VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences
Journal homepage: https://js.vnu.edu.vn/EES

Original Article

Ammonium Adsorption by Geopolymer from Thach That Laterite

Ta Thi Hoai*, Nguyen Thi Hong Hanh, Nguyen Thi Hai

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Received 6th June 2024
Revised 8th December 2024; Accepted 22nd April 2025

Abstract: This study aims to assess the ammonium (NH_4^+) removal ability of geopolymer made from laterite. The results showed that the NH_4^+ adsorption efficiency of laterite-based geopolymer (GL) was 9 times higher than raw laterite (LR). GL demonstrated a rapid increase in NH_4^+ adsorption efficiency in the first 30 minutes, followed by a 90-minute gradual increase and stabilization. The NH_4^+ adsorption isotherm of GL well fitted with both Langmuir and Freundlich models with a maximum adsorption capacity of 5.28 mg/g. The adsorbent dosage has influenced the adsorption capacity of GL, with the optimal ratio of adsorbent and solution volume being 10g/L. The SEM morphology structure of LR and GL indicates an increase in the surface area owing to higher regions of rough structures in GL compared to LR, contributing to the increment of NH_4^+ adsorption capacity. These findings emphasize the potential of ammonium removal of laterite-based geopolymer in an aqueous environment.

Keywords: Ammonium, geopolymer, laterite.

* Corresponding author.
E-mail address: hoaitt@hus.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5161

Nghiên cứu đặc điểm hấp phụ amoni trong môi trường nước của geopolymer từ vụn laterit Thạch Thất

Tạ Thị Hoài*, Nguyễn Thị Hồng Hạnh, Nguyễn Thị Hải

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 6 tháng 6 năm 2024
Chỉnh sửa ngày 8 tháng 12 năm 2024; Chấp nhận đăng ngày 22 tháng 4 năm 2025

Tóm tắt: Nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng hấp phụ amoni (NH_4^+) của geopolymer (GL) biến tính từ vụn laterit Thạch Thất (LR). Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu suất hấp phụ NH_4^+ của geopolymer cao hơn xấp xỉ 9 lần so với vụn laterit thô. GL có hiệu suất hấp phụ NH_4^+ tăng nhanh trong khoảng thời gian 30 phút đầu, tăng chậm đến xấp xỉ 90 phút, sau đó đạt trạng thái cân bằng. Ngoài ra, mô hình hấp phụ của geopolymer GL phù hợp với cả hai mô hình Langmuir và Freundlich, với dung lượng hấp phụ cực đại đạt 5,28 mg/g. Khi khối lượng vật liệu GL thay đổi với tỉ lệ vật liệu và dung dịch NH_4^+ là 10 g/L, hiệu suất hấp phụ đạt tối ưu. Cấu trúc hình thái bằng phân tích kính hiển vi điện tử quét (SEM) của LR và GL cho thấy sau khi biến tính, GL có các diện tích cấu trúc sần sùi lớn (kích thước > 100 μm^2) dày đặc trên bề mặt trong khi đó thưa thớt trên bề mặt của LR, điều này góp phần gia tăng khả năng xử lý NH_4^+. Kết quả nghiên cứu chỉ ra tiềm năng xử lý amoni của geopolymer từ vật liệu thải vụn laterit trong môi trường nước.

Từ khóa: Amoni, geopolymer, vụn laterit.

1. Mở đầu

Sự phát triển mạnh mẽ của quá trình công nghiệp hóa và đô thị hóa kéo theo một lượng lớn nước thải xả ra môi trường, trong đó vấn đề ô nhiễm amoni trong môi trường nước gia tăng ở nhiều quốc gia nói chung và Việt Nam nói riêng. Amoni trong nước thải, không xử lý hoặc xử lý không hiệu quả thải ra môi trường có thể ảnh hưởng đến chất lượng nước mặt. Chất lượng nước mặt và nước uống của một số khu vực tại thành phố Hà Nội đang ở mức báo động [1, 2]. Nồng độ amoni trong các mẫu nước mặt thuộc khu vực quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội được khảo sát 3/2021 vượt quá tiêu chuẩn từ 5,1-13,9 lần so với QCVN08-MT:2015/BTNMT [1]. Hàm lượng ở 10 hộ gia đình ở phường Hoàng Liệt, quận Hoàng Mai, Hà Nội cao hơn xấp xỉ 40 lần giới hạn cho phép (0,3 mg/L) theo QCVN 01-1:2018/BYT của Bộ Y tế [2]. Nguồn nước ô nhiễm NH_4^+ có thể chuyển hoá thành nitrit, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khoẻ con người [3]. Do đó, các phương pháp xử lý amoni trong môi trường nước đã và đang thu hút nhiều sự quan tâm.

Kết hợp vật liệu hấp phụ trong xử lý amoni trong môi trường nước góp phần nâng cao tính hiệu quả và tính ổn định [4]. Các vật liệu xử lý amoni trong môi trường nước phổ biến như than sinh học [5, 6], zeolit [7, 8], vật liệu quặng biến tính [9], tro bay biến tính [10], geopolymer từ metakaolin [11]. Trong đó, những năm gần đây,

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: hoaitt@hus.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5161

vật liệu hấp phụ geopolymer được đánh giá cao trong xử lý ô nhiễm [12]. Geopolymer được tạo ra từ vật liệu có nguồn gốc aluminosilicate hoạt hóa kiềm bằng đơn lẻ hoặc kết hợp các dung dịch NaOH, KOH và Na_2SiO_3 [13]. Quá trình tạo thành geopolymer có cấu trúc tứ diện được liên kết bởi các oxy dùng chung SiO_4^{4-} và AlO_4^{5-}, với sự chênh lệch điện tích này, các ion dương từ dung dịch kiềm (Na^+) đã cân bằng trong liên kết trên. Điều này đã tạo ra khả năng trao đổi ion với các chất ô nhiễm tương ứng. Ngoài ra, trong cấu trúc vi mô của geopolymer quan sát được các lỗ xốp phân tán, gia tăng cấu trúc bề mặt và tồn tại các điện tích âm, dẫn đến khả năng hấp phụ tốt các chất ô nhiễm ion dương như NH_4^+ [12]. Geopolymer có khả năng xử lý hiệu quả đa số các chất ô nhiễm, có thể kể đến kim loại nặng của geopolymer từ metakaolin [14], tro bay [15], laterit [16], xanh methylen của geopolymer từ metakaolin [17], tro xỉ [18], amoni của geopolymer từ metakaolin [10, 19]. Tuy nhiên, cho đến nay các nghiên cứu về đặc điểm xử lý amoni trong môi trường nước của geopolymer chủ yếu chế tạo từ vật liệu ban đầu là metakaolin, trong đó sử dụng vụn thải laterit còn hạn chế.

Việt Nam là một trong các quốc gia có trữ lượng lớn đá ong laterit, phổ biến ở Hà Nội (laterit huyện Thạch Thất), Vĩnh Phúc (laterit huyện Tam Dương), Tây Nguyên. Laterit với thành phần chủ yếu là oxit nhôm, silic và sắt nên là một trong những vật liệu có thể biến tính làm vật liệu xử lý ô nhiễm. Vụn đá ong laterit đã được ứng dụng biến tính làm vật liệu xử lý các chất ô nhiễm trong môi trường nước như As^{3+} [20], Cr^{3+} [21], Pb^{2+} [22], chất hoạt động bề mặt [23]. Nguyen và nnk [20] đã biến tính laterit Thạch Thất và ứng dụng cho xử lý nước ngầm bị nhiễm As các khu vực Hà Nội và Hà Nam.

Nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng xử lý amoni của geopolymer tạo ra từ vụn laterit, khảo sát dưới ảnh hưởng của các yếu tố như nồng độ ban đầu, kích thước hạt, thời gian và tỉ lệ vật liệu. Ngoài ra, một số đặc tính vật liệu như cấu trúc hình thái SEM và thành phần khoáng vật của vật liệu thô và geopolymer được phân tích để làm rõ hơn đặc điểm xử lý amoni.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Chế tạo vật liệu geopolymer từ laterit

Vật liệu laterit sử dụng trong nghiên cứu là vụn laterit được thu thập tại khu thải bỏ sau khi khai thác của người dân tại huyện Thạch Thất, Hà Nội. Sau khi đưa về phòng thí nghiệm, vụn laterit được rửa với nước để loại bỏ bụi bẩn và chất hòa tan khác sau đó sấy khô trong tủ sấy ở nhiệt độ 105 °C. Tiến hành nghiền mịn, vật liệu sau khi nghiền có đường kính nhỏ hơn 200 µm (LT).

Vật liệu geopolymer từ laterit (GL) được chế tạo dựa trên quy trình trong nghiên cứu của Nguyen et al., [17] với dung dịch kiềm hóa là NaOH 10 M. Tỉ lệ vật liệu rắn laterit và dung dịch kiềm là 2:1. Hỗn hợp trên được trộn đều sử dụng máy khuấy trộn trong 5 phút ở nhiệt độ phòng, sau đó đổ ra khuôn và bảo dưỡng ở nhiệt độ 60 °C trong 24 giờ, thu được vật liệu geopolymer từ laterit. Vật liệu geopolymer được nghiền nhỏ về 2 kích thước bao gồm đường kính nhỏ hơn 200 µm (GLM) và dạng hạt có đường kính 3-5 mm (GLH). Các vật liệu này được rửa về pH7 trước khi sử dụng trong các thí nghiệm hấp phụ và phân tích đặc tính vật liệu.

Quy trình rửa vật liệu được thực hiện bằng máy ly tâm. Thêm nước cất vào vật liệu sau đó đưa vào máy ly tâm để tách vật liệu ra khỏi dung dịch. Quy trình này được lặp lại cho đến khi dung dịch vật liệu đạt pH 7. Sau đó, tiếp tục ly tâm để thu được vật liệu. Vật liệu sau khi rửa được sấy ở nhiệt độ 105 °C và bảo quản chuẩn bị cho các thí nghiệm và phân tích tiếp theo.

2.2. Thí nghiệm hấp phụ

Thí nghiệm hấp phụ được thực hiện cho laterit thô (LT) và geopolymer từ laterit (GL). Thí nghiệm hấp phụ amoni được tiến hành bằng cách cân 0,25 g vật liệu cho vào ống falcon 50 mL với tỉ lệ vật liệu trên dung dịch là 1:10. Điều kiện thí nghiệm được thực hiện tương tự trong nghiên cứu của Hoai và nnk [24]. Dung dịch sử dụng là dung dịch amoni có nồng độ NH_4^+-N 20 mg/L, pH 7. Thí nghiệm hấp phụ được thực hiện sử dụng máy lắc vật liệu LSI-2 Labtech. Dung dịch chứa vật liệu được lắc trong vòng 24 giờ với

tốc độ 160 vòng/phút. Sau khi kết thúc thí nghiệm, mỗi vật liệu được lọc tách khỏi dung dịch sử dụng giấy lọc đường kính 0,45 μm. Dung dịch sau lọc được sử dụng để phân tích nồng độ NH_4^+-N.

Ngoài ra, thí nghiệm hấp phụ khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng hấp phụ của LT và GL bao gồm kích thước vật liệu, nồng độ amoni ban đầu, thời gian hấp phụ và khối lượng vật liệu. Kích thước vật liệu được khảo sát cho GL bao gồm GLM và GLH. Nồng độ amoni ban đầu nằm trong dãy nồng độ 10 – 300 mg/L. Thời gian hấp phụ bao gồm 5, 10, 15, 25, 30, 45, 60, 90, 120 và 300 phút. Khối lượng vật liệu được thay đổi sao cho tỉ lệ vật liệu trên dung dịch là 5, 10, 20, 30 và 50 g/L. Dung lượng và hiệu suất hấp phụ amoni của LR và GL được tính lần lượt theo các công thức (1) và (2) [18]:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

$$H(\%) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

Trong đó: Q_e là dung lượng hấp phụ (mg/g), C_0 và C_e lần lượt là nồng độ NH_4^+-N tại thời điểm ban đầu và tại thời điểm 24 giờ (mg/L); m là khối lượng của vật liệu (g), V là thể tích dung dịch (L), H là hiệu suất hấp phụ (%)

2.3. Đặc tính vật liệu và phân tích amoni

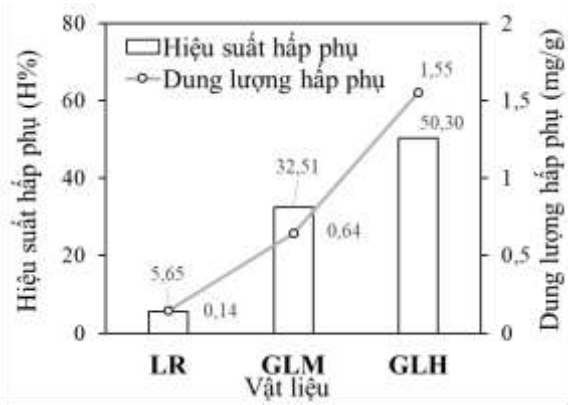
Đặc tính vật liệu được làm rõ trong nghiên cứu này là cấu trúc hình thái SEM sử dụng thiết bị NanoSEM FEI-450 và thành phần khoáng vật được xác định thông qua nhiễu xạ tia X (XRD) bởi thiết bị D5005. Nồng độ NH_4^+-N ban đầu trong dung dịch và còn lại sau thí nghiệm hấp phụ được xác định bằng phương pháp so màu với bước sóng 670 nm dựa theo quy trình của Kanda [25], sử dụng máy phân tích UV-VIS Hatch Dr6000.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Khả năng xử lý NH_4^+ của geopolymer từ vụn laterit

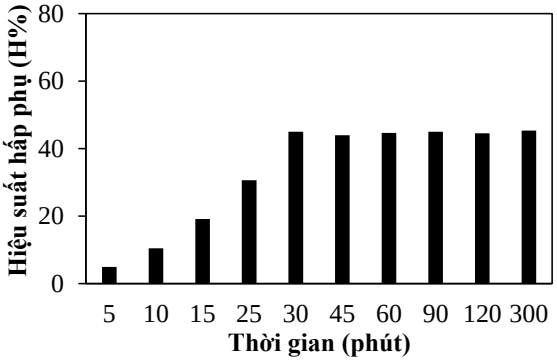
3.1.1. Ảnh hưởng của biến tính và kích thước vật liệu

Hình 1 thể hiện dung lượng và hiệu suất hấp phụ của LR, GLM và GLH. Kết quả cho thấy khả năng hấp phụ NH_4^+ của LR thấp, đạt hiệu suất hấp phụ 5,65% và dung lượng hấp phụ 0,14 mg/g. Sau khi biến tính thành vật liệu geopolymer, hiệu suất hấp phụ amoni tăng lên khoảng 9 lần đối với GLM. Vật liệu hấp phụ geopolymer dạng hạt GLH có hiệu suất và dung lượng hấp phụ NH_4^+ thấp hơn GLM. GLH có dung lượng hấp phụ NH_4^+ tăng lên khoảng 5 lần so với LR. Nhìn chung, dung lượng và hiệu suất hấp phụ NH_4^+ của GLM đạt cao nhất, lần lượt là 1,55 mg/g và 50,3%.



Hình 1. Dung lượng và hiệu suất hấp phụ NH_4^+ của vụn laterit thô và geopolymer từ laterit.

3.1.2. Ảnh hưởng của thời gian

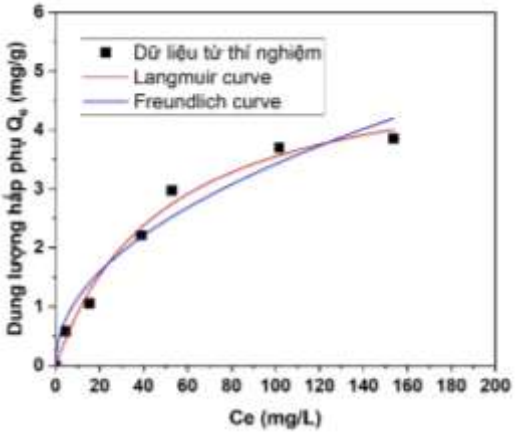


Hình 2. Ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hấp phụ NH_4^+ của geopolymer.

Ảnh hưởng của thời gian đến khả năng hấp phụ amoni của geopolymer từ vụn laterit được thực hiện với dung dịch pH 7, nồng độ ban đầu 20 mg/L, tỉ lệ vật liệu trên dung dịch là 1:10, thời gian khảo sát từ 5 đến 300 phút. Kết quả được

thể hiện trong Hình 2. Có thể thấy rằng, hiệu suất hấp phụ tăng nhanh trong khoảng thời gian 30 phút đầu, tăng chậm dần đến khoảng 90 phút, sau đó đạt trạng thái cân bằng với hiệu suất xấp xỉ 54%. Ban đầu, sự hấp phụ nhanh hơn là do nồng độ amoni trong dung dịch cao và trên bề mặt vật liệu có nhiều vị trí hấp phụ nên tốc độ hấp phụ diễn ra nhanh chóng. Khi quá trình hấp phụ diễn ra, sự giảm nồng độ ion bị hấp phụ và độ bão hòa của các vị trí hoạt động xảy ra dẫn đến quá trình hấp phụ chậm hơn và dần thiết lập trạng thái cân bằng.

3.1.3. Ảnh hưởng của nồng độ ban đầu



Hình 3. Dung lượng và hiệu suất hấp phụ NH_4^+ của geopolymer.

Ảnh hưởng của nồng độ ban đầu đến khả năng xử lý amoni thể hiện cân bằng đẳng nhiệt của vật liệu geopolymer từ vụn laterit, được thể hiện qua các đường đẳng nhiệt Langmuir và Freudlich trong Hình 3 và được xác định lần lượt theo các công thức (3) và (4):

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

$$Q_e = K_F C_e^n \quad (4)$$

Trong đó: Q_m là dung lượng hấp phụ tối ưu, K_L là hệ số Langmuir; K_F là hệ số Freundlich chỉ ra dung lượng hấp phụ, n là hệ số thực nghiệm.

Bảng 1 thể hiện các thông số của mô hình đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich cho hấp phụ NH_4^+ của GL. Kết quả cho thấy hệ số tương quan R^2 từ mô hình Langmuir là 0,98 và mô hình Freundlich là 0,95, chỉ ra sự phù hợp hơn của mô hình Langmuir với khả năng hấp phụ amoni của vật liệu geopolymer. Dung lượng hấp phụ NH_4^+ tối ưu của laterit biến tính đạt 5,28 mg/g. Kết quả này được so sánh với khả năng xử lý NH_4^+ của các vật liệu biến tính khác tại Việt Nam được thể hiện trong Bảng 2. Có thể thấy rằng, vật liệu geopolymer có dung lượng hấp phụ tối ưu thấp hơn một số vật liệu biến tính quặng apatit, than sinh học lõi ngô, EBB cải tiến, feldspar biến tính tuy nhiên cao hơn một số vật liệu than sinh học có nguồn gốc từ bùn giấy, than tre và rơm rạ.

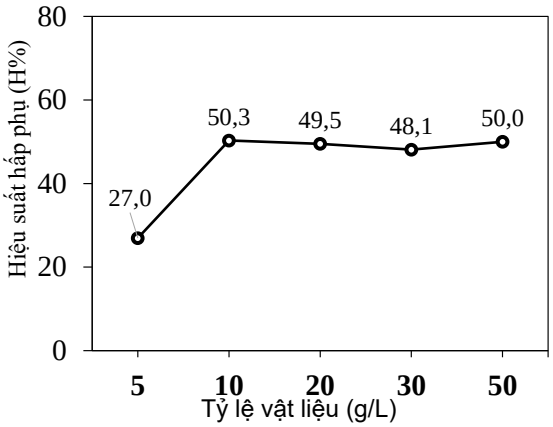
Bảng 1. Các thông số của mô hình đẳng nhiệt

Vật liệu	Mô hình Langmuir			Mô hình Freundlich		
GL	Q_m (mg/g)	K_L	R^2	K_F	n	R^2
	5,28	0,02	0,98	0,38	0,48	0,95

Bảng 2. So sánh dung lượng hấp phụ NH_4^+ giữa các vật liệu hấp phụ

Vật liệu	Điều kiện thí nghiệm				Nguồn tài liệu
	Tỉ lệ rắn lỏng (g/L)	pH	Nồng độ ban đầu	Dung lượng hấp phụ tối ưu (mg/g)	
Geopolymer từ vụn laterit	10	7	10-200	5,28	Nghiên cứu này
Than sinh học từ bùn giấy	4	7	10-100	5,22	[20]
Than sinh học từ tre	1	8	1-50	4,87	[21]
Than sinh học từ rơm rạ	10	5-5,5	0-25	1,27	[22]
Feldspar biến tính	2	-	5-500	21,8	[23]
Quặng apatit biến tính	4	7-8	1-200	13,69	[8]
EBB cải tiến	150	6	10-50	18,72	[11]
Than sinh học từ lõi ngô biến tính	2	5-6	1-100	16,6	[12]

3.1.4. Ảnh hưởng của khối lượng vật liệu



Hình 4. Ảnh hưởng của khối lượng vật liệu đến hiệu suất của geopolymer.

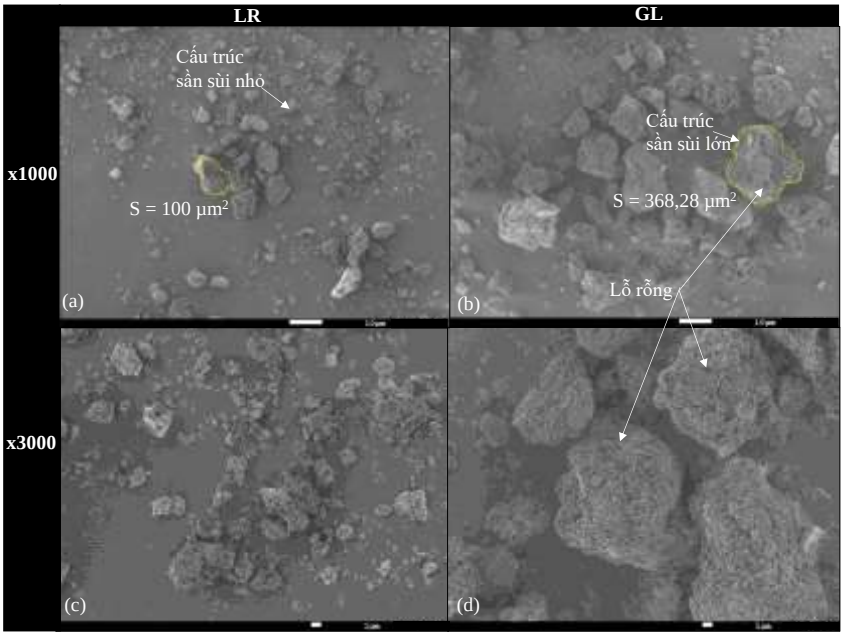
Hình 4 thể hiện hiệu suất hấp phụ amoni của geopolymer dưới ảnh hưởng của khối lượng vật liệu. Hiệu suất hấp phụ tăng theo tỉ lệ vật liệu trên dung dịch, cụ thể hiệu suất hấp phụ tăng 26,95% đến 50,3% khi tăng tỉ lệ từ 5,0 đến 10 g/L. Tiếp đó hiệu suất hấp phụ gần như không đổi khi tăng khối lượng vật liệu theo các tỉ lệ 20, 30 và 50 g/L. Kết quả chỉ ra rằng tỉ lệ 10 g/L cho khả năng đạt được hiệu suất xử lý amoni tối ưu.

3.2. Đặc tính vật liệu geopolymer từ vụn laterit

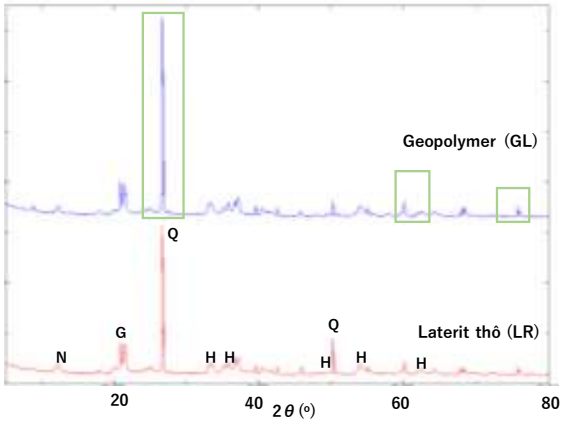
Cấu trúc hình thái SEM của laterit thô LR và geopolymer GL với độ phóng đại 1000 và 3000 được thể hiện trong Hình 5. Hình 5a, c cho thấy cấu trúc sần sùi trên bề mặt của LR có diện tích nhỏ dao động từ 1,6-100 µm^2 (được tính toán trên phần mềm Image J). Số lượng sần sùi có diện tích lớn hơn 100 µm^2 rất thưa thớt trên cấu trúc bề mặt LR.

Cùng một độ phóng đại, cấu trúc sần sùi trên bề mặt của GL phân bố dày đặc. Diện tích lớn nhất của cấu trúc sần sùi lên đến 368,28 µm^2. Trên bề mặt các cấu trúc sần sùi lớn này quan sát thấy nhiều lỗ rỗng. Điều này cho thấy biến tính geopolymer có thể đã làm tăng diện tích bề mặt và độ lỗ rỗng của vật liệu, từ đó làm tăng khả năng xử lý NH_4^+ từ dung dịch.

Đặc điểm thành phần khoáng vật XRD của laterit thô và geopolymer được thể hiện trong Hình 6. Thành phần khoáng vật trong laterit thô bao gồm thạch anh (Q), hematit (H), gơtit (G) và nacrit (N). Kết quả cho thấy sau khi biến tính, mặc dù cường độ của các đỉnh của geopolymer cao hơn so với laterit thô (kí hiệu ô chữ nhật màu xanh lá), thành phần khoáng vật của geopolymer được nhận định tương đối tương tự laterit thô.



Hình 5. Cấu trúc hình thái SEM của vụn laterit thô (a, c) và geopolymer (b, d).



Hình 6. Đặc điểm thành phần khoáng vật XRD của laterit thô và geopolymer.

4. Kết luận

Vật liệu geopolymer từ vụn laterit được khảo sát khả năng xử lý amoni trong dung dịch dưới ảnh hưởng của nồng độ amoni, thời gian, kích thước hạt, khối lượng vật liệu. Geopolymer mịn có khả năng hấp phụ amoni cao hơn 9 lần so với vụn laterit thô. Hiệu suất hấp phụ amoni của geopolymer tăng nhanh trong khoảng thời gian 30 phút đầu sau đó đạt trạng thái cân bằng sau 90 phút. Cả hai mô hình Langmuir và Freundlich phù hợp với dữ liệu thí nghiệm hấp phụ amoni của geopolymer từ laterit với hệ số tương quan lần lượt là R^2 = 0,98 và R^2 = 0,95. Dung lượng hấp phụ cực đại của geopolymer từ vụn laterit đạt 5,28 mg/g. Dung lượng hấp phụ amoni trong nghiên cứu này của geopolymer từ laterit cao hơn một số vật liệu biến tính khác chỉ ra tiềm năng xử lý amoni của geopolymer từ vụn laterit. Tuy nhiên, cần thực hiện thêm các thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của các điều kiện biến tính khác nhau và các đặc tính vật liệu khác để xác định được điều kiện tối ưu sản xuất geopolymer đạt hiệu quả cao nhất.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ kinh phí từ Quỹ tài trợ nghiên cứu khoa học về nước và môi trường Kurita, mã số 24Pvn024.

Tài liệu tham khảo

[1] D. T. Ha, N. T. T. Phuong, T. Q. Hai, N. T. Thoa, N. M. Ha, Determination of Total Phosphorus, Phosphate, Total Nitrogen, Ammonium, Chloride, Residual Chlorine, Color, pH, Total Solids in Water of Some Rivers and Lakes in Bac Tu Liem District, Hanoi, HaUI Journal of Science and Technology, Vol. 60, No. 3, 2024, pp. 113-118, http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.108 (in Vietnamese).

[2] L. A. Trung, D. K. Loan, T. H. Con, Assessing the Status of Contamination Nitrogen Compound in Storage of Domestic Water in Hoang Liet Ward, Hoang Mai District, Hanoi City, VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences, Vol. 32, No. 1S, 2016, pp. 110-117 (in Vietnamese).

[3] WHO (World Health Organisation), Guidelinesf for Drinking Water Quality (Fourth Ed.), Geneva: World Health Organization, 2011, 541 pp.

[4] J. Huang, N. R. Kankanamge, C. Chow, D. T. Welsh, T. Li, P. R. Teasdale, Removing Ammonium from Water and Wastewater Using Cost-Effective Adsorbents: A Review, Journal of Environmental Sciences, Vol. 63, 2018, pp. 174-197, http://doi.org/10.1016/j.jes.2017.09.009.

[5] X. Hu, X. Zhang, H. H. Ngo, W. Guo, H. Wen, C. Li, C. Ma, Comparison Study on the Ammonium Adsorption of the Biochars Derived from Different Kinds of Fruit Peel, Science of the Total Environment, Vol. 707, 2020, pp. 135544, http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135544.

[6] N. V. Phuong, P. T. T My, D. M. D. Thien, N. K. Hoang, Evaluation of NH_4^+ Adsorption Capacity from Water by Rice Straw Derived Biochar, Journal of Science and Technology Magazine, Vol. 49, 2021 (in Vietnamese).

[7] S. M. Muscarella, L. Badalucco, B. Cano, V. A. Laudicina, G. Mannina, Ammonium Adsorption, Desorption and Recovery by Acid and Alkaline Treated Zeolite, Bioresource Technology, Vol. 341, 2021, pp. 125812, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125812.

[8] L. V. Tam, P. H. Tuan, N. V. Dung, N. T. X. Hong, P. H. Nhat, Treatment of Amoni In Wastewater by Continuous Column Model Using Zeolite A Synthesized from Coal Fly Ash, Journal of Military Science and Technology, No. VITTEP, 2022, pp. 178-184, https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.vittep.2022.178-184 (in Vietnamese).

[9] N. T. M. Viet, Removal of Ammonium from Aqueous Solutions by Using Apatite Ore/Fe_3O_4 Nanoparticles, TNU Journal of Science and Technology, Vol. 200, No. 07, 2019, pp. 175-182 (in Vietnamese).

[10] Y. Zhao, H. Luan, B. Yang, Z. Li, M. Song, B. Li, X. Tang, Adsorption of Low-Concentration Ammonia Nitrogen from Water on Alkali-Modified Coal Fly Ash: Characterization and Mechanism. Water, Vol. 15, No. 5, 2023, pp. 956, https://doi.org/10.3390/w15050956.

[11] T. Luukkonen, E. T. Tolonen, H. Runtti, K. Kemppainen, P. Perämäki, J. Rämö, U. Lassi, Optimization of the Metakaolin Geopolymer Preparation for Maximized Ammonium Adsorption Capacity, Journal of Materials Science, Vol. 52, 2017, pp. 9363-9376, https://doi.org/10.1007/s10853-017-1156-9.

[12] K. Liang, X. Q. Wang, C. L. Chow, D. Lau, D, A Review of Geopolymer and Its Adsorption Capacity with Molecular Insights: A Promising Adsorbent Of Heavy Metal Ions, Journal of Environmental Management, Vol. 322, 2022, pp. 116066, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116066.

[13] S. A. Rasaki, Z. Bingxue, R. Guarecuco, T. Thomas, Y. Minghui, Geopolymer for Use in Heavy Metals Adsorption, and Advanced Oxidative Processes: A Critical Review, Journal of Cleaner Production, Vol. 213, 2019, pp.42-58, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.145.

[14] I. Kara, D. Yilmazer, S. T. Akar, Metakaolin Based Geopolymer as an Effective Adsorbent for Adsorption of Zinc (II) and Nickel (II) Ions from Aqueous Solutions, Applied Clay Science, Vol. 139, 2017, pp. 54-63, https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.008.

[15] M. S. A. Harahsheh, K. A. Zboon, L. A. Makhadmeh, M. Hararah, M. Mahasneh, Fly Ash Based Geopolymer for Heavy Metal Removal: A Case Study on Copper Removal, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 3, No.3, 2015, pp. 1669-1677, https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.06.005.

[16] U. Ghani, S. Hussain, M. Imtiaz, S. A. Khan, Laterite Clay-Based Geopolymer As A Potential Adsorbent for the Heavy Metals Removal from Aqueous Solutions, Journal of Saudi Chemical Society, Vol. 24, No. 11, 2020, pp. 874-884, https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.09.004.

[17] M. E. Alouani, S. Alehyen, M. E. Achouri, M. H. Taibi, Preparation, Characterization, and Application of Metakaolin-Based Geopolymer for Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution, Journal of Chemistry, Vol. 2019, No. 1, 2019, pp. 4212901, https://doi.org/10.1155/2019/4212901.

[18] K. D. Nguyen, Q. N. V. My, A. P. T. Kim, P. T. Tran, D. T. K. Huynh, O. T. K. Le, Coal Fly Ash-Slag and Slag-Based Geopolymer As An Absorbent for the Removal of Methylene Blue in Wastewater, Science and Technology Development Journal, Vol. 25, No. 1, 2022, pp. 2215-2223, https://doi.org/10.32508/stdj.v25i1.3421.

[19] V. Medri, E. Papa, E. Landi, C. Maggetti, D. Pinelli, D. Frascari, Ammonium Removal and Recovery from Municipal Wastewater by Ion Exchange Using A Metakaolin K-Based Geopolymer, Water Research, Vol. 225, 2022, pp. 11920, https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119203.

[20] T. H. Nguyen, H. N. Tran, H. A. Vu, M. V. Trinh, T. V. Nguyen, P. Loganathan, T. H. H. Nguyen, Laterite as A Low-Cost Adsorbent in A Sustainable Decentralized Filtration System to Remove Arsenic from Groundwater in Vietnam, Science of the Total Environment, Vol. 699, 2020, pp. 134267, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134267.

[21] Y. He, Y. G. Chen, K. N. Zhang, W. M. Ye, D. Y. Wu, Removal of Chromium and Strontium from Aqueous Solutions by Adsorption on Laterite, Archives of Environmental Protection, Vol. 45, No. 3, 2019, pp. 11-20, https://doi.org/ 10.24425/aep.2019.128636.

[22] R. Chatterjee, K. Adhikari, R. Sinha, S. Bharti, U. Mal, Arsenic Contamination in Groundwater of Moribund Delta of Bengal Basin: Quantitative Assessment Through Adsorption Kinetics and Contaminant Transport Modelling, Journal of Earth System Science, Vol. 133, No. 2, 2024, pp. 1-26, https://doi.org/10.1007/s12040-024-02275-6.

[23] T. D. Pham, T. T. Pham, M. N. Phan, T. M. V. Ngo, C. M. Vu, Adsorption Characteristics of Anionic Surfactant Onto Laterite Soil with Differently Charged Surfaces and Application for Cationic Dye Removal, Journal of Molecular Liquids, Vol. 301, 2020, pp. 112456, https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112456.

[24] T. T. Hoai, N. T. Tue, L. V. Dung, N. T. Hai, M. T. Nhuan, Potential of Ammonium Adsorption of Coal Fly Ash-Based Porous Geopolymer Granules, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1383, No. 1, 2024, pp. 012013, https://doi.org/10.1088/1755-1315/1383/1/012013.

[25] J. Kanda, Determination of Ammonium in Seawater Based on the Indophenol Reaction with O-Phenylphenol (OPP), Water Research, Vol. 29, No. 12, 1995, pp. 2746-2750, https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00149-F.