



Tổng hợp nano $\text{AgCl/ZnMn}_2\text{O}_4$ ứng dụng làm chất xúc tác cho phản ứng khử 4-nitrophenol

Trần Công Đình¹, Nguyễn Thị Thủy Tiên¹, Nguyễn Lê Phương Thùy¹, Trần Thùy Trinh¹,
Lê Bá Minh Lộc¹, Nguyễn Lê Mỹ Linh²

¹Sinh viên Khoa Hóa học, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế

²Khoa Hóa học, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình xử lý:

Ngày nhận bài: 12/12/2025

Ngày nhận bản chỉnh sửa: 19/3/2026

Ngày nhận đăng: 20/3/2026

Ngày xuất bản: 20/4/2026

Từ khóa:

$\text{AgCl/ZnMn}_2\text{O}_4$;

4-nitrophenol;

Vật liệu nano.

TÓM TẮT

Trong bài báo này, vật liệu nano $\text{AgCl/ZnMn}_2\text{O}_4$ được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt kết hợp phương pháp hóa học. Vật liệu tổng hợp được đặc trưng bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD), hiển vi điện tử quét (SEM), phổ hồng ngoại (FT-IR) và đẳng nhiệt hấp phụ-khử hấp phụ N_2 . Kết quả phân tích cho thấy vật liệu nano $\text{AgCl/ZnMn}_2\text{O}_4$ gồm các pha tinh thể AgCl và ZnMn_2O_4 với độ tinh thể cao, diện tích bề mặt đạt $30,23 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, với kích thước hạt nano trong khoảng 30–150 nm. Vật liệu thu được ứng dụng làm xúc tác cho phản ứng khử 4-nitrophenol bằng NaBH_4 để tạo thành 4-aminophenol. Động học phản ứng khử 4-nitrophenol bằng NaBH_4 tuân theo mô hình động học bậc 1, hằng số tốc độ k tăng theo nhiệt độ và năng lượng hoạt hóa của phản ứng xác định được là $65,79 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhiều ứng dụng của vật liệu nano đã được nghiên cứu rộng rãi trong các lĩnh vực như xúc tác (Neal et al., 2019), cảm biến (Montes-García et al., 2021), y học (Sawle et al., 2008)... cho thấy đây là nhóm vật liệu luôn thu hút sự quan tâm đặc biệt của các nhà khoa học. Trong số đó, các vật liệu oxide kim loại có cấu trúc spinel được xem là một hướng nghiên cứu đầy tiềm năng nhờ vào độ bền hóa học cao, khả năng điều chỉnh cấu trúc điện tử, phù hợp cho các ứng dụng xúc tác dị thể. Nhiều nghiên cứu liên quan đến việc tổng hợp và ứng dụng các vật liệu spinel đã được triển khai. M. Y. Nassar và cộng sự (2017) đã tổng hợp vật liệu ZnMn_2O_4 kích thước nano bằng phương pháp đốt cháy tự phát (auto-combustion) với các nhiên liệu như ure, glycine và L-alanine; vật liệu thu được được ứng dụng để chế tạo cảm biến nano hóa học nhằm xác định omeprazole và lansoprazole. Trong nước, Nguyễn Lê Mỹ Linh và Đỗ Mai Nguyễn (2020) đã tổng hợp thành công vật liệu ZnMn_2O_4 bằng phương pháp thủy nhiệt. Tiếp nối nghiên cứu này, nhóm tác giả (Phan et al., 2022) đã khảo sát khả năng xúc tác của ZnMn_2O_4 trong phản ứng phân hủy chất nhuộm basic fuchsin khi có mặt tác nhân H_2O_2 , cho thấy tiềm năng ứng dụng của vật liệu spinel ZnMn_2O_4 trong lĩnh vực xúc tác môi trường.

Bên cạnh các vật liệu spinel, AgCl kích thước nano cũng được quan tâm trong các nghiên cứu xúc tác gần đây, đặc biệt trong phản ứng khử 4-nitrophenol (4-NP) bằng NaBH_4 . Tuy nhiên, cần lưu ý rằng hầu hết các công bố liên quan đến AgCl đều tập trung vào các hệ vật liệu tổ hợp, trong đó AgCl được kết hợp với các thành phần khác như kim loại Ag (Konvičková et al., 2018; Lu et al., 2020), tannic acid-cellulose hydrogels (Zhang et al., 2021), nhằm tăng cường độ phân tán, cải thiện khả năng truyền electron. Trong các hệ này, AgCl thường đóng vai trò trung tâm hoạt hóa, tham gia vào quá trình tiếp nhận và trung gian chuyển electron từ BH_4^- đến phân tử 4-NP. Sản phẩm của phản ứng khử 4-NP là 4-aminophenol (4-AP), một hợp chất trung gian quan trọng trong công nghiệp dược phẩm, đặc biệt trong sản xuất thuốc giảm đau và hạ sốt (Seo et al., 2017).

Xuất phát từ những phân tích trên, việc kết hợp AgCl với nền spinel ZnMn_2O_4 được kỳ vọng sẽ tạo ra hiệu ứng hiệp đồng, trong đó ZnMn_2O_4 không chỉ đóng vai trò chất mang giúp phân tán tốt AgCl mà còn có thể hỗ

Tác giả liên hệ: Nguyễn Lê Mỹ Linh;

Địa chỉ e-mail: nguyenlemylinh@dhsphue.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.26459/jse.050.2026>

trợ quá trình chuyển electron trên bề mặt xúc tác, từ đó nâng cao hiệu quả phản ứng khử 4-NP. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung tổng hợp vật liệu ZnMn_2O_4 bằng phương pháp thủy nhiệt, sau đó phủ AgCl bằng phương pháp hóa học. Hoạt tính xúc tác của hệ vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ được đánh giá thông qua phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 . Đồng thời, ảnh hưởng của nhiệt độ đến quá trình khử 4-NP trên hệ xúc tác $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ cũng được khảo sát nhằm làm rõ đặc trưng động học của phản ứng.

2. PHƯƠNG PHÁP

2.1. Hóa chất

Zinc sulfate heptahydrate ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), manganese(II) sulfate monohydrate ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), tin (II) chloride dihydrate ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sodium hydroxide (NaOH), ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (Trung Quốc), 4-nitrophenol (Merck), sodium borohydride (NaBH_4) (Merck).

2.2. Tổng hợp vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$

Vật liệu nano $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ được tổng hợp theo 2 giai đoạn:

- Giai đoạn 1: Tổng hợp vật liệu ZnMn_2O_4 có cấu trúc nano bằng phương pháp thủy nhiệt theo công bố (Nguyễn & Đỗ, 2020).

Hòa tan hỗn hợp rắn $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ và $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ với tỉ lệ mol 1:2 vào 40 mL nước cất, khuấy đều bằng máy khuấy từ với tốc độ 500 vòng/phút trong 1 giờ. Tiếp theo, vừa khuấy vừa nhỏ từ từ từng giọt đến hết 60 mL dung dịch NaOH 1 M. Khuấy đều hỗn hợp trong 15 phút, sau đó cho toàn bộ hỗn hợp vào bình Teflon. Đặt bình Teflon vào autoclave, đậy thật kín và sấy ở nhiệt độ 120 °C trong 24 giờ. Sau khi thủy nhiệt, autoclave được để nguội một cách tự nhiên đến nhiệt độ phòng. Lọc kết tủa thu được rồi rửa nhiều lần bằng nước cất, sau đó bằng ethanol đến khi dịch lọc có pH 7,0. Sản phẩm thu được sấy khô ở 80 °C, sau đó nung 500 °C trong 4 giờ.

- Giai đoạn 2: Tổng hợp vật liệu nano $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$

Cho 0,5 g vật liệu ZnMn_2O_4 đã tổng hợp ở giai đoạn 1 vào 40 mL dung dịch $\text{SnCl}_2/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 0,05 M, khuấy đều hỗn hợp bằng máy khuấy từ ở nhiệt độ phòng trong 5 phút. Tiếp theo, thêm vào hỗn hợp 40 mL dung dịch AgNO_3 có nồng độ xác định và khuấy đều hỗn hợp bằng máy khuấy từ với tốc độ 750 vòng/phút trong những khoảng thời gian khác nhau. Sau khi khuấy xong, lọc tách kết tủa và rửa nhiều lần bằng nước cất đến khi dung dịch lọc có pH $\approx 7,0$. Sản phẩm thu được sấy khô ở 70 °C.

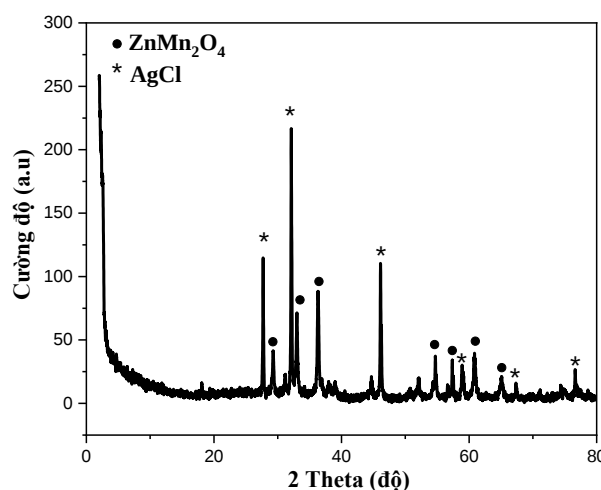
2.3. Khảo sát khả năng xúc tác của vật liệu

Phản ứng khử 4-nitrophenol (4-NP) bằng NaBH_4 trên xúc tác $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ được thực hiện như sau:

Cho 0,1 g NaBH_4 vào 150 mL dung dịch 4-NP 20 mg/L, khuấy từ với tốc độ 500 vòng/phút ở nhiệt độ 30 °C trong 15 phút, màu của dung dịch chuyển từ màu vàng nhạt sang màu vàng đậm. Tiếp theo, cho xúc tác $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ vào hỗn hợp và khuấy liên tục. Sau một khoảng thời gian xác định, dùng pipet lấy 4 mL dung dịch đem ly tâm lấy phần lỏng. Nồng độ còn lại của 4-NP được xác định bằng phương pháp UV-Vis ở các thời gian đó ở bước sóng 400 nm. Trong phần khảo sát này, yếu tố ảnh hưởng đến khả năng xúc tác $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ trong phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 được nghiên cứu là nhiệt độ (293 K, 303 K, 313 K).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

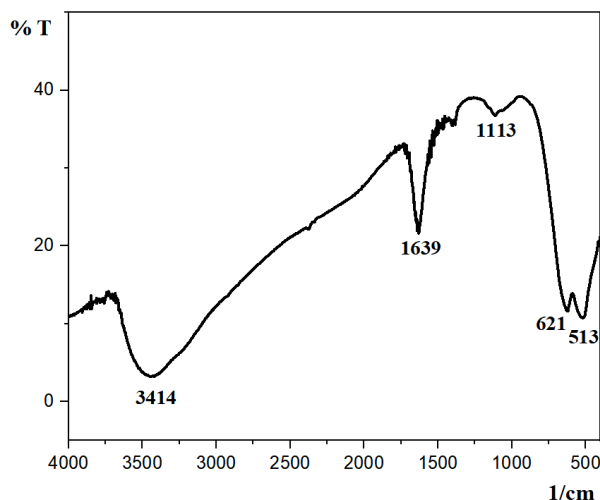
3.1. Đặc trưng vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$



Hình 1. Giảm đồ XRD của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$.

Giản đồ XRD của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ tổng hợp được trình bày ở hình 1. Hình 1 cho thấy giản đồ XRD của mẫu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ xuất hiện các peak đặc trưng cho pha tinh thể ZnMn_2O_4 (JCPDS 24-1133) ở $18,40^\circ$; $29,32^\circ$; $33,07^\circ$; $35,86^\circ$; $60,88^\circ$ tương ứng với các mặt phản xạ (101); (112); (103); (211); (224) (Taghavi Fardood et al., 2019) và pha tinh thể lập phương tâm mặt AgCl ở $27,7^\circ$; $32,1^\circ$; $46,1^\circ$; $57,4^\circ$ tương ứng với các mặt phản xạ (111); (200); (220); (222) (Al Aboody, 2019). Các peak đặc trưng cho pha tinh thể AgCl , ZnMn_2O_4 sắc nét với cường độ mạnh, không quan sát thấy các peak đặc trưng cho zinc oxide, manganese oxide và silver cho thấy vật liệu tổng hợp chủ yếu chứa các tinh thể AgCl , ZnMn_2O_4 có cấu trúc trật tự.

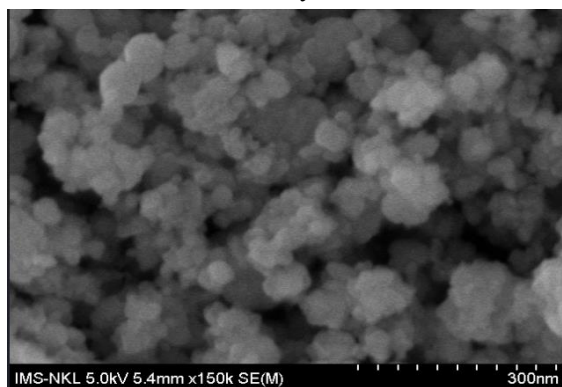
Hình 2 trình bày phổ FT-IR của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$.



Hình 2. Phổ FT-IR của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$.

Từ hình 2 nhận thấy FT-IR của mẫu tổng hợp bao gồm các peak ở số sóng 3414 cm^{-1} , 1639 cm^{-1} , 1113 cm^{-1} , 621 cm^{-1} , 513 cm^{-1} . Peak ở số sóng 3414 cm^{-1} đặc trưng cho dao động của liên kết O – H trong nước hấp phụ vật lý và peak có số sóng 1639 cm^{-1} đặc trưng cho dao động biến dạng $\delta_{\text{H-O-H}}$ (Peng et al., 2015), peak có số sóng 1113 cm^{-1} đặc trưng cho dao động kéo dãn của liên kết S–O trong ion SO_4^{2-} , cho thấy các nhóm sulfate vẫn còn trong mẫu, peak có số sóng 621 cm^{-1} đặc trưng cho dao động biến dạng Zn – O của cấu trúc ZnMn_2O_4 (Nguyễn & Đỗ, 2020), peak có số sóng 513 cm^{-1} đặc trưng cho dao động biến dạng Mn – O trong mạng bát diện (Nguyễn & Đỗ, 2020). Vùng hấp thụ $250 - 350\text{ cm}^{-1}$ đặc trưng dao động liên kết Ag–Cl trong mạng tinh thể (Bottger & Geddes, 1967). Điều này khẳng định vật liệu AgCl , ZnMn_2O_4 đã được hình thành, kết quả phù hợp với sự phân tích XRD ở trên.

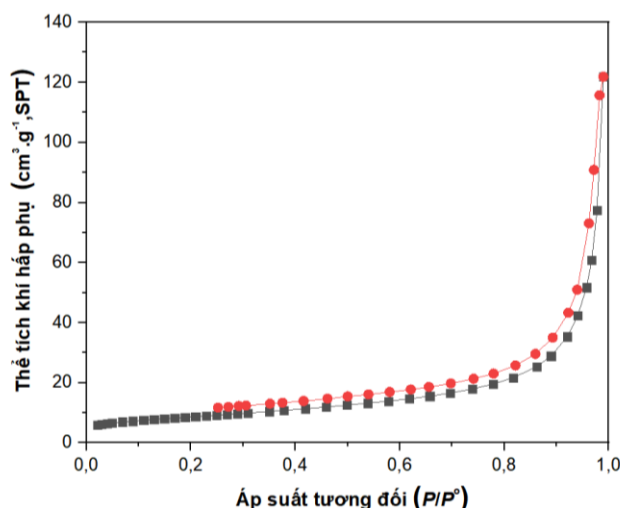
Ảnh SEM của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ được trình bày ở hình 3.



Hình 3. Ảnh SEM của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$.

Hình 4 là đường đẳng nhiệt hấp phụ/giải hấp phụ N_2 của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$.

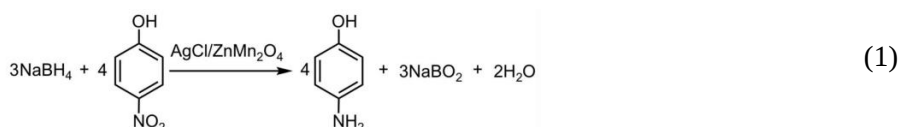
Từ hình 4 nhận thấy đường đẳng nhiệt hấp phụ - khử hấp phụ của mẫu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ thuộc loại III, diện tích bề mặt vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ tính được là $30,23\text{ m}^2.\text{g}^{-1}$. So với vật liệu ZnMn_2O_4 tổng hợp ở giai đoạn 1 có diện tích bề mặt $13,83\text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ (Nguyễn & Đỗ, 2020), diện tích bề mặt của vật liệu $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ được cải thiện là do sự hình thành AgCl phủ trên bề mặt vật liệu ZnMn_2O_4 . Đường đẳng nhiệt hấp phụ và giải hấp phụ của mẫu có vòng trễ kiểu H_3 liên quan đến sự hấp phụ đa lớp phân tử N_2 trong các mao quản của vật liệu, các mao quản này có thể liên quan đến sự sắp xếp của các hạt liên kết của vật liệu như quan sát thấy ở ảnh SEM.



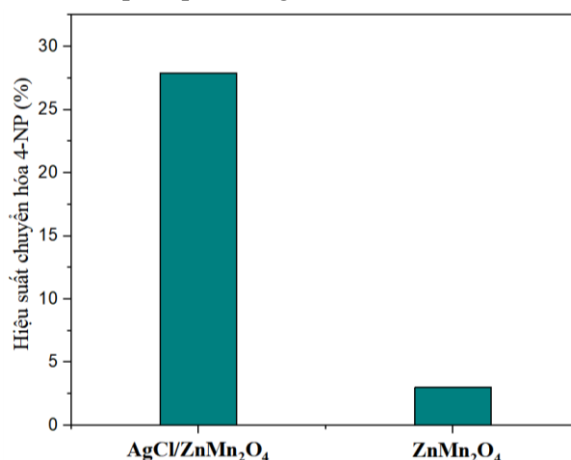
Hình 4. Đường đẳng nhiệt hấp phụ/giải hấp phụ N₂ của vật liệu AgCl/ZnMn₂O₄.

3.2. Ứng dụng vật liệu AgCl/ZnMn₂O₄ làm xúc tác cho phản ứng khử 4-nitrophenol bằng NaBH₄

Phản ứng khử 4-NP trên xúc tác AgCl/ZnMn₂O₄ được mô tả như sau:



Phản ứng khử 4-NP bằng NaBH₄ để tạo thành 4-AP thuận lợi về mặt nhiệt động học. Tuy nhiên, phản ứng này lại bị hạn chế về mặt động học nếu không có mặt chất xúc tác. Hoạt tính xúc tác của vật liệu ZnMn₂O₄, AgCl/ZnMn₂O₄ trong phản ứng này đã được nghiên cứu. Hình 5 trình bày hiệu suất chuyển hóa 4-NP trên xúc tác ZnMn₂O₄ và AgCl/ZnMn₂O₄ sau 30 phút phản ứng.



Hình 5. Hiệu suất chuyển hóa 4-NP trên xúc tác ZnMn₂O₄ và AgCl/ZnMn₂O₄ sau 30 phút phản ứng.

Hiệu suất chuyển hóa 4-NP được tính theo công thức:

$$H = \frac{(C_o - C_t) \times 100\%}{C_o} \quad (2)$$

Trong đó: C_o và C_t (mg.L⁻¹) lần lượt là nồng độ 4-NP tại thời điểm ban đầu và tại thời điểm t phản ứng. Do nồng độ 4-NP tỉ lệ thuận với độ hấp thụ A , nên phương trình (2) có thể được viết lại như sau:

$$H = \frac{(A_o - A_t) \times 100\%}{A_o} \quad (3)$$

Trong đó: A_o và A_t lần lượt là độ hấp thụ của dung dịch 4-NP ở bước sóng 400 nm tại thời điểm ban đầu và tại thời điểm t phản ứng.

Kết quả ở hình 5 cho thấy mẫu ZnMn₂O₄ hầu như không thể hiện hoạt tính xúc tác, hiệu suất chuyển hóa 4-NP chỉ đạt 3%, trong khi mẫu AgCl/ZnMn₂O₄ cho hiệu suất chuyển hóa 4-NP là 27,9%. Như vậy, với sự có mặt của AgCl, vật liệu AgCl/ZnMn₂O₄ đã thể hiện hoạt tính xúc tác cho phản ứng khử 4-NP bằng NaBH₄ tốt hơn.

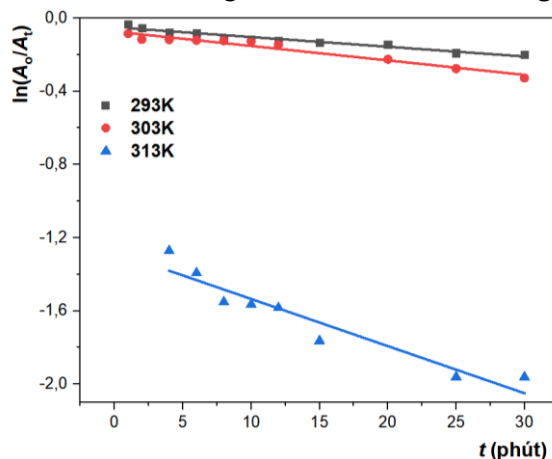
Trong phản ứng khử 4-NP khảo sát ở bài báo này, nồng độ NaBH_4 lớn hơn nhiều so với nồng độ 4-NP, nên tốc độ phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 xem như chỉ phụ thuộc vào nồng độ của 4-NP. Phương trình động học bậc 1 được dùng để mô tả động học khử 4-NP bằng NaBH_4 trên xúc tác khảo sát.

Phương trình động học bậc 1:

$$\ln \frac{C_t}{C_o} = \ln \frac{A_t}{A_o} = -kt \quad (4)$$

Trong đó k (phút⁻¹) hằng số tốc độ bậc 1 biểu kiến.

Hình 6 biểu diễn đồ thị phương trình động học bậc 1 của phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 trên xúc tác $\text{AgCl/ZnMn}_2\text{O}_4$ ở các nhiệt độ khác nhau với nồng độ đầu của 4-NP là 20 mg/L.



Hình 6. Đồ thị mô hình động học bậc 1 của phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 trên xúc tác $\text{AgCl/ZnMn}_2\text{O}_4$ ở các nhiệt độ khác nhau.

Các tham số của phương trình động học được tóm tắt ở bảng 1.

Bảng 1. Các tham số thu được từ phương trình động học bậc 1 của phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 trên xúc tác $\text{AgCl/ZnMn}_2\text{O}_4$ ở các nhiệt độ khác nhau

Nhiệt độ (K)	k (phút ⁻¹)	R^2
293	0,0053	0,944
303	0,0079	0,956
313	0,0258	0,912

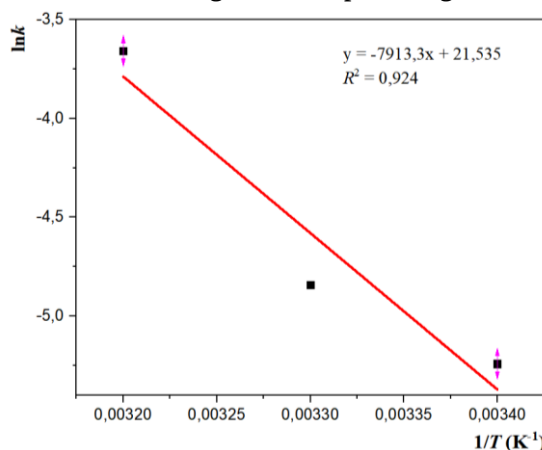
Kết quả ở bảng 1 cho thấy hằng số tốc độ phản ứng k tăng theo nhiệt độ. Điều này được lý giải bởi việc gia tăng nhiệt độ làm các phân tử chuyển động nhanh hơn, dẫn đến số va chạm hiệu quả giữa chúng nhiều hơn, từ đó làm tốc độ phản ứng tăng lên.

Năng lượng hoạt hóa

Dựa vào phương trình Arrhenius, năng lượng hoạt hóa của phản ứng được tính theo biểu thức:

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A \quad (5)$$

Trong đó, E_a là năng lượng hoạt hóa; k là hằng số tốc độ phản ứng, A là thừa số tần số.



Hình 7. Mối quan hệ tuyến tính giữa $\ln k$ và $1/T$.

Từ các số liệu thực nghiệm vẽ đồ thị $\ln k$ theo $1/T$ (hình 7), ta sẽ tính được năng lượng hoạt hóa của phản ứng.

Từ hình 7, năng lượng hoạt hóa của phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 trên xúc tác $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ được xác định là $65,79 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. So với công bố khác, giá trị năng lượng hoạt hóa tính được trong phản ứng là nhỏ hơn (Iben Ayad et al., 2020) và tương đương (Mondal et al., 2017). Hoạt tính xúc tác của $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ trong phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 được quy cho hiệu ứng hiệp đồng giữa AgCl và nền spinel ZnMn_2O_4 , giúp tăng cường quá trình truyền electron trong phản ứng khử 4-NP.

4. KẾT LUẬN

Vật liệu nano $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ được tổng hợp với kích thước hạt 30–150 nm, gồm hai pha tinh thể AgCl và ZnMn_2O_4 có độ kết tinh cao. Sự hiện diện của lớp phủ nano AgCl trên các hạt ZnMn_2O_4 góp phần làm tăng diện tích bề mặt của vật liệu lên $30,23 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$. Phản ứng khử 4-NP bằng NaBH_4 trên xúc tác $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ tuân theo mô hình động học bậc nhất. Hằng số tốc độ phản ứng k tăng theo nhiệt độ. Năng lượng hoạt hóa của phản ứng được xác định là $65,79 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế trong nhiệm vụ mã số: “NCTBSV T.24-TN.104-01”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Al Aboody, M. S. (2019). Silver/silver chloride (Ag/AgCl) nanoparticles synthesized from *Azadirachta indica* latex and its antibiofilm activity against fluconazole-resistant *Candida tropicalis*. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 47(1), 2107–2113. <https://doi.org/10.1080/21691401.2019.1620257>
- Bottger, G. L., & Geddes, A. L. (1967). Infrared lattice vibrational spectra of AgCl , AgBr , and AgI . *The Journal of Chemical Physics*, 46(8), 3000–3004. <https://doi.org/10.1063/1.1841169>
- Iben Ayad, A., Luat, D., Ould Dris, A., & Guénin, E. (2020). Kinetic analysis of 4-nitrophenol reduction by “water-soluble” palladium nanoparticles. *Nanomaterials*, 10(6), 1169. <https://doi.org/10.3390/nano10061169>
- Konvičková, Z., Holířová, V., Kolenčík, M., Niide, T., Kratošová, G., Umetsu, M., & Seidlerová, J. (2018). Phytosynthesis of colloidal Ag – AgCl nanoparticles mediated by *Tilia* sp. leachate, evaluation of their behaviour in liquid phase and catalytic properties. *Colloid and Polymer Science*, 296(4), 677–687. <https://doi.org/10.1007/s00396-018-4290-2>
- Lu, Y., Mao, J., Wang, Z., Qin, Y., & Zhou, J. (2020). Facile synthesis of porous hexapod $\text{Ag}@\text{AgCl}$ dual catalysts for *in situ* SERS monitoring of 4-nitrothiophenol reduction. *Catalysts*, 10(7), 746. <https://doi.org/10.3390/catal10070746>
- Montes-García, V., Squillaci, M., Diez-Castellnou, M., Ong, Q. K., Stellacci, F., & Samorì, P. (2021). Chemical sensing with Au and Ag nanoparticles. *Chemical Society Reviews*, 50(2), 1269–1304. <https://doi.org/10.1039/D0CS01112F>
- Mondal, A., Mondal, A., Adhikary, B., & Mukherjee, D. K. (2017). Cobalt nanoparticles as reusable catalysts for reduction of 4-nitrophenol under mild conditions. *Bulletin of Materials Science*, 40(2), 321–328. <https://doi.org/10.1007/s12034-017-1367-3>
- Nassar, M. Y., El-Moetyb, E. A., & El-Shahat, M. F. (2017). Synthesis and characterization of a ZnMn_2O_4 nanostructure as a chemical nanosensor: A facile and new approach for colorimetric determination of omeprazole and lansoprazole drugs. *RSC Advances*, 7, 43798–43811. <https://doi.org/10.1039/C7RA08010G>
- Neal, R. D., Inoue, Y., Hughes, R. A., & Neretina, S. (2019). Catalytic reduction of 4-nitrophenol by gold catalysts: The influence of borohydride concentration on the induction time. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(20), 12894–12901. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b02396>
- Nguyễn, L. M. L., & Đỗ, M. N. (2020). Nghiên cứu tổng hợp vật liệu nano ZnMn_2O_4 bằng phương pháp thủy nhiệt. *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption*, 9(3), 58–62.
- Phan, T. H. M., Phan, T. H. T., & Nguyễn, L. M. L. (2022). Nghiên cứu sự phân hủy basic fuchsin bằng xúc tác ZnMn_2O_4 khi có mặt tác nhân H_2O_2 . *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế*.
- Peng, Q., Liu, M., Zheng, J., & Zhou, C. (2015). Adsorption of dyes in aqueous solutions by chitosan–halloysite nanotubes composite hydrogel beads. *Microporous and Mesoporous Materials*, 201, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.09.003>
- Sawle, B. D., Salimath, B., Deshpande, R., Bedre, M. D., Prabhakar, B. K., & Venkataraman, A. (2008). Biosynthesis and stabilization of Au and Au–Ag alloy nanoparticles by fungus, *Fusarium semitectum*. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(3), 035012. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/3/035012>
- Seo, Y. S., Ahn, E.-Y., Park, J., Kim, T. Y., Hong, J. E., Kim, K., Park, Y., & Park, Y. (2017). Catalytic reduction of 4-nitrophenol with gold nanoparticles synthesized by caffeic acid. *Nanoscale Research Letters*, 12, 7. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1776-z>

Taghavi Fardood, S., Moradnia, F., & Ramazani, A. (2019). Green synthesis and characterisation of ZnMn_2O_4 nanoparticles for photocatalytic degradation of Congo red dye and kinetic study. *Micro & Nano Letters*, 14, 986–991. <https://doi.org/10.1049/mnl.2019.0071>

Zhang, M., Li, M., Yu, N., Su, S., & Zhang, X. (2021). Fabrication of $\text{AgCl}@$ tannic acid-cellulose hydrogels for NaBH_4 -mediated reduction of 4-nitrophenol. *Cellulose*, 28, 3515–3529. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03721-0>

Synthesis of $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ nanomaterials for use as a catalyst in the reduction of 4-nitrophenol

Tran Cong Dinh¹, Nguyen Thi Thuy Tien¹, Nguyen Le Phuong Thuy¹, Tran Thuy Trinh¹,
Le Ba Minh Loc¹, Nguyen Le My Linh²

¹Student of the Faculty of Chemistry, University of Education, Hue University

²Faculty of Chemistry, University of Education, Hue University

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 December 2025

Received in revised form: 19 March 2026

Accepted: 20 March 2026

Published: 20 April 2026

Keywords:

$\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$;

4-nitrophenol;

nanomaterials.

Corresponding author:

Nguyen Le My Linh

E-mail address:

nguyenlemylinh@dhsphue.edu.vn

ABSTRACT

In this study, $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ nanomaterials were successfully synthesized using a hydrothermal method combined with a chemical method. The obtained materials were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), and N_2 adsorption-desorption isotherms. The results indicate that the $\text{AgCl}/\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ nanomaterials contain well-crystallized AgCl and ZnMn_2O_4 phases, with a specific surface area of $30.23 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and nanoparticle sizes ranging from 30 to 150 nm. The synthesized material was applied as a catalyst for the reduction of 4-nitrophenol by NaBH_4 to produce 4-aminophenol. The reduction kinetics of 4-NP by NaBH_4 follow a first-order kinetic model, with the rate constant k increasing with temperature, and the activation energy of the reaction determined to be $65.79 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.