

TỔNG HỢP XANH NANO VÀNG VÀ ỨNG DỤNG XÚC TÁC TRONG PHẢN ỨNG KHỬ HỢP CHẤT HỮU CƠ

Đến tòa soạn 03-11-2023

Phan Thanh Long^{1,2}, Đoàn Văn Đạt¹, Lê Thành Thọ², Trương Huỳnh Anh Vũ²,
Lê Văn Tấn^{1*}

¹Khoa Công nghệ Hoá Học, Trường Đại học Công Nghiệp Thành Phố Hồ Chí Minh

²Trung Tâm Dịch Vụ Phân Tích Thí Nghiệm Thành Phố Hồ Chí Minh.

*Email: levantan@iuh.edu.vn

SUMMARY

GREEN SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES AND THEIR ENHANCED CATALYTIC APPLICATION IN ORGANIC REDUCTION

Water pollution stemming from various sources, including organic dyes, pesticides, and organic compounds, remains a pressing global concern. In this study, a green one-step synthesis method using *Paramignya trimera*'s extract as reducing and stabilizing agent was successfully applied to synthesize gold nanoparticles (AuNPs) for the effective degradation of organic dyes. The AuNPs exhibit a spherical shape, ranging from 18 to 24 nm, and are uniformly distributed as observed through TEM and SEM measurements. The exceptional stability of the AuNPs suspension is attributed to the electrostatic attraction mechanism, as indicated by the high zeta potential of -23.8 mV, and the protective role played by the organic layer surrounding the AuNPs. The research results regarding the catalytic capabilities of the material reveal that AuNPs effectively serve as catalysts for the reduction of two organic dyes, methylene blue (MB) and bromocresol green (BG), forming their respective complex compounds. The corresponding rate constants for these reactions are determined as follows: $k = 0.0152 \text{ s}^{-1}$ for MB and $k = 0.0056 \text{ s}^{-1}$ for BG, while the activation energies of these reactions are found to be -14.62 kJ/mol for BG, and -16.05 kJ/mol.

Keywords: Gold nanoparticle, green synthesis, organic reduction, methylene blue, bromocresol green.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, với tốc độ phát triển của các ngành đại công nghiệp, tình trạng ô nhiễm môi trường nước bởi các chất thải màu hữu cơ ngày càng nghiêm trọng. Các chất này có thời gian tồn tại rất lâu trong môi trường nước và tích tụ sinh học theo các chuỗi thức ăn, điều này sẽ gây hại rất lớn đến hệ sinh thái và trực tiếp ảnh hưởng đến chất lượng cuộc sống, sức khỏe con người [1-2].

Các chất hữu cơ thường được loại bỏ khỏi môi trường nước bằng các phương pháp truyền thống như: phương pháp lọc màng, trao đổi ion, hấp phụ, sinh học.... Các phương pháp này thường tốn chi phí cao đôi khi còn tạo thành các chất thải thứ cấp càng

khó xử lý hơn. Hiện nay, nhiều công trình khoa học đã chỉ ra việc sử dụng các vật liệu nano kim loại làm chất xúc tác cho phản ứng loại bỏ hợp chất hữu cơ như methylene blue [3,4,6,7,11], 4-nitrophenol [5,12], methylene orange [6,8,10,11], bromocresol green [9] ... trong một số dạng nước thải đã mang lại hiệu quả tích cực cùng với chi phí thấp và thân thiện môi trường. Trong số này, vật liệu AuNPs (AuNPs) được tổng hợp bằng phương pháp sử dụng dịch chiết từ thực vật làm chất khử và dung dịch Au^{3+} được xem là ứng viên nổi bật bởi nó mang lại nhiều lợi ích kinh tế [13], thân thiện môi trường [13-15] cũng như bảo đảm sức khỏe cho con người [16-17].

Cây Xáo tam phân có tên khoa học là *Paramignya trimera* (Oliv.) *Guillaum* là cây dược liệu, được trồng khá nhiều ở các tỉnh vùng nam trung bộ của Việt Nam. Rễ, thân và lá cây xáo tam phân chứa các hợp chất có tính khử mạnh như: Tannins, Saponin, Coumarin, Flavonoid..., từ xa xưa, loài cây này được sử dụng như một phương thuốc điều trị các bệnh về gan, đường tiêu hoá và các bệnh truyền nhiễm [18-19]. Trong nghiên cứu này, hạt AuNPs được tổng hợp từ muối $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ với chất khử là dịch chiết từ cây Xáo tam phân, vật liệu AuNPs tổng hợp được ở điều kiện tối ưu sẽ đóng vai trò xúc tác cho phản ứng loại bỏ hai hợp chất hữu cơ Bromocresol Green (BG) và Methylene Blue (MB).

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Hoá chất

Trong nghiên cứu này, các hoá chất chính được sử dụng gồm: Tetrachloroauric(III) acid trihydrate, Sodium borohydride, Methylene Blue, Bromocresol Green.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1 Chuẩn bị dịch chiết

Cây Xáo tam phân được thu mua từ vùng trồng ở tỉnh Khánh Hoà, Việt Nam. Sau đó, thân cây được băm nhuyễn thành dăm và xay thành bột nhờ thiết bị xay nhuyễn.

Cân khoảng 5(g) bột Xáo tam phân và đun hoàn lưu với 400 mL nước cất trong 60 phút ở nhiệt độ 100 °C, sau đó lọc bỏ cặn sẽ thu được dịch chiết.

2.2.2 Tổng hợp vật liệu AuNPs

Phản ứng giữa dung dịch $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ với dịch chiết Xáo tam phân (đã được chuẩn bị ở mục 2.2.1) phụ thuộc vào các yếu tố: tỉ lệ giữa dịch chiết và $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, nhiệt độ, thời gian phản ứng và nồng độ dung dịch $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Khảo sát lần lượt từng yếu tố để tìm điều kiện tối ưu, theo thứ tự và khoảng khảo sát như sau: tỉ lệ giữa dịch chiết và $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ được khảo sát lần lượt ở các tỉ lệ sau: 1:1, 1:2, 1:5, 1:10, 1:20, nồng độ $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ là: 0,5, 1,0, 1,5 và 2,0 mM, thời gian phản ứng: 10, 15, 20, 25, 30, 40 phút, nhiệt độ phản ứng: 50, 60, 70, 80, 90°C. Các phản ứng tổng hợp được thực hiện trong ống ly tâm thủy tinh chịu nhiệt có nắp đậy, thể tích ống 15 mL. Ống ly tâm

được đặt trong bể ổn nhiệt (Bandelin DT 156 BH) được trang bị kèm hệ thống siêu âm, giúp kiểm soát nhiệt độ tổng hợp, đảm bảo cho hỗn hợp phản ứng được khuấy trộn liên tục.

Phương pháp phân tích phổ UV-Vis (trên thiết bị UV-VIS Shimadzu 1900i tại Trung tâm dịch vụ phân tích thí nghiệm Thành phố Hồ Chí Minh) được sử dụng để kiểm tra độ hấp thụ quang tại bước sóng 554 nm của dung dịch AuNPs tạo thành nhằm tối ưu hóa từng yếu tố được khảo sát. Dung dịch nano vàng tổng hợp ở cả bốn điều kiện tối ưu được mang đi ly tâm, sấy khô, chuẩn bị cho các phép phân tích đặt trưng hoá lý của vật liệu.

2.2.3 Phương pháp phân tích đặc trưng vật liệu AuNPs

Vật liệu sau khi tổng hợp ở các điều kiện tối ưu được xác định đặc trưng bằng các phương pháp: phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) được ghi trên thiết bị Shimadzu 6100 với cường độ dòng ống phát 30 mA, góc quét 2 θ từ 10-80° và tốc độ quét 0,6°/phút; phương pháp phổ hồng ngoại (FT-IR) được đo trên máy Thermo-Nicolet ISO50 FT-IR trong vùng số sóng từ 400-4000 cm^{-1} ; phương pháp tán xạ năng lượng: được ghi trên thiết bị EDX-8100 ROHS ASSY của hãng SHIMADZU tại phòng Nghiên cứu triển khai-Trung tâm Dịch vụ Phân tích Thí nghiệm Thành phố Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh; phương pháp hiển vi điện tử quét (SEM) trên máy S-4800, Hitachi (Nhật Bản) với hiệu thế gia tốc = 10 kV, độ phân giải từ 200 nm đến 1 μm , WD = 7,7 mm, tại Nanotechnology Lab, SHTP labs. Lô I3, đường N2, khu công nghệ cao, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh; kỹ thuật hiển vi điện tử truyền qua (TEM) trên máy JEM 2100, hãng sản xuất: JEOL, Nhật Bản, với thế phát: 200 kV, sợi đốt: LaB6, độ phân giải giữa hai điểm: 0,23 nm, hai đường: 0,14 nm, khả năng nhiễu xạ: nhiễu xạ lựa chọn vùng (SAED), nhiễu xạ chùm hội tụ (CBED) với góc nhiễu xạ rộng. Tại Viện Khoa Học Vật Liệu - Viện Hàn Lâm Khoa Học và Công Nghệ Việt Nam, số 18 Hoàng Quốc Việt, quận Cầu Giấy, Hà Nội.

2.2.4 Khảo sát khả năng xúc tác của AuNPs

Hoạt tính xúc tác của AuNPs được đánh giá bằng cách: tiến hành khảo sát phản ứng khử giữa MB hoặc BG và NaBH_4 với sự có mặt của nano vàng,

phản ứng này được coi như là phản ứng nền, và là nền tảng phản ứng để khảo sát năng lượng hoạt hóa.

Thực hiện phản ứng với 2,5 mL MB hoặc BG nồng độ 1 mM và 0,5 mL NaBH_4 nồng độ 1,0 M trong điều kiện khi chưa có xúc tác và khi có 0,03 mL xúc tác AuNPs. Kết quả được theo dõi thông qua máy phân tích phổ UV-Vis tại những khoảng thời gian khác nhau để thấy sự giảm dần biến mất độ hấp thụ ở bước sóng 662 nm.

2.2.5 Xác định năng lượng hoạt hóa của phản ứng phân hủy giữa NaBH_4 và methylene blue, bromocresol green khi có mặt xúc tác AuNPs

Để đánh giá khả năng hoạt hóa của phản ứng, tiến hành thực hiện ở từng điều kiện nhiệt độ khác nhau: 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C. Từ đó, hằng số tốc độ phản ứng k được xác định tương ứng với thời gian khảo sát.

Năng lượng hoạt hóa (E) được xác định thông qua phương trình Arrhenius, xác định hằng số góc của đường hồi qui tuyến tính $\ln k$ và $1/T$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả khảo sát điều kiện tổng hợp tối ưu

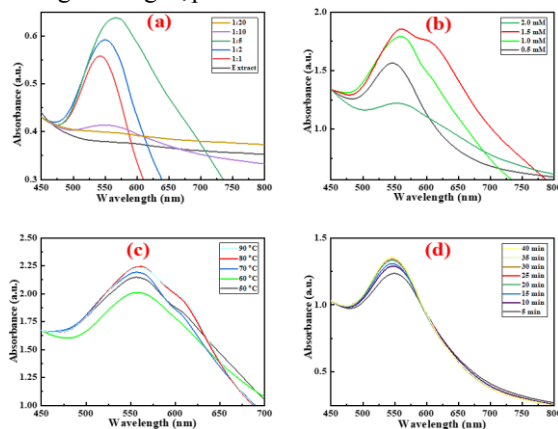
Kết quả khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tổng hợp vật liệu được thể hiện ở hình 1. Kết quả ở hình 1a cho thấy, phổ UV-Vis của dịch chiết từ cây Xáo tam phân không xuất hiện peak đặc trưng nào, do đó peak ở 554 nm có thể được sử dụng để khảo sát các điều kiện tổng hợp nano vàng thông qua hiện tượng plasmon bề mặt. Theo khảo sát, độ hấp thụ của dung dịch mẫu có xu hướng tăng theo tỉ lệ dịch chiết, từ tỉ lệ 1:1, 1:2, 1:5. Tuy nhiên, bắt đầu ở tỉ lệ dịch chiết trở đi 1:10, 1:20 ta thấy độ hấp thụ giảm xuống so với ở tỉ lệ dịch chiết 1:5 bởi vì lúc này hệ nano ở trạng thái không bền, có hiện tượng keo tụ, các hạt AuNPs lúc này to hơn làm cho ở tỉ lệ 1:10 trở đi độ hấp thụ giảm xuống. Đồng thời ở giá trị 1:5 thì độ hấp thụ đạt giá trị cao nhất. Do đó, ta lựa chọn được tỉ lệ dịch chiết so với dung dịch vàng tối ưu trong tổng hợp AuNPs là 1:5 (tỉ lệ dịch chiết/ dung dịch $\text{HAuCl}_4.3\text{H}_2\text{O}$).

Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch $\text{HAuCl}_4.3\text{H}_2\text{O}$ được thể hiện ở hình 1b: Khi tăng nồng độ $\text{HAuCl}_4.3\text{H}_2\text{O}$ từ 0,5 mM đến 1,0 mM thì giá trị mật độ quang đo được cũng tăng dần nhưng không nhiều chứng tỏ quá trình tạo AuNPs vẫn đang diễn ra. Đến nồng độ 1,5 mM mật độ quang đạt giá trị

cao nhất nghĩa là tốc độ phản ứng xảy ra nhanh hơn và hạt AuNPs được tạo ra nhiều hơn, và đạt giá trị lớn nhất ở nồng độ 1,5 mM. Sau đó, ở nồng độ 2,0 mM mật độ quang giảm mạnh nghĩa là ở nồng độ này tốc độ phản ứng và hạt AuNPs được tạo ra không còn tốt nữa. Trong quá trình bảo quản AuNPs ở nồng độ 2,0 mM đã thấy xuất hiện keo tụ sau 3–4 giờ. Nghĩa là hạt AuNPs ở nồng độ 2,0 mM tạo thành không bền ở điều kiện khảo sát, dễ bị keo tụ. Như vậy, nồng độ dung dịch $\text{HAuCl}_4.3\text{H}_2\text{O}$ thích hợp nhất là $C = 1,5 \text{ mM}$ và dung dịch keo AuNPs được tổng hợp bền, không bị keo tụ, nên nồng độ tối ưu được chọn là 1,5 mM.

Hình 1c là kết quả thể hiện ảnh hưởng của nhiệt độ đến quá trình tổng hợp vật liệu: từ kết quả UV-Vis cho thấy tại bước sóng $\lambda=554 \text{ nm}$ độ hấp thụ của AuNPs có xu hướng tăng theo nhiệt độ phản ứng. Tuy nhiên, ở nhiệt độ 80°C và 90°C thì độ hấp thụ bằng nhau bởi vì ở 80°C hệ nano ở trạng thái tối ưu. Do đó, ta lựa chọn được nhiệt độ tối ưu trong tổng hợp AuNPs là 80°C.

Từ kết quả phổ UV-Vis ở hình 1d cho thấy ở thời gian khảo sát từ 5 phút đến 40 phút, ta thấy cường độ đỉnh hấp thụ của dung dịch tăng dần và mật độ do quang cao nhất ở 25 phút. Sau thời gian 25 phút, từ 30, 35, 40 phút, ta thấy độ hấp thụ cực đại của dung dịch mặc dù có xu hướng tăng nhưng không có sự chênh lệch nhiều với giá trị ở mốc thời gian là 25 phút. Từ đó, ta xác định được mốc thời gian tối ưu là 25 phút cho việc hình thành AuNPs sau phản ứng, đảm bảo được về mặt năng lượng lẫn thời gian tổng hợp.

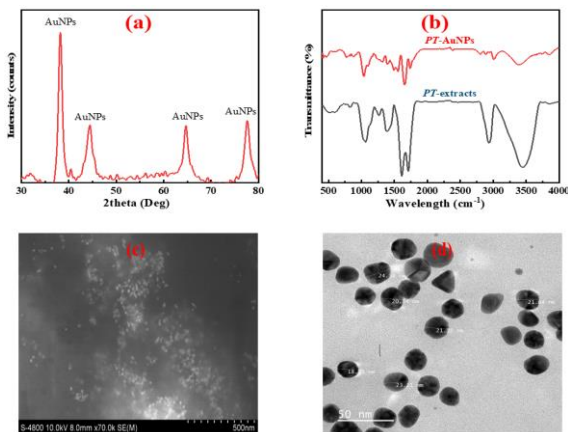


Hình 1. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tổng hợp AuNPs: (a) tỉ lệ dịch chiết/ $\text{HAuCl}_4.3\text{H}_2\text{O}$; (b) nồng độ dung dịch $\text{HAuCl}_4.3\text{H}_2\text{O}$; (c) nhiệt độ; (d) thời gian.

3.2. Kết quả xác định đặc trưng vật liệu

Đặc trưng vật liệu AuNPs được thể hiện ở các hình 3, 4. Từ giản đồ XRD của các hạt AuNPs ở hình 2a cho thấy các đỉnh nhiễu xạ ở các góc 2θ là 38.2° (111), 44.4° (200), 64.7° (220), 77.5° (311) trong cấu trúc FCC [20-21]. Đỉnh nhiễu xạ cao nhất quan sát được ở góc $2\theta = 38.2^\circ$ cho thấy các hạt tinh thể AuNPs có xu hướng phát triển chính theo mặt (111). Như vậy, kích thước hạt trung bình của AuNPs là 9,4 nm được xác định dựa vào chiều rộng ở mặt (111) thông qua công thức: $d = 0.9\lambda/\beta\cos\theta$ (phương trình Debye – Scherrer).

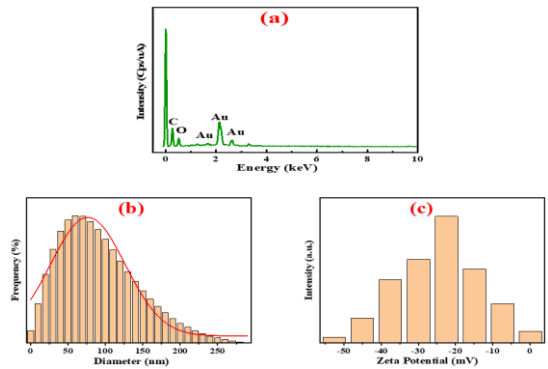
Kết quả FT-IR (hình 2b) thể hiện số sóng dao động của của các phân tử hữu cơ trong dịch chiết Xáo tam phân tại 1405.85, 1498.42, 1559.17, 2337.3, 2852.2, 2922.6, 3381.6 cm^{-1} . Các đỉnh phổ có sự dịch chuyển sang các vị trí khác nhau sau khi tổng hợp AuNPs bằng dịch chiết Xáo tam phân, nhưng sự thay đổi đó không lớn. Ở bước sóng 3300–3500 cm^{-1} , cho thấy sự có mặt của nhóm -OH, biểu hiện cho sự tồn tại của glucides và polyphenol. Các nhóm C-H cũng được tìm thấy ở dải phổ ở vị trí 2800–2960 cm^{-1} , bên cạnh đó, liên kết -C=O tồn tại trong dịch chiết cũng được thể hiện cụ thể ở các đỉnh khoảng 1630–1780. Các nhóm mang vòng benzene được biểu hiện cụ thể ở khoảng bước sóng 1500 cm^{-1} . Như vậy, dịch chiết Xáo tam phân có chứa các phân tử hữu cơ có các nhóm chức có khả năng cho điện tử -O-H, -C=O đóng vai trò chất khử tham gia vào quá trình hình thành AuNPs.



Hình 2. Các kết quả đo giản đồ XRD (a); phổ FT-IR (b); SEM (c); TEM (d) của AuNPs ở điều kiện tổng hợp tối ưu.

Kết quả phân tích SEM, TEM (hình 2c, d) cho biết vật liệu AuNPs có dạng hình cầu, khá đồng đều, kích thước dao động từ 18 đến 24 nm, các hạt tồn tại độc lập và tách rời nhau, không quan sát thấy hiện tượng keo tụ.

Từ kết quả đo trong hình 3(a, b, c) cho thấy AuNPs được phân bố khá đồng đều với kích thước nhỏ hơn 100 nm, điện thế Zeta có giá trị nhỏ nhất ở -20.5 mV và có giá trị trung bình khoảng -23.8 mV, chứng tỏ rằng AuNPs tổng hợp được có tính ổn định do sự tạo thành các micelle của các phân tử hữu cơ bao bọc AuNPs.



Hình 3. Các kết quả EDX (a); phân bố kích thước hạt (b); thế zeta (c) của vật liệu ở điều kiện tối ưu.

3.3. Kết quả khảo sát hiệu quả xúc tác của vật liệu

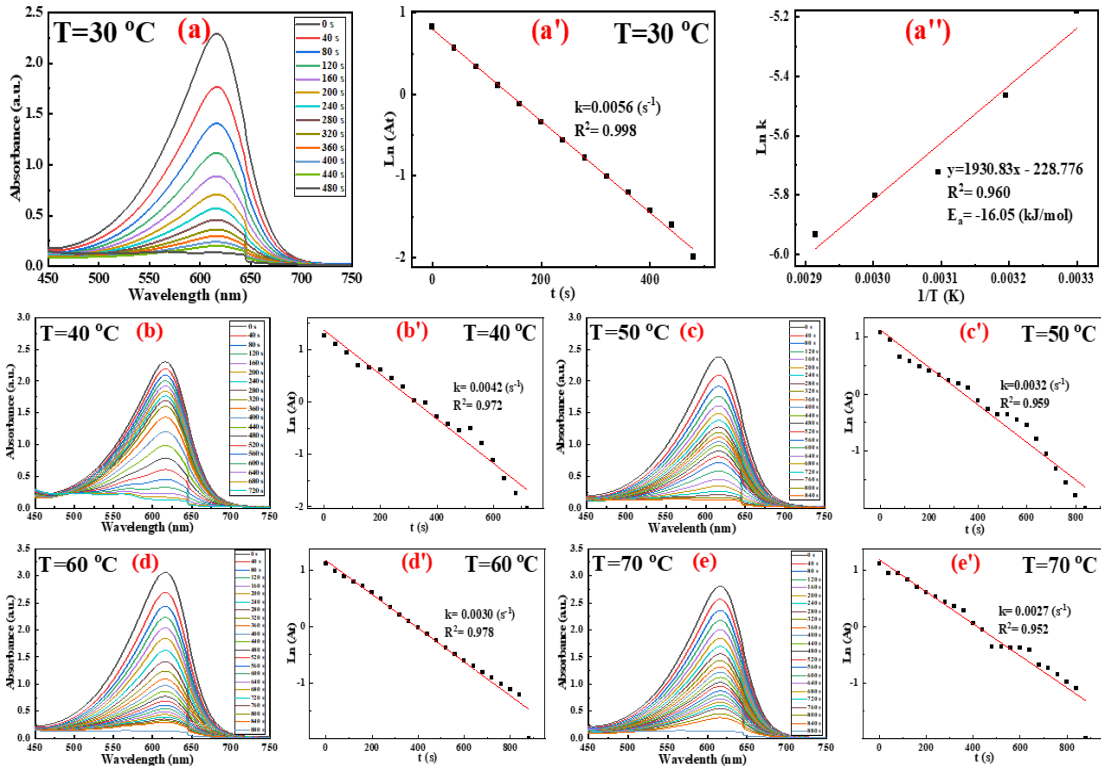
3.3.1. Hiệu quả xúc tác của AuNPs trong phản ứng giữa NaBH_4 và MB

Từ kết quả được trình bày ở hình 4a cho thấy: dung dịch MB màu xanh đậm hấp thu cực đại ở bước sóng $\lambda=664$ nm, sau khi cho MB phản ứng với NaBH_4 , AuNPs vai trò là một chất xúc tác, màu của dung dịch dần biến mất. Kết quả cho thấy sự phân hủy MB với sự có mặt của xúc tác AuNPs đã được hoàn thành trong khoảng 4 phút (240 giây). Mối quan hệ tuyến tính có thể được quan sát từ phương trình $\ln\left(\frac{A_t}{A_0}\right) = -kt$ so với thời gian phản ứng, hằng số tốc độ (hình 4a'). Giá trị tương ứng $k = 0,0152 \text{ s}^{-1}$.

Từ kết quả UV-Vis về sự suy giảm hàm lượng MB phản ứng với NaBH_4 có mặt AuNPs làm xúc tác tại các nhiệt độ: 30°C , 40°C , 50°C , 60°C , 70°C cho thấy phản ứng xảy ra chậm hơn ở nhiệt độ cao, cụ thể từ 240 s tăng lên 560 s.

Phương trình động học bậc nhất (hình 4a'') cho thấy hằng số tốc độ có giá trị giảm dần ở mỗi nhiệt độ (hình (4a', b', c', d', e')). Nhiệt độ cao làm tăng động năng của các phân tử hữu cơ trong dung dịch, các phân tử chuyển động nhanh hơn đã có thể đã cản trở quá trình hấp phụ phân tử chất hữu cơ lên bề mặt xúc tác, làm giảm tốc độ quá trình chuyển hoá.

Từ phương trình Arrhenius của MB phản ứng với NaBH_4 có mặt AuNPs làm xúc tác, ta xác định được năng lượng hoạt hóa tương ứng là $E_a = -14,62 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$. Năng lượng hoạt hóa âm chứng tỏ phản ứng không thuận lợi ở nhiệt độ cao và ở nhiệt độ khảo sát 30°C hằng số tốc độ là lớn nhất.



Hình 4. Phổ UV – Vis về suy giảm hàm lượng MB phản ứng với NaBH_4 có AuNPs làm xúc tác và phương trình động học bậc nhất ở các nhiệt độ khác nhau.

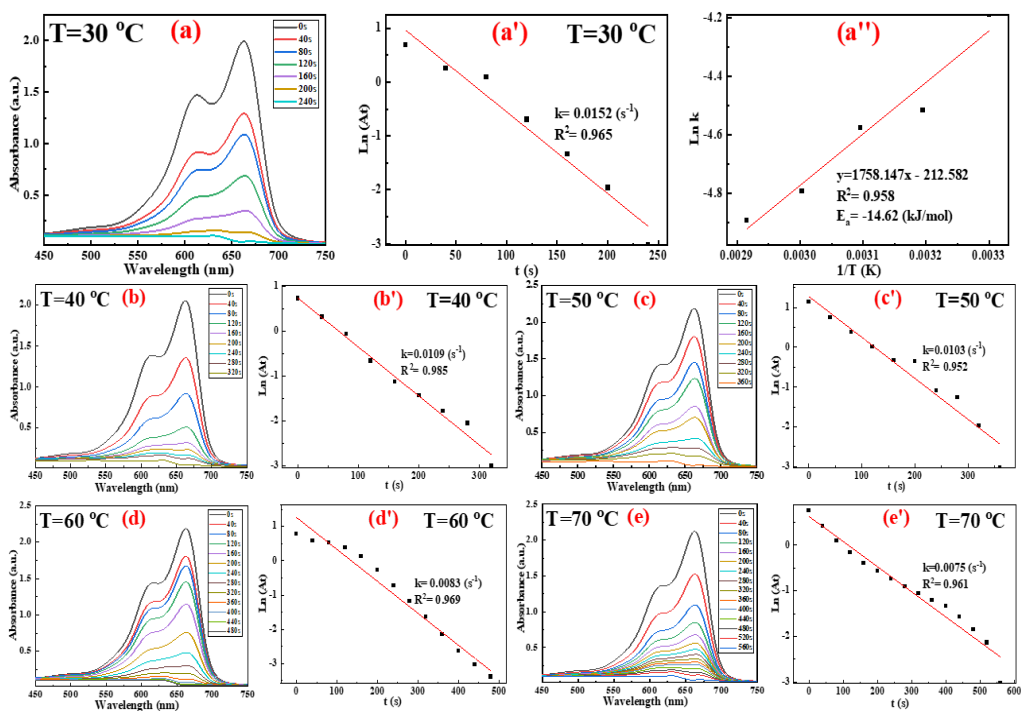
3.3.2. Hiệu quả xúc tác của AuNPs trong phản ứng giữa NaBH_4 và BG

Tương tự như nghiên cứu ở mục 3.3.1., dung dịch BCG màu xanh lá, kết quả đo trên phổ UV-Vis cho đỉnh hấp thụ cực đại $\lambda = 616 \text{ nm}$ (hình 5). Kết quả cho thấy, sự phân hủy màu MB khi tham gia phản ứng với dung dịch NaBH_4 với sự có mặt của AuNPs hoàn thành trong khoảng 12 phút. Mỗi quan hệ tuyến tính có thể được quan sát từ phương trình $\ln\left(\frac{A_t}{A_0}\right) = -kt$ so với thời gian phản ứng, hằng số tốc độ (hình 5a'). Giá trị tương ứng $k = 0,0056 \text{ s}^{-1}$.

Từ kết quả UV – Vis về sự suy giảm hàm lượng BG phản ứng với NaBH_4 có mặt AuNPs làm xúc

tác tại các nhiệt độ: $30^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}$ cho thấy việc khử BG bằng NaBH_4 có xúc tác AuNPs đã làm cho phản ứng xảy ra chậm hơn, cụ thể từ 720 s tăng lên 880 s (tăng từ 12 phút đến gần khoảng 15 phút, theo nhiệt độ). Kết quả này tương tự với khảo sát MB ở mục 3.3.1.

Qua kết quả của phương trình động học bậc nhất cũng cho thấy hằng số tốc độ có giá trị giảm dần ở mỗi nhiệt độ (hình (5a'', b', c', d', e')). Từ phương trình Arrhenius của BG phản ứng với NaBH_4 có mặt AuNPs làm xúc tác, năng lượng hoạt hóa xác định tương ứng là $E_a = -16,05 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$.



Hình 5. Phổ UV – Vis về suy giảm hàm lượng BG phản ứng với NaBH_4 có AuNPs làm xúc tác và phương trình động học bậc nhất ở các nhiệt độ khác nhau.

4. KẾT LUẬN

Đã tổng hợp thành công vật liệu AuNPs từ hợp chất $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ với dịch chiết từ cây Xảo tam phân làm chất khử, các thông số ảnh hưởng đến quá trình tổng hợp đã được khảo sát để tìm điều kiện tối ưu: nồng độ $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ sử dụng là 1 mM, thời gian phản ứng 25 phút, tỉ lệ dịch chiết so với vàng là: 1: 5, nhiệt độ phản ứng là 80 °C. AuNPs sau khi tổng hợp được xác định đặc trưng hoá lý bằng các phương pháp: TEM, SEM, XRD, FT – IR, DLS, thế Zeta, EDX. AuNPs tổng hợp được có dạng hình cầu với kích thước trung bình khoảng 18–24 nm. Kết quả nghiên cứu khả năng xúc tác của vật liệu cho thấy: AuNPs thể hiện tốt vai trò làm chất xúc tác cho phản ứng khử hai chất màu hữu cơ: methylene blue và bromocresol green với hằng số tốc độ tương ứng lần lượt là $k = 0,0152 \text{ s}^{-1}$, $k = 0,0056 \text{ s}^{-1}$ và năng lượng hoạt hóa của phản ứng lần lượt là: -14,62 kJ/mol; -16,05 kJ/mol.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại Học Công Nghiệp TP.HCM và Trung Tâm Dịch Vụ Phân Tích Thí Nghiệm TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cơ sở vật chất và kinh phí thực hiện nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] S. Samsami, *et al*, (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Saf. Environ. Prot.*, **143(10)**, 138–163.
- [2] M. Trojanowicz, (2020). Removal of persistent organic pollutants (POPs) from waters and wastewaters by the use of ionizing radiation. *Sci. Total Environ.*, **718**, 134425.
- [3] J. Yadav and P. Chauhan, (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using Citrus X sinensis (Orange) fruit extract and assessment of their catalytic reduction. *Mater. Today Proc.*, **62(10)**, 6177–6181.
- [4] M. I. Al-Zaban, *et al*, (2021). Catalytic degradation of methylene blue using silver nanoparticles synthesized by honey. *Saudi J. Biol. Sci.*, **28(3)**, 2007–2013.
- [5] N. Z. Srećković *et al.*, (2023). Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using Salvia pratensis L. Aerial Part and Root Extracts: Bioactivity, Biocompatibility, and Catalytic Potential. *Molecules*, **28(3)**, 1387.

- [6] M. Şahin, Y. Arslan, *et al.*, (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using Lathyrus brachypterus extract for efficient catalytic reduction of methylene blue, methyl orange, methyl red and investigation of a kinetic model. *React. Kinet. Mech. Catal.*, **135**(6), 3303–3315.
- [7] R. S. Dharshini *et al.*, (2023). Nano-decolorization of methylene blue by Phyllanthus reticulatus iron nanoparticles: an eco-friendly synthesis and its antimicrobial, phytotoxicity study. *Appl. Nanosci.*, **13**(3), 2527–2537.
- [8] T. C. Perrotti, *et al.*, (2019). Green iron nanoparticles supported on amino-functionalized silica for removal of the dye methyl orange. *J. Environ. Chem. Eng.*, **7**(4), 103237.
- [9] D. Uzunoglu and A. Ozer, (2022). Synthesis of Iron-containing Nanoparticles from Iron-Steel Industrial Waste for Adsorption of Malachite Green. *Eurasia Proc. Sci. Technol. Eng. Math.*, **17**, 6–18.
- [10] M. Ismail, *et al.*, (2019). Green synthesis of zerovalent copper nanoparticles for efficient reduction of toxic azo dyes congo red and methyl orange. *Green Process. Synth.*, **8**(1), 135–143.
- [11] B. Kumar, (2021). Green synthesis of gold, silver, and iron nanoparticles for the degradation of organic pollutants in wastewater. *J. Compos. Sci.*, **5**(8), 219.
- [12] Y. R. Mejía and N. K. Reddy Bogireddy, (2022). Reduction of 4-nitrophenol using green-fabricated metal nanoparticles. *RSC Adv.*, **12**(29), 18661–18675.
- [13] C. W. Kang and H. Kolya, (2021). Green synthesis of Ag-Au bimetallic nanocomposites using waste tea leaves extract for degradation congo red and 4-nitrophenol. *Sustain*, **13**(6), 3318.
- [14] L. Sun *et al.*, (2021). Preparation of Polyaniline Microtubes as the Gold Catalyst Support with Improved Catalytic Performances for the Reduction of Nitrophenols. *Top. Catal.*, **64**(3–4), 215–223.
- [15] W. Liang, *et al.*, (2020). Microwave-assisted synthesis of magnetic surface molecular imprinted polymer for adsorption and solid phase extraction of 4-nitrophenol in wastewater. *Microchem. J.*, **159**(7), 105316.
- [16] H. N. Abdelhamid, (2021). High performance and ultrafast reduction of 4-nitrophenol using metal-organic frameworks. *J. Environ. Chem. Eng.*, **9**(1), 104404.
- [17] B. Kumar, *et al.*, (2022). Honeybee pollen assisted biosynthesis of nanogold and its application as catalyst in reduction of 4-nitrophenol. *Heliyon*, **8**(8), e10191.
- [18] J. K. Triantafillidis, *et al.*, (2022). Herbs and Plants in the Treatment of Pancreatic Cancer: A Systematic Review of Experimental and Clinical Studies. *Nutrients*, **14**(3), 1–49.
- [19] V. A. Le Thi, N. L. *et al.*, (2021). Phytochemical Screening and Potential Antibacterial Activity of Defatted and Nondefatted Methanolic Extracts of Xao Tam Phan (Paramignya trimera (Oliv.) Guillaum) Peels against Multidrug-Resistant Bacteria,” *Scientifica (Cairo)*, **2021**, 1-6
- [20] P. Kaithavelikkakath Francis, *et al.*, (2020). A novel green synthesis of gold nanoparticles using seaweed Lobophora variegata and its potential application in the reduction of nitrophenols. *Part. Sci. Technol.*, **38**(3), 365–370.
- [21] T. T. Vo, *et al.*, (2020). Biogenic Synthesis of Silver and Gold Nanoparticles from Lactuca indica Leaf Extract and Their Application in Catalytic Degradation of Toxic Compounds. *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, **30**(2), 388–399.