hydroxyl (-OH), aliphatic C - H, carbonyl/carboxyl ($C = O/-COO^-$) và ether (C - O - C), phù hợp với đặc điểm cấu trúc của mucilage *Opuntia* đã được báo cáo trong nhiều nghiên cứu trước đây [15, 26, 29].

Tuy nhiên, cường độ và độ sắc nét của các dải hấp thụ có sự khác biệt đáng kể tùy thuộc vào phương pháp trích ly. Mẫu thu nhận bằng UAEE thể hiện phổ FTIR với tín hiệu rõ ràng và cường độ hấp thụ cao hơn trên hầu hết các vùng đặc trưng so với ME và UAE, phản ánh hiệu suất thu hồi polysaccharide cao hơn cũng như mức độ bảo toàn cấu trúc hóa học tốt hơn [15, 27, 3].



Hình 6. Phổ FTIR polysaccharide thô từ xương rồng trích ly bằng ME, UAE và UAEE

Dải hấp thụ rộng tại khoảng 3.400 cm^{-1} , đặc trưng cho dao động kéo dài của nhóm -OH liên quan đến liên kết hydro nội và liên phân tử, được quan sát với cường độ mạnh nhất ở mẫu UAEE. Xu hướng này cho thấy mật độ nhóm hydroxyl tự do cao hơn, phù hợp với các báo cáo FTIR về mucilage *Opuntia ficus-indica*, trong đó cường độ dải -OH được xem là dấu hiệu gián tiếp cho mức độ giải phóng và độ tinh sạch của polysaccharide [26, 30].

Các dải tại khoảng 2.900 cm^{-1} , tương ứng với dao động của liên kết -CH và -CH₂ trong khung polysaccharide, thể hiện rõ ở mẫu ME nhưng giảm cường độ ở UAE và UAEE. Sự thay đổi này đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước và thường được liên hệ với sự điều chỉnh cấu hình hoặc phân bố mạch polysaccharide dưới tác động của các phương pháp chiết tách cường, mà không làm mất đi các đặc trưng cấu trúc cốt lõi của polymer [15], [25].

Trong vùng 1.600 và 1.416 cm^{-1} , các dải hấp thụ liên quan đến dao động bất đối xứng và đối xứng của nhóm carboxylate (-COO⁻) được quan sát ở cả ba mẫu, cho thấy sự hiện diện của các acid uronic - thành phần cấu trúc quan trọng của mucilage *Opuntia*. Mẫu UAEE tiếp tục thể hiện cường độ tín hiệu cao hơn, gợi ý khả năng thu hồi tốt hơn các phân đoạn giàu acid uronic, tương tự với các nghiên cứu cho thấy hàm lượng và trạng thái ion hóa của nhóm carboxylate có thể bị ảnh hưởng bởi phương pháp trích ly [26], [31].

Ngoài ra, các dải hấp thụ trong vùng $1.084 - 1.070\text{ cm}^{-1}$, đặc trưng cho dao động của liên kết C-C và C-O-C trong khung polysaccharide, xuất hiện rõ nét nhất ở mẫu UAEE. Điều này cho thấy cấu trúc polymer cơ bản được bảo toàn tốt, đồng thời phản ánh mức độ tinh sạch cao của polysaccharide thu nhận, tương quan chặt chẽ với kết quả định lượng polysaccharide đã trình bày trên. Xu hướng này phù hợp với các nghiên cứu FTIR trên mucilage *Opuntia ficus-indica* và *Opuntia robusta*, trong đó phương pháp trích ly được xác định là yếu tố chính ảnh hưởng đến cả hàm lượng và chất lượng cấu trúc polymer [31], [32], [27].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá hiệu quả ba phương pháp trích ly polysaccharide từ xương rồng Nopal (*Opuntia* spp.), gồm ngâm chiết, siêu âm và enzyme hỗ trợ siêu âm. Kết quả cho thấy phương pháp enzyme kết hợp siêu âm (UAEE) với tổ hợp 0,5% cellulase và 0,5% pectinase mang lại hiệu suất trích ly cao nhất, đạt 18,12% polysaccharide thô và 13,02% carbohydrate trong polysaccharide thô, vượt trên hai lần so với ngâm chiết và gần hai lần so với siêu âm đơn thuần. Điều này khẳng định hiệu ứng cộng hưởng giữa cavitation của siêu âm và hoạt tính thủy phân của enzyme trong việc phá vỡ cấu trúc thành tế bào, giúp giải phóng polysaccharide hiệu quả hơn. Phân tích FTIR xác nhận sự hiện diện các nhóm chức đặc trưng và cho thấy mẫu UAEE có cường độ hấp thụ mạnh nhất,

phản ánh mức độ giải phóng hoạt chất cao và sự bảo tồn cấu trúc polysaccharide tốt. Nhìn chung, phương pháp UAEE được xác định là quy trình tối ưu để thu hồi polysaccharide từ xương rồng Nopal (*Opuntia* Spp.), đồng thời cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho các nghiên cứu tiếp theo về đặc tính chức năng và tiềm năng ứng dụng trong phát triển vật liệu màng sinh học.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này do Trường Đại học Công Thương TP. HCM bảo trợ và cấp kinh phí theo Hợp đồng số 09/HĐ-DCT ngày 09 tháng 01 năm 2024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. G. Goksen, D. Demir, K. Dhama, M. Kumar, P. Shao, F. Xie, N. Echegaray, and J. M. Lorenzo (2023). Mucilage polysaccharide as a plant secretion: Potential trends in food and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 230 (1): 1 - 17. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123146.
2. Yadiki M. N., Suggala V. S., Puchalapalli D. S. R., Ahad H. A. (2022). Temperature and exposure time impact on the extraction of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia dillenii* cladodes on % yield as a response: Screening using Design Expert software. *Global Journal of Medical, Pharmaceutical and Biomedical Update*, 17(4): 1 - 5. DOI: 10.25259/gjmbpu_55_2022.
3. Salehi E., Emam-Djomeh Z., Askari G., Fathi M. (2019). *Opuntia ficus indica* fruit gum: Extraction, characterization, antioxidant activity and functional properties. *Carbohydrate Polymers*, 206(50): 565 - 572. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.11.035.
4. M. del S. Santos Díaz, A.-P. Barba de la Rosa, C. Héliès-Toussaint, F. Guéraud, and A. Nègre-Salvayre (2017). *Opuntia* spp.: Characterization and Benefits in Chronic Diseases. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 4: 1 - 17. DOI: 10.1155/2017/8634249.
5. De Santiago E., Juárez I., Cid C., De Peña M. P. (2021). Extraction of (poly)phenolic compounds of cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) cladodes. *Food Analytical Methods*, 14(6): 1167-1175. DOI: 10.1007/s12161-020-01946-6.
6. Sepúlveda E., Sáenz C., Aliaga E., Aceituno C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68(4): 534-545. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2006.08.001.
7. Akhmetova A., Saliev T., Allan I. U., Illsley M. J., Nurgozhin T., Mikhailovsky S. (2016). A comprehensive review of topical odor-controlling treatment options for chronic wounds. *Journal of Wound, Ostomy and Continence Nursing*, 43(6): 598-609. DOI: 10.1097/WON.0000000000000273.
8. Martinsen B. K., Aaby K., Skrede G. (2020). Effect of temperature on stability of anthocyanins, ascorbic acid and color in strawberry and raspberry jams. *Food Chemistry*, 316(1): 126297. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126297.
9. Habibi Y., Heyraud A., Mahrouz M., Vignon M. R. (2004). Structural features of pectic polysaccharides from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydrate Research*, 339(6): 1119-1127. DOI: 10.1016/j.carres.2004.02.005.
10. N. Adjeroud-Abdellatif, Y. Hammoui, A. Boudria, S. Agab, F. Choulak, and J.-P. Leclerc (2022). Effect of a natural coagulant extract from *Opuntia ficus-indica* cladode on electrocoagulation-electroflotation water treatment process. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(17): 5822 - 5846. DOI: 10.1080/03067319.2020.1804889.
11. Nguyen Thi Dong Phuong, Le Thi Van Anh, Le Thi Dieu Huong, Pham Thi My Yen (2021). Extraction of polysaccharide from *Spirulina platensis* - advantage of freeze-thaw method. *Vietnam Journal of Biotechnology*, 18(4), 693 - 699. DOI: 10.15625/1811-4989/18/4/16087.
12. Yue F., Zhang J., Xu J., Niu T., Lü X., Liu M. (2022). Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method. *Frontiers in Nutrition*, 9: 1 - 10. DOI: 10.3389/fnut.2022.963318.
13. Tang Z., Guo S., Rao L., Qin J., Xu X., Liang Y. (2011). Optimization of the technology of extracting water soluble polysaccharides from *Morus alba* L. leaves. *African Journal of*

Biotechnology, 10(59): 12714 - 12720. DOI: 10.5897/ajb10.2203.

14. Hu X., Goff H. D. (2018). Fractionation of polysaccharides by gradient non-solvent precipitation: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 81: 108 - 115. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.09.011.

15. S. Rodríguez-González, H. E. Martínez-Flores, C. K. Chávez-Moreno, L. I. Macías-Rodríguez, E. Zavala-Mendoza, M. G. Garnica-Romo, and L. Chacón-García (2014). Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *Journal of Food Process Engineering*, 37(3): 285 - 292. DOI: 10.1111/jfpe.12084.

16. Zamboi A., Fraterrigo Garofalo S., Tommasi T., Fino D. (2024). Optimization of ultrasound assisted extraction of polysaccharides from cladodes of *Opuntia ficus-indica* using response surface methodology. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37: 1 - 11. DOI: 10.1016/j.scp.2023.101348.

17. B. Luna-Sosa, G. C. G. Martínez-Ávila, H. Rodríguez-Fuentes, L. M. Pastrana, A. G. Azevedo, D. C. González-Sandoval, M. A. Cerqueira, and R. Rojas (2022). Extraction and characterization of mucilage from *Opuntia ficus-indica* cultivated on hydroponic system. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1): 1 - 16. DOI: 10.15835/nbha50112460.

18. Wei Q., Zhang Y. H. (2023). Ultrasound-assisted polysaccharide extraction from *Cercis chinensis* and properties, antioxidant activity of polysaccharide. *Ultrasonics Sonochemistry*, 96(1): 1 - 9. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106422.

19. Abou-Elseoud W. S., Hassan E. A., Hassan M. L. (2021). Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2: 1 - 11. DOI: 10.1016/j.carpta.2021.100042.

20. M. Zhang, W. Wang, W. Li, Z. Wang, K. Bi, Y. Li, Y. Wu, Y. Zhao, R. Yang, and Q. Du (2025). Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from *Brassica rapa* L. and its effects on gut microbiota in humanized mice. *Foods*, 14(11): 1 - 21. DOI: 10.3390/foods14111994

21. Zhang, J.; Liang, Z.; Zhang, K.; Tang, X.; Wang, L.; Gu, X.; Savelkoul, H.F.J.; Li, J. (2025). Ultrasound-assisted extraction, characterization, and antioxidant activities of the polysaccharides from fermented *Astragalus membranaceus*. *Molecules*, 30(5): 1 - 22. DOI: 10.3390/molecules30051159.

22. Iftikhar, K.; Siddique, F.; Ameer, K.; Arshad, M.; Kharal, S.; Ahmed, I.A.M.; Yasmin, Z.; Aziz, N. (2023). Phytochemical profiling, antimicrobial and antioxidant activities of hydroethanolic extracts of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit and pulp. *Food Science & Nutrition*, 11(4): 1916 - 1930. DOI: 10.1002/fsn3.3226.

23. Lin B., Wang S., Zhou A., Hu Q., Huang G. (2023). Ultrasound-assisted enzyme extraction and properties of Shatian pomelo peel polysaccharide. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98: 1 - 12. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106507.

24. J. P. Fuenzalida, P. K. Nareddy, I. Moreno-Villoslada, B. M. Moerschbacher, M. J. Swamy, S. Pan, M. Ostermeier, and F. M. Goycoolea (2016). On the role of alginate structure in complexing with lysozyme and application for enzyme delivery. *Food Hydrocolloids*, 53: 239 - 248. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.04.017.

25. Fernández-Martínez M. C., Jiménez-Martínez J. F., Alamilla-Beltrán L. M. R. (2024). Extraction of purple prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) mucilage by microfiltration, composition, and physicochemical characteristics. *Polymers*, 16(23): 1 - 21. DOI: 10.3390/polym16233383.

26. Medina-Torres L., Brito-De La Fuente E., Torrestiana-Sanchez B., Katthain R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14(5): 417 - 424. DOI: 10.1016/S0268-005X(00)00015-1.

27. F. Di Lorenzo, A. Silipo, A. Molinaro, M. Parrilli, C. Schiraldi, A. D'Agostino, E. Izzo, L. Rizza, A. Bonina, F. Bonina, and R. Lanzetta (2017). The polysaccharide and low molecular weight components of *Opuntia ficus indica* cladodes: Structure and skin repairing properties. *Carbohydrate Polymers*, 157: 128 - 136. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.09.073.

28. Elhleli H., Mannai F., Khiari R., Moussaoui Y. (2021). The use of mucilage extracted from *Opuntia ficus indica* as a microencapsulating shell. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 86(1): 25 - 38. DOI: 10.2298/jsc200229033e.
29. García A. L., Zamora C. M. P., Michaluk A. G., Nuñez M. B., Gonzalez A. M., Torres C. A. (2024). Physicochemical and functional characterization of the mucilage obtained from cladodes of two *Opuntia* species. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283(9): 137802. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137802.
30. Elshewy A., Blando F., Bahlol H., El-Desouky A., De Bellis P., Khalifa I. (2023). Egyptian *Opuntia ficus-indica* residues: Recovery and characterization of fresh mucilage from cladodes. *Horticulturae*, 9: 1 - 15. DOI: 10.3390/horticulturae9070736.
31. E. Gonzalez-Aviles, F. Rodríguez-Gonzalez, S. V. Vargas-Solano, A. Osorio-Ruiz, M. P. Jonathan, and L. E. Campos-Villegas (2024). Effect of the concentration of uronic acids in *Opuntia* mucilage on the removal of heavy metals and water quality of the Yautepec River, Mexico. *Arabian Journal of Chemistry*, 17: 1 - 12. DOI: 10.1016/j.arabjc.2024.105636.
32. A. Bernardino-Nicanor, J. L. Montañez-Soto, E. Conde-Barajas, M. de la Luz Xochilt Negrete-Rodríguez, G. Teniente-Martínez, E. A. Vargas-León, J. M. Simitrio Juárez-Goiz, G. Acosta-García, and L. González-Cruz (2018). Spectroscopic and structural analyses of *Opuntia robusta* mucilage and its potential as an edible coating. *Coatings*, 8: 1 - 11. DOI: 10.3390/coatings8120466.

STUDY ON THE EFFECT OF EXTRACTION METHOD AND QUALITY EVALUATION OF POLYSACCHARIDES OBTAINED FROM NOPAL (*OPUNTIA* SPP.)

Nguyen Thi Luong¹, Phan Thi Thanh Dieu¹, Vo Ngoc Man¹,
Le Ngoc Na¹, Dinh Thi Tam Nhu¹, Le Tu Ngoc¹

¹ Ho Chi Minh City University of Industry and Trade

Abstract

This study investigates the extraction efficiency of polysaccharides from Nopal cactus (*Opuntia* spp.) using three methods: maceration, ultrasound-assisted extraction (UAE), and ultrasound-assisted enzymatic extraction (UAEE). In the maceration method, optimization of material-to-solvent ratios and extraction times yielded a maximum crude polysaccharide content of 7.92% and a carbohydrate content in the crude polysaccharide of 5.58%. UAE improved extraction performance, achieving 9.01% polysaccharides and 6.44% carbohydrate under varied ultrasound amplitudes and precipitation ratios. UAEE demonstrated the highest efficiency, particularly with the combined use of 0.5% cellulase and 0.5% pectinase, resulting in 18.12% polysaccharides and 13.02% carbohydrate. FTIR spectra confirmed the presence of polysaccharides through characteristic functional groups, including -OH, -CH, -C=O, C=C, and C-O-C. Overall, UAEE not only significantly enhanced polysaccharide recovery but also preserved chemical integrity, highlighting its potential for developing biodegradable polymer films.

Keywords: Cellulase, enzyme, maceration, pectinase, polysaccharide, ultrasound, nopal cactus (*Opuntia* spp.).

Ngày nhận bài: 31/10/2025

Ngày chuyển phản biện: 15/12/2025

Ngày thông qua phản biện: 5/01/2026

Ngày duyệt đăng: 12/02/2026