Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption
Tạp chí xúc tác và hấp phụ Việt Nam

https://jca.edu.vn

Nghiên cứu chế tạo vật liệu gamma oxit nhôm từ bùn đỏ Tây Nguyên ứng dụng hấp phụ Pb(II) trong môi trường nước

Study on synthesis of gamma aluminum oxide material from Tay Nguyen Red mud for the adsorption of Pb(II) in aqueous solution

Phạm Thị Mai Hương[1,*], Nguyễn Thị Hương[2], Trịnh Thị Hải[1]

[1] *Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*
[2] *Viện khoa học và công nghệ quân sự*
** Email: phammaihuong@haui.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 02/03/2026
Accepted: 28/03/2026
Published: 30/03/2026

Keywords:
Tay Nguyen red mud;
gamma alumina oxide;
adsorption Pb(II).

ABSTRACT

Tay Nguyen red mud, solid waste from the aluminum production process from bauxite ore, contains a number of metal oxides such as iron oxide, aluminum oxide, silicon oxide, titanium oxide... Metal oxides in red mud are modified, recovered and can be made into adsorbent materials for environmental treatment. The aluminum oxide content in red mud is about 13%, was determined by the XRF method (X-ray fluorescence spectroscopy). In this study, the amount of aluminum oxide in red mud was separated from other oxides, and the resulting material was calcined at 600°C for 3 hours. Aluminum oxide gamma material was analyzed for structural characteristics using X-Ray, BET, SEM methods. The result showed that the adsorption capacity of Pb(II) in water environment at pH 6.0, the adsorption equilibrium time is 120 minutes and the adsorption capacity for Pb(II) of the material is determined according to the method Langmuir isotherm reached 38.27 mg/g.

Giới thiệu chung

Bùn đỏ là bã thải của quá trình tinh chế nhôm từ quặng boxit theo công nghệ Bayer. Trên thực tế cứ sản xuất 1 tấn Al_2O_3 từ quặng bauxit thì đồng thời thải ra 1,5 tấn bùn đỏ. Loại bùn thải này có độ pH cao (11-13) và các oxit kim loại như oxit sắt, oxit nhôm, oxit silic... có ảnh hưởng xấu đến môi trường sinh thái và con người [1]. Bùn đỏ Tân Rai (Tây nguyên) theo ước tính khoảng 50 năm nữa sẽ có khoảng 1,15 tỷ tấn trên vùng đất Tây Nguyên, như vậy với mức độ ô nhiễm rất cao nó sẽ ảnh hưởng đến môi trường sống nơi đây nếu không có những biện pháp xử lý triệt để. Trên thế giới và ở Việt nam thì bùn đỏ đã được xử lý với nhiều phương pháp như xử lý độ kiềm cao bằng trung hòa, sử dụng axit, nước biển, hay thạch cao phế thải (gypsum) [2,3,4]. Nghiên cứu biến tính, tận dụng các oxit kim loại có trong thành phần bùn đỏ thành vật liệu xử lý môi trường như sản xuất vật liệu từ tính có cấu trúc nano dựa vào Fe hóa trị 0 lấy từ bùn đỏ và methanol được phủ bởi cacbon nanofiber và nanotube [2,5], thu hồi oxit nhôm và oxit sắt từ bùn đỏ bằng cách khử sắt oxit sắt về Fe, đồng thời đồng kết tủa tạo thành canxi silicat, nhôm aluminat, kết quả phân tích cho thấy lượng nhôm thu hồi được đến 89,71%, sắt thu hồi được 60,76% [6], tách nhôm oxit trong bùn đỏ chế tạo vật xử lý Asen trong nước [7,8], chế tạo vật liệu zeolit từ bùn đỏ xử lý ion NH_4^+, NO_2^- trong nước [9,10]. Trong thành phần bùn đỏ hàm lượng oxit nhôm chiếm khoảng 13 % đến 30% tùy thuộc vào quy trình công nghệ tinh chế nhôm từ quặng bauxit, nếu được tách và biến tính sang các dạng boemit, gamma oxit nhôm có

https://doi.org/10.62239/jca.2026.009

©2026 by the authors. Licensee Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

thể sử dụng làm vật liệu hấp phụ xử lý một số kim loại khác trong nước [11,12,13]. Chính vì vậy, trong nghiên cứu này bùn đỏ Tây Nguyên đem tách nhôm ra khỏi các thành phần oxit kim loại khác, sau đó biến tính để chế tạo vật liệu gamma oxit nhôm, vật liệu chế tạo được sẽ được ứng dụng để hấp phụ xử lý Pb(II) trong môi trường nước. Đã có một số nghiên cứu cho thấy khả năng hấp phụ Pb(II) trên các dạng oxit nhôm khá hiệu quả [14, 15].

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất, nguyên liệu

Bùn đỏ thô (RM): Lấy từ nhà máy sản xuất nhôm Tân Rai, Tây Nguyên. Natri cacbonat (Na_2CO_3 tinh thể, tinh khiết phân tích, Trung Quốc 98%), axit hidroclorua (HCl, Trung Quốc, 36.5%), natri hidroxit (NaOH, Việt Nam, 98%), axit sunfuric (H_2SO_4, Trung Quốc, 98%), $(Pb(NO_3)_2$, Merk, Đức, 1000 mg/L).

Chế tạo vật liệu

Chuẩn bị mẫu bùn đỏ thô: Bùn đỏ Tân Rai được lấy tại bãi chứa bùn thải của nhà máy sản xuất nhôm Tân Rai, Lâm Đồng. Mẫu bùn đỏ ở dạng khô, được sấy nhẹ ở 45-50°C, nghiền đến cỡ hạt 0,1 mm. Vật liệu được ký hiệu là RM.

Nghiên cứu chế tạo vật liệu gamma nhôm

*Giai đoạn 1: Khử carbon của bùn đỏ. Cân 2,0 g bùn đỏ và 0,24 g Na_2CO_3 (12%) được trộn với nước cất, sau đó sấy khô ở 110°C trong 4 giờ. Than được thêm vào hỗn hợp bùn đỏ và natri cacbonat với tỷ lệ 1:3 (bùn đỏ + natri cacbonat : than), sau đó nung ở 950°C trong 3 giờ. Quá trình này khử toàn oxit sắt về sắt bằng than [2].

* Giai đoạn 2: Tách sắt oxit từ bùn đỏ. Cân 0,5 g bùn đỏ sau khử carbon, mẫu được bổ sung 100 mL nước cất và khuấy trong 3 giờ, dùng nam châm thu hồi toàn bộ sắt. Phần hỗn hợp còn lại được lọc, thu được chất rắn, sấy khô 100 °C trong 3 giờ.

*Giai đoạn 3: Tổng hợp vật liệu gamma nhôm oxit. Kiềm hoá: Cân 0,2 g chất rắn thu được ở giai đoạn 2, bổ sung dung dịch NaOH 20% với tỷ lệ R/L= 1/4. Hỗn hợp được khuấy và đun ở 90°C trong 1 giờ, sau đó lọc rửa, ly tâm thu được chất rắn.

Axit hóa: Cân 0,2 g chất rắn thu được ở giai đoạn kiềm hoá, bổ sung axit H_2SO_4 30% với tỷ lệ R/L=1/5. Hỗn hợp được khuấy và đun già hóa ở 80 °C trong 2 giờ. Tiến hành ly tâm để thu chất rắn, tốc độ ly tâm 5 phút 7000 vòng/phút. Chất rắn được rửa lại nhiều lần bằng nước cất đến khi pH trung tính, ly tâm lấy phần chất rắn đem sấy ở 110 °C trong 3 giờ.

Mẫu sau khi sấy được nung ở 400°C, 500°C, 600°C trong 3 giờ [15]. Vật liệu thu được kí hiệu ***(GA/RM***), ký hiệu mẫu theo nhiệt độ nung lần lượt là GA/RM 400, GA/RM 500, GA/RM 600.

Nghiên cứu điều kiện và khả năng hấp phụ Pb(II) trong môi trường nước

Quy trình thí nghiệm

Cân 0,1 gam mẫu vật liệu chế tạo cho vào 50 mL dung dịch Pb (II) có nồng độ xác định cho từng thí nghiệm và được điều chỉnh về pH thích hợp theo yêu cầu. Hỗn hợp được đưa lên máy lắc với tốc độ lắc 140 v/ph trong thời gian xác định. Tiến hành lọc hỗn hợp qua giấy lọc băng xanh. Hàm lượng Pb(II) trước và sau khi hấp phụ được xác định bằng phương pháp quang phổ nguyên tử lò graphit (GF-AAS) trên máy quang phổ AA-7000 Shimazu. Tiến hành tương tự với mẫu bùn đỏ thô (RM) để đối chứng.

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

$$H = \frac{(C_0 - C_e).100}{C_0} \ (\%) \qquad q = \frac{(C_0 - C_e).V.10^{-3}}{m} \ (mg/g)$$

Trong đó :

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

H: hiệu suất hấp phụ (%)

C_0: nồng độ Pb(II) ban đầu (mg/L)

C_e : nồng độ Pb(II) còn lại sau khi hấp phụ (mg/L)

V: thể tích dung dịch Pb(II) (mL); m: khối lượng vật liệu (g)

Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ dung dịch Pb (II) ban đầu tới quá trình hấp phụ trên vật liệu GA/RM, kết quả nghiên cứu được phân tích dựa trên hai mô hình đẳng nhiệt hấp phụ phổ biến là Langmuir (phương trình 1) và Frendlich (phương trình 2) :

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:

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

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

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 ($g.mg^{-1}.phút^{-1}$).

https://doi.org/10.62239/jca.2026.009

Phương pháp nghiên cứu cấu trúc vật liệu

Các mẫu vật liệu chế tạo được nghiên cứu đặc điểm hình thái, cấu trúc bằng các phương pháp nhiễu xạ tia X (X-Ray) được ghi trên thiết bị D8-Advance, Brucker và SIEMEN D5005 với tia bức xạ CuKα có bước sóng λ = 1,5406 A^o, công suất 40 KV, góc quét 2θ từ 10 đến 70^o, tốc độ quét 1^o/phút, nhiệt độ 25^{o}C tại Khoa Vật lý, ĐH Quốc gia Hà Nội, phương pháp hiển vi điện tử quét SEM trên thiết bị Hitachi S – 4800 (Nhật Bản) tại Viện Khoa học Vật liệu – Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam; phương pháp đẳng nhiệt - hấp phụ (BET) được đo trên thiết bị Tristar- Micromeritics – 3000 (Mỹ) tại Trường Đại học sư phạm Hà Nội

Kết quả và thảo luận

Đặc trưng cấu trúc của vật liệu

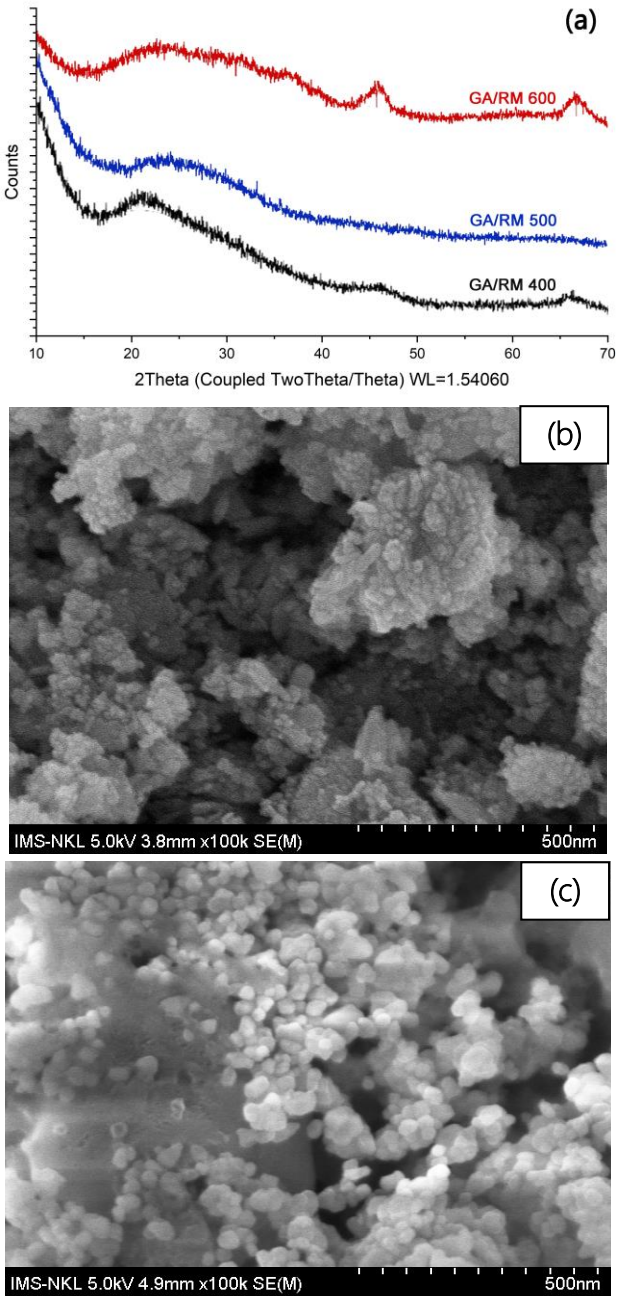
Giản đồ nhiễu xạ tia X (X-Ray) của mẫu vật liệu GA/RM

Mẫu vật liệu gamma oxit nhôm được chụp X-Ray, ở các nhiệt độ nung khác nhau (400^{o}C, 500^{o}C, 600^{o}C) cho thấy ở các nhiệt độ nung khác nhau cho đặc trưng cấu trúc vật liệu khác nhau, khi nung ở 400^{o}C và 500^{o}C, vật liệu Al_2O_3 được tạo thành gần như hoàn toàn ở trạng thái vô định hình. Khi tăng nhiệt độ lên 500^{o}C thì oxit nhôm tạo thành đã chuyển thành γ-Al_2O_3 (gamma oxit nhôm). Tại 600^{o}C, hàm lượng γ-Al_2O_3 tạo thành trong mẫu vật liệu là cao hơn nhiều so với các vật liệu nung ở điều kiện nhiệt độ trước đó. Kết quả chụp X-Ray của các mẫu vật liệu chế tạo ở các nhiệt độ 400^{o}C (GA/RM 400), 500^{o}C (GA/RM 500), 600^{o}C (GA/RM 600) được trình bày ở hình 1.a.

Vật liệu chế tạo được thì γ-Al_2O_3 tồn tại ở dạng vô định hình, trạng thái vô định hình này của gamma oxit nhôm trong một số nghiên cứu thường có khả năng hấp phụ tốt với một số ion kim loại [15,16].

Ảnh chụp SEM của vật liệu RM và GA/RM

Kết quả chụp SEM (hình 1.b và 1.c) của hai loại vật liệu bùn đỏ thô (RM) và vật liệu gamma oxit nhôm GA/RM nung ở 600^{o}C (GA/RM 600) được chế tạo cho thấy ở bùn đỏ thô RM các hạt vật liệu kết dính chặt với nhau thành những khối lớn, có thể đây là sự kết dính chủ yếu do nhôm hydroxit tạo nên. Còn đối với vật liệu chế tạo mới gamma oxit nhôm với độ phóng đại 100.000 lần, trên bề mặt đã xuất hiện các hạt vật liệu có dạng hình cầu sắc nét xếp sắp ngẫu nhiên thành các khối chồng lên nhau trên bề mặt các hạt vật liệu, bề mặt xốp sẽ giúp cho quá trình hấp phụ trên bề mặt tốt hơn.



Hình 1: (a) Giản đồ X-Ray của mẫu vật liệu GA/RM 400, GA/RM 500 và GA/RM 600. (b) Ảnh SEM của bùn đỏ thô RM, (cd) Ảnh SEM vật liệu GA/RM 600

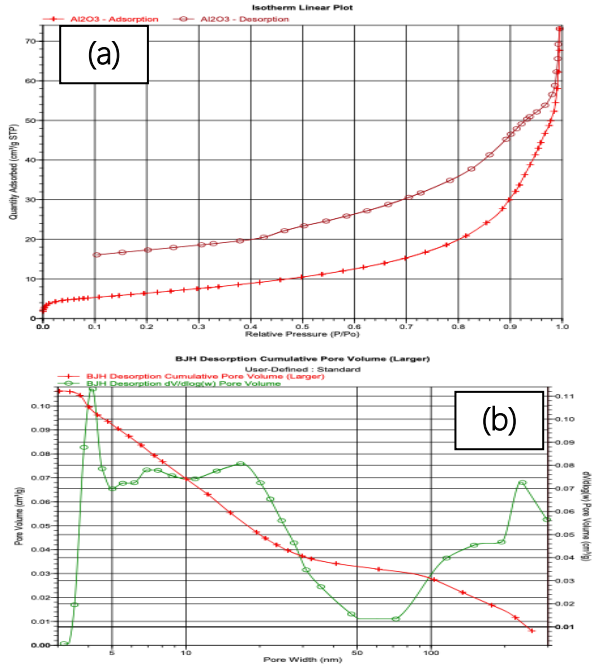
Kết quả xác định diện tích bề mặt riêng BET

Diện tích bề mặt của vật liệu ảnh hưởng lớn bởi nhiệt độ nung và sự thay đổi cấu trúc và thành phần của vật liệu. Kết quả xác định diện tích bề mặt riêng của vật liệu GA/RM 600 theo phương pháp BET là 63,8 m^2/g cao hơn so diện tích bề mặt với bùn đỏ ban đầu RM (40,7 m^2/g).

Kết quả tại Hình 2.a cho thấy, đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp phụ của vật liệu -Al_2O_3 không trùng hợp nhau, tạo ra vòng trễ do đó thuộc dạng đường loại IV

https://doi.org/10.62239/jca.2026.009

theo IUPAC, từ đó có thể thấy vật liệu có kích thước mao quản trung bình. Tuy nhiên, đường hấp phụ và khử hấp phụ không có sự đóng vòng ở vùng áp suất tương đối thấp, điều đó cho thấy mao quản của vật liệu có độ đồng đều không cao. Kết quả cho tại hình 2.b cũng chứng minh rằng có nhiều khoảng kích thước mao quản của hệ vật liệu, trải dài từ 2-150 nm. Kết quả nghiên cứu tương đồng với kết quả cho tại đường hấp phụ và giải hấp phụ.



Hình 2: Đường hấp phụ giải hấp N_2 (a) và đường phân bố kích thước mao quản (b) của vật liệu GA/RM 600

Ảnh hưởng của pH hấp phụ

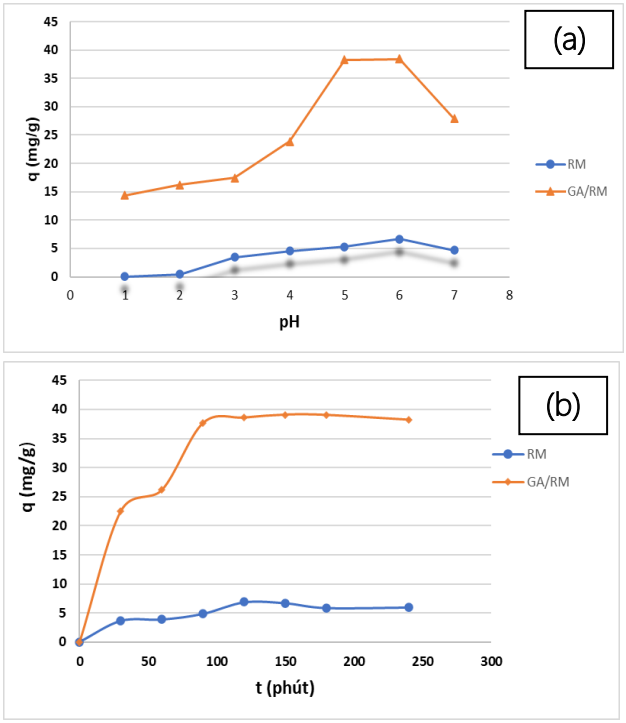
Để khảo sát ảnh hưởng của pH đến khả năng hấp phụ của vật liệu RM thô và biến tính GA/RM 600, thực nghiệm được tiến hành với khoảng pH của dung dịch khảo sát từ 2 đến 7, được điều chỉnh bằng dung dịch HCl 0,1M; dung dịch Pb(II) đem hấp phụ có nồng độ ban đầu là 100 mg/L và thời gian tiếp xúc hai pha với 120 phút với lượng vật liệu tổng hợp 0,1 g. Thí nghiệm được làm song song đối chứng với mẫu bùn đỏ thô chưa biến tính (RM). Hiệu suất hấp phụ được tính theo công thức trình bày trong phần thực nghiệm và kết quả được trình bày trên hình 3.a.

Phản ứng hấp phụ Pb(II) lên trên bề mặt γ-Al_2O_3 của vật liệu GA/RM 600 là quá trình ion kim loại bị giữ lại trên bề mặt vật liệu xốp thông qua tương tác hóa học (liên kết) và vật lý (lực Van der Waal) chủ yếu là do bề mặt vật liệu có nhiều vị trí hoạt động như nhóm hydroxyl (-OH), đó chính là các điểm mà Pb(II) có thể tạo liên kết phối trí hoặc trao đổi ion, làm giảm nồng độ của chì [14,15]:

$$\equiv Al\text{-}OH + Pb^{2+} \rightleftharpoons \equiv Al\text{-}O\text{-}Pb^{+} + H^{+}$$

Quá trình này phụ thuộc rất nhiều vào pH, diện tích bề mặt và nồng độ ban đầu.

Theo kết quả thực nghiệm thì dung lượng hấp phụ tăng dần theo pH của dung dịch do ở pH thấp ion [H^+] cạnh tranh với Pb(II) giành vị trí trên bề mặt. Khi pH tăng giới hạn thì dung lượng hấp phụ của Pb(II) tăng do giảm cạnh tranh và tăng sự tạo phức. Tuy nhiên pH đến trung tính hoặc kiềm yếu đã xuất hiện kết tủa chì hydroxit làm giảm khả năng hấp phụ trên bề mặt. Kết quả chỉ rõ dung lượng hấp phụ trên RM đạt giá trị cao nhất là 6,65 mg/g ở pH 6, còn với GA/RM 38,38 mg/g cũng ở giá trị pH 6 nhưng cao hơn nhiều so với bùn đỏ thô chưa biến tính. Kết quả khảo sát này phù hợp với giá trị pH_{pzc} của vật liệu chế tạo là 8,1. Giá trị pH hấp phụ nhỏ hơn giá trị pH_{pzc} bề mặt tích điện âm sẽ thuận lợi cho quá trình hấp phụ các cation. Giá trị pH này được lựa chọn để khảo sát các bước tiếp theo.



Hình 3: Ảnh hưởng của (a) pH đến hiệu suất hấp phụ của RM và GA/RM 600; (b) thời gian đến cân bằng hấp phụ

Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc

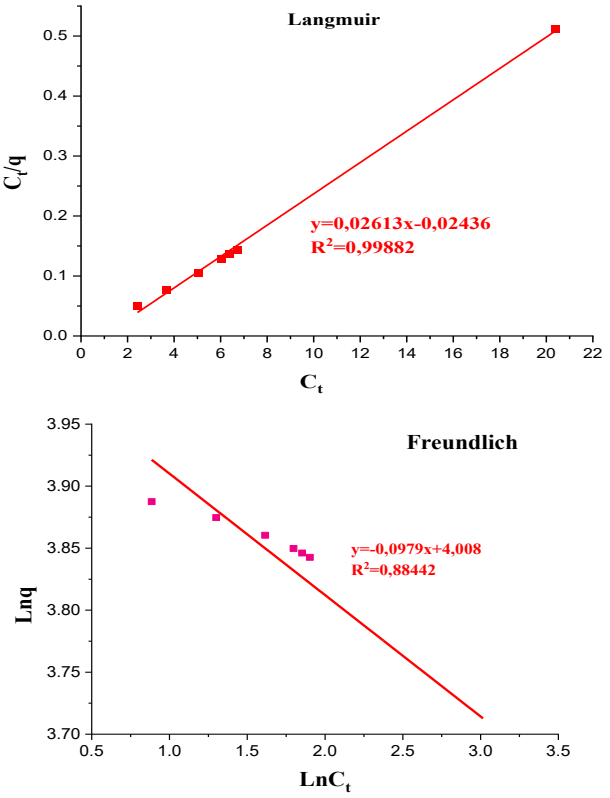
Thời gian tiếp xúc ảnh hưởng đến hiệu suất hấp phụ của vật liệu. Thực nghiệm được tiến hành với 50 ml dung dịch Pb(II) có nồng độ ban đầu là 100 mg/L trên 2 loại vật liệu là RM và GA/RM 600, pH được điều chỉnh đến giá trị 6, lắc hấp phụ với tốc độ 150 v/phút trong các khoảng thời gian khác nhau 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240 phút. Kết quả thực nghiệm được mô tả

https://doi.org/10.62239/jca.2026.009

theo hình 3.b. Cân bằng hấp phụ của Pb(II) trên vật liệu diễn ra rất nhanh ở giai đoạn đầu, sau đó chậm lại khi các vị trí hoạt tính trên bề mặt bão hòa. Kết quả thực nghiệm cho thấy dung lượng hấp phụ Pb (II) trên vật liệu tổng hợp được tăng nhanh ở 90 phút đầu tiên, sau đó đạt cân bằng ở giá trị 120 phút ứng với dung lượng hấp phụ của GA/RM 600 là 38,12 mg/g.

Khảo sát mô hình đẳng nhiệt hấp phụ theo Langmuir và Frendlich

Từ kết quả của mô hình động học hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich xác định được các thông số động học hấp phụ. Kết quả được trình bày tại hình 4 và bảng 1.



Hình 4: Đồ thị đường đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Frendlich của vật liệu GA/RM 600

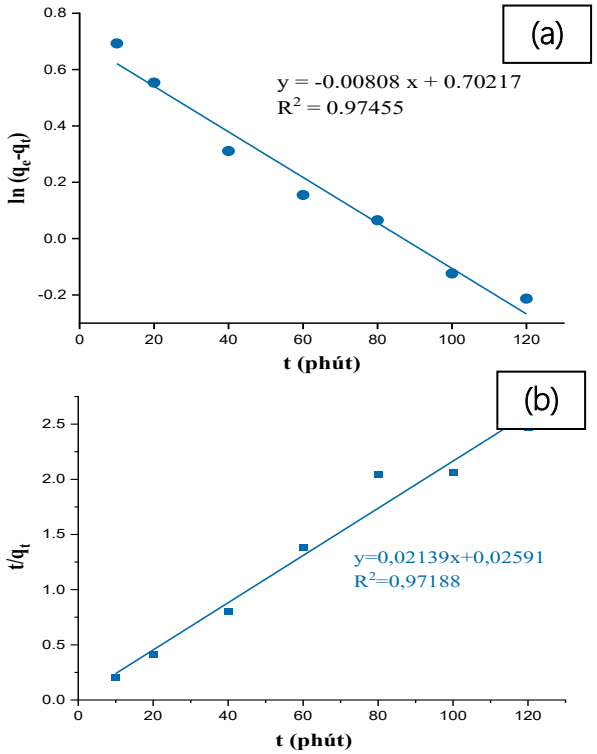
Bảng 1: Thông số động học của vật liệu GA/RM 600 hấp phụ Pb(II) theo mô hình động học Langmuir và Frendlich

Langmuir				Frendlich		
K_L	q_{max} (mg/g)	R_L (1/g)	R^2	1/n	K_F(1/g)	R^2
$1/q_{max}.b$	1/a	$1/(1+K_LC_o)$		a	$lnK_F=b$	
1,073	38,27	0,009<R_L <0,036	0,9982	0,0979	4,008	0,8844

Với các giá trị thông số khảo sát mô hình động học, quá trình hấp phụ chì theo mô hình động học Langmuir phù hợp hơn so với mô hình Frendlich, quá trình hấp phụ đơn lớp trên bề mặt vật liệu. Trong vùng nồng độ khảo sát giá trị dung lượng hấp phụ cực đại của Pb(II) đạt 38,27 mg/g.

Mô hình động học của vật liệu GA/RM 600 hấp phụ Pb(II)

Quá trình hấp phụ Pb(II) trên vật liệu được nghiên cứu trên mô hình động học bậc 1 và bậc 2 ở điều kiện nhiệt đô 25°C, pH thích hợp là 6, nồng độ ban đầu của Pb(II) là 100 mg/L. Kết quả khảo sát được thể hiện trên hình 5.



Hình 5: (a) Phương trình động học giả định bậc 1; (b) Phương trình động học giả định bậc 2

Các chỉ số thu được cho thấy sự tương thích đáng kể của cả hai mô hình đối với dữ liệu thực tế. Cụ thể, đối với mô hình động học bậc 1, phương trình hồi quy được xác định là y = -0,008x + 0,70217. Từ phương trình này, hằng số tốc độ hấp phụ k_1 đạt giá trị 0,008 phút^{-1} với hệ số hồi quy R^2 = 0,97455. Những thông số này phản ánh khả năng biểu diễn khá chính xác diễn biến của quá trình theo thời gian. Khi xem xét dưới mô hình động học bậc 2, dữ liệu thực nghiệm tuân theo phương trình y = 0,02139x + 0,02591. Ở mô hình này, hằng số tốc độ k_2 được tính toán là 0,009 mg/g.phút^{-1} đi kèm với hệ số hồi quy R^2 đạt 0,97188. Như vậy, có

https://doi.org/10.62239/jca.2026.009

thể kết luận rằng quá trình hấp phụ Pb(II) diễn ra ổn định và phù hợp để mô tả bằng cả hai mô hình động học bậc 1 và bậc 2. Điều này cho thấy cơ chế hấp phụ có thể bao gồm cả sự khuếch tán vật lý và tương tác hóa học trên bề mặt vật liệu.

Kết luận

Vật liệu gamma oxit nhôm được chế tạo từ bùn đỏ Tây Nguyên sau khi tách bỏ oxit sắt và một số oxit kim loại khác đã được phân tích đặc trưng cấu trúc bằng các phương pháp phân tích hiện đại như XRD, SEM, BET. Các hạt gamma oxit nhôm chủ yếu tồn tại ở dạng vô định hình, đây là dạng có khả nắng hấp phụ xử lý tốt đối với Pb(II), với diện tích bề mặt khá lớn, được cải thiện hơn về độ xốp so với bùn đỏ thô do đó có khả năng hấp phụ cao hơn đối với Pb(II). Mô hình đẳng nhiệt Langmuir được xác định phù hợp với quá trình hấp phụ xử lý Pb(II) trong môi trường nước, dung lượng hấp phụ cực đại đạt 38,27 mg/g. Dung lượng hấp phụ Pb(II) của vật liệu từ việc thu hồi oxit nhôm từ bùn đỏ có thể thấp hơn so với một số vật liệu biến tính bùn đỏ kết một số vật liệu khác [17], nhưng việc tận thu các thành phần oxit có trong bùn đỏ Tây Nguyên là một trong hướng nghiên cứu có khả thi và có ý nghĩa thực tiễn lớn trong xử lý chất thải công nghiệp thành vật liệu thân thiện môi trường

Tài liệu tham khảo

1. P.T.M. Huong, N.M. Ha, Vietnam J. Catal. Adsorpt., 11(4) (2022) 92-97. https://doi.org/10.51316/jca.2022.076
2. V.D. Loi, D.T. Hung, N.T. Van, N.V. Tuyen, P.S. Lam, D.Q. Trung, Vietnam J. Sci. Technol., 54(9) (2016) 15-23. https://doi.org/10.15625/2525-2518/54/9/419
3. D. Tuazon, G.D. Corder, Resour. Conserv. Recycl., 52(11) (2008) 1307-1314. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.010
4. R.C. Sahu, R. Patel, B.C. Ray, J. Hazard. Mater., 179(1-3) (2010) 28-34. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.052
5. A.A.S. Oliveira, J.C. Tristao, J.D. Ardisson, A. Dias, R.M. Lago, Appl. Catal. B Environ., 105(1-2) (2011) 163-170. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.042
6. X.B. Li, W. Xiao, W. Liu, G.H. Liu, Z.H. Peng, Q.S. Zhou, T.G. Qi, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 19(5) (2009) 1342-1347. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60447-X
7. P.T.M. Huong, T.H. Con, T.T. Dung, VNU J. Sci. Nat. Sci. Technol., 33(1) (2017) 26-35. https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.4116
8. I. Akin, G. Arslan, A. Tor, M. Ersoz, Y. Cengeloglu, J. Hazard. Mater., 235-236 (2012) 62-68. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.009
9. Y. Zhao, Y. Niu, X. Hu, B. Xi, X. Peng, W. Liu, W. Guan, L. Wang, Desalin. Water Treat., 57(10) (2016) 4720-4731. https://doi.org/10.1080/19443994.2014.992972
10. Y. Cengeloglu, A. Tor, M. Ersoz, G. Arslan, Sep. Purif. Technol., 51(3) (2006) 374-378. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.02.020
11. S.H. Ju, S.D. Lu, J.H. Peng, L.B. Zhang, C. Srinivasakannan, S.H. Guo, W. Li, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22(12) (2012) 3140-3146. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61582-1
12. F.T. da Conceição, B.C. Pichinelli, M.S.G. Silva, Environ. Earth Sci., 75 (2016) 362. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4929-y
13. M.K. Sahu, S. Mandal, S.S. Dash, P. Badhai, R.K. Patel, J. Environ. Chem. Eng., 1(4) (2013) 1315-1324. https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.09.027
14. T. Yoshida, T. Yamaguchi, Y. Iida, S. Nakayama, J. Nucl. Sci. Technol., 40(9) (2003) 672–678. https://doi.org/10.1080/18811248.2003.9715405
15. T.A. Bejiga, G.Y. Gezahegn, Y.H. Abrha, A.M. Mengistu, Discover Materials, 4 (2024) 2. https://doi.org/10.1007/s43939-024-00122-5
16. M. Aktaruzzaman, S.M.A. Salam, M.G. Mostafa, Trop. Aquat. Soil Pollut., 4(2) (2024) 127-142. https://doi.org/10.53623/tasp.v4i2.497
17. R.A. Rabu, N. Jewena, S.K. Das, J.I. Khandaker, F. Ahmed, J. Nanomater. Mol. Nanotechnol., 9(6) (2020) 1000292. https://doi.org/10.37532/jnmn.2020.9(6).292