

# CHẾ TẠO VẬT LIỆU TỔ HỢP Ag/ZnO/G-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT QUANG XÚC TÁC

Trần Thị Ngọc Anh<sup>1</sup>, Phạm Văn Thành<sup>1</sup>, Vũ Văn Phú<sup>2</sup>, Trần Thị Quỳnh Hoa<sup>3</sup>,  
Lê Thị Huyền Trang<sup>4</sup>, Đỗ Văn Đăng<sup>4</sup>, Hoàng Mạnh Hà<sup>5\*</sup>

<sup>1,4</sup>Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – Đại học Quốc gia Hà Nội,

<sup>2</sup>Đại học quốc gia Jeonbuk, Hàn Quốc

<sup>3</sup>Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, <sup>5</sup> Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

**Tóm tắt:** Vật liệu tổ hợp Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> được chế tạo thành công bằng phương pháp thủy nhiệt. Cấu trúc vật liệu được phân tích bằng phổ nhiễu xạ tia X (XRD), ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) cho thấy các tinh thể ZnO kết tinh tốt, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có dạng tấm đồng đều từ 100 đến 200 nm. Thành phần các nguyên tố được khảo sát bằng phổ tán sắc năng lượng tia X (EDS). Kết quả đo phổ hấp thụ (UV-Vis) cho thấy vật liệu chế tạo được có độ bền và ổn định cao, sau 4 chu kì quang xúc tác hiệu suất quang xúc tác lên tới 97%.

**Từ khóa:** Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, thủy nhiệt, quang xúc tác, phổ hấp thụ.

Nhận bài ngày 2.7.2023; gửi phản biện, chỉnh sửa và duyệt đăng ngày 24.7.2023

Liên hệ tác giả: Hoàng Mạnh Hà; Email: hahm@hau.edu.vn

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ô nhiễm môi trường nói chung và ô nhiễm nguồn nước nói riêng trở thành một trong những mối đe dọa đặc biệt nghiêm trọng đối với con người và sinh vật xung quanh. Với sự gia tăng dân số thế giới cũng như quá trình công nghiệp hóa đã làm cho ô nhiễm nguồn nước ngày càng nghiêm trọng. Thuốc nhuộm hữu cơ hiện nay đang là một nguồn gây ô nhiễm nguy hiểm nếu không được xử lý trước khi thải ra môi trường. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng thuốc nhuộm hữu cơ ở nồng độ rất thấp có thể gây nôn mửa, buồn nôn, nếu sử dụng trong thời gian dài có thể gây ung thư [1, 2].

Một số biện pháp nhằm xử lý thuốc nhuộm đã được sử dụng như phương pháp hấp phụ và siêu lọc. Tuy nhiên, hiệu quả của phương pháp này còn thấp và thời gian tương đối dài. Gần đây, các nhà khoa học cho rằng vật liệu oxit bán dẫn trở thành ứng viên tiềm năng cho quá trình phân hủy thuốc nhuộm hữu cơ vì tính hiệu quả, đơn giản, và ổn định. Một số loại vật liệu xúc tác điển hình cho quá trình phân hủy này được kể đến như ZnO, TiO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>... Tuy nhiên, khả năng ứng dụng quang xúc tác của ZnO và TiO<sub>2</sub> còn nhiều hạn chế do độ rộng vùng cấm lớn.

Vật liệu g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có độ rộng vùng cấm thích hợp đầy hứa hẹn cho vùng ánh sáng khả kiến nhưng tốc độ tái hợp điện tử - lỗ trống lại quá lớn [3, 4].

Để giảm tốc độ tái tổ hợp của các cặp điện tử - lỗ trống, một số giải pháp đã được các nhà khoa học chỉ ra như pha tạp kim loại chuyển tiếp [5-8], phủ hạt nano kim loại quý Ag, Au, Pt lên bề mặt g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [9-12], hoặc tạo ra các tiếp xúc dị thể [13-15]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng cấu trúc dị thể Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ứng dụng làm chất xúc tác quang hóa cho quá trình phân hủy Methylene blue (MB).

## 2. THỰC NGHIỆM

Trong nghiên cứu này tất cả các hóa chất ban đầu là hóa chất phân tích, có độ sạch cao bao gồm: Bạc nitrat (AgNO<sub>3</sub>, ≥ 99%), Melamine (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>), Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), Kẽm axetat dihydrat (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub>Zn.2H<sub>2</sub>O, ≥ 98%), Hexametylene tetramine (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub>). Quy trình chế tạo vật liệu được mô tả như sau:

Quy trình chế tạo g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> từ melamine trình bày chi tiết trong báo cáo của Wang và cộng sự [16] được mô tả tóm tắt như sau: bột melamine được nung nóng ở nhiệt độ 550 °C trong thời gian 4h với tốc độ gia nhiệt từ nhiệt độ phòng là 5 °C/phút. Sau khi để nguội tự nhiên mẫu thu được có màu vàng đặc trưng của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Vật liệu tổ hợp Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt theo quy trình sau: một lượng xác định g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> được phân tán thu được trong 60 ml cồn 100% bằng bề siêu âm trong thời gian 12h. Sau đó 20 ml hỗn hợp dung dịch chứa chuẩn bị dung dịch gồm AgNO<sub>3</sub> và Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O được thêm vào dung dịch chứa g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> và tiếp tục khuấy đều trong thời gian 60 phút với tốc độ khuấy là 300 vòng/phút. Cuối cùng, toàn bộ dung dịch được cho vào thủy nhiệt ở nhiệt độ 160 °C trong thời gian 24 giờ [17].

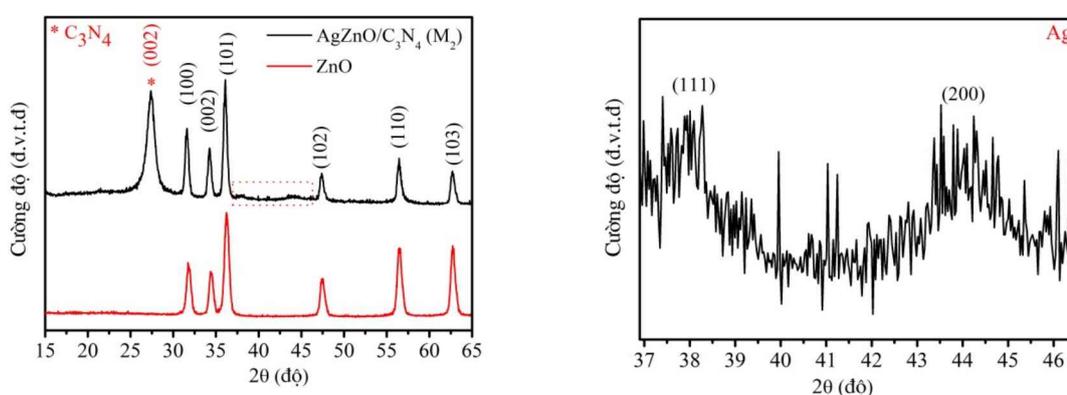
Quá trình đánh giá hiệu suất quang xúc tác của vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> như sau: 30 mg Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hòa với 30 ml dung dịch của MB (10 mgL<sup>-1</sup>). Sau đó khuấy đều hỗn hợp trong bóng tối 30 phút được dung dịch A. Lấy 2 ml dung dịch A vào ống eppendorf sau đó tiếp tục khuấy và có chiếu ánh đèn UV công suất 150W (Xenon LAX 1000, bước sóng 380 nm -780 nm) với khoảng cách từ nguồn đến dung dịch A là 15 cm trong bóng tối nhằm kích thích phản ứng quang xúc tác. Cứ sau mỗi 10 phút lại lấy ra 2 ml hỗn hợp dung dịch để đánh giá hiệu suất quang xúc tác của vật liệu tổ hợp Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> trên cơ sở phép đo phổ hấp thụ UV-Vis. Phổ nhiễu xạ tia X được thực hiện trên hệ nhiễu xạ kế tia X - Empyryan (PANalytical), ảnh SEM được chụp bởi kính hiển vi điện tử quét phân giải cao NOVA NanoSEM 450 (FEI) tích hợp phân tích EDS (AMETEK), phổ hấp thụ UV-Vis được ghi nhận trên hệ đo mẫu lỏng Shimadzu 2450, mẫu rắn thực hiện trên hệ đo Carry 5000.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Phổ nhiễu xạ tia x

Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của mẫu hạt nano ZnO và Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> đã được chỉ ra trên Hình 3.1. Kết quả phân tích cho thấy tinh thể ZnO kết tinh tốt, các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của cấu trúc lục giác wurtzite của ZnO tại góc 2θ lần lượt là 31.7°, 34.4°, 36.3°, 47.5°, 56.6° và 62.9° tương ứng với các mặt mạng (100), (002), (101), (102), (110), (103) xuất hiện đồng thời trên mẫu ZnO và mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Trên giản đồ nhiễu xạ không xuất hiện các đỉnh nhiễu

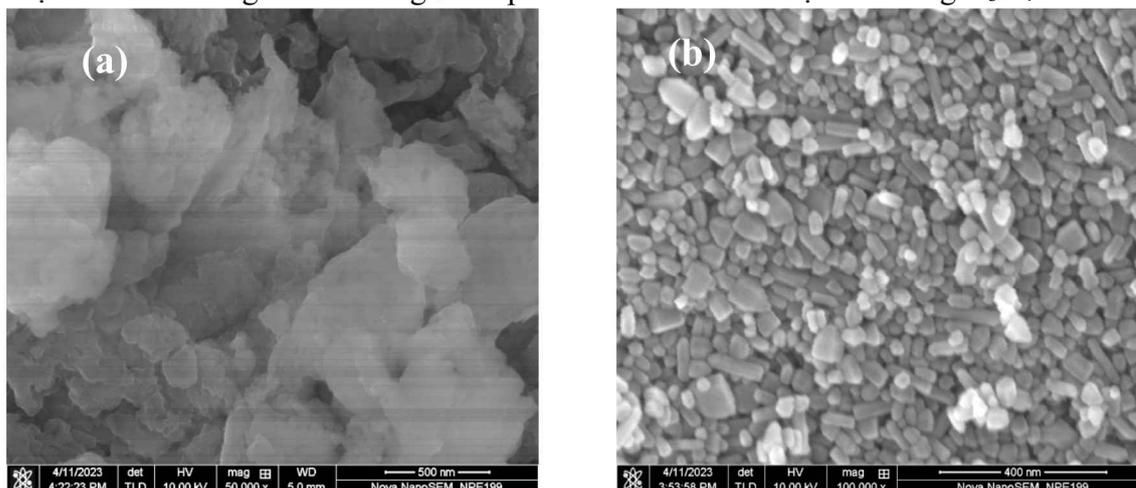
xạ của pha lạ. Từ giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu ZnO xác định được hằng số mạng tinh thể của ZnO là  $a = b = 0.325$  nm,  $c = 0.52$  nm, phù hợp với các kết quả đã được công bố (JSPS 36-1451). Kích thước tinh thể ZnO được xác định từ công thức Debye – Scherre lần lượt là 10 nm và 11 nm tương ứng với mẫu ZnO và Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Bên cạnh đó, trên giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> còn xuất hiện đỉnh nhiễu xạ đặc trưng tại góc 27.6° tương ứng với mặt (002) trong cấu trúc lục giác của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (JCPDS 87-1526) và các đỉnh nhiễu xạ có cường độ yếu tại vị trí 38.1° và 44.2° của bạc kim loại. Kết quả này có thể được giải thích là do hàm lượng bạc thấp trong cấu trúc dị thể Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (khoảng 2% khối lượng).

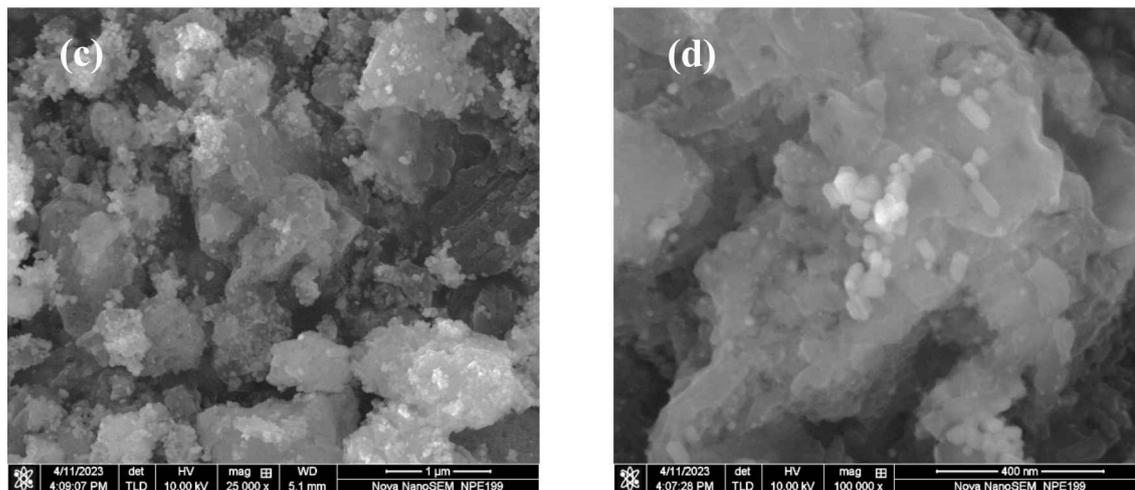


Hình 3.1: Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu hạt nano ZnO và Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

### 3.2. Kết quả đo SEM

Để quan sát hình thái bề mặt của các mẫu chế tạo được chúng tôi tiến hành phân tích ảnh SEM của mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, ZnO và mẫu g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Ảnh SEM của các mẫu chế tạo được chỉ ra trên Hình 3.2. Kết quả cho thấy vật liệu g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có dạng tấm đặc trưng tương đối đồng đều, đường kính trong khoảng từ 100 nm đến 200 nm, chiều dày khoảng 50 nm (Hình 3.2a). Hạt nano ZnO có dạng cầu đường kính khoảng 20 nm và dạng thanh có chiều dài cỡ 40 nm và chiều rộng khoảng 15 nm. Đối với mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có thể quan sát thấy đồng thời các tấm g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> và các thanh nano (hạt nano) ZnO đặc trưng. Trên ảnh SEM (Hình 3.2d) còn xuất hiện các hạt cầu nhỏ đường kính khoảng 5 nm phân tán đều trên bề mặt các tấm g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

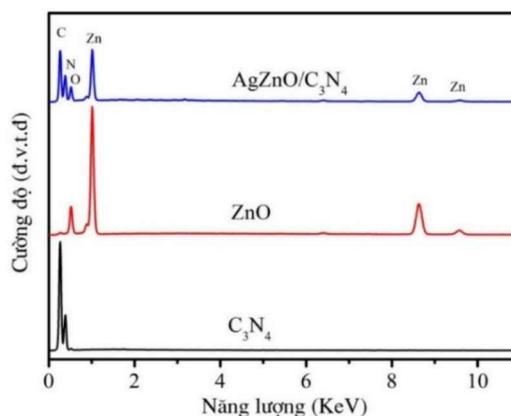




Hình 3.2: Ảnh SEM của mẫu g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (a), ZnO (b) và Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [(c) ảnh có độ phóng đại thấp, (d) ảnh có độ phóng đại cao]

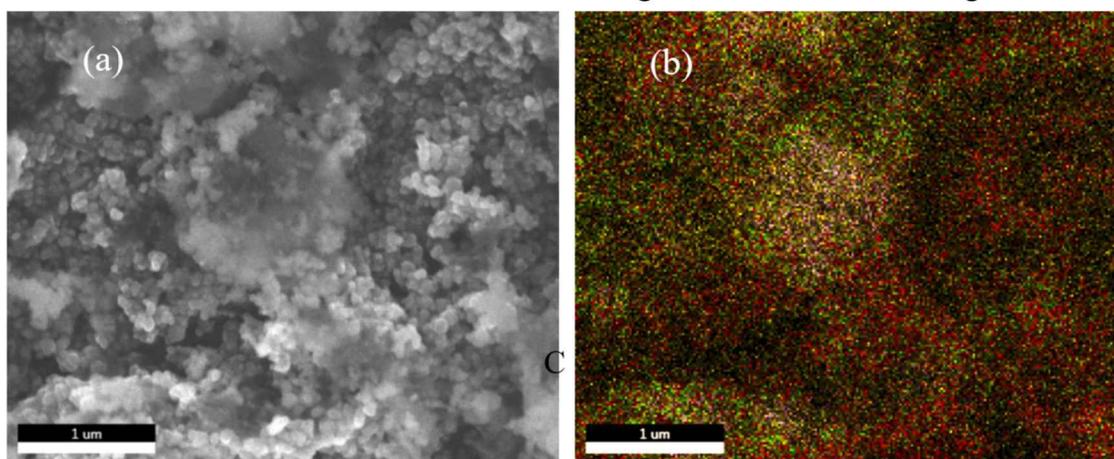
### 3.3. Phổ tán sắc năng lượng tia x (eds)

Để kiểm tra độ tinh khiết của các mẫu chế tạo, chúng tôi đã tiến hành phân tích thành phần nguyên tố hóa học của các mẫu. Kết quả phân tích cho thấy trên phổ tán sắc năng lượng (Hình 3.3) chỉ xuất hiện các đỉnh đặc trưng của mẫu bao gồm C, N, Ag, Zn và O mà không thấy xuất hiện các đỉnh của nguyên tố lạ. Đối với mẫu Ag/ZnO/C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> chúng tôi xác định được hàm lượng theo khối lượng của các pha tinh thể ZnO, Ag và g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> lần lượt là 28%, 2% và 70%. Kết quả này khá phù hợp với hàm lượng các mẫu đưa vào là 19%, 2% và 79%.



Hình 3.3: Phổ tán sắc năng lượng EDS của các mẫu chế tạo

Bên cạnh đó, để kiểm tra phân bố nguyên tố hóa học có trong mẫu, chúng tôi đã tiến hành phân tích phổ EDS mapping của mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Kết quả cho thấy các hạt nano Ag, ZnO phân tán đều trên toàn bộ mẫu chế tạo được. Các tấm g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có kích thước hàng trăm nanomet.

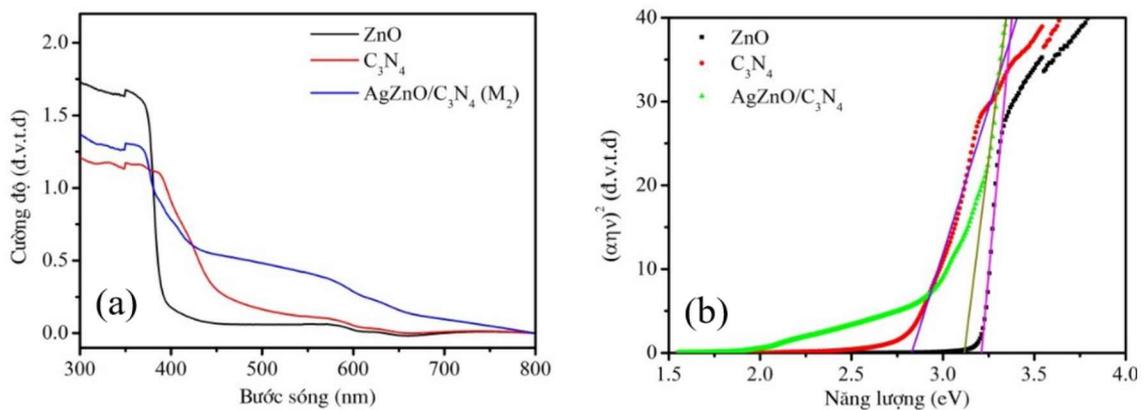


Hình 3.4: EDS mapping của vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (a) ảnh SEM, (b) element Overlay

### 3.4. Phổ quang hấp thụ (UV-VIS)

Để đánh giá khả năng ứng dụng quang xúc tác của mẫu chế tạo, chúng tôi tiến hành phân tích phổ hấp thụ của các mẫu chế tạo được. Trên phổ hấp thụ có thể quan sát được bờ vùng hấp thụ của ZnO tại bước sóng 400 nm, bờ vùng hấp thụ của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tại vị trí 450 nm và bờ vùng của vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dịch chuyển đổ về phía sóng dài so với bờ vùng của vật liệu ZnO. Điều này là dấu hiệu cho thấy mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có thể là vật liệu quang xúc tác đầy triển vọng trong vùng ánh sáng khả kiến.

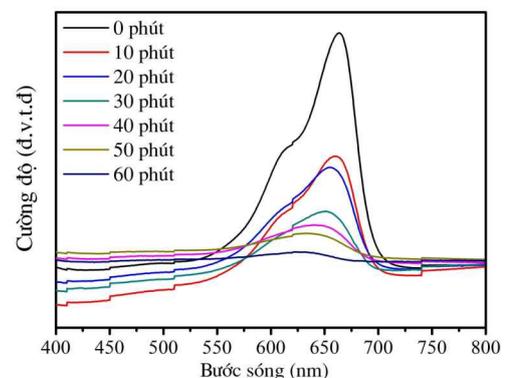
Năng lượng vùng cấm của các mẫu chế tạo được xác định thông qua phương trình Tauc:  $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ . Trong đó  $\alpha$  là hằng số hấp thụ,  $h$  là hằng số Plank,  $\nu$  là tần số của ánh sáng tới,  $A$  là hằng số,  $E_g$  là năng lượng vùng cấm của vật liệu. Năng lượng vùng cấm của mẫu được xác định bằng cách vẽ đồ thị sự phụ thuộc của  $(\alpha h\nu)^2$  vào  $E_g$  như được trình bày trên Hình 3.5. Ngoại suy phần tuyến tính của đồ thị cắt trục năng lượng chúng ta xác định được độ rộng vùng cấm của mẫu ZnO, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> và Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> lần lượt là 3.2 eV, 2.9 eV và 3.1 eV, phù hợp với các công trình đã được công bố.



Hình 3.5: Phổ hấp thụ (a) và đồ thị sự phụ thuộc của  $(\alpha h\nu)^2$  vào năng lượng (b) của mẫu ZnO, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> và Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

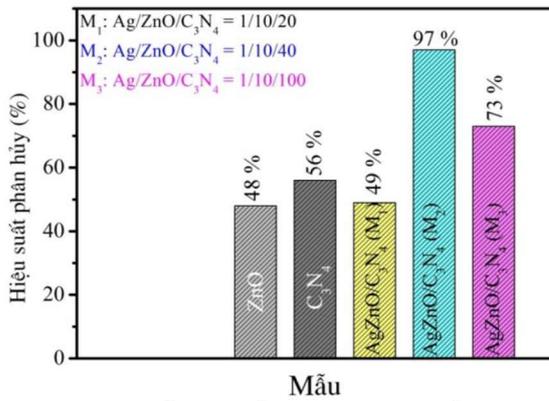
### 3.5. Ảnh hưởng hàm lượng của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> đến hiệu ứng quang xúc tác

Để nghiên cứu ảnh hưởng của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> đến hiệu quả quang xúc tác của mẫu chúng tôi tiến hành ghi phổ hấp thụ của các mẫu theo thời gian xúc tác từ 0 đến 60 phút với khoảng thời gian lấy mẫu là 10 phút. Hình 3.6 trình bày phổ hấp thụ của MB theo thời gian quang xúc tác của mẫu xúc tác Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Sự suy giảm cường độ hấp thụ của MB tại vị trí đỉnh hấp thụ 665 nm của MB được sử dụng để đánh giá hiệu suất xúc tác quang của tất cả các mẫu. Kết quả cho thấy sau 60 phút đỉnh hấp thụ đặc trưng của MB suy giảm hoàn toàn, đỉnh hấp thụ đặc trưng của MB không quan sát thấy trên phổ hấp thụ.

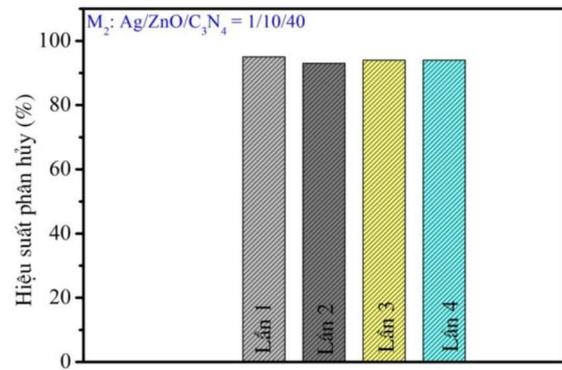


Hình 3.6: Phổ hấp thụ của MB theo thời gian quang xúc tác của mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Hiệu suất quang xúc tác sau 60 phút chiếu đèn được chỉ ra trên Hình 3.7. Kết quả cho thấy hiệu suất phân hủy lớn nhất được ghi nhận trên mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (M<sub>2</sub>) lên đến 97%, gấp 2 lần so với mẫu ZnO và g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> trong cùng điều kiện thí nghiệm. Hầu hết các nghiên cứu cho rằng quá trình tái hợp điện tử và lỗ trống của mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> giảm mạnh so với mẫu ZnO và g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tinh khiết là nguyên nhân chính để hiệu quả quang xúc tác được nâng cao. Có thể thấy rằng khi hàm lượng g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tăng thì hiệu suất quang xúc tác cũng tăng và đạt giá trị cực đại tại mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có tỉ lệ khối lượng Ag(Zn)/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> là 1/10/20 và bắt đầu suy giảm khi tỉ lệ g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tiếp tục tăng.



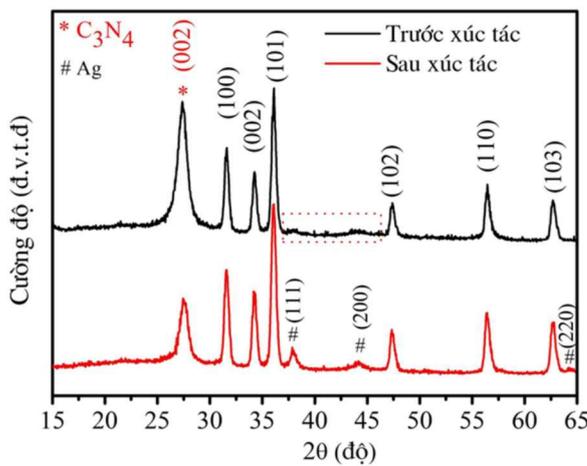
Hình 3.7: Đồ thị biểu diễn hiệu suất phân hủy của MB sau thời gian 60 phút



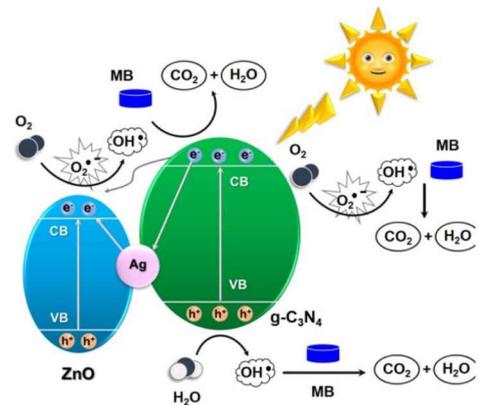
Hình 3.8: Hiệu suất quang xúc tác của vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

### 3.6. Khả năng tái sử dụng của xúc tác quang ag/zno/g-c3n4

Để đánh giá tính ổn định xúc tác của vật liệu quang xúc tác chúng tôi đã tiến hành phân tích khả năng tái sử dụng của vật liệu. Kết quả cho thấy sau 4 lần thực hiện quy trình quang xúc tác thì hiệu suất quang xúc tác của mẫu vẫn lên tới xấp xỉ 97% (Hình 3.8).



Hình 3.9: Giản đồ XRD của Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> trước và sau 4 lần xúc tác



Hình 3.10: Cơ chế phân hủy MB của vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Để đánh giá độ bền của vật liệu chúng tôi tiến hành đo phổ nhiễu xạ tia X của mẫu sau 4 lần quang xúc tác. Kết quả cho thấy mẫu thu được có các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của Ag, ZnO và g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mà không thấy xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ lạ nào khác (Hình 3.9).

Hình 3.10 minh họa quá trình quá trình quang xúc tác nhằm phân hủy chất màu hữu cơ MB khi sử dụng vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dưới tác dụng của ánh sáng UV-Vis. Dưới bức xạ của ánh sáng nhìn thấy, các phân tử ZnO và g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> trong mẫu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sẽ nhận năng lượng kích thích và tạo ra các cặp điện tử và lỗ trống trong dung dịch ( $\text{Ag/ZnO/g-C}_3\text{N}_4 + h\nu \rightarrow \text{Ag/ZnO/g-C}_3\text{N}_4 (e_{CB}^- + h_{VB}^+)$ ). Trong môi trường dung dịch, các cặp điện tử và lỗ trống này có thể tương tác với oxy và nước để tạo ra các chất oxy hóa như là: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, •O<sub>2</sub><sup>-</sup> và OH•. Cơ chế hình thành các chất oxy hóa •O<sub>2</sub><sup>-</sup> và các gốc OH• là do các lỗ trống phản ứng với các ion OH trong nước tạo thành các gốc tự do OH•. Các electron tự do di chuyển đến bề mặt chất xúc tác và hấp thụ O<sub>2</sub> trên bề mặt để tạo thành •O<sub>2</sub><sup>-</sup>. Khi tác dụng với chất màu hữu cơ MB, hai chất oxy hóa mạnh là •O<sub>2</sub><sup>-</sup> và OH• sẽ phân hủy chúng thành CO<sub>2</sub> và H<sub>2</sub>O làm mất màu sản phẩm (MB + (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, •O<sub>2</sub><sup>-</sup>, OH•) → sản phẩm mất màu). Trong quá trình di chuyển, các điện tử và lỗ trống sẽ nhảy sang các vùng dẫn (CB) và hóa trị (VB) của tổ hợp vật liệu. Cụ thể, đối với ZnO, các lỗ trống được tạo ra từ vùng hóa trị (VB) dễ dàng di chuyển sang vùng hóa trị (VB) của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Trong khi đó, các điện tử bị kích thích từ vùng dẫn (CB) của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> lại có xu hướng di chuyển đến vùng dẫn (CB) của ZnO. Sự di chuyển của điện tử và lỗ trống này dẫn đến thế năng vùng hóa trị của ZnO dương hơn của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> và thế năng vùng dẫn của g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> âm hơn của ZnO. Như vậy sự tái tổ hợp của các electron tự do và lỗ trống trong dung dịch giảm đi, số lượng điện tử và lỗ trống lớn giúp cho hiệu quả phân hủy thuốc nhuộm tốt hơn. Với các hạt Ag được thêm vào, do hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt của vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> cũng làm cho hiệu suất quang xúc tác của vật liệu được tăng cường.

#### 4. KẾT LUẬN

Vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt. Đĩa g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> được đính các hạt nano bạc có kích thước khoảng 5 nm và các thanh (hạt) nano ZnO. Kết quả phân tích cấu trúc cho thấy sự kết tinh tốt của các tinh thể ZnO. Các hạt Ag, ZnO phân tán đồng đều trên các tấm g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Kết quả nghiên cứu về quá trình quang xúc tác cho thấy hiệu suất phân hủy MB của vật liệu chế tạo được lên đến 97% sau thời gian chiếu sáng 60 phút ở mẫu có tỉ lệ Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> là 1/20/40. Cơ chế tăng cường hiệu suất quang xúc tác của mẫu vật liệu đã được giải thích. Mẫu vật liệu chế tạo được có độ bền và ổn định cao sau 4 chu kỳ quang xúc tác hiệu suất quang xúc tác lên tới 97%. Mẫu vật liệu Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> có hiệu suất quang xúc tác cao gấp 2 lần so với mẫu ZnO và g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> trong cùng điều kiện.

\* Nghiên cứu này được tiến hành trong khuôn khổ đề tài QG.23.13 của Đại học Quốc gia Hà Nội.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. R. Kishor, D. Purchase, G.D. Saratale, R.G. Saratale, L.F.R. Ferreira, M. Bilal, R. Chandra, R.N. Bharagava (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 105012.

2. S. S. Affat (2021). Classifications, advantages, disadvantages, toxicity effects of natural and synthetic dyes: a review. *University of Thi-Qar Journal of Science*, vol. 8, no. 1, pp. 130-135.
3. R.-t. Guo, J. Wang, Z.-x. Bi, X. Chen, X. Hu, and W.-g. Pan (2022). Recent advances and perspectives of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based materials for photocatalytic dyes degradation. *Chemosphere*, p. 133834.
4. J. Ni, Y. Wang, H. Liang, Y. Kang, B. Liu, R. Zhao, Y. Wang, X. Shuai, Y. Shang, J. Du (2021). Facile Preparation of Hierarchically Porous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as High-Performance Photocatalyst for Degradation of Methyl Violet Dye. *ChemistrySelect*, vol. 6, no. 28, pp. 7130-7135.
5. T. Munawar, M.S. Nadeem, F. Mukhtar, S. Manzoor, M.N. Ashiq, S. Batool, M. Hasan, F. Iqbal (2022). Enhanced photocatalytic, antibacterial, and electrochemical properties of CdO-based nanostructures by transition metals co-doping. *Advanced Powder Technology*, vol. 33, no. 3, p. 103451.
6. G. Yanalak, S. Yılmaz, Z. Eroglu, E. Aslan, O. Metin, and I. H. Patir (2022). Transition metal (Ni, co)-doped graphitic carbon nitride/MoS<sub>2</sub> heterojunctions as efficient photocatalysts for hydrogen evolution reaction under visible light. *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 12, pp. 17189-17203.
7. A. Hussain, S. Maqsood, R. Ji, Q. Zhang, M.U. Farooq, M. Boota, M. Umer, M. Hashim, H. Naeem, Z.S. Toor (2023). Investigation of transition metal-doped graphitic carbon nitride for MO dye degradation. *Diamond and Related Materials*, vol. 132, p. 109648.
8. A. Krishnan, A. Swarnalal, D. Das, M. Krishnan, V. S. Saji, and S. Shibli (2023). A review on transition metal oxides based photocatalysts for degradation of synthetic organic pollutants. *Journal of Environmental Sciences*.
9. Z. Fang, Q. Wang, X. Zhao, Y. Li, W. Zhang, and D. Zhang (2023). Integrating 3D porous morphology with efficient plasmonic Au nanoparticles in photo-responsive g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Au hybrid photocatalyst for the enhancement of CO<sub>2</sub> reduction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, no. 2, p. 109478.
10. S. Yin, L. Sun, Y. Zhou, X. Li, J. Li, X. Song, P. Huo, H. Wang, Y. Yan (2021). Enhanced electron-hole separation in SnS<sub>2</sub>/Au/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> embedded structure for efficient CO<sub>2</sub> photoreduction. *Chemical Engineering Journal*, vol. 406, p. 126776.
11. A.M. Asiri, A. Raza, M.K. Shahzad, W.A. Adeosun, S.B. Khan, K.A. Alamry, H.M. Marwani, M.M. AlOtaibi, S.M. Zakeeruddin, M. Grätzel (2022). Construction of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> bridged Pt/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterostructure with enhanced solar to fuel conversion. *Applied Surface Science*, vol. 592, p. 153159.
12. G.-Z. Peng, A. Hardiansyah, H.-T. Lin, R.-Y. Lee, C.-Y. Kuo, Y.-C. Pu, T.-Y. Liu (2022). Photocatalytic degradation and reusable SERS detection by Ag nanoparticles immobilized on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/graphene oxide nanosheets. *Surface and Coatings Technology*, vol. 435, p. 128212.
13. S. Zhang, Z. He, S. Xu, X. Li, J. Zhang, X. Zhan, M. Dai, S. Wang (2021). In Situ Liquid-Phase Growth Strategies of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Solar-Driven Heterogeneous Catalysts for Environmental Applications. *Solar RRL*, vol. 5, no. 8, p. 2100233.
14. X. Dang, M. Xie, F. Dai, J. Guo, J. Liu, and X. Lu (2021). Ultrathin 2D/2D ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheet heterojunction with atomic-level intimate interface for photocatalytic hydrogen evolution under visible light. *Advanced Materials Interfaces*, vol. 8, no. 10, p. 2100151.

15. X. Zhang, B. Ren, X. Li, Y. Xu, B. Liu, P. Yu, Y. Sun, D. Mei (2021). Efficiently enhanced visible-light photocatalytic activity by in situ deposition of Ag@ AgBr on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic heterogeneous materials. *Separation and Purification Technology*, vol. 254, p. 117596.
16. X. Wang, K. Maeda, A. Thomas, K. Takanabe, G. Xin, J.M. Carlsson, K. Domen, M. Antonietti (2009). A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light. *Nature materials*, vol. 8, no. 1, pp. 76-80.
17. S. Ma, S. Zhan, Y. Xia, P. Wang, Q. Hou, and Q. Zhou (2019). Enhanced photocatalytic bactericidal performance and mechanism with novel Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite under visible light. *Catalysis Today*, vol. 330, pp. 179-188.

### **SYNTHESIS OF Ag/ZnO/g- C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> COMPOSITE MATERIAL FOR ENHANCED PHOTOCATALYTIC PERFORMANCE**

**Abstract:** *The Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite material was successfully fabricated via a hydrothermal method. The materials structure was analyzed using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), which revealed well-crystallized ZnO nanoparticles and uniform g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sheets ranging from 100 to 200 nm. The elemental composition was investigated using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The absorption spectrum (UV-Vis) measurements demonstrated that the synthesized material exhibited high durability and stability after 4 photocatalytic cycles, with a photocatalytic efficiency of up to 97%.*

**Keywords:** *Ag/ZnO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, hydrothermal, photocatalytic, absorption spectrum.*