VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology

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

Original Article

Enhanced Photodegradation Ability of Antibiotics with Composite Based on V_2O_5 under Visible Light

Nguyen Thi Phuong Le Chi[1], Truong Thi Vuong[2,*], Nguyen Thi Lan[2], Truong Cong Duc[2], Truong Thanh Tam[2], Nguyen Tri Quoc[3], Nguyen Van Luong[2], Tran Thi Thu Phuong[2], Nguyen Vu Ngoc Mai[2]

[1]*Ho Chi Minh University of Natural Resources and Environment, 236B Le Van Sy, Ho Chi Minh, Vietnam*

[2]*Quy Nhon University, 170 An Duong Vuong, Quy Nhon, Vietnam*

[3]*Mientrung Industry and Trade College, 251 Nguyen Tat Thanh, Tuy Hoa, Vietnam*

Received 10th March 2024
Revised 09th April 2025; Accepted 16th April 2025

Abstract: In this paper, V_2O_5 combining with g-C_3N_4 were obtained to reduce charge recombination rate between electrons and holes in semiconductors. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) results indicated certain interaction between V_2O_5 and g-C_3N_4 in the V_2O_5/g-C_3N_4 heterojunction. In addition, the reducing in recombination of photogenerated electrons and holes was confirmed via the photoluminescence (PL) spectrum. The photocatalytic activities of the as-synthesized materials were investigated by the degradation of tetracycline hydrochloride (TC) under visible light. The V_2O_5/g-C_3N_4 heterojunction is more active than pure V_2O_5 and g-C_3N_4. The TC degradation efficiency by V_2O_5/g-C_3N_4 photocatalyst under visible light was 82.18% after 180 minutes. The improvement in photocatalytic activity of V_2O_5/g-C_3N_4 can be attributed to the reduction of recombination rate of photogenerated electron and hole pairs.

Keywords: V_2O_5, g-C_3N_4, photocatalytic activity, visible light, recombination, tetracycline hydrochloride.

* Corresponding author.
E-mail address: truongthivuong2010@gmail.com

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5617

Tăng cường khả năng phân hủy kháng sinh trong vùng ánh sánh nhìn thấy bằng vật liệu tổ hợp trên cơ sở V_2O_5

Nguyễn Thị Phương Lệ Chi[1], Trương Thị Vương[2,*], Nguyễn Thị Lan[2], Trương Công Đức[2], Trương Thanh Tâm[2], Nguyễn Trí Quốc[3], Nguyễn Văn Lượng[2], Trần Thị Thu Phương[2], Nguyễn Vũ Ngọc Mai[2]

[1]*Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh, 236B Lê Văn Sỹ, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*

[2]*Trường Đại học Quy Nhơn, 170 An Dương Vương, Thành phố Quy Nhơn, Việt Nam*

[3]*Trường Cao đẳng Công thương Miền trung, 251 Nguyễn Tất Thành, Thành phố Tuy Hòa, Việt Nam*

Nhận ngày 10 tháng 3 năm 2024
Chỉnh sửa ngày 09 tháng 4 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 16 tháng 4 năm 2025

Tóm tắt: Trong bài báo này, vật liệu V_2O_5 được biến tính bằng g-C_3N_4 nhằm hạn chế sự tái tổ hợp giữa các điện tử và lỗ trống quang sinh trong V_2O_5. Kết quả từ phổ XPS (quang điện tử tia X) cho thấy, có sự tương tác giữa V_2O_5 và g-C_3N_4 trong vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4. Đồng thời, khi biến tính V_2O_5 bằng g-C_3N_4 tạo thành vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 đã làm giảm sự tái tổ hợp giữa điện tử và lỗ trống quang sinh thông qua sự xác nhận của phổ quang phát quang (PL). Hiệu suất phân hủy tetracycline hydrochloride (TC) dưới ánh sáng nhìn thấy và được xúc tác bởi vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 là 82,18% sau 180 phút. Giá trị này cao hơn so với hiệu suất phân hủy TC trên vật liệu V_2O_5 và g-C_3N_4 trong vùng ánh sáng nhìn thấy do hạn chế được sự tái tổ hợp giữa các electron và lỗ trống quang sinh trong vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4.

Từ khóa: V_2O_5/g-C_3N_4, hoạt tính xúc tác, ánh sáng vùng nhìn thấy, tái tổ hợp, tetracycline hydrochloride.

1. Mở đầu

Hiện nay, sự tồn dư kháng sinh đang gây ra mối đe dọa nghiêm trọng đến cân bằng môi trường sinh thái, sức khỏe con người và sự kháng kháng sinh của các sinh vật. Để xử lý các chất kháng sinh, phương pháp xúc tác quang hóa dị thể đang được biết là có tiềm năng nhờ các ưu điểm về khả năng khoáng hóa, thân thiện môi trường, vật liệu xúc tác được tái sử dụng nhiều lần, có thể tận dụng được nguồn kích thích là bức xạ mặt trời đối với những vật liệu bán dẫn có giá trị năng lượng vùng cấm phù hợp với bước sóng ở vùng bức xạ khả kiến.

Gần đây, vật liệu bán dẫn xúc tác quang mới với vùng cấm có giá trị năng lượng nhỏ được quan tâm nghiên cứu [1-5]. Ưu điểm của các vật liệu này là hoạt động trong vùng ánh sáng nhìn thấy, nên khá thuận lợi để xúc tác phân hủy các chất ô nhiễm hữu cơ. Tuy nhiên, yếu điểm của nhóm vật liệu mới này là sự tái kết hợp nhanh giữa các điện tử - lỗ trống quang sinh và chỉ có điện tử ở vùng dẫn khử được O_2 thành $O_2^{\bullet-}$ hoặc lỗ trống ở vùng hóa trị oxi hóa được H_2O thành $HO^{\bullet}$. Trong số các vật liệu bán dẫn thế hệ mới, các hợp chất bán dẫn dạng oxide như V_2O_5 đã nhận được sự chú ý của nhiều nhà nghiên cứu (với giá trị năng lượng vùng cấm khoảng 2,10 eV) [6-9] nhờ hoạt tính xúc tác phân hủy cao các hợp chất hữu cơ dưới bức xạ vùng nhìn thấy và dễ tổng hợp. Yếu điểm của V_2O_5 là chỉ có lỗ trống ở vùng hóa trị oxi hoá H_2O tạo thành $^{\bullet}OH$. Do đó, các nghiên cứu biến

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: truongthivuong2010@gmail.com

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5617

tính V_2O_5 hiện nay tập trung chủ yếu vào việc tổ hợp V_2O_5 với một bán dẫn khác có năng lượng của vùng cấm nhỏ mà có thế khử ở vùng dẫn phù hợp (âm hơn so với thế khử chuẩn của $O_2/O_2^{\bullet}$) để tham gia phản ứng khử O_2 thành ion $O_2^{\bullet-}$ là tác nhân trung gian tạo gốc $HO^{\bullet}$ để phân hủy các chất hữu cơ ô nhiễm, đồng thời giảm được sự tái tổ hợp giữa các cặp điện tử - lỗ trống quang sinh dẫn đến hoạt tính xúc tác tăng [10-15]. Do vậy, trong nghiên cứu này, vật liệu V_2O_5 được biến tính bằng g-C_3N_4 nhằm phân hủy các chất kháng sinh trong nước.

2. Thực nghiệm

2.1. Tổng hợp vật liệu

2.1.1. Tổng hợp V_2O_5

Cho 0,1g ammonium metavanadate và 0,1 gam cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) hòa tan hết vào 100 mL hỗn hợp nước cất - ethanol và khuấy đều (dung dịch X). Thêm từ từ dung dịch acid nitric vào dung dịch X trong điều kiện khuấy liên tục cho đến khi pH đạt 2,5. Hỗn hợp cho vào bình thủy nhiệt (teflon), sau đó đặt vào tủ và giữ ở 160 ^oC trong 12 giờ, thu được chất rắn màu cam vàng. Chất rắn được rửa với ethanol và nước cất, đem sấy ở 80 ^oC. Kết tủa sau khi sấy được nung ở 530 ^oC trong 2 giờ, thu được vật liệu V_2O_5 [8, 16].

2.1.2. Tổng hợp g-C_3N_4

Cân 1 gam urea cho vào chén nung, đặt vào lò nung và tiến hành nung trong điều kiện yếm khí ở nhiệt độ 530 ^oC (với tốc độ gia nhiệt 5 ^oC/phút trong 2 giờ). Để nguội lò tự nhiên đến nhiệt độ phòng, thu được g-C_3N_4 màu vàng [17].

2.1.3. Tổng hợp vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4

Vật liệu V_2O_5 và g-C_3N_4 được cho vào cốc theo tỉ lệ mol V_2O_5 : g-C_3N_4 là 1,5:1. Sau đó, phân tán V_2O_5 và g-C_3N_4 trong dung môi ethannol theo tỷ lệ khối lượng V_2O_5/g-C_3N_4 (g)/thể tích ethanol (mL) = 1/20. Hỗn hợp đem siêu âm 15 phút để phân tán đều, tiếp tục khuấy hỗn hợp trong 2 giờ. Sau đó, cho bay hơi hỗn hợp ở 80 ^oC, chất rắn sau bay hơi được nung ở 530 ^oC (gia nhiệt 5 ^oC/phút) trong điều kiện yếm khí với thời gian 2 giờ, thu được V_2O_5/g-C_3N_4.

2.2. Đặc trưng vật liệu

Phương pháp XRD (D8-Advance 5005) dùng để xác định cấu trúc. Phương pháp UV-Vis-DRS (3101PC Shimadzu) để xác định đặc tính hấp thụ ánh sáng. Phương pháp XPS (Karatos Axis ULTRA) và IR (Nicolet Magna-IR 760) để phân tích liên kết giữa các nguyên tố. Phương pháp PL (Fluoromax-4, Jobin-Yvon Co, France) khảo sát sự tái kết hợp giữa các điện tử và lỗ trống quang sinh.

2.3. Thí nghiệm phân hủy TC

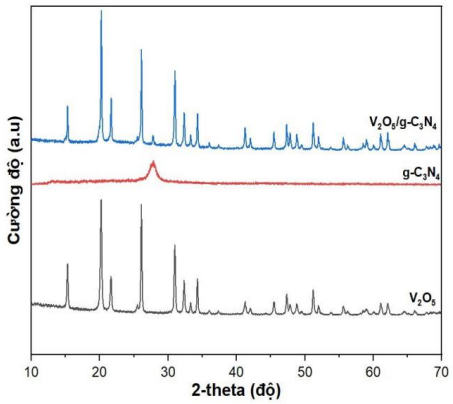
Cho 0,1 gam xúc tác vào cốc thủy tinh đã chứa 200 mL dung dịch TC nồng độ 10 mg/L, đặt cốc trên máy khuấy từ, khuấy đều cốc để sự hấp phụ và giải hấp phụ đạt cân bằng (bóng tối). Sau thời gian đạt cân bằng hấp phụ, lấy một lượng xác định dung dịch TC đem tách chất xúc tác và đo nồng độ TC còn lại. Nồng độ TC ở thời điểm này là nồng độ đầu vào khi thực hiện khảo sát hoạt tính của xúc tác. Tiếp tục khuấy đều (600 vòng/phút) hỗn dịch dưới điều kiện ánh sáng đèn led trắng (30 W) có cường độ tại bề mặt ánh sáng đèn led tiếp xúc với dung dịch là 41.200 lux (sử dụng máy đo cường độ ánh sáng LX-1010B, dựa vào bộ phận cảm biến của máy để đọc và kiểm tra mức độ cung cấp ánh sáng của đèn led trắng), bước sóng 400 < λ < 700 nm, đặt cách bề mặt dung dịch phản ứng 40 cm, nhiệt độ được duy trì ở 30 ^oC. Ứng với một thời gian nhất định, một lượng xác định dung dịch TC được đem tách chất xúc tác và đo nồng độ TC còn lại (ở bước sóng 355 nm bằng phương pháp trắc quang trên máy UV-Vis (CE-2011)).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng vật liệu

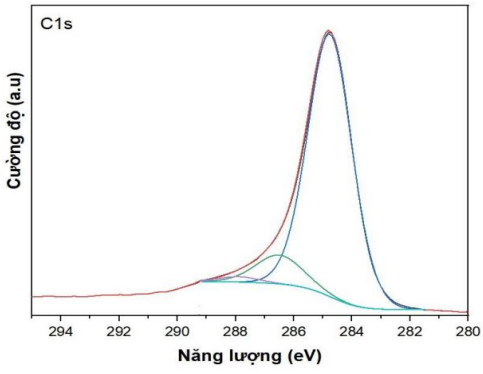
Giản đồ nhiễu xạ tia X của các vật liệu V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4 được trình bày ở Hình 1. Trên giản đồ nhiễu xạ tia X của g-C_3N_4 ở Hình 1 chỉ ra rằng, vật liệu V_2O_5 có các đỉnh nhiễu xạ ở khoảng 2θ bằng 15,1^o; 20,2^o; 26,1^o; 31^o,05 ứng với cấu trúc orthorhombic của V_2O_5 (thẻ chuẩn JCPDS 75-0457), còn xúc tác g-C_3N_4, đỉnh nhiễu xạ có cường độ khá mạnh xuất hiện tại

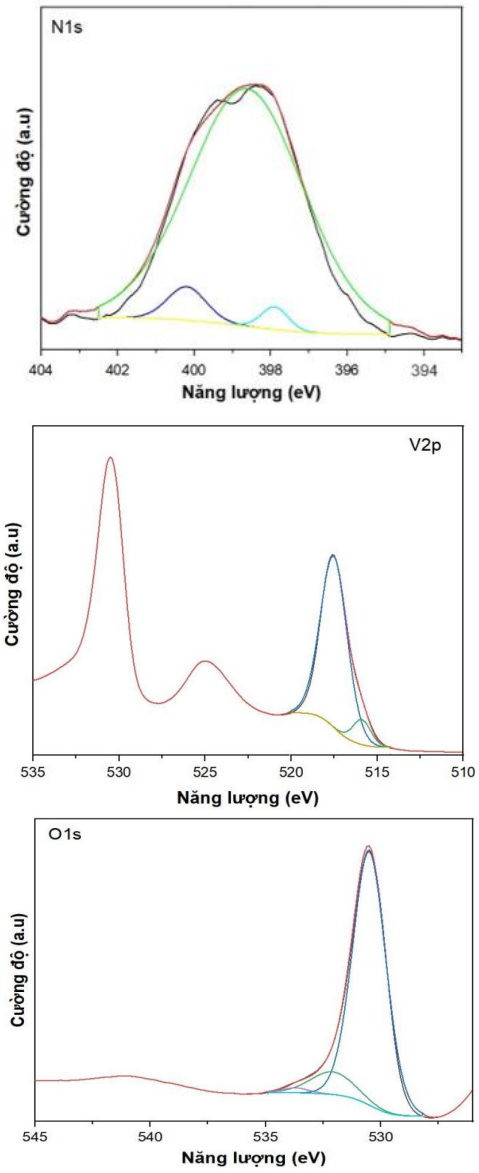
vị trí 2-theta khoảng 27,40^o được quy cho sự sắp xếp của các hệ liên hợp thơm, ứng với mặt (002) minh chứng cho cấu trúc của g-C_3N_4 (thẻ chuẩn JCPDS 87-1526). Đối với giản đồ XRD của xúc tác V_2O_5/g-C_3N_4 xuất hiện hầu hết các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của V_2O_5 và chỉ xuất hiện đỉnh nhiễu xạ ở 2θ bằng 27,4^o nhưng có cường độ thấp của g-C_3N_4.



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của các vật liệu V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4.

Trạng thái hóa học của các nguyên tố trong V_2O_5/g-C_3N_4 được phân tích bằng phương pháp phổ XPS. Trên phổ XPS (Hình 2) của C1s trong vật liệu tổ hợp V_2O_5/g-C_3N_4 có ba đỉnh phổ với giá trị năng lượng lần lượt là 284,9; 286,6 và 288,1 eV; đỉnh phổ thứ nhất có cường độ mạnh tại mức năng lượng 284,6 eV được xác định là carbon đối chứng của phép đo và của liên kết C-H, đỉnh phổ tại mức năng lượng 286,6 và 288,1eV ứng với Csp^2 (N-C=N) trong g-C_3N_4, tuy nhiên giá trị các mức năng lượng này có sự sai khác so với g-C_3N_4 tinh khiết [18].



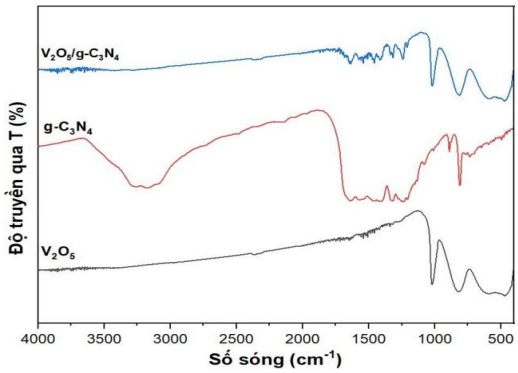


Hình 2. Phổ XPS của C1s, N1s, V2p và O1s trong vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4

Phổ XPS của N1s có đỉnh phổ có cường độ mạnh tại mức năng lượng liên kết 397,8 và 398,9 eV được xác định là của Nsp^2 (liên kết với hai nguyên tử C lân cận) và đỉnh phổ tại 400,3 eV ứng với Nsp^3 (liên kết với ba nguyên tử C lân cận) ứng với cấu tạo của g-C_3N_4 [19, 20]. Trên phổ XPS của O1s, xuất hiện đỉnh phổ có năng lượng liên kết ở 531,1 eV ứng với trạng thái O^{2-} trong V_2O_5 và một đỉnh phổ ở 532,2 eV đặc trưng cho nhóm -OH hoặc phân tử nước

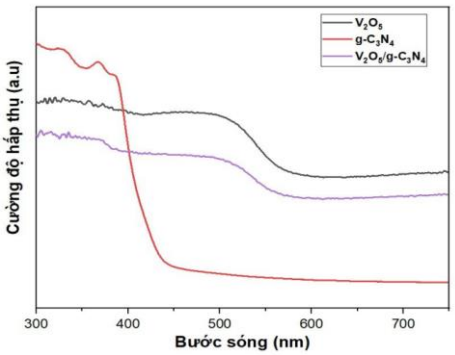
hấp phụ trên bề mặt vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 [21]. Phổ XPS của V2p xuất hiện các đỉnh phổ tại hai mức năng lượng 517,5 và 524,9 eV đặc trưng cho trạng thái $V2p_{3/2}$ và $V2p_{1/2}$ của V-V_2O_5 trong vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 là V^{5+}, giá trị này thấp hơn so với trong V_2O_5 tinh khiết [16, 21], điều này có thể do có một sự tương tác giữa V_2O_5 và g-C_3N_4 trong vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4.

Phổ IR của V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4 được thể hiện ở Hình 3. Phổ IR của g-C_3N_4 ở Hình 3 cho thấy, có các đỉnh phổ đặc trưng cho các liên kết giữa nitrogen và carbon. Đỉnh phổ ở số sóng 810,1 cm^{-1} ứng với dao động của liên kết C–N trong vòng thơm của triazin. Các đỉnh phổ có cường độ rất yếu trong khoảng 1458 - 1246 cm^{-1} được quy cho những dao động hóa trị của C–N bên ngoài của vòng thơm. Đỉnh phổ có cường độ rất thấp ở 1636 và 1570 cm^{-1} đặc trưng cho dao động hóa trị của liên kết C=N. Dải phổ có đỉnh hấp thụ ở 3177 cm^{-1} có thể là dao động của các amin sơ cấp (melamin) và thứ cấp (melem) [22, 23]. Phổ IR của V_2O_5, xuất hiện một đỉnh khá rõ nét hấp thụ ở số sóng 1004, 788 cm^{-1} lần lượt đặc trưng cho liên kết V=O và V-O-V [8, 12]. Đối với phổ IR của V_2O_5/g-C_3N_4 gần như có các đỉnh phổ ứng với V_2O_5 và g-C_3N_4.



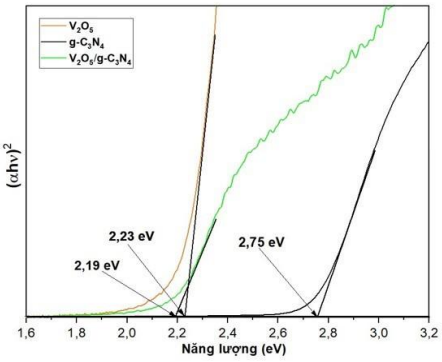
Hình 3. Phổ IR của V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4.

Từ phổ UV-Vis DRS (Hình 4) của xúc tác V_2O_5 và g-C_3N_4 cho thấy, đều xuất hiện dải phổ xuất phát từ vùng ánh sáng tử ngoại sang vùng ánh sáng khả kiến, nhưng xúc tác V_2O_5 hấp thụ ánh sáng mạnh hơn khi so với g-C_3N_4. Đối với phổ UV-Vis DRS của xúc tác V_2O_5/g-C_3N_4 gần như có bờ hấp thụ ánh sáng vùng khả kiến mạnh hơn nhiều so với xúc tác g-C_3N_4 nhưng yếu hơn V_2O_5.



Hình 4. Phổ UV-Vis-DRS của V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4.

Kết quả giá trị E_{bg} của xúc tác V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4 thu được dựa vào dữ liệu của phổ UV-Vis DRS (Bảng 1) chỉ ra rằng, giá trị E_{bg} của V_2O_5/g-C_3N_4 (2,19 eV) là gần tương đương với V_2O_5 (2,23 eV). Điều này cho thấy, khi tổ hợp vật liệu V_2O_5 và g-C_3N_4 thì gần như không có sự giảm E_{bg} so với vật liệu đơn có E_{bg} nhỏ hơn. Như vậy, cả ba vật liệu V_2O_5 và g-C_3N_4, V_2O_5/g-C_3N_4 đều có thể hoạt động tốt trong ánh sáng vùng nhìn thấy.

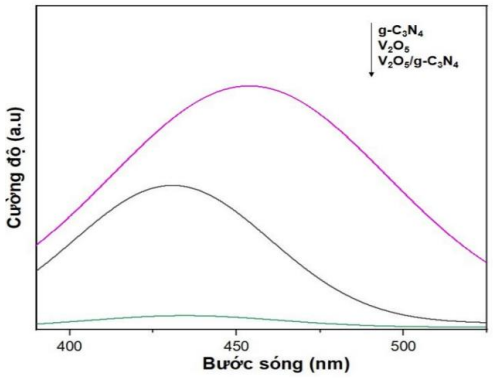


Hình 5. Sự biểu diễn hàm Kubelka-Munk phụ thuộc vào năng lượng hấp thụ ánh sáng của V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4.

Bảng 1. Giá trị năng lượng vùng cấm của các vật liệu V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4

Vật liệu	E_{bg} (eV)
g-C_3N_4	2,75
V_2O_5	2,23
V_2O_5/g-C_3N_4	2,19

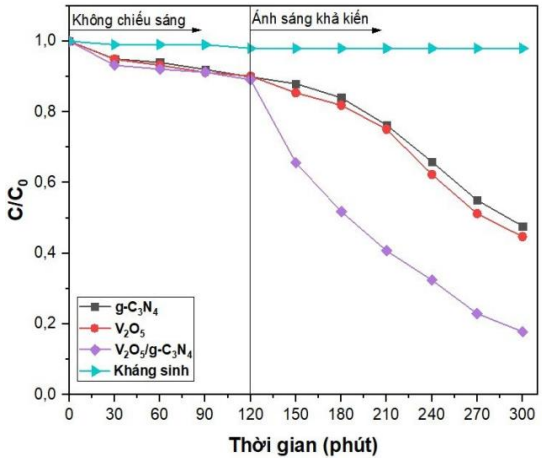
Để phân tích sự tái kết hợp giữa các điện tử và lỗ trống quang sinh trong các xúc tác V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4, phổ PL được sử dụng. Kết quả thu được từ phổ PL ở Hình 6 thể hiện sự giảm cường độ đỉnh phổ PL rõ rệt từ mẫu xúc tác g-C_3N_4, V_2O_5 đến V_2O_5/g-C_3N_4. Kết quả PL chỉ ra thứ tự tái kết hợp giữa electron và lỗ trống trong xúc các xúc tác giảm lần lượt là g-C_3N_4 > V_2O_5 > V_2O_5/g-C_3N_4. Như vậy, xúc tác V_2O_5/g-C_3N_4 đã hạn chế được sự tái tổ hợp giữa các điện tử và lỗ trống hữu hiệu hơn so với xúc tác g-C_3N_4 và V_2O_5 riêng lẻ trong vùng khảo sát.



Hình 6. Phổ quang phát quang của V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4.

3.2. Hoạt tính quang xúc tác

Để đánh giá hoạt tính của xúc tác V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4, kháng sinh TC được sử dụng phân hủy như chất ô nhiễm hữu cơ mô hình. Kết quả thực nghiệm được thể hiện ở Hình 7. Kết quả phân hủy TC ở Hình 7 cho thấy, vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 có hoạt tính cao hơn so với g-C_3N_4 và V_2O_5 đơn lẻ. Hiệu suất phân hủy TC tại 180 phút trên g-C_3N_4, V_2O_5 và V_2O_5/g-C_3N_4 lần lượt là 52,34; 55,32 và 82,18%. Như đã biết, khi hạn chế được sự tái tổ hợp giữa các electron và lỗ trống thì khả năng hoạt động quang xúc tác của vật liệu sẽ được gia tăng đáng kể. Điều này có thể được giải thích là khi biến tính V_2O_5 với g-C_3N_4 tạo thành vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 sẽ tạo ra được sự chuyển dịch điện tử theo sơ đồ dạng Z. Khi vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 được kích hoạt bằng bức xạ khả kiến, electron của V_2O_5 phân tách khỏi vùng hóa trị nhảy lên vùng dẫn, khi đó điện tử ở vùng dẫn của V_2O_5 có thể nhảy xuống vùng hóa trị của g-C_3N_4 nên hạn chế được sự tái kết hợp giữa electron - lỗ trống theo dạng Z, kết quả việc tổ hợp hai vật liệu bán dẫn trên cơ sở được đề cập trong nghiên cứu này đã làm giảm được sự tái kết hợp giữa electron và lỗ trống là phù hợp với công bố của nhiều tác giả [12, 13]. Do đó, sự tổ hợp V_2O_5 với g-C_3N_4 đã làm tăng thời gian sống của điện tử và lỗ trống dẫn đến hiệu quả phân hủy TC của xúc tác V_2O_5/g-C_3N_4 tăng lên.



Hình 7. Sự thay đổi C/C_O của TC phụ thuộc thời gian của xúc tác V_2O_5, g-C_3N_4 và V_2O_5/g-C_3N_4.

4. Kết luận

Vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 đã được tổng hợp thành công. V_2O_5/g-C_3N_4 có bờ hấp thụ ánh sáng vùng khả kiến mạnh hơn nhiều so với xúc tác g-C_3N_4 nhưng yếu hơn V_2O_5. Khả năng hạn chế sự tái kết hợp giữa electron-lỗ trống trong vật liệu V_2O_5/g-C_3N_4 là tốt hơn so với V_2O_5 và g-C_3N_4 đơn lẻ. Sự phân hủy TC trên xúc tác V_2O_5/g-C_3N_4 (hiệu suất đạt 82,18%) dưới tác dụng của bức xạ vùng nhìn thấy là cao hơn so với xúc tác V_2O_5 (55,32%) và g-C_3N_4 (52,34%).

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong khuôn khổ đề tài cấp Nhà nước, mã số ĐTĐL.CN.33/21.

Tài liệu tham khảo

[1] J. Feng, M. Cao, L. Wang, X. Ran, B. Xiao, J. Zhu, Z. Liu, X. Xi, G. Feng, R. Li, Ultra-thin $DyFeO_3$/g-C_3N_4 p-n Heterojunctions for Highly Efficient Photo-Fenton Removal of Oxytetracycline and Antibacterial Activity, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 939, 2023, pp. 168789.

[2] S. Liu, C. Wang, Y. Song, B. Yan, B. Ai, K. Pan, L. Zhang, Fabrication of a Hybrid Phase TiO_2/g-C_3N_4 Heterojunction Composite with Enhanced Adsorption and Photocatalytic Degradation of MB under Vsible Light, New J. Chem., Vol. 47, 2023, pp. 8170-8181.

[3] M. L. Matias, A. S. R. Machado, J. Rodrigues, T. Calmeiro, J. Deuermeier, A. Pimentel, E. Fortunato, R. Martins, D. Nunes, Microwave Synthesis of Visible-Light-Activated g-C_3N_4/TiO_2 Photocatalysts, Nanomaterials, Vol. 13, No. 6, 2023, pp. 1090.

[4] H. Khan, I. H. Lone, S. E. Lofland, K. V. Ramanujachary, T. Ahmad, Exploiting Multiferroicity of $TbFeO_3$ Nanoparticles for Hydrogen Generation through Photo/Electro/Photoelectro-catalytic Water Splitting, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, No. 14, 2023, pp. 5493-5505.

[5] M. Baladi, M. Amiri, M. Amirinezhad, W. K. Abdulsahib, F. Pishgouii, Z. Golshani, M. S. Niasari, Green Synthesis and Characterization of Terbium Orthoferrite Nanoparticles Decorated with g-C_3N_4 for Antiproliferative Activity Against Human Cancer Cell Lines (Glioblastoma, and Neuroblastoma), Arabian Journal of Chemistry, Vol. 16, No. 7, 2023, pp. 104841.

[6] P. Hu, P. Hu, T. D. Vu, M. Li, S. Wang, Y. Ke, X. Zeng, L. Mai, Y. Long, Vanadium Oxide: Phase Diagrams, Structures, Synthesis, and Applications, Chem. Rev., Vol. 123, No. 8, 2023, pp. 4353-4415.

[7] Y. S. Thakur, A. D. Acharya, Bhawna, B. Singh, Preparation and Characterization of Vanadium Oxide (V_2O_5) Ssheet Like Nanostructure, AIP Conf. Proc., Vol. 2800, 2023, pp. 020051.

[8] R. T. Rasheed, H. S. Mansoor, T. A. Abdullah, T. Juzsakova, N. A. Jammal, A. D. Salman, R. R. A. Shaikhly, P. C. Le, E. Domokos, T. A. Abdulla, Synthesis, Characterization of V_2O_5 Nanoparticles and Determination of Catalase Mimetic Activity by New Colorimetric Method, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 145, 2021, pp. 297-307.

[9] Y. Zou, C. Wang, H. Chen, H. Ji, Q. Zhu, W. Yang, W. Zhu, Scalable and Facile Synthesis of V_2O_5 Nanoparticles Via Ball Milling for Improved Aerobic Oxidative Desulfurization, Green Energy & Environment, Vol. 6, No. 2, 2021, pp. 169-175.

[10] S. V. P. Vattikuti, P. A. K. Reddy, J. Shim, Byon, Synthesis of Vanadium-pentoxide-Supported Graphitic Carbon Nitride Heterostructure and Studied their Hydrogen Evolution Activity under Solar Light, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 29, No. 6, 2018.

[11] V. V. Pham, H. H. Tran, T. M. Cao, V_2O_5 Nanorod-Loaded g-C_3N_4 Sheets for Efficient Photocatalytic Removal of NO and Minimal NO_2 Yield under Visible Light, Energy Fuels, Vol. 37, No. 17, 2023, pp. 13241-13249.

[12] Y. N. Zang, S. S. Yang, J. Ding, S. Y. Zhao, C. X. Chen, L. He, N. Q. Ren, A Biochar-promoted V_2O_5/g-C_3N_4 Z-Scheme Heterostructure for Enhanced Simulated Solar Lightdriven Photocatalytic Activity, RSC Adv., Vol. 11, 2021, pp. 15106.

[13] X. Zhang, X. Jia, P. Duan, R. Xia, N. Zhang, B. Cheng, Y. Zhang, V_2O_5/P-g-C_3N_4 Z-scheme Enhanced Heterogeneous Photocatalytic Removal of Methyl Orange from Water under Visible Light Irradiation, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 608, 2021, pp. 125580-125597.

[14] S. Vignesh, S. Suganthi, M. Srinivasan, A. Tamilmani, J. K. Sundar, S. Gedi, B. Palanivel, S. F. Shaikh, M. Ubaidullah, Md. K. Raza, Investigation of Heterojunction Between α-Fe_2O_3/V_2O_5 and g-C_3N_4 Ternary Nanocomposites for Upgraded Photo-degradation Performance of Mixed Pollutants: Efficient dual Z-scheme Mechanism, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 902, 2022, pp. 163705.

[15] A. Kumar, S. K. Sharma, G. Sharma, M. Naushad, F. J. Stadler, CeO_2/g-C_3N_4/V_2O_5 Ternary Nano Hetero-structures Decorated with CQDs for Enhanced Photo-Reduction Capabilities under Different Light Sources: Dual Z-scheme Mechanism, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 838, 2020, pp. 155692.

[16] N. Asim, S. Radiman, M. A. Yarmo, M. S. Banaye Golriz, Vanadium Pentoxide: Synthesis and Characterization of Nanorod and Nanoparticle V_2O_5 Using CTAB Micelle Solution, Microporous Mesoporous Mater, Vol. 120, 2009, pp. 397-401.

[17] S. Sun, J. Li, J. Cui, X. Gou, Q. Yang, S. Liang, J. Zhang, Constructing Oxygen-doped g-C_3N_4 Nanosheets with an Enlarged Conductive Band Edge for Enhanced Visible-light-driven Hydrogen Evolution, Inorganic Chemistry Frontiers, Vol. 5, No. 7, 2018, pp. 1721-1727.

[18] J. Liu, T. Zhang, Z. Wang, G. Dawson, W. Che, Simple Pyrolysis of Urea into Graphitic Carbon Nitride with Recyclable Adsorption and Photocatalytic Activity, Journal of Materials Chemistry, Vol. 21, 2011, pp. 14398.

[19] L. Jia, H. Wang, D. Dhawale, C. Anand, M. A. Wahab, Q. Ji, A. Vinu, Highly Ordered Macro-Mesoporous Carbon Nitride Film for Selective Detection of Acidic/basic Molecules, Chem. Commun., Vol. 50, No. 45, 2014, pp. 5976-5979.

[20] J. R. Zhang, Y. Ma, S. Y. Wang, J. Ding, B. Gao, E. Kan, W. Hua, Accurate K-edge X-ray Photoelectron and Absorption Spectra of g-C_3N_4 Nanosheets by First-principles Simulations and Reinterpretations, Phys. Chem. Chem. Phys., Vol. 21, 2019, pp. 22819-22830.

[21] Shawky, S. M. Albukhari, M. S. Amin, A. I. Zaki, Mesoporous V_2O_5/g-C_3N_4 Nanocomposites for Promoted Mercury (II) Ions Reduction Under Visible Light, Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, Vol. 31, No. 11, 2021, pp. 4209-4221.

[22] Y. Wang, X. Wang, M. Antonietti, Polymeric Graphitic Carbon Nitride as a Heterogeneous Organocatalyst: From Photochemistry to Multipurpose Catalysis to Sustainable Chemistry, Angewandte Chemie International Edition, Vol. 51, 2012, pp. 68-89.

[23] S. Zuluaga, L. H. Liu, N. Shafiq, S. M. Rupich, J. F. Veyan, Y. J. Chabal T. Thonhauser, Structural Band-gap Tuning in g-C_3N_4, Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 17, No. 2, 2015, pp. 957-962.