



Nghiên cứu chế tạo hạt polymer sinh học có chứa sắt nano ứng dụng trong xử lý môi trường

Fabrication of biopolymer containing zero-valent iron nanoparticles for environmental treatment

Đặng Trung Dũng^{1*}, Nguyễn Thị Xuân Quỳnh¹, Mai Xuân Tuấn¹, Nguyễn Minh Châu¹, Nguyễn Xuân Trường¹, Nguyễn Lan Hương¹, Lê Đức Dương^{2*}

¹ Trường Hóa và Khoa học Sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

² Viện Hóa học – Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

*Email: dung.dangtrung@hust.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 21/3/2023

Accepted: 28/5/2023

Published: 30/9/2023

Keywords:

zero-valent iron particles, Calcium alginate, organic colorant, Rhodamine B

ABSTRACT

Environmental pollution is posing hazardous impact on our lives, requiring innovative and effective methods and materials for the treatment process. In this research, the biopolymer containing zero-valent iron nanoparticles is synthesized using the green chemistry method and then coated with a biopolymer (Calcium Alginate) using the dropping method and solidified in CaCl_2 . Scanning Electron Microscope (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) are the methods used to study the morphology and structure of the biopolymer. Analytical results show that the form of material is alginate polymer particles with an average diameter of 2mm containing iron particles with the average size of 100nm. The material has the ability to treat Rhodamine B (RhB) effectively in the absence of the light source, and it is simple to collect and reuse. The efficiency of RhB removal is affected by the ratio of components in the material, the pH of the treated solution, which is evaluated by Ultraviolet-Visible (UV-Vis) method.

Giới thiệu chung

Vấn đề ô nhiễm môi trường ngày nay là vấn đề đang được quan tâm, việc nghiên cứu các phương pháp, vật liệu mới để xử lý ô nhiễm đã và đang được thúc đẩy mạnh mẽ. Một trong những vật liệu có tiềm năng xử lý ô nhiễm trong tương lai hiện đang được nghiên cứu rộng rãi là hạt Alginate và vật liệu sắt nano hóa trị 0 [1-6]. Vật liệu sắt nano hóa trị 0 được tổng hợp bằng

phương pháp hóa học xanh có nhiều ưu điểm như dễ chế tạo, giá thành rẻ, tính ổn định cao, khả năng phản ứng của sắt ở kích thước nano cho tỉ lệ diện tích trên thể tích lớn... [3]. Với những ưu điểm vượt trội như vậy, sắt nano hóa trị 0 đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: điện tử, y sinh, xúc tác, xử lý môi trường, lưu trữ năng lượng [7,8]. Trong báo cáo này, khả năng xử lý nước thải của sắt nano được tập trung nghiên cứu. Nhờ vào khả năng phản ứng của cả vỏ và lõi trong cấu

trúc hạt sắt nano kết hợp cùng khả năng hấp phụ vật lý, vật liệu sắt nano được xem là một vật liệu hứa hẹn trong lĩnh vực xử lý các chất màu hữu cơ, dư lượng thuốc bảo vệ thực vật, chất độc màu da cam [9]. Bên cạnh đó, vật liệu sắt nano hóa trị 0 cũng còn có những hạn chế như khó thu hồi, việc tái sử dụng trong thực tế vẫn gặp nhiều khó khăn. Ngoài ra, các hạt sắt nano có khả năng bị oxy hóa mạnh dẫn đến ứng dụng của nó vào xử lý môi trường bị hạn chế. Để khắc phục nhược điểm này, sắt nano tổng hợp bằng dịch chiết thực vật, đặc biệt là dịch chiết lá vối có khả năng hạn chế quá trình oxy hóa của môi trường, tăng khả năng ứng dụng cho quá trình xử lý các hợp chất hữu cơ thông qua quá trình oxy hóa tiên tiến [2-4].

Alginate là một thành phần tự nhiên được tìm thấy trong tất cả các loài rong nâu với đặc tính tương thích sinh học, có khả năng phân hủy sinh học và không độc hại. Alginate là vật liệu được ứng dụng nhiều trong lĩnh vực y sinh và hóa học [10]. Hydrogel dựa trên nền tảng Alginate đã và đang được nghiên cứu, sử dụng rộng rãi như một phát hiện mới trong xử lý kim loại nặng trong nước thải [1,5]. Với khả năng hấp phụ tốt của cấu trúc hydrogel thì Alginate đang là một vật liệu hứa hẹn trong xử lý nhiều đối tượng ô nhiễm. Những ưu điểm vượt trội của hydrogel Alginate là nền tảng để phát triển những nghiên cứu sử dụng Alginate như một chất mang bao bọc các loại vật liệu cho những ứng dụng như vận chuyển thuốc, xử lý môi trường.

Trong nghiên cứu này, Alginate được sử dụng để bao bọc các hạt sắt nano tổng hợp bằng phương pháp hóa học xanh. Trong đó, sắt nano đóng vai trò chính trong quá trình xử lý chất màu hữu cơ, hạt Alginate đóng vai trò như một chất mang để tăng khả năng thu hồi và tái sử dụng của vật liệu. Sản phẩm sau khi chế tạo ra sẽ được nghiên cứu hình thái, cấu trúc bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét (SEM), quang phổ nhiễu xạ tia X (XRD), quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) và được đánh giá khả năng xử lý chất màu hữu cơ Rhodamine B (RhB) bằng phương pháp phổ hấp phụ tử ngoại khả kiến (UV-Vis).

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất sử dụng

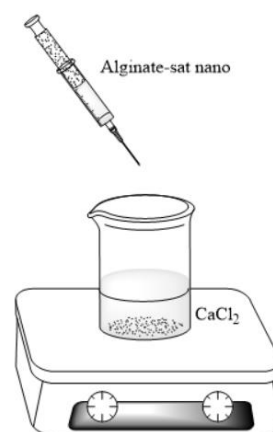
Sắt nano được chế tạo bằng phương pháp hóa học xanh với đầu vào là muối FeCl_3 (Trung Quốc, 99 %) và dịch chiết lá vối [3]. Dung dịch chứa hạt nano sắt có nồng độ 1 mg/L sẽ được hòa trộn với dung dịch Na-Alginate (Trung Quốc) nồng độ 2%. Để gel hóa các hạt Alginate-nano sắt, dung dịch CaCl_2 10 % đã được chuẩn

bị từ bột calcium chloride (Trung Quốc, 98 %) (hình 1). Dung dịch Rhodamine B với nồng độ: 1, 3, 5, 7 mg/L được chuẩn bị để khảo sát khả năng xử lý của vật liệu Alginate - sắt.

Tổng hợp vật liệu

Dung dịch Na-Alginate 2% được pha từ hóa chất và nước cất ở tốc độ khuấy 300 vòng/phút. Sau khi dung dịch đồng nhất, một lượng dung dịch sắt nano (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 mL) được thêm vào, tiếp tục khuấy và siêu âm trong 3 tiếng tạo nhũ tương.

Các hạt Ca-Alginate chứa sắt nano được chế tạo bằng phương pháp nhỏ giọt (dropping) từ nhũ tương đã chuẩn bị ở trên và được gel hóa trong cốc chứa dung dịch CaCl_2 10 %. Quy trình chế tạo hạt được thể hiện ở trên hình 1. Các hạt Ca-Alginate chứa sắt nano sau khi đã gel hóa được rửa 5 lần bằng nước cất và được sử dụng để đánh giá khả năng xử lý màu với dung dịch Rhodamine B.



Hình 1: Quá trình chế tạo hạt Alginate - sắt nano

Đánh giá cấu trúc hình thái vật liệu

Hình thái, cấu trúc vi mô, hình dạng, kích thước của hạt Alginate - sắt nano được nghiên cứu bằng các phương pháp kính hiển vi quang học, hiển vi điện tử quét (SEM), phổ nhiễu xạ tia X (XRD). Quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) được sử dụng để nghiên cứu tương tác giữa Alginate và sắt nano trong hạt. Sản phẩm sau chế tạo được đem đi phân tích hình thái bề mặt bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM - Hitachi S-4600), đánh giá cấu trúc bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) với thiết bị X'Pert Pro (PAN Analytical) tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Phép phân tích FTIR dùng cho nghiên cứu này được thực hiện trên thiết bị Spectrum Two tại khoa Hóa - Lý Kỹ thuật, Học viện Kỹ Thuật Quân Sự.

<https://doi.org/10.51316/jca.2023.056>

Đánh giá khả năng xử lý chất màu RhB

Khả năng xử lý chất màu Rhodamin B (RhB) được đánh giá bằng phổ tử ngoại khả kiến UV-Vis. Các yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả xử lý chất màu được nghiên cứu như: nồng độ chất màu RhB 1; 3; 5; 7 mg/L, pH dung dịch tại các giá trị 1; 3; 5; 7; 9, và với các lượng sắt nano khác nhau trong chế tạo vi hạt lần lượt là 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 mL được nghiên cứu. Dung dịch RhB trước và sau khi xử lý được tiến hành phân tích phổ hấp thụ tử ngoại khả kiến (UV-Vis) tại bước sóng đặc trưng là 554 nm trên thiết bị Agilent 8453 tại Bộ môn Hóa Phân tích, Viện Kỹ thuật Hóa học, Đại học Bách khoa Hà Nội.

Khả năng xử lý chất màu RhB được đánh giá bằng phương pháp UV-Vis và xác định thông qua hiệu suất xử lý tính theo công thức:

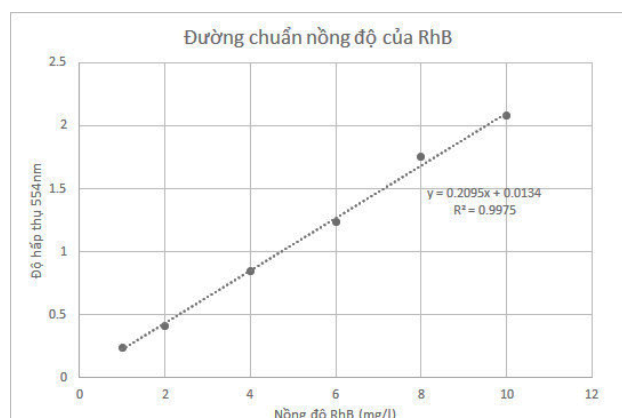
$$\text{Hiệu suất xử lý} = 100 - \frac{A_t}{A_o} \times 100$$

Trong đó:

A_t : độ hấp thụ tại bước sóng đặc trưng của chất màu RhB sau khi xử lý bằng hạt Alginate bao bọc sắt nano.

A_o : độ hấp thụ ban đầu của chất màu RhB tại bước sóng đặc trưng.

Dung dịch RhB với các nồng độ 1, 2, 4, 6, 8, 10 mg/L được tiến hành đo UV-Vis để xây dựng đường chuẩn. Phương trình đường chuẩn của dung dịch RhB là $y=0.2095x+0.0134$ ($R^2=0.9975$) được thể hiện trên hình 2.

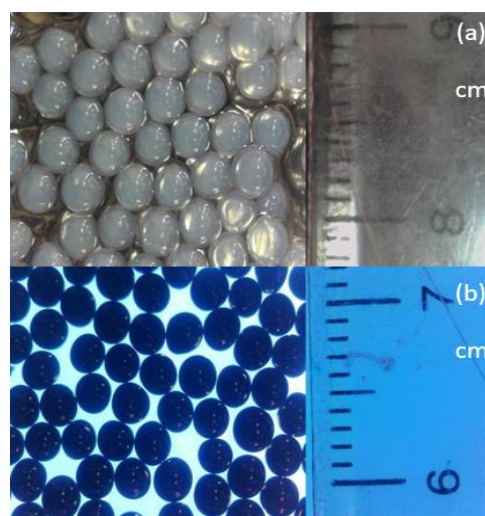


Hình 2: Đường chuẩn nồng độ của Rhodamine B

Kết quả và thảo luận

Quá trình tổng hợp vật liệu và hình thái, cấu trúc sản phẩm

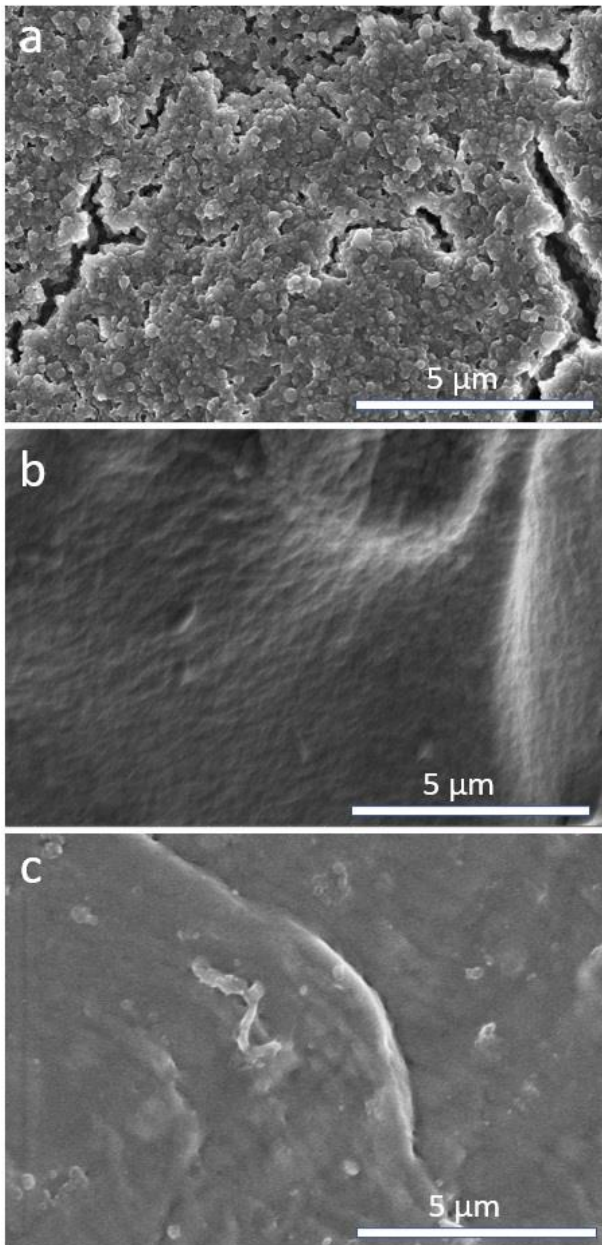
Hình ảnh hiển vi quang học của hạt Ca-Alginate khi không và có mang sắt nano được biểu diễn trên hình 3. Qua quan sát trực quan có thể thấy các hạt Alginate được hình thành có màu trắng đục đặc trưng bởi màu sắc của gel Ca-Alginate (hình 3a). Hình dạng tổng thể của hạt là dạng hình cầu, kích thước của các hạt đồng đều có đường kính trung bình trong khoảng 2,5 mm. Hạt Alginate có chứa sắt nano qua quan sát bước đầu có thể cho thấy sắt được phân tán đều bên trong hạt dựa vào màu đen đặc trưng của sắt trên tất cả các hạt sản phẩm (hình 3b). Hình dạng của hạt Alginate - sắt thu được vẫn ở dạng cầu và kích thước của hạt không thay đổi đáng kể so với hạt Ca-Alginate không chứa sắt.



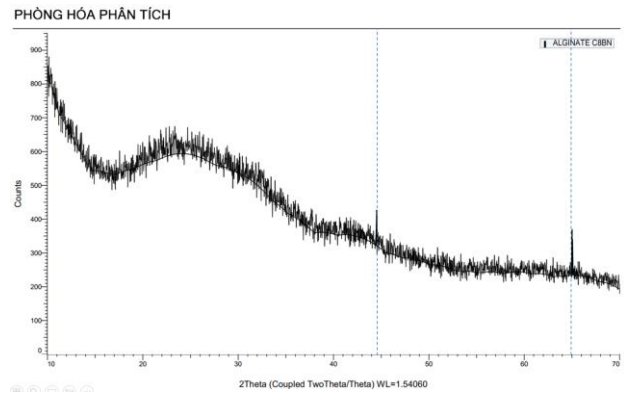
Hình 3: Hình ảnh hạt Alginate khi không mang sắt nano (a) và khi mang sắt nano (b)

Hình thái vi mô của vật liệu sắt nano hóa trị 0, hạt Alginate khi có và không có sắt nano được quan sát dưới kính hiển vi điện tử quét (hình 4). Ảnh SEM trên hình 4a cho thấy sản phẩm sắt nano hóa trị 0 được chế tạo có hình thái là các hạt nano với kích thước 30 ÷ 50 nm và có xu hướng co cụm lại tạo thành các cụm hạt nano (nanoclusters). Trong dịch chiết lá với có nhiều thành phần hữu cơ có khả năng đóng vai trò là các chất khử sinh học, điển hình là polyphenol (12,5%) và flavonoid (0,6%). Các hợp chất có chiết xuất từ thiên nhiên này sẽ khử các ion sắt (III) về sắt hóa trị 0 với kích thước nano [3,4]. Mặt cắt hạt Ca-Alginate qua quá trình làm khô có độ đồng nhất của polymer thiên nhiên với độ mịn đều (hình 4b). Trên hình 4c có thể quan sát thấy rõ ràng sự có mặt của các hạt sắt nano nổi bật trên nền mịn của cấu trúc hạt alginate (hình 4c). Kết hợp các hình ảnh hiển vi quang học và hình ảnh hiển vi điện tử quét, bước đầu có thể khẳng định việc đưa thành công vật liệu sắt nano vào trong vi hạt alginate.

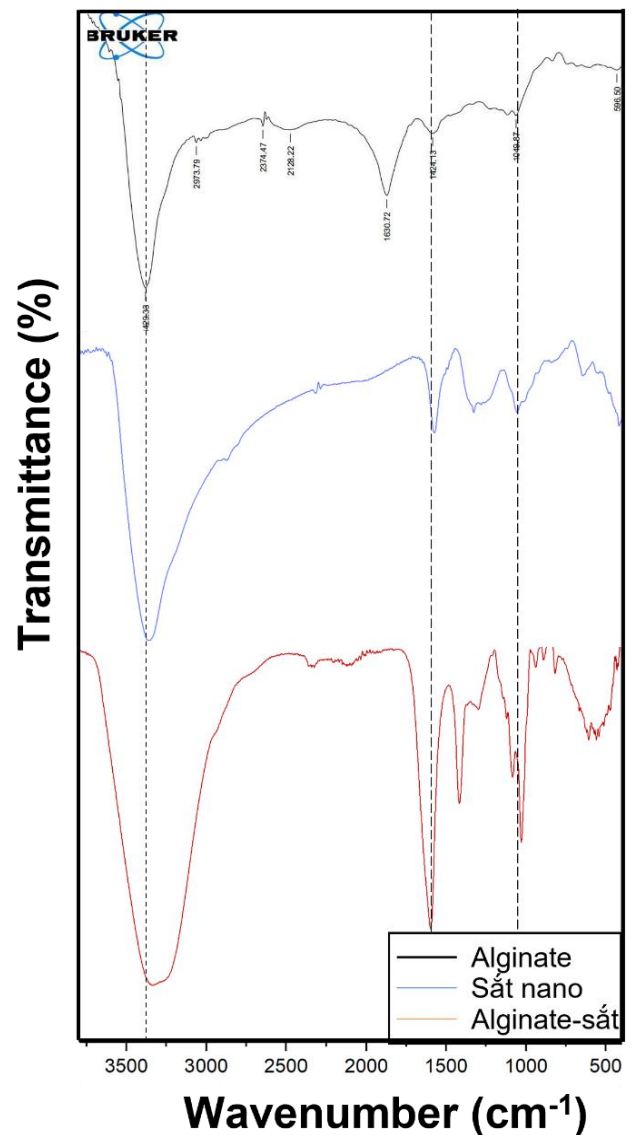
Cấu trúc tinh thể của hạt Ca-Alginate có chứa nano sắt được phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) và thể hiện trên hình 5. Dạng phổ thể hiện hình dạng đặc trưng cho vật liệu Ca-Alginate [11]. Tuy nhiên có thể quan sát thấy có sự xuất hiện các peak đặc trưng của sắt nano ở $2\theta = 44,7^\circ$ và 65° . Các peak này có cường độ tương đối nhỏ vì các hạt sắt nano đã bị bao phủ bởi một lớp Ca-alginate và có thể bản chất vô định hình của Alginate đã làm suy giảm tính tinh thể của hạt nano sắt.



Hình 4: Ảnh SEM của sắt nano được tổng hợp bằng phương pháp hóa học xanh (a); mặt cắt hạt alginate không mang sắt nano (b) và mặt cắt hạt alginate có mang sắt nano (c)



Hình 5: Giảm nhiễu xạ tia X của hạt alginate có mang sắt nano



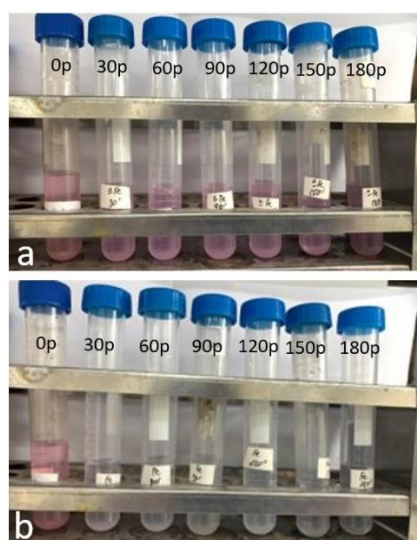
Hình 6: Hình ảnh phổ FTIR của hạt alginate nguyên bản, sắt nano hóa trị 0 và với phổ FTIR của hạt alginate mang sắt nano

Phổ FTIR của hạt Alginate có mang sắt nano được so sánh với phổ FTIR của hạt Alginate không chứa sắt và phổ FTIR của sắt nano hóa trị 0 được tổng hợp từ dịch chiết lá vối. Các đỉnh đặc trưng lần lượt ở 3429, 1630, 1424, 1029 và 620 cm^{-1} được quy cho các dao động đặc trưng của liên kết O-H, C=O, C-H, C-N và Fe-O.

Cụ thể, ở phổ FTIR của hạt alginate nguyên bản xuất hiện đỉnh peak tại 3429 cm^{-1} , 1630 cm^{-1} , 1424 cm^{-1} , 1049 cm^{-1} đặc trưng cho các liên kết O-H; $-\text{COO}-$; và $-\text{C}-\text{H}-$ và $\text{C}-\text{O}-\text{C}$. Ở phổ FTIR của sắt nano hóa trị 0 cũng xuất hiện các đỉnh đặc trưng cho liên kết nhóm O-H, C=O, C-H tương tự phổ FTIR của hạt alginate tuy nhiên có xuất hiện thêm liên kết của nhóm C-N và Fe-O lần lượt tại khoảng phổ 1029 cm^{-1} và 620 cm^{-1} .

Phổ FTIR của hạt alginate mang sắt nano cho thấy xuất hiện đồng thời các liên kết đặc trưng của cả hạt alginate và sắt nano hóa trị 0 khi xuất hiện các đỉnh đặc trưng cho liên kết O-H, C=O, C-H, C-N và Fe-O lần lượt tại 3400, 1597, 1418, 1029, 620 cm^{-1} . Kết quả cho thấy rằng sau quá trình bao bọc sắt của hạt Alginate, hạt Alginate - sắt xuất hiện các peak đặc trưng cho các nhóm chức của cả alginate và sắt nano; giữa sắt nano và alginate không xuất hiện các tương tác hóa học, không sinh ra các nhóm chức mới. Kết quả này bước đầu cho thấy hạt Alginate chỉ thực hiện vai trò là chất mang bao bọc sắt nano, không xuất hiện các tương tác hóa học giữa hạt mang (Ca-alginate) và chất được mang (sắt nano).

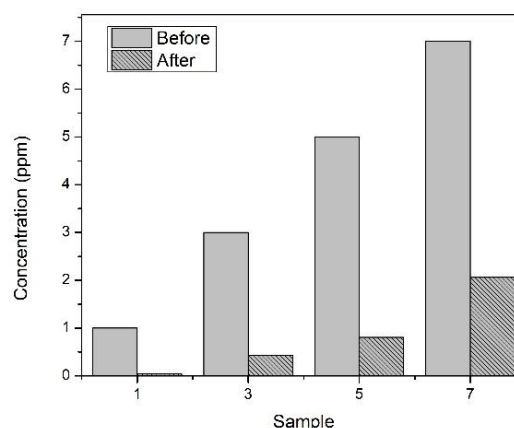
Quá trình xử lý chất màu RhB



Hình 7: Kết quả xử lý RhB với thời gian từ 0 đến 180 phút bằng hạt Alginate không chứa sắt nano (a) và có chứa sắt nano (b)

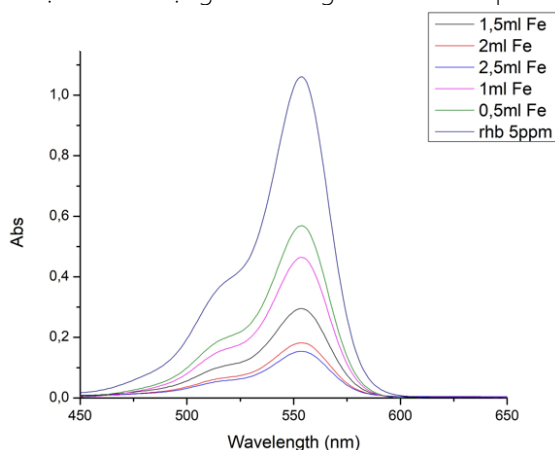
Để xác định hiệu suất xử lý chất màu RhB, tiến hành chế tạo các hạt Alginate có mang sắt nano bằng quy trình đã trình bày trong phần thực nghiệm. Qua nghiên cứu cho thấy 180 phút là thời gian tối ưu cho xử lý chất màu RhB khi hầu như toàn bộ chất màu được xử lý – dung dịch mất màu hoàn toàn (hình 7). Đồng thời nghiên cứu so sánh khả năng xử lý chất màu cũng được tiến hành với cùng một lượng hạt Alginate có chứa và không chứa sắt nano. Quan sát mẫu thực nghiệm cho thấy, sau 180 phút xử lý, màu hồng của mẫu dung dịch RhB được xử lý bằng hạt alginate không biến đổi nhiều. Trong khi đó, dung dịch RhB được xử lý bằng vi hạt alginate có chứa sắt nano gần như mất màu hoàn toàn.

Qua phân tích UV-Vis và tính toán cho thấy, hạt Alginate có khả năng xử lý chất màu RhB, tuy nhiên hiệu suất xử lý sau 180 phút chỉ đạt xấp xỉ 10%. Hạt alginate xử lý các chất ô nhiễm dựa trên cơ chế hấp phụ vào cấu trúc của hydrogel đã được nhiều nhóm nghiên cứu đề cập [1,5,6]. Với cùng một lượng hạt alginate nhưng có chứa sắt nano, hiệu suất xử lý một thể tích mẫu dung dịch RhB tương tự cho hiệu suất xử lý đạt trên 90%. Như vậy có thể kết luận, sắt nano đóng vai trò chính trong quá trình xử lý chất màu RhB với cơ chế xử lý dựa trên quá trình oxy hóa tiên tiến [2,3]. Cơ chế loại bỏ - xử lý các hợp chất hữu cơ của sắt nano đã được chứng minh và báo cáo trong nhiều nghiên cứu trước đây, gồm có 3 con đường: i) Hấp phụ lên lớp hỗn hợp oxit và hydroxit mỏng trên bề mặt hạt sắt (vai trò không đáng kể); ii) Khử điện hóa trên bề mặt hạt sắt nano (vai trò không đáng kể); iii) cơ chế oxy hóa tiên tiến, bề gãy và phân hủy hoàn toàn các hợp chất hữu cơ dựa vào các gốc hydroxyl được sinh ra do phản ứng của hạt sắt nano và môi trường xung quanh (vai trò chủ yếu) [12-14].



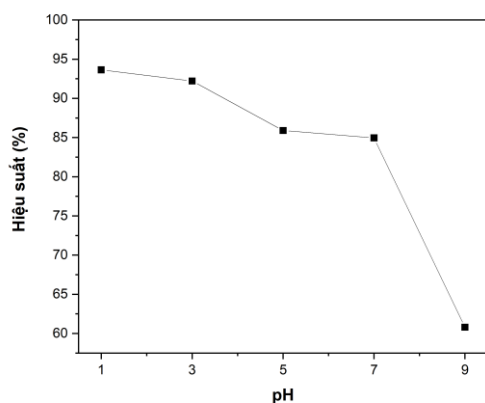
Hình 8: Nồng độ của dung dịch RhB tại các nồng độ RhB khác nhau: trước và sau khi xử lý

Tiến hành khảo sát ảnh hưởng của nồng độ RhB đến hiệu quả quá trình xử lý của hạt Alginate - sắt nano với các dung dịch RhB có nồng độ lần lượt: 1; 3; 5; 7 mg/L. Đây là khoảng nồng độ chất màu RhB thường được thải ra hệ thống nước thải của các nhà máy và yêu cầu cần xử lý. Kết quả UV-Vis thu được (hình 8) cho thấy ở các nồng độ 1 mg/L; 3 mg/L và 5 mg/L đều cho hiệu suất xử lý trên 90% và ở nồng độ 7 mg/L cho hiệu suất xử lý là xấp xỉ 70%. RhB 5 mg/L là nồng độ cao nhất có khả năng xử lý với hiệu suất cao. Vì vậy, RhB 5 mg/l được lựa chọn là đối tượng để đánh giá các bước tiếp theo.



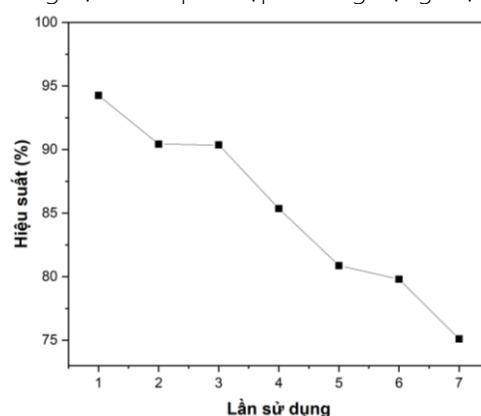
Hình 9: Kết quả phân tích UV-Vis của dung dịch RhB tại tỉ lệ Fe khác nhau.

Ảnh hưởng của lượng sắt nano đến hiệu quả xử lý cũng được tiến hành. Thay đổi lần lượt lượng sắt nano trong quá trình tổng hợp hạt là 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 mL trên 50ml hỗn hợp Alginate 2% và sắt nano. Kết quả cho thấy khi tăng dần lượng sắt lên thì hiệu quả xử lý RhB cũng tăng lên, ở mức 2 mL và 2,5 mL sắt nano trên tổng lượng 50 mL dung dịch Alginate để chế tạo vi hạt thì sản phẩm cho hiệu suất xử lý tương tự và đều đạt trên 90%. Tỉ lệ 2 mL sắt nano/50 mL dung dịch Alginate được lựa chọn để chế tạo hạt sản phẩm.



Hình 10: Hiệu suất xử lý RhB 5 mg/L tại các pH khác nhau

Khảo sát pH là một bước quan trọng trong quá trình đánh giá khả năng xử lý chất màu hữu cơ. Ở các pH khác nhau cho thấy khả năng xử lý chất màu của hạt Alginate bao bọc sắt nano có sự chênh lệch đáng kể (hình 10). Ở môi trường axit và trung tính (pH=1; 3; 5; 7) cho hiệu quả xử lý đạt đều trên 90% và khi pH=9 thì hiệu quả xử lý giảm còn dưới 60%. Như vậy, môi trường axit và trung tính phù hợp với quá trình xử lý chất màu RhB bằng hạt alginate mang sắt nano. Kết quả hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu trước đây về ứng dụng sắt nano trong xử lý RhB [3] và môi trường pH=7 được lựa chọn cho các thí nghiệm khác phù hợp với ứng dụng thực tiễn.



Hình 11: Hiệu suất xử lý RhB của Alginate - sắt sau các lần tái sử dụng

Sản phẩm hạt alginate có chứa sắt nano được chế tạo bằng quy trình này có thể được lọc tách dễ dàng và tái sử dụng để tiếp tục xử lý dung dịch RhB. Kết quả thể hiện trên hình 11 cho thấy hiệu suất xử lý RhB của hạt alginate chứa sắt nano đạt trên 80% sau 7 lần tái sử dụng. Khi sử dụng đến lần thứ 10, vi hạt vẫn có khả năng xử lý RhB với hiệu suất xử lý trên 65% nhưng bắt đầu quan sát thấy xuất hiện sự phá hủy các vi hạt do quá trình trương nở hydrogel Alginate khi ngâm quá lâu trong các dung dịch. Với kết quả tái sử dụng được nhiều lần cùng hiệu suất xử lý chất màu cao, có thể hướng tới việc sử dụng các hạt alginate chứa sắt nano như vật liệu lọc và xử lý môi trường trong các ống lọc được sản xuất hàng loạt.

Kết luận

Hạt Ca-alginate có chứa sắt nano hóa trị 0 với kích thước trung bình 2,5 μm đã được chế tạo thành công bằng quy trình đơn giản gồm tạo nhũ tương, nhỏ giọt và hóa rắn. Sắt nano được phân bố đều trong hạt Ca-alginate và không xuất hiện các tương tác hóa học giữa chất mang – Ca-alginate và chất được mang – sắt nano. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy hạt Alginate chứa sắt nano

<https://doi.org/10.51316/jca.2023.056>

có khả năng xử lý hiệu quả và tái sử dụng nhiều lần đối với chất màu Rhodamine B (RhB) ở nồng độ 5 mg/L, đạt hiệu suất hơn 90 %, trong điều kiện pH trung tính và thời gian xử lý là 180 phút. So với các chất xử lý màu thông dụng như than hoạt tính và các hệ zeolite thương mại có cơ chế xử lý hấp phụ - không triệt để, hệ vật liệu alginate – sắt nano có khả năng xử lý triệt để các chất màu hữu cơ. Ngoài ra, hai thành phần của hệ là sắt nano – được chế tạo đơn giản bằng phương pháp hóa học xanh với chất khử đầu vào là chiết xuất thiên nhiên từ lá vối và alginate – là một hợp chất thiên nhiên được từ tảo nâu, hiện đã được nuôi cấy và chiết xuất thành công tại Việt Nam, hứa hẹn đây là vật liệu có tiềm năng xử lý ô nhiễm môi trường nước trong tương lai, với hiệu quả xử lý cao, kinh tế, dễ thu hồi, và tái sử dụng nhiều lần.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Chương trình phát triển khoa học cơ bản trong lĩnh vực Hóa học, Khoa học sự sống, Khoa học trái đất và Khoa học biển giai đoạn 2017-2025 theo đề tài số ĐTĐL.CN-69/19.

Tài liệu tham khảo

1. T.H. Duc, T.K. Vu, C.-T. Dang, V.H. Nguyen, D.D. La, G.M. Kim, S.W. Chang, X.-T. Bui, T.-D. Dang, D.D. Nguyen, *Environmental Technology & Innovation* 22 (2021) 101400. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101400>
2. N. Van Hoang, N. Thi Xuan Quynh, T.-D. Dang, T. Nguyen Xuan, V. Ngoc Toan, D. Duc La, *ChemistrySelect* 7 (2022) e202203499. <https://doi.org/10.1002/slct.202203499>
3. N. Van Hoang, L. Nguyen-Thi, G.M. Kim, T.-D. Dang, V. Ngoc Toan, D.D. La, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 13 (2022) 045007. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/aca023-045007>
4. N.T. Le, T.-D. Dang, K. Hoang Binh, T.M. Nguyen, T.N. Xuan, D.D. La, A. Kumar Nadda, S.W. Chang, D.D. Nguyen, *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 25 (2022) 100598. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100598>
5. Z.A. Sutirman, M.M. Sanagi, W.I. Wan Aini, *International Journal of Biological Macromolecules* 174 (2021) 216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.150>
6. V. Rocher, J.-M. Siaugue, V. Cabuil, A. Bee, *Water Research* 42 (2008) 1290. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.09.024>
7. D.L. Huber, *Small* 1 (2005) 482. <https://doi.org/10.1002/sml.200500006>
8. J.E. Martin, A.A. Herzog, W. Yan, X.-q. Li, B.E. Koel, C.J. Kiely, W.-x. Zhang, *Langmuir* 24 (2008) 4329. <https://doi.org/10.1021/la703689k>
9. K.Y. Lee, D.J. Mooney, *Progress in Polymer Science* 37 (2012) 106. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
10. T.-D. Dang, H.T.T. Le, D.A. Nguyen, D.D. La, D.D. Nguyen, *New Journal of Chemistry* 44 (2020) 9083. <https://doi.org/10.1039/D0NJ00126K>
11. S. Jana, M.K. Trivedi, R.M. Tallapragada, A. Branton, D. Trivedi, G. Nayak, R.K. Mishra, *Pharm Anal Acta* 6 (2015). <https://doi.org/10.4172/2153-2435.1000430>
12. Q. Li, Z. Chen, H. Wang, H. Yang, T. Wen, S. Wang, B. Hu, X. Wang, *Science of The Total Environment* 792 (2021) 148546. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148546>
13. C.D. Raman, S. Kanmani, *Journal of Environmental Management* 177 (2016) 341. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.034>
14. T.-D. Dang, H.T.T. Le, D.A. Nguyen, D.D. La, D.D. Nguyen, *New Journal of Chemistry* 44 (2020) 9083. <https://doi.org/10.1039/D0NJ00126K>