



Nghiên cứu khả năng hấp phụ arsen trong môi trường nước bằng vật liệu zeolit chế tạo từ bùn đỏ Tây Nguyên
 Study on the adsorption of arsenate in aqueous solution by zeolite material synthesized from Tay Nguyen red mud

Phạm Thị Mai Hương*, Nguyễn Mạnh Hà

Khoa Công nghệ Hóa, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: phamthimaihuong76@yahoo.com.vn

ARTICLE INFO

Received: 10/4/2022

Accepted: 12/5/2022

Published: 10/6/2022

Keywords:

Tay Nguyen red mud, modified, adsorption of arsenate

ABSTRACT

Tân Rai (Tay Nguyen) red mud is the waste from alumina production of bauxite ore. The composition of red mud contains mainly the iron oxide and other metals oxide as SiO_2 , Al_2O_3 ... The aluminum and silica in red mud was used to synthesize the zeolite material. The zeolite material was synthesized by the hydrothermal method from red mud by adding Si which was RM-ZeO-Si and RM-ZeO-Si/Al for both Si and Al added. The structure of zeolite material studied by X-Ray, EDX, BET and FT-IR. The results showed that the synthesized zeolite was likely the new kind one with one sunfua S atom in the formular $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$. The absorption arsenate was studied on both materials, the maximum adsorption capacity of arsenate by Langmuir model was 7.63 mg/g and 5.81 mg/g for RM ZeO-Si and RM ZeO-Si/Al, the maximum adsorption capacity was higher than the adsorption ability of original Tay Nguyen red mud (2.30 mg/g).

Giới thiệu chung

Bùn đỏ Tân Rai (Tây Nguyên) là bã thải của quá trình tinh chế nhôm từ quặng boxit theo công nghệ Bayer. Trong thành phần bùn đỏ Tây Nguyên chứa khoảng 40-55% Fe_2O_3 và một số các oxit khác như SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MnO_2 ... [1]. Bùn đỏ đã được các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước nghiên cứu biến tính làm vật liệu hấp phụ, xử lý một số các ion kim loại trong môi trường nước như Pb (II), Cu (II), As(V)...[2,3,4] và xử lý một số các anion khác trong nước như PO_4^{3-} , NO_2^- , NO_3^- [5,6,7]. Các thành phần oxit trong bùn đỏ đều rất có ý nghĩa trong việc xử lý chúng thành vật liệu hấp phụ. Trong cấu trúc của zeolit thì SiO_2 , Al_2O_3 là thành phần quan trọng, tỷ lệ Si/Al sẽ tạo nên vật liệu zeolit

có tính chất, đặc điểm khác nhau và cũng quyết định tính chất của chúng. Hàm lượng SiO_2 , Al_2O_3 có trong bùn đỏ chiếm 5,14% và 13,20%, chúng được định hướng trong nghiên cứu chế tạo zeolit là vật liệu hấp phụ.

Các vật liệu zeolit nói chung và vật liệu zeolit biến tính từ bùn đỏ của một số nhà nghiên cứu đã cho thấy khả năng hấp phụ xử lý các ion trong môi trường nước rất hiệu quả [8,9,10]. Vật liệu zeolite được tổng hợp từ bùn đỏ bằng phương pháp thủy nhiệt bổ sung thêm silic để có vật liệu RM ZeO-Si hay thêm đồng thời silic, nhôm để có vật liệu RM ZeO-Si/Al. Vật liệu chế tạo được đem thử nghiệm khả năng hấp phụ với As(V) trong môi trường nước. As(V) trong nước, đặc biệt là trong nước ngầm thường khá cao và gây ảnh hưởng

<https://doi.org/10.51316/jca.2022.076>

đến sức khỏe của người sử dụng. Do đó, đã có nhiều công trình nghiên cứu loại bỏ asen trong nước, trong đó vật liệu hấp phụ được sử dụng khá phổ biến. Vật liệu zeolit được biến tính từ bùn đỏ Tây Nguyên dùng để xử lý asen trong nước là một trong định hướng nghiên cứu mới trong lĩnh vực chế tạo vật liệu hấp phụ từ các chất thải công nghiệp.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Bùn đỏ Tây Nguyên được lấy từ hồ chứa bùn thải của nhà máy Alumin Tân Rai, Tây Nguyên, bùn đỏ thô (RM).

Chế tạo vật liệu RM ZeO-Si: Cân một lượng bùn đỏ thô, thêm dung dịch NaOH vào để có tỷ lệ rắn: lỏng là 1:10, đun trên máy khuấy từ gia nhiệt ở nhiệt độ 150°C trong 6 giờ, sau đó thêm nhanh $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ sao cho tỷ lệ mol Si/Al = 3÷4, khuấy đều. Tiến hành kết tinh ở 95°C trong 24 giờ. Vật liệu được lọc, rửa bằng nước cất đến pH = 9, được sấy ở nhiệt độ 105°C trong 24 giờ. Vật liệu chế tạo được ký hiệu là RM ZeO-Si. Chế tạo vật liệu RM ZeO-Si/Al: Các bước quy trình chế tạo vật liệu này được tiến hành giống như đối với vật liệu RM ZeO-Si, nhưng thêm đồng thời $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ và $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ sao cho tỷ lệ mol Si/Al = 3÷4. Vật liệu thu được ký hiệu là RM ZeO-Si/Al.

Phương pháp nghiên cứu cấu trúc vật liệu: Mẫu vật liệu zeolit biến tính từ bùn đỏ được nghiên cứu đặc điểm hình thái, cấu trúc bằng các phương pháp như nhiễu xạ tia X (giản đồ XRD được ghi trên thiết bị D8-Advance, Brucker và SIEMEN D5005 với tia bức xạ $\text{CuK}\alpha$ có bước sóng $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), phương pháp tán xạ năng lượng EDX (Phổ EDX được thực hiện trên hệ đo SEM Jeol 4510), phương pháp phổ hồng ngoại FT-IR (mẫu được đo trên thiết bị FTIR Affinity 1S ở nhiệt độ phòng trong vùng hồng ngoại từ 400 – 4000 cm^{-1}), phương pháp đẳng nhiệt - hấp phụ (BET) (diện tích bề mặt được xác định từ đồ thị BET trong vùng áp suất tương đối 0-0,3 atm, trên thiết bị Tristar- Micromeritics – 3000 của Mỹ).

Nghiên cứu khả năng hấp phụ As(V): Các thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ phòng. Cân 0,5 gam mẫu vật liệu chế tạo cho vào 50 ml dung dịch As(V) có nồng độ xác định cho từng thí nghiệm, điều chỉnh về pH thích hợp theo yêu cầu. Hỗn hợp được đưa lên máy lắc với tốc độ 150 vòng/phút trong thời gian xác định. Phần dung dịch được lọc qua giấy lọc băng xanh, hàm lượng As(V) trước và sau khi hấp phụ được xác định bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAS) với kỹ thuật hiđrua hóa (HVG-AAS) trên máy quang phổ AA-7000 Shimadzu.

Hiệu suất và dung lượng hấp phụ As(V) trên các vật liệu được tính theo công thức:

$$H = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100(\%) \quad (1); \quad q = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V \cdot 10^{-3}}{m} \quad (\text{mg/g}) \quad (2)$$

Trong đó:

H: hiệu suất hấp phụ (%)

C_0 : nồng độ As (V) ban đầu (mg/L)

C_e : nồng độ As (V) còn lại sau khi hấp phụ (mg/L)

q: dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng (mg/g chất hấp phụ)

V: thể tích dung dịch As(V) (ml)

m: khối lượng vật liệu (g)

Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ: Để nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ dung dịch As(V) ban đầu tới quá trình hấp phụ trên vật liệu, kết quả nghiên cứu được phân tích dựa trên hai mô hình đẳng nhiệt hấp phụ phổ biến là Langmuir và Freundlich.

Động học của quá trình hấp phụ: Động học của quá trình hấp phụ được phân tích theo phương trình động học biểu kiến bậc 1 và bậc 2:

$$\text{Phương trình động học bậc 1: } \frac{dq_t}{dt} = k_1 \cdot (q_e - q_t)$$

$$\text{Phương trình động học bậc 2: } \frac{dq_t}{dt} = k_2 \cdot (q_e - q_t)^2$$

Trong đó:

q_e là dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng (mg/g);

q_t là dung lượng hấp phụ tại thời điểm t (mg/g);

k_1 là hằng số tốc độ hấp phụ bậc nhất biểu kiến (phút⁻¹);

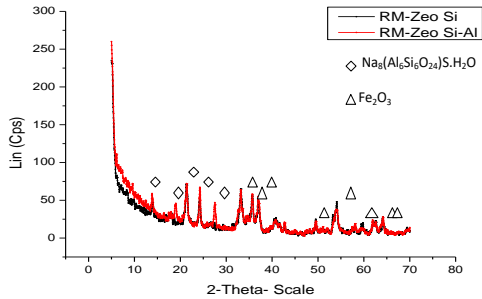
k_2 là hằng số tốc độ hấp phụ bậc hai biểu kiến (g.mg⁻¹.phút⁻¹).

Kết quả và thảo luận

Đặc trưng cấu trúc của vật liệu

Giản đồ X-Ray của hai loại vật liệu RM ZeO-Si, RM ZeO-Si/Al được thể hiện trên hình 1. Từ hình 1 cho thấy cả hai vật liệu đều có mặt của tinh thể sodalit và dạng zeolit mới có chứa nguyên tố lưu huỳnh với công thức tổng quát là $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tồn tại trên nền hematit (Fe_2O_3). Góc 2 θ và d của vật liệu RM ZeO-Si tương đồng với các giá trị của mạng lưới tinh thể sodalite có công thức $\text{Na}_6(\text{H}_2\text{O})_8 \text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24}$ có các giá trị cặp (2 θ : d) là (14,16: 6,256) và (20,07: 4,424), Trên

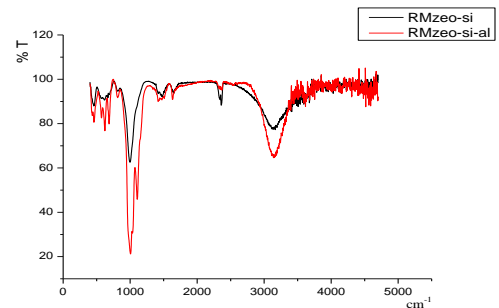
giản đồ X-Ray của vật liệu RM ZeO-Si/Al gần trùng với các giá trị trong bảng phổ chuẩn của zeolit P có 2 cặp giá trị (2θ: d) là (33,38: 2,684) và (35,75: 2,511) [11,12]. Căn cứ các thông tin từ giản đồ X-Ray có thể nhận định zeolit thu được tương tự dạng zeolit P [12].



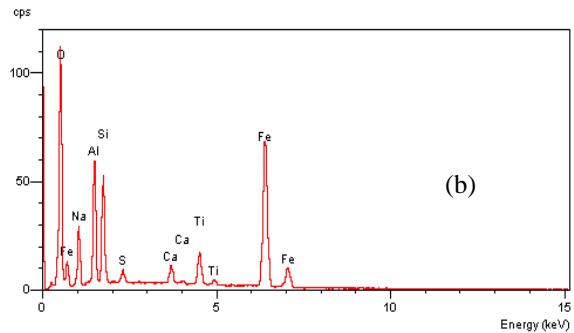
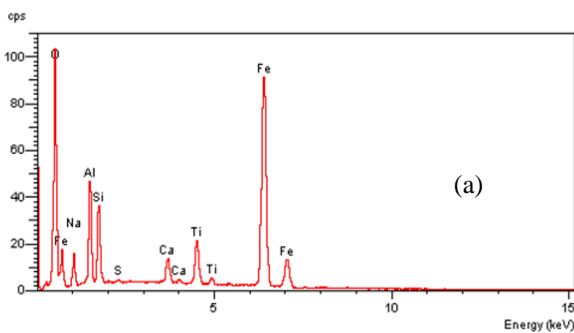
Hình 1: Giản đồ X-Ray của vật liệu RM ZeO-Si, RM ZeO-Si/Al

Phổ hồng ngoại (hình 2) cho thấy tại vùng số sóng từ 1100 đến 400 cm^{-1} , có sự xuất hiện các pic đặc trưng cho dao động của các liên kết T-O và Si-O-Al trong khung cấu trúc của sodalit (T: Si hoặc Al) như các pic tại số sóng 998,21 cm^{-1} ; 667,40 và 1106,22; 623,03 cm^{-1} lần lượt đặc trưng cho dao động đối xứng và bất xứng

của liên kết Si-O-Al của vật liệu RM ZeO-Si, RM ZeO-Si/Al [11]. Phổ hồng ngoại đối với vật liệu RM ZeO-Si/Al còn có sự xuất hiện các pic tại số sóng 1005,92; 1034,85 cm^{-1} đặc trưng cho dao động của liên kết Si-O và Al-O trong tứ diện TO_4 . Trong vùng bước sóng từ 600 đến 400 cm^{-1} thì vật liệu RM ZeO-Si/Al có xuất hiện hai pic tại 434 cm^{-1} ; 459 cm^{-1} và một pic tại bước sóng 571,92 cm^{-1} đặc trưng cho dao động của liên kết T-O, Fe-O của hematit và dao động của khung vòng 6 cạnh [11]; trong khi đó vật liệu RM ZeO-Si chỉ có sự xuất hiện của hai pic tại 464 cm^{-1} ; 568 cm^{-1} đặc trưng cho dao động của liên kết Fe-O và dao động khung của vòng 6 cạnh.



Hình 2: Phổ hồng ngoại của RM ZeO-Si, RM ZeO-Si/Al



Hình 3: Phổ EDX của vật liệu RM ZeO-Si (a) and RM ZeO-Si/Al (b)

Hình 3 là kết quả EDX của vật liệu RM ZeO-Si, RM-ZeO-Si/Al cho biết thành phần các nguyên tố có trong mẫu vật liệu, dựa vào số liệu thu được tỷ lệ Si/Al của vật liệu mới tổng hợp. Từ kết quả phân tích thành phần ở bảng 1, có thể tính tỷ số Si/Al của 2 loại vật liệu. Kết quả tính toán cả hai loại vật liệu đều có tỷ lệ Si/Al gần như nhau. Với tỷ lệ Si/Al từ 3,7÷4, vật liệu được xếp vào loại zeolit có hàm lượng silic trung bình, zeolit có độ bền nhiệt cao, kích thước mao quản tương đối đồng đều, cấu trúc ưu tiên tạo thành vòng 4 hay 6 tứ diện [13].

Loại vật liệu này có khả năng hấp phụ tốt đối với cả các cation và anion do có mặt của Fe_2O_3 .

Bảng 1: Thành phần một số nguyên tố của RM ZeO-Si và RM ZeO-Si/Al

% nguyên tố	RM Zeo-Si	RM Zeo-Si/Al
Al	6,76	6,49
Si	25,96	28,24
Na	30,64	40,85
Fe	27,33	16,93

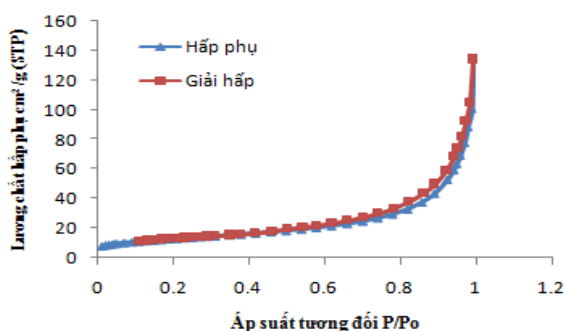
Tỷ lệ Si/Al của vật liệu RM ZeO-Si:

$$\text{Si} / \text{Al} = \frac{n_{\text{Si}}}{n_{\text{Al}}} = \frac{25,96 / 28}{6,76 / 27} = 3,7$$

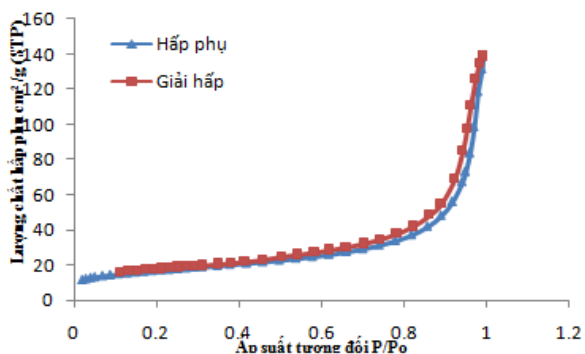
Tỷ lệ Si/Al của vật liệu RM ZeO-Si/Al:

$$\text{Si} / \text{Al} = \frac{n_{\text{Si}}}{n_{\text{Al}}} = \frac{28,24 / 28}{6,49 / 27} = 4,1$$

Diện tích bề mặt riêng được xác định theo BET (S_{BET}) bằng phương pháp hấp phụ đẳng nhiệt với vật liệu RM ZeO-Si là $46,1994 \pm 0,1189 \text{ m}^2/\text{g}$, vật liệu RM ZeO-Si/Al là $59,2126 \pm 0,3853 \text{ m}^2/\text{g}$, đường đẳng nhiệt hấp phụ của vật liệu RM ZeO-Si và RM ZeO-Si/Al được thể hiện ở hình 4, hình 5. Diện tích bề mặt của 2 vật liệu mới tổng hợp đều cao hơn so với bùn đỏ thô chưa biến tính ($S_{BET} = 40,7122 \pm 0,0670$). Giảm đồ phân bố lỗ xốp BJH cho thấy kích thước lỗ xốp trung bình của cả hai vật liệu trong khoảng từ 2 đến 80 nm, trong đó kích thước mao quản trung bình của RM ZeO-Si là 18,09 nm, thể tích lỗ xốp $0,209 \text{ cm}^3/\text{g}$, còn vật liệu RM ZeO-Si/Al với các thông số lần lượt là 14,54 nm và $0,215 \text{ cm}^3/\text{g}$.



Hình 4: Đường đẳng nhiệt hấp phụ của vật liệu RM ZeO-Si



Hình 5: Đường đẳng nhiệt hấp phụ của vật liệu RM ZeO-Si/Al

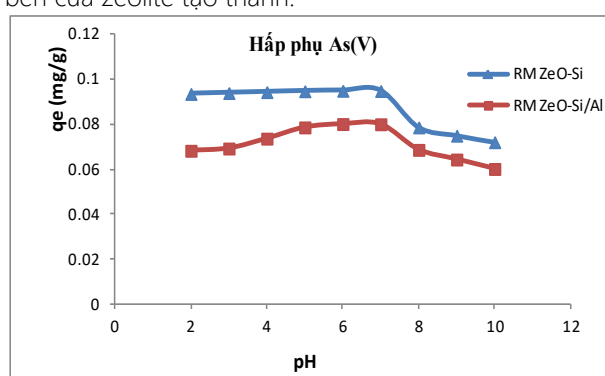
Khả năng hấp phụ As(V) của vật liệu RM ZeO-Si, RM ZeO-Si/Al

Kết quả khảo sát ảnh hưởng của pH

Bảng 2: Ảnh hưởng của các anion đến khả năng hấp phụ của As(V)

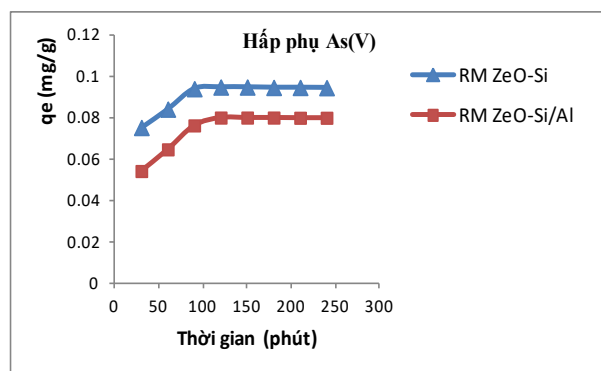
Vật liệu	Dung lượng hấp phụ (mg/g)				
	Không có ion	Có SO_4^{2-}	Có HPO_4^{2-}	Có HCO_3^-	Có Cl^-
RM ZeO-Si	0,095	0,095	0,081	0,094	0,094
RM ZeO-Si/Al	0,080	0,080	0,073	0,079	0,079

Ảnh hưởng của pH đối với quá trình hấp phụ As (V) được khảo sát trong giá trị pH từ 2 đến 10, lượng vật liệu hấp phụ là 0,5 g, thời gian hấp phụ là 180 phút, thể tích dung dịch As (V) 1 mg/L được lấy là 50 ml. Kết quả thể hiện ở hình 6 cho thấy ở giá trị pH 6-7 dung lượng hấp phụ đạt giá trị lớn nhất ($q_{\text{max}} = 0,095 \text{ mg/g}$ với vật liệu RM ZeO-Si, $q_{\text{max}} = 0,080 \text{ mg/g}$ với vật liệu RM ZeO-Si/Al). Quá trình hấp phụ As(V) xảy ra chủ yếu trên nền hematit và 1 phần trên zeolit tạo thành, sự có mặt của lưu huỳnh (S) dạng anion và có sự trao đổi dạng anion tồn tại của As(V) ở các H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-} trong giới hạn pH 6-7 [14]. Giá trị pH lựa chọn cho quá trình hấp phụ As(V) trong khoảng môi trường axit yếu hay trung tính cũng phù hợp với tính chất, độ bền của zeolite tạo thành.



Hình 6: Ảnh hưởng của pH đến khả năng hấp phụ As(V)

Thời gian tiếp xúc được khảo sát từ 30 đến 240 phút, kết quả được thể hiện ở hình 7. Kết quả ở thời gian tiếp xúc 120 phút thì quá trình hấp phụ đạt cân bằng và ổn định.

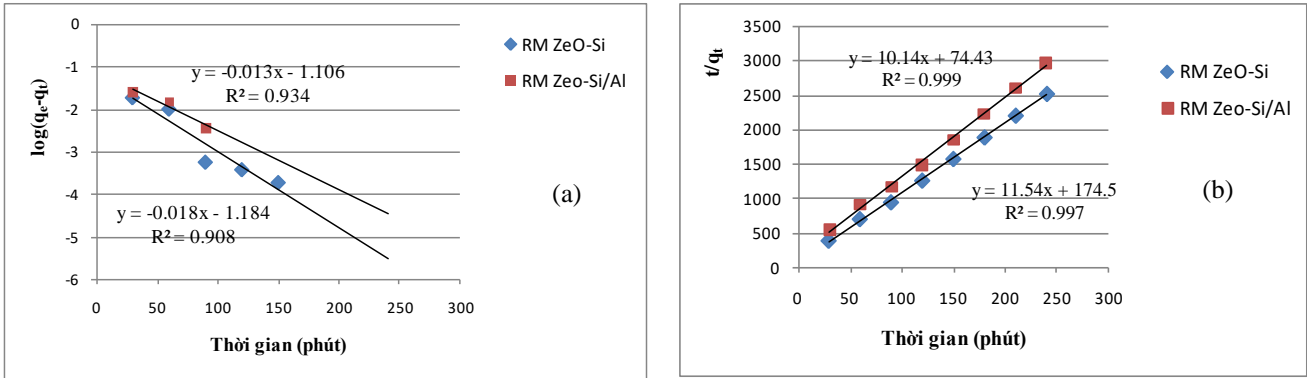


Hình 7: Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc của vật liệu với dung dịch As(V)

Ảnh hưởng cạnh tranh của các anion khác

Trong quá trình hấp phụ As(V) có thể bị ảnh hưởng của một số anion trong nước như Cl^- , SO_4^{2-} , HPO_4^- , HCO_3^- . Quá trình khảo sát được thực hiện với các dung dịch của các anion Cl^- , SO_4^{2-} , HPO_4^- , HCO_3^- với nồng độ ban đầu là 10 mg/L, kết quả được thể hiện ở bảng 2. Đối với quá trình hấp phụ As(V), trên cả hai vật liệu

RM ZeO-Si và RM ZeO-Si/Al thì ion HPO_4^{2-} có ảnh hưởng nhiều nhất, dung lượng hấp phụ giảm từ 0,080 mg/g xuống còn 0,073 mg/g có thể là do sự hấp phụ cạnh tranh của ion HPO_4^{3-} khi có mặt đồng thời Asen, nồng độ HPO_4^{3-} tăng lên thì khả năng hấp phụ Asen giảm xuống, các ion SO_4^{2-} không có ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ, còn các ion HCO_3^- và Cl^- ảnh hưởng rất ít đến dung lượng hấp phụ của As(V).



Hình 8: Đồ thị động học bậc 1 biểu kiến (a), bậc 2 biểu kiến (b) hấp phụ As(V) trên vật liệu RM ZeO-Si và RM ZeO-Si/Al
 Bảng 3: Các tham số của phương trình động học bậc 2 biểu kiến hấp phụ As(V) trên vật liệu RM ZeO-Si và RM ZeO-Si/Al

Vật liệu	Phương trình động học	q_e (tn) $mg.g^{-1}$	Động học bậc 2		
			k_2 ($g.mg^{-1}.phút^{-1}$)	q_e (lt) $mg.g^{-1}$	R^2
RM ZeO-Si	$y=10,14x+74,43$	0,095	1,399	0,098	0,999
RM ZeO-Si/Al	$y= 11,54x+ 174,5$	0,080	0,774	0,086	0,997

Kết quả nghiên cứu động học được tiến hành với dung dịch As(V) nồng độ 1 mg/L lấy mẫu theo thời gian và phân tích nồng độ As(V) còn lại trong dung dịch sau khi hấp phụ trên 2 vật liệu RM ZeO-Si và RM ZeO-Si/Al. Kết quả được thể hiện trên hình 8 theo 2 mô hình phương trình động học bậc 1 và bậc 2. Các thông số của mô hình động học được trình bày ở bảng 3.

Quá trình hấp phụ As(V) trên cả hai vật liệu RM ZeO-Si và RM ZeO-Si/Al đều tuân theo phương trình động học bậc 2 với hệ số tương quan tương ứng lần lượt là $R^2 = 0,999$ và $R^2 = 0,997$.

Tốc độ hấp phụ của As (V) trên các vật liệu tính theo công thức: $v_o = k_2.q_e^2$ ($mg.g^{-1}.phút^{-1}$)

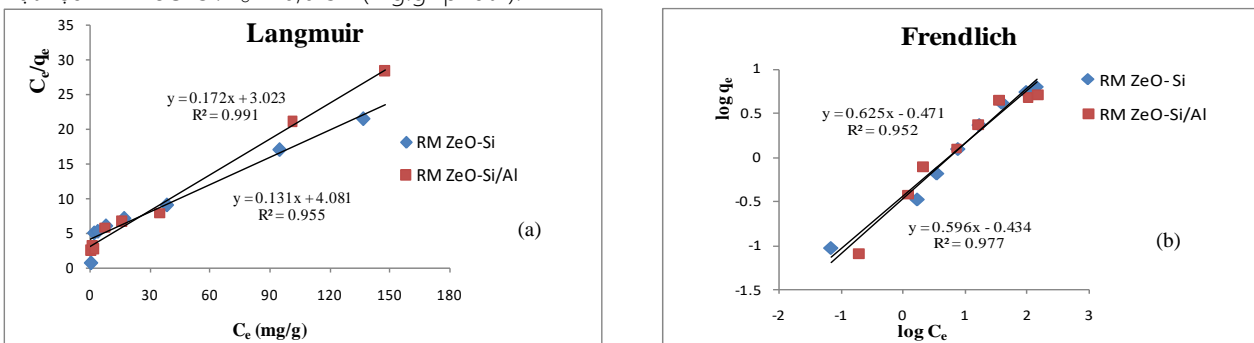
Vật liệu RM ZeO-Si: $v_o = 0,013$ ($mg.g^{-1}.phút^{-1}$).

Vật liệu RM ZeO-Si/Al: $v_o = 5,6. 10^{-3}$ ($mg.g^{-1}.phút^{-1}$).

Như vậy tốc độ hấp phụ ban đầu của As(V) trên vật liệu RM ZeO-Si nhanh hơn tốc độ hấp phụ trên RM ZeO-Si/Al.

Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ

Lượng vật liệu hấp phụ RM ZeO-Si, RM ZeO-Si/Al được cố định là 0,5 g. Nồng độ khảo sát của As(V) tăng dần từ 1 mg/L đến 200 mg/L (đây là dải nồng độ As thường gặp trên thực tế), thể tích dung dịch hấp phụ là 50 ml. Đường đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich được thể hiện ở hình 9.



Hình 9: Đường đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich đối với As(V) của vật liệu RM ZeO-Si, RM ZeO-Si/Al

Bảng 4: Thông số của mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir, Freundlich của quá trình hấp phụ As(V)

Vật liệu	Đẳng nhiệt Langmuir			Đẳng nhiệt Freundlich		
	q_{max} (mg/g)	K_L	R^2	n	K_F	R^2
RM ZeO-Si	7,63	0,032	0,955	1,67	0,368	0,977
RM ZeO-Si/Al	5,81	0,056	0,991	1,60	0,338	0,998

Các thông số của mô hình đẳng nhiệt ở bảng 4 cho thấy quá trình hấp phụ As(V) phù hợp với mô hình đẳng nhiệt Freundlich hơn, quá trình hấp phụ đa lớp chiếm ưu thế hơn. So với các bùn đỏ biến tính khác thì dung lượng hấp phụ cực đại của As(V) nhỏ hơn, bởi vật liệu zeolit có khả năng hấp phụ tốt với các cation hơn [15]. Nhưng so với bùn đỏ thô (dung lượng hấp phụ là 2,30 mg/g) thì khả năng hấp phụ cao hơn rất nhiều [16]. Quá trình hấp phụ As(V) ở vật liệu này chủ yếu là được hấp phụ bởi thành phần hematit Fe_2O_3 tồn tại cùng với các tinh thể zeolit. Qua các nghiên cứu vật liệu zeolit này do cấu trúc khá đặc biệt nên khả năng hấp phụ cả cation và anion đều cho kết quả tốt.

Kết luận

Vật liệu zeolit chế tạo từ bùn đỏ Tây Nguyên bằng cách thêm Si (vật liệu RM ZeO-Si) và thêm đồng thời Si/Al (vật liệu RM ZeO-Si/Al) được chế tạo từ bùn đỏ Tây nguyên được phân tích các đặc trưng cấu trúc qua các phương pháp phân tích hiện đại như XRD, SEM, IR, BET... Các kết quả cho thấy vật liệu chế tạo có xuất hiện các tinh thể sodalit và dạng zeolit $Na_8(Al_6Si_6O_{24})S.4H_2O$ cùng tồn tại với các hạt hematit Fe_2O_3 , đó là điểm khác biệt đối với các loại vật liệu zeolit tổng hợp khác. Sự khác biệt này cũng tạo ra những tính chất hấp phụ đồng thời cả với các cation và anion. Trong dung dịch nước, asen tồn tại chủ yếu ở dạng anion và khi thử nghiệm hấp phụ trên vật liệu zeolit mới chế tạo dung lượng hấp phụ theo mô hình đẳng nhiệt Langmuir là 7,63 mg/g với vật liệu RM ZeO-Si, đạt 5,81 mg/g với vật liệu RM ZeO-Si/Al. đồng thời cũng cho thấy sự thay đổi cấu trúc của zeolit sẽ làm cho tính chất hấp phụ của vật liệu thay đổi, hiệu quả hơn trong lĩnh vực vật liệu xử lý môi trường.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Thị Mai Hương, Trần Hồng Côn, Nguyễn Văn Thơm, Tạp chí hóa học 53 (5e3) (2015) 152-156.
2. Vũ Đức Lợi, Dương Tuấn Hưng, Nguyễn Thị Vân, Tạp chí Phân tích Hóa, Lý và Sinh học 3 (2015) 140-151.
3. Fabiano T.da Conceicao, Beatriz C.Pichinelli, Mariana S.G. Silva (2016), Environ Earth Sci 75 (362) (2016) 2-7.

- <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4929-y>
4. Manoj Kumar Sahu, Sandip Maldal, Saswati S.Dash, Pranati Badhai, Rai Kishore Patel, Journal of Environmental Chemical Engineering 1 (2013) 1315-1324.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.09.027>
 5. Y.Zhao, J.Wang, Z.K Luan, X.J.Peng, Z.Liang, L.Shi, J.Hazard.Mater 165 (2009) 1193-1199.
<https://10.1016/j.jhazmat.2008.10.114>
 6. Yunus Cengeloglu, Ali Tor, Mustafa Ersoz, Gulsin Arslan, Separation and Purification Technology 51 (3) (2006) 374-378.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.02.020>
 7. Nguyễn Trung Minh, Tạp chí các khoa học về trái đất 33(2) (2011) 231-237
 8. M.Zhang, H. Y. Zhang, D.Xu, L. Han, D.X. Niu, B.H Tian, J.Zhang, L.Y. Zhang, W.S.Wu, Desalination 271 (2011) 111-121.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.021>
 9. Shaobin Wang, Yuelian Peng, Chemical Engineering Journal 156 (2010) 11-24.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
 10. Zhao Y, Niu Y, Hu X, Xi B, Peng X, Liu W, Guan W, Wang L., Destination and Water Treatment 57(10) (2016) 4720-4731.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1000382>
 11. Mark C. Barnes, Jonas Addai-Mensah, Andrea R. Gerson, Microporous and Mesoporous Material 31 (1999) 303-319.
[https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(99\)00080-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(99)00080-3)
 12. Michael M.J. Treacy and John B. Higgins, 4th Edition, International Zeolite Association (2001).
 13. Trần Quang Vinh, Nguyễn Thị Thanh Loan, Lê Thị Hoài Nam, Chu Văn Giáp, Tạp chí Hóa học 47 (6B) (2009) 103-109.
 14. Ilker Akin, Gulsin Arslan, Ali Tor, Mustafa Ersoz, Yunus Cengeloglu, Journal of Hazardous Materials 235-236 (2012) 62-68.
<https://10.1016/j.jhazmat.2012.06.024>
 15. Phạm Thị Mai Hương, Trần Hồng Côn, Trần Thị Dung, Tạp chí hóa học 55(4E23) (2017) 172-176.
 16. Phạm Thị Mai Hương, Trần Hồng Côn, Trần Thị Dung, Tạp chí Khoa học Đại học quốc gia Hà Nội, 33(1) (2017) 26-35.