



**TỔNG HỢP TỔ HỢP VẬT LIỆU NANO  $rGO/V_2O_5$  CHO ỨNG DỤNG PHÂN HỦY THUỐC NHUỘM XANH METHYLEN VÀ TÍM TINH THỂ DƯỚI ÁNH SÁNG KHẢ KIẾN**  
**Võ Thị Lan Phương<sup>1\*</sup>, Đỗ Quang Đạt<sup>2</sup>, Nguyễn Thị Lan Phương<sup>3</sup>, Lại Văn Duy<sup>4</sup>**

Ngày nhận bài: 01/10/2025

Ngày chấp nhận đăng: 22/12/2025

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này giới thiệu vật liệu tổ hợp nano dị thể  $rGO/V_2O_5$  mới với hình thái có thể điều chỉnh, được tổng hợp thông qua việc kiểm soát nồng độ tiền chất  $rGO$  và  $NH_4VO_3$  kết hợp xử lý nhiệt. Khác với các chất xúc tác quang truyền thống dựa trên  $V_2O_5$  hoặc  $rGO$  đơn lẻ, cấu trúc dị thể được thiết kế thể hiện hoạt tính quang xúc tác vượt trội dưới ánh sáng khả kiến, với hiệu suất phân hủy đạt trên 86% đối với xanh methylene và 90% đối với tím tinh thể trong 180 phút. Phân tích cơ chế cho thấy hiệu ứng hiệp đồng mạnh mẽ giữa  $rGO$  và  $V_2O_5$  đã thúc đẩy quá trình phân tách điện tử – lỗ trống, hạn chế sự tái tổ hợp và nâng cao khả năng hấp thụ ánh sáng. Những kết quả này chứng minh sự cải thiện rõ rệt so với các thành phần riêng lẻ, đồng thời khẳng định  $rGO/V_2O_5$  là chất xúc tác quang hiệu quả, chi phí thấp và thân thiện với môi trường. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng việc điều khiển hợp lý hình thái của  $rGO/V_2O_5$  mở ra hướng đi mới cho xử lý hiệu quả các chất ô nhiễm hữu cơ trong nước thải.

**Từ khóa:** Tổ hợp nano  $rGO/V_2O_5$ ; Quang xúc tác; Ánh sáng khả kiến; Xanh Methylene; Tím tinh thể.

**FACILE SYNTHESIS OF  $rGO/V_2O_5$  NANOCOMPOSITE TOWARDS THE DEGRADATION OF METHYLENE BLUE AND CRYSTAL VIOLET DYES UNDER VISIBLE LIGHT IRRADIATION**

**Abstract:** This study reports the synthesis and application of  $rGO/V_2O_5$  heterostructured nanocomposites for wastewater treatment. The material was prepared by adjusting the concentrations of  $rGO$  and  $NH_4VO_3$  to control the morphology, followed by thermal treatment to optimize photocatalytic activity. The  $rGO/V_2O_5$  heterostructure exhibited remarkable performance, achieving over 86% degradation of methylene blue and 90% degradation of crystal violet within 180 min under visible-light irradiation. The photocatalytic mechanism was elucidated, highlighting the synergistic role of  $rGO$  and  $V_2O_5$  in enhancing charge separation and light utilization. These findings demonstrate that  $rGO/V_2O_5$  is a promising, cost-effective, and environmentally friendly photocatalyst, offering an efficient strategy for the degradation of organic pollutants in wastewater.

**Keywords:**  $rGO/V_2O_5$  nanocomposites; Visible light; Photocatalysis; Methylene blue; Crystal Violet.

### Giới thiệu

Quá trình công nghiệp hóa nhanh chóng cùng với các hoạt động của con người là những nguyên nhân chính gây ra tình trạng ô nhiễm môi trường, đặc biệt là ô nhiễm nguồn nước do chất

<sup>1</sup> Khoa Sư phạm Trung học, Trường Đại học Hoa Lư, Email: [vtlphuong@hluv.edu.vn](mailto:vtlphuong@hluv.edu.vn)

<sup>2</sup> Phòng Hành chính - Quản trị, Trường Đại học Hoa Lư

<sup>3</sup> Trường phổ thông thực hành sư phạm Tràng An

<sup>4</sup> Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam



thải công nghiệp và hóa chất làm ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe cũng như đời sống hằng ngày của con người [1]. Các phương pháp xử lý nước thải truyền thống như phương pháp cơ học, hóa lý, sinh học ... thường không thể loại bỏ hoàn toàn được các hợp chất phức tạp dẫn đến nhiều chất ô nhiễm khó phân hủy sinh học vẫn tồn tại, làm phát sinh nhu cầu xử lý bổ sung với chi phí cao. Trước thực trạng này, việc phát triển các kỹ thuật mới là điều hết sức cần thiết. Các phương pháp tái tạo, thân thiện với môi trường nhằm loại bỏ các chất độc hại vốn là những tác nhân chính gây ô nhiễm nước trong nhiều ngành công nghiệp như: thuốc nhuộm azo, phenothiazin và triphenylmethan... đang được tập trung nghiên cứu [2]. Trong đó, các quá trình oxy hóa nâng cao, đặc biệt là quang xúc tác, đang được ứng dụng để loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ trong nước thải màu, điển hình như rhodamin B, monoazo, diazo và xanh methylen (MB) [3]. Phương pháp này được ưa chuộng nhờ hiệu quả cao, khả năng tái sử dụng, không tạo ra ô nhiễm thứ cấp, chi phí hợp lý và tính thân thiện với môi trường. Bên cạnh đó, sự phát triển của các chất quang xúc tác cấu trúc nano hiệu quả đã thu hút sự quan tâm đáng kể của giới nghiên cứu trong những năm gần đây. Các chất xúc tác quang ở kích thước nano như g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, PANI, rGO, ZnO, TiO<sub>2</sub> và V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, cũng như tổ hợp của chúng với các vật liệu khác đã được chứng minh có hiệu quả trong các quá trình quang xúc tác [4]. Trong đó, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – một loại oxide kim loại bán dẫn được quan tâm chú ý nhờ có vùng cấm phù hợp và các đặc tính hóa học đặc biệt cùng với cấu trúc lớp và tỷ lệ diện tích bề mặt lớn tạo điều kiện thuận lợi cho các phản ứng quang xúc tác [5, 6].

Trong các ứng dụng thực tiễn, graphene oxide dạng khử (rGO - Reduced graphene oxide) được sử dụng để dẫn truyền electron kích thích và hấp phụ thuốc nhuộm nhờ diện tích bề mặt lớn và các nhóm chức chứa oxy [7, 8]. Khi kết hợp với V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, cấu trúc dị thể oxide kim loại (rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) thể hiện ưu thế trong việc tách và vận chuyển các hạt tải quang sinh, từ đó nâng cao hoạt tính quang xúc tác. Cấu trúc dị thể đặc trưng hình thành giữa rGO và V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> đã được chứng minh có khả năng cải thiện hiệu suất quang xúc tác trong phân hủy MB dưới sự chiếu sáng khả kiến [1]. Ngoài ra, tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt đơn giản cũng cho thấy khả năng quang phân hủy MB mạnh mẽ, nâng cao hiệu suất xử lý nước chứa thuốc nhuộm MB thông qua việc giảm năng lượng vùng cấm, hạn chế sự tái hợp của các hạt mang điện tích và gia tăng mật độ dòng điện [9].

Trong nghiên cứu này, vật liệu rGO được tổng hợp bằng phương pháp Hummer cải tiến, các thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> được chế tạo bằng quy trình thủy nhiệt. Thông qua việc điều chỉnh nồng độ của rGO và ammonium metavanadat (NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>), hình thái của tổ hợp nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> đã được kiểm soát hiệu quả. Đặc biệt, sau khi xử lý nhiệt ở 300 °C trong 1 giờ trong không khí, các vật liệu thu được thể hiện hiệu suất quang xúc tác vượt trội, với khả năng phân hủy MB đạt trên 86% và tím tinh thể (CV) trên 90% trong vòng 180 phút dưới ánh sáng khả kiến. Kết quả này cho thấy rằng thiết kế dị thể với hình thái được điều khiển có vai trò quan trọng trong việc cải thiện hoạt tính quang xúc tác. Điểm mới của nghiên cứu này là kỹ thuật điều chỉnh hình thái và cấu trúc dị thể rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nhằm tối ưu hóa hiệu quả quang phân hủy các hợp chất hữu cơ, qua đó mở ra một hướng tiếp cận tiềm năng cho phát triển vật liệu quang xúc tác hoạt động dưới ánh sáng khả kiến. Ngoài ra, nghiên cứu này còn sử dụng nguồn sáng đèn huỳnh quang compact thay thế cho các nguồn sáng phổ liên tục như halogen, xenon hoặc UV, giúp giảm đáng kể mức tiêu thụ năng lượng trong khi vẫn duy trì hiệu suất quang phân hủy cao đối với các chất màu CV và MB. Kết quả thu được cho thấy vật liệu có thể hoạt động hiệu quả dưới điều kiện chiếu sáng thông thường, hứa hẹn ứng dụng thực tế trong các hệ thống xử lý ô nhiễm thân thiện và tiết kiệm năng lượng.

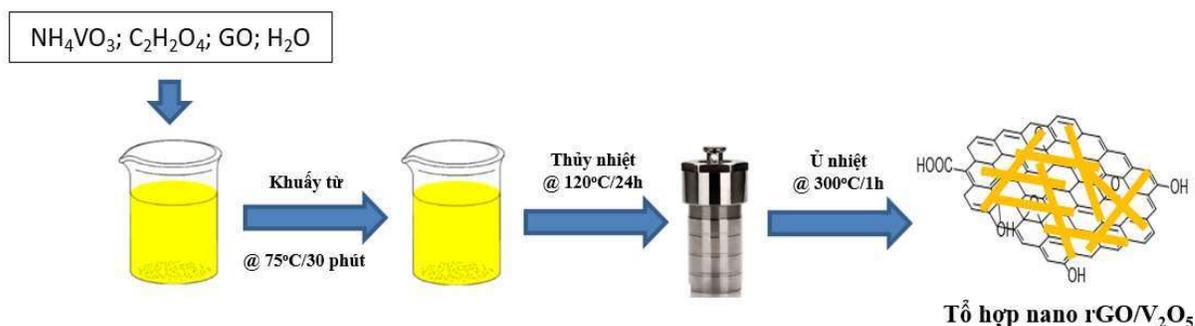
### Thực nghiệm

**Hóa chất:** Bột graphite tinh khiết (kích thước hạt khoảng 50 μm) được cung cấp bởi Merck. NaNO<sub>3</sub> (84,99%), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%), KMnO<sub>4</sub> (99,5%), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%), acid L-ascorbic (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>, 99,7%), NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>, 99,99%, acid oxalic (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) và ethanol (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, 99,8%) được mua từ Xilong Chemical Co., Ltd. Tất cả các hóa chất đều có độ tinh khiết phân tích và được sử dụng trực tiếp mà không qua tinh chế thêm. Nước khử ion được sử dụng trong toàn bộ thí nghiệm.



### Quy trình tổng hợp tổ hợp nano rGO/ V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Graphene oxide (GO) được tổng hợp từ graphite tự nhiên bằng phương pháp Hummers cải tiến, theo quy trình đã được chúng tôi thực hiện trong các nghiên cứu trước đây [10]. Tổ hợp nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt với quy trình cụ thể như sau: 5 mmol NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> được hòa tan trong 100 ml nước khử ion chứa 0,032 gam GO. Dung dịch được khuấy từ và gia nhiệt ở 75°C trong 30 phút. Sau đó, 2,5 mmol C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub> được thêm vào hỗn hợp và tiếp tục khuấy trong 15 phút. Tiếp theo, dung dịch HNO<sub>3</sub> đặc được nhỏ giọt từ từ để điều chỉnh pH của dung dịch đến giá trị bằng 3,0. Hỗn hợp sau đó được chuyển vào bình thủy nhiệt (100 ml) và tiến hành xử lý thủy nhiệt ở 120°C trong 24 giờ. Sau khi làm nguội đến nhiệt độ phòng, phần kết tủa ở đáy được thu hồi bằng ly tâm và rửa nhiều lần với nước khử ion, cuối cùng rửa bằng cồn và ly tâm ở tốc độ 5800 vòng/phút. Sản phẩm bột màu xanh đen thu được được sấy trong tủ sấy ở 60°C trong 24 giờ, sau đó nung ở 300°C trong 1 giờ trong không khí.



**Hình 1. Sơ đồ tổng hợp thủy nhiệt tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**

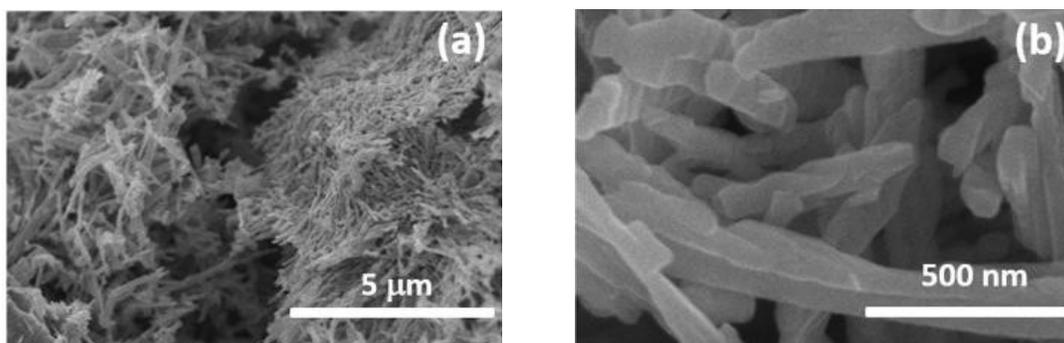
Hình thái, cấu trúc và thành phần của vật liệu đã tổng hợp được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM, JEOL 7600F) và nhiễu xạ tia X bột với nguồn bức xạ Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 0,15406$  nm) (XRD Advance D8, Bruker). Bản chất liên kết trong vật liệu được phân tích bằng phổ Raman thu được từ hệ Renishaw Invia Microfocal Raman. Phổ hấp thụ quang học (UV-Vis) được khảo sát bằng máy quang phổ tử ngoại–khả kiến (PG-T90, UK), phổ FTIR được đo trên máy FTIR Nexus 670-Nicole.

### Khảo sát khả năng quang xúc tác phân hủy dung dịch MB và CV của rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Hoạt tính quang xúc tác phân hủy thuốc nhuộm MB và CV của tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> được thực hiện tại điều kiện nhiệt độ phòng (khoảng 28°C). Cụ thể như sau: 100 ml MB hoặc CV có nồng độ 20 mg/l được trộn với 20 mg chất xúc tác trong cốc thủy tinh 250 mL, hỗn hợp được khuấy trong bóng tối bằng khuấy từ trong vòng 1 giờ để đạt được cân bằng hấp phụ giữa vật liệu và dung dịch chất màu. Sau đó, hỗn hợp được chiếu sáng bằng đèn huỳnh quang (220V, 105W) trong buồng kín. Cứ sau mỗi 30 phút, khoảng 7 ml dung dịch được lấy ra và ly tâm ở 5800 vòng/phút trong 30 phút để loại bỏ chất xúc tác. Dung dịch thu được được phân tích bằng quang phổ UV-Vis tại bước sóng  $\lambda_{max} = 664$  nm (MB) và 590 nm (CV) để xác định nồng độ.

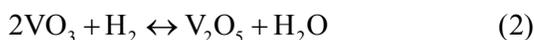
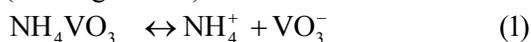
### Kết quả và thảo luận

Hình 2a mô tả hình thái của vật liệu tổ hợp nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, có thể quan sát thấy các thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tách rời hoặc liên kết với nhau trông giống như san hô đan xen với các tấm mỏng rGO. Do hàm lượng rGO thấp nên sự hiện diện của rGO trên ảnh là không đáng kể, khiến mẫu chủ yếu xuất hiện dưới dạng các cấu trúc của V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Hình 2b là ảnh SEM độ phân giải cao, cho thấy các thanh nano có đường kính trung bình khoảng dưới 50 nm. Các thanh V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hầu như tách rời nhau, ít có sự kết tụ lại thành đám lớn đồng thời chúng được sắp xếp ngẫu nhiên và định hướng khác nhau trong không gian, điều này góp phần tăng cường diện tích bề mặt và tăng cường diện tích tiếp xúc chất xúc tác – chất màu, từ đó nâng cao hiệu quả của quá trình quang xúc tác.

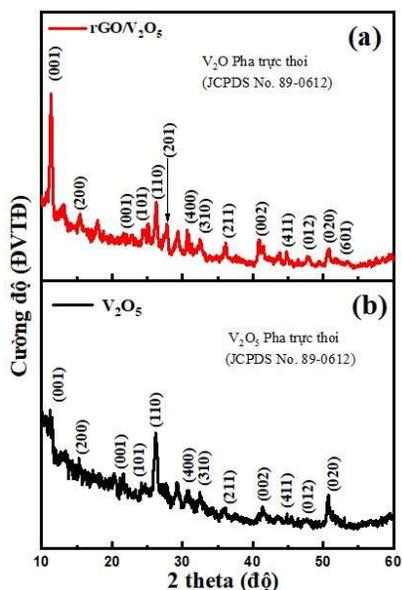


**Hình 2. Ảnh SEM của tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sau xử lý nhiệt: (a) độ phóng đại thấp, (b) độ phóng đại cao**

Trong quá trình thủy nhiệt, các nano dạng thanh V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> được hình thành nhờ sự phân ly của NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> thành các ion NH<sub>4</sub><sup>+</sup> và VO<sub>3</sub><sup>-</sup> trong dung dịch nước khử ion (Phương trình 1). Việc điều chỉnh pH xuống 3 bằng HNO<sub>3</sub> đậm đặc làm tăng nồng độ H<sup>+</sup>, tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> từ VO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Phương trình 2).



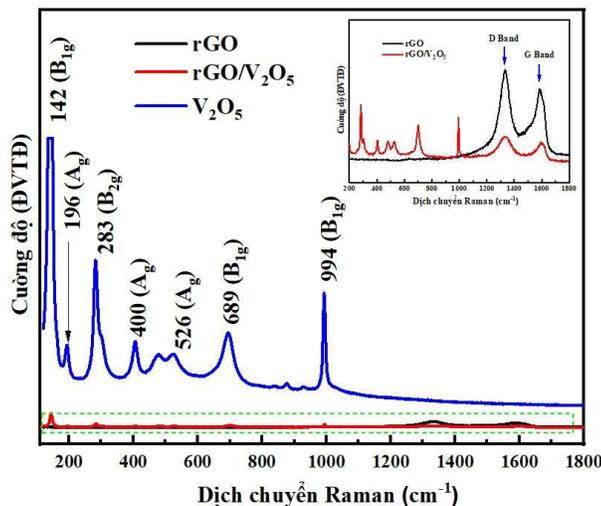
Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của mẫu bột tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> và V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết được tổng hợp ở 120°C và sau đó ủ ở 300°C được thể hiện trong Hình 3. Các đỉnh nhiễu xạ quan sát được đặc trưng cho cấu trúc tinh thể trực thoi của V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (thẻ JCPDS số 89-0612) [11, 12]. Kích thước hạt trung bình, được tính toán bằng phương trình Scherrer dựa trên mặt nhiễu xạ (110) có cường độ mạnh nhất, lần lượt là khoảng 12,5 nm đối với mẫu tổ hợp vật liệu nano và 6,7 nm đối với mẫu V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết. Trong giản đồ XRD không quan sát thấy các đỉnh nhiễu xạ riêng biệt của rGO điều này có thể là do hàm lượng nhỏ rGO trong mẫu.



**Hình 3. Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của vật liệu tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (a) và V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết (b).**

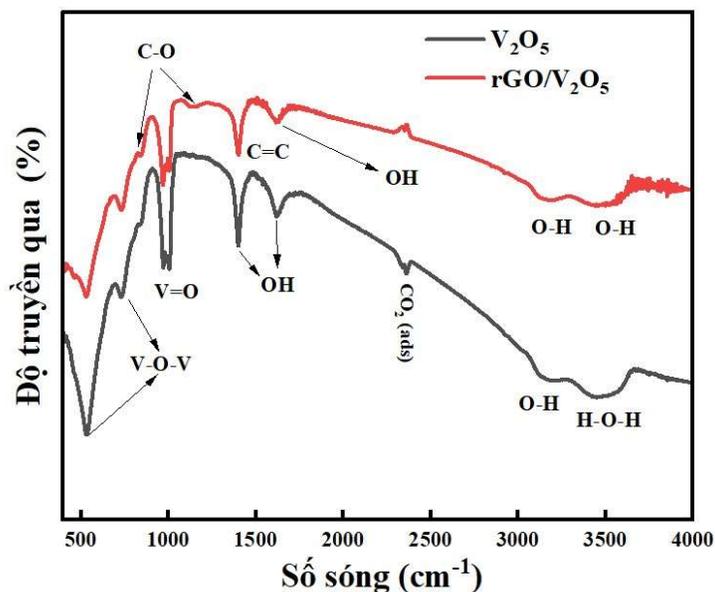
Hình 4 là phổ Raman của rGO, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết và tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Trong cả hai mẫu vật liệu các đỉnh đặc trưng tại 142, 196, 283, 400, 479, 526, 689 và 994 cm<sup>-1</sup> xác nhận sự tồn tại của pha trực thoi α-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Các dao động này phù hợp với các báo cáo trong tài liệu và được gán cho đặc trưng của pha trực thoi α-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, như vậy việc bổ sung rGO không làm thay đổi pha hay cấu trúc mạng của V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Cụ thể, đỉnh tại 142 cm<sup>-1</sup> đặc trưng cho cấu trúc lớp của V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, trong khi đỉnh tại 196 cm<sup>-1</sup> liên quan đến dao động uốn cong của liên kết O–V–O. Các đỉnh tại 283 và 400 cm<sup>-1</sup> biểu

thị mode dao động Ag của liên kết V=O. Các dịch chuyển tại 479 và 526  $\text{cm}^{-1}$  lần lượt tương ứng với mode dao động Ag (V–O3–V) và  $\nu(\text{d3})$ , phản ánh các đơn vị cấu trúc của mạng tinh thể. Các đỉnh gần 526 và 689  $\text{cm}^{-1}$  được gán cho mode phonon  $\text{V3=O}$ . Đặc biệt, đỉnh rõ nét tại 994  $\text{cm}^{-1}$  khẳng định chất lượng kết tinh cao của các thanh nano  $\text{V2O5}$ . Trong phổ Raman của rGO và tổ hợp vật liệu nano rGO/ $\text{V2O5}$ , các dải đặc trưng D (1329  $\text{cm}^{-1}$ ) và G (1585  $\text{cm}^{-1}$ ) của vật liệu rGO đều được quan sát rõ ràng [13]. Như vậy thông qua phổ Raman có thể xác nhận sự tồn tại đồng thời vật liệu rGO và vật liệu  $\text{V2O5}$  trong tổ hợp vật liệu tạo thành.



**Hình 4. Phổ Raman của rGO,  $\text{V2O5}$  tinh khiết và tổ hợp vật liệu nano rGO/ $\text{V2O5}$ .**

Hình 5 là phổ FTIR của  $\text{V2O5}$  tinh khiết và tổ hợp vật liệu nano rGO/ $\text{V2O5}$  được đo trong dải số sóng 450 – 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Đỉnh xuất hiện tại khoảng 630  $\text{cm}^{-1}$ , được quy cho dao động kéo giãn của liên kết V–O–V, trong khi dải kế tiếp tại khoảng 760  $\text{cm}^{-1}$  tương ứng với dao động kéo giãn đối xứng của liên kết V–O–V. Các đỉnh hấp thụ trong khoảng 912 – 1043  $\text{cm}^{-1}$  liên quan đến trạng thái kéo giãn của liên kết V=O, còn đỉnh tại 3125  $\text{cm}^{-1}$  gắn với dao động kéo giãn của liên kết –OH. Dải hấp thụ rộng ở 3443  $\text{cm}^{-1}$  được gán cho nhóm hydroxyl của vanadi, trong khi dao động uốn của  $\text{H2O}$  xuất hiện trong khoảng 1399 – 1618  $\text{cm}^{-1}$ . Các đặc trưng như liên kết V=O, –OH và C=C trong phổ FTIR của rGO/ $\text{V2O5}$  cho thấy sự tồn tại của các liên kết bền vững giữa các thanh nano  $\text{V2O5}$  và các lớp rGO [14].

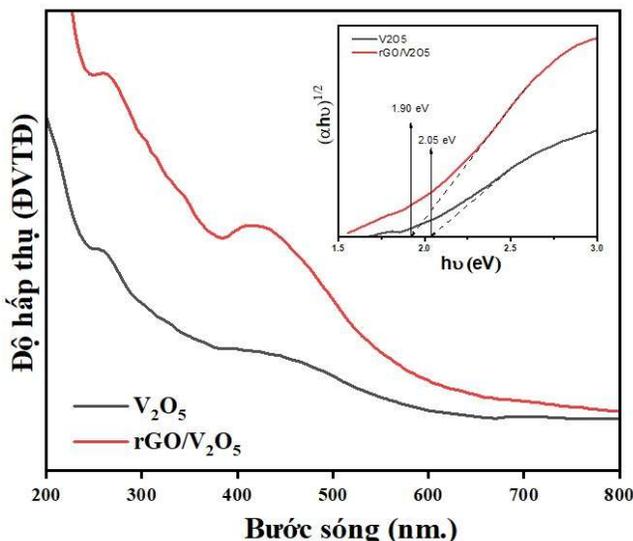


### Hình 5. Phổ FTIR của V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết đã ủ nhiệt và tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Hình 6 mô tả phổ hấp thụ UV-Vis của thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> và tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, trong đó cả hai mẫu đều thể hiện một đỉnh hấp thụ chung tại khoảng 410 nm. Khi so sánh phổ hấp thụ của dây nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết với mẫu tổ hợp, có thể nhận thấy sự dịch chuyển rõ rệt về phía bước sóng dài hơn, phản ánh sự thay đổi trong năng lượng vùng cấm (E<sub>g</sub>) của vật liệu. Trên phổ UV – Vis có thể quan sát thấy cường độ hấp thụ của tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> có sự khác biệt nhẹ so với mẫu V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết. Năng lượng vùng cấm (E<sub>g</sub>) của các mẫu vật liệu được tính toán dựa trên phương trình Tauc [15]:

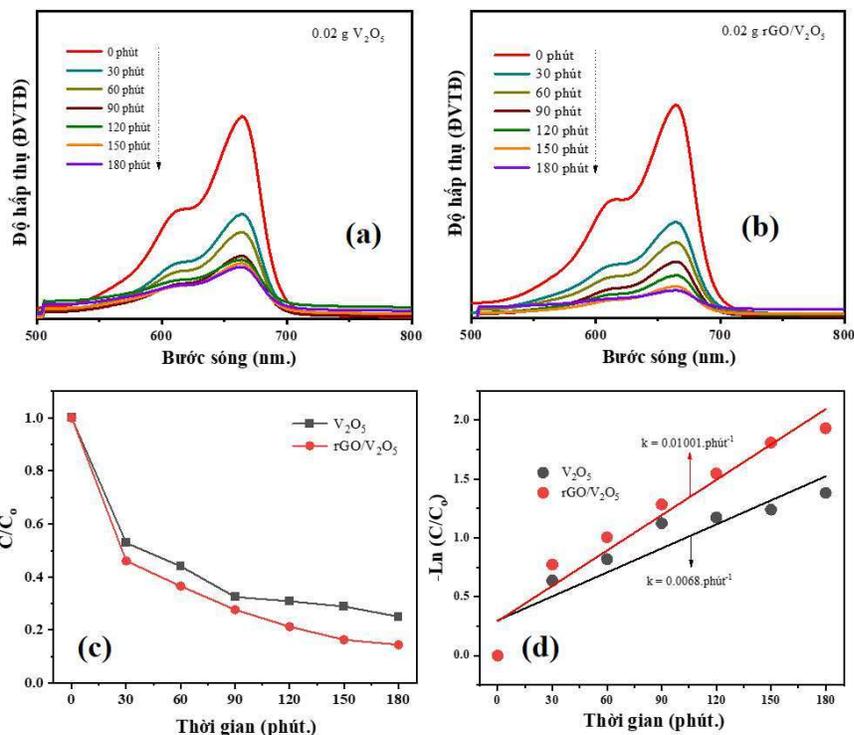
$$E_g = h\nu - \frac{(\alpha h\nu)^{1/2}}{C} \quad (3)$$

Trong đó, E<sub>g</sub> là năng lượng vùng cấm, hν là năng lượng photon tới, α là hệ số hấp thụ và C là hằng số phụ thuộc năng lượng. Giá trị E<sub>g</sub> được xác định bằng cách ngoại suy phần tuyến tính của đường cong. Cụ thể, giá trị E<sub>g</sub> của dây nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết và tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> lần lượt là 2,05 eV và 1,90 eV. Năng lượng vùng cấm của V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> giảm khi tổ hợp với rGO được cho là do sự xuất hiện của các khuyết tật trong vật liệu tổ hợp dẫn đến sự gia tăng mật độ và độ linh động của các hạt mang điện khiến biên vùng dẫn và vùng hóa trị của V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tiến gần nhau hơn. Giá trị năng lượng vùng cấm này hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu đã công bố trước đây [9]. Sự thay đổi trong giá trị vùng cấm sau khi tổ hợp với rGO cho thấy khả năng hấp thụ quang của vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vượt trội hơn, đạt hiệu quả phân hủy chất màu MB cao hơn so với V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết [16].

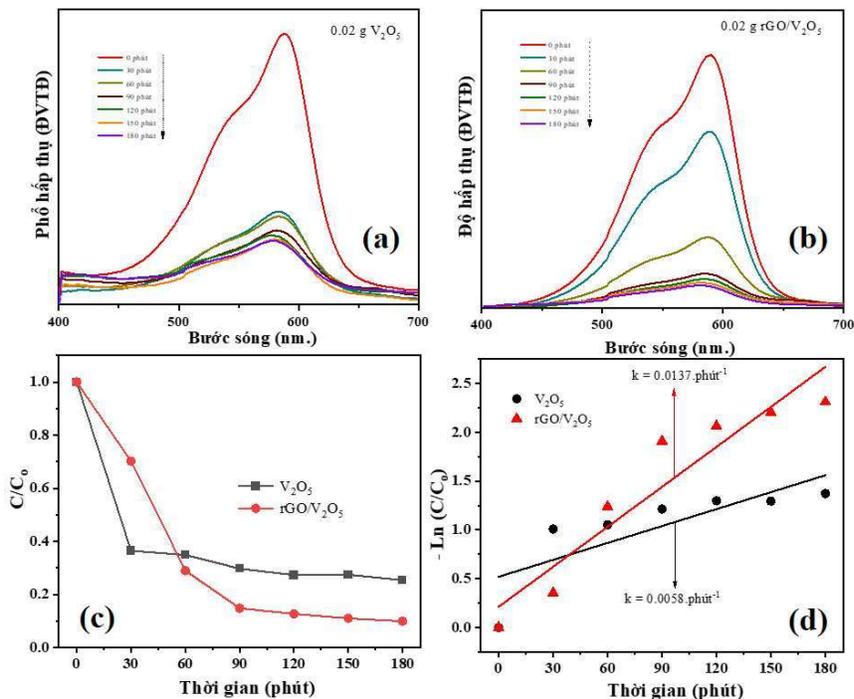


Hình 6. Phổ hấp thụ UV-Vis của thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> và tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Quá trình phân hủy quang xúc tác dung dịch MB và CV (nồng độ 20 mg/l) được tiến hành với thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> và tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,02 g) làm chất xúc tác dưới chiếu xạ đèn huỳnh quang Compact (220V, 120W) (Hình 7 và Hình 8). Ở hình 7a, cường độ phổ hấp thụ của dung dịch MB giảm dần khi tăng thời gian chiếu sáng cho thấy tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thể hiện hoạt tính quang xúc tác vượt trội so với thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết nhờ cấu trúc và đặc tính điện tử được cải thiện. Sự kết hợp này giúp tăng tốc độ truyền điện tử, giảm tái tổ hợp điện tử – lỗ trống, từ đó phân hủy hiệu quả. Ngoài ra, sự có mặt của rGO kéo dài thời gian sống của cặp điện tử – lỗ trống quang sinh, góp phần tăng hiệu suất xúc tác. Kết quả là sau 180 phút, tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> đạt hiệu suất phân hủy MB là 86%, cao hơn so với V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết (74%) (Hình 7c). Đồ thị động học bậc nhất (Hình 7d) cho thấy hằng số tốc độ phản ứng ước tính khoảng 0,0068 phút<sup>-1</sup> đối với mẫu V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết và 0,01 phút<sup>-1</sup> đối với tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.



Hình 7. (a, b) Phổ hấp thụ của dung dịch MB; (c) hoạt tính quang xúc tác; (d) đồ thị  $C/C_0$  theo thời gian ( $C_0$  là nồng độ ban đầu tại  $t = 0$ ,  $C$  là nồng độ tại thời điểm  $t$ ). Đồ thị động học bậc một tuyến tính với  $-\ln(C/C_0)$  theo thời gian chiếu sáng của tổ hợp vật liệu nano rGO/ $V_2O_5$  và  $V_2O_5$  tinh khiết.



Hình 8. (a, b) Phổ hấp thụ UV-Vis của dung dịch CV sau phân hủy; (c) hoạt tính quang xúc tác; (d) đồ thị  $C/C_0$  theo thời gian và động học bậc một tuyến tính  $-\ln(C/C_0)$  theo thời gian chiếu sáng.

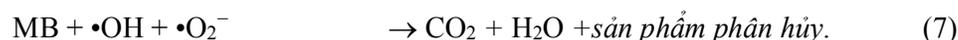
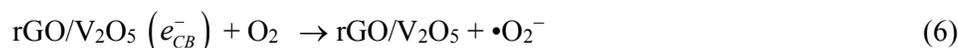
Hiệu suất phân hủy dung dịch CV với thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> và tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> được trình bày ở Hình 8(a-b). Sau 180 phút chiếu sáng, tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> đạt hiệu suất phân hủy 90%, vượt trội hơn so với 75% của thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết (Hình 8c). Tốc độ phản ứng phân hủy CV được xác định lần lượt là 0,0137 phút<sup>-1</sup> và 0,0058 phút<sup>-1</sup> (Hình 8d).

Bảng 1 so sánh hoạt tính quang xúc tác trong phân hủy dung dịch MB và CV của tổ hợp nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tổng hợp trong nghiên cứu này với các vật liệu khác. Kết quả cho thấy, với nồng độ chất xúc tác thấp hơn (2 mg/100 ml) nhưng nồng độ chất màu cao hơn (20 mg/l) so với các công bố khác, mẫu nghiên cứu vẫn đạt hiệu suất phân hủy cao hơn. Điều này được giải thích bởi diện tích bề mặt riêng lớn của cấu trúc V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> và rGO, cùng hiệu ứng hiệp đồng giữa hai thành phần giúp hạn chế sự tái tổ hợp cặp điện tử – lỗ trống trong quá trình quang xúc tác.

**Bảng 1. So sánh đặc tính xúc tác quang phân hủy MB và CV của các vật liệu khác nhau**

STT	Chất xúc tác	Phương pháp tổng hợp	Chất màu/ Nồng độ	Hàm lượng xúc tác	Hiệu suất (%)	Nguồn sáng	Thời gian (phút.)	Tài liệu tham khảo
1	CeO <sub>2</sub> /V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phân hủy nhiệt	MB 3x10 <sup>-5</sup> M	500 mg	64,2	Đèn Halogen (7748XHP 250 W, Philips, 532 nm)	210	[17]
2	rGO-V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Vi sóng	MB 9,2 mg/l	50 mg	80	Ánh sáng mặt trời	90	[18]
3	NiV <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Thủy nhiệt	MB 20 mg/l	-	80	Đèn Xenon (500 W)	150	[19]
4	VO <sub>2</sub> -A/g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Thủy nhiệt	CV 10 mg/l	-	78,3	Đèn UV	120	[20]
5	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Thủy nhiệt	CV 10 ppm	1,0 g/l	64	Ánh sáng mặt trời	45	[21]
6	Ga <sub>2</sub> Zr <sub>2-x</sub> W <sub>x</sub> O <sub>7</sub>	Hóa ướt	CV 20 mg/l	1,0 g/l	83,6	Đèn Halogen (OSRAM, 82 lm.W <sup>-1</sup> , 20000 lm)	300	[22]
7	rGO/V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Thủy nhiệt	MB 20 mg/l	20 mg	86	Đèn huỳnh quang (220V, 105W)	180	Bài báo
8	rGO/V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Thủy nhiệt	CV 20 mg/l	20 mg	90	Đèn huỳnh quang (220V, 105W)	180	Bài báo

Tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thúc đẩy hoạt tính quang xúc tác bằng cách hấp thụ ánh sáng khả kiến để tạo ra cặp điện tử (e<sup>-</sup>) – lỗ trống (h<sup>+</sup>) (Phương trình 4). Các lỗ trống ở vùng hóa trị (VB - Valence band) phản ứng với nước tạo gốc hydroxyl (•OH) (Phương trình 5), trong khi electron ở vùng dẫn (CB - Conduction band) phản ứng với oxy tạo gốc superoxide (•O<sub>2</sub><sup>-</sup>) (Phương trình 6). Các gốc tự do này tiếp tục ô xy hóa và khoáng hóa các phân tử hữu cơ như MB/CV thành CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O và các sản phẩm phân hủy khác ở nồng độ thấp (Phương trình 7). Cơ chế của quá trình quang xúc tác này bao gồm ba giai đoạn: hấp phụ thuốc nhuộm lên bề mặt chất xúc tác, khuếch tán vào các mao quản và phản ứng tại các vị trí hoạt động (hình 9). Đặc biệt, sự dư thừa gốc hydroxyl (•OH) từ phản ứng giữa lỗ trống vùng hóa trị và ion hydroxyl càng làm tăng hiệu suất xúc tác quang [9].





**Hình 9. Cơ chế quang xúc tác phân hủy chất màu của tổ hợp vật liệu nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.**

### Kết luận

Nghiên cứu này đã chứng minh tiềm năng nổi bật trong việc phân hủy cả hai loại thuốc nhuộm MB và CV dưới chiếu xạ ánh sáng khả kiến của tổ hợp nano rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt. Thông qua việc điều chỉnh có kiểm soát nồng độ tiền chất rGO và NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>, hình thái cấu trúc dị thể được tối ưu, từ đó mang lại hoạt tính quang xúc tác vượt trội so với thanh nano V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tinh khiết, với hiệu suất phân hủy đạt trên 86% đối với MB và 90% đối với CV sau 180 phút chiếu sáng. Hiệu suất cải thiện này bắt nguồn từ những đặc tính cấu trúc và điện tử ưu việt của dị thể rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, giúp tăng cường quá trình phân tách và truyền điện tích đồng thời hạn chế tái tổ hợp cặp điện tử – lỗ trống. Cơ chế quang xúc tác được giải thích bởi sự hình thành các cặp điện tử–lỗ trống dưới ánh sáng khả kiến, tiếp đó ô xy hóa và khoáng hóa các phân tử thuốc nhuộm hữu cơ thành các sản phẩm thân thiện môi trường như CO<sub>2</sub> và H<sub>2</sub>O. Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng của rGO/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> như một chất xúc tác quang hiệu quả, chi phí hợp lý và bền vững cho xử lý nước thải công nghiệp.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Aradhya Mishra, Archana Panigrahi, Priyanath Mal, Santosh Penta, G. Padmaja, Ganesh Bera, Pradip Das, P. Rambabu, Goverdhan Reddy Turpu (2020), "Rapid photodegradation of methylene blue dye by rGO-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nano composite", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 842, p. 155746.
- [2] S. Vignesh, S. Suganthi, M. Srinivasan, A. Tamilmani, J. Kalyana Sundar, Sreedevi Gedi, Baskaran Palanivel, Shoyebmohamad F. Shaikh, Mohd Ubaidullah, Md Kausar Raza (2022), "Investigation of heterojunction between  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ternary nanocomposites for upgraded photo-degradation performance of mixed pollutants: Efficient dual Z-scheme mechanism", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 902, p. 163705.
- [3] Muhammad Munir Sajid, Naveed Akhtar Shad, Yasir Javed, Sadaf Bashir Khan, Zhengjun Zhang, Nasir Amin, Haifa Zhai (2020), "Preparation and characterization of Vanadium pentoxide (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) for photocatalytic degradation of monoazo and diazo dyes", *Surfaces and Interfaces*, vol. 19, p. 100502.
- [4] Gupta, Shalu and Rakesh Kumar (2024), "Enhanced photocatalytic performance of the N-rGO/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposite for efficient solar-driven water remediation", *Nanoscale*, vol. 16, pp. 6109-6131.

[5] Peng Hu, Ping Hu, Tuan Duc Vu, Ming Li, Shancheng Wang, Yujie Ke, Xianting Zeng, Liqiang Mai, Yi Long (2023), "Vanadium oxide: phase diagrams, structures, synthesis, and applications", *Chemical Reviews*, vol. 123, p. 4353–4415.

[6] Ahmed Badreldin, Muhammad Danyal Imam, Yiming Wubulikasimu, Khaled Elsaid, Aya E. Abusrafa, Perla B. Balbuena, Ahmed Abdel-Wahab (2021), "Surface microenvironment engineering of black  $V_2O_5$  nanostructures for visible light photodegradation of methylene blue", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 871, p. 159615.

[7] Aminah N. Ghulam, Otávio A. L. dos Santos, Layla Hazeem, Bianca Pizzorno Backx, Mohamed Bououdina, Stefano Bellucci (2022), "Graphene Oxide (GO) Materials—Applications and Toxicity on Living Organisms and Environment", *Journal of Functional Biomaterials*, vol. 13, p. 77.

[8] Do Quang Dat, Vo Thi Lan Phuong, Lam Van Nang, Nguyen Van Toan, Nguyen Van Duy, Nguyen Duc Hoa (2021), "Synthesis of CuO/rGO nanocomposites for carcinogenic Congo red photodegradation", *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 12, p. 045014.

[9] Deepanshu Sharma, Mohd Faraz, Dheeraj Kumar, Devender Takhar, Balaji Birajdar, Neeraj Khare (2022), "Visible light activated  $V_2O_5$ /rGO nanocomposite for enhanced photodegradation of methylene blue dye and photoelectrochemical water splitting", *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 142, p. 109657.

[10] Chu Manh Hung, Do Quang Dat, Nguyen Van Duy, Vu Van Quang, Nguyen Van Toan, Nguyen Van Hieu, Nguyen Duc Hoa (2020), "Facile synthesis of ultrafine rGO/ $WO_3$  nanowire nanocomposites for highly sensitive toxic  $NH_3$  gas sensors", *Materials Research Bulletin*, p. 110810.

[11] Samir Alghool, Hanan F. Abd El-Halim, Ayman M. Mostafa (2019), "Eco-friendly synthesis of  $V_2O_5$  nanoparticles and their catalytic activity for the degradation of 4-Nitrophenol", *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, vol. 29, p. 1324–1330.

[12] Kollur Shiva Prasad, Chandan Shivamallu, Govindaraju Shruthi, Melvin Prasad (2018), "A novel and one-pot green synthesis of vanadium oxide nanorods using a phytomolecule isolated from *phyllanthus amarus*", *ChemistrySelect*, vol. 3, p. 3860–3865.

[13] Aawani Elaheh, Memarian Nafiseh, Dizaji Hamid Rezagholipour (2019), "Synthesis and characterization of reduced graphene oxide– $V_2O_5$  nanocomposite for enhanced photocatalytic activity under different types of irradiation", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 125, pp. 8–15.

[14] Pankaj Singh Chauhan, Kuldeep Kumar, Kirtiman Singh, Shantanu Bhattacharya (2022), "Fast decolorization of rhodamine-B dye using novel  $V_2O_5$ -rGO photocatalyst under solar irradiation", *Synthetic Metals*, vol. 283, p. 116981.

[15] Quang Dat Do, Manh Hung Chu, Van Duy Nguyen, Van Nang Lam, Thi Lan Phuong Vo, Thi Minh Ngoc Le, Ngoc Tu Tran, Thi Nga Pham, Thiet Ke Nguyen, Van Duy Lai, Duc Hoa Nguyen (2023), "Hydrothermal synthesis of nanostructured  $V_2O_5$  material for photocatalytic applications: Effect of surfactants", *JST: Engineering and Technology for Sustainable Development*, vol. 33, pp. 22–28.

[16] Top Khac Le, Manil Kang, Van Tam Tran, Sok Won Kim (2019), "Relation of photoluminescence and sunlight photocatalytic activities of pure  $V_2O_5$  nanohollows and  $V_2O_5$ /RGO nanocomposites", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 100, pp. 159–166.

[17] R. Saravanan, S. Joicy, V.K. Gupta, V. Narayanan, A. Stephen (2013), "Visible light induced degradation of methylene blue using  $CeO_2/V_2O_5$  and  $CeO_2/CuO$  catalysts", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 33, no. 8, pp. 4725–4731.



[18] Devanshi Bhardwaj, Sahil Sangwan, S. A. Shivashankar, Arun M. Umarji (2022), "Microwave-assisted synthesis of reduced graphene oxide/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nano-composite as an efficient photocatalyst for dye degradation", *Bulletin of Materials Science*, vol. 45, p. 135.

[19] Amal George, S. Rahul, A. Dhayal Raj, A. Albert Irudayaraj, M. Senthilkumar, B. Natarajan, S. John Sundaram, K. Kaviyarasu (2023), "Surfactant assisted synthesis of nickel vanadium oxide nanostructures with strong visible-light-induced photocatalytic activity", *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 12, p. 100129.

[20] Sachin Shoran, Sweety Dahiya, Manju Rani, SP Nehra, Anshu Sharma, Sudesh Chaudhary (2025). "Synergistic photocatalysis of VO<sub>2</sub>-A/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites for efficient degradation of anionic and cationic dyes: towards a sustainable environmental solution", *Applied Surface Science*, vol. 684, pp. 161852.

[21] R. Sukhin Saravan, M. Muthukumaran, S.M. Mubashera, M. Abinaya, P. Varun Prasath, R. Parthiban, Faruq Mohammad, Won Chun Oh, Suresh Sagadevan (2020), "Evaluation of the photocatalytic efficiency of cobalt oxide nanoparticles towards the degradation of crystal violet and methylene violet dyes", *Optik*, vol. 207, p. 164428.

[22] Abbas H. A., Nasr Rabab A., Abu-Zurayk Rund, Al Bawab Abeer and Jamil Tarek S (2020), "Decolourization of crystal violet using nano-sized novel fluorite structure Ga<sub>2</sub>Zr<sub>2-x</sub>W<sub>x</sub>O<sub>7</sub> photocatalyst under visible light irradiation", *Royal Society Open Science*, vol. 7, no. 3, p. 191632.

