

Tổng hợp vật liệu nano ZnO pha tạp Pr và ứng dụng trong phân hủy xanh methylene

**Đỗ Quang Thắm^{1, 2*}, Nguyễn Thị Xuyên¹, Nguyễn Tuấn Anh¹,
Phạm Quang Dương¹, Đặng Xuân Hiếu³, Vũ Thị Lê³, Nguyễn Trung Huy^{1, 2}**

¹*Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,*

18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

²*Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,*

18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

³*Trường Đại học Sư phạm Hà Nội, 136 Xuân Thủy,*

phường Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 8/8/2025; ngày chuyển phản biện 11/8/2025; ngày nhận phản biện
23/8/2025; ngày chấp nhận đăng 28/8/2025

Tóm tắt:

Vật liệu nano ZnO (nZnO) pha tạp Pr (nZnOPr) được tổng hợp bằng phương pháp kết tủa, phương pháp phổ biến trong nghiên cứu vật liệu nano. Tính chất của vật liệu được đặc trưng hóa bằng các kỹ thuật ghi phổ nhiễu xạ tia X (XRD), phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR), phổ tử ngoại khả kiến (UV-Vis) và kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM). Bên cạnh đó, hoạt tính quang xúc tác được đánh giá thông qua quá trình phân hủy xanh methylene (MB) trong dung dịch nước dưới ánh sáng mặt trời. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, khi tăng nhiệt độ nung tạo mẫu từ 900 lên 1000 và 1100°C, hiệu suất phân hủy MB của cả mẫu nZnO và nZnOPr đều giảm. Trong đó, mẫu ZnOPr0,5% nung ở 900°C cho hiệu suất quang xúc tác tốt nhất dưới ánh sáng mặt trời, với hiệu suất khử màu MB đạt tới 99,0%.

Từ khóa: nano ZnO, pha tạp, phân hủy, praseodymium oxide, xanh methylene

Chỉ số phân loại: 1.4, 2.4, 2.5

Synthesis and photocatalytic application of Pr-doped ZnO nanomaterials in methylene blue degradation

Do Quang Tham^{1, 2*}, Nguyen Thi Xuyen¹, Nguyen Tuan Anh²,
Pham Quang Duong², Dang Xuan Hieu³, Vu Thi Le³, Nguyen Trung Huy^{1, 2}

¹*Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology,
18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Hanoi, Vietnam*

²*Graduate University of Science and Technology,
Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street,
Nghia Do Ward, Hanoi, Vietnam*

³*Hanoi National University of Education, 136 Xuan Thuy Street,
Cau Giay Ward, Hanoi, Vietnam*

Received 8 August 2025; revised 23 August 2025; accepted 28 September 2025.

Abstract:

In this study, praseodymium oxide-doped nano ZnO nanomaterials (nZnOPr) were synthesised by means of the precipitation method, which is widely applied for preparing nanostructured compounds. Following the synthesis, the structural, optical, and morphological properties of the resulting materials were comprehensively characterized. This was accomplished through a suite of analytical techniques, including X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy, and field emission scanning electron microscopy (FESEM). Furthermore, to evaluate their practical applicability, the photocatalytic activity of the nanomaterials was meticulously evaluated through the process of monitoring the degradation of methylene blue (MB) in an aqueous solution under natural sunlight exposure. The experimental results clearly revealed that increasing sintering temperature from 900 to 1000 and 1100°C led to a reduction in the MB degradation efficiency for both nano ZnO (nZnO) and nZnOPr samples. Notably, among all tested conditions, the ZnOPr0.5% sample sintered at 900°C exhibited the best photocatalytic performance under sunlight, achieving nearly complete decolourisation of MB with an efficiency of 99.0%.

Keywords: degradation, doping, methylene blue, nano ZnO, praseodymium oxide

Classification numbers: 1.4, 2.4, 2.5

1. Đặt vấn đề

Zinc oxide (ZnO) được xem là chất xúc tác đầy tiềm năng trong việc phân hủy các chất màu hữu cơ cũng như khử trùng nước. So với TiO_2 và một số oxit bán dẫn khác, ZnO có khả năng xúc tác quang hóa cao hơn nhờ khả năng hấp thụ bức xạ mặt trời hiệu quả [1-4]. Tuy nhiên, ZnO có năng lượng vùng cấm khá lớn (3,27 eV), tương ứng với vùng ánh sáng cực tím, vốn chỉ chiếm khoảng 5% trong phổ bức xạ ánh sáng mặt trời, nên hiệu quả xúc tác quang trong điều kiện ánh sáng tự nhiên còn hạn chế. Để nâng cao hoạt tính xúc tác quang và mở rộng phạm vi ứng dụng của ZnO, điều cần thiết là thu hẹp được năng lượng vùng cấm của ZnO và hạn chế quá trình tái hợp giữa electron và lỗ trống quang sinh. Một trong những phương pháp hiệu quả là pha tạp (doping) kim loại, phi kim hoặc đồng thời cả hai vào mạng ZnO, giúp cải thiện rõ rệt hiệu suất xúc tác quang của vật liệu này. Trên thế giới cũng như tại Việt Nam, đã có nhiều công trình nghiên cứu về vật liệu ZnO pha tạp nhằm nâng cao hiệu quả quang xúc tác [5-9]. Pha tạp được xem là một trong những phương pháp hiệu quả nhất trong việc cải thiện hoạt tính quang xúc tác của ZnO. Việc pha tạp kim loại có thể làm thay đổi cấu trúc vùng năng lượng của ZnO, đồng thời tạo ra các khuyết tật tinh thể, điển hình là khuyết tật lỗ trống oxy (V_o). Các ion kim loại pha tạp, đặc biệt là những kim loại đa hóa trị, còn có thể đóng vai trò như các “bẫy” electron, kết hợp với các khuyết tật oxy, góp phần thúc đẩy quá trình phân tách hiệu quả giữa electron và lỗ trống quang sinh. Bên cạnh đó, pha tạp kim loại còn giúp mở rộng khả năng hấp thụ ánh sáng của ZnO sang vùng khả kiến, nhờ việc tạo ra các mức năng lượng trung gian trong vùng cấm. Điều này góp phần tăng cường đáng kể hoạt tính quang xúc tác dưới ánh sáng mặt trời. Các nghiên cứu về ZnO đồng pha tạp praseodymium và nghiên cứu khả năng xúc tác quang của nó đã cho thấy khả năng xúc tác phân hủy Rhotamin B của nó dưới ánh sáng mặt trời [10]. Nghiên cứu này trình bày việc tổng hợp vật liệu ZnO pha tạp Pr bằng phương pháp kết tủa. Các đặc trưng tính chất và cấu trúc của vật liệu nano ZnO pha tạp Pr cũng như khả năng quang xúc tác phân hủy xanh methylene (MB) dưới ánh sáng mặt trời cũng được trình bày và thảo luận chi tiết.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên liệu và hóa chất

Nano kẽm oxit ZnO ($n\text{ZnO}$, 99,5%, kích thước hạt trung bình 100 nm; praseodymium (III) nitrate hexahydrate ($\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99,99%) được cung cấp bởi

hãng Hăng Aladdin (Trung Quốc). Diethanolamine (DEA, 99%, di-etanol amin), dạng lỏng được cung cấp bởi công ty TOC Glycol Chemical (Thái Lan). Phenolphthalein ($C_{20}H_{14}O_4$), dung dịch amoniac (NH_3 , 25-28%), xanh methylene ($C_{16}H_{18}ClN_3S$, 99%), được sản xuất bởi công ty hóa chất Xilong (Trung Quốc).

2.2. Chế tạo mẫu nano ZnO pha tạp Pr

Quy trình chế tạo mẫu hạt nZnOPr0,5% (bảng 1) được thực hiện như sau: 5 g nano ZnO được phân tán trong 20 g nước cất và khuấy đều trong 20 phút. Tiếp theo, 0,133g $Pr(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ được thêm vào cùng vài giọt dung dịch phenolphthalein 1% làm chỉ thị. DEA được nhỏ dần đến khi dung dịch chuyển sang màu hồng nhạt, dung dịch được khuấy thêm 1 giờ. Chất rắn thu được thu hồi bằng quy trình ly tâm (6000 vòng/phút, trong 6 phút) và rửa lại 2-3 lần bằng nước cất hoặc cho đến khi dung dịch rửa đạt pH 7, sau đó sấy khô ở $110^\circ C$ trong 24 giờ, nghiền mịn và nung ở 900 , 1000 và $1100^\circ C$. Mẫu sau khi nung tiếp tục được nghiền lại và rây qua sàng $160 \mu m$, cuối cùng được bảo quản trong lọ kín. Mẫu nZnOPr3% cũng được chế tạo tương tự.

Bảng 1. Thành phần các chất dùng trong tổng hợp các nano ZnO pha tạp Pr

STT	Kí hiệu mẫu	ZnO	$Pr(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	DEA	Nước cất
1	nZnO	5	0	0	20,0
2	nZnOPr0,5%	5,00	0,133	0,096	20,0
3	nZnOPr3%	4,88	0,798	0,579	20,0

2.3. Đặc trưng tính chất

FTIR: Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) của mẫu bột nZnO và nZnOPr được ghi trên máy quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier Nicolet iS10, hãng Thermo Scientific ở nhiệt độ phòng, trong khoảng $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ với độ phân giải 4 cm^{-1} và 32 lần quét, sử dụng phương pháp ép viên KBr.

XRD: Phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) của các mẫu bột nZnO và nZnOPr được phân tích bằng máy đo nhiễu xạ D8-Advance với bức xạ $Cu K_\alpha$ hoạt động ở $40 \text{ kV}/25 \text{ mA}$ với bước sóng $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$.

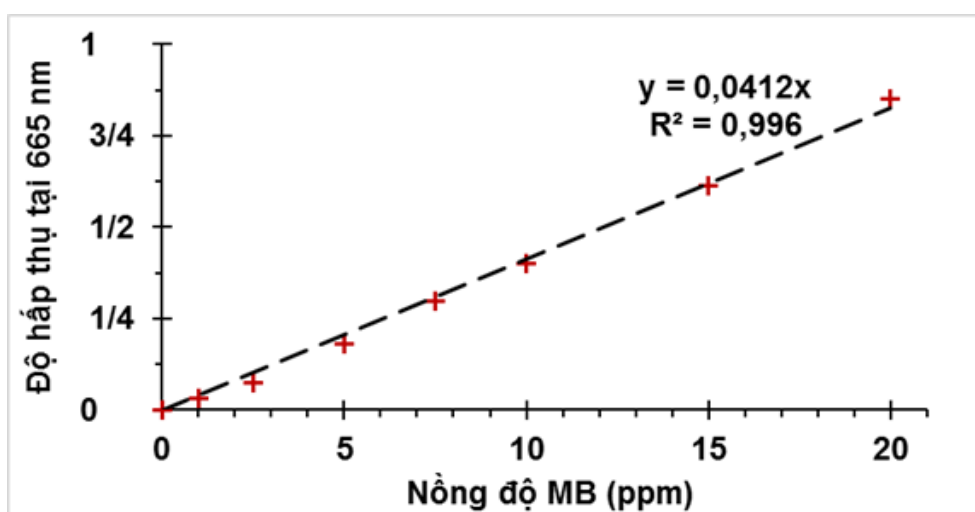
SEM: Hình thái cấu trúc của mẫu nZnO và nZnOPr được quan sát bằng cách sử dụng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường JSM-IT800 hãng Jeol, Nhật Bản.

UV-VIS: Máy đo quang phổ UV-Vis S80 hãng Biochorm (Cộng hòa Pháp) được sử dụng để phân tích phổ hấp thụ UV-Vis của bột nZnO ban đầu và nZnOPr sau khi

nung với khoảng bước sóng từ 400-800 nm, dung môi so sánh là nước, hàm lượng chất rắn được sử dụng là 0,006 mg/ml.

2.4. Đánh giá hoạt tính quang xúc tác của vật liệu dưới ánh sáng mặt trời

Các dung dịch MB chuẩn với các nồng độ tương ứng (C_{MB}) được ghi phổ hấp thụ UV-Vis và xác định độ hấp thụ (A) đặc trưng của xanh methylene ở bước sóng khoảng 665 nm. Độ hấp thụ A được xác định bằng khoảng cách từ đỉnh đặc trưng 665 nm của phổ UV-Vis đến đường cơ sở (base-line) tạo bởi các chân đáy thấp gần nhất với đỉnh đặc trưng này. Kết quả xác định đường chuẩn độ hấp thụ A theo nồng độ C của MB được xác định bởi phương trình $A=0,0412 \times C_{MB}$, với hệ số tương quan $R^2=0,996$ (hình 1).



Hình 1. Đường chuẩn độ hấp thụ A theo nồng độ xanh methylene (MB).

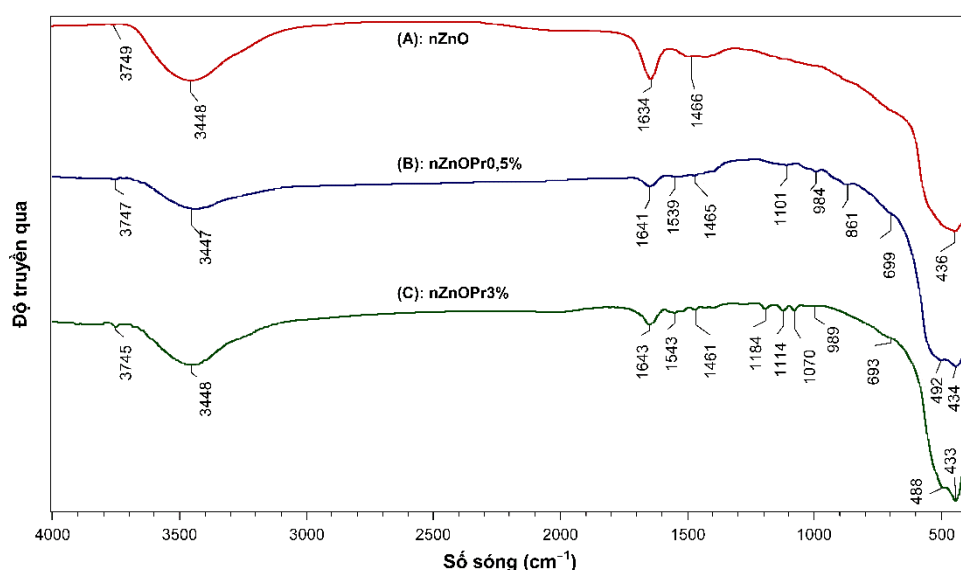
Các ống nghiệm chứa các chất rắn $nZnO$ và $nZnOPr0,5\%$ (0,006 g/ml) được phơi dưới ánh nắng mặt trời (trong khoảng từ 10A.M-15P.M) vào các ngày nắng cho đến khi mất màu. Thời gian lấy mẫu là 0, 3, 5 giờ (h). Mẫu dung dịch được đo quang phổ UV-Vis và xác định cường độ hấp thụ ở bước sóng 665 nm. Hiệu suất (H) phân hủy MB tính theo công thức: $H = (C_o - C_t)/C_o$, trong đó, C_o là nồng độ MB ban đầu, C_t : nồng độ MB sau khi phơi nắng và lấy mẫu dung dịch ở thời điểm t (h). H cũng có kết quả tương tự khi tính thông qua công thức $H = (A_o - A_t)/A_o$, trong đó A_o là độ cao peak đặc trưng ở 665 nm của phổ UV-Vis của mẫu ở thời điểm ban đầu, A_t là độ cao peak đặc trưng của mẫu dung dịch sau khi đã phơi nắng và lấy mẫu dung dịch ở thời điểm t (h).

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Phổ hồng ngoại của mẫu $nZnO$ và $nZnOPr$

Hình 2 là phổ hồng ngoại (FTIR) của mẫu $nZnO$ và $nZnOPr$ với các hàm lượng Pr khác nhau. Hình 2A cho thấy dao động hóa trị (ν) của Zn-O trong mạng tinh thể xuất

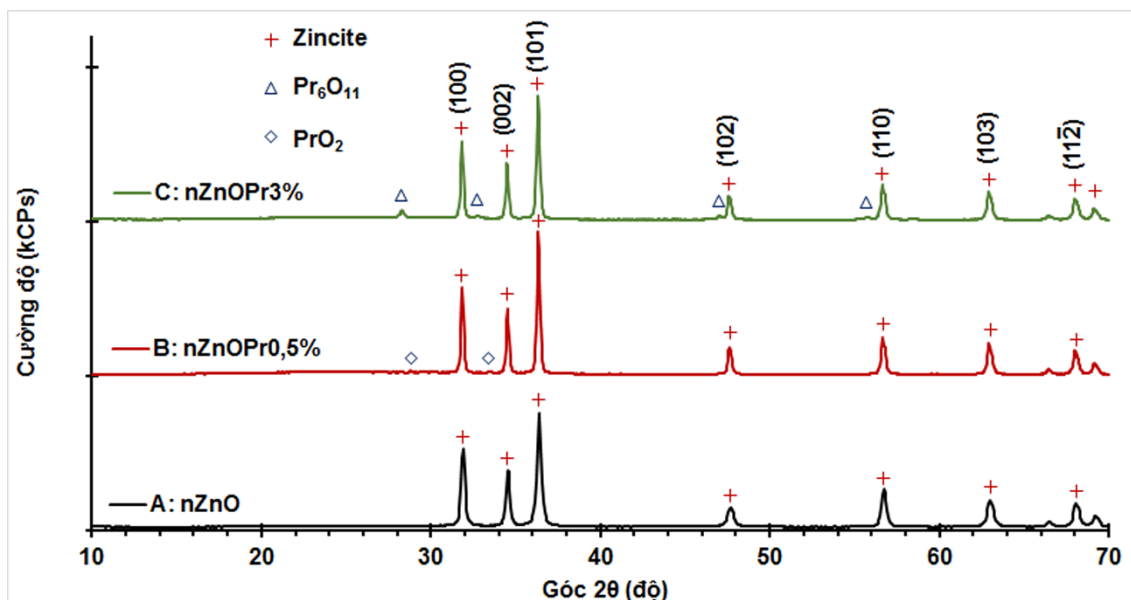
hiện ở 436 cm^{-1} [11]. Các peak hấp thụ ở 3448 cm^{-1} và 1634 cm^{-1} là đặc trưng của $\nu(\text{OH})$ bề mặt [12]. Khi pha tạp với Pr, phổ FTIR của các mẫu nZnOPr0,5% (hình 2B) và nZnOPr3% (hình 2C) xuất hiện thêm các peak hấp thụ mới, lần lượt ở 1101 và 984 cm^{-1} (mẫu ZnOPr0,5%) và ở các vị trí 1070 , 1113 cm^{-1} và 1187 cm^{-1} (với mẫu nZnOPr3%), có thể gán cho các dao động của $\nu(\text{Pr-O})$. Điều này là do các hạt Pr_6O_{11} đã hình thành trên bề mặt các hạt nZnO ban đầu. Cơ chế hình thành oxit này là sự tạo thành $\text{Pr}(\text{OH})_3$ ở giai đoạn đầu, sau đó chuyển hóa thành Pr_6O_{11} trong quá trình nung ở nhiệt độ cao.



Hình 2. Phổ FT-IR của mẫu (A) nZnO, (B) nZnOPr0,5% và (C) nZnOPr3%.

3.2. Phổ nhiễu xạ tia X của mẫu nZnO và nZnOPr ở các nồng độ khác nhau

Hình 3 là các phổ nhiễu xạ tia X (XRD) của các mẫu nZnO, nZnOPr0,5% và nZnOPr3%. Hình 3A cho thấy các peak nhiễu xạ đặc trưng của ZnO (phù hợp với thẻ chuẩn JCPDS 01-082-9744 của ZnO dạng wurtzite, hay còn được gọi là Zincite) tương ứng với các mặt tinh thể (100) , (002) , (101) , (102) , (110) , (103) và $(11\bar{2})$. Khi hàm lượng Pr tăng từ 0,5% lên 3%, các phổ XRD trong hình 3A và 3B cho thấy sự xuất hiện của một số đỉnh nhiễu xạ mới, mặc dù không thật sự rõ nét. Đối với mẫu nZnOPr0,5%, có hai đỉnh mới tại các góc 2θ là $28,65^\circ$ và $33,20^\circ$ (phù hợp với thẻ JCPDS 01-075-6705 của PrO_2). Hình 3C thể hiện rõ hơn với bốn đỉnh mới tại các vị trí $28,25^\circ$, $32,74^\circ$, $46,99^\circ$ và $55,71^\circ$ (phù hợp với thẻ chuẩn JCPDS 00-042-1121 của Pr_6O_{11}) [1].

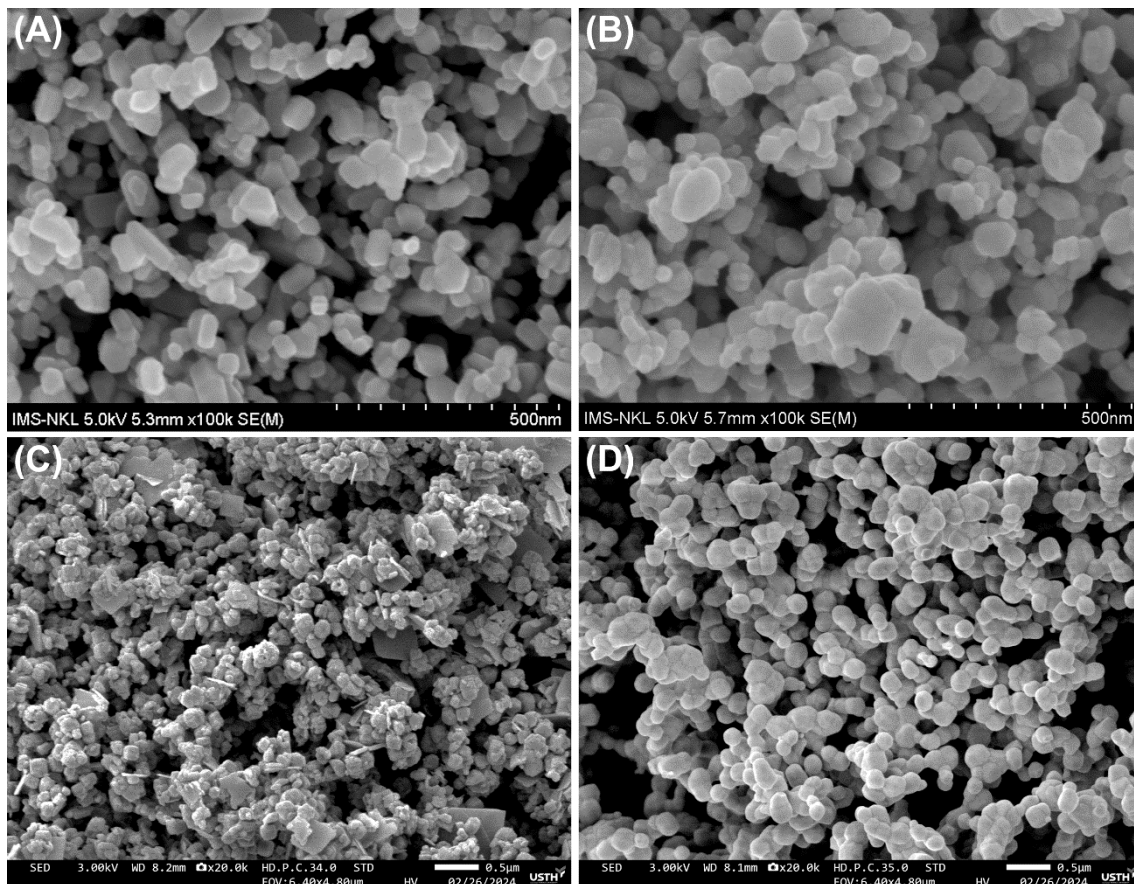


Hình 3. Phổ XRD của mẫu (A) nZnO, (B) nZnOPr0,5% và (C) nZnOPr3%.

3.3. Hình thái và kích thước của mẫu nZnO và nZnOPr

Hình 4 là ảnh FESEM của mẫu nZnO ban đầu (nung 900°C), mẫu nZnOPr0,5% (nung 900°C) và mẫu nZnOPr3% chưa nung và sau khi nung ở 900°C. Hình 4A cho thấy hình thái bề mặt của mẫu nZnO, trong đó các hạt có hình dạng gần với lục giác. Hình dạng này phù hợp với của cấu trúc wurtzite của ZnO như đã được xác nhận bởi kết quả XRD (hình 2). Dưới tác dụng của quá trình sấy và nung, các hạt nano ZnO sơ cấp có xu hướng kết dính thành từng cụm với số lượng 2-10 hạt sơ cấp. Phần lớn hạt sơ cấp có kích thước nhỏ hơn 100 nm. Hình 4B là ảnh FESEM của các hạt nano nZnOPr0,5%, trong đó cho thấy phản ứng kết tủa dẫn đến sự tạo thành $\text{Pr}(\text{OH})_3$ từ $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ đã xúc tiến quá trình liên kết các hạt nano ZnO. Mặc dù vậy, phần lớn các hạt sơ cấp vẫn giữ được đều có kích thước nhỏ hơn 100 nm. Hình dạng đa giác của hạt không còn rõ ràng như ở mẫu ban đầu, chứng tỏ quá trình tổng hợp hạt nZnOPr có thể đã làm biến đổi bề mặt các hạt nano ZnO, khiến chúng trở nên trơn hơn và ít sắc nét góc cạnh hơn. Hình 4C thể hiện hình thái bề mặt của mẫu nZnOPr3% chưa nung, trong đó ngoài các hạt nano ZnO còn quan sát được sự xuất hiện của một cấu trúc hạt khác, phân bố xen kẽ và có hình thái không đồng nhất. Cấu trúc này có thể gắn với sự tạo thành của $\text{Pr}(\text{OH})_3$ từ tiền chất $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ trong quá trình kết tủa, góp phần làm biến đổi đặc trưng bề mặt so với mẫu nZnO ban đầu. Các hạt nano ZnO phân bố khá rời rạc, bề mặt gồ ghề và tồn tại nhiều khoảng trống giữa các cụm hạt, chúng có xu hướng kết tụ nhưng chưa hình thành biên hạt rõ ràng. Trong khi đó, hình 4D là ảnh FESEM của mẫu nZnOPr3% sau khi nung ở 900°C. Sau khi nung, pha Pr oxide gần như không còn quan sát thấy ở

dạng hạt riêng rẽ. Quan sát kỹ hơn cho thấy các cấu trúc có thể gắn với Pr oxide đã phân bố ở vùng biên hạt ZnO, gợi ý rằng Pr có thể tồn tại ở trạng thái pha phụ rất mịn hoặc đã tương tác trực tiếp với ranh giới hạt ZnO. Các hạt đã phát triển lớn hơn, biên hạt trở nên rõ nét và hiện tượng kết khối thể hiện rõ rệt, dẫn đến cấu trúc đặc hơn. Quá trình nung cũng thúc đẩy sự kết tinh, khiến bề mặt hạt trở nên đồng đều và giảm đáng kể độ xốp so với mẫu chưa nung.



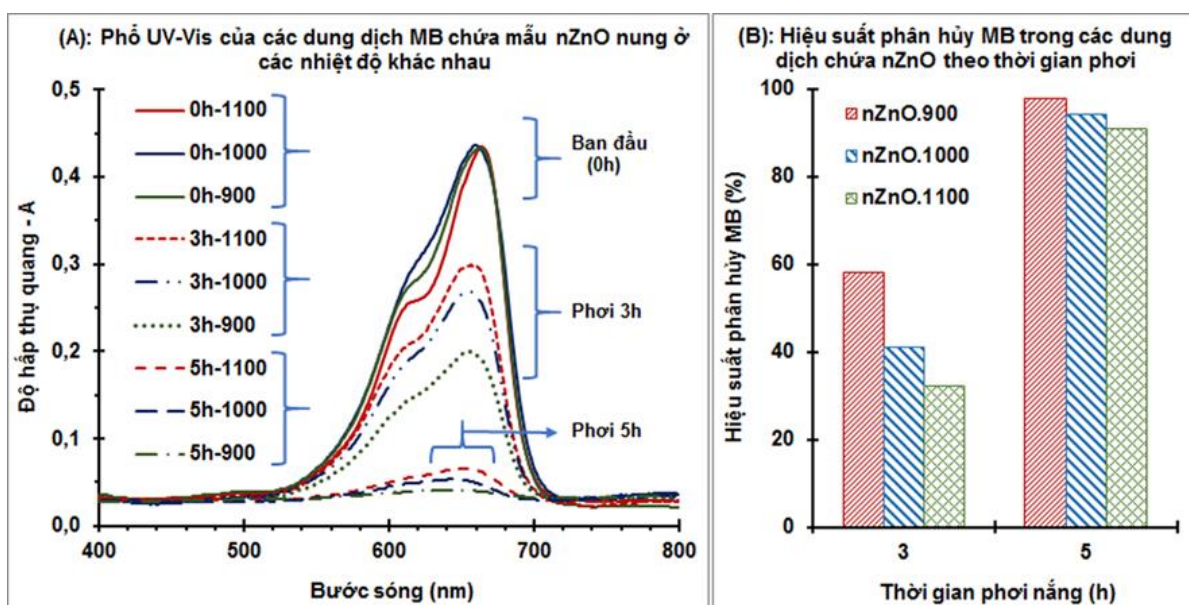
Hình 4. Ảnh FESEM của mẫu (A) nZnO, (B) nZnOPr0,5%, (C) nZnOPr3% (chưa nung) và (D) nZnOPr3% (đã nung ở 900°C).

3.4. Khả năng phân hủy MB của các mẫu nZnO và nZnOPr

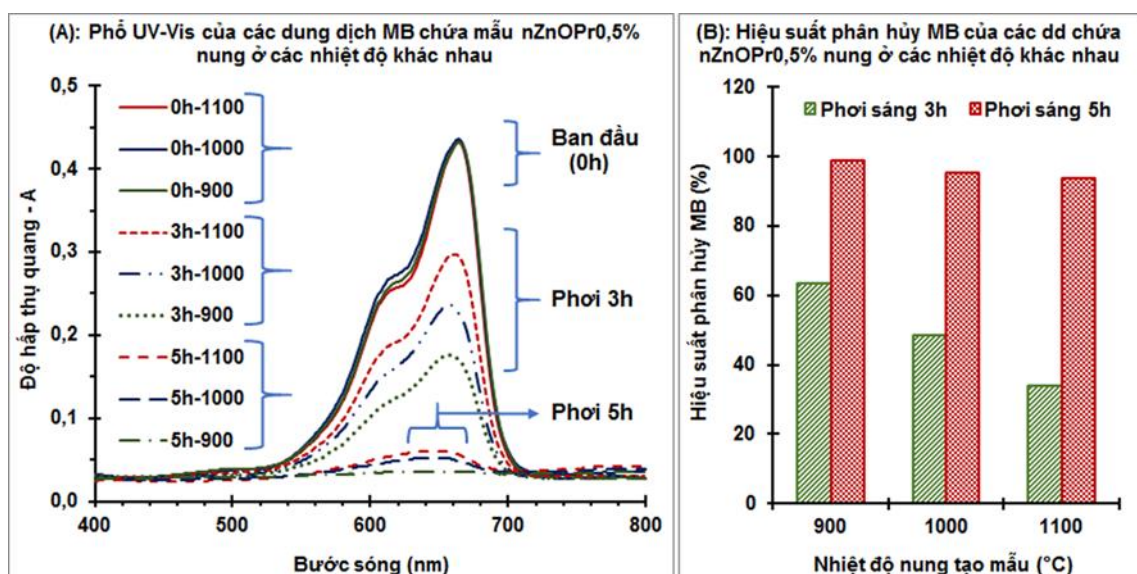
Hình 5 trình bày phổ hấp thụ UV-Vis của dung dịch MB sử dụng mẫu nZnO nung ở các nhiệt độ khác nhau (900-1100°C) làm xúc tác phân hủy, trong khi hình 6 thể hiện phổ hấp thụ tương ứng khi sử dụng mẫu nZnOPr0,5% làm xúc tác quang. Nhìn chung, các mẫu nZnO và nZnOPr đều cho hiệu quả xúc tác quang tốt, độ hấp thụ của đỉnh tại 665 nm đều gần như bằng 0 sau 3 giờ (h) phơi nắng. Tuy vậy, khả năng xúc tác phân hủy của cả hai mẫu nZnO và nZnOPr đều có xu hướng giảm, khi tăng nhiệt độ nung. Sau 3 giờ phơi nắng, hiệu suất phân hủy MB của mẫu nZnO nung ở 900, 1000 và 1100°C lần lượt là 58,2; 41,2 và 32,4%. Khi sử dụng mẫu nZnOPr nung ở 900, 1000 và 1100°C,

hiệu suất phân hủy MB đạt lần lượt là 63,4; 48,5 và 33,8%. Như vậy, sau 3 giờ phơi nắng mẫu dung dịch chứa nZnOPr0,5% nung ở 900°C có độ hấp thụ A giảm rõ hơn so với mẫu nZnO.

Sau 5 giờ phơi nắng, hiệu suất phân hủy MB của mẫu nZnO nung ở 900, 1000 và 1100°C lần lượt là 98,0; 94,4 và 91,0%. Khi sử dụng mẫu nZnOPr0,5% nung ở 900, 1000 và 1100°C, hiệu suất phân hủy MB đạt lần lượt là 99,0; 95,3 và 93,6%. Có thể thấy mẫu nZnOPr0,5% nung ở 900°C có độ hấp thụ thấp nhất sau 5h phơi nắng, MB gần như mất màu hoàn toàn trong ống nghiệm, tương ứng với hiệu suất phân hủy tính được là 99,0%. Hiệu suất quang xúc tác cao của mẫu nZnOPr0,5% nung ở 900°C có thể được lý giải bởi việc vật liệu giữ lại một mức độ cao các khuyết tật mạng tinh thể, đặc biệt là các lỗ trống oxy, khi nung ở nhiệt độ tương đối thấp [12]. Những khuyết tật này đóng vai trò quan trọng trong việc kéo dài thời gian sống của các cặp electron-lỗ trống, từ đó nâng cao hiệu quả quang xúc tác. Kết quả này cũng gợi ý rằng việc tiếp tục giảm nhiệt độ nung và/hoặc tối ưu hóa phương pháp tổng hợp có thể là hướng đi tiềm năng để tiếp tục cải thiện hiệu suất xúc tác quang của vật liệu nZnO pha tạp Pr, ví dụ như đồng thời hình thành cấu trúc nano của nZnO và Pr_6O_{11} .



Hình 5. (A) Phổ UV-VIS của dung dịch MB chứa các mẫu nZnO nung ở các nhiệt độ khác nhau, trước và sau khi phơi nắng, (B) Hiệu suất phân hủy MB của các dung dịch chứa mẫu nZnO theo thời gian phơi nắng.



Hình 6. (A) Phổ UV-VIS của dung dịch MB chứa các mẫu nZnOPr0,5% nung ở các nhiệt độ khác nhau, trước và sau khi phơi nắng, (B) Hiệu suất phân hủy MB của các dung dịch chứa mẫu nZnOPr0,5% nung ở các nhiệt độ khác nhau.

4. Kết luận

Mẫu nZnO pha tạp Pr (nZnOPr) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp kết tủa. Phổ FTIR cho thấy sự xuất hiện các peak đặc trưng của liên kết Pr-O. Phổ XRD cho thấy nZnOPr có cấu trúc chủ yếu là hexagonal wurtzite của ZnO, đồng thời xuất hiện Pr_6O_{11} với hàm lượng nhỏ. Ảnh FESEM cho thấy vật liệu nZnOPr thu được ở dạng hạt với kích thước trung bình dưới 100 nm. Cả hai vật liệu nZnO và nZnOPr đều thể hiện khả năng xúc tác quang trong phân hủy MB, trong đó, mẫu nZnOPr0,5% nung ở 900°C cho hiệu quả phân hủy MB ngoài trời cao hơn so với các mẫu nung ở 1000°C và 1100°C. Sau 5 giờ phơi sáng, vật liệu nZnOPr0,5% gần như làm mất màu hoàn toàn MB, với hiệu suất đạt tới 99,0%.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam (MOST) cho đề tài với mã số ĐTĐLCN.22/23.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.T. Dung (2006), *Analytical Chemistry, Part III: Chemical Quantitative Methods*, Vietnam Education Publishing House, 318pp (in Vietnamese).
- [2] V.D. Do (2001), *Physical Analytical Methods in Chemistry*, Vietnam Education Publishing House, 217pp (in Vietnamese).

- [3] T.T. Hieu (2003), *Spectrophotometric Analysis by UV-Vis Absorption*, VNU Publishing House, 226pp (in Vietnamese).
- [4] N.T. Huong (2012), *Preparation and Optical Properties of ZnO Nanomaterials*, Master's Thesis, Vietnam National University (in Vietnamese).
- [5] F. Moosavi, G. Neri (2023), “Effect of Pb doping on the structural, optical and electrical properties of sol-gel ZnO nanoparticles”, *Discover Materials*, **3(1)**, DOI: 10.1007/s43939-023-00066-2.
- [6] R. Ullah, J. Dutta (2008), “Photocatalytic degradation of organic dyes with manganese-doped ZnO nanoparticles”, *Journal of Hazardous Materials*, **156(1)**, pp.194-200, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.12.033.
- [7] N.T.T. Loan, N.Q. Hai (2014), “Study the catalytic decomposition of phenol red ZnO nanomaterials doped Ce and Mn”, *Journal of Analytical Sciences*, **19(4)**, pp.39-39 (in Vietnamese).
- [8] P.T.L. Huong, L.T. Thao, T.T.M. Man, et al. (2023), “Synthesis of Cr^{3+} doped ZnO nano materials for visible light photocatalytic applications”, *Journal of Science and Transport Technology*, **3(4)**, pp.1-7, DOI: 10.58845/jstt.utt.2023.vn.3.4.1-7 (in Vietnamese).
- [9] D.T.B. Hop, N.V. Cuong, H.Q. Thuan, et al. (2023), “Effect of the Ce^{3+} concentration on the crystallite structure and optical properties of ZnO nanomaterials synthesised by sol-gel method”, *Vietnam Journal of Science and Technology-MOST*, **65(11)**, pp.63-68, DOI: 10.31276/VJST.65(11) (in Vietnamese).
- [10] J.-L. Chen, N. Devi, N. Li, et al. (2018), “Synthesis of Pr-doped ZnO nanoparticles: Their structural, optical, and photocatalytic properties”, *Chinese Physics B*, pp.27, 086102, DOI:10.1088/1674-1056/27/8/086102.
- [11] Z.L. Wang (2004), “Zinc oxide nanostructures: Growth, properties and applications”, *Journal of Physics: Condensed Matter*, **16(25)**, R829-R858, DOI: 10.1088/0953-8984/16/25/R01.
- [12] A.B. Djurišić, Y.H. Leung (2006), “Optical properties of ZnO nanostructures” *Small*, **2(8-9)**, pp.944-961, DOI: 10.1002/smll.200600134.