VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology

Journal homepage: https://js.vnu.edu.vn/NST

Original Article

Effect of Ultrasound on the Formation and Photocatalytic Activity of ZnO Nanoparticles

Nguyen Viet Tuyen[1], Pham Van Thanh[1], Nguyen Cong Toan[1], Ngac An Bang[1], Nguyen Canh Viet[1], Sai Cong Doanh[1], Tran Thi Ngoc Anh[1], Pham Thi Hong[1], Nguyen Trong Tam[2], Tran Thi Ha[3,*]

[1]*VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*
[2]*Vietnam Maritime University, 484 Lach Tray, Le Chan, Hai Phong, Vietnam*
[3]*Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien, Dong Ngac, Hanoi, Vietnam*

Received 27th April 2025
Revised 26th March 2026; Accepted 09th April 2026

Abstract: In this paper, we report the synthesis of ZnO nanoproducts using an ultrasonic method. The effect of temperature on the structure, size and properties of ZnO nanostructures was investigated. The study shows that ZnO nanoproducts synthesized via the ultrasonic method exhibit a hexagonal structure at all synthesis temperatures. However, temperature significantly affects the size of the nanoproducts. The photocatalytic properties of the as-synthesized nanoparticles were studied using methylene blue as a testing reagent. Applying ultrasound during the photocatalytic reaction enhances the degradation efficiency of methylene blue by the prepared ZnO nanoparticles.

Keywords: ZnO nanoparticles; photocatalyst; ultrasonic.

* Corresponding author.
E-mail address: tranthiha@humg.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5650

Ảnh hưởng của sóng siêu âm lên sự hình thành và khả năng quang xúc tác của hạt nano ZnO

Nguyễn Việt Tuyên[1], Phạm Văn Thành[1], Nguyễn Công Toản[1], Ngạc An Bang[1], Nguyễn Cảnh Việt[1], Sái Công Doanh[1], Trần Thị Ngọc Anh[1], Phạm Thị Hồng[1], Nguyễn Trọng Tâm[2], Trần Thị Hà[3,*]

[1]*Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*
[2]*Trường Đại học Hàng Hải, 484 Lạch Tray, Lê Chân, Hải Phòng, Việt Nam*
[3]*Trường Đại học Mỏ - Địa Chất, 18 Phố Viên, Đông Ngạc, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 27 tháng 4 năm 2025
Chỉnh sửa ngày 26 tháng 3 năm 2026; Chấp nhận đăng ngày 09 tháng 4 năm 2026

Tóm tắt: Trong bài báo này, chúng tôi công bố các kết quả chế tạo hạt nano ZnO bằng phương pháp siêu âm. Ảnh hưởng của nhiệt độ phản ứng lên cấu trúc, kích thước và tính chất của sản phẩm nano đã được nghiên cứu. Các kết quả nghiên cứu cho thấy trong vùng nhiệt độ nghiên cứu, tất cả các sản phẩm thu được đều là ZnO có cấu trúc lục giác. Tuy nhiên, nhiệt độ có ảnh hưởng lớn đến kích thước của các hạt nano thu được. Khả năng quang xúc tác của các vật liệu nano đã chế tạo cũng đã được nghiên cứu với chất thử là Methylene Blue. Việc sử dụng sóng siêu âm trong quá trình xử lý quang xúc tác làm tăng hiệu quả xử lý Methylene Blue của các hạt nano đã chế tạo được.

Từ khóa: Hạt nano ZnO; quang xúc tác, siêu âm.

1. Mở đầu

Kẽm oxit (ZnO) đã dành được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới do có khả năng ứng dụng cao và có thể chế tạo dễ dàng. Đặc biệt, khi vật liệu ZnO có cấu trúc nano, nhiều đặc tính như quang, điện và quang xúc tác được tăng cường hơn dạng vật liệu khối. Vì vậy, chúng thường được ứng dụng trong pin mặt trời, quang xúc tác và cảm biến hóa học [1-3]. Hiện nay nhiều phương pháp chế tạo vật liệu nano ZnO được sử dụng như phương pháp thủy nhiệt, tổng hợp pha dung dịch, phương pháp sol-gel, lắng đọng xung laser, phún xạ, phương pháp vi song [4-8],… Trong những năm gần đây, phương pháp siêu âm nổi lên là một phương pháp hiệu quả để chế tạo vật liệu với nhiều ưu điểm [9-11]. Trong phương pháp này, sóng siêu âm (tần số 20kHz - 10MHz) được sử dụng để hỗ trợ cho phản ứng hóa học. Các sóng siêu âm có làm hình thành, phát triển và sụp đổ tức thời của các bong bóng trong môi trường dung dịch. Môi trường đặc biệt với nhiệt độ cao hơn 5000K và áp suất lớn hơn 1000 atm trong các bong bóng này tạo ra các điều kiện để thúc đẩy các phản ứng hóa học mà thường không thể xảy ra ở điều kiện phòng. Chiếu xạ siêu âm có thể làm tăng tốc độ và giảm thời gian phản ứng gấp nhiều lần, do đó nó có nhiều ưu điểm như: đơn giản, thân thiện với môi trường, chi phí thấp,... Phương pháp này đã trở thành một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng trong những năm gần đây.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi chế tạo các hạt nano ZnO bằng phương pháp siêu âm. Cấu trúc của các sản phẩm đã được nghiên cứu bằng một số phép đo như nhiễu xạ tia X, tán xạ Raman. Hình dạng và kích thước của sản phẩm

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: tranthiha@humg.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5650

được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét và phép đo tán xạ ánh sáng động. Tính chất quang xúc tác và ảnh hưởng của sóng siêu âm trong quá trình quang xúc tác của các vật liệu cũng đã được nghiên cứu.

2. Thực nghiệm

Các tiền chất ban đầu được sử dụng bao gồm $Zn(CH_3COO)_2$ (99,5%), NaOH (99,9%) và C_2H_5OH (99%) được mua từ hãng Merck (Đức). Đầu tiên, dung dịch tiền chất được tạo ra bằng cách hòa tan muối $Zn(CH_3COO)_2$ trong isopropanol (C_3H_7OH) nồng độ 0,01M bằng cách khuấy từ. Dung dịch NaOH có nồng độ 0,025M được tạo ra bằng cách tương tự. Nhỏ giọt từ từ 50 ml dung dịch NaOH vào 50 ml dung dịch muối $Zn(CH_3COO)_2$ trong khi liên tục khuấy mạnh hỗn hợp. Trong quá trình nhỏ giọt, dung dịch muối $Zn(CH_3COO)_2$ được ngâm trong nước đá để giảm sự kết tụ của các hạt. Dung dịch hỗn hợp sau đó được đem đi rung siêu âm trong 30 phút và không gia nhiệt (Mẫu Z0) hoặc gia nhiệt tại các nhiệt độ 60 °C (Mẫu Z1), 70 °C (Mẫu Z2), 80 °C (Mẫu Z3).

Các hạt ZnO được tạo ra theo các phương trình phản ứng sau:

$Zn(CH_3COO)_2 + NaOH \rightarrow Zn(CH_3COO)(OH) + CH_3COONa$

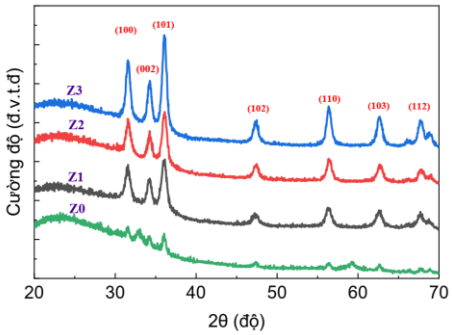
$Zn(CH_3COO)OH + NaOH \rightarrow ZnO + CH_3COONa + H_2O$

Sau khi rung siêu âm, dung dịch thu được có màu trắng sữa. Sản phẩm sau đó được rửa nhiều lần bằng cồn (70%) và nước cất bằng phương pháp quay li tâm để loại bỏ các tiền chất dư. Sản phẩm sau khi rửa được sấy trong ở nhiệt độ 80 °C trong 1 giờ. Sản phẩm cuối cùng thu được có dạng bột màu trắng.

Hoạt tính quang xúc tác của hạt nano ZnO được đánh giá qua chất thử Methylene Blue (MB) dưới sự chiếu xạ của tia UV. 10 mg hạt nano ZnO đã chế tạo được cho phân tán đều vào 20 ml dung dịch MB (5 mg/l). Trước khi chiếu UV, hỗn hợp được khuấy từ trong bóng tối trong 30 phút để đạt được sự cân bằng hấp thụ trên bề mặt của hạt nano. Trong quá trình thực hiện quang xúc tác, sóng siêu âm cũng được áp dụng đồng thời với việc chiếu tia UV để khảo sát ảnh hưởng của nó đến khả năng phân hủy MB. Trong quá trình đo, 3 ml dung dịch mẫu được lấy ra định kỳ và được phân tích bằng máy quang phổ hấp thụ UV-Vis Shimadzu (UV - 2450) để nghiên cứu quá trình phân huỷ MB bởi vật liệu nano ZnO đã chế tạo. Cấu trúc tinh thể của mẫu được phân tích bởi thiết bị đo nhiễu xạ tia X Panalitycal Empyrean và thiết bị đo Raman Horiba Jobin Yvon's LabRAM HR 800 với bước sóng kích thích là 632,8 nm. Hình dạng của sản phẩm nano được nghiên cứu bằng thiết bị đo hiển vi điện tử quét Phenom XL G2 của hãng Thermo Scientific. Kích thước hạt được đo bằng thiết bị Zetasizer Nano ZS90 của hãng Malvern.

3. Kết quả và thảo luận

Hình 1 cho thấy giản đồ XRD của hạt nano ZnO được chế tạo bằng phương pháp rung siêu âm với các nhiệt độ khác nhau.



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu ZnO (Z0, Z1, Z2, Z3).

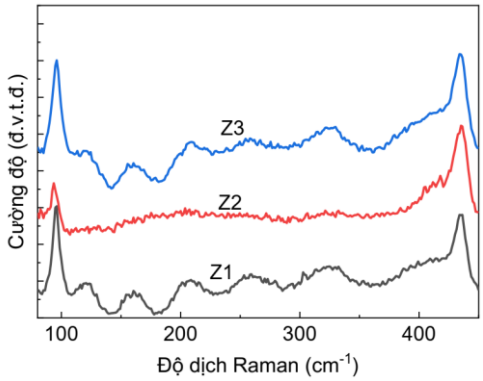
Giản đồ XRD (Hình 1) của các mẫu đã chế tạo cho thấy các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của cấu trúc tinh thể lục giác của ZnO xuất hiện lần lượt ở các vị trí 31,6°; 34,3°; 36,1°; 47,4°; 56,5°; 62,6°; 67,8° tương ứng với các mặt mạng (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) của tinh thể ZnO. Mẫu không gia nhiệt có sự xuất hiện của một số đỉnh lạ, có thể là do các chất phản ứng trung gian chưa được chuyển hoàn toàn thành tinh thể ZnO. Trong khi các mẫu chế tạo khi có gia nhiệt đều không xuất hiện pha lạ, chứng tỏ mẫu thu được chỉ có pha tinh thể ZnO. Độ kết tinh của các mẫu chế tạo

khi có gia nhiệt cũng cao hơn so với khi không gia nhiệt.

Kích thước tinh thể tính theo công thức Debye - Sherrer và hằng số mạng của các mẫu được trình bày chi tiết trong Bảng 1. Kết quả hằng số mạng này hoàn toàn phù hợp với giá trị hằng số mạng của vật liệu ZnO đã được công bố. Nhận thấy khi rung siêu âm tại các nhiệt độ 60 °C, 70 °C, 80 °C kích thước tinh thể chênh lệch nhau không nhiều, nhưng lớn hơn khá nhiều so với mẫu được chế tạo khi rung siêu âm không gia nhiệt. Kết quả này cho thấy gia nhiệt trong quá trình chế tạo giúp cải thiện độ kết tinh của sản phẩm ZnO thu được.

Bảng 1. Hằng số mạng và kích thước tinh thể trung bình của hạt nano ZnO

ZnO	a (nm)	c (nm)	d (nm)
Z0	0,3272	0,5238	13,7 ± 1,9
Z1	0,3272	0,5235	21,6 ± 1,7
Z2	0,3266	0,5336	21,9 ± 1,7
Z3	0,3268	0,5232	22,2 ± 1,6



Hình 2. Phổ Raman của các mẫu ZnO (Z1, Z2, Z3).

Phổ Raman của các mẫu ZnO đã chế tạo được cho trong Hình 2. Hai đỉnh đặc trưng của ZnO được quan sát rõ ràng ở 99 cm^{-1} (E_2^{low}) và đỉnh khoảng từ 437 cm^{-1} đến 450 cm^{-1} (E_2^{high}) [4, 12-14]. Đây là các mode ứng với dao động của mạng tinh thể của Zn và O trong mạng lục giác wurtzite. Phổ Raman cũng cho thấy các sản phẩm thu được là ZnO tinh khiết có độ kết tinh tốt.

Hình 3 là phổ hấp thụ của các mẫu đã chế tạo được. Tất cả các phổ hấp thụ đều thể hiện bờ hấp thụ mạnh ở vùng ánh sáng UV ở bước sóng khoảng 380 nm tương ứng với chuyển mức vùng - vùng trong vật liệu ZnO [12, 15].

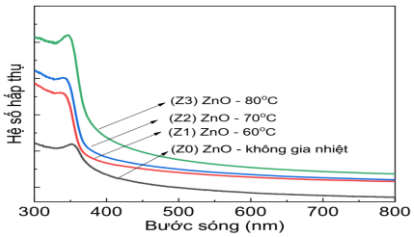
Độ rộng vùng cấm E_g được xác định bởi bờ hấp thụ theo công thức:

$(\alpha hv)^2 = A(hv - Eg)$

Bằng cách ngoại suy phần tuyến tính đồ thị sự phụ thuộc của $(\alpha hv)^2$ vào năng lượng hv cho cắt trục năng lượng ta có thể xác định được độ rộng vùng cấm của ZnO. Độ rộng vùng cấm của các mẫu Z1, Z2 và Z3 lần lượt là ~3,40 eV; 3,38 eV và 3,34 eV (Hình 4). Kết quả này phù hợp với độ rộng vùng cấm chuẩn của ZnO là 3,37 eV tại nhiệt độ phòng 300K. Mẫu được chế tạo ở nhiệt độ 80 ^oC có độ rộng vùng cấm hơi nhỏ hơn so với các mẫu còn lại.

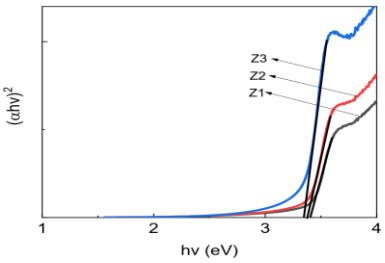
Kích thước hạt của các mẫu ZnO được xác định thông qua phép đo tán xạ. Kết quả cho thấy kích thước trung bình của 3 mẫu đã chế tạo lần lượt là ~ 460± 11, 550 ± 3 và 342 ± 7 nm (Hình 5). Hình 6 là ảnh SEM và phổ EDS của mẫu Z3. Trên phổ EDS ta chỉ quan sát được các đỉnh ứng với nguyên tố Zn và O. Như vậy, phổ

EDS cho thấy mẫu hạt nano ZnO thu được là hoàn toàn tinh khiết. Ảnh SEM cho thấy mẫu nano ZnO Z3 có kích thước hạt nhỏ và khá đồng đều do đó, mẫu này được chúng tôi tiếp tục nghiên cứu tính chất quang xúc tác.

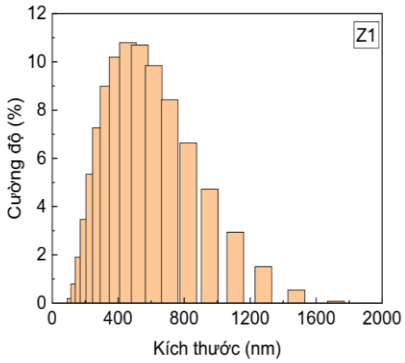


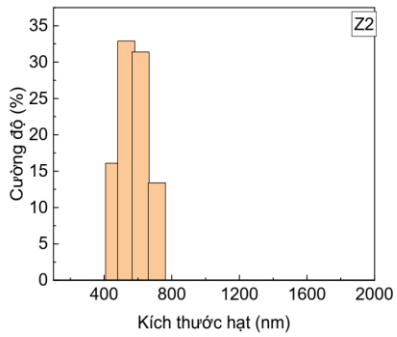
Hình 3. Phổ hấp thụ của mẫu ZnO.

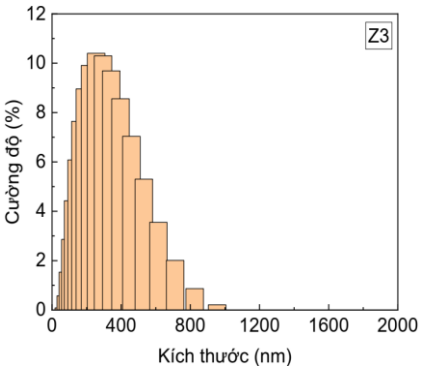
Hoạt tính xúc tác quang của mẫu được đánh giá qua chất thử là MB khi chiếu tia UV và chiếu tia UV kết hợp rung siêu âm. Hình 7 là phổ hấp thụ của MB khi được chiếu tia UV trong thời gian 90 phút. Ta có thể thấy cường độ đỉnh hấp thụ của MB bị suy giảm không đáng kể sau thời gian chiếu UV. Khi dung dịch MB được xử lý với ZnO (Hình 8) hoặc ZnO kết hợp rung siêu âm (Hình 9), cường độ hấp thụ của MB giảm đi rõ rệt sau khi xử lý trong 90 phút.



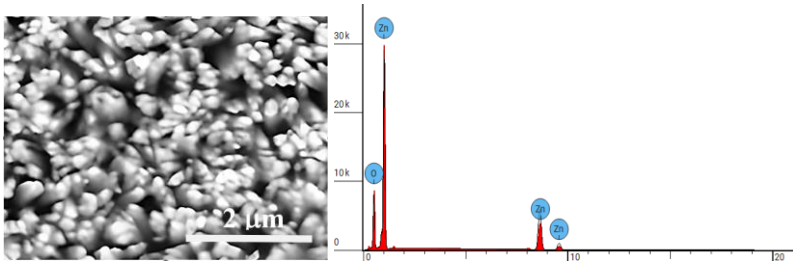
Hình 4. Sự phụ thuộc của $(\alpha hv)^2$ vào hv của các mẫu hạt nano ZnO chế tạo khi có gia nhiệt.





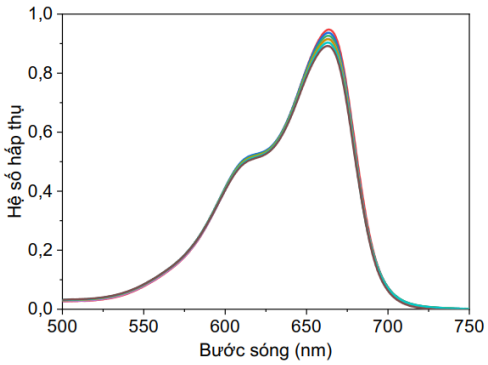


Hình 5. Kích thước hạt của các mẫu ZnO (Z1, Z2, Z3).

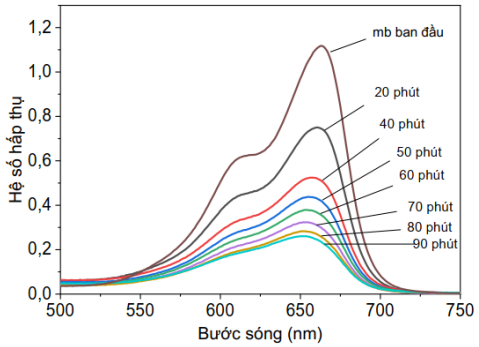


(a) (b)

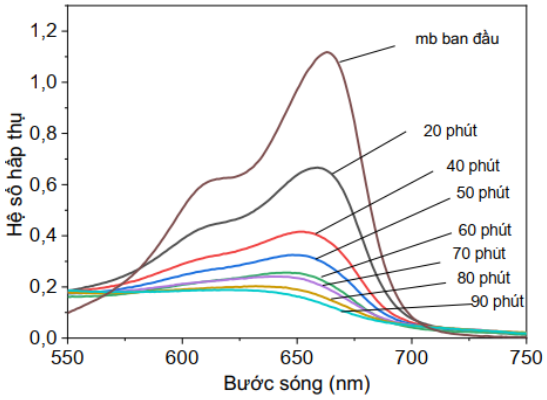
Hình 6. Ảnh SEM (a) và phổ EDS (b) của mẫu ZnO (Z3).



Hình 7. Phổ hấp thụ của dung dịch chứa MB thay đổi
theo thời gian khi được chiếu tia UV sau thời gian 90 phút.



Hình 8. Phổ hấp thụ của MB khi được xử lý bằng các hạt nano ZnO (Mẫu Z3)
khi được chiếu tia UV không rung siêu âm.



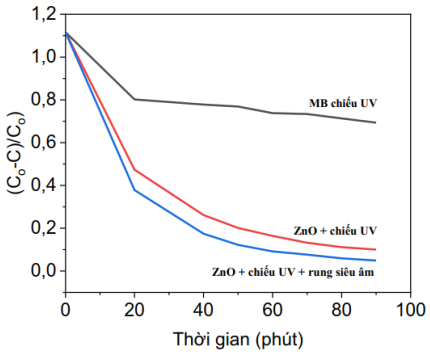
Hình 9. Phổ hấp thụ của MB khi được xử lý bằng các hạt nano ZnO (Mẫu Z3)
khi được chiếu tia UV kết hợp rung siêu âm.

Khi các hạt nano ZnO được sử dụng trong quá trình chiếu tia UV, khả năng quang xúc tác các hạt nano ZnO giúp phân hủy MB tới 91% trong 90 phút (Hình 10). Khi kết hợp siêu âm trong quá trình chiếu UV, hiệu quả phân hủy MB đạt tới 95,6% (Hình 10). Kết quả khảo sát cho thấy việc sử dụng sóng siêu âm trong quá trình xử lý mẫu làm tăng khả năng quang xúc

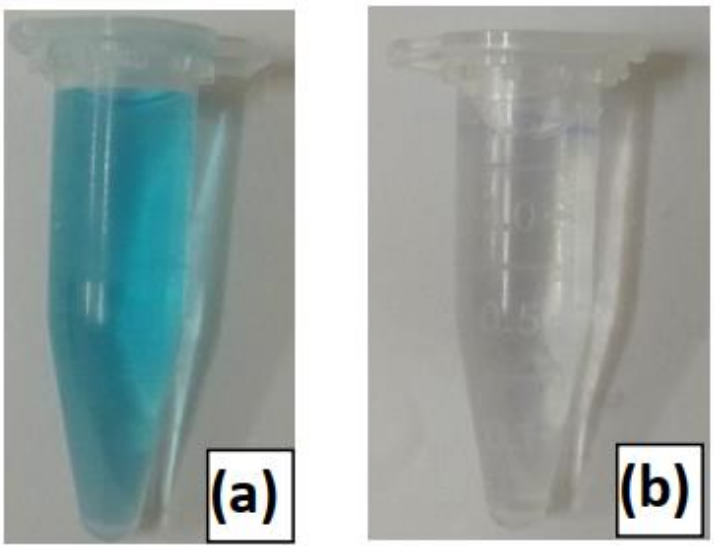
tác của ZnO. Hiệu quả của việc sử dụng ZnO để phân hủy MB có thể được quan sát trực quan như trên Hình 11. Dung dịch MB đã mất màu sau khi được xử lý bởi hạt nano ZnO Z3 sau 90 phút. Các kết quả này cho thấy phương pháp rung siêu âm rất có tiềm năng trong việc tạo ra vật liệu nano ZnO với hoạt tính quang xúc tác tốt khi so sánh với các công bố khác (Bảng 2).

Bảng 2. So sánh khả năng quang xúc tác với một số vật liệu đã công bố

Vật liệu	Phương pháp chế tạo	Chất thử	Hiệu suất phân huỷ	Tài liệu tham khảo
Hạt nano ZnO	Đồng kết tủa	Chất nhuộm eosin blue	95-97%	[16]
Hạt nano ZnO	Khử sinh học	MB	94,07%	[17]
Vật liệu nano composite N-ZnO/C dot	Ủ nhiệt	MB	83,4 %	[18]
Hạt nano ZnO	Rung siêu âm	MB	95,6%	Nghiên cứu này



Hình 10. Sự phân hủy MB bởi hạt nano ZnO (Mẫu Z3).



Hình 11. (a) Dung dịch chứa MB trước xử lý;
(b) Dung dịch chứa MB sau khi được xử lý bằng hạt nano ZnO (Mẫu Z3).

4. Kết luận

Chúng tôi đã chế tạo thành công các hạt nano ZnO bằng phương pháp siêu âm - một phương pháp an toàn, tiết kiệm thời gian và chi phí thấp. Kết quả cho thấy gia nhiệt trong quá trình rung siêu âm giúp tăng cường khả năng kết tinh của các hạt nano ZnO và cho sản phẩm đơn pha. Hạt nano ZnO thu được có cấu trúc lục giác, với kích thước hạt tinh thể khoảng 22 nm và kích thước hạt vào khoảng ~400 nm. Khả năng quang xúc tác của các hạt nano ZnO chế tạo đã được chứng minh bằng hiệu suất khả năng phân hủy MB đến 95,6%. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy rung siêu âm có tác dụng nâng cao hiệu suất phân hủy MB.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.02-2023.100.

Tài liệu tham khảo

[1] R. Zahoor, A. Jalil, S. Z. Ilyas, S. Ahmed, A. Hassan, Optoelectronic and Solar Cell Applications of ZnO Nanostructures, Results in Surfaces and Interfaces, Vol. 2, 2021, pp. 100003(1)-100003(7), https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2021.100003.

[2] A. A. E. Bindary, S. M. E. Marsafy, A. A. E. Maddah, Enhancement of the Photocatalytic Activity of ZnO Nanoparticles by Silver Doping for the Degradation of AY99 Contaminants, J. Mol. Struct. Vol. 1191, 2019, pp. 76-84, https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.04.064.

[3] S. Dev, P. Kumar, A. Rani, A. Agarwal, R. Dhar, Development of Indium Doped ZnO Thin Films for Highly Sensitive Acetylene (C_2H_2) Gas Sensing, Superlattices Microstructures, Vol. 145, 2020, pp. 106638(1)-106638(9), https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106638.

[4] T. H. Tran, N. H. Pham, T. H. Nguyen, T. D. T. Nguyen, C. D. Sai, Q. H. Nguyen, V. T. Nguyen, M. P. Le, V. T. Tran, T. B. Nguyen, T. T. Nguyen, T. N. Duong, T. D. Tran, N. D. Dai, V. T. Pham, A. B. Ngac, Preparation of ZnO/Ag Nanoflowers by Hydrothermal Assisted with Galvanic Effect and its Surface Enhanced Raman Scattering Activity, Chem. Phys. Lett. Vol. 833, 2023, pp 140948(1)-140948(6), https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140948.

[5] F. Dabir, H. Esfahani, F. Bakhtiargonbadi, Z. Khodadadi, Study on Microstructural and Electro-optical Properties of Sol-gel Derived Pure and Al/Cu-doped ZnO Thin Films, J. Solgel Sci. Technol., Vol. 96, 2020, pp. 529-538, https://doi.org/10.1007/s10971-020-05269-0.

[6] T. Sakano, Y. Tanaka, R. Nishimura, N. N. Nedyalkov, P. A. Atanasov, T. Saiki, M. Obara, Surface Enhanced Raman Scattering Properties Using Au-coated ZnO Nanorods Grown by Two-Step, Off-axis Pulsed Laser Deposition, J. Phys. D Appl. Phys., Vol. 41, 2008, pp. 235304 (1)-235304 (8), https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/23/235304.

[7] T. H. Tran, T. N. A. Tran, T. C. Bach, C. D. Sai, N. H. Pham, V. T. Tran, T. B. Nguyen, Q. H. Nguyen, V. T. Pham, Q. K. Doan, V. T. Nguyen, Effect of Annealing on the Properties of Transparent Conducting Ag Doped ZnO Thin Films Prepared by r.f. Magnetron Sputtering Method, Micro and Nanostructures, Vol. 166, 2022, pp. 207219(1)-207219(7), https://doi.org/10.1016/j.micrna.2022.207219.

[8] T. D. Canh, N. V. Tuyen, N. N. Long, Influence of Solvents on the Growth of Zinc Oxide Nanoparticles Fabricated By Microwave Irradiation, VNU Journal of Science: Mathematics - Physics, Vol. 25, 2009, pp. 71-76.

[9] V. Sáez, T. J. Mason, Sonoelectrochemical Synthesis of Nanoparticles, Molecules, Vol. 14, 2009, pp. 4284-4299, https://doi.org/10.3390/molecules14104284.

[10] M. I. D. Mardjan, M. F. Hariadi, I. M. Putri, N. A. Musyarrofah, M. Salimah, N. Priatmoko, B. Purwono, L. Commeiras, Ultrasonic Assisted Synthesis of Isoindolin-1-one Derivatives, RSC Adv., Vol. 12, 2022, pp. 19016-19021, https://doi.org/10.1039/d2ra02720h.

[11] X. L. Yu, Y. H. Fan, X. N. Zheng, J. F. Gao, L. G. Zhuang, Y. L. Yu, J. H. Xi, D. W. Zhang, Synthesis of Imidazole-Based Molecules under Ultrasonic Irradiation Approaches, Molecules, Vol. 28, 2023, pp. 4845(1)-4845(31), https://doi.org/10.3390/molecules28124845.

[12] V. T. Tran, T. H. Tran, M. P. Le, N. H. Pham, V. T. Nguyen, D. B. Do, X. T. Nguyen, B. N. Q. Trinh, T. T. Van Nguyen, V. T. Pham, M. Q. Luu, A. B. Ngac, Highly Efficient Photo-Induced Surface Enhanced Raman Spectroscopy from

ZnO/Au Nanorods, Opt. Mater., Vol. 134, 2022, pp. 113069(1)-113069(5), https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113069.

[13] L. N. Dem'yanets, R. M. Zakalyukin, B. N. Mavrin, Growth and Raman Spectra of Doped ZnO Single Crystals, Inorganic Materials, Vol. 47, 2011, pp. 649-653, https://doi.org/10.1134/s0020168511060070.

[14] N. V. Tuyen, T. T. Ha, N. M. Hong, M. H. Hanh, P. V. Thanh, S. C. Danh, N. T. Binh, P. N. Hai, N. T. Tam, H. K. Hieu, Preparation of ZnO Nanoflowers for Surface Enhance Raman Scattering Applications, VNU Journal of Science: Mathematics - Physics, Vol. 36, 2020, pp. 1-6, https://doi.org/10.25073/2588-1124/vnumap.4369.

[15] V. T. Tran, M. P. Le, N. H. Pham, T. H. Y. Le, V. T. Nguyen, T. H. Pham, T. S. Nguyen, Q. H. Nguyen, V. T. Pham, T. T. Nguyen, C. T. Nguyen, A. B. Ngac, O. M. Sacristán, T. H. Tran, Unraveling the Mechanism of Photo-induced Surface Enhanced Raman Scattering on ZnO/Au Thin Films, Appl. Surf. Sci., Vol. 657, 2024, pp. 159785(1)-159785(9), https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159785.

[16] M. H. Magar, V. A. Adole, R. H. Waghchaure, T. B. Pawar, Efficient Photocatalytic Degradation of Eosin Blue Dye and Antibacterial Study Using Nanostructured Zinc Oxide and Nickel Modified Zinc Oxide, Results Chem., Vol. 4, 2022, pp. 100537(1)-100537(11), https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100537.

[17] S. Venkatesan, S. Suresh, P. Ramu, J. Arumugam, S. Thambidurai, N. Pugazhenthiran, Methylene Blue Dye Degradation Potential of Zinc Oxide Nanoparticles Bioreduced Using Solanum Trilobatum Leaf Extract, Results Chem., Vol. 4, 2022, pp. 100637(1)-100637(12), https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100637.

[18] D. G. Ayu, S. Gea, N. Andriayani, D. J. Telaumbanua, A. F. R. Piliang, M. Harahap, Z. Yen, R. Goei, A. I. Y. Tok, Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Using N-Doped ZnO/Carbon Dot (N-ZnO/CD) Nanocomposites Derived from Organic Soybean, ACS Omega, Vol. 8, 2023, pp. 14965-14984, https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07546.