



## Nghiên cứu tạo hạt hấp phụ trên cơ sở Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> ứng dụng loại bỏ As(V) trong môi trường nước

### Study on granulation of adsorbent-based Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> composite for efficient removal of As(V) in aqueous media

Trần Văn Chinh<sup>1\*</sup>, Nguyễn Đức Thiệu<sup>2</sup>, Nhâm Đức Thịnh<sup>2</sup>, Nguyễn Thị Anh Thu<sup>2</sup>, Nguyễn Mạnh Hà<sup>2</sup>, Nguyễn Thị Hoài Phương<sup>3</sup>, Lê Đức Dương<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Viện Hóa học-Vật liệu, Viện KH-CN quân sự, số 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup> Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, số 298 Cầu Diễn, Minh Khai, Bắc Từ Liêm, Hà Nội

<sup>3</sup> Trung tâm Nhiệt đới Việt-Nga, số 63 Nguyễn Văn Huyền, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

\*Email: [chinhpkq@gmail.com](mailto:chinhpkq@gmail.com)

#### ARTICLE INFO

Received: 21/3/2024

Accepted: 10/4/2024

Published: 30/06/2024

#### Keywords:

Granulation, adsorption, heavy metals, fixed-bed adsorption column

#### ABSTRACT

Granular adsorbent-based Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> was fabricated via the drum granulation method with bentonite as the binder. The granulation process consists of three steps: mixing Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> composite powder; fine coal dust into a homogeneous mixture; granulating by spraying water mist; drying granules and calcining at 500 °C for 1 hour to create pores. The granules used to remove As(V) from aqueous media were investigated using a fixed-bed adsorption column. The effects of inlet As(V) concentration, flow rate, and bed height on the breakthrough characteristics of the adsorption system were determined. The adsorption data were fitted to three well-established fix-bed adsorption models, namely, the Adam-Bohart, Thomas, and Yoon-Nelson models, with a correlation coefficient, R<sup>2</sup> > 0.96.

## 1. Giới thiệu chung

Nguồn nước bị ô nhiễm bởi Asen luôn là mối quan tâm lớn trên toàn cầu xét cả về vấn đề môi trường và sức khỏe cộng đồng. Asen tồn tại chủ yếu ở dạng As(V) (arsenate), As(III) (arsenite), As (0)..., trong đó As(V) và As(III) là hai dạng tồn tại chủ yếu trong nước. Asen đi vào cơ thể con người qua đường nước uống hoặc ăn phải thức ăn có nhiễm asen gây ra các bệnh về tiêu đường, thần kinh, tiêu hóa ... và một số dạng ung thư như tuyến tiền liệt, gan, thận, da, phổi [1]. Theo khuyến cáo của Tổ chức Y tế thế giới, giới hạn nồng độ asen trong nước uống chỉ là 10 µg/L. Do đó asen luôn cần phải được loại bỏ ra khỏi dung dịch

trước khi sử dụng hoặc thải ra môi trường. Có nhiều phương pháp khác nhau để xử lý nước nhiễm asen như kết tủa hóa học, hấp phụ, keo tụ, trao đổi ion, màng lọc, điện phân, thẩm thấu ngược... Trong số đó, hấp phụ là công nghệ được sử dụng rộng rãi ra khỏi nguồn nước do có chi phí thấp, hiệu quả tốt và dễ dàng vận hành [2,3].

Vật liệu tổ hợp Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> đã được nhiều tác giả nghiên cứu tổng hợp và ứng dụng trong hấp phụ loại bỏ asen [4-7]. Đặc biệt, trong nghiên cứu trước của chúng tôi đã chế tạo thành công vật liệu Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> từ xỉ titan và đánh giá khả năng hấp phụ As(V) theo phương pháp mẻ, có dung lượng hấp phụ cực đại là 68,26 mg/g [8]. Vật liệu Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> chế tạo được ở

<https://doi.org/10.62239/jca.2024.040>

dạng bột mịn, có kích thước trong khoảng 50-400 nm, điều này hạn chế tính ứng dụng thực tế vì thường phải yêu cầu quá trình xử lý thứ cấp là lọc ly tâm tốc độ cao để tách vật liệu ra khỏi môi trường nước. Quá trình chuyển đổi vật liệu  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  dạng bột thành các hạt dạng xốp, làm tăng tính thấm thấu cho phép một lượng lớn nước thải đi qua dễ dàng. Vật liệu dạng hạt, tăng tính chất xốp làm tăng khả năng hấp phụ, giảm mật độ khối, do đó sẽ là vật liệu lọc thiết thực hơn để loại bỏ các kim loại nặng cũng như các chất hữu cơ trong nguồn nước ô nhiễm [9].

Trong quá trình tạo hạt, chất kết dính có vai trò quan trọng để làm cho các phần tử riêng lẻ kết hợp lại với nhau có độ bền cơ học tốt và chất kết dính cũng có khả năng hấp phụ. Trong số các loại chất kết dính, bao gồm vô cơ và hữu cơ, bentonite còn là một loại khoáng sét có khả năng trao đổi và hấp phụ cation cao, có thể tái sinh và có giá thành thấp như những ưu điểm về đặc tính vật lý, hóa học và bề mặt riêng. Bentonite có thể hấp phụ các kim loại nặng hoặc một số các loại chất độc tố. Do vậy khi bentonite được dùng làm chất kết dính cho vật liệu hấp phụ, thì khả năng hấp phụ của hạt có thể được cải tiến đáng kể [10-12].

Trong nghiên cứu này, tiến hành tạo hạt vật liệu trên cơ sở  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  trên thiết bị dạng đĩa sử dụng chất kết dính là bentonite. Hạt hấp phụ được đánh giá khả năng loại bỏ As(V) trong môi trường nước bằng phương pháp hấp phụ cột. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ như nồng độ As(V) ban đầu, lưu lượng dòng, chiều cao cột sẽ được nghiên cứu. Dữ liệu hấp phụ được tính toán theo các mô hình Adam-Bohart, Thomas và Yoon-Nelson.

## 2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

### Hóa chất

Các hóa chất chính sử dụng bao gồm: Xi tian - Công ty CP Khoáng sản Bình Định;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 98% - Xilong;  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 98.5% - Sigma Aldrich; bentonite - Ấn độ; nước cất.

### Phương pháp tạo hạt

Đầu tiên, vật liệu tổ hợp  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  được chế tạo theo quy trình đã công bố của nhóm tác giả [8].

Vật liệu tổ hợp  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , chất kết dính bentonite và than cám theo tỷ lệ khối lượng là 1:0,08:0,08 cho vào thiết bị tạo hạt dạng đĩa có góc nghiêng  $45^\circ$ , tốc độ quay 90 vòng/phút. Hỗn hợp được trộn đều trong 10 phút, sau đó xịt sương nước từ từ vào trong đĩa đến độ ẩm khoảng 15%. Quá trình tạo hạt diễn ra trong 45 phút, hạt hấp phụ được lấy ra và sấy ở  $150^\circ\text{C}$  trong 8

giờ, sàng phân loại thu hạt có kích thước từ 2-5 mm. Sau đó, các hạt hấp phụ được nung ở  $500^\circ\text{C}$  trong 1 giờ để hình thành các mao quản xốp.

### Phương pháp đặc trưng tính chất vật liệu

Phân tích nhiệt trọng lượng/vi sai (TGA/DTA) trên thiết bị Diamond DSC Perkin Elmer, từ  $40^\circ\text{C}$  -  $900^\circ\text{C}$  với tốc độ gia nhiệt 10o/phút, trong môi trường khí  $\text{N}_2$ . Hình thái bề mặt được xác định bằng phương pháp hiển vi điện tử quét SEM trên thiết bị Hitachi S-4800. Diện tích bề mặt riêng của vật liệu được xác định bằng phương pháp hấp phụ-giải hấp  $\text{N}_2$  trên thiết bị MicroActive for TriStar II Plus 2.03.

### Phương pháp thực nghiệm hấp phụ cột

Cột hấp phụ là một ống thủy tinh có đường kính 4 cm và chiều cao 20 cm. Cột hấp phụ được nối với bình chứa dung dịch As(V) có van điều chỉnh lưu lượng. Trước khi nhồi vào cột, hạt hấp phụ được ngâm trong nước để loại bỏ hết bọt khí và các phần tử bám trên bề mặt vật liệu. Phía trên và dưới lớp hạt hấp phụ được chặn bởi lớp xốp PUF. Tiến hành hấp phụ động bằng cách cho dung dịch As(V) có nồng độ ban đầu là  $C_0$  chạy qua cột và lấy mẫu sau từng mốc thời gian để phân tích và đánh giá hiệu quả.

Thực nghiệm hấp phụ cột được thực hiện ở nhiệt độ phòng, thời gian thoát  $t_b$  (breakthrough time) là thời gian khi đó nồng độ đầu ra bằng 10% nồng độ ban đầu  $C_t = 0,1C_0$ . Tương tự thời gian bão hòa  $t_s$  (saturation time) được xác định là thời gian tại thời điểm  $C_t = 0,9C_0$  [13].

### Ảnh hưởng của chiều cao cột hấp phụ

Thực nghiệm được tiến hành ở chiều cao lớp hạt hấp phụ lần lượt là 4 cm, 8 cm, 12 cm và 16 cm, tương ứng với khối lượng hạt hấp phụ lần lượt là 45g, 90 g, 135 g và 180 g. Nồng độ dung dịch As(V) ban đầu 10 mg/L, vận tốc dòng 10 mL/phút và pH = 7.

### Ảnh hưởng của tốc độ dòng

Tốc độ dòng lần lượt là 5 mL/phút, 8 mL/phút và 10 mL/phút; chiều cao cột hấp phụ là 16 cm; nồng độ dung dịch As(V) ban đầu là 10 mg/L; pH = 7.

### Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch As(V) ban đầu

Nồng độ dung dịch As(V) ban đầu lần lượt là 5 mg/L, 10 mg/L và 15 mg/L ở tốc độ dòng 5 mL/phút; chiều cao cột 16 cm; pH = 7.

### Nghiên cứu động học hấp phụ cột

Động học hấp phụ As(V) của hạt hấp phụ chế tạo được đánh giá bằng ba mô hình: Thomas, Yoon-

Nelson và Adams-Bohart, có phương trình dạng tuyến tính lần lượt là (1), (2) và (3):

$$\ln\left(\frac{C_o}{C_e} - 1\right) = \frac{K_T q_o M}{Q} - K_T C_o t \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{C_e}{C_o - C_e}\right) = k_{YN} t - \tau k_{YN} \quad (2)$$

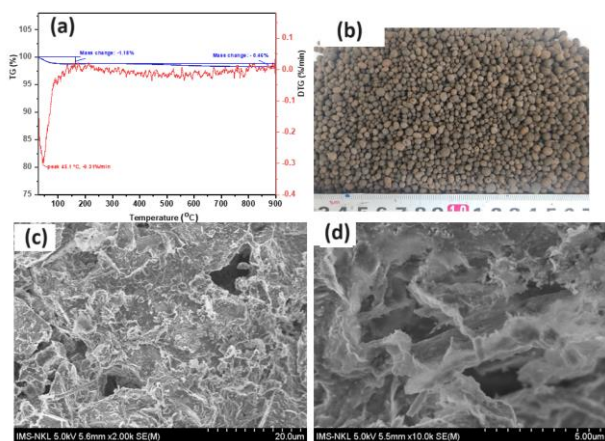
$$\ln\left(\frac{C_e}{C_o}\right) = K_{AB} C_o t - \frac{K_{AB} N_o H}{Q} \quad (3)$$

Trong đó:  $K_T$  (mL/phút.mg),  $k_{YN}$  (phút<sup>-1</sup>),  $K_{AB}$  (L/mg.phút) lần lượt là hằng số động học Thomas, Yoon-Nelson và Adams-Bohart;  $C_o$  và  $C_e$  lần lượt là nồng độ đầu vào và nồng độ đầu ra của dung dịch (mg/L);  $q_o$ : dung lượng hấp phụ (mg/g);  $M$ : khối lượng chất hấp phụ (g);  $Q$ : Lưu lượng dòng (mL/phút);  $\tau$ : thời gian cho sự thoát 50% chất bị hấp phụ (phút);  $N_o$ : Nồng độ bão hòa của chất bị hấp phụ (mg/L) [13].

### 3. Kết quả và thảo luận

#### Đặc trưng tính chất hạt hấp phụ

Trước tiên để xác định độ bền nhiệt, sự thiêu kết của chất kết dính bentonit với các phần tử  $Fe_2O_3/TiO_2$  và than cám trong hạt hấp phụ được đánh giá. Vật liệu khi sấy được phân tích nhiệt trọng lượng ở nhiệt độ từ 30 °C đến 900 °C, đường cong TG-DTG thể hiện ở Hình 1a.



Hình 1: (a) Giảm đồ TG/DTG của hạt hấp phụ, (b) hạt hấp phụ và (c), (d) ảnh SEM bề mặt hạt

Trên đường cong TG của hạt hấp phụ xảy ra hai giai đoạn giảm khối lượng. Giai đoạn giảm khối lượng đầu tiên diễn ra ở nhiệt độ từ 30 °C đến 300 °C với độ hụt khối lượng là 1,18 %, đồng thời xuất hiện 1 peak thu nhiệt ở 45,1 °C đây được cho là giai đoạn mất hơi nước do hấp phụ vào hạt trong quá trình chuẩn bị mẫu. Giai đoạn giảm khối lượng thứ 2 diễn ra trong khoảng nhiệt độ từ 300 °C đến 900 °C với độ hụt khối lượng không đáng kể chỉ khoảng 0,46%, đây được cho là giai đoạn thiêu kết của chất kết dính bentonite với các

phần tử composit  $Fe_2O_3/TiO_2$ .

Hình 1b cho thấy ảnh của các hạt hấp phụ có kích thước từ 2-5 mm sau khi xử lý ở nhiệt độ 500 °C trong 1 giờ, các hạt này có hình dạng tương đối tròn và đồng đều. Hình 1c,d thể hiện bề mặt của hạt hấp phụ ở độ phóng đại khác nhau cho thấy xuất hiện các mao quản và các kênh xốp trong hạt hấp phụ. Các mao quản và kênh xốp này được hình thành do sự cháy của than cám, sẽ thuận lợi cho việc loại bỏ các chất ô nhiễm trong môi trường nước.

#### Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ cột

##### Ảnh hưởng của chiều cao cột hấp phụ

Ảnh hưởng của chiều cao cột đến khả năng hấp phụ As(V) được minh họa bởi đường cong thoát thể hiện ở hình 2a. Khi ở chiều cao cột  $H = 4$  cm thời gian thoát và thời gian đạt bão hòa đối với As(V) là 25 phút và 136 phút. Khi tăng chiều cao cột hấp phụ lên 8 cm, 12 cm và 16 cm thì thời gian thoát, thời gian bão hòa và thời gian tổng đều tăng. Điều này cho thấy, chiều cao cột hấp phụ ảnh hưởng nhiều đến hiệu suất hấp phụ ion kim loại nặng ở chế độ động, do làm tăng diện tích bề mặt và số lượng các vị trí tâm hấp phụ có sẵn trên vật liệu [14], hiệu suất tăng khi chiều cao cột càng tăng, tăng từ 43,575 % lên 57,420 % đối với As(V).

##### Ảnh hưởng của tốc độ dòng

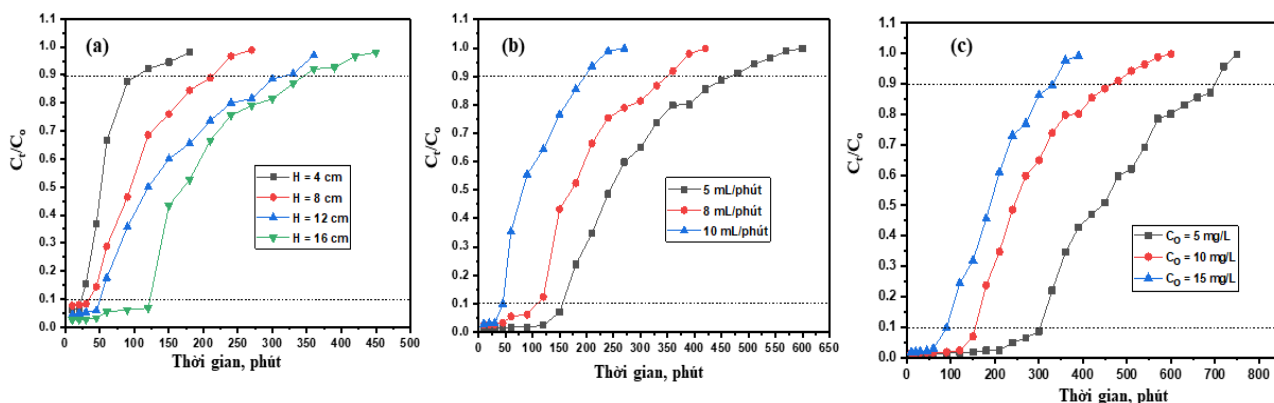
Đường cong thoát của As(V) ứng với tốc độ dòng khác nhau thể hiện ở hình 2b. Hiệu suất hấp phụ đạt giá trị cao nhất khi tốc độ dòng vào là thấp nhất và giảm dần khi tốc độ dòng tăng. Khi tốc độ dòng là 5 mL/phút, hiệu suất hấp phụ là 60,07 % với thời gian bão hòa là 457 phút. Như vậy, lưu lượng dòng vào càng nhỏ thì hiệu suất hấp phụ càng tăng, điều này là do sự tiếp xúc giữa pha lỏng và pha rắn càng lâu thì lượng chất bị hấp phụ từ pha lỏng khuếch tán vào trong chất rắn càng nhiều. Ngược lại, khi tốc độ dòng lớn dẫn đến thời gian tiếp xúc ngắn hơn làm hạn chế sự khuếch tán của các ion kim loại vào hạt hấp phụ [15].

##### Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch As(V) ban đầu

Đường cong thoát của quá trình hấp phụ As(V) ở các nồng độ ban đầu khác nhau thể hiện ở hình 2c, thấy rằng khi tăng nồng độ đầu vào tại cùng một điều kiện (chiều cao cột, lưu lượng dòng) thì đường cong thoát có xu hướng ngắn hơn. Ở nồng độ ion kim loại thấp, hệ số khuếch tán và sự hấp phụ các ion kim loại trên bề mặt vật liệu chậm hơn, lượng ion kim loại bị hấp phụ trên vật liệu thấp hơn, ngược lại khi nồng độ ion kim loại cao, nhiều ion kim loại bị hấp phụ hơn do sự di chuyển của các ion kim loại đến bề mặt vật liệu nhanh hơn, dẫn đến thời gian làm việc của cột ngắn

<https://doi.org/10.62239/jca.2024.040>

hơn [16,17].

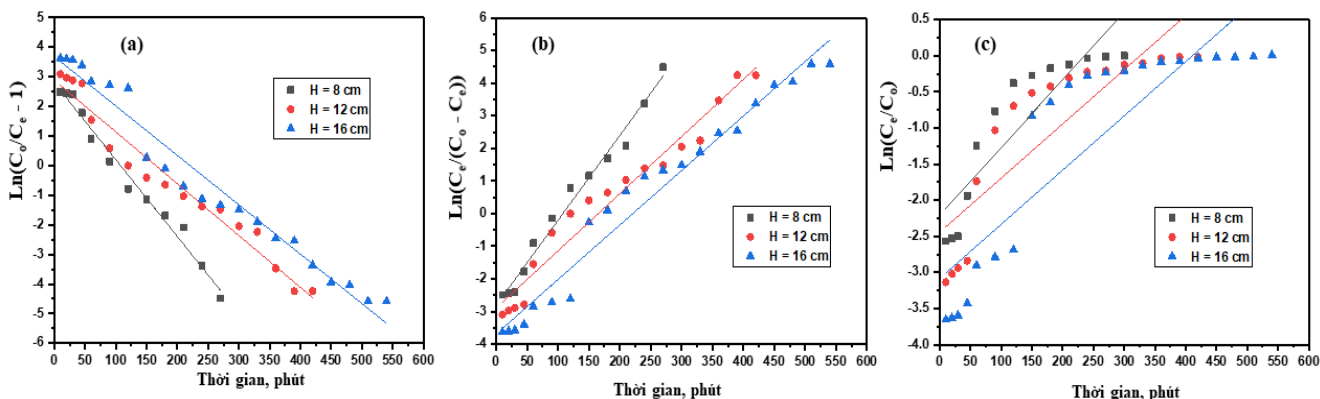


Hình 2: Đường cong thoát của quá trình hấp phụ As(V) ứng với (a) chiều cao cột, (b) lưu lượng dòng và (c) nồng độ ban đầu khác nhau

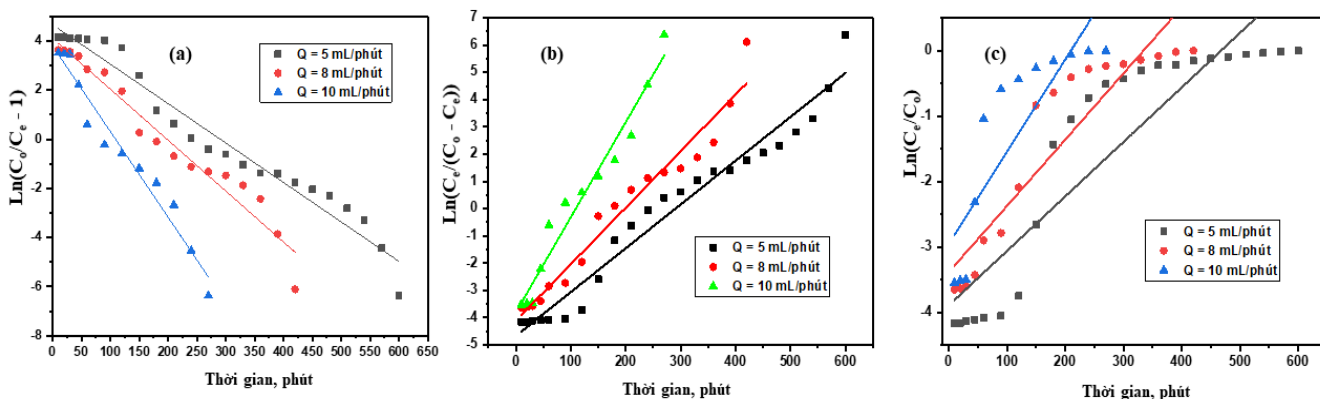
*Mô hình động học hấp phụ cột*

Từ các số liệu thực nghiệm, các mô hình động học Thomas, Yoon-Nelson và Adam-Bohart được thực hiện để đánh giá quá trình hấp phụ As(V) khi thay đổi chiều cao cột, tốc độ dòng và nồng độ dung dịch ban đầu, kết quả lần lượt được thể hiện ở hình 3 đến hình 5.

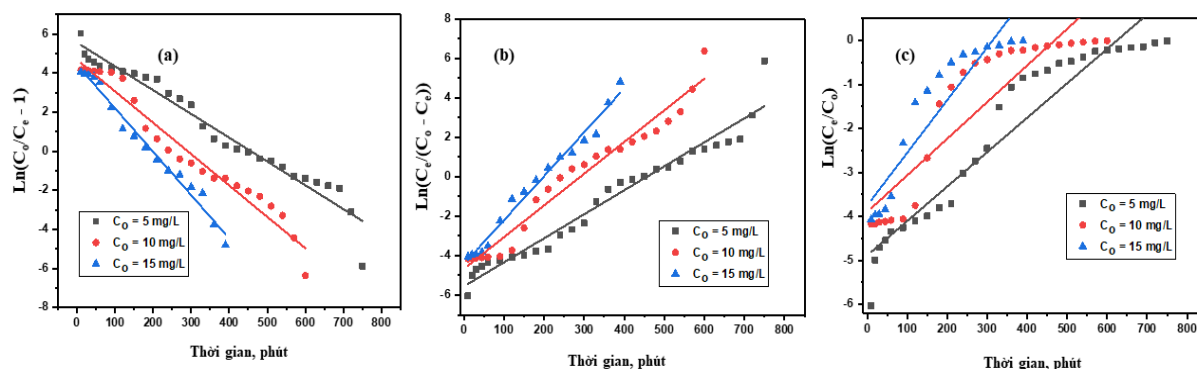
Các tham số động học được tính toán, kết quả thể hiện ở bảng 1 thấy rằng, mô hình Thomas và Yoon-Nelson đều có giá trị R<sup>2</sup> khá lớn (> 0,95). Trong khi đó, giá trị R<sup>2</sup> theo mô hình Bohart-Adam thấp hơn mô hình Thomas và Yoon-Nelson trong các điều kiện thực nghiệm không đổi.



Hình 3: Phương trình động học (a) Thomas, (b) Yoon - Nelson (b) và (c) Bohart-Adam dạng tuyến tính đối với As(V) tại các chiều cao cột hấp phụ khác nhau



Hình 4: Phương trình động học (a) Thomas, (b) Yoon - Nelson (b) và (c) Bohart-Adam dạng tuyến tính đối với As(V) ứng với tốc độ dòng khác nhau



Hình 5: Phương trình động học (a) Thomas, (b) Yoon - Nelson (b) và (c) Bohart-Adam dạng tuyến tính đối với As(V) ứng với nồng độ ban đầu khác nhau

Bảng 1: Các tham số trong các phương trình động học hấp phụ As(V) của hạt hấp phụ

Biến số		Thomas				Yoon-Nelson			Bohart-Adam		
H, cm	Q, mL/phút	C <sub>0</sub> , mg/L	K <sub>T</sub> , mL/phút.mg	q <sub>0</sub> , mg/g	R <sup>2</sup>	K <sub>VN</sub> , phút <sup>-1</sup>	τ, phút	R <sup>2</sup>	K <sub>AB</sub> , L/mg.phút	N <sub>0</sub> , mg/L	R <sup>2</sup>
8	8	10	0,0026	95,771	0,9808	0,0259	108,158	0,9809	0,0940	23,494	0,7764
12	8	10	0,0018	95,124	0,9588	0,0175	165,109	0,9588	0,0750	21,727	0,7229
16	8	10	0,0017	96,316	0,9665	0,0167	220,605	0,9665	0,0750	20,563	0,7575
16	10	10	0,0035	60,363	0,9559	0,0348	109,279	0,9556	0,1410	13,132	0,7056
16	5	10	0,0016	81,039	0,9601	0,0161	289,932	0,9601	0,0830	14,677	0,8095
16	5	5	0,0025	61,714	0,9548	0,0122	455,270	0,9548	0,0016	732,598	0,9113
16	5	15	0,0015	81,850	0,9806	0,0222	199,095	0,9806	0,0008	1465,19	0,8491

Như vậy, đối với mô hình Thomas và Yoon-Nelson có thể được áp dụng để giải thích quá trình loại bỏ As(V) trong hệ thống cột. Mô hình Thomas đã bỏ qua trở lực chuyển khối trên màng biên giữa các tiểu phân và màng chất lỏng. Do đó, mô hình này giả định rằng phản ứng bề mặt giữa các ion và tâm chưa bị hấp phụ quyết định tốc độ quá trình hấp phụ. Theo mô hình Yoon-Nelson giả định rằng tốc độ hấp phụ của các chất tỷ lệ với độ hấp phụ và giải hấp [18].

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã tạo hạt thành công vật liệu tổ hợp Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> trên thiết bị dạng đĩa, sử dụng chất kết dính là bentonite và than cám như chất tạo độ xốp cho hạt. Hạt hấp phụ có kích thước từ 2 – 5mm, được nung ở 500 °C trong 1 giờ để tạo các mao quản rỗng quan sát được qua ảnh SEM. Khả năng hấp phụ As(V) của hạt phục thuộc vào nồng độ ban đầu, chiều cao cột và lưu lượng dòng, ở chế độ cột thời gian thoát dài nhất là 304 phút, thời gian bão hòa là 700 phút và hiệu suất hấp phụ 65,14% ở điều kiện nồng độ ban đầu 5 mg/L, chiều cao cột 16 cm và lưu lượng dòng 5 mL/phút. Các

mô hình động học Thomas, Yoon-Nelson và Adam-Bohart được sử dụng để đánh giá số liệu thực nghiệm cho thấy quá trình hấp phụ As(V) phù hợp hơn với mô hình Thomas và Yoon-Nelson. Hạt hấp phụ chế tạo được có triển vọng ứng dụng vào thực tế xử lý nguồn nước ô nhiễm bởi kim loại nặng.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện trong phòng thí nghiệm, trang thiết bị của Viện Hóa học-Vật liệu/Viện KH-CN quân sự.

#### Tài liệu tham khảo

1. A. Dabizha, C. Bahr, M. Kersten, Water research X 9 (2020) 100061. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100061>
2. C.-L. Su, L. Chen, T.-J. Wang, L.-X. Yu, Y. Jin, Water Science Technology: Water Supply 13 (2013) 1309-1316. <https://doi.org/10.3390/w12102720>
3. T. Liang, L. Li, C. Zhu, X. Liu, H. Li, Q. Su, J. Ye, B. Geng, Y. Tian, M.F. Sardar, Water 12 (2020) 2720. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.08.023>

<https://doi.org/10.62239/jca.2024.040>

4. M. D'Arcy, D. Weiss, M. Bluck, R. Vilar, *Journal of colloid interface science* 364 (2011) 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.08.023>
5. C.M. Babu, R. Vinodh, B. Sundaravel, A. Abidov, M.M. Peng, W.S. Cha, H.-T. Jang, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 62 (2016) 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.02.005>
6. J.C. Bullen, J.P. Kenney, S. Fearn, A. Kafizas, S. Skinner, D. Weiss, I. Science, *Journal of Colloid Interface Science* 580 (2020) 834-849. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.06.119>
7. P.T. Nguyen, D.A. Nguyen, T.T. Nguyen, B.T. Le, P.H.T. Nguyen, D.D. La, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience Nanotechnology* 10 (2019) 015014. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/ab0d1d>
8. C.V. Tran, P.T.H. Nguyen, D.D. Nguyen, H.T. Pham, D.T. Do, D.D. La, *Sustainability* 15 (2023) 7253. <https://doi.org/10.3390/su15097253>
9. B. Zhao, Y. Zhang, X. Dou, H. Yuan, M. Yang, *Water Science Technology* 72 (2015) 2179-2186. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.438>
10. P. Jelínek, S.M. Dobosz, J. Beňo, K. Major-Gabryś, *Archives of Metallurgy Materials* 59 (2014) 1041--1044. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0175>
11. C. Bertagnolli, S.J. Kleinübing, M.G.C. Da Silva, *Applied Clay Science* 53 (2011) 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.002>
12. J. Du, S. Chadalavada, R. Naidu, *Applied Clay Science* 148 (2017) 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.033>
13. R. Bergamasco, D. Mantovani, A. Diório, C. de Oliveira Bezerra, H.B. Quesada, G. Wernke, M.R. Fagundes-Klen, L.F. Cusioli, *Water* 15 (2023) 1260. <https://doi.org/10.3390/w15071260>
14. O.B. Omitola, M.N. Abonyi, K.G. Akpomie, F.A. Dawodu, *Applied Water Science* 12 (2022) 94. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01624-4>
15. Y. Jin, C. Teng, S. Yu, T. Song, L. Dong, J. Liang, X. Bai, X. Liu, X. Hu, J. Qu, *Chemosphere* 191 (2018) 799-808. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.154>
16. P.G. Hiremath, T. Theodore, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 61 (2017) 188-199. <https://doi.org/10.3311/PPch.10085>
17. K. Nithya, A. Sathish, P. Kumar, *Water Process* 33 (2020) 101069. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101069>
18. B. Hayati, A. Maleki, F. Najafi, F. Gharibi, G. McKay, V.K. Gupta, S.H. Puttaiah, N. Marzban, *Chemical Engineering Journal* 346 (2018) 258-270. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.172>