Fabrication of highly active silver nanoparticles from mangosteen peel (*Garcinia mangostana*) for the reduction of p-nitrophenol in water and their antibacterial activities

Van T. T. Le*, Phu D. Trương, & Quyen T. N. Le
Department of Chemical Engineering, Nong Lam University, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

Research Paper

Received: October 30, 2025
Revised: December 04, 2025
Accepted: December 09, 2025

Keywords

Antibacterial
Mangosteen peel
Nano silver
P-nitrophenol reduction

***Corresponding author**

Le Thi Thanh Van
Email: thvan@hcmuaf.edu.vn

ABSTRACT

This study presents a green and sustainable route for synthesizing silver nanoparticles (AgNPs) using mangosteen peel extract, which served as both a reducing and a stabilizing agent. The synthesis process was optimized by investigating key parameters, including temperature, reaction time, $AgNO_3$ concentration, and the Ag^+ solution-to-extract ratio. The formation of AgNPs was confirmed by UV-Vis spectroscopy, while XRD (X-ray diffraction), HR-TEM (High-resolution transmission electron microscopy), and SAED (Selected area electron diffraction) analyses revealed that the nanoparticles were spherical, well-dispersed, crystalline face-centered cubic structures with an average size of 16.2 ± 4.3 nm. The AgNPs exhibited exceptional catalytic activity in the sodium borohydride ($NaBH_4$) reduction of p-nitrophenol (PNP), achieving a conversion efficiency of > 95% within just 2 minutes. This catalytic reaction followed pseudo-first-order kinetics with a reaction rate constant (k = 0.815/min). Furthermore, the AgNPs demonstrated strong antibacterial activity against *Escherichia coli* and *Salmonella typhi*, evidenced by an inhibition zone of approximately 15 mm, a minimum inhibitory concentration (MIC) of 3.04 mg/L, and a minimum bactericidal concentration (MBC) of 6.08 mg/L. These findings not only highlight the potential of plant extracts for the green synthesis of AgNPs but also underscore the promising application of this nanomaterial in environmental remediation and biomedical fields.

Cited as: Le, V. T. T., Truong, P. D., & Le, Q. T. N. (2026). Fabrication of highly active silver nanoparticles from mangosteen peel (*Garcinia mangostana*) for the reduction of p-nitrophenol in water and theor antibacterial activities. *The Journal of Agriculture and Development* 25(5), 116-127.

Chế tạo hạt nano bạc từ vỏ măng cụt (*Garcinia mangostana*) có hoạt tính khử p-nitrophenol trong nước và kháng khuẩn cao

Lê Thị Thanh Vân*, Trương Đình Phú & Lê Thị Như Quyên

Bộ Môn Công Nghệ Hóa Học, Khoa Công Nghệ Hóa Học và Thực Phẩm, Trường Đại Học Nông Lâm TP.HCM, TP. Hồ Chí Minh

THÔNG TIN BÀI BÁO

Bài báo khoa học

Ngày nhận: 30/10/2025
Ngày chỉnh sửa: 04/12/2025
Ngày chấp nhận: 09/12/2025

Từ khóa

Kháng khuẩn
Khử-nitrophenol
Nano bạc
Vỏ măng cụt

***Tác giả liên hệ**

Lê Thị Thanh Vân
Email: thvan@hcmuaf.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày một quy trình xanh và bền vững để tổng hợp nano bạc (AgNPs) bằng cách sử dụng dịch chiết vỏ măng cụt, đóng vai trò vừa là tác nhân khử vừa là tác nhân ổn định. Quá trình tổng hợp được tối ưu hóa bằng cách khảo sát các thông số chính, bao gồm nhiệt độ, thời gian phản ứng, nồng độ $AgNO_3$ và tỷ lệ dung dịch Ag^+ trên dịch chiết. Sự hình thành các hạt AgNPs được xác nhận bằng quang phổ UV-Vis, trong khi các phân tích XRD (giản đồ nhiễu xạ tia X), HR-TEM (kính hiển vi điện tử truyền qua độ phân giải cao) và SAED (nhiễu xạ điện tử vùng chọn lọc) cho thấy các hạt nano có dạng hình cầu, phân tán tốt, cấu trúc tinh thể lập phương tâm diện với kích thước trung bình là 16,2 ± 4,3 nm. Các hạt AgNPs thể hiện hoạt tính xúc tác đặc biệt trong phản ứng khử p-nitrophenol (PNP) bằng natri borohydride ($NaBH_4$), đạt hiệu suất chuyển đổi > 95% chỉ trong vòng 2 phút. Phản ứng xúc tác này tuân theo phương trình động học bậc một với hằng số tốc độ phản ứng (k = 0,815/phút). Đồng thời, các hạt AgNPs thể hiện hoạt tính kháng khuẩn mạnh đối với *Escherichia coli* và *Salmonella typhi*, được chứng minh bằng vùng ức chế khoảng 15 mm, nồng độ ức chế tối thiểu (MIC) là 3,04 mg/L và nồng độ diệt khuẩn tối thiểu (MBC) là 6,08 mg/L. Những phát hiện này không chỉ làm nổi bật tiềm năng của dịch chiết thực vật trong tổng hợp xanh AgNPs mà còn nhấn mạnh ứng dụng đầy hứa hẹn của vật liệu nano này trong lĩnh vực xử lý môi trường và y sinh.

1. Đặt Vấn Đề

Ô nhiễm môi trường do các hợp chất hữu cơ độc hại từ hoạt động công nghiệp đang trở thành thách thức nghiêm trọng đối với sự phát triển bền vững. Trong số đó, p-nitrophenol (PNP) là một hợp chất nitroaromatic độc hại, được sử dụng phổ biến trong sản xuất thuốc trừ sâu, thuốc nhuộm, dược phẩm và nhiều quá trình công nghiệp khác (Qatan & ctv., 2024). Do đặc tính bền vững, khó phân hủy sinh học và độc tính cao đối với cả sinh vật thủy sinh lẫn con người, PNP đã được xếp vào nhóm các chất ô nhiễm nguy hại cần kiểm soát nghiêm ngặt.

Trong những năm qua, nhiều phương pháp xử lý PNP đã được nghiên cứu và áp dụng, từ các kỹ thuật truyền thống như hấp phụ, kết tủa

hóa học, xử lý sinh học cho đến các công nghệ tiên tiến hơn như quang xúc tác, oxi hóa nâng cao (AOPs) và điện hóa (Kamal & ctv., 2022). Mặc dù các phương pháp này có thể đạt hiệu quả nhất định, song vẫn tồn tại nhiều hạn chế về chi phí, điều kiện vận hành và khả năng loại bỏ hoàn toàn chất ô nhiễm. Đặc biệt, phương pháp khử hóa học bằng natri borohydride ($NaBH_4$) dưới sự hỗ trợ của các hạt xúc tác nano kim loại đã nổi lên như một giải pháp tiềm năng. Trong cơ chế này, $NaBH_4$ đóng vai trò là chất cho hydro mạnh, khử nhóm nitro ($-NO_2$) của PNP thành nhóm amino ($-NH_2$), tạo ra p-aminophenol, một hợp chất trung gian quan trọng trong công nghiệp dược phẩm và nhuộm (Din & ctv., 2020). Phương pháp này có ưu điểm về tốc độ phản ứng nhanh, điều kiện phản ứng ở nhiệt động phòng và hiệu suất chuyển hóa cao (Das & Das, 2022). Mặc dù phản ứng khử PNP bằng $NaBH_4$ là quá trình thuận lợi về mặt nhiệt động học, nhưng lại bị hạn chế mạnh về mặt động học, làm cho phản ứng gần như không thể diễn ra nếu thiếu sự hỗ trợ của chất xúc tác. Trong bối cảnh đó, các hạt nano kim loại, đặc biệt là nano bạc (AgNPs), đã chứng minh vai trò xúc tác hiệu quả khi có khả năng làm giảm năng lượng hoạt hóa, thúc đẩy sự chuyển hóa nhanh chóng và duy trì độ chọn lọc cao (Hunge & ctv., 2025). Tuy nhiên, AgNPs thường được tổng hợp bằng phương pháp hóa học truyền thống, sử dụng nhiều loại hóa chất làm chất khử và chất ổn định. Các quy trình này thường khá phức tạp, tốn kém và tiềm ẩn nguy cơ gây hại cho môi trường cũng như sức khỏe con người. Điều này đã thúc đẩy sự quan tâm đến các phương pháp tổng hợp xanh, trong đó dịch chiết từ thực vật, vi sinh vật hay phụ phẩm nông nghiệp được xem là giải pháp an toàn và bền vững. Các hợp chất tự nhiên như polyphenol, flavonoid và tannin có trong dịch chiết vừa đóng vai trò chất khử vừa giúp ổn định hạt nano (Mohamad & ctv., 2014). Đặc biệt, vỏ quả măng cụt giàu xanthone và polyphenol được xem là nguồn nguyên liệu đầy tiềm năng cho việc tổng hợp AgNPs theo hướng xanh, vừa tận dụng phế thải nông nghiệp vừa tạo ra vật liệu có giá trị cao cho các ứng dụng xúc tác và xử lý môi trường. Ngoài khả năng xúc tác trong phản ứng khử p-nitrophenol, AgNPs còn được biết đến rộng rãi với hoạt tính kháng khuẩn mạnh. Các nghiên cứu đã chứng minh rằng AgNPs có thể ức chế sự phát triển của nhiều loại vi khuẩn gây bệnh, đặc biệt là *Escherichia coli (E. coli)* và *Salmonella typhi* (Sondi & Salopek-Sondi, 2004). Cơ chế kháng khuẩn chủ yếu liên quan đến sự gắn kết của các hạt nano vào màng tế bào, tạo ra các gốc tự do và ion bạc, từ đó làm tổn thương cấu trúc màng, ức chế enzyme và dẫn đến sự chết tế bào (Tang & Zheng, 2018). Do đó, việc phát triển sản phẩm AgNPs theo hướng tổng hợp xanh không chỉ mở ra triển vọng trong lĩnh vực xúc tác xử lý môi trường mà còn mang lại tiềm năng ứng dụng trong y sinh và kiểm soát vi khuẩn gây bệnh.

Tóm lại, trong nghiên cứu này, AgNPs được tổng hợp theo phương pháp hóa học xanh sử dụng dịch chiết từ vỏ quả măng cụt đóng vai trò là tác nhân khử và ổn định, mở ra triển vọng ứng dụng AgNPs trong xử lý nước thải chứa hợp chất nitroaromatic cũng như trong lĩnh vực y sinh.

2. Vật Liệu và Phương Pháp Nghiên Cứu

2.1. Vật liệu

Vỏ quả măng cụt được thu thập tại các chợ địa phương thuộc phường An Phú Đông, Thành phố Hồ Chí Minh. Mẫu được rửa sạch bằng nước máy, sau đó rửa lại bằng nước cất nhằm loại bỏ tạp chất bám trên bề mặt. Vỏ được cắt nhỏ (kích thước khoảng 2 x 2 cm^2) và sấy ở 60°C trong 48 giờ (đạt độ ẩm < 5%), tiếp đó nghiền thành bột mịn (kích thước hạt < 1 mm) bằng

máy xay. Mẫu bột sau khi thu được được bảo quản trong điều kiện khô ráo, kín khí cho đến khi sử dụng trong các thí nghiệm. Bạc nitrate ($AgNO_3$), p-nitrophenol (độ tinh khiết 98%) và natri borohydride ($NaBH_4$), aluminium chloride, sodium carbonate anhydrous, sodium chloride, thuốc thử Folin-Ciocalteu's phenol, chất chuẩn acid galic, sodium acetate được mua từ hãng Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). Tất cả các hóa chất sử dụng đều thuộc loại tinh khiết phân tích (analytical grade) và được dùng trực tiếp mà không qua tinh chế thêm. Nước cất siêu tinh khiết được cung cấp từ hệ thống Milli-Q và được sử dụng trong toàn bộ các thí nghiệm.

2.2. Phương pháp

2.2.1. Khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình trích ly dịch chiết vỏ quả măng cụt

Một gam bột vỏ măng cụt sau sấy được cho vào 100 mL nước cất. Quá trình trích ly được tiến hành bằng cách khảo sát luân phiên từng yếu tố ảnh hưởng bao gồm nhiệt độ (65, 70, 75 và 80°C) và thời gian (30, 60, 90 và 120 phút) nhằm xác định điều kiện tối ưu. Sau mỗi lần trích ly, dung dịch được lọc và lấy 0,1 mL dịch chiết (Ext) pha loãng 300 lần để xác định hàm lượng polyphenol tổng bằng phương pháp Folin-Ciocalteu, dựa trên kết quả phổ UV-Vis so sánh với đường chuẩn acid gallic (Francisco & ctv., 2024). Mỗi thí nghiệm được tiến hành lặp lại ba lần và điều kiện cho hàm lượng polyphenol cao nhất được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo. Dịch chiết thu được ở điều kiện tối ưu được lọc và bảo quản ở 4°C cho đến khi sử dụng.

2.2.2. Khảo sát quá trình tổng hợp nano bạc sử dụng dịch chiết vỏ măng cụt

Dung dịch AgNPs được tổng hợp bằng cách khử dung dịch $AgNO_3$ nhờ các hợp chất polyphenol có trong dịch chiết vỏ măng cụt, dưới chiếu sáng mạnh của đèn LED (ánh sáng trắng, nhiệt độ 45°C, nhãn hiệu 135/12W PT04. V2, Rạng Đông) kết hợp với khuấy từ ở tốc độ 300 vòng/phút. Trong quá trình này, ba yếu tố ảnh hưởng chính được khảo sát theo phương pháp luân phiên từng biến gồm: 1) thời gian phản ứng, 2) nồng độ Ag^+ và 3) tỉ lệ thể tích dung dịch $AgNO_3$ so với dịch chiết (V_{Ag}/V_{Ext}). Trong đó, thời gian phản ứng được theo dõi tại các mốc 0, 30, 60, 90, 120 và 150 phút. Các nồng độ $AgNO_3$ được lựa chọn lần lượt là 1.0; 1.5 và 2.0 mM. Cuối cùng, các tỉ lệ thể tích (V_{Ag}/V_{Ext}) khảo sát là 25:25, 30:20, 35:15 (mL). Sau mỗi thí nghiệm, dung dịch AgNPs được lấy 1 mL, pha loãng 10 lần và đo phổ UV–Vis để theo dõi sự hình thành hạt nano tại bước sóng khoảng 420 nm, là đỉnh hấp thụ đặc trưng của AgNPs. Kết quả thu được từ từng điều kiện khảo sát được so sánh, và điều kiện cho cường độ hấp thụ cao và phù hợp nhất được chọn làm thông số tối ưu cho các thí nghiệm tiếp theo.

2.3. Phân tích tính chất lý hóa của AgNPs

Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) được tiến hành nhằm xác định cấu trúc tinh thể của mẫu bằng thiết bị Bruker D8 Advance (Bruker, Mỹ), sử dụng bức xạ Cu-Kα được lọc Ni (λ = 1.5406 Å). Kết quả được ghi trong khoảng 2θ từ 10 đến 80°, với bước quét 0,02°, thời gian bước 38,4 giây và dòng phát xạ 40 mA. Hình thái và mạng cấu trúc tinh thể của hạt AgNPs được quan sát bằng kính hiển vi điện tử truyền qua độ phân giải cao (HR-TEM). Ngoài ra, phổ hấp thụ UV-Vis được đo bằng thiết bị UV-1800 (Shimadzu, Nhật Bản) trong khoảng bước sóng 190 - 800 nm để xác định sự hình thành của AgNPs.

2.4. Đánh giá hoạt tính của AgNPs trong quá trình khử p-nitrophenol trong nước

Phản ứng khử PNP được tiến hành theo mẻ với tổng thể tích dung dịch 250 mL. Trước khi phản ứng, dung dịch được sục khí N_2 trong 15 phút nhằm loại bỏ oxy hòa tan, tránh sự ức chế quá trình khử. Trên cơ sở nghiên cứu đã có trước của các tác giả (Ho & ctv., 2023), nồng độ ban đầu của PNP được thiết lập ở 0,144 mM, với tỷ lệ mol $NaBH_4$/PNP cố định ở mức 200:1. Sau đó, dung dịch $NaBH_4$ được thêm vào dưới điều kiện khuấy từ với tốc độ 300 vòng/phút, tiếp theo là bổ sung xúc tác AgNPs. Trong quá trình khảo sát, liều lượng xúc tác được thay đổi ở các mức tương ứng với 50, 100, 150 và 200 µL dung dịch AgNPs sau khi tổng hợp, trong khi các thông số khác được giữ cố định. Tại những khoảng thời gian nhất định, 2 mL dung dịch phản ứng được lấy ra, lọc để loại bỏ phần xúc tác còn lại, sau đó pha loãng năm lần và đo phổ UV-Vis (UV-1800, Shimadzu) nhằm theo dõi sự biến đổi nồng độ PNP ở bước sóng 400 nm. Độ chuyển hóa PNP tại thời điểm t được tính theo công thức:

$$X = \left(1 - \frac{C_t}{C_o}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Trong đó: X (%) là độ chuyển hóa của PNP, C_o và C_t là nồng độ của PNP tại thời điểm 0 và t.

2.5. Đánh giá hoạt tính kháng khuẩn của dung dịch AgNPs

Hoạt tính kháng khuẩn của AgNPs được khảo sát và đánh giá bằng ba phương pháp: đo đường kính vòng kháng khuẩn (agar well diffusion method), xác định nồng độ ức chế tối thiểu (MIC) và nồng độ diệt khuẩn tối thiểu (MBC) bằng phương pháp pha loãng trên đĩa thạch. Các quy trình thí nghiệm được thực hiện theo phương pháp chuẩn đã công bố trong nghiên cứu của (Parvekar & ctv., 2020).

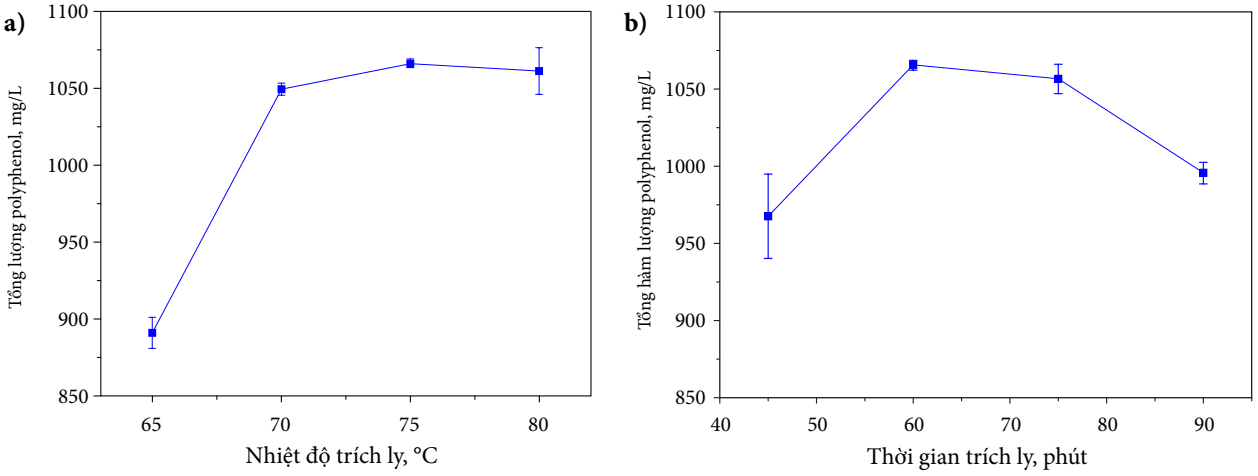
2.6. Xử lý thống kê

Tất cả các thí nghiệm được lặp lại 3 lần và kết quả được biểu diễn dưới dạng giá trị trung bình. Đồng thời, phần mềm Excel 365 (Microsoft, Mỹ) được sử dụng để xây dựng mô hình động học phản ứng.

3. Kết Quả và Thảo Luận

3.1. Sự ảnh hưởng của các yếu tố đến quá trình trích ly dịch chiết vỏ quả măng cụt

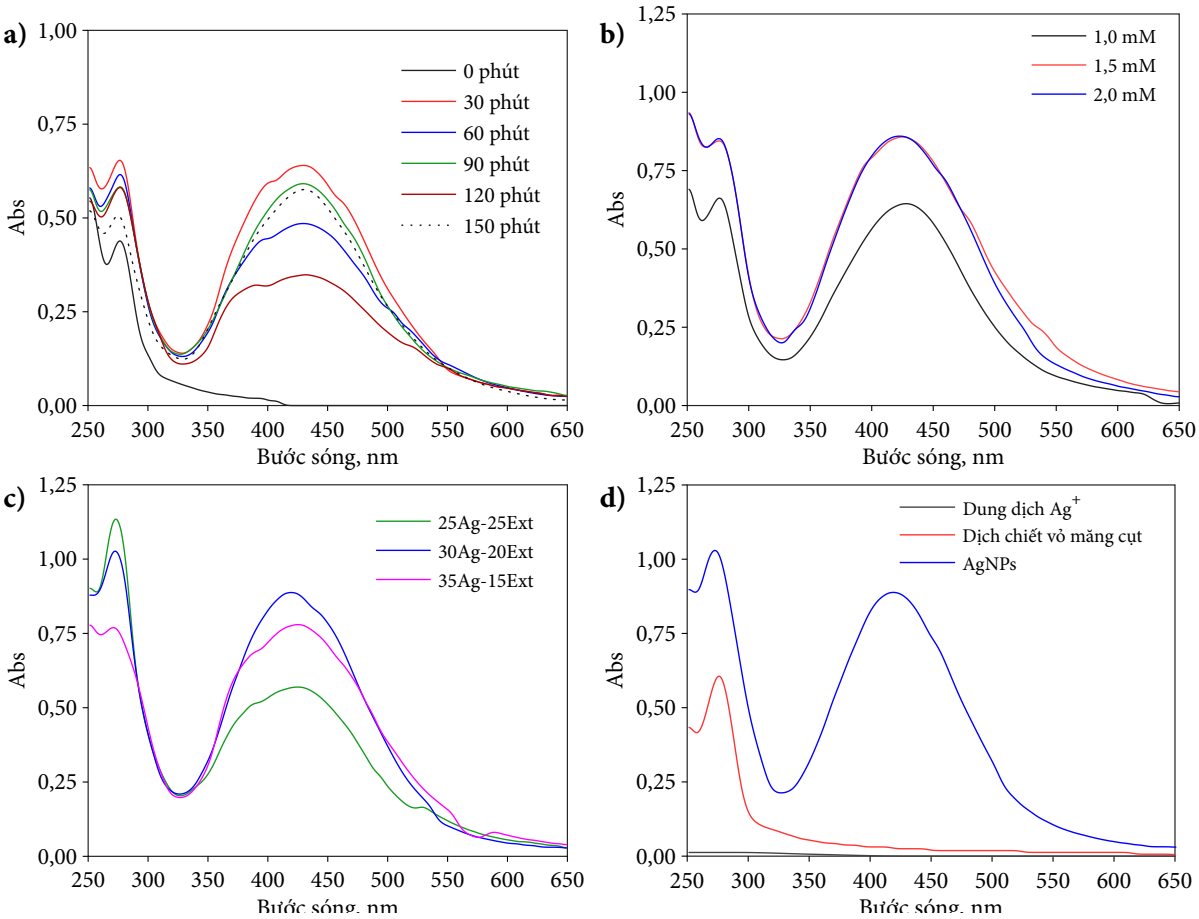
Kết quả khảo sát sự ảnh hưởng của các yếu tố đến quá trình trích ly vỏ măng cụt theo phương pháp luân phiên từng yếu tố được trình bày ở Hình 1a và 1b. Kết quả cho thấy, nhiệt độ và thời gian trích ly có ảnh hưởng rõ rệt đến hàm lượng polyphenol thu được từ vỏ măng cụt. Khi nhiệt độ tăng từ 65 đến 75°C, hàm lượng polyphenol tăng mạnh và đạt cực đại khoảng 1.066,12 ± 3,16 mg/L tại 75°C. Điều này có thể được giải thích là ở mức nhiệt thấp, sự khuếch tán các hợp chất phenolic từ ma trận tế bào vào dung dịch còn hạn chế (Osorio-Tobón, 2020). Khi nhiệt độ tăng, quá trình hòa tan và phá vỡ cấu trúc tế bào được thúc đẩy, giúp giải phóng polyphenol nhiều hơn. Tuy nhiên, khi nhiệt độ vượt quá 75°C, hàm lượng polyphenol giảm nhẹ do xảy ra các phản ứng oxy hóa hoặc phân hủy nhiệt, làm suy giảm nồng độ các hợp chất hoạt tính sinh học trong dung dịch (Ling & ctv., 2022). Trong khoảng 30 - 60 phút, hàm lượng polyphenol tăng nhanh và đạt giá trị cực đại khoảng 1.066,12 ± 3,16 mg/L ở 60 phút. Đây là giai đoạn mà tốc độ khuếch tán và giải phóng polyphenol diễn ra mạnh mẽ. Tuy nhên, khi thời gian kéo dài đến 90 phút, hàm lượng polyphenol giảm xuống còn khoảng 9.96,27 ± 7,49 mg/L, cho thấy các phản ứng thoái hóa và oxy hóa đã xảy ra, làm suy giảm chất lượng dịch chiết. Từ những kết quả này, điều kiện phù hợp nhất cho quá trình chiết tách polyphenol từ vỏ măng cụt được xác định là 75°C trong 60 phút.



Hình 1. Ảnh hưởng của nhiệt độ (a) và thời gian (b) trích ly đối với tổng hàm lượng polyphenol của dịch chiết vỏ măng cụt thu được.

3.2. Sự ảnh hưởng của các yếu tố đến quá trình tổng hợp AgNPs

Phổ UV-Vis ở Hình 2 cho thấy thời gian phản ứng, nồng độ $AgNO_3$ và tỉ lệ thể tích dung dịch Ag^+/dịch chiết đều ảnh hưởng rõ rệt đến sự hình thành AgNPs. Trong Hình 2a, cường độ hấp thụ tại khoảng 420 nm, đặc trưng cho plasmon bề mặt cục bộ (SPR) của AgNPs (Alzoubi & ctv., 2023), tăng dần khi kéo dài thời gian phản ứng từ 0 đến 120 phút. Điều này chứng tỏ số lượng hạt nano bạc được tạo ra ngày càng nhiều và phản ứng khử diễn ra hiệu quả. Tại 120 phút, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại (Abs = 0,65) và ổn định, phản ánh trạng thái bão hòa trong quá trình tạo hạt. Ngược lại, khi kéo dài đến 150 phút, cường độ tín hiệu giảm nhẹ, có thể do hạt nano bắt đầu kết tụ hoặc thoái hóa. Vì vậy, 120 phút được xác định là thời gian tối ưu. Hình 2b cho thấy khi tăng nồng độ $AgNO_3$ từ 1.0 lên 1,5 mM, cường độ hấp thụ tại 420 nm tăng mạnh, chứng tỏ số lượng hạt nano sinh ra nhiều hơn. Tuy nhiên, ở 2,0 mM, phổ hấp thụ không cải thiện đáng kể. Do đó, nồng độ 1,5 mM được xem là phù hợp. Ở Hình 2c, khi khảo sát các tỉ lệ thể tích dung dịch $AgNO_3$ /dịch chiết (V_{Ag}/V_{Ext}), mẫu 30Ag - 20Ext cho tín hiệu plasmon tại 420 nm mạnh nhất, chứng tỏ sự cân bằng phù hợp giữa lượng ion Ag^+ và polyphenol trong dịch chiết. Nếu Ag^+quá ít, phản ứng khử diễn ra không hoàn toàn, trong khi nếu thiếu polyphenol, hạt nano dễ kết tụ do không đủ chất ổn định. Tỉ lệ 30Ag - 20Ext đã đáp ứng tốt cả hai điều kiện, tạo ra hạt AgNPs đồng đều và bền vững. Cuối cùng, Hình 2d cho thấy vai trò quan trọng của dịch chiết vỏ măng cụt: chỉ khi có cả Ag^+ và dịch chiết mới xuất hiện đỉnh plasmon tại 420 nm. Điều này chứng minh polyphenol trong dịch chiết vừa là tác nhân khử, vừa là chất ổn định trong quá trình tổng hợp xanh. Từ các kết quả trên, điều kiện phản ứng phù hợp nhất được xác định là 120 phút, nồng độ $AgNO_3$ là 1,5 mM và tỉ lệ thể tích giữa dung dịch $AgNO_3$ và dịch chiết là 30Ag - 20Ext.

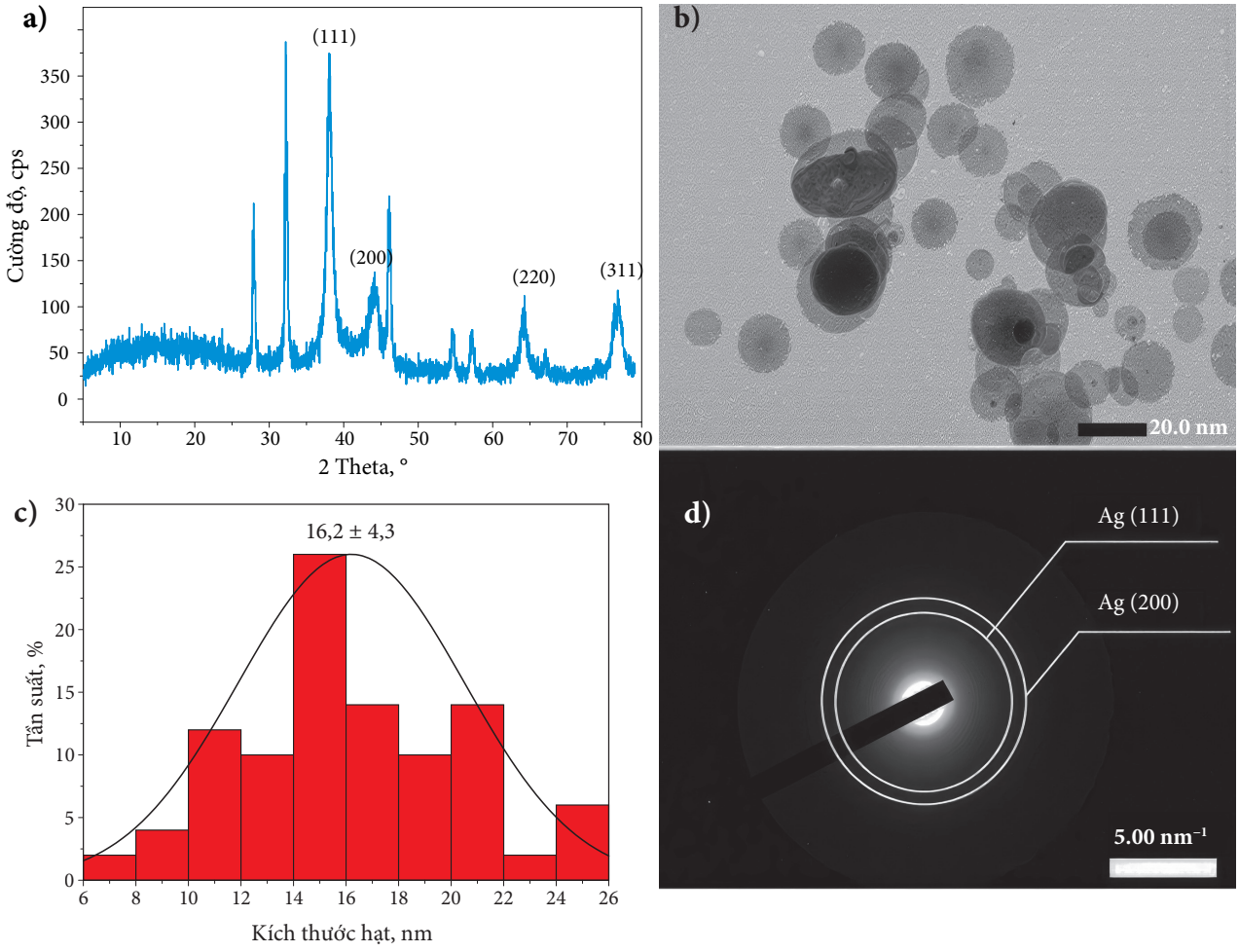


Hình 2. Phổ hấp thụ UV-Vis của dung dịch nano bạc (AgNPs): (a) theo thời gian phản ứng, (b) theo nồng độ $AgNO_3$, (c) theo tỷ lệ dung dịch $AgNO_3$, và dịch chiết, (d) so sánh đối chứng giữa dung dịch $AgNO_3$, chiết xuất vỏ măng cụt và AgNPs.

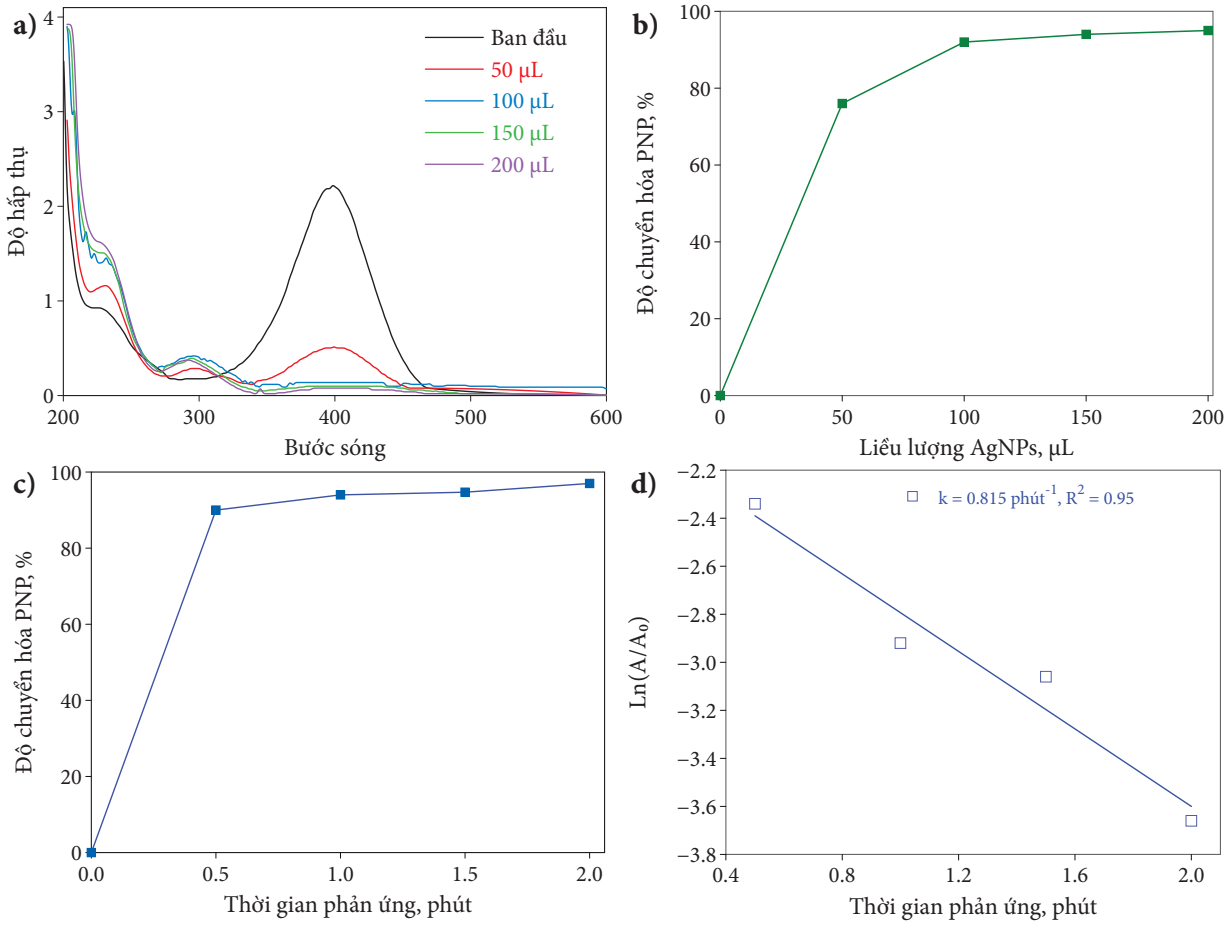
3.3. Tính chất lý hóa của AgNPs được tổng hợp ở điều kiện phù hợp

Giản đồ XRD (Hình 3a) xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ mạnh tại 2θ ≈ 38.1; 44.3; 64.4 và 77.3°; tương ứng với các mặt tinh thể (111), (200), (220) và (311) của cấu trúc lập phương tâm mặt (fcc) của bạc kim loại (JCPDS số 04-0783) (Basu & ctv., 2016). Sự hiện diện rõ ràng của các đỉnh này khẳng định AgNPs thu được có cấu trúc tinh thể hoàn chỉnh và độ kết tinh cao. Ngoài ra, bên cạnh các đỉnh chính đặc trưng cho bạc, giản đồ còn xuất hiện một số tín hiệu nhiễu nền ở vùng góc thấp, có thể bắt nguồn từ các hợp chất hữu cơ chưa bị loại bỏ hoàn toàn trong dịch chiết vỏ măng cụt. Các hợp chất polyphenol và flavonoid này không chỉ đóng vai trò chất khử và chất ổn định trong quá trình tổng hợp mà còn có thể hấp phụ lên bề mặt hạt nano, tạo ra tín hiệu nhiễu đặc trưng trong giản đồ XRD. Ảnh HR-TEM (Hình 3b) cho thấy các hạt AgNPs có dạng hình cầu, phân bố khá đồng đều và ít hiện tượng kết tụ. Phân tích thống kê kích thước hạt (Hình 3c) cho thấy phân bố hẹp với kích thước trung bình 16,2 ± 4,3 nm, phù hợp với vị trí đỉnh plasmon quan sát được ở phổ UV-Vis (~420 nm). Phân bố kích thước của AgNPs tổng hợp theo phương pháp xanh tập trung chủ yếu ở 14 - 16 nm do sự

hội tụ của các điều kiện tối ưu cho quá trình khử và ổn định hạt. Sự phân tán của các kích thước khác xuất phát từ bản chất phức tạp và không đồng nhất của chiết xuất sinh học, dẫn đến động học phản ứng cạnh tranh, sự chồng chéo giữa các giai đoạn tạo mầm - phát triển hạt, và sự không đồng đều của điều kiện phản ứng trong dung dịch. Điều này làm xuất hiện các hạt nhỏ hơn (< 14 nm) do thiếu chất ổn định và các hạt lớn hơn (> 16 nm) do kết tụ ngẫu nhiên. Hơn thế nữa, ảnh SAED (Hình 3d) hiển thị các vòng nhiễu xạ rõ nét, tương ứng với các mặt tinh thể (111) và (200) của Ag, hoàn toàn nhất quán với kết quả XRD. Sự đồng bộ giữa XRD, HR-TEM và SAED cho thấy AgNPs được tổng hợp bằng dịch chiết vỏ măng cụt có cấu trúc tinh thể rõ ràng, kích thước nano đồng đều và tính bền vững tốt.



Hình 3. Các tính chất đặc trưng của nano bạc (AgNPs): (a) giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD), (b) ảnh HR-TEM (truyền qua kính hiển vi điện tử có độ phân giải cao), (c) phân bố kích thước hạt, (d) ảnh nhiễu xạ điện tử vùng chọn lọc (SAED).



Hình 4. Phổ hấp thụ UV-Vis của phản ứng khử PNP với các hàm lượng AgNPs khác nhau (a); độ chuyển hóa PNP theo hàm lượng AgNPs (b) và theo thời gian phản ứng (c); động học phản ứng bậc nhất được biểu diễn qua biểu đồ tuyến tính $\ln(A/A_0)$ theo thời gian (d).

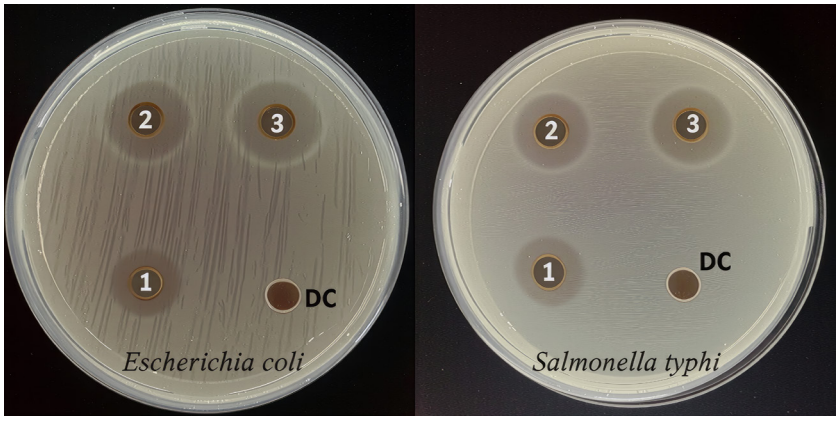
3.4. Hoạt tính của AgNPs trong phản ứng khử p-nitrophenol trong nước

Kết quả ở Hình 4 chứng minh rằng AgNPs tổng hợp xanh từ dịch chiết vỏ măng cụt thể hiện hoạt tính xúc tác vượt trội trong phản ứng khử PNP bằng $NaBH_4$. Phổ UV-Vis (Hình 4a) cho thấy cường độ đỉnh hấp thụ đặc trưng của PNP tại 400 nm suy giảm nhanh chóng sau khi bổ sung AgNPs, đồng thời sự xuất hiện đỉnh mới tại ~300 nm xác nhận sự hình thành p-aminophenol (PAP), sản phẩm khử của PNP. Đặc biệt, khi tăng hàm lượng AgNPs từ 50 đến 200 µL, quá trình khử diễn ra nhanh hơn và gần như hoàn toàn, khẳng định vai trò của AgNPs trong việc xúc tiến quá trình vận chuyển electron từ $NaBH_4$ sang nhóm nitro ($-NO_2$). Độ chuyển hóa PNP theo hàm lượng AgNPs (Hình 4b) cho thấy hiệu suất tăng mạnh từ 0% lên trên 90% khi thể tích AgNPs tăng từ 50 đến 100 µL, sau đó đạt trạng thái bão hòa ở 150 - 200 µL. Hiện tượng này phản ánh giới hạn bề mặt xúc tác: khi số lượng hạt nano đã đủ để bao phủ toàn bộ phân tử PNP, việc bổ sung thêm không mang lại hiệu quả đáng kể. Khảo sát ảnh hưởng của thời gian phản ứng (Hình 4c) cho thấy quá trình khử diễn ra cực nhanh, với hiệu suất đạt trên 95% chỉ trong vòng 2 phút. Điều này khẳng định AgNPs có hoạt tính xúc tác cao,

giúp quá trình khử PNP diễn ra trong điều kiện nhiệt độ phòng, liều lượng xúc tác thấp mà vẫn đạt hiệu quả gần như hoàn toàn. Phân tích động học (Hình 4d) dựa trên mô hình động học phản ứng bậc một cho thấy mối quan hệ tuyến tính tốt giữa $\ln(A/A_0)$ và thời gian, với hằng số tốc độ $k = 0{,}815$ phút^{-1} và hệ số tương quan $R^2 = 0{,}95$. Giá trị k cao cùng với R^2 gần 1 chứng minh phản ứng tuân theo phương trình động học bậc một và AgNPs đóng vai trò xúc tác hiệu quả, giúp giảm năng lượng hoạt hóa và thúc đẩy tốc độ phản ứng. Tổng thể, các kết quả này khẳng định AgNPs tổng hợp bằng phương pháp xanh không chỉ đạt hiệu suất xúc tác cao mà còn duy trì tốc độ phản ứng nhanh trong điều kiện đơn giản.

3.5. Hoạt tính kháng khuẩn của AgNPs

Hoạt tính kháng khuẩn của AgNPs được đánh giá trên hai chủng vi khuẩn gây bệnh phổ biến là *Escherichia coli* (*E. coli*) và *Salmonella typhi* (*S. typhi*) bằng ba phương pháp: khuếch tán giếng thạch, xác định nồng độ ức chế tối thiểu (MIC) và nồng độ diệt khuẩn tối thiểu (MBC). Kết quả khuếch tán giếng thạch (Hình 5) cho thấy AgNPs tạo ra vùng ức chế rõ rệt xung quanh giếng, với đường kính vòng kháng khuẩn lần lượt là 15,33 ± 0,57 mm đối với *E. coli* và 15,67 ± 0,57 mm đối với *S. typhi*. Giá trị này vượt ngưỡng 10 mm, được phân loại là mức kháng khuẩn mạnh, chứng minh khả năng ức chế đáng kể của AgNPs đối với cả hai chủng vi khuẩn Gram âm.



Hình 5. Vòng kháng khuẩn của AgNPs đối với *Escherichia coli* (bên trái) và *Salmonella typhi* (bên phải).

Kết quả Bảng 1 cho thấy, nồng độ tối thiểu của AgNPs có thể ngăn cản sự phát triển của vi khuẩn là N/32 (tương đương 3,04 mg/L) đối với cả *E. coli* và *S. typhi*. Điều này chứng tỏ chỉ với hàm lượng rất thấp, AgNPs đã có thể ức chế sự nhân lên của vi khuẩn. Đồng thời, kết quả xác định MBC chỉ ra rằng nồng độ diệt khuẩn tối thiểu đối với cả hai chủng vi khuẩn là N/16 (tương đương 6,08 mg/L), cao hơn một bậc so với MIC. Sự chênh lệch hợp lý giữa MIC và MBC phản ánh cơ chế tác động hai giai đoạn điển hình của AgNPs: ở nồng độ thấp, chúng gây ức chế sự tăng trưởng thông qua việc làm rối loạn chức năng tế bào; trong khi ở nồng độ cao hơn, chúng dẫn đến phá hủy hoàn toàn màng tế bào và tiêu diệt vi khuẩn. Tóm lại, AgNPs tổng hợp bằng phương pháp xanh từ dịch chiết vỏ măng cụt thể hiện hoạt tính kháng khuẩn mạnh và ổn định đối với cả *E. coli* và *S. typhi*, với vòng kháng khuẩn trên 15 mm, MIC đạt 3,04 mg/L và MBC đạt 6,08 mg/L. Những kết quả này không chỉ khẳng định tiềm năng ứng dụng của AgNPs trong lĩnh vực y sinh mà còn mở ra triển vọng phát triển các vật liệu kháng khuẩn thế hệ mới, thân thiện môi trường và hiệu quả cao.

Bảng 1. Nồng độ ức chế tối thiểu và nồng độ tiêu diệt tối thiểu của mẫu nano bạc (AgNPs) kháng vi khuẩn *Escherichia coli* và *Salmonella typhi*

Vi khuẩn	Nồng độ mẫu AgNPs									
	N/2	N/4	N/8	N/16	N/32	N/64	N/128	N/256	N/512	N/1024
Nồng độ ức chế tối thiểu (MIC)										
Escherichia coli	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Salmonella typhi	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Nồng độ tiêu diệt tối thiểu (MBC)										
Escherichia coli	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Salmonella typhi	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

Chú thích: N = 97,2 mg/L; (+): Có sự xuất hiện vi khuẩn; (-): Không có sự xuất hiện vi khuẩn.

4. Kết Luận

Nghiên cứu này đã chứng minh khả năng tổng hợp thành công AgNPs bằng phương pháp xanh sử dụng dịch chiết vỏ măng cụt giàu polyphenol, đóng vai trò kép vừa là tác nhân khử vừa là chất ổn định. Các hạt AgNPs thu được có cấu trúc tinh thể lập phương tâm diện với kích thước hạt trung bình 16,2 ± 4,3 nm, được xác nhận qua các phương pháp phân tích hiện đại như XRD, HR-TEM và SAED. Ngoài ra, AgNPs thể hiện hoạt tính xúc tác vượt trội trong phản ứng khử PNP bằng $NaBH_4$, với hiệu suất gần như hoàn toàn trong điều kiện nhiệt độ phòng, liều lượng xúc tác thấp, tuân theo mô hình động học phản ứng bậc một. Đồng thời, dung dịch AgNPs có hoạt tính kháng khuẩn mạnh đối với *Escherichia coli* và *Salmonella typhi*, với giá trị MIC và MBC thấp. Kết quả này không chỉ khẳng định tiềm năng của dịch chiết thực vật trong việc tổng hợp nano bạc thân thiện môi trường, mà còn mở ra triển vọng ứng dụng AgNPs trong xử lý nước thải chứa hợp chất nitroaromatic và trong lĩnh vực y sinh kháng khuẩn. Đây là một hướng nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn, góp phần phát triển các giải pháp bền vững và an toàn hơn trong công nghệ vật liệu nano.

Lời Cam Đoan

Chúng tôi cam đoan bài báo do nhóm tác giả thực hiện và không có bất kỳ mâu thuẫn nào giữa các tác giả.

Lời cảm ơn

Công trình này được tài trợ kinh phí từ Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh, mã số đề tài: CS-SV25-HHTP-02.

Tài Liệu Tham khảo (References)

Alzoubi, F., Ahmad, A. A., Aljarrah, I. A., Migdadi, A., & Al-Bataineh, Q. M. (2023). Localize surface plasmon resonance of silver nanoparticles using Mie theory. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 34, 2128. https://doi.org/10.1007/s10854-023-11544-x.

Basu, S., Maji, P., & Ganguly, P. J. (2016). Rapid green synthesis of silver nanoparticles by aqueous extract of seeds of Nyctanthes arbor-tristis. *Applied Nanoscience* 6, 1-5. https://doi.org/10.1007/s13204-015-0407-9.

Das, T. K., & Das, N. C. (2022). Advances on catalytic reduction of 4-nitrophenol by nanostructured

materials as benchmark reaction. *International Nano Letters* 12, 223-242. https://doi.org/10.1007/s40089-022-00370-4.

Din, M. I., Khalid, R., Hussain, Z., Hussain, T., Mujahid, A., Najeeb, J., & Izhar, F. (2020). Nanocatalytic assemblies for catalytic reduction of nitrophenols: a critical review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 50, 322-338. https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1637241.

Francisco, R., Rafael, B., & Julio, A. G. (2024). A comprehensive and critical review of the unstandardized Folin-Ciocalteu assay to determine the total content of polyphenols: The conundrum of the experimental factors and method validation. *Talanta* 272, 125771. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.125771.

Ho, T. G. T., Truong, D. P. T., Nguyen, H. B., Do, B. L., Dinh, T. A., Ton-That, P., Nguyen, T. T. V., Truong, T. B. T., Huynh, K. P. H., & Tri, N. (2023). Green synthesized nano-silver/cellulose aerogel as a robust active and recyclable catalyst towards nitrophenol hydrogenation. *Chemical Engineering Journal* 471, 144604. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144604.

Hunge, Y. M., Yadav, A., Majumder, S., Takagi, K., Ali, T., Fujishima, A., & Terashima, C. (2025). Catalytic activity of Cu-MOF catalyst for 4-Nitrophenol reduction. *Chemistry - An Asian Journal* 20(18), e70119. https://doi.org/10.1002/asia.70119.

Kamal, A., Makhatova, A., Yergali, B., Baidullayeva, A., Satayeva, J. K., Poulopoulos, S. G., & Arkhangelsky, J. (2022). Biological treatment, advanced oxidation and membrane separation for landfill leachate treatment: a review. *Sustainability* 14, 14427. https://doi.org/10.3390/su142114427.

Ling, J. K. U., Sam, J. H., Jeevanandam, J., Chan, Y. S., & Nandong, J. (2022). Thermal degradation of antioxidant compounds: Effects of parameters, thermal degradation kinetics, and formulation strategies. *Food and Bioprocess Technology* 15, 1919-1935. https://doi.org/10.1007/s11947-022-02844-x.

Mohamad, N. A. N., Arham, N. A., Jai, J., & Hadi, A. (2014). Plant extract as reducing agent in synthesis of metallic nanoparticles: a review. *Advanced Materials Research* 832, 350-355. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.832.350.

Osorio-Tobón, J. F. (2020). Recent advances and comparisons of conventional and alternative extraction techniques of phenolic compounds. *Journal of Food Science and Technology* 57, 4299-4315. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04433-2.

Parvekar, P., Palaskar, J., Metgud, S., Maria, R., & Dutta, S. (2020). The minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of silver nanoparticles against Staphylococcus aureus. *Biomaterial Investigations in Dentistry* 7, 105-109. https://doi.org/10.1080/26415275.2020.1748871.

Qatan, M., Arshad, F., Miskam, M., & Naikoo, G. (2024). Trends in bimetallic nanomaterials and methods for the removal of p-nitrophenol and its derivatives from wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology* 21, 5247-5268. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05565-0.

Sondi, I., & Salopek-Sondi, B. (2004). Silver nanoparticles as antimicrobial agent: a case study on E. coli as a model for Gram-negative bacteria. *Journal of Colloid and Interface Science* 275, 177-182. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.012.

Tang, S., & Zheng, J. (2018). Antibacterial activity of silver nanoparticles: structural effects. *Advanced Healthcare Materials* 7, 1701503. https://doi.org/10.1002/adhm.201701503.