

TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH HẤP PHỤ Cr(VI) TRONG NƯỚC TRÊN VẬT LIỆU NANOCOMPOSITE Fe_3O_4 /OXIT PHỨC HỢP Fe-Mn /BENTONITE SỬ DỤNG THIẾT KẾ THÍ NGHIỆM TAGUCHI VÀ PHƯƠNG PHÁP BỀ MẶT ĐÁP ỨNG

Đến toà soạn 10-05-2024

Nguyễn Bình Dương¹, Phạm Văn Lâm², Quẩn Thị Thu Trang¹,
Phan Thị Ngọc Bích^{1*}

1. Viện Hóa học, Viện Hàn lâm KHCN Việt Nam

2. Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm KHCN Việt Nam

*Email: bich@ich.vast.vn

SUMMARY

OPTIMIZATION OF Cr(VI) ADSORPTION ON Fe_3O_4 /Fe-Mn BINARY OXIDE/BENTONITE NANOCOMPOSITE USING TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN AND RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

In this report, Taguchi experimental design (TED) and response surface methodology (RSM) were used to optimize and model Cr(VI) removal conditions by Fe_3O_4 /Fe-Mn binary oxide/bentonite nanocomposite (FFMB). The effect of variables including Cr(VI) concentration, adsorbent dosage, pH of the solution, and contact time on the adsorption efficiency of Cr(VI) were evaluated by TED. Then, the most important factors were chosen and modeled by RSM to reach the highest efficiency of Cr(VI) removal. The proposed quadratic equation of RSM was consistent with correlation coefficients $R^2=0,9874$ for the actual experimental data. The maximum adsorption capacity of Cr(VI) in the optimal operation condition (solution pH of 2.54, contact time of 314 min and adsorbent dosage of 1,55 g/l) was 64,15 mg/g.

Keywords: Fe_3O_4 /Fe-Mn binary oxide/bentonite, Taguchi experimental design, response surface methodology, adsorption, Cr(VI).

1. MỞ ĐẦU

Crom là một trong các kim loại được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp như khai khoáng, sản xuất thép, hợp kim, chế biến gỗ, dệt nhuộm... [1-3]. Đi kèm theo đó, do độc tính cao nên các nguồn xả thải crom là mối quan tâm lo ngại lớn đối với môi trường và cuộc sống con người. Crom mà đặc biệt là crom ở trạng thái hóa trị 6, Cr(VI), có thể gây ra các bệnh ở thận, dạ dày và gan, gây ra các vấn đề sức khỏe, nhiễm độc gây biến dị di

truyền và ung thư [4]. Giới hạn của tổng lượng crom cho phép trong nước ăn uống theo qui định của WHO cũng như theo QCVN 01-1:2018/BYT chỉ 0,05 mg/L. Chính vì vậy, loại bỏ Cr (VI) ra khỏi nước bị ô nhiễm là vấn đề hết sức quan trọng. Nhiều phương pháp hóa lý đã được sử dụng trong đó hấp phụ loại bỏ Cr(VI) ra khỏi môi trường nước được nghiên cứu rộng rãi bởi quá trình đơn giản dễ thực hiện và mang lại hiệu quả tốt. Trong số các vật liệu hấp phụ hiện có, các

nanocomposite trên cơ sở kim loại, oxit kim loại với chất nền (chất mang) khác nhau đã và đang được phát triển nhanh chóng. Nhiều vật liệu nanocomposite đã được nghiên cứu sử dụng để loại bỏ Cr(VI) trong nước [5-8]. Trong một công bố trước đây [9], chúng tôi đã nghiên cứu tổng hợp một vật liệu mới, nanocomposite từ tính Fe_3O_4 /oxit phức hợp Fe-Mn/bentonite (FFMB). FFMB là nanocomposite được hình thành trên cơ sở kết hợp ba thành phần Fe_3O_4 , oxit phức hợp Fe-Mn và bentonite. Bentonite dạng tách lớp được sử dụng làm chất nền để khắc phục vấn đề kết tập của các hạt nano cũng như tăng độ bền cơ học nhằm nâng cao hiệu suất làm việc của vật liệu. FFMB đã được chứng minh là chất hấp phụ tốt với các đặc trưng như diện tích bề mặt riêng lớn đạt 188,14 m^2/g , dễ dàng tách ra khỏi dung dịch do vật liệu có tính chất siêu thuận từ với độ từ bão hòa 39,6 emu/g. FFMB đã thể hiện khả năng hấp phụ thuốc nhuộm tốt, dung lượng hấp phụ RR-195 khá cao, đạt 164 mg/g [9]. Trong bài báo này, chúng tôi sẽ trình bày kết quả nghiên cứu khả năng hấp phụ kim loại nặng của vật liệu, cụ thể là nghiên cứu hấp phụ Cr(VI) trong môi trường nước.

Việc nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số vận hành đến hiệu suất của một quá trình thường đòi hỏi một lượng lớn các thí nghiệm nhằm tìm ra qui luật và xác định các điều kiện tối ưu. Các phương pháp thí nghiệm trên cơ sở thống kê sử dụng các mô hình toán học đã được phát triển nhằm khắc phục trở ngại này. Thiết kế thí nghiệm Taguchi (TED) và phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) là hai công cụ phân tích thống kê mạnh mẽ và đáng tin cậy, cho phép đánh giá độc lập các kết quả với số lần chạy thử nghiệm ít nhất có thể [10, 11]. Bài báo này tập trung vào nghiên cứu tối ưu hóa quá trình hấp phụ Cr(VI) trên vật liệu FFMB sử dụng TED và RSM. Các thông số chính ảnh hưởng

đến hiệu suất hấp phụ được chọn làm yếu tố nghiên cứu bao gồm: pH dung dịch, lượng chất hấp phụ, thời gian tiếp xúc và nồng độ Cr(VI) trong dung dịch ban đầu. Mô hình toán học tuyến tính theo TED đã được đưa ra nhằm minh họa ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau thông qua phân tích phương sai (Anova), sự ảnh hưởng chính, phụ tới hàm mục tiêu được thể hiện cụ thể. Từ kết quả này, sử dụng phương pháp RSM xác định được các giá trị thông số tối ưu cho quá trình hấp phụ Cr(VI) trên vật liệu.

2. THỰC NGHIỆM

Thí nghiệm hấp phụ Cr(VI)

Dung dịch Cr(VI) được chuẩn bị từ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dùng nước khử ion. Giá trị pH được điều chỉnh bằng dung dịch HCl và NaOH 0,1 M.

Vật liệu FFMB được tổng hợp theo qui trình đã công bố trước đây của chúng tôi [9].

Một lượng FFMB xác định được phân tán trong 50 mL nước trên máy siêu âm Ultrasonic steri cleaner (Taiwan) trong 5 phút. Dung dịch Cr(VI) đã chuẩn bị được thêm tiếp vào bình thí nghiệm sao cho đảm bảo lượng dung dịch và nồng độ mong muốn. Các mẫu được lắc trên máy lắc (IKA HS 260 Basic) với tốc độ 120 vòng/phút. Mẫu sau hấp phụ được lọc để loại bỏ chất hấp phụ trên giấy lọc 0,2 μm .

Xác định nồng độ Cr(VI)

Nồng độ Cr(VI) được xác định bằng phương pháp trắc quang sau khi tạo phức với 1,5-diphenylcarbazine (DPC) [12].

Dung dịch DPC được chuẩn bị bằng cách hòa tan 1g DPC trong 100 mL axeton, bảo quản trong chai thủy tinh màu nâu ở nhiệt độ 5 °C.

Cr(VI) được tạo phức với DPC theo qui trình [12]. Cụ thể, 1 mL mẫu sau hấp phụ đã lọc được pha loãng thành 50 mL với

nước cất. Sau đó, 0,5 mL sulfuric acid 98%, 1 mL dung dịch phosphoric acid (tỷ lệ thể tích acid 85%/nước = 1:1) và 2 mL dung dịch DPC lần lượt được thêm vào. Lắc hỗn hợp khoảng 1 phút, để yên thêm 10 phút thu được phức chất Cr(VI)-DPC màu hồng.

Phổ hấp thụ UV-Vis của phức chất Cr(VI)-DPC được xác định ở bước sóng $\lambda_{\max} = 540$ nm trên máy Perkin Elmer Lambda 900. Đã xác định được phương trình đường chuẩn có dạng $y = 0,7225x - 0,0066$ với hệ số tương quan $R^2 = 0,9988$.

Nồng độ Cr(VI) được tính theo biểu thức:

$$[Cr]_t = \frac{Abs_t + 0,0066}{0,7225} \quad (1)$$

Hiệu suất hấp phụ Cr(VI) được tính theo biểu thức:

$$H(\%) = \frac{[Cr]_o - [Cr]_t}{[Cr]_o} \times 100 \quad (2)$$

Trong đó:

$[Cr]_t$ là nồng độ Cr(VI) trong dung dịch còn lại sau thời gian thí nghiệm t , $[Cr]_o$ là nồng độ Cr(VI) ban đầu, Abs_t là độ hấp thụ quang của phức Cr(VI)-DPC tương ứng với nồng độ $[Cr]_t$, $H(\%)$ là hiệu suất hấp phụ Cr(VI) trên FFMB.

Thiết kế thí nghiệm Taguchi (TED)

Trong phương pháp TED, sử dụng thuật ngữ “tín hiệu” (signal – S) biểu thị giá trị mong muốn của mục tiêu đầu ra (ở đây là hiệu suất hấp phụ Cr(VI)) và thuật ngữ “nhiều” (noisy – N) là giá trị không mong muốn. Các yếu tố cung cấp thông tin cụ thể đến các tín hiệu trong mô hình thông qua phân tích phương sai ANOVA. Tỷ lệ tín hiệu/nhiều (S/N) được dùng để đánh giá ảnh hưởng của yếu tố tới tín hiệu. Tỷ lệ S/N theo tiêu chí càng lớn càng tốt được đưa ra trong biểu thức:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

Trong đó: y_n là tín hiệu - hiệu suất hấp phụ Cr(VI), n là số thứ tự thí nghiệm, S/N là tỷ lệ tín hiệu/nhiều.

Các yếu tố của quá trình hấp phụ được nghiên cứu theo TED với 9 thí nghiệm (L_9) được bố trí với tín hiệu là hiệu suất hấp phụ Cr(VI) và 4 yếu tố là pH dung dịch (1–3), lượng chất rắn (0,1–2 g/L), thời gian tiếp xúc (10–360 phút), nồng độ Cr (10–100 mg/L) và 3 mức của từng yếu tố. Khoảng giá trị của các thông số thí nghiệm (yếu tố) được lựa chọn dựa trên kết quả của một số thí nghiệm hấp phụ sơ bộ ban đầu.

Giá trị S/N và mức đóng góp vào y_n là tiêu chí đánh giá ảnh hưởng các yếu tố tới hiệu suất hấp phụ.

Bảng 1. Các mức biến số ảnh hưởng trong TED

Biến số	Mức cao	Mức giữa	Mức thấp
pH	3	2	1
Thời gian (phút)	360	185	10
Lượng rắn (g/L)	2,00	1,05	0,10
Nồng độ Cr (mg/L)	100	55	10

Tổng bình phương thu được từ mô hình (SS_{Total}) và biến số riêng lẻ (SS_{variable}) được sử dụng để xác định hệ số đóng góp của từng yếu tố và đánh giá ảnh hưởng của chúng đến hiệu suất hấp phụ Cr(VI) [10]. Sự đóng góp của mỗi yếu tố giúp hiểu rõ về tác động của yếu tố đó đến hiệu suất hấp phụ và có thể được tính bằng phương trình:

$$\% \text{ đóng góp} = \frac{SS_{\text{variable}}}{SS_{\text{Total}}} \times 100 \quad (4)$$

Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM)

Theo kết quả thu được bằng TED, yếu tố nồng độ Cr ít ảnh hưởng tới hiệu suất hấp phụ Cr(VI), 3 yếu tố còn lại là lượng chất hấp phụ, thời gian và pH dung dịch được xác định giá trị tối ưu bằng phương pháp RSM với hàm mục tiêu là hiệu suất hấp phụ Cr(VI). Phương trình đáp ứng bậc hai với ba biến số là ba yếu tố tương ứng ở trên có dạng:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + \sum_{j=i+1}^3 b_{ij} X_j + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_i X_j \quad (5)$$

Trong đó:

Y là hàm mục tiêu - hiệu suất hấp phụ Cr(VI) (%), b_0 là hệ số hồi qui bậc 0, X_i là biến độc lập thứ i ảnh hưởng tới hàm mục tiêu, b_i là hệ số hồi qui bậc 1 đối với biến X_i . Giá trị của các biến khảo sát được mã hóa thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Bảng mã hóa các giá trị của các biến khảo sát

Biến số	Mã hóa	Cực đại	Tâm	Cực tiểu
pH	X_1	3	2	1
Thời gian (phút)	X_2	360	185	10
Lượng rắn (g/L)	X_3	2,00	1,05	0,10

Phép phân tích phương sai được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của các biến số và ảnh hưởng tương tác của chúng lên hàm mục tiêu thông qua trị số p . Biến số có ảnh hưởng tới hàm mục tiêu khi $p < 0,05$.

Để đánh giá tính tương thích của mô hình, ba thí nghiệm hấp phụ được tiến hành với điều kiện đã tối ưu. Xác định giá trị hiệu suất thực nghiệm trung bình. Sai số giữa giá trị hiệu suất hấp phụ tính tối ưu theo mô hình và giá trị thực tế được tính theo công thức:

$$\Delta(\%) = \frac{(K_{qtn} - K_{qtt})}{K_{qtt}} \times 100 \quad (6)$$

Trong đó: Δ : Sai số (%); K_{qtn} : Giá trị hiệu suất hấp phụ trung bình xác định bằng thực nghiệm (%); K_{qtt} : Giá trị hiệu quả hấp phụ tính theo mô hình tại điều kiện tối ưu (%).

Nghiên cứu đẳng nhiệt hấp phụ Cr(VI) trên FFMB

Nghiên cứu đẳng nhiệt hấp phụ Cr(VI) trên vật liệu FFMB được tiến hành với các thông số đã được tối ưu ở trên, trong khoảng nồng độ Cr(VI): 10 - 90 mg/L.

Số liệu thí nghiệm được đánh giá theo hai mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich [9].

$$\text{Langmuir: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_{\max}} + \frac{1}{K_L Q_{\max}} \quad (7)$$

$$\text{Freundlich: } \ln(q_e) = \ln(K_F) + \left(\frac{1}{n}\right) \ln(C_e) \quad (8)$$

Trong đó: q_e (mg/g) và C_e là lượng Cr(VI) hấp phụ trên 1 g FFMB và nồng độ Cr(VI) (mg/L) trong dung dịch tại cân bằng, tương ứng, $Q_{\max}$ (mg/g) là dung lượng hấp phụ đơn lớp cực đại trên FFMB, K_L (L/mg) là hằng số hấp phụ Langmuir biểu thị ái lực của chất hấp phụ, K_F (mg/g)/(L/mg) và n (không thứ nguyên) là các hằng số Freundlich chỉ ra cường độ và khả năng hấp phụ, tương ứng.

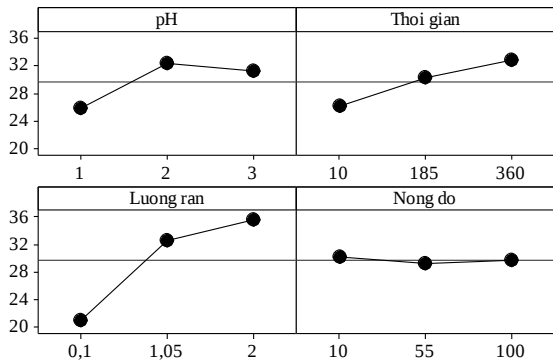
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thiết kế thí nghiệm Taguchi

Thiết kế Taguchi TED được thực hiện trên phần mềm Minitab phiên bản 16. Như trong phần thực nghiệm đã trình bày, bốn thông số với ba mức biến đổi được khảo sát nên ta có bảng ma trận trực giao L_9 (Bảng 3). Sự thay đổi theo mức của từng yếu tố cho thấy tầm quan trọng của yếu tố đó trong quá trình kiểm nghiệm. Trong Bảng 3, tác động của từng yếu tố ở mỗi cấp độ được phần mềm tính toán độc lập và do đó, tùy theo sự thay đổi các mức

của từng yếu tố, tầm quan trọng của chúng đã được nghiên cứu.

Từ kết quả Bảng 3, xác định tỉ số S/N theo phương trình 3, từ đó xây dựng được mức ảnh hưởng của từng biến số đến giá trị S/N của chúng (Hình 1).



Hình 1. Mức ảnh hưởng của từng biến đến giá trị S/N

Kết quả Hình 1 kết hợp với phân tích tổng bình phương phương sai theo Anova và mức đóng góp của từng yếu tố (Bảng 4) cho thấy lượng chất hấp phụ có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu suất hấp phụ với tỉ lệ đóng góp là 73,8%, thời gian tiếp xúc và pH dung dịch Cr(VI) là những yếu tố ảnh hưởng tiếp theo đều với khoảng 13,2% và cuối cùng ít ảnh hưởng nhất là nồng độ Cr(VI) chỉ đóng góp 0,2% tới hiệu suất hấp phụ Cr(VI).

Giá trị PZC của vật liệu FFMB là 4,2 [9]. Khi pH dung dịch thấp hơn điểm PZC của vật liệu, bề mặt FFMB tích điện dương, bề mặt FFMB được pronton hóa thành dạng (FFMB-H) trong khi đó dạng tồn tại của Cr(VI) tại pH này chủ yếu là HCrO_4^- và một phần $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ [13]. Hai ion âm này dễ dàng tiếp cận bề mặt tích điện dương của vật liệu, tạo điều kiện thuận lợi cho hình thành liên kết tĩnh điện FFMB-H- HCrO_4^- và FFMB-H- $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ [14].

Các yếu tố gồm pH dung dịch, thời gian và lượng chất hấp phụ (lượng rắn) được chọn làm biến số để tối ưu hóa hiệu suất hấp phụ Cr(VI) bằng phương pháp RSM.

Trong các thí nghiệm tối ưu tiếp theo nồng độ Cr(VI) của dung dịch ban đầu được duy trì ở mức 55 mg/L.

Bảng 3. Bảng thiết kế thí nghiệm L_9

TT	pH	Thời gian (phút)	Lượng rắn (g/L)	Nồng độ (mg/L)	Hiệu quả (%)
1	1	10	0,1	10	5
2	1	185	1,05	55	27
3	1	360	2	100	55
4	2	10	1,05	100	37
5	2	185	2	10	92
6	2	360	0,1	55	20
7	3	10	2	55	45
8	3	185	0,1	100	14
9	3	360	1,05	10	76

Bảng 4. Mức đóng góp của các biến số thực nghiệm

Biến số	Tổng bình phương	Mức đóng góp (%)
pH	66,197	12,80
Thời gian	66,393	12,84
Lượng rắn	381,682	73,81
Nồng độ	0,842	0,16
Tổng	517,113	

3.2. Tối ưu hóa các yếu tố ảnh hưởng bằng RSM

Trong phần này, thiết kế Box-Benkhen được sử dụng để xây dựng ma trận thực nghiệm tối ưu hóa. Kết quả đưa ra trong Bảng 5.

Bảng 5. Bảng ma trận thí nghiệm tối ưu hóa

STN	Biến mã Hóa			Hàm mục tiêu (%) Y
	pH X1	Thời gian (phút) - X2	Lượng rắn (g/L) - X3	
1	2	185	1,05	82
2	2	10	0,10	7
3	3	10	1,05	20
4	3	185	2,00	78
5	2	185	1,05	82
6	1	10	1,05	37
7	3	185	0,10	25

Trên cơ sở các kết quả đưa ra trong Bảng 5, sử dụng phần mềm Minitab 16 để phân

tích tương tác và ảnh hưởng của các biến độc lập đến hàm mục tiêu. Kết quả (không đưa ra ở đây) cho thấy các tương tác X_1^2 , X_1X_3 , X_2X_3 là không ảnh hưởng đến hàm mục tiêu (giá trị $p \geq 0,05$), các yếu tố X_1 , X_2 , X_3 , X_1X_2 ảnh hưởng dương tới hàm mục tiêu và các yếu tố còn lại ảnh hưởng âm tới hàm mục tiêu.

Phương trình đáp ứng được xác định là:

$$Y = 38,7956 + 40,2015X_1 + 0,2026X_2 + 68,1506X_3 + 0,061X_1X_2 - 0,0006X_2^2 - 25,2078X_3^2 \quad (9)$$

Xem xét phương trình (9) ta thấy thứ tự ảnh hưởng của ba biến độc lập đến hàm mục tiêu giảm theo dãy X_3 , X_1 , X_2 do hệ số của các biến này trong phương trình đáp ứng giảm tương ứng.

Từ dữ liệu phân tích bằng phần mềm Minitab 16 xác định được giá trị tối ưu của hiệu suất hấp phụ Cr(VI) đạt 96,04% tại pH 2,49, thời gian tiếp xúc 314 phút và lượng rắn 1,55 g/L trong điều kiện nồng độ dung dịch Cr(VI) ban đầu là 55 mg/L, tốc độ lắc 120 vòng/phút và nhiệt độ 25°C (Hình 2).

Đánh giá tính tương thích của mô hình thể hiện qua sự lặp lại 3 thí nghiệm với cùng điều kiện tối ưu đã xác định. Hiệu suất hấp phụ Cr(VI) là 96,15% và sai số tương đối so với giá trị mô hình là 0,114%. Như vậy, mô hình có độ lặp lại tương đối tốt.

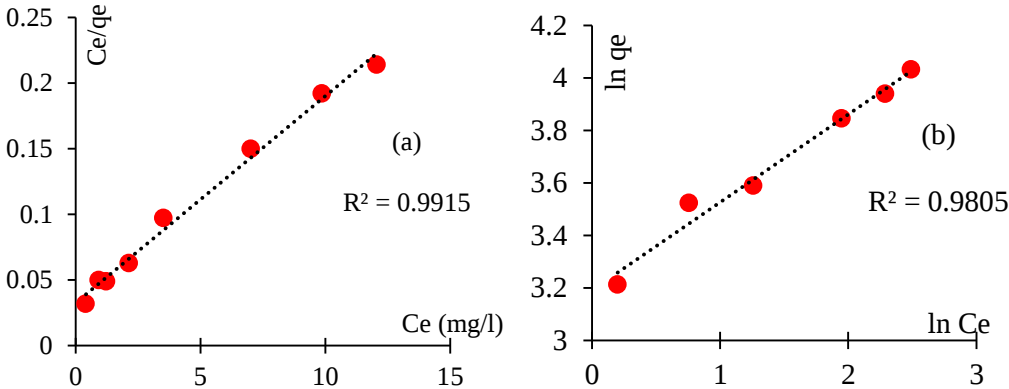
Các thông số đã tối ưu được lựa chọn để nghiên cứu quá trình đẳng nhiệt hấp phụ Cr(VI) trên vật liệu FFMB.

3.3. Đẳng nhiệt hấp phụ Cr(VI) trên FFMB

Số liệu thí nghiệm đẳng nhiệt hấp phụ được phân tích theo hai mô hình Langmuir và Freunlich, kết quả được thể hiện trên Hình 3. So sánh giá trị hệ số tương quan R^2 cho thấy quá trình hấp phụ Cr(VI) trên FFMB phù hợp với mô hình Langmuir hơn so với mô hình Freundlich. Dung lượng hấp phụ Cr(VI) cực đại của vật liệu theo Langmuir là 64,51 mg/g. So với một số vật liệu hấp phụ trên cơ sở oxit sắt hoặc mangan khác, dung lượng hấp phụ như vậy là tương đối cao (Bảng 7).

	pH	Thời gian	Lượng rắn
Cao	3,00	360,00	2,00
Tối ưu	2,49	314,04	1,55
Thấp	1,00	10,00	0,10
Hiệu quả tối đa 96,04%			

Hình 2: Kết quả tối ưu hóa bằng phương pháp RSM



Hình 3. Đường đẳng nhiệt hấp phụ Cr(VI) trên FFMB (a) Langmuir và (b) Freundlich

Bảng 7. Dung lượng hấp phụ Cr(VI) của một số vật liệu và các điều kiện hấp phụ tương ứng

Vật liệu	pH	Lượng chất hấp phụ (g/L)	Thời gian (h)	Khoảng nồng độ (mg/L)	Dung lượng cực đại	Tài liệu
Fe-Mn (1/3) oxide-modified biochar composite	2	2,00	24	25-800	118,03	[15]
MnFe ₂ O ₄ /FeS _x	3	1,00	24	20-100	36,30	[16]
Magnetic Fe-C-N Composite	2	0,80	2	20-50	52,63	[17]
MnFe ₂ O ₄ @SiO ₂ -CTAB composite	3	2,80	2	20-240	25,04	[18]
Fe-MnBinary Oxide/Mulberry Stem Biochar Composite	2	1,00	3	2-150	37,14	[19]
FFMB	2,49	1,55	5	10-100	64,51	Nghiên cứu này

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo, đã nghiên cứu tối ưu hóa quá trình hấp phụ Cr(VI) trên vật liệu nanocomposite từ tính Fe₃O₄/oxit phức hợp Fe-Mn /bentonite FFMB. Các thông số thí nghiệm chủ yếu bao gồm pH, lượng chất hấp phụ, thời gian tiếp xúc và nồng độ Cr(VI) và ảnh hưởng riêng biệt của chúng đã được lựa chọn dựa trên sự kết hợp phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi với các biến số trên và tối ưu hóa chúng bằng phương pháp bề mặt đáp ứng.

So với một số vật liệu tương tự, FFMB có khả năng hấp phụ Cr(VI) tương đối tốt, đạt 64,51 mg/g tại điều kiện tối ưu: lượng chất hấp phụ 1,55 g/L, pH 2,49 và thời gian tiếp xúc 314 phút.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này nhận được tài trợ của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, đề tài mã số NVCC06.10/24-24.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Jones A.S., Marini J., Solo- Gabriele H.M., Robey N.M., Townsend T.G., (2019). Arsenic, copper, and chromium from treated wood products in the U.S. disposal sector. *Waste Manag.*, **87**,731–740.

[2] Achmad R.T, Budiawan, Auerkari E.I., (2017). Effects of Chromium on Human Body. *ARRB*, **13**, 1–8.

[3] Pellerin C., Booker S.M., (2000). Reflections on hexavalent chromium: Health hazards of an industrial heavyweight, *Environ. Health Perspect.*, **108**, 402–407.

[4] J. Hu, G. Chen, I.M.C. Lo, (2005). Removal and recovery of Cr(VI) from wastewater by maghemite nanoparticles. *Water Res.*, **39**, 4528-4536.

[5] Yao L., Esmaeili H., Haghani M., Roco A., (2021). Activated Carbon/Bentonite/Fe₃O₄ as Novel Nanobiocomposite for High Removal of Cr(VI) Ions. *Chemical Engineering & Technology*, **44**, 1908-1918.

[6] Wang G., Hua Y., Su X., Komarneni S., Ma S., Wang Y., (2016). Cr(VI) adsorption by montmorillonite nanocomposites. *Applied Clay Science*, **124-125**, 111–118.

[7] Ghosh A., Pal M., Biswas K., Ghosh U. C., Manna B., (2015). Manganese oxide incorporated ferric oxide nanocomposites (MIFN): A novel adsorbent for effective removal of Cr(VI) from contaminated water. *Journal of Water Process Engineering*, **7**, 176-186.

[8] Du X., Yu Z., Zhu Y., (2019). Cr(VI) adsorption from aqueous solution and its reactions behavior on the surfaces of granular

Fe-Mn binary oxides. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **38S1**, 176-184.

[9] Nguyen Binh Duong, Quan Thi Thu Trang, Pham Van Lam, Phan Thi Ngoc Bich, (2024). Magnetic Fe₃O₄/Fe-Mn binary oxide/bentonite nanocomposite-a novel adsorbent for removal of reactive red 195 dye from water. *Vietnam J. Chem.*, **62**, 153–162.

[10] Shojaei S., Band S.S., Farizhandi A. A. K., Ghorogi M., Mosavi A., (2021). Application of Taguchi method and response surface methodology into the removal of malachite green and auramine-O by NaX nanozeolites. *Scientific Reports*, **11(1)**, 16054.

[11] A. Dabagh, R. Benhiti, M. EL-Habacha, A. A. Ichou, M. Abali, A. Assouani, M. Guella, A. Berish, R. Hsissou, F. Sinan, M. Zerbet, (2023). Application of Taguchi method, response surface methodology, DFT calculation and molecular dynamics simulation into the removal of orange G and crystal violet by treated biomass. *Heliyon*, **9(11)**, e21977.

[12] TCVN 6658:2000, Xác định Cr(VI) trong nước sử dụng phương pháp đo phổ dùng 1,5-Diphenylcacbazid.

[13] Li N., Fu F, Lu J., Ding Z., Tang B., Pang J., (2017). Facile preparation of magnetic mesoporous MnFe₂O₄ @SiO₂ –CTAB composites for Cr(VI) adsorption and reduction. *Environmental Pollution*, **220**, 1376–1385.

[14] Lu M., Su Z, Zhang Y., Zhang H, Wang J, Li Q, Jiang T., (2023). Mn-Doped spinel for removing Cr(VI) from aqueous solutions: Adsorption characteristics and mechanisms. *Materials*, **16**, 1553.

[15] Zhu Y, Dai W, Deng K., Pan T., Guan Z., (2020). Efficient removal of Cr(VI) from aqueous solution by Fe-Mn Oxide-modified biochar. *Water, Air & Soil Pollution*, **231**, 1-17.

[16] Wang J., Xu Q, Yin W., Hou J., Wang S., Wang X., (2021). Mechanism analysis of MnFe₂O₄/FeS_x for removal of Cr(VI) from aqueous phase. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **217**, 11220.

[17] Liu X., Liu H., Cui K., Dai Z., Wang B., Weerasooriya R., (2023). Adsorption-reduction of Cr(VI) with magnetic Fe-C-N composites. *Water*, **15**, 2290.

[18] Balan C., Volf I., Bilba D., (2013). Chromium (VI) removal from aqueous solutions by purolite base anion-exchange resins with gel structure. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, **19(4)**, 615–628.

[19] Liang M., Xu S., Zhu Y., Chen X., Deng Z., Yan L., He H., (2020). Preparation and characterization of Fe-Mn binary oxide/mulberry stem biochar composite Adsorbent and adsorption of Cr(VI) from aqueous solution. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **17(3)**, 676.