**Đặc tính và hiệu quả phân hủy quang xanh methylen của dàn xếp chitosan trong khớp nối MgFe2O** **4-TiO2  
 ở các nhiệt độ và thời gian nung khác nhau**

**Thieu Quang Quoc Viet1,2,3,4, Doan Ba Thinh1,2,3, Che Quang Cong1,2,3, Le Minh Huong1,2,3, Nguyen Duy Hai  
1,2,3, Nguyen Minh Dat1,2,3, Nguyen Thanh Hoai Nam1,2,3, Nguyen Thi Huong Giang1,2,3, Tong Hoang Lin1,2,3, Le Pham Minh Triet3,5, Mai Thanh Phong2,3, and Nguyen Huu Hieu1,2,3\***

*1ĐHQG-HCM, Phòng thí nghiệm trọng điểm kỹ thuật hóa học và chế biến dầu khí (CEPP), Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUT), 268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*

*2Khoa Kỹ thuật Hóa học, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUT), 268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*

*3Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM), Linh Trung Ward, Thu Duc Ciy, Ho Chi Minh City, Vietnam*

*4Trường Cao đẳng Công nghệ Kỹ thuật, Đại học Cần Thơ, Đường 3/2, Xuân Khánh, Ninh Kiều, Thành phố Cần Thơ, Việt Nam*

*5Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, 227 Nguyễn Văn Cừ, Quận 5, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*

**\*** Tác giả tương ứng, e-mail: [nhhieubk@hcmut.edu.vn](mailto:nhhieubk@hcmut.edu.vn)

**Trừu tượng**

Ở đây, khớp nối ferrite MgFe2O 4-TiO2 (MFO-TiO2) được chế tạo bởi thủy nhiệt - trước khi quá trình nung với chitosan được sử dụng làm chất ổn định hạt và được nghiên cứu trong quá trình quang xúc tác đối với xanh methylen (MB) trong nguồn nước. Quá trình chế tạo được nghiên cứu thông qua nhiệt độ và thời gian nung trong khi các vật liệu được chuẩn bị được đặc trưng bởi các phương pháp phân tích hiện đại như nhiễu xạ tia X, kính hiển vi Raman, kính hiển vi điện tử quét e quangphổ tia X phân tán mọt sách, diện tích bề mặt cụ thể Brunauer-Emmett-Teller và t phân tích trọng lực hermal. Các kết quả đặc tính và hiệu quả phân hủy quang cho thấy xử lý nhiệt vừa đủ là phơi sáng 2 giờ trong 800 oC để phân tích cấu trúc hình thái học vượt trội thông qua xử lý hình ảnh gần như hoàn chỉnh với chất hữu cơ. Các kết quả thu được cũng nhấn mạnh việc sử dụng các gốc oxy tham gia vào quá trình thoái hóa MB trong khi H2O2 đóng vai trò quyết định trong quá trình phân hủy quang học do Fenton hỗ trợ của vật liệu khớp nối. Thật vậy, nghiên cứu cho thấy một quy trình nổi bật và tiết kiệm trên quy mô lớn để chuẩn bị vật liệu ghép nối Ferrite TiO2 như một chất xúc tác quang ấn tượng để xử lý các chất gây ô nhiễm hữu cơ trong xử lý nước thải.

**Từ khóa:** MgFe2O4, TiO2, chitosan, xanh methylen, chất xúc tác quang.

**1. Giới thiệu**

Quang xúc tác, trong đó năng lượng ánh sáng được sử dụng để điều khiển các cặp phản ứng hóa học, đã đạt được một kỷ nguyên được quan tâm rộng rãi và đáp ứng sự chú ý lớn vì lợi ích của nó. Trong những năm gần đây, việc ứng dụng công nghệ nano trong lĩnh vực này đã được sử dụng rộng rãi cho sự xuống cấp của các chất ô nhiễm hữu cơ [1]. Do hiệu quả cao, chi phí vận hành thấp, thiết kế đơn giản và các sản phẩm thân thiện với môi trường, quang xúc tác được chứng minh là vượt trội so với các phương pháp thông thường khác trong xử lý nước thải. Về chất xúc tác quang, TiO2 được biết đến như một chất bán dẫn nổi bật cho các quá trình xử lý ảnh do không độc hại, khả năng quang hóa cao, chi phí thấp và ổn định hóa học [2]. Tuy nhiên, những hạn chế đã hạn chế tiềm năng của nó trong việc sử dụng thực tế, bao gồm sự kết hợp lại rộng rãi của điện tích kích thích (e–) - lỗ (h +) đồng tình với quá trình cũng như bandgap khá lớn (3.2 và 3.0 eV cho pha anatase và rutile, tương ứng) do khả năng chiếu xạ ánh sáng chỉ trong phạm vi cực tím [3]. Do đó, khớp nối TiO2 với các oxit kim loại khác để thu hẹp năng lượng bandgap và kiểm soát việc vận chuyển điện tích là cực kỳ quan trọng để đối phó với những vấn đề đó [2,4,5].

Mặt khác, các hạt ferrite được tuyên bố là sắt từ trong tự nhiên với năng lượng bandgap thấp đáng kể do đức tính của mạng tinh thể của chúng [6]. Spinel ferrites (XFe2O4 trong đó X liên quan đến kim loại trong hóa trị của 2), đặc biệt, giữ các đặc tính quang xúc tác tối quan trọng dưới vùng chiếu xạ có thể nhìn thấy [7]. Hơn nữa, khả năng tái chế sau các quá trình xử lý được đặc trưng bởi tính chất siêu từ tính của các phân tử ferrite đã làm nổi bật giải pháp xử lý ấn tượng và có thể duy trì chống lại các chất ô nhiễm hữu cơ vi lượng trong môi trường thủy sinh [3]. Do đó, việc pha tạp ferrite spinel vào ma trận TiO2 có thể làm giảm năng lượng bandgap tổng thể của hỗn hợp bán dẫn, tạo điều kiện thuận lợi cho việc vận chuyển các electron và lỗ bị kích thích về phía các vị trí hoạt động TiO 2 để bắt đầu chuỗi oxy hóa quang [8]. Cập nhật, magiê ferrite (MgFe2O 4-MFO) đã thu hút sự chú ý của các nhà nghiên cứu trong các lĩnh vực khác nhau như vật liệu từ tính và ứng dụng quang xúc tác nhờ băng tần nhỏ (~ 2 eV) và độc tính thấp thông qua độ nhạy thấp hơn trong lọc dưới xử lý hình ảnh [9,10]. Sự gia tăng độ ổn định cấu trúc ferrite và các đặc tính từ tính hỗ trợ đã được nâng lên một cách hợp lý cho sự ra đời của việc bổ sung ion Mg2 + [11,12], khiến nó trở thành một ứng cử viên sáng giá để kết hợp với các hạt nano TiO 2 để tăng cường quang xúc tác.

Tuy nhiên, việc tập hợp dạng nhị phân như đã đề cập đến đến kích thước cụm tương đối cao có thể dễ dàng xảy ra sẽ làm giảm mặt hoạt động để gắn các chất ô nhiễm và thú vị dưới sự kiểm soát của tia cực tím. Do đó, sự quan tâm đến phương pháp nạp các hạt nano oxit vào ma trận polymer đã được sở hữu rộng rãi để đối phó với nhược điểm này [13]. Đặc biệt, chitosan, một dẫn xuất deacetylated của chitin, đã được báo cáo như một môi trường đủ để tổng hợp hạt nano do các đặc tính ưa nước, phân hủy sinh học và tương thích sinh học của nó [14]. Sự hiện diện của các nhóm amino hoạt động và khả năng liên kết chéo tạo ra sự gắn kết với các hạt oxy của oxit khớp nối làm cho chitosan trở thành một chất khử và ổn định hiệp đồng trong việc hình thành vật liệu. Nhiều tương tác tĩnh điện được hình thành thông qua đơn vị carbohydrate chuỗi dài cũng tạo điều kiện thuận lợi cho hình dạng thuận lợi cho titania ferrite với mức độ kết tinh đắm chìm [15,16]. Hơn nữa, các nhóm hydroxyl trong chitosan có thể tiếp cận liên kết hydro với sản xuất hydroxit đồng kim loại trong bước kết tủa, trong khi phân tán đồng đều nó qua các chuỗi polymer . Quá trình nung sau đó (600 - 900 [14]oC) đã đóng một vai trò quan trọng trong việc kết hợp bằng cách hình thành liên kết Ti – O - Fe, kết tinh, cũng như khẳng định kích thước phù hợp của MFO-TiO2 với độ tinh khiết cao [8].

Trong nghiên cứu này, MFO-TiO2 được chế tạo bằng cách khuấy trộn tuyến thủy nhiệt hỗ trợ sử dụng chitosan như một chất ổn định. Những ảnh hưởng của nhiệt độ ủ và thời gian đến độ kết tinh và cấu trúc của nanocomposite cũng được nghiên cứu, như thể hiện trong Sơ đồ 1. Các vật liệu được sản xuất sau đó đã trải qua quá trình phân hủy quang bằng thực nghiệm với một loại thuốc nhuộm hữu cơ nổi tiếng, xanh methylen (MB), và được chỉ định trong các nghiên cứu động học. Cơ chế quang xúc tác của vật liệu cũng được nghiên cứu với sự có mặt của những người nhặt rác triệt để khác.

|  |
| --- |
|  |
| **Sơ đồ 1.**  Quá trình tổng hợp và sử dụng MFO-TiO2 làm chất xúc tác quang cho sự suy thoái MB |

**2. Thử nghiệm**

**2.1. Vật liệu, hóa chất**

Than chì (kích thước hạt < 20 μm), chitosan (từ vỏ tôm, wt. 190–375 kDa, cấp thực tế), 1,4-Benzoquinone (C6H4O2–BQ), và titan (IV) isopropoxide (TIP, (C12H28O4Ti)) được mua từ Sigma Aldrich Co. Ltd, Hoa Kỳ. Ethanol (C2H6O– EtOH), magiê nitrat (Mg (NO3) 2,6H2O), ferrite nitrat (Fe (NO3) 3,9H 2 O), axit axetic (C2H4O2), axit sunfuric (H2SO4), axit photphoric (H3 PO4), kali permanganat (KMnO4), hydro peroxide (H2O2), amoni hydroxit (NH4OH), disodium ethylenediamine-tetraacetate (EDTA) và isopropanol (IPA, C3H8O) đã được mua từ Xilong Scientific Co. Ltd, Trung Quốc và được sử dụng mà không cần tinh chế thêm.

**2.2. Tổng hợp MgFe2O4**–**TiO2**

Việc chế tạo vật liệu ghép ferrite và ferrite được thực hiện trong lò phản ứng khuấy có áp suất. Tóm lại, 1,28 g magiê và 4,04 g muối sắt (tỷ lệ Fe3 +: Mg2+ 2: 1) trong 50 mL dung dịch chitosan (1 g / L) đã được thêm vào hỗn hợp chứa 1 axit axetic mL với 50 mL EtOH và 1 mL TIP trong vòng khuấy dần trong 30 phút trong môi trường xung quanh. Sau đó, hỗn hợp được điều chỉnh thành pH 11 bằng dung dịch NH 4OH 30% trước khi được làm nóng đến 90 oC dưới sự khuấy trộn mạnh trong 2 giờ. Dư lượng sau đó được tách ra, ly tâm, rửa sạch, sấy khô ở 80 oC trong 6 giờ, và cuối cùng, được nung. Các mẫu TiO2 và MgFe2O4 để tham khảo được thực hiện trong cùng một tuyến đường, nhưng không thêm tiền chất tương ứng của chúng. Các vật liệu composite được tiến hành với bảy nhiệt độ nung trong 2 giờ từ 300 đến 900 oC (nhiệt độ đồng bằng là 100 oC). Các mẫu thích hợp đã được chọn để điều tra thời gian nung, bao gồm 1, 2, 3, 4 và 6 giờ.

**2.3. Đặc tính của vật liệu**

Nhiễu xạ tia X (XRD) được đo bằng Advanced X8, Bruker (λX = 0,154 nm) với CuKα chiếu xạ trong phạm vi 5 ~ 80 °. Quang phổ Raman được tiến hành với hệ thống LabRam micro-Raman ở bước sóng kích thích 632 nm (laser He-Ne). Kính hiển vi điện tử quét (SEM) (Hitachi S-4800, Nhật Bản) đã được sử dụng để điều tra thuật ngữ hình thái của khớp nối ferrite. Phân tích nguyên tố được xác định theo trình tự bằng cách sử dụng quang phổ tia X phân tán năng lượng (EDS) (Jeol – JMS 6490, Nhật Bản). Diện tích bề mặt và thể tích lỗ rỗng cụ thể của Brunauer Emmett-Teller (BET) được xác định bằng cách hấp phụ nitơ bằng máy phân tích TriStar II 3020 V1.03, Micromeritics Instrument Corporation. Phân tích trọng lực nhiệt (TGA) được thực hiện bằng TGA Q500 V20.10 Build 36.

**2.4. Hoạt động quang xúc tác**

Một giải pháp dự trữ MB (20 mg / L) đã được chuẩn bị và bảo quản trong tủ lạnh trước khi sử dụng. Quá trình xử lý quang bắt đầu với 100 mL dung dịch MB được thay thế bằng chất xúc tác 80 mg. Hỗn hợp được khuấy trong bóng tối trong 10 phút, sau đó thêm 2 mL H2O2 trước khi tiếp xúc với tia UV (TUV 215mm 11W, Philips). Một phần của mẫu được lấy trong khoảng thời gian đều đặn là 10 phút, được lọc và định lượng dưới quang phổ UV-vis ở bước sóng 665 nm. Cơ chế phân hủy quang học đã được nghiên cứu bằng cách thêm các chất nhặt rác gốc tự do (BQ, EDA và ISP) vào hỗn hợp phản ứng. Năng suất và tốc độ phản ứng động học cho quang xúc tác được công nhận thông qua Các phương trình (1) và (2), tương ứng:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |
|  | (2) |

trong đó và (mg/L) tương ứng với nồng độ ban đầu và cuối cùng của MB sau thời gian chiếu xạ t (phút), và k là hằng số tốc độ.

**3. Kết quả và thảo luận**

**3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung**

Hình 1 cho thấy tác động tổng thể của nhiệt độ nung đến độ kết tinh thông qua các đặc tính quang xúc tác của vật liệu MFO-TiO2. Theo đó, nhiệt độ được kiểm soát càng cao (từ 500 oC trở lên), càng loại trừ nhiễu quan sát thấy trong các mẫu vật liệu (Hình 1a), chỉ ra rằng sự phân hủy hoàn toàn đã đóng vai trò hình thành và ổn định các oxit kim loại tại các điểm đó. Tuy nhiên, ở 500 °C, sự phá vỡ ma trận chitosan thành CO và CO2 xảy ra rộng rãi trên bề mặt vật liệu, nước tách ra để tạo ra các oxit trần (TiO2, MgO, FeO và Fe2O3) cùng với sự phát triển tinh thể để tạo thành pha oxit khớp nối (MgFe2O4 và MgFe2O 4-TiO2 ) có thể gây ra xu hướng cao tiếp cận lẫn nhau của các hạt đó. Hiện tượng này tạo điều kiện cho phản ứng pha rắn-rắn giữa các pha tinh thể. Ngoài ra, nhiệt độ cũng được coi là yếu tố chính dẫn đến sự phân tách hydroxit theo sau là sự di chuyển nguyên tử và tinh thể trong ma trận để tạo thành hỗn hợp. Những tuyên bố đó rất phù hợp với Hình 2, trong khi liên quan đến sự gia tăng nhiệt độ từ 300 đến 400 oC, đã quan sát thấy sự giảm các mảng vật liệu lớn tương ứng với hydroxit kim loại và chitosan dính vào nhau. Ở 500 oC, môi trường polymer để tải oxit kim loại dường như biến mất, tuy nhiên, sự kết tụ làm giảm cường độ XRD có được từ quá trình thiêu kết nhiệt như đã đề cập vẫn xảy ra. Điều thú vị là ở nhiệt độ nung 600 - 900 oC, cường độ được làm rõ cao của mô hình XRD cho thấy rằng việc tối ưu hóa oxit ghép nối hình thành oxit ferrite oxide và quá trình thiêu kết nhiệt tăng cường được thúc đẩy bởi nhiệt độ đã dẫn đến một tinh thể lớn hơn lan rộng đến kích thước mong muốn và pha tinh thể ấn tượng [17].

|  |
| --- |
|  |
| **Hình 1.**  (a) Các mẫu XRD; (b) Năng suất loại bỏ và (c) Nghiên cứu động học  để MB phân hủy quang học của MFO-TiO2 ở các nhiệt độ nung khác nhau |

Cụ thể hơn, liên quan đến Hình 1a, ở 300 oC, vật liệu giữ TiO2 trong rutile (ở đỉnh 36,2 và 54,4 o) và các pha brookit thu được từ thủy nhiệt ban đầu trước quá trình nung trong khi dấu vết của Fe2O3 và FeO tồn tại cho thấy sự tăng trưởng chính của chúng từ tiền chất Fe. Từ 400 đến 600 oC, quá trình oxy hóa tiếp tục trong môi trường nung giàu oxy, chuyển đổi chủ yếu lượng FeO sang pha Fe2O3 trong khi vẫn không có đỉnh đặc trưng của pha anatase TiO 2 được phát hiện trong các mẫu đó. Đỉnh ở 35,5 o cho thấy sự hiện diện của MgFe2O4 ở phạm vi nhiệt độ 300 - 500 oC, tuy nhiên, lượng thấp hơn ở ban đầu đã bị chồng chéo bởi pha Fe2O3 trong ma trận. Ở 700 oC, sự hình thành mgfe2O4 trong hỗn hợp nổi bật hơn tương ứng với (220), (331) và (440) khía cạnh lần lượt là 2θ của 18,1 và 32,4 và 62,5 o. Bên cạnh đó, pha anatase xuất hiện ở các đỉnh 25.3, 37.5, 54.1 và 62.0 o theo các mặt phẳng (101), (004), (200), (105) và (204) tương ứng. Khi vật liệu được nung nóng đến 800 - 900 oC, hầu hết các pha tinh thể TiO 2 và MgFe2O4 đều được phát hiện, gợi ý về sự hình thành và khớp nối hoàn chỉnh của chúng với hỗn hợp với độ kết tinh cường độ cao [3].

Hơn nữa, về mặt Hình 1b và c, hiệu suất suy thoái và phân tích động học của hỗn hợp được minh họa, tương ứng. Như có thể quan sát, trong 60 phút, năng suất loại bỏ thuốc nhuộm của ferrite MgFe2O 4-TiO2 thường leo thang với sự gia tăng nhiệt độ. Hiện tượng này có thể được quy cho thực tế là nhiệt độ cao hơn sẽ dẫn đến động năng cao hơn của các phân tử chất phản ứng, nói cách khác, vận tốc va chạm cao hơn, dẫn đến thúc đẩy tốc độ phản ứng và hiệu quả loại bỏ thuốc nhuộm cor responding của chúng. Do đó, hình động học thể hiện mối quan hệ tuyến tính tuyệt vời giữa và t, cho biết tính hợp lệ của mô hình phản ứng bậc một giả [1]. Theo đó, thông số thu được càng thấp, nồng độ còn lại của thuốc nhuộm tồn tại trong dung dịch sau khi phản ứng còn lại càng thấp, do đó, năng suất phản ứng tăng cường thu được. Các kết quả động học cũng phù hợp với kết quả hiệu quả suy giảm nói trên. Tóm lại, việc tăng nhiệt độ nung thường thúc đẩy sự phân hủy cũng như các hình thức hiệu quả hơn và ổn định các hạt, dẫn đến hiệu suất quang xúc tác tốt hơn được thể hiện thông qua các cuộc kiểm tra năng suất loại bỏ và nghiên cứu động học.

Như đã nêu, kết quả tích lũy tương đối phù hợp với hình ảnh SEM trong Hình 2. Cụ thể, khi nhiệt độ tăng lên, các hạt được hình thành đồng đều và rõ ràng hơn với kích thước 100 – 200 nm. Tuy nhiên, nhiệt độ quá cao (900 oC) dẫn đến xu hướng lùi: phân tử có kích thước nhỏ với diện tích bề mặt tương đối cao hỗ trợ di chuyển nhiệt đã đạt được xu hướng lớn để liên kết lại giữa các pha rắn. Tuy nhiên, sự kết tụ tại thời điểm này đã không xảy ra rộng rãi do sự phân hủy hoàn toàn của hydroxit thành oxit, sự gia tăng kích thước phân tử là không thể tránh khỏi. Tóm lại, 800 oC là điểm dừng thích hợp để hoàn thành việc chế tạo composite.

|  |
| --- |
|  |
| **Hình 2.**  Hình ảnh SEM của MgFe2O 4-TiO2 ở các nhiệt độ nung khác nhau |

Phân tích nhiệt của vật liệu trong môi trường giàu oxy (Hình 3a) đã làm rõ tổn thất trung gian thông qua sự thay đổi pha của oxit bazơ để ghép nối. Việc giảm cân đầu tiên ~ 3,6 và 2,4% đối với các ferrites nói trên lên đến 150 oC là do mất nước và loại bỏ các chất hữu cơ vi lượng trên bề mặt vật liệu. Khi nhiệt độ đạt 213 và 274 oC xảy ra với 2 đỉnh giảm nhiệt ở nhiệt đồ, đã chứng kiến sự giảm đáng kể khối lượng được lập chỉ mục tốt cho quá trình phân hủy chitosan (lên đến ~ 7%) như được mô tả bởi hình ảnh XRD và SEM ở trên. Ở giai đoạn này, sự hình thành của oxit cơ bản đã được tuyên bố là gần như hoàn thành và sẵn sàng để bắt đầu một cái khác, khi nhiệt độ đạt trên 350 oC. Trong các bước tiếp theo (400 - 500 oC), sự thay đổi nhỏ về khối lượng đang đáp ứng tốt với việc loại bỏ cuối cùng các maters hữu cơ vi lượng và polymer, sự tan rã của TIP không thủy lực không hoàn toàn thông qua sự biến đổi lớn của các hydroxit tiền chất thành các oxit của chúng. Ở 650 oC, trong khi đường cong khối lượng không thay đổi, nhiệt đồ thể hiện một đỉnh hướng lên trên nội nhiệt cho thấy sự kết tinh và thay đổi pha giữa các oxit đó thành ferrite và khớp nối của nó với TiO2. Điều đó cũng thích hợp với các mẫu XRD hoàn toàn rõ ràng của vật liệu sau 700 oC trở lên xử lý nung. Cuối cùng, những phần còn lại và ferrite khớp nối đó đã được hình thành ổn định do trọng lượng giảm không đáng kể ở 700 - 800 oC, do khối lượng 83,97% so với ban đầu. Điều thú vị là trong môi trường trơ (Hình 3b), xu hướng tương tự cũng được quan sát thấy trong cuộc điều tra trước đó, xác nhận các giai đoạn như đã đề cập trong con đường hình thành của ferrite và khớp nối của nó với TiO2[16] .

Như đã lưu ý trước đó, sự gia tăng đủ nhiệt độ nung là cực kỳ quan trọng để tăng cường pha hoạt động và diện tích bề mặt xúc tác để quang xúc tác đối với thuốc nhuộm hữu cơ trong nước. Trong Hình 1b, họ chứng kiến sự gia tăng đáng kể năng suất loại bỏ ~ 99,6% khi nhiệt độ được kiểm soát đến 800 oC. Tuy nhiên, ở 900   
oC, sự kết tập của hạt oxit với kích thước lớn hơn cho thấy năng suất giảm nhẹ, khẳng định sự hấp thụ ít hơn của MB thông qua sự xâm nhập của ánh sáng đến pha hoạt động. Cụ thể, sự hấp phụ hạn chế của MB lên vật liệu ở cả 500 và 900 oC sau 10 phút đã đánh dấu sự hỗ trợ polymer thông qua sự sụp đổ lỗ rỗng (đối với vật liệu trước đây) và sự phát triển quá mức của tinh thể (đối với vật liệu sau) được tăng tốc bằng cách xử lý nhiệt. Ngoài ra, xu hướng này cũng có thể được giải thích bằng sự hiện diện của các đa hình khác nhau trong các vật liệu kết quả. Đặc biệt, sự gia tăng nhiệt độ nung lên 800 oC một cách hiệu quả thúc đẩy sự biến đổi brookite thành anatase. Hơn nữa, pha anatase của TiO2 sở hữu cấu trúc khoảng cách vùng cấm gián tiếp, tạo ra thời gian tái tổ hợp các cặp electron và lỗ lâu hơn khi so sánh với cấu trúc bandgap trực tiếp của các pha rutile và brookite, do đó tăng cường hiệu suất quang xúc tác của các vật liệu chế tạo . Hơn nữa, anatase TiO[17]2 cũng cho thấy hiệu ứng phân hủy quang học vượt trội nhờ kích thước nhỏ hơn và khối lượng hiệu dụng thấp hơn của các cặp electron và lỗ hổng làm tăng hiệu quả tốc độ truyền điện tích. Ngược lại, người ta cũng đã báo cáo rằng sự gia tăng hơn nữa nhiệt độ nung lên trên 900 oC có thể kích thích sự hình thành kích thước tinh thể lớn hơn của pha rutile từ anatase, thể hiện cấu trúc bandgap trực tiếp, dẫn đến sự suy giảm dần dần hiệu quả phân hủy quang . [18] Bên cạnh đó, từ Bảng 1, sự xuống cấp quang xúc tác của MB bởi MgFe2O 4-TiO2 rất phù hợp với động học bậc nhất giả với hệ số tương quan cao. Hằng số tốc độ của vật liệu nung ở 700 oC có giá trị cao nhất (0,0854 phút-1), nhưng với xử lý 800 oC, không có thay đổi đáng kể nào về giá trị này. Do đó, phù hợp với phân tích cấu trúc, nhiệt độ nung lý tưởng để tối ưu hóa hiệu suất phân hủy quang học đã được xác nhận thêm ở 800 oC và phù hợp với các giải thích ở trên.

|  |
| --- |
|  |
| **Hình 3.**  Đường cong TGA và DTA của MFO-TiO2 trong (a) môi trường khí trơ giàu oxy và (b) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Bảng 1.**  Các thông số động học của MFO-TiO2 ở các nhiệt độ nung khác nhau | | |
| **Nhiệt độ nung (oC)** | **Hằng số tốc độ k (tối thiểu-1)** | **Hệ số tương quan R2** |
| 300 | 0.0380 | 0.9954 |
| 400 | 0.0426 | 0.9967 |
| 500 | 0.0504 | 0.9912 |
| 600 | 0.0568 | 0.9836 |
| 700 | 0.0854 | 0.9839 |
| 800 | 0.0848 | 0.9836 |
| 900 | 0.0737 | 0.9977 |

Năng lượng khe hở vùng cấm của vật liệu ở các nhiệt độ nung khác nhau có thể được xác định dựa trên mối quan hệ tuyến tính của (ahν) 2 và hν, như được chỉ ra trong Bảng 2. Như có thể chứng kiến từ các kết quả, sự gia tăng nhiệt độ nung từ 300 đến 800 oC làm giảm đáng kể năng lượng bandgap từ 2, 91 xuống 1, 78 eV, có thể được quy cho việc tạo dần pha rutile trong quá trình nung. Năng lượng bandgap của tất cả các mẫu cũng cao hơn so với TiO 2 nguyên sơ. Điều này có thể được quy cho sự tham gia của cấu trúc ferrite với năng lượng khoảng cách vùng cấm thấp, cũng như sự hỗ trợ của ma trận polymer của chitosan, chịu trách nhiệm cho mức độ kết tinh tốt và sự ổn định của vật liệu nhờ sự tương tác mạnh mẽ với carbohydrate chuỗi dài. Kết quả cũng phù hợp với phân tích nói trên về xu hướng biến động trong các mô hình XRD.

**Bảng 2.**  Năng lượng Bandgap của MFO-TiO2 ở các nhiệt độ nung khác nhau

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Không.** | **Nhiệt độ nungs (oC)** | **Bandgaps (eV)** |
| 1 | 300 | 2.91 |
| 2 | 400 | 2.08 |
| 3 | 500 | 2.07 |
| 4 | 600 | 1.92 |
| 5 | 700 | 1.84 |
| 6 | 800 | 1.82 |
| 7 | 900 | 1.78 |

Bảng 3 cho thấy sự giảm đáng kể diện tích bề mặt và kích thước xốp của vật liệu sau khi kiểm soát nhiệt độ vôi hóa từ 80 đến 800 oC. Điều này được cho là do sự phân hủy nhiệt rộng lớn của chất mang chitosan vốn đã cung cấp nền tảng giới hạn cho hydroxit kim loại và TiO 2 được tạo hình sẵn, cấu trúc bát diện Ti, hình thành trên ma trận polymer [2]. Việc xử lý nhiệt cao hơn đã sở hữu một vai trò trong việc đẩy nhanh quá trình phá vỡ ma trận và sụp đổ lỗ chân lông, do đó, bắt đầu vận chuyển hạt giống thông qua tương tác pha với ferrite và khớp nối của nó với TiO2. Kết quả rất phù hợp với tất cả các tuyên bố trước đó.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Bảng 3.**  Diện tích bề mặt và thể tích lỗ rỗng của MFO-TiO2 với hai giai đoạn nung | | | | |
| **Nhiệt độ (oC)** | **Diện tích bề mặt BET (m2** **/ g)** | **Diện tích bề mặt Langmuir (m2** **/ g)** | **Thể tích lỗ rỗng (10-3 cm3** **/ g)** | **Kích thước lỗ**chân lông c **(nm)** |
| 80 | 56.1164 | 339.5031 | 62.0640một | 4.4239 |
| 800 | 0.0848 | 0.9836 | 1.5150b | 1.3859 |
| tổng thể tích lỗ hấp phụ một điểm của lỗ chân lông nhỏ hơn 1,6279 nm chiều rộng tại P / P0 = 0,0770  bSự hấp phụ đơn điểm tổng thể tích lỗ chân lông của lỗ chân lông nhỏ hơn 1,6852 nm chiều rộng tại P / P0 = 0,0881  cChiều rộng lỗ rỗng trung bình hấp phụ (4V / A bằng BET) | | | | |

**3.2. Ảnh hưởng của thời gian nung**

Hình 4 cho thấy tác động của thời gian nung đến độ kết tinh thông qua các đặc tính quang xúc tác của vật liệu MFO-TiO2. Tuyên bố trên nhấn mạnh sự tồn tại của pha rutil và brookite TiO2 của vật liệu khi bắt đầu quá trình xử lý nhiệt, được chứng minh bằng các đỉnh Raman là 230 và 612 cm–1 tương ứng với các đối xứng của B1g và A1g trong khi 413 và 665 cm–1 thuộc về sự đối xứng của chế độ hoạt động B 2g và A1g, tương ứng [18,19]. Việc mở rộng thời gian xử lý chứng kiến sự gia tăng tán xạ Raman của các dải đặc trưng đó, khẳng định động lực thúc đẩy nhiệt cho sự phân hủy rộng lớn của ma trận chitosan và hỗ trợ biến đổi pha trong các oxit đó. Loại thứ hai được củng cố mạnh mẽ bởi sự hiện diện của pha anatase TiO 2 chỉ rõ ràng sau 3 - 4 giờ nung (ở 362, 497 và 618 cm–1 phù hợp với B1g, A1g và Eg chế độ kéo dài, tương ứng) trong khi việc phát hiện nó ở mức nung một giờ là đáng kể . Đặc biệt, sự tích tụ của chế độ E [19]g của anatase và chế độ A1g của pha rutile đã dẫn đến tín hiệu vượt trội của băng tần đó trong quang phổ Raman [20]. Tương tự như vậy, MgFe2O4 cũng xuất hiện ở giai đoạn đầu của quá trình, nhưng với một lượng nhỏ được trình bày, ba rung động mạng Raman ở 210, 610 và 820 cm–1 được gán cho hai F2g và A1g là không thể phát hiện được [8,21] . Chuyển sang 4 giờ xử lý, sự tăng cường trong các dải đó cho thấy sự tương tác tốt giữa các oxit trần đó để tạo thành ferrite của chúng và ghép nối ferrite tương tự như hiệu ứng nhiệt độ. Việc thay thế chitosan đã đóng một vai trò quan trọng trong việc phân tán và ổn định kích thước thích hợp (Hình 5) để sự va chạm nhiệt giữa các pha xảy ra hiệu quả trong điều trị lâu dài. Điều thú vị là đỉnh Raman mạnh mẽ ở 297 cm-1 thuộc sở hữu của các chế độ phonon đối xứng E g của pha hematit Fe2O3, cho thấy sự hình thành ferrit của nó với tiền chất Mg và / hoặc oxit không phản ứng còn lại trong cấu trúc tinh thể [22].

|  |
| --- |
|  |
| **Hình 4.**  (a) Quang phổ Raman; (b) Năng suất loại bỏ và (c) Nghiên cứu động học để phân hủy quang MB của MFO-TiO2 với thời gian nung khác nhau |

Điều thú vị là nhiệt độ nung cho thấy ít ảnh hưởng hơn đến sự phân hủy quang học của MB vì 99% sắc tố đã được loại bỏ bằng vật liệu được xử lý trong hai giờ trong khi với các vật liệu khác, năng suất không thay đổi đáng kể trong phạm vi 98,2 - 99,5% (Hình 4b). Điều này đề xuất một lộ trình chế tạo hiệu quả cho khớp nối ferrite với một giai đoạn hoạt động mong muốn và đủ kích thước. Bên cạnh đó, năng suất hấp thụ cao nhất sau 10 phút trong bóng tối được quan sát thấy trong MgFe2O 4-TiO2 trong vòng hai giờ điều trị đã tạo điều kiện cho quá trình quang xúc tác của chất hữu cơ. Tương tự như hiệu ứng nhiệt độ, sự kết tập tương đối của các oxit là kết quả rất lớn từ sự thay đổi cấu trúc trước khi phân hủy chitosan và / hoặc sự phát triển tinh thể làm mất diện tích bề mặt xúc tác. Về Hình 4c, sự [4]xuống cấp quang xúc tác của MB do thời gian nung rõ ràng cũng phù hợp với thứ tự đầu tiên giả. Với các đặc điểm cấu trúc, tôpô và xử lý ảnh tốt, 2 giờ được coi là thời gian xử lý thích hợp để chuẩn bị ferrite, nhưng hằng số tốc độ của nó thấp hơn so với vật liệu được xử lý với thời gian lớn hơn. Việc sử dụng thời gian nung phù hợp không chỉ đảm bảo hiệu quả của quá trình xúc tác mà còn đề xuất một khía cạnh kinh tế trong việc sử dụng thời gian và năng lượng. Nó vừa làm giảm chi phí của quá trình vừa tăng cường sử dụng thực tế trong xử lý ảnh cho quy mô lớn [23].

Các tuyên bố nói trên được hỗ trợ tốt bởi sự thay đổi thành phần và kích thước của các hạt oxit được hình thành khi tăng nhiệt độ ủ từ 1 đến 4 giờ trong hình ảnh SEM và quang phổ EDS như thể hiện trong Hình 5 và 6, tương ứng. Thời gian tiếp xúc kéo dài với nhiệt độ cao đã trở thành tác nhân chính cho sự phân hủy các chất mang chitosan thông qua những thay đổi đáng kể trong thành phần nguyên tố C và O, mất nước từ hydroxit kim loại sang oxit, thông qua việc vận chuyển oxit cơ bản cho nhau để tạo thành ferrite và khớp nối của nó với TiO2. Như thể hiện trong Hình 3a và 5b, thời gian tăng cường trong xử lý nhiệt có thể dẫn đến sự gia tăng dần hàm lượng Ti cho TiO2 (~ 20 wt.%) với mức độ cao hơn của pha anatase trong khi hàm lượng Fe trong hỗn hợp tiếp cận gần 50% như một thành phần chính cho các phân tử ferrite do giảm tổng số nguyên tử trình bày . Việc xử lý đủ lâu dài cũng kết thúc ở kích thước nano tương đối là 99.46 ± 2.5 nm cho vật liệu.[17]

|  |
| --- |
|  |
| **Hình 5.**  Hình ảnh SEM của MgFe2O 4-TiO2 với thời gian nung khác nhau và sự phân bố kích thước hạt của nó |

Hơn nữa, các số liệu EDS của vật liệu được duy trì cực kỳ tốt sau 4 giờ xử lý mà không có sự khác biệt đáng kể về số lượng đỉnh và cường độ của chúng [24]. Như đã đề cập ở trên, phân tích nguyên tố của ferrite MgFe2O 4-TiO2 cũng minh họa những thay đổi cụ thể trong thành phần khối lượng của hỗn hợp sau mỗi giai đoạn nung. Nói chung, có thể chứng kiến rằng wt.% của C, O và Mg giảm dần theo thời gian trong khi hai hình kim loại khác của Ti và Fe có xu hướng tăng lên khi thời gian nung tăng lên. Những hiện tượng thu được này cũng có thể được gán cho sự phân hủy chitosan và tạo thêm các hợp chất ferrite và ghép nối ferrite khi thời gian xử lý leo thang, điều này càng phù hợp với kết quả của quang phổ Raman.

|  |
| --- |
| Đường dẫn dự án: C: \ Users \ honey \ Documents \ OriginLab \ User Files \ .opju Thư mục PE: // Tên viết tắt: Graph12 |
| **Hình 6.**  (a) Quang phổ EDS và (b) Phân tích nguyên tố của MgFe2O 4-TiO2 với thời gian nung khác nhau |

Ngoài ra, như được thể hiện trong Bảng 4, việc loại bỏ ảnh MB bằng MgFe2O 4-TiO2 tương đối phù hợp với mô hình bậc nhất giả với hệ số tương quan cao trong cả bốn khoảng thời gian, tương tự như ảnh hưởng của nhiệt độ phản ứng. Hằng số tốc độ của hỗn hợp nung một giờ giữ giá trị thấp nhất (0,0393 phút-1), nhưng bốn mẫu chỉ ra các hằng số tốc độ xấp xỉ tương tự nhau với các hệ số tương quan tuyệt vời. Đặc biệt, con số cho 2 giờ đạt được đáng chú ý là 0, 0638 phút-1 và R 2 = 0, 9981, đây là chính xác nhất trong các kỳ thi. Tóm lại, thời gian nung thích hợp để tiến hành xử lý ảnh đã được chọn ở 2 giờ đã đề cập trước đó.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Bảng 4.**  Các thông số động học của vật liệu với thời gian nung khác nhau | | | |
| **Nhiệt độ (oC)** | **Thời gian (h)** | **Hằng số tốc độ k (tối thiểu-1)** | **Hệ số tương quan R2** |
| 80 | 6 | 0.0393 | 0.9894 |
| 800 | 1 | 0.0646 | 0.9982 |
| 800 | 2 | 0.0847 | 0.9799 |
| 800 | 3 | 0.0651 | 0.9953 |
| 800 | 4 | 0.0689 | 0.9919 |

**3.3. Cơ chế quang xúc tác**

Như thể hiện trong Hình 7, ba người nhặt rác, BQ, EDTA và IPA, đã được nghiên cứu trong MgFe2O 4-TiO2 dưới mb xử lý hình ảnh để xác nhận sự hỗ trợ của gốc oxy. Mặt khác, việc sử dụng IPA đã nhận thấy năng suất 48,86% do sự gia tăng các hồ chứa gốc • OH, tương tự như những hồ chứa thu được mà không cần người nhặt rác. Ngược lại, việc giảm các gốc gây ra bởi sự thay thế BQ và EDTA đã cản trở sự phân hủy quang học của chúng. Kết quả cho thấy các gốc •O2 và •OH đóng một vai trò quan trọng trong quá trình phân hủy quang. Dưới ánh sáng tia cực tím, những gốcs đó được hình thành do phản ứng của điện tích cảm ứng và lỗ hổng với nước và các phân tử oxy hòa tan trong môi trường. Việc kết hợp ferrite với TiO2 đã tăng cường vận chuyển qua ma trận ferrite và sau đó đến các chất ô nhiễm thuốc nhuộm. Hơn nữa, H2O2 dưới ánh sáng chiếu xạ có thể hoạt động như một bể chứa cho • Các gốc OH và phản ứng Fenton được hỗ trợ với thành phần Fe trong khớp nối ferrite [8]. Đối với con đường oxy hóa, ban đầu, những gốc có đặc tính điện di cao có thể tham gia phản ứng với lưu huỳnh cation, trước để phá vỡ các hợp chất N và / hoặc S-heterocyclic [25]. Sau đó, sự phân tách chuỗi hoặc vòng của các chất trung gian đó có thể xảy ra do sự hiện diện của các gốc. Cuối cùng, kết quả của các phản ứng nói trên được khoáng hóa hơn nữa thành các chất ngoan ngoãn và vô hại như H2O và CO2 [26].

|  |
| --- |
|  |
| **Hình 7.**  (a) Ảnh hưởng của các tác nhân nhặt rác đến hoạt động quang xúc tác của MFO-TiO2 đối với MB và  (b) Cơ chế phân hủy quang của MFO-TiO2 cho MB. |

**4. Kết luận**

Trong nghiên cứu này, một phương tiện truyền thông xanh, chitosan, đã được áp dụng như một trợ lý trong khớp nối ferrite MgFe2O 4-TiO2 theo thủy nhiệt - trước khi xử lý nung. Các kết quả chỉ ra rằng nhiệt độ và thời gian nung đều ảnh hưởng hiệu quả đến hiệu suất quang xúc tác của vật liệu thu được do sự biến đổi các pha của TiO2. Hơn nữa, kết quả XRD cũng tiết lộ rằng sự kết hợp của các pha anatase, rutile và brookite có thể góp phần hiệu quả vào sự thay đổi hiệu suất phân hủy quang của vật liệu chế tạo. Điều kiện thích hợp cho cái sau đã được tiến hành kỹ lưỡng để có được sản phẩm xúc tác với đặc tính cấu trúc và hình thái đầy hứa hẹn. Việc loại bỏ gần như hoàn toàn màu xanh methyelene (99,53%) đã đạt được khi khớp nối ferrite MgFe2O 4-TiO2, thu được với nhiệt độ nung và thời gian lần lượt là 800 oC và 2 giờ, được sử dụng. Tóm lại, các kết quả cho thấy một quy trình chuẩn bị nhất định cho chất xúc tác này để đề xuất một hiệu suất xử lý hình ảnh vượt trội của các chất hữu cơ từ môi trường nước.

**Lời cảm ơn**

Chúng tôi ghi nhận sự hỗ trợ về thời gian và cơ sở vật chất từ Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUT), ĐHQG- cho nghiên cứu này.HCM

**Tham khảo**

[1]H. Văn Bảo, N.M. Đạt, N.T.H. Giang, D.B. Thịnh, L.T. Tài, D.N. Trinh, N.D. Hải, N.A.D. Khoa, L.M. Hương, H.M. Nam, M.T. Phong, N.H. Hiếu, Hành vi của tio2 pha tạp ZnO-pha tạp 2/rGO nanocomposite để tăng cường xử lý nước, bề mặt và giao diện. 23 (2021) 100950. https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2021.100950.

[2]D.N. Trinh, T.Q.Q. Việt, T.H. Như, N.M. Đạt, D.B. Thịnh, N.D. Hải, L.T. Tai, D.T.Y. Oanh, V.H. Khôi, H.M. Nam, TiO2 nhị phân/giảm graphene oxide nanocomposite để cải thiện quá trình phân hủy quang xanh methylen, Tạp chí Hóa học Việt Nam. 59 (2021) 395–404.

[3]L. Zhang, Y. He, Y. Wu, T. Wu, Sự xuống cấp quang xúc tác của RhB so với vật liệu tổng hợp MgFe2O4 / TiO2, Khoa học và Kỹ thuật Vật liệu: B. 176 (2011) 1497–1504.

[4]K. Rajangam, S. Amuthameena, S. Thangavel, V.S. Sanjanadevi, B. Balraj, Tổng hợp và mô tả đặc điểm của Ag kết hợp vật liệu nano TiO2 cho các ứng dụng siêu tụ điện, Tạp chí Cấu trúc phân tử. 1219 (2020) 128661.

[5]M. Pedrosa, E.S. Da Silva, L.M. Pastrana-Martínez, G. Drazic, P. Falaras, J.L. Faria, J.L. Figueiredo, A.M.T. Silva, các oxit graphene của Hummers và Brodie làm chất xúc tác quang cho sự thoái hóa phenol, Tạp chí Khoa học Keo và Giao diện. 567 (2020) 243–255.

[6]I. Shakir, M. Sarfraz, Z. Ali, M.F.A. Aboud, P.O. Agboola, Graphene-MgFe2O4 nanocomposites có thể tách rời và tái chế từ tính cho các ứng dụng quang xúc tác nâng cao, Tạp chí Hợp kim và Hợp chất. 660 (2016) 450–455.

[7]M. Nadimi, A.Z. Saravani, M.A. Aroon, A.E. Pirbazari, Photodegradation of methylene blue by aternary magnetic TiO2/Fe3O4/graphene oxide nanocomposite under visible light, Materials Chemistry and Physics. 225 (2019) 464–474.

[8]D.B. Thịnh, N.T. Tiến, N.M. Đạt, H.H.T. Phong, N.T.H. Giang, D.T.Y. Oanh, H.M. Nam, M.T. Phong, N.H. Hiếu, Cải thiện quá trình phân hủy quang học p-nitrophenol từ môi trường nước bằng cách sử dụng TiO2 pha tạp bậc ba MgFe2O4/oxit graphene khử, Kim loại tổng hợp. 270 (2020) 116583.

[9]Y. Shen, Y. Wu, X. Li, Q. Zhao, Y. Hou, Tổng hợp một nồi của nanospheres MgFe2O4 bằng phương pháp nhiệt, Materials Letters. 96 (2013) 85–88.

[10]X. Gao, X. Liu, Z. Zhu, X. Wang, Z. Xie, Tăng cường các hành vi quang điện và quang xúc tác của MFe2O4 (M = Ni, Co, Zn và Sr) đã sửa đổi các mảng nano TiO2, Báo cáo khoa học. 6 (2016) 1–11.

[11]E. Suharyadi, A. Hermawan, D.L. Puspitarum, Cấu trúc tinh thể và tính chất từ tính của các hạt nano magiê ferrite (MgFe2O4) được tổng hợp bằng phương pháp kết tủa, trong: Tạp chí Vật lý: Chuỗi hội nghị, Nhà xuất bản IOP, 2018: tr. 12003.

[12]J. Zhao, T. Wang, X. Liu, X. Kan, C. Liu, W. Wang, Y. Li, J. Hu, Q. Lv, J. Huang, Ảnh hưởng của sự thay thế Mg2+ đến cấu trúc và tính chất từ tính của MgxZn1− xFe2O4 (x = 0,1–0,5) ferrites, Tạp chí Khoa học Vật liệu: Vật liệu trong Điện tử. 32 (2021) 4008–4020.

[13]K.S. Alghamdi, N.S.I. Ahmed, D. Bakhotmah, M. Mokhtar, Chitosan trang trí các hạt nano đồng làm chất xúc tác hiệu quả để tổng hợp các dẫn xuất quinoline mới, Tạp chí Khoa học Nano và Công nghệ Nano. 20 (2020) 890–899.

[14]R. Kalaivani, M. Maruthupandy, T. Muneeswaran, A.H. Beevi, M. Anand, C.M. Ramakritinan, A.K. Kumaraguru, Tổng hợp các hạt nano bạc qua trung gian chitosan (Ag NPs) cho các ứng dụng kháng khuẩn tiềm năng, Biên giới trong Y học Phòng thí nghiệm. 2 (2018) 30–35.

[15]A.I. Adeogun, O.A. Osideko, M.A. Idowu, V. Shappur, O.A. Akinloye, B. Ramesh Babu, Chitosan đã hỗ trợ CoFe2O4 để loại bỏ thuốc nhuộm anthraquinone: nghiên cứu động học, cân bằng và nhiệt động lực học, Khoa học ứng dụng SN. 2 (2020) 1–14.

[16]M.E.I. Badawy, T.M.R. Lotfy, S. Shawir, Chuẩn bị và hoạt tính kháng khuẩn của các hạt nano chitosan-bạc để ứng dụng trong bảo quản thịt băm, Bản tin của Trung tâm Nghiên cứu Quốc gia. 43 (2019) 1–14.

[17]L. Balassa, Á. Ágoston, Z. Kása, V. Hornok, L. Janovák, Chất xúc tác hoạt động ánh sáng nhìn thấy TiO2 biến đổi bề mặt sulfat để lọc nước thải phức tạp: Chuẩn bị, đặc tính và hoạt động quang xúc tác, Tạp chí Cấu trúc phân tử. 1260 (2022) 132860.

[18]J.J. Jasinski, M. Lubas, K. Suchorab, M. Gawęda, L. Kurpaska, M. Brykala, A. Kosinska, M. Sitarz, J. Jagielski, Phân tích pha định tính và bán định lượng của các lớp mỏng TiO2 bằng hình ảnh Raman, Tạp chí Cấu trúc Phân tử. 1260 (2022) 132803.

[19]R. Verma, J. Gangwar, A.K. Srivastava, Cấu trúc nano Multiphase TiO 2: Đánh giá tổng hợp hiệu quả, cơ chế tăng trưởng, khả năng thăm dò và ứng dụng trong an toàn sinh học và sức khỏe, RSC Advances. 7 (2017) 44199–44224.

[20]L.A. Al-Hajji, A.A. Ismail, A. Al-Hazza, S.A. Ahmed, M. Alsaidi, F. Almutawa, A. Bumajdad, Tác động của việc nung các dây nano TiO2 được tổng hợp thủy nhiệt đến hiệu suất quang xúc tác của chúng, Tạp chí Cấu trúc Phân tử. 1200 (2020) 127153.

[21]F. Naaz, H.K. Dubey, C. Kumari, P. Lahiri, Tính chất cấu trúc và từ tính của thuốc nano MgFe2O4 được tổng hợp thông qua tuyến đường đồng kết tủa, Khoa học ứng dụng SN. 2 (2020) 1–8.

[22]H. Liang, C. Xia, A.-H. Emwas, D.H. Anjum, X. Miao, H.N. Alshareef, Hoạt hóa plasma Phosphine của α-Fe2O3 cho siêu tụ điện bất đối xứng năng lượng cao, Năng lượng Nano. 49 (2018) 155–162.

[23]B. Ahmmad, K. Leonard, M.S. Islam, J. Kurawaki, M. Muruganandham, T. Ohkubo, Y. Kuroda, Tổng hợp màu xanh lá cây của các hạt nano hematit mesoporous (α-Fe2O3) và hoạt động quang xúc tác của chúng, Công nghệ bột tiên tiến. 24 (2013) 160–167.

[24]D.B. Thịnh, N.T. Tiên, N.M. Đạt, H.H.T. Phong, N. Thị Hương Giang, L.T. Tai, D. Thị Yên Oanh, H.M. Nam, M.T. Phong, N.H. Hiếu, Cải thiện sự phân hủy quang học của p-nitrophenol từ môi trường nước sử dụng TiO2 pha tạp bậc ba MgFe2O4/giảm graphene oxide, Kim loại tổng hợp. 270 (2020) 116583. https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116583.

[25]X. Wang, S. Han, Q. Zhang, N. Zhang, D. Zhao, Nghiên cứu cơ chế suy thoái oxy hóa quang xúc tác của nước thải nhuộm xanh methylen với GR / iTO2, trong: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018: tr. 3006.

[26]H. Javed, A. Rehman, S. Mussadiq, M. Shahid, M.A. Khan, I. Shakir, P.O. Agboola, M.F.A. Aboud, M.F. Warsi, Giảm các giống lai nano graphene oxide-spinel như chất xúc tác quang điều khiển ánh sáng nhìn thấy có thể tách rời và tái chế từ tính, Kim loại tổng hợp. 254 (2019) 1–9.