

Nghiên cứu tổng hợp vật liệu composite $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ cho quá trình quang xúc tác phân hủy rhodamine BSynthesis of $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ composite for photocatalytic degradation of rhodamine BNguyễn Thị Lan^{1,*}, Phan Thị Thùy Trang¹, Nguyễn Hồng Liên^{2,*}¹ Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Quy Nhơn² Trường Hóa và khoa học sự sống, Đại học Bách Khoa Hà Nội*Email: nguyenthilan@qnu.edu.vn, lien.nguyenhong@hust.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 22/3/2024

Accepted: 22/5/2024

Published: 30/06/2024

Keywords:

 SiO_2 ; $\text{g-C}_3\text{N}_4$; Rhodamine B;
Photocatalytic

ABSTRACT

In this study, a visible-light-driven $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ composite was prepared by heating a mixture of SiO_2 and urea. The products were characterized by X-ray diffraction (XRD), infrared spectra (IR), scanning electron microscopy (SEM), and ultraviolet–visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis DRS). Results indicate that the composite only contained SiO_2 and $\text{g-C}_3\text{N}_4$, and the $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ composite had higher photocatalytic activities in the degradation of rhodamine B (82.2%) compared to the pristine $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (43.9%) under visible light. The $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ composite is a promising new material for the photodegradation of organic pollutants in wastewater due to its high photocatalytic performance, low cost, and convenient collection for reuse.

1. Giới thiệu chung

Với sự phát triển của đất nước, không thể không kể đến sự góp sức của ngành khoa học và công nghệ. Tuy nhiên, những hệ quả mà nó để lại cũng là vấn đề nan giải, đòi hỏi chúng ta phải giải quyết như: sự ô nhiễm nghiêm trọng không khí, đất và đặc biệt là nguồn nước. Trong đó, phải kể đến thuốc nhuộm hữu cơ là chất gây ô nhiễm nguồn nước phổ biến, đóng góp tới 0,7 triệu tấn sản lượng toàn cầu hàng năm. Các ngành dệt may, thực phẩm, mỹ phẩm, thuốc nhuộm tóc, da đã tiêu thụ gần 0,28 triệu tấn thuốc nhuộm hữu cơ trên toàn thế giới. Thuốc nhuộm ức chế quá trình quang hợp của thủy sinh và làm cạn kiệt oxy hòa tan, dẫn đến độc tính đối với hệ thực vật, động vật và con người. Lấy ví dụ về thuốc nhuộm nhóm azo, nếu bị phân hủy trong điều kiện kỵ khí, nó sẽ tạo ra các amin thơm khá độc hại, gây ung thư và gây đột biến

[1]. Để loại bỏ các chất ô nhiễm này, người ta sử dụng phương pháp quang xúc tác với chất xúc tác là các chất bán dẫn. Phân hủy quang xúc tác là một quá trình hóa lý thu hút nhiều sự chú ý do khả năng xử lý hiệu quả cao trong nước hoặc trong môi trường lỏng.

Graphitic carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) là một chất bán dẫn polymer hữu cơ không kim loại, có cấu trúc như graphene đã thu hút nhiều sự chú ý trong việc ứng dụng làm xúc tác quang phân hủy các chất hữu cơ gây ô nhiễm dưới vùng ánh sáng khả kiến. Vật liệu này có nhiều lợi thế như năng lượng vùng cấm khoảng 2,7 eV, khả năng sản xuất trên quy mô lớn, giá thành hợp lý, điều chế dễ dàng, độ ổn định hóa học cao, thân thiện với môi trường nên được sử dụng phổ biến và rộng rãi [2]. Tuy nhiên, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ có hoạt tính quang xúc tác thấp vì nó có diện tích bề mặt nhỏ, dễ tái hợp electron và lỗ trống quang sinh dẫn đến hiệu suất xúc tác quang thấp. Để khắc phục nhược điểm này, nhiều phương

pháp được áp dụng để tăng hoạt tính quang xúc tác của g-C₃N₄. Các nhà khoa học đã biến tính g-C₃N₄ với nhiều phương pháp khác nhau như pha tạp kim loại (như Au, Ag...) [3], pha tạp phi kim (như O, S, P...) [4] hay là phương pháp ghép để tạo vật liệu composite (như WO₃ [5], TiO₂ [6], ZnO [7],...).

Các hạt nano SiO₂ ổn định, có giá trị, giá thành thấp đã được quan tâm rất nhiều trong các lĩnh vực khác nhau [2]. SiO₂ là một chất cách điện, hầu như không có hoạt tính quang xúc tác do đặc tính nội tại của nó và thường sử dụng làm đế để tăng diện tích bề mặt của chất xúc tác [8]. Bên cạnh đó, trạng thái bề mặt của chất cách điện SiO₂ có thể thúc đẩy sự di chuyển của các hạt mang điện được tạo ra dẫn đến việc tăng cường khả năng quang oxy hóa của g-C₃N₄. Do vậy, khi có sự kết hợp với g-C₃N₄ sẽ làm phân tán các hạt nano SiO₂ trên bề mặt vật liệu, làm giảm đáng kể sự kết tụ của các hạt SiO₂. Chính điều này đã cải thiện đáng kể hiệu quả quang xúc tác vật liệu.

Trong nghiên cứu này, sự kết hợp giữa vật liệu SiO₂ và g-C₃N₄ bằng phương pháp nung đơn giản, hiệu quả khắc phục được các nhược điểm của mỗi vật liệu và tạo ra vật liệu composite có hoạt tính quang xúc tác tốt cho quá trình phân hủy chất màu RhB dưới vùng ánh sáng khả kiến.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất

Các hóa chất được sử dụng trong nghiên cứu này đều được mua từ hãng Sigma Aldrich (Đức) bao gồm: CTAB (Hexadecyltrimethylammoniumbromide) ([C₁₆H₃₃)N(CH₃)₃]Br ≥ 99,0%), Ethanol (C₂H₅OH ≥ 99,5%), Ammonia (NH₃ ≥ 99,0%), TEOS (Tetraethyl orthosilicate) (C₈H₂₀O₄Si ≥ 99,5%), Urea (CON₂H₄ ≥ 99,0%), Rhodamine B (C₂₈H₃₁ClN₂O₃, 99,0%).

Phương pháp tổng hợp vật liệu

Tổng hợp SiO₂: Vật liệu SiO₂ được tổng hợp theo quy trình sau: cân 0,16 gam hexadecyl trimetyl amoni bromua (CTAB) cho vào 50 mL nước cất, sau đó cho thêm 15 mL ethanol và 1 mL dung dịch amonia thêm vào dung dịch. Khuấy trong 0,5 giờ, cho 1 mL tetraetyl orthosilicate (TEOS) vào dung dịch từng giọt một trong khi khuấy trong 24 giờ. Sản phẩm thu được được rửa bằng nước cất, sau đó rửa với ethanol trong ba lần, sấy trong 24 giờ ở 60 °C, ký hiệu SiO₂.

Tổng hợp g-C₃N₄: Nghiền 10 gam urea cho vào cốc sứ, bọc kín bằng giấy nhôm, nung trong môi trường khí trơ ở nhiệt độ 550 °C trong 1 giờ. Để nguội đến nhiệt độ phòng, nghiền và rửa mẫu bằng nước cất cho đến

trung tính. Sản phẩm thu được sấy ở 80 °C trong 12 giờ và được ký hiệu là CN.

Tổng hợp vật liệu composite SiO₂/g-C₃N₄: Quy trình tổng hợp vật liệu SiO₂/g-C₃N₄: Trộn 0,1 gam SiO₂ và 3 gam bột urea rồi nghiền mịn. Cho hỗn hợp vào cốc sứ, nung trong môi trường khí trơ Ar ở nhiệt độ 550 °C trong 1 giờ. Để nguội đến nhiệt độ thường, nghiền mịn và rửa mẫu bằng nước cất cho đến trung tính. Mẫu được sấy ở 80 °C trong 12 giờ và ký hiệu là SiO₂/CN.

Phương pháp đặc trưng

Nhiễu xạ tia X (XRD) của các mẫu được đo trên máy Bruker D8 Advance, ống phát tia X bằng Cu có bước sóng λ = 1,540 Å, điện áp 30 kV, cường độ dòng ống phát 0,01 A. Phổ hồng ngoại (IR) của mẫu vật liệu được ghi trên máy GX - PerkinElmer. Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) được đo trên máy Nova Nano SEM 450, phản xạ khuếch tán tử ngoại khả kiến (UV-Vis DRS - Shimadzu UV-2600). Nồng độ dung dịch RhB được xác định bằng phương pháp đo quang trên máy UV-vis Jenway 6800.

Khảo sát hoạt tính xúc tác quang

Để đánh giá hoạt tính quang xúc tác của các vật liệu, rhodamine B (RhB) được chọn làm chất ô nhiễm hữu cơ. Lấy 0,1 gam mẫu SiO₂/g-C₃N₄ được phân tán trong 100 mL dung dịch RhB 10 mg/L, dung dịch được khuấy liên tục bằng máy khuấy từ 60 phút trong bóng tối để đạt được trạng thái cân bằng hấp phụ - giải hấp phụ. Sau khoảng thời gian này, dung dịch được chiếu xạ bằng ánh sáng đèn LED 30W – 220V. Sự suy giảm nồng độ RhB được theo dõi sau các khoảng thời gian chiếu sáng mỗi 10 phút. Nồng độ dung dịch RhB của quá trình quang xúc tác được xác định dựa vào đường chuẩn thiết lập bởi mối quan hệ giữa độ hấp thụ theo nồng độ RhB trên máy UV-vis Jenway 6800, tại bước sóng 553 nm [9].

Hiệu suất phân hủy RhB của các vật liệu được xác định theo công thức:

$$H = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

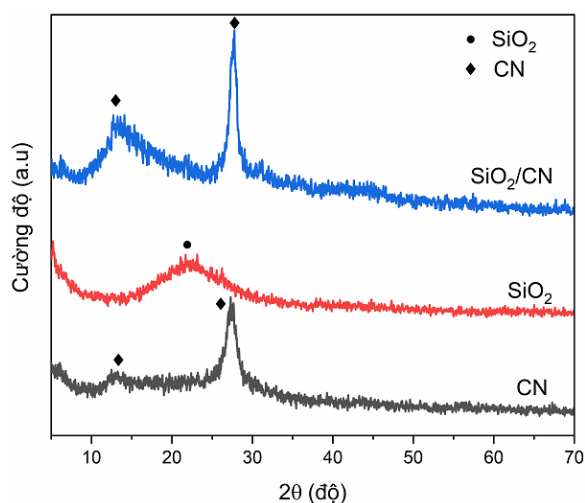
trong đó, C₀ là nồng độ đầu của RhB tại thời điểm đạt cân bằng hấp phụ - giải hấp phụ và C_t là nồng độ RhB tại từng thời điểm khảo sát.

3. Kết quả và thảo luận

Đặc trưng vật liệu

Cấu trúc tinh thể và thành phần pha của vật liệu nanocomposite SiO₂, g-C₃N₄ (CN) và SiO₂/g-C₃N₄ (SiO₂/CN) được tổng hợp được thể hiện trong hình 1. Kết quả ở Hình 1 cho thấy mẫu vật liệu composite

SiO₂/CN thể hiện đầy đủ các pic đặc trưng của cả hai vật liệu đơn chất g-C₃N₄ và SiO₂. Trong đó, với SiO₂ có pic ở 23° và không thể hiện rõ ràng trong mẫu composite là do cấu trúc vô định hình của SiO₂. Hai pic đặc trưng tại 2θ = 27,4° có cường độ mạnh và 2θ = 13° yếu hơn tương ứng với mặt phẳng (002) và (100) của g-C₃N₄ [10]. Cụ thể, đỉnh 2θ = 13° có thể được quy cho các lớp xếp chồng cấu trúc trong mặt phẳng dựa trên cấu trúc tri-s-triazine (s-heptazine) của g-C₃N₄, còn đỉnh nhiễu xạ mạnh ở vị trí tại 2θ = 27,3° là kết quả của sự xếp chồng giữa các mặt phẳng của các đơn vị thơm liên hợp của g-C₃N₄ [11].



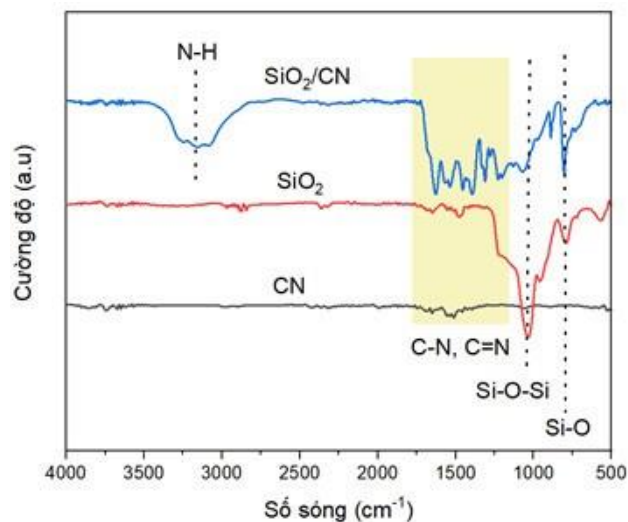
Hình 1: Giảm đồ XRD của các vật liệu CN, SiO₂ và composite SiO₂/CN

Có thể nói rằng sự hiện diện của các đỉnh nhiễu xạ ở khoảng 13° và 27,4° là dấu hiệu cho thấy sự hình thành của g-C₃N₄ với pha tri-s-triazine thu được thông qua quá trình nung tiền chất urea ở nhiệt độ 550 °C trong thời gian 1 giờ. Kết quả từ giảm đồ XRD cũng cho thấy việc đưa các hạt SiO₂ lên g-C₃N₄ không làm thay đổi cấu trúc tinh thể của g-C₃N₄ nhưng độ kết tinh của vật liệu giảm [12].

Các đặc trưng liên kết của vật liệu được đặc trưng bằng phổ hồng ngoại IR, kết quả được trình bày như Hình 2.

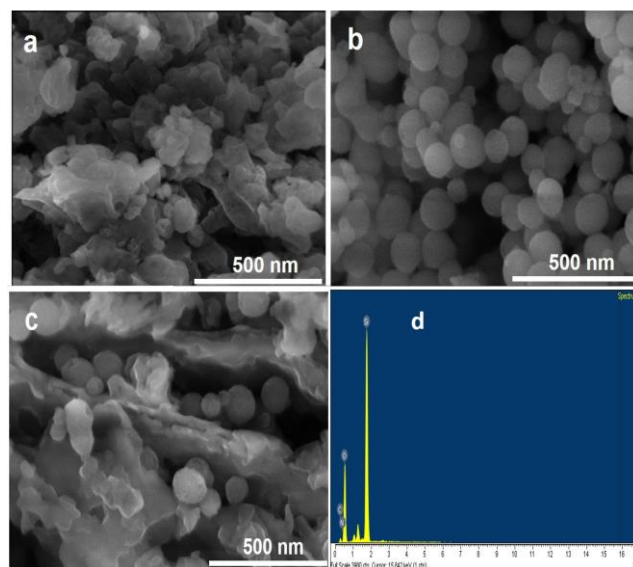
Kết quả ở Hình 2 cho thấy trên phổ IR của mẫu SiO₂ xuất hiện pic mạnh trong phạm vi số sóng 1086 cm⁻¹ cho thấy sự hiện diện của các liên kết Si-O-Si phù hợp với lớp silicon dioxide. Đỉnh pic ở 796 cm⁻¹ được gán cho dao động kéo dài đối xứng Si-O [2]. Quan sát các đỉnh pic của g-C₃N₄ trong khoảng 1100 – 1750 cm⁻¹ tương ứng với các dao động kéo giãn C-N và C=N thơm. Hơn nữa, đỉnh pic quan sát được ở khoảng 810 cm⁻¹ được cho là có sự xuất hiện dao động của các đơn vị s-triazine. Các đỉnh pic rộng ở 3700 - 3500 cm⁻¹ được gán cho các dao động giãn O-H từ H₂O bị hấp

phụ. Mẫu composite SiO₂/CN xuất hiện đầy đủ các liên kết đặc trưng của SiO₂ và g-C₃N₄. Bên cạnh đó, với mẫu composite còn xuất hiện ở dải bước sóng rộng từ 3000 – 3500 cm⁻¹ thể hiện ngoài sự có mặt của liên kết nhóm -OH của các phân tử nước bị hấp phụ thì còn có liên kết N-H có trong vật liệu [13].



Hình 2: Phổ IR của các vật liệu CN, SiO₂ và composite SiO₂/CN

Các mẫu vật liệu CN; SiO₂ và composite SiO₂/CN đã tổng hợp được quan sát hình thái cấu trúc bề mặt theo phương pháp hiển vi điện tử quét, kết quả ảnh SEM được thể hiện trên Hình 3.

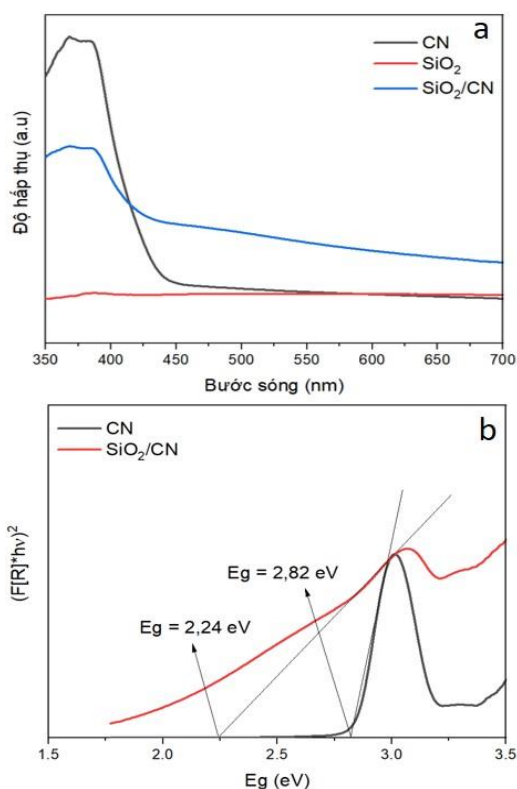


Hình 3: Ảnh SEM của các vật liệu CN (a); SiO₂ (b) và composite SiO₂/CN (c) và phổ EDX của mẫu vật liệu SiO₂/CN (d)

Như được hiển thị trong Hình 3a, mẫu g-C₃N₄ ban đầu có cấu trúc dạng tấm điển hình, được hình thành thông qua việc tổng hợp các hạt g-C₃N₄ lớn. Ảnh SEM của SiO₂ (Hình 3b) cho thấy cấu trúc dạng hình cầu

nano đồng nhất và hạt SiO_2 này có bề mặt nhẵn mịn. Hình 3c hiển thị ảnh SEM điển hình của composite $\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$, kết quả cho thấy vật liệu composite vẫn giữ nguyên hình thái dạng hạt hình cầu của các hạt SiO_2 xen kẽ với các lớp xếp chồng của $\text{g-C}_3\text{N}_4$. Điều này cho thấy có sự liên kết giữa các hạt SiO_2 với các lớp $\text{g-C}_3\text{N}_4$ khi hình thành composite SiO_2/CN . Kết quả trên phổ EDX (hình 3d) cũng cho thấy có sự xuất hiện và thành phần của các nguyên tố Si, O, N, C có mặt ở trong vật liệu composite SiO_2/CN lần lượt là 17,64; 60,08; 8,74 và 13,54%.

Tính chất hấp thụ quang của các mẫu vật liệu được khảo sát bằng phương pháp phổ phản xạ khuếch tán tử ngoại-khả kiến (UV-Vis DRS) và kết quả được thể hiện ở Hình 4a.



Hình 4: Phổ UV-Vis DRS (a) và năng lượng vùng cấm được xác định theo hàm Kubelka-Munk (b) của các mẫu vật liệu

Kết quả ở Hình 4a cho thấy vật liệu SiO_2 hấp thụ ánh sáng trong vùng UV [14]. Đối với vật liệu $\text{g-C}_3\text{N}_4$ cho thấy bờ hấp thụ ở khoảng 438 nm, điều này thể hiện vật liệu hấp thụ trong vùng ánh sáng khả kiến [15]. Khi các vật liệu đơn SiO_2 kết hợp với $\text{g-C}_3\text{N}_4$ tạo thành composite cho thấy bờ hấp thụ của vật liệu chuyển về bước sóng hấp thụ ánh sáng trong vùng khả kiến và khả năng hấp thụ tốt hơn so với mẫu đơn chất là $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

Từ kết quả đo phổ UV-Vis DRS, năng lượng vùng cấm của các mẫu vật liệu cũng được xác định theo hàm

Kubelka-Munk được trình bày ở Hình 4b. Kết quả cho thấy vật liệu CN và SiO_2/CN có năng lượng vùng cấm lần lượt là 2,82 và 2,24 eV. Và sau khi phân tích theo hàm Kubelka-Munk thì năng lượng vùng cấm của mẫu composite SiO_2/CN giảm so với mẫu CN đơn chất. Điều này có thể kết luận rằng đã cải thiện một phần nào về sự tái tổ hợp giữa electron – lỗ trống quang sinh của vật liệu composite SiO_2/CN .

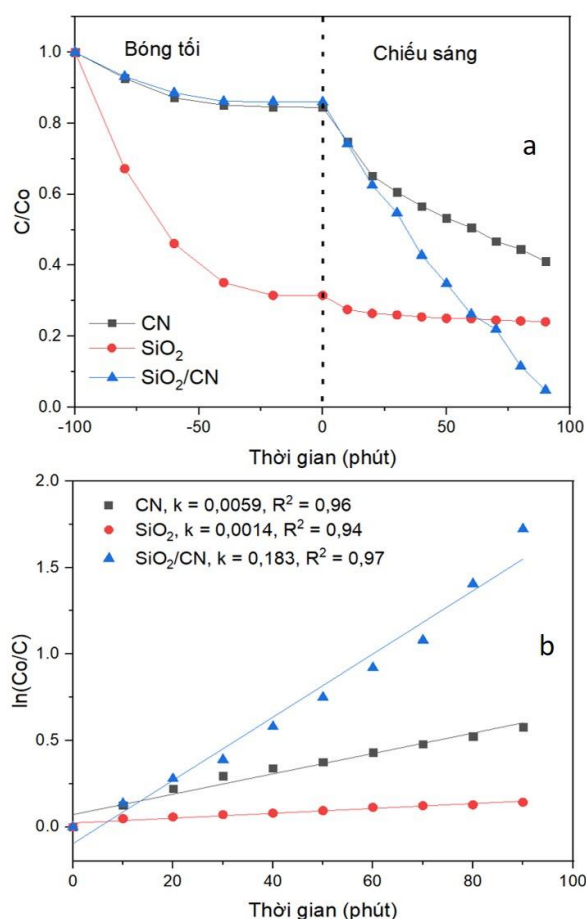
Từ một vật liệu SiO_2 đơn chất có năng lượng vùng cấm rất lớn (khoảng 9,0 eV), hấp thụ ánh sáng chủ yếu trong vùng tử ngoại và gần như không có hiệu quả quang xúc tác nhưng khi có sự kết hợp với một vật liệu khác là $\text{g-C}_3\text{N}_4$ đã khắc phục được nhược điểm của SiO_2 một cách đáng kể. Để hiểu rõ điều này một cách cụ thể, các vật liệu được sử dụng làm chất xúc tác phân hủy chất màu RhB trong vùng ánh sáng khả kiến.

Khảo sát hoạt tính quang xúc tác của vật liệu

Hoạt tính quang xúc tác của vật liệu CN, SiO_2 và composite SiO_2/CN được thử nghiệm cho quá trình phân hủy RhB dưới đèn LED (ánh sáng khả kiến), với nồng độ ban đầu là 10 mg/L. Các mẫu vật liệu được hấp phụ trong bóng tối với thời gian là 60 phút để đạt cân bằng hấp phụ bão hòa trước khi thực hiện quá trình quang xúc tác. Kết quả khảo sát hoạt tính xúc tác của vật liệu được thể hiện trên Hình 5.

Quan sát kết quả ở Hình 5a cho thấy, sau 120 phút thực hiện phản ứng phân hủy RhB dưới vùng ánh sáng khả kiến, hiệu suất xử lý RhB trên các mẫu xúc tác lần lượt là 7,3%; 43,9% và 82,2% tương ứng với các mẫu SiO_2 , CN và SiO_2/CN . So với các mẫu đơn chất thì mẫu composite thể hiện khả năng quang xúc tác cao hơn nhiều. Điều này càng khẳng định việc tạo composite đã cải thiện đáng kể hiệu suất quang xúc tác của vật liệu do hiệu ứng hiệp trợ giữa việc sử dụng đồng thời giữa SiO_2 và $\text{g-C}_3\text{N}_4$ đã làm tăng phân bố các vị trí hoạt tính xúc tác của vật liệu, tăng tốc độ truyền điện tích, và khắc phục nhược điểm tái tổ hợp nhanh của electron – lỗ trống quang sinh tạo ra trong quá trình quang xúc tác của các chất bán dẫn thông thường.

Động học của quá trình quang xúc tác và hằng số tốc độ của phản ứng phân hủy RhB cũng là một tiêu chí quan trọng để đánh giá hoạt tính xúc tác của vật liệu. Để thực hiện đánh giá này, mô hình Langmuir - Hinshelwood được lựa chọn để áp dụng. Hình 5b biểu diễn sự phụ thuộc tuyến tính của $\ln(C_0/C)$ vào thời gian phản ứng của các mẫu vật liệu.



Hình 5: Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc C/C_0 của dung dịch RhB (a) và mô hình Langmuir – Hinshelwood (b) theo thời gian chiếu sáng của các mẫu vật liệu CN, SiO_2 và composite SiO_2/CN

Kết quả cho thấy sự phù hợp quá trình quang xúc tác của các mẫu đối với mô hình đã áp dụng. Hằng số tốc độ tương ứng với quá trình quang xúc tác của từng mẫu được thống kê ở Bảng 1.

Bảng 1: Dữ liệu của các vật liệu CN, SiO_2 và SiO_2/CN thu được từ mô hình động học Langmuir – Hinshelwood

Mẫu	Hằng số tốc độ k (phút ⁻¹)	Hệ số tương quan R^2
CN	0,0059	0,96
SiO_2	0,0014	0,94
SiO_2/CN	0,183	0,97

Từ các giá trị ở Bảng 1 cho thấy vật liệu SiO_2/CN có hằng số tốc độ phản ứng cao nhất ($k = 0,183$ phút⁻¹), khẳng định hiệu ứng hiệp trợ giữa SiO_2 và CN làm nâng cao hiệu quả quang xúc tác của vật liệu một cách đáng kể.

4. Kết luận

Vật liệu composite SiO_2/CN được tổng hợp bằng phương pháp xử lý nhiệt từ các tiền chất urea và SiO_2 . Composite SiO_2/CN thể hiện hiệu quả quang xúc tác (82,2%) cao hơn so với các đơn chất SiO_2 (7,3%) và CN (43,9%) cho quá trình phân hủy chất màu RhB dưới vùng ánh sáng khả kiến. Vật liệu composite đã khắc phục được nhược điểm của các đơn chất SiO_2 và g- C_3N_4 nhờ khả năng giảm tốc độ tái tổ hợp electron – lỗ trống quang sinh và mở rộng vùng hoạt động quang về vùng ánh sáng có năng lượng thấp đó là năng lượng ánh sáng mặt trời. Điều này mở ra hướng ứng dụng mới của vật liệu SiO_2/CN vào lĩnh vực quang xúc tác trong việc xử lý hợp chất màu hữu cơ khó phân hủy trong môi trường nước.

Tài liệu tham khảo

1. Md. Ahmaruzzaman, Soumya Ranjan Mishra, Materials Research Bulletin 143 (2021) 111417. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111417>
2. Ali Allahresani, Mohammad Ali Nasser, Alireza Nakhaei, Res Chem Intermed 43 (2017) 6367–6378. <https://doi.org/10.1007/s11164-017-2994-4>
3. Runxue Liu, Wanliang Yang, Guiwei He, Wei Zheng, Maokun Li, Wenliang Tao, and Mengkui Tian, ACS Omega 5 (2020) 19615–19624. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02161>
4. Yi-Ching Chu, Tzu-Jen Lin, Yan-Ru Lin, Wei-Lun Chiu, Ba-Son Nguyen, Chechia Hu, Chechia Hu, Carbon 169 (2020) 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.053>
5. Jie Meng, Jingyuan Pei, Zefang He, Shiyan Wu, Qingyun Lin, Xiao Wei, Jixue Lia, Ze Zhanga, RSC Adv. 7 (2017) 24097–24104. <https://doi.org/10.1039/C7RA02297B>
6. F.L. Hui Zhang, Hao Wu, Xin Cao, Jianhua Sun and Weiwei Lei, RSC Adv. 7 (2017) 40327–40333. <https://doi.org/10.1039/C7RA06786K>
7. Devina Rattan Paul, Shubham Gautam, Priyanka Panchal, Satya Pal Nehra, Pratibha Choudhary, and Anshu Sharma, ACS Omega 5 (2020) 3828–3838. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02688>
8. Qiang Hao, Xiuxiu Niu, Changshun Nie, Simeng Hao, Wei Zou, Jiangman Ge, Daimei Chen and Wenqing Yao, Phys. Chem. Chem. Phys. 18 (2016) 31410–31418. <https://doi.org/10.1039/C6CP06122B>
9. Tran Thi Ngoc My, Đoàn Văn Hồng Thiện, Văn Phạm Đan Thủy, Trần Thị Bích Quyên, Ngô Trương Ngọc Mai, Ta Ngoc Don, Thien Doan Van Hong, Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption 11 (2022) 22–27. <https://doi.org/10.51316/jca.2022.044>
10. K. Prakash, P. Senthil Kumar, P. Latha, K. Saravanakumar & S. Karuthapandian, Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials 28 (2018) 268–278. <https://doi.org/10.1007/s10904-017-0715-5>

<https://doi.org/10.62239/jca.2024.037>

11. Tanaporn Narkbuakaew & Pornapa Sujaridworakun, Topics in Catalysis 63 (2020) 1086–1096. <https://doi.org/10.1007/s11244-020-01375-z>
12. Zhao Mo, Xiaojie She, Yeping Li, Liang Liu, Liying Huang, Zhigang Chen, Qi Zhang, Hui Xu and Huaming Li, RSC Advances 5 (2015) 101552-101562. <https://doi.org/10.1039/C5RA19586A>
13. Meng-Jie Chang, Wen-Na Cui, Jun Liu, Kang Wang & Xiao-Jiao Chai, Journal of Materials Science: Materials in Electronics 29 (2018) 6771–6778. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8663-6>
14. Uma Kasimayan, Arjun Nadarajan, Chandra Mohan Singaravelu, Guan-Ting Pan, Jothivenkatachalam Kandasamy, Thomas C.-K. Yang & Ja-Hon Lin, Scientific Reports 10 (2020) 2128. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59037-9>
15. Ke Li, Miaomiao Chen, Lei Chen, Songying Zhao , Wencong Xue, Zixuan Han and Yanchao Han, Processes 11 (2023) 528. <https://doi.org/10.3390/pr11020528>