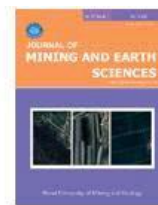




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Using red mud for flue gas storage and treatment: A green solution for the alumina industry



Luan Van Pham^{1,3,*}, Ha Viet Le^{1,3}, Tuyen Dinh Trinh², Nhuong Van Nguyen²

¹ Hanoi university of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Vinacomin - Daknong Aluminium Company, Lamdong, Vietnam

³ Research Group MinPro, Hanoi university of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:
Received 25th Aug. 2025
Revised 30th Nov. 2025
Accepted 20th Dec. 2025

Keywords:
Alumina industry,
CO₂ capture,
Environmental sustainability,
Flue gas treatment,
NO_x reduction,
Red mud,
SO₂ removal.

ABSTRACT

The production of alumina by the Bayer process invariably generates two types of hazardous waste: red mud and greenhouse gas emissions. Red mud is a voluminous solid residue consisting primarily of 30÷60% Fe₂O₃, 10÷20% Al₂O₃, 3÷50% SiO₂, 2÷10% Na₂O, 2÷8% CaO, and approximately 10% TiO₂. Due to its high alkalinity (pH 10÷13), red mud is not only difficult to manage but also poses potential risks of soil, water, and ecosystem contamination if improperly handled. In parallel, the combustion of fossil fuels during alumina production releases greenhouse gases along with other pollutants such as CO, CO₂, SO₂, NO_x, and fine particulate matter, thereby contributing to climate change and deteriorating air quality. Nevertheless, the strong alkalinity of red mud makes it a promising material for adsorption and neutralization of acidic wastes, particularly flue gases from fossil fuel-fired power plants. Thus, utilizing red mud for greenhouse gas capture and treatment offers dual environmental benefits: mitigating gaseous emissions while providing a sustainable waste management strategy for the alumina industry. This paper reviews international research and practical applications of red mud for greenhouse gas storage and treatment. Building on these findings, it proposes technological directions for the simultaneous management of red mud and gaseous emissions generated during alumina production in Vietnam. Such an integrated approach is expected to enhance environmental performance while supporting the sustainable development of Vietnam's bauxite and alumina industry.

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

**Corresponding author*

E - mail: phamvanluan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).03



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>



Sử dụng bùn đỏ để lưu trữ và xử lý khí thải: Giải pháp xanh cho ngành công nghiệp nhôm

Phạm Văn Luận^{1,3,*}, Lê Việt Hà^{1,3}, Trịnh Đình Tuyền², Nguyễn Văn Nhường²

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Công ty Nhôm Đắc Nông - TKV, Lâm Đồng, Việt Nam

³ Nhóm nghiên cứu MinPro, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 25/8/2025

Sửa xong 30/11/2025

Chấp nhận đăng 20/12/2025

Từ khóa:

Bùn đỏ,

Công nghiệp nhôm,

Giảm NO_x,

Hấp phụ CO₂,

Khử SO₂,

Phát triển bền vững môi

trường,

Xử lý khí thải.

TÓM TẮT

Quá trình sản xuất nhôm bằng quy trình Bayer luôn phát sinh hai loại chất thải nguy hại là bùn đỏ và khí thải. Bùn đỏ là chất thải rắn có khối lượng lớn, chứa chủ yếu 30÷60% Fe₂O₃, 10÷20% Al₂O₃, 3÷50% SiO₂, 2÷10% Na₂O, 2÷8% CaO và khoảng 10% TiO₂. Bùn đỏ có pH cao (10÷13) nên không chỉ khó xử lý mà còn tiềm ẩn nguy cơ ô nhiễm đất, nước và hệ sinh thái nếu không được quản lý thích hợp. Song song đó là quá trình đốt nhiên liệu hóa thạch phục vụ sản xuất phát sinh khí thải và các chất ô nhiễm khác như CO, CO₂, SO₂, NO_x và bụi mịn, góp phần gia tăng biến đổi khí hậu và suy giảm chất lượng môi trường không khí. Tuy nhiên, bùn đỏ có độ kiềm cao nên là vật liệu tiềm năng để hấp phụ và trung hòa chất thải axit, đặc biệt là khí thải của các nhà máy đốt nhiên liệu hoá thạch. Do đó, sử dụng bùn đỏ để lưu giữ và xử lý khí thải không chỉ góp phần giảm phát thải mà còn tạo giải pháp quản lý chất thải bền vững, hướng đến mục tiêu kép về môi trường. Bài báo này tổng hợp các nghiên cứu và thực tiễn trên thế giới về ứng dụng bùn đỏ trong lưu trữ khí thải, từ đó đưa ra định hướng công nghệ xử lý đồng thời bùn đỏ và khí thải phát sinh trong quá trình sản xuất nhôm tại Việt Nam, góp phần nâng cao hiệu quả môi trường và phát triển bền vững ngành công nghiệp bauxit của Việt Nam.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

**Tác giả liên hệ*

E - mail: phamvanluan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).03

1. Mở đầu

Bùn đỏ là chất thải rắn phát sinh trong quá trình sản xuất nhôm theo quy trình Bayer. Lượng bùn đỏ sinh ra từ quy trình Bayer trên toàn thế giới gần 170 triệu tấn mỗi năm khiến nó trở thành một trong những loại chất thải rắn lớn nhất hiện nay. Bùn đỏ được lưu trữ ngoài trời tại các hồ thải hoặc bãi thải, không chỉ chiếm dụng diện tích đất mà còn gây thẩm nhiễm các thành phần độc hại vào đất và nước ngầm, đe dọa đến môi trường sinh thái và sức khỏe con người.

Bùn đỏ chứa nhiều thành phần hữu ích như Fe, Al, Si, Ti, Ca và Na, chúng có thể được tận dụng để sản xuất vật liệu xây dựng như gạch, thủy tinh, xi măng, gốm sứ và bê tông. Ngoài ra, bùn đỏ còn là nguồn cung cấp các kim loại có giá trị như Fe, Al, Ti, Ga và Sc (Lê, V. H và nnk., 2024). Do đó, nhiều nghiên cứu cho rằng tái sử dụng bùn đỏ để sản xuất vật liệu xây dựng là hướng khả thi và triển vọng nhất. Hiện tại, tỷ lệ tái sử dụng bùn đỏ chỉ đạt khoảng 5%, trong đó yếu tố hạn chế chính cho việc tái sử dụng là tính kiềm mạnh của bùn đỏ. Khi các thành phần kiềm được loại bỏ, việc tái sử dụng và tái chế bùn đỏ sẽ trở nên khả thi hơn. Do đó, việc khử kiềm có ý nghĩa rất lớn đối với việc sử dụng toàn diện bùn đỏ. Các phương pháp khử kiềm truyền thống cho bùn đỏ bao gồm: rửa bằng nước, cacbonat hóa, vôi hóa, vôi hóa kết hợp cacbonat hóa, trung hòa bằng axit, trung hòa bằng nước biển và sinh học, trong đó phương pháp khử kiềm bằng khí axit (CO_2 , SO_2 ,...) được tập trung phân tích trong nghiên cứu này.

Phát sinh đồng thời chất thải rắn và khí thải là hai vấn đề môi trường lớn mà ngành công nghiệp nhôm đang đối mặt. Quá trình sản xuất nhôm từ quặng chiếm đến 90% lượng phát thải CO_2 trong chuỗi sản xuất nhôm. Theo Sripriya và nnk. (2023) thì năng lượng cần thiết cho quá trình phân hủy bauxite gibbsit ở nhiệt độ thấp là $7,5 \pm 12$ GJ/t và ở nhiệt độ cao là 11,18 GJ/t. Phần lớn năng lượng này được cung cấp bởi các nhà máy nhiệt điện than. Nhìn chung, để sản xuất 1 tấn nhôm kim loại cần phải đốt 8÷12 tấn than và phát sinh 3÷4 tấn bùn đỏ và 2÷5 tấn tro bay,... (Sripriya và nnk., 2023). Khí thải phát sinh từ quá trình đốt than chứa một lượng lớn CO_2 , SO_2 , NO_x , CO, bụi mịn,... và có tính axit. Trong khi đó, bùn đỏ có tính kiềm mạnh, là vật liệu tiềm năng để hấp phụ và trung hòa các khí thải axit, chẳng hạn như khí thải

của các nhà máy đốt nhiên liệu hoá thạch. Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chứng minh khả năng cacbonat hóa, sulfat hóa và nitrat hóa của bùn đỏ (Tao và nnk., 2019; Bonenfant và nnk., 2008; Valluri và nnk. 2021). Các phản ứng này vừa trung hòa độ kiềm vừa cố định các khí axit do đó góp phần giảm phát thải khí nhà kính và xử lý chất thải rắn. Theo Fang và nnk. (2024), các phản ứng này làm giảm pH dung dịch bùn đỏ từ 12÷13 xuống khoảng 9÷10, đồng thời hình thành muối bền như canxi cacbonat, canxi sunfat và canxi nitrat - là những sản phẩm có thể tái sử dụng trong sản xuất vật liệu xây dựng.

Như vậy, việc sử dụng khí thải của các nhà máy đốt nhiên liệu hoá thạch để khử kiềm bùn đỏ mang lại hai lợi ích: giảm phát thải khí thải và khử kiềm cho bùn đỏ. Quá trình trộn khí thải với bùn đỏ sẽ lưu giữ một lượng khí thải đồng thời làm giảm độ kiềm của bùn đỏ, tạo điều kiện thuận lợi cho việc tái sử dụng bùn đỏ cho các mục đích khác.

2. Cơ sở lý thuyết

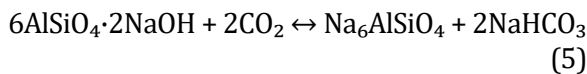
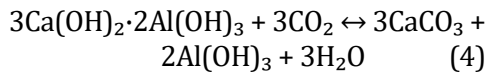
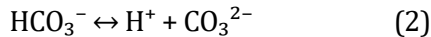
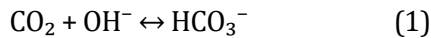
2.1. Cơ chế hấp phụ khí CO_2 của bùn đỏ

Để lưu trữ CO_2 , đã có nhiều kỹ thuật được phát triển nhằm thu giữ và cố định CO_2 . Các phương pháp như cố định địa chất, thải vào đại dương và cố định sinh học đã được nghiên cứu rộng rãi. Quá trình cacbonat hóa khoáng vật (mineral carbonation) là một trong những phương pháp hứa hẹn nhất với các thí nghiệm và ứng dụng ngày càng tăng trong việc cố định CO_2 trong bazan hoặc các vật liệu phế thải.

Cacbonat hóa khoáng vật là phản ứng của CO_2 với các khoáng vật không phải cacbonat hoặc chất thải để tạo thành các dạng cacbonat ổn định về mặt địa chất và nhiệt động học. Ngày nay, các vật liệu thường phổ biến để lưu trữ CO_2 bao gồm đất đai, xỉ thép, tro bay, dung dịch amine, zeolite, màng lọc đa lỗ, serpentinit, olivin, vật liệu xi măng,... và bùn đỏ. Bùn đỏ có thể được dùng làm vật liệu thu giữ và lưu trữ CO_2 phát thải từ các nhà máy nhiệt điện, nhà máy xi măng, xưởng luyện kim và các nhà máy gia công kim loại. Bùn đỏ sau khi trung hòa có thể dùng làm vật liệu xây dựng như gạch, gốm sứ, men, chất tạo màu, sơn, ngói, phụ gia xi măng và gạch lát. Trong một số trường hợp, dùng làm chất cải tạo đất và phân bón. Ngoài ra, còn thể sử dụng trong vật liệu cao cấp hơn như tấm composite bùn đỏ, polymer thay thế gỗ,

geopolymer, xi măng giàu sắt, vật liệu cản tia X. Nó cũng có thể được dùng làm nền đường hoặc trong xử lý nước thải để hấp phụ ion kim loại nặng như chì, crôm, arsenic, florua, cadmium, kẽm. Việc thu hồi kim loại như V, Cr, Ti và các nguyên tố đất hiếm cũng là một hình thức tái chế có thể thực hiện với một số loại bùn đỏ sau trung hoà.

Phản ứng trung hòa dung dịch bùn đỏ diễn ra theo các phản ứng cacbonat hóa của CO₂ theo các phương trình từ (1) đến (5): (Fang và nnk., 2024; Guilfoyle và nnk., 2005; Venancio và nnk., 2013; Braga và nnk., 2018). Axit cacbonic hình thành trong dung dịch chứa CO₂ sẽ trung hòa các bazơ và kết tủa dưới dạng cacbonat natri, canxi và magie. Quá trình cacbonat hóa trong môi trường nước thì sự hydrat hoá không thể đảo ngược của oxit canxi xảy ra trước quá trình hòa tan đồng thời của Ca(OH)₂ với sự phân ly của CO₂ trong dung dịch và đây là bước chuẩn bị cho phản ứng cacbonat hóa. Khi các ion Ca²⁺ được chuyển hóa thành CaCO₃ và kết tủa thì nhiều Ca(OH)₂ hơn sẽ hòa tan để cân bằng nồng độ Ca²⁺.



Quá trình cacbonat hóa trong nước của các hợp chất silicat chứa Ca và Na, bước đầu tiên là CO₂ hòa tan trong pha nước tạo ra các ion H⁺. Trong môi trường axit yếu các ion Ca²⁺, Mg²⁺ và Na⁺ được tách ra khỏi mạch silicat và hệ thống tiến tới quá trình kết tủa cacbonat. Tốc độ và mức độ tách các cation được phát hiện có mối quan hệ tỷ lệ nghịch với kích thước hạt và pH, nhưng tăng khi nhiệt độ, áp suất và diện tích bề mặt riêng tăng. Mức độ và tốc độ cacbonat hóa phụ thuộc vào khả năng khuếch tán và tính phản ứng của CO₂ được kiểm soát bởi độ xốp và các điều kiện vật lý như nhiệt độ, áp suất và độ ẩm tương đối.

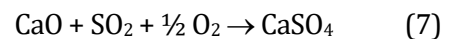
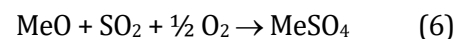
Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra những yếu tố chính ảnh hưởng đến tốc độ và mức độ cacbonat hóa bao gồm: cơ chế kiểm soát vận chuyển như sự

khuếch tán của CO₂ và các ion Ca²⁺ đến và ra khỏi các vị trí phản ứng, hiệu ứng lớp biên (khuếch tán qua lớp kết tủa trên bề mặt hạt), sự hòa tan Ca(OH)₂ trên bề mặt hạt và độ rỗng. Các sản phẩm chính của quá trình cacbonat hóa cường bức trong bùn là: Na₂CO₃ và NaHCO₃. Na₂CO₃ bị hòa tan nên cung cấp khả năng lưu trữ CO₂ kém bền vững hơn so với các cacbonat rắn của Ca và Mg. Khi NaOH hòa tan tích tụ trên bề mặt của hồ thải bùn đỏ, cacbonat natri được ưu tiên kết tủa thông qua quá trình làm khô nhưng việc tái hydrat hoá sẽ làm tan pha rắn này.

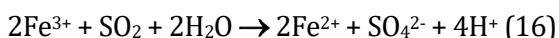
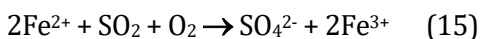
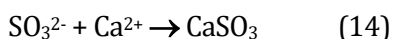
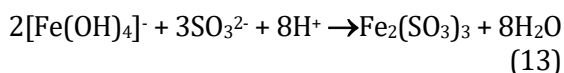
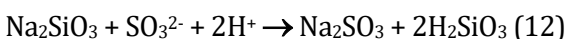
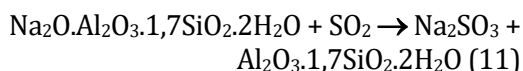
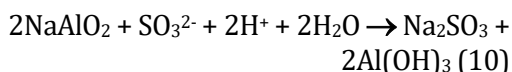
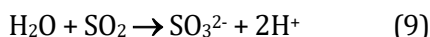
2.2. Cơ chế hấp phụ khí SO₂ của bùn đỏ

Hiện nay, theo môi trường phản ứng có 02 phương pháp hấp phụ khí SO₂ bằng bùn đỏ là phương pháp khô và ướt. Nguyên lý chung của phương pháp khô là sử dụng các oxit kim loại để phản ứng với SO₂ như phương trình (6). Trong phương pháp khô bùn đỏ được sử dụng để hấp phụ SO₂ nồng độ thấp trong buồng khí hoá, hiệu quả của quá trình phụ thuộc và khả năng hấp phụ SO₂ của Fe₂O₃ trong bùn đỏ. Ngoài ra, các thành phần khác của bùn đỏ trong buồng khí hoá cũng có khả năng hấp phụ khí SO₂ theo các phương trình (7) và (8) (Venancio và nnk., 2011; Tao và nnk., 2019; Liu và nnk., 2023). Do đó, bùn đỏ có khả năng thay thế chất hấp phụ truyền thống như đá vôi trong quá trình khử lưu huỳnh tại chỗ trong buồng khí hóa. Có thể thấy rằng trong quá trình khử lưu huỳnh bằng phương pháp khô thì việc sử dụng bùn đỏ chủ yếu dựa vào các oxit kim loại trong bùn đỏ để loại bỏ SO₂. Phương pháp này tận dụng sự đa dạng của các oxit kim loại trong bùn đỏ và tránh được các vấn đề như tắc và ăn mòn so với phương pháp ướt. Tuy nhiên, kích thước mịn của bùn đỏ là một khó khăn và trở ngại đối với quá trình khử lưu huỳnh khô.

Ngoài ra, sử dụng bùn đỏ để hấp phụ SO₂ bằng phương pháp khô có hiệu suất thấp hơn và khó thực hiện trong thực tế do phải làm khô bùn đỏ.



Trong phương pháp ướt, bùn đỏ vẫn đang ở dạng bùn được sử dụng để hấp phụ SO_2 . Theo nhiều nghiên cứu bùn đỏ phản ứng với SO_2 chủ yếu thông qua các phương trình (9) đến (14). Những phản ứng hóa học này không chỉ loại bỏ SO_2 trong khí thải mà còn loại bỏ thành phần kiềm dư trong bùn đỏ. Ngoài ra, khi bùn đỏ hấp phụ SO_2 , phản ứng oxi hóa xúc tác sẽ xảy ra theo phương trình (15) và (16) (Liu và nnk., 2023). Hai phản ứng này tạo ra sự có mặt của ion $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ trong bùn đỏ làm tăng hiệu quả hấp phụ SO_2 của bùn đỏ. Nhiều nhà nghiên cứu cho rằng bùn đỏ là một chất thay thế hiệu quả cho các chất hấp phụ trong phương pháp khử lưu huỳnh ướt. Cơ chế hấp phụ chủ yếu được chia thành ba bước: (1) SO_2 trong pha khí được hấp phụ bởi nước trong bùn đỏ; (2) phản ứng trung hòa, phản ứng oxi hóa và oxi hóa xúc tác xảy ra giữa ion H^+ với kiềm và muối kim loại trong bùn đỏ và (3) các chất phản ứng ban đầu trong pha lỏng di chuyển đến giao diện giữa pha khí và pha lỏng, nơi chúng có thể phản ứng với các chất khí, còn các sản phẩm của phản ứng đi vào pha lỏng và phân tán đều trong pha lỏng.

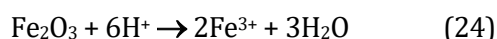
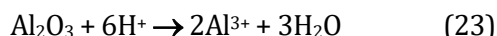
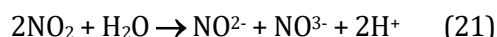
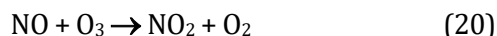
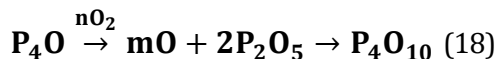


2.3. Cơ chế hấp phụ khí NO_x của bùn đỏ

Bùn đỏ được sử dụng để hấp phụ NO_x thông qua hai phương pháp là khử và oxy hóa. Theo phương pháp khử, bùn đỏ được sử dụng làm chất xúc tác để loại bỏ NO bằng quá trình khử xúc tác chọn lọc. Do bùn đỏ có đặc điểm như chi phí thấp, khả năng chống thiêu kết, chống độc, diện tích bề mặt riêng cao và hàm lượng oxit sắt cao. Ngoài ra, hỗn hợp $\text{V}_2\text{O}_5 / \text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ trong bùn đỏ là xúc tác kiểm soát tốt khí thải NO. Vì vậy, nhiều nghiên cứu cho rằng bùn đỏ có hàm lượng sắt cao có thể thay

thế tốt cho các chất xúc tác thương mại đang sử dụng để kiểm soát khí thải NO. Tuy nhiên, để sử dụng được bùn đỏ làm chất xúc tác cho quá trình khử NO, bùn đỏ phải được tiền xử lý để loại bỏ kiềm và làm khô bùn đỏ. Do đó, phương pháp này không kinh tế khi áp dụng tại các nhà máy sản xuất nhôm bằng quá trình Bayer.

Do khí NO_x có hại chứa đến 90% NO và NO không tan trong nước. Vì vậy, thực chất của phương pháp oxy hóa là quá trình chuyển khí NO thành các oxit nitơ có hoá trị cao hơn, còn bùn đỏ lại có khả năng hấp phụ khí NO_2 . Vì vậy, bùn đỏ có thể được sử dụng làm chất hấp phụ cho quá trình oxy hóa NO_x . Trong quá trình này, đầu tiên sử dụng phốt pho vàng để kích thích ozone oxy hóa NO, chuyển NO thành NO_x hóa trị cao, sau đó sử dụng tính kiềm của bùn đỏ để trung hòa và hấp phụ NO_x , cuối cùng NO_x được chuyển thành HNO_3 . Các phản ứng này được trình bày từ phương trình (17) đến (24) (Bin và nnk., 2020; 2021; Liu và nnk., 2023).



Có thể thấy rằng trong quá trình oxy hóa và hấp phụ NO_x , bùn đỏ đóng vai trò là chất hấp phụ, chủ yếu sử dụng tính kiềm của bùn đỏ để hấp phụ NO_x hóa trị cao đã được oxy hóa, nhằm đạt được mục đích loại bỏ NO_x . Sự khác biệt giữa phương pháp oxy hóa và phương pháp khử NO_x là quá trình khử NO_x chuyển NO_x thành N_2 vô hại. Còn phương pháp oxy hóa thì oxy hóa NO_x thành NO_3 , các ion kim loại trong bùn đỏ sẽ phản ứng, dẫn đến pha lỏng sau khi hấp phụ NO_x chứa NaNO_3 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ và các nitrat khác, có thể được tái chế làm sản phẩm thương mại. So với việc khử NO_x , quá trình hấp phụ oxy hóa NO_x có chi phí kinh tế hơn.

3. Các nghiên cứu điển hình

3.1. Sử dụng bùn đỏ để lưu trữ khí CO₂

Nhiều nghiên cứu cho thấy bùn đỏ có khả năng cố định CO₂ thông qua quá trình cacbonat hóa trực tiếp trong đó CO₂ phản ứng với các oxit kiềm trong bùn đỏ để tạo thành muối cacbonat (CaCO₃, Na₂CO₃). Đây là hướng xử lý khí nhà kính có ý nghĩa kép: giảm độ kiềm bùn đỏ và hấp thụ CO₂ từ khí thải. Hiệu quả cố định CO₂ phụ thuộc vào nồng độ khí, nhiệt độ, độ ẩm và tỷ lệ rắn/lỏng. Các nghiên cứu tiêu biểu được tóm tắt ở Bảng 1. Từ số liệu Bảng 1 nhận thấy: bùn đỏ hấp phụ CO₂ hiệu quả nhất trong môi trường ướt pH 10÷12, tỷ lệ lỏng/rắn 5÷10. Quá trình ướt cho hiệu quả hấp phụ cao hơn 3÷4 lần so với khô. Kết quả trung bình: 5÷20 gCO₂/kg bùn đỏ (tương đương 50÷200 kg/tấn bùn đỏ). Các khoáng phản ứng chủ yếu là CaO và Na₂O, hình thành CaCO₃, Na₂CO₃ và hydrotalcite. Sản phẩm ổn định, dễ tách, không gây ô nhiễm thứ cấp.

3.2. Sử dụng bùn đỏ để lưu trữ khí SO₂

Các nghiên cứu về lưu trữ SO₂ từ khí thải bằng bùn đỏ đều cho thấy hiệu suất khử SO₂ đạt trên 93%, hàm lượng Na₂O trong bùn đỏ có thể giảm xuống dưới 1%. Các thông số quan trọng nhất để tăng hiệu quả khử SO₂ bằng bùn đỏ là: thời gian phản ứng; nồng độ SO₂ và nồng độ pha rắn của bùn đỏ (Tao và nnk., 2019). Năm 1977, Sumitomo

(Nhật Bản) đã xây dựng hệ thống có khả năng khử đến 96% SO₂ trong khí thải bằng bùn đỏ. Hệ thống này đã được sử dụng trong một thời gian dài tại nhà máy alumin Eurallumina ở Sardinia (Italia). Tương tự, nhà máy luyện nhôm ở Surinam thuộc Alcoa (Úc) đang sử dụng khí axit sunfuric/lưu huỳnh từ khí thải của lò hơi để trung hoà bùn đỏ (Raahauge và Williams, 2022). Các nghiên cứu xử lý SO₂ bằng bùn đỏ cho ở Bảng 2.

Các kết quả tổng hợp cho thấy bùn đỏ có khả năng hấp phụ SO₂ rất cao đặc biệt trong điều kiện ướt. Hiệu suất loại bỏ thường đạt 90÷98% nhờ phản ứng trung hòa giữa SO₂ và các thành phần kiềm (CaO, Na₂O) trong bùn đỏ, hình thành CaSO₃ và CaSO₄·2H₂O (Wang và nnk., 2018; Liu và nnk., 2022a). Phản ứng không chỉ loại bỏ SO₂ mà còn giảm đáng kể độ kiềm của bùn đỏ - điều này rất có lợi khi tái sử dụng bùn đỏ trong các ứng dụng khác. So với phương pháp dùng đá vôi truyền thống trong khử lưu huỳnh (FGD) thì việc dùng bùn đỏ mang lại hiệu quả tương đương nhưng chi phí thấp hơn do tận dụng được chất thải sẵn có tại nhà máy alumin (Chen và nnk., 2023). Ngoài ra, sản phẩm phụ thạch cao tổng hợp (CaSO₄·2H₂O) có thể sử dụng trong vật liệu xây dựng góp phần hướng tới chu trình xử lý - tái chế tuần hoàn.

Tuy nhiên, một số hạn chế vẫn tồn tại: hiệu suất giảm khi nồng độ CO₂ cao hoặc độ ẩm thấp do hình thành lớp CaCO₃ phủ bề mặt ngăn cản tiếp xúc giữa SO₂ và bùn đỏ (Liu và nnk., 2022a).

Bảng 1. Tổng hợp các nghiên cứu về hấp phụ và cố định CO₂ bằng bùn đỏ.

Tham khảo	Hướng tiếp cận	Nguồn CO ₂	Điều kiện thí nghiệm	Hiệu quả chính	Ý nghĩa công nghiệp
Guilfoyle và nnk. (2005)	Carbonat hoá trực tiếp	Khí thải (9% CO ₂)	bán công nghiệp; 35°C; pH 11	pH 10,5→9; giảm ~4% CO ₂ tổng	Ứng dụng công nghiệp khả thi
Yadav và nnk (2010), Sahu và nnk. (2010)	Carbonat hoá trực tiếp	CO ₂ tinh khiết	3,5 bar; 0,5÷12 h	53 kg/t bùn đỏ	Hình thành CaCO ₃ , cancrinit ổn định
Bonenfant và nnk. (2008)	Carbonat hoá khô và ướt	CO ₂ tinh khiết	6 bar, 1 h	20,09 g/kg	Phương pháp ướt hiệu quả hơn
Venancio và nnk. (2013)	Khí thải bán công nghiệp	Lò đốt dầu nhiên liệu	27% rắn; tháp phun	33÷102 kg/t; pH cuối 10,4	Hấp thụ đồng thời SO ₂ (~94%)
Fang và nnk. (2024)	Khử kiềm	Khí thải	35°C; L/R = 10; 30 phút	Na ₂ O giảm từ 3,2 xuống 2,20%	Ứng dụng công nghiệp nhanh
Niu và nnk. (2021)	Phụ gia vật liệu	—	500÷850°C	3,2 mmol CO ₂ /g	Kết hợp xử lý với than hoạt tính

Bảng 2. Tổng hợp các nghiên cứu xử lý SO_2 bằng bùn đỏ.

Tham khảo	Phương pháp/Nguồn SO_2	Điều kiện thí nghiệm chính	Hiệu quả khử SO_2 (%)	Đặc điểm/Nhận xét chính
Raahauge và Williams (2022)	Hệ thống khử khí thải (FGD)	Ứng dụng tại nhà máy Eurallumina (Italia)	96%	Hệ thống hoạt động ổn định lâu dài; chứng minh khả năng ứng dụng công nghiệp.
Raahauge và Williams (2022)	Trung hòa bùn đỏ bằng khí axit (SO_2/SO_3)	Sử dụng khí thải từ lò hơi chứa SO_2/SO_3	-	Quá trình trung hòa giúp giảm kiềm trong bùn đỏ, phù hợp cho xử lý liên tục.
Tao và nnk. (2019)	Hấp phụ ướt - bùn đỏ Bayer (Vân Nam, Trung Quốc)	pH = 12,3; L/R = 20:1; $[SO_2] = 1000 \text{ mg/m}^3$; T = 25°C; lưu lượng khí = 1,5 L/phút	98,61%	L/R là yếu tố quan trọng nhất; O_2 tăng 0÷7% giúp tăng hiệu quả; giảm $Na_2O < 1\%$.
Venancio và nnk. (2011)	Hấp phụ ướt - bùn đỏ ALUNORTE	Vận tốc khí = 10,9 m/s; $[SO_2]_{in} = 5694,63 \text{ mg/m}^3$; $[SO_2]_{out} = 231 \text{ mg/m}^3$; pha rắn 20%	95,94%	Hiệu suất giảm khi pH < 9; nếu duy trì pH > 9 thì hiệu suất >95%; phù hợp cho vận hành liên tục.
Tao và nnk. (2019)	Ướt (FGD) - 0,3% SO_2	25÷40°C	97%	Sản phẩm phụ: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; phản ứng ổn định.
Wang và nnk. (2018)	Khô tuần hoàn	0,2% SO_2 ; 300°C	90% sau 3 h	Phù hợp quy mô nhỏ; tái sử dụng vật liệu hấp phụ.
Liu và nnk. (2023)	Ướt tuần hoàn	0,4% SO_2 ; pH = 11	98%	Giảm Na_2O trong bùn đỏ từ 2,2÷1,4%.
Liu và nnk. (2022a)	Khô - bùn đỏ hoạt hóa	250°C	75%	Bề mặt CaO và Fe_2O_3 đóng vai trò hấp phụ chính.
Liu và nnk. (2022b)	Bùn đỏ + NaAscorbate	0,4% SO_2 ; pH = 10	94%	NaAscorbate giúp tăng hiệu suất và hạn chế bít bề mặt.

Để khắc phục, các nghiên cứu gần đây khuyến nghị kết hợp chất oxy hóa (O_3 , Na-ascorbate) hoặc tăng tuần hoàn dung dịch bùn đỏ nhằm duy trì pH tối ưu (9÷10) và tránh hiện tượng bít mao quản.

Tổng thể, công nghệ khử SO_2 bằng bùn đỏ dạng huyền phù là phương án khả thi ở quy mô công nghiệp, vừa xử lý khí thải, vừa giảm độc tính của bùn đỏ.

3.3. Sử dụng bùn đỏ để lưu trữ đồng thời khí SO_2 và NO_x

Phương pháp phổ biến hiện nay để khử đồng thời khí SO_2 và NO_x bằng bùn đỏ là thêm chất oxy hóa (O_3) bằng cách sử dụng nhũ tương phốt pho

vàng như trong các phản ứng (17) đến (20). Việc sử dụng phốt pho vàng để sản xuất ozone oxy hóa đã tránh được vấn đề chi phí cao trong việc sản xuất ozone. Kết quả cho thấy ở điều kiện tối ưu hiệu quả loại bỏ NO_x và SO_2 lần lượt là 97,9% và 100% dưới các điều kiện tối ưu như sau: hàm lượng oxy 10%; tốc độ khuấy 1.600 v/ph; lưu lượng khí thải 400 ml/phút; nồng độ phốt pho vàng 12,5 g/l; nhiệt độ phản ứng 50°C; nồng độ pha rắn của bùn đỏ 30 g/l; Nồng độ NO đầu vào 300 ppm và nồng độ SO_2 đầu vào 1.000 ppm (Liu và nnk., 2022a).

Vì vai trò của bùn đỏ trong khử lưu huỳnh và khử nitơ trong quá trình ướt gần như giống nhau,

việc kết hợp oxi hóa và hấp phụ NO bằng bùn đỏ với khử lưu huỳnh ướt bằng bùn đỏ sẽ mang lại hiệu quả kinh tế. Hai phương pháp này phù hợp hơn khi sử dụng cùng nhau, và các sản phẩm là nitrat pha lỏng và canxi sulfat dihydrate pha rắn, dễ tách và tinh chế thành các sản phẩm thương mại. Ngoài ra, khi bùn đỏ hấp phụ NO_x và SO_2 trong khí thải một số ion kim loại trong bùn đỏ cũng có thể hòa tan, nên có thể tận dụng quá trình này để tái chế bùn đỏ. Tổng hợp các nghiên cứu về xử lý NO_x và đồng thời với SO_2 cho ở Bảng 3.

Hiệu quả xử lý NO_x bằng bùn đỏ nhìn chung thấp hơn SO_2 , do NO có độ tan kém và hoạt tính hóa học thấp. Tuy nhiên, khi kết hợp các tác nhân oxi hóa (O_3 , H_2O_2 , Na-ascorbate) hoặc plasma

năng lượng thấp, hiệu suất khử NO_x có thể đạt 80÷90% trong điều kiện ướt (Bin và nnk., 2020; Liu và nnk., 2022b). Các oxit Fe_2O_3 , TiO_2 và CaO trong bùn đỏ đóng vai trò xúc tác oxi hóa NO thành NO_2 , sau đó NO_2 hòa tan trong dung dịch tạo HNO_2 và HNO_3 , phản ứng với Ca^{2+} và Na^+ để tạo muối nitrat (Liu và nnk., 2023). Khi tồn tại đồng thời SO_2 và NO_x , hiệu suất hấp phụ được cải thiện nhờ tương tác hóa học thuận lợi: SO_2 làm giảm pH dung dịch, thúc đẩy sự hòa tan và phản ứng của NO_2 . Ngoài ra, quá trình plasma khô (Liu và nnk., 2022b) cho thấy bùn đỏ có thể đóng vai trò vật liệu hấp phụ xúc tác, giúp giảm năng lượng tiêu thụ và

Bảng 3. Tổng hợp các nghiên cứu xử lý NO_x bằng bùn đỏ.

Tham khảo	Phương pháp/Hướng tiếp cận	Nguồn hoặc nồng độ NO_x (và SO_2 nếu có)	Điều kiện thí nghiệm	Hiệu quả khử NO_x / SO_2 (%)	Ghi chú/Ý nghĩa công nghiệp
Bin và nnk. (2020; 2021)	Hấp phụ ướt đơn bằng bùn đỏ	0,03% NO_x	25°C	70÷80%	Hình thành $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; thích hợp cho quy mô nhỏ.
Bin và nnk. (2020)	Hấp phụ ướt đồng thời với Na-ascorbate	400 ppm NO + 500 ppm SO_2	50°C; 4% NaAsc	NO_x 88%; SO_2 95%	Hiệu quả cao, quy trình đơn giản.
Chen và nnk. (2021)	Hấp phụ xúc tác khô bằng bùn đỏ hoạt hóa	10% CO_2 + 500 ppm SO_2 + 300 ppm NO	200°C; bùn đỏ hoạt hóa ở 400°C	CO_2 25%; SO_2 85%; NO_x 65%	Khả thi công nghiệp, vật liệu có thể tái sinh.
Niu và nnk. (2021)	Oxi hóa ướt bằng bùn đỏ + O_3	0,1% SO_2 + 0,05% NO	40°C; O_3 30 mg/L	NO_x 87%; SO_2 98%	O_3 xúc tác $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$, tăng hiệu quả hấp phụ.
Liu và nnk. (2023)	Ướt (bùn đỏ + O_3)	200 ppm NO + SO_2	Nhiệt độ phòng (RT)	NO_x 85%; SO_2 99%	Xảy ra đồng hấp phụ; hiệu quả cao với O_3 .
Chen và nnk. (2021)	Bùn đỏ hoạt hóa (khô)	10% CO_2 + 500 ppm SO_2 + 300 ppm NO	200°C	NO_x 65%; SO_2 85%	Đồng khử ba khí, bùn đỏ có thể tái sử dụng.
Bin và nnk. (2021)	Hấp phụ ướt đồng thời (SO_2 - NO)	Khí mô phỏng SO_2 - NO	25÷50°C; pH 9÷11	NO_x 80÷90%; SO_2 90%	Hiệu quả cao, phù hợp cho xử lý đồng thời khí thải.
Liu và nnk. (2022b)	Plasma hỗ trợ bùn đỏ (khô)	Khí thải biodiesel, 300 ppm NO_x	200÷400°C; plasma HFAC 30 W	NO_x 70%; SO_2 85÷90%	Giảm năng lượng ~30%; phù hợp khí thải động cơ.
Liu và nnk. (2022a)	Bùn đỏ tuần hoàn	100 ppm NO_x	pH 9÷10	80%	Đồng xử lý SO_2 - NO_x hiệu quả; ổn định theo chu kỳ.

tăng độ ổn định của plasma. Tuy nhiên, phương pháp này yêu cầu kiểm soát nhiệt độ nghiêm ngặt ($200\div 400^{\circ}\text{C}$) để tránh thiêu kết bề mặt vật liệu.

Nhìn chung, việc sử dụng bùn đỏ cho xử lý NO_x đạt hiệu quả cao nhất khi phối hợp đồng thời với SO_2 và CO_2 , tạo môi trường hóa học cân bằng và tái sinh sản phẩm trung hòa. Điều này khẳng định tiềm năng của bùn đỏ như vật liệu đa chức năng, có thể xử lý đồng thời nhiều khí ô nhiễm trong cùng hệ thống.

Các công nghệ khử lưu huỳnh và khử nitơ thông dụng được so sánh với công nghệ ứng dụng bùn đỏ. Kết quả so sánh được trình bày trong Bảng

4 (Liu và nnk., 2023). Có thể thấy rằng bùn đỏ có hiệu suất loại bỏ cao khi được áp dụng cho khử lưu huỳnh và khử nitơ.

4. Thực tế xử lý bùn đỏ và khí thải tại các nhà máy Alumin Việt Nam

4.1. Hiện trạng bùn đỏ và khí thải tại các nhà máy alumin

Hiện nay tại Việt Nam có hai cơ sở sản xuất alumin thuộc Tập đoàn TKV là công ty Nhôm Đắk Nông và Lâm Đồng, hàng năm thải ra khoảng $1,2\div 1,3$ triệu tấn bùn đỏ.

Bảng 4. So sánh hiệu quả khử lưu huỳnh và khử nitơ bằng các tác nhân khác nhau.

Kỹ thuật	Tác nhân	Khí cần loại bỏ	Hiệu suất (%)	Sản phẩm phụ	Ưu điểm	Nhược điểm
Khử lưu huỳnh khô	Đá vôi	SO_2	85	CaSO_4 , CaSO_3	Không có nước thải, tiêu thụ năng lượng thấp	Hiệu quả kém
	Bùn đỏ, CuO	SO_2	80	Na_2SO_3 , CaSO_4 , CuSO_3	Không có nước thải, tiêu thụ năng lượng thấp, giá rẻ	Hiệu quả kém
Khử lưu huỳnh ướt	Đá vôi	SO_2	> 95	Thạch cao	Phản ứng nhanh, hiệu quả cao	Xử lý nước thải có tính ăn mòn
	Bùn đỏ	SO_2	> 95	CaSO_4 , FeSO_4	Phản ứng nhanh, hiệu quả cao, nhiều sản phẩm phụ	Xử lý nước thải có tính ăn mòn
Khử nitơ khô	NH_3	NO_x	90	-	Hiệu quả cao	Đầu tư lớn
	NH_3 , Bùn đỏ	NO_x	90	-	Hiệu quả cao	Cần tiền xử lý bùn đỏ
Khử nitơ ướt	O_3 , NaOH	NO_x	98	NaNO_2	Vận hành đơn giản, hiệu quả cao	Đắt tiền
	P_4 , Bùn đỏ	NO_x	98	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	Hiệu quả cao	Cần chất oxy hóa
Khử lưu huỳnh và nitơ khô	NH_3 , Than hoạt tính	SO_2 , NO_x	$\text{SO}_2: 90$; $\text{NO}_x: 80$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Hiệu quả cao, thiết bị nhỏ, than hoạt tính có thể tái chế	Hơn 300°C có thể tự cháy
	NH_3 , Than hoạt tính, Bùn đỏ	SO_2 , NO_x	$\text{SO}_2: 98$; $\text{NO}_x: 85$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Hiệu quả cao hơn khi sử dụng bùn đỏ	CaO/Na trong bùn đỏ có thể độc
Khử lưu huỳnh và khử nitơ ướt	O_3 , NaOH	SO_2 , NO_x	$\text{SO}_2: 100$; $\text{NO}_x: 94$	Na_2SO_4 , NaNO_2	Phản ứng nhanh, hiệu quả cao	Đắt tiền, sản phẩm phụ khó tách
	P_4/O_3 , Bùn đỏ	SO_2 , NO_x	$\text{SO}_2: 100$; $\text{NO}_x: 99$	CaSO_4 , $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	Phản ứng nhanh, hiệu quả cao	Cần chất oxy hóa

Bùn đỏ tại các nhà máy có pH = 10÷12,2 và được các công ty lưu trữ tại hồ theo phương pháp thải ướt. Theo quy hoạch hiện nay về khai thác bauxit tại Tây Nguyên, nếu tính đến năm 2025 thì lượng bùn đỏ thải ra sẽ đạt 23 triệu tấn, sau 10 năm sẽ là 230 triệu tấn và sau 50 năm sẽ là 1,15 tỷ tấn. Đồng thời, theo số liệu của công ty Nhôm Đắk Nông - TKV để sản xuất tấn alumin cần 0,44 tấn than (trong đó 0,31 tấn cho nhiệt điện và 0,13 tấn cho khí hoá than). Như vậy, để sản xuất khoảng 700.000 tấn alumin thì công ty cần phải đốt khoảng 310.000 tấn than. Theo số liệu quan trắc tại ống khói nhà máy nhiệt điện của công ty Nhôm Đắk Nông vào tháng 5 năm 2021: lưu lượng khí thải vào khoảng 513.000 m³/h; hàm lượng CO, NO_x, SO₂ và bụi trong khí thải lần lượt là 5,32; 20,6; 391 và 64 mg/m³; còn lại chủ yếu là khí CO₂. Tương tự, ống khói tại lò nhiệt phân của công ty quan trắc tháng 11/2023 có lưu lượng vào khoảng 228.000 m³/h; hàm lượng CO, NO_x, SO₂ và bụi trong khí thải lần lượt là 21,47; 0,19; 69,86 và 59 mg/m³; còn lại chủ yếu là khí CO₂.

4.2. Ước tính lượng bùn đỏ để lưu trữ khí thải nhà máy nhiệt điện của Công ty Nhôm Đắk Nông bằng

Theo số liệu thực nghiệm bằng khí thải thật của Guilfoyle và nnk. (2005) và Venancio (2013) thì trong 1 m³ khí thải chứa khoảng 8÷10% khí CO₂. Vì không có số liệu quan trắc khí CO₂ nên trong tính toán này chọn hàm lượng CO₂ trong khí thải nhà máy nhiệt điện 9% (tương ứng 90 g/m³). Dựa trên số liệu thực nghiệm (Liu và nnk., 2022a;

Bin và nnk., 2020; Fang, 2024) thì 1 kg bùn đỏ có thể hấp phụ 15 g CO₂; 200 g SO₂ và 80 g NO_x bằng phương pháp ướt. Đồng thời, giả thiết nhà máy làm việc 300 ngày/năm (tương ứng 7.200 h). Khi đó sẽ xác định được lượng bùn đỏ cần thiết để hấp phụ hết các khí CO₂, SO₂ và NO_x từ khí thải nhà máy nhiệt điện. Kết quả tính toán cho ở Bảng 5.

Như vậy, lượng bùn đỏ phát sinh mỗi năm (1,2÷1,3 triệu tấn) có thể hấp phụ toàn bộ SO₂ và NO_x trong khí thải, đồng thời cố định khoảng 6% lượng CO₂.

4.3. Đánh giá khả năng áp dụng công nghiệp tại Việt Nam

Ưu điểm của việc sử dụng bùn đỏ để xử lý khí thải tại Việt Nam:

- *Sẵn nguồn nguyên liệu*: phát sinh tại chỗ, không cần chi phí vận chuyển.

- *Tận dụng chất thải kép*: đồng xử lý bùn đỏ và khí thải, giảm chi phí xử lý môi trường.

- *Giảm phát thải CO₂ gián tiếp*: ước tính đạt 30÷40% so với công nghệ FGD-DeNO_x truyền thống, nhờ tận dụng bùn đỏ sẵn có thay thế hoàn toàn các hóa chất hấp phụ và xúc tác nhân tạo trong quá trình xử lý SO₂ và NO_x.

- *Phù hợp công nghệ*: các nhà máy alumin Việt Nam hiện nay đều thải bùn đỏ bằng phương pháp ướt, do đó có thể dễ dàng tích hợp quá trình xử lý khí thải vào các công đoạn rửa và tuần hoàn bùn đỏ hiện có.

Tuy nhiên công nghệ này có hiệu quả hấp phụ CO₂ thấp, đòi hỏi cần nghiên cứu tối ưu tỷ lệ lỏng/rắn (L/R), thời gian phản ứng và khả năng tái sinh bùn

Bảng 5. Khả năng lưu giữ khí thải bằng bùn đỏ.

Thông số	Đơn vị	CO ₂	SO ₂	NO _x
1. Nồng độ trong khí thải	g/m ³	90	0,391	0,02
2. Lưu lượng khí thải	m ³ /h	513.000	513.000	513.000
3. Lượng phát thải theo giờ	kg/h	46.170	200,6	10,26
4. Thời gian vận hành/năm	h/năm	7.200	7.200	7.200
5. Tổng lượng phát thải/năm	tấn/năm	332.424	1.444	73,9
6. Hiệu suất hấp phụ trung bình	g khí/kg bùn đỏ	15	200	80
7. Tương đương tấn khí/tấn bùn đỏ	tấn/tấn	0,015	0,2	0,08
8. Lượng bùn đỏ cần để hấp phụ toàn bộ khí	tấn bùn đỏ/năm	22.161.600	7.220	924
9. Lượng bùn đỏ hiện có tại nhà máy	tấn/năm	1.300.000	1.300.000	1.300.000
10. Tỷ lệ xử lý đạt được với lượng bùn sẵn có hàng năm	%	≈6% CO ₂	100% SO ₂	100% NO _x

đỏ. Tuy nhiên, trong bối cảnh Việt Nam cam kết đạt phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050, đây vẫn được xem là hướng đi triển vọng cho phát triển công nghiệp nhôm xanh và kinh tế tuần hoàn.

5. Kết luận

Khí thải của các nhà máy đốt nhiên liệu hóa thạch có thể được sử dụng để trung hòa bùn đỏ, đồng thời góp phần giảm phát thải khí nhà kính. Mặc dù chi phí đầu tư và vận hành cho việc lưu giữ CO₂ trong bùn đỏ còn tương đối cao (bao gồm cả năng lượng khuấy trộn và nén khí), nhưng công nghệ này mang lại hiệu quả môi trường kép: vừa cố định CO₂, vừa trung hòa tính kiềm cao của bùn đỏ. Khi pH của bùn đỏ được hạ xuống mức chấp nhận được ($\approx 9 \div 9,5$), giá trị sử dụng của vật liệu tăng đáng kể, mở ra cơ hội thương mại hóa và tái sử dụng trong vật liệu xây dựng, cải tạo đất hoặc xử lý nước thải.

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chứng minh khả năng hấp phụ và lưu trữ SO₂, NO_x của bùn đỏ theo phương pháp ướt, với hiệu quả cao và chi phí hợp lý. Đặc biệt, bùn đỏ có thể xử lý đồng thời SO₂ và NO_x trong cùng một hệ thống, thông qua các phản ứng oxy hóa – khử và hấp phụ bề mặt. Tuy nhiên, ứng dụng ở quy mô công nghiệp vẫn còn hạn chế, chủ yếu do vấn đề chi phí vận hành, kiểm soát pH và tái sinh vật liệu. Vì vậy, cần tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện công nghệ, đánh giá tính ổn định lâu dài và khả năng tích hợp vào quy trình sản xuất nhôm hiện nay.

Từ các kết quả nghiên cứu và tính toán trên thế giới cho thấy, bùn đỏ từ quá trình Bayer có khả năng hấp phụ hiệu quả các khí axit CO₂, SO₂ và NO_x nhờ chứa nhiều oxit kiềm và kiềm thổ hoạt tính (Na₂O, CaO, Fe₂O₃). Các phản ứng cacbonat hóa, sulfat hóa và nitrat hóa không chỉ trung hòa kiềm mà còn cố định khí thải thành các muối ổn định như CaCO₃, CaSO₄, NaNO₃. Kết quả thực nghiệm tổng hợp từ các nghiên cứu cho thấy: hiệu suất hấp phụ trung bình CO₂ đạt 5÷20 g/kg, SO₂ đạt 150÷220 g/kg, và NO_x đạt 50÷90 g/kg.

Với 1,2÷1,3 triệu tấn bùn đỏ/năm, các nhà máy nhôm Việt Nam có thể hấp phụ hoàn toàn SO₂ và NO_x đồng thời cố định khoảng 6% lượng CO₂ phát thải hàng năm. Đồng thời bùn đỏ sau trung hòa mở ra nhiều hướng tái chế, góp phần hình thành chuỗi kinh tế tuần hoàn trong sản xuất nhôm.

Trong bối cảnh Việt Nam cam kết đạt phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050, việc tận dụng bùn đỏ để xử lý khí thải là một giải pháp xanh, mang tính khả thi và có ý nghĩa chiến lược đối với ngành công nghiệp nhôm.

Để hướng tới ứng dụng thực tế, cần tập trung các nghiên cứu sâu hơn về động học hấp phụ, cơ chế đồng hấp phụ CO₂-SO₂-NO_x, quy trình tái sinh bùn đỏ và đánh giá tính ổn định của sản phẩm sau phản ứng. Việc sớm làm chủ và triển khai công nghệ này sẽ giúp ngành nhôm Việt Nam vừa giảm phát thải, vừa tận dụng chất thải rắn, góp phần thực hiện mục tiêu phát triển bền vững và nền kinh tế carbon thấp của quốc gia.

Đóng góp của tác giả

Phạm Văn Luận - phương pháp luận, viết bản thảo bài báo, thu thập, phân tích và xử lý số liệu, viết nhận xét, hiệu đính bài báo; Lê Việt Hà – thu thập tài liệu tổng quan, kiểm chứng và hiệu đính bản thảo; Trịnh Đình Tuyên và Nguyễn Văn Nhường – thu thập và viết bản thảo về số liệu thực tế tại công ty Nhôm Đắk Nông và Lâm Đồng.

Tài liệu tham khảo

- Bin, L., Wu, H., Liu, X., Zhu, T., Liu, F., Zhao, Z. (2020). Simultaneous removal of SO₂ and NO using a novel method with red mud as absorbent combined with O₃ oxidation. *J Hazard Mater.* doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122270. Epub 2020 Feb 11. PMID: 32086090.
- Bin, L., Zhao, Z., Ning, P., Liu, X., Zhu, T. (2021). O₃ oxidation excited by yellow phosphorus emulsion coupling with red mud absorption for denitration, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 403, Doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123971.
- Bonenfant, D., Kharoune, L., Sauvé, S., Hausler, R., Niquette, P., Mimeault, M. and Kharoune, M. (2008). CO₂ Sequestration by Aqueous Red Mud Carbonation at Ambient Pressure and Temperature. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol 47. Iss 20. Doi.org/10.1021/ie7017228.
- Braga, P., Lemos, F., Santos, R.D., Nascimento, C., Franca, S. (2018). Use of bauxite residue (red mud) as CO₂ absorbent. *Tailings 2018: 5th*

- International Seminar on Tailings Management*, 1–10.
- Chen, J., Wang, Y., Liu, Z. (2023) Red mud-based catalysts for the catalytic removal of typical air pollutants: A review, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 127, Pages 628-640, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.027>.
- Fang, C., Jia, Y., Lou, R., Wang, Y., Deng, Z., Bo, L.V. (2024). Dealkalinization Effect of Carbon Dioxide in Flue Gas on Bayer Red Mud. In: Wagstaff, S. (eds) *Light Metals 2024. TMS 2024. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50308-5_14.
- Guilfoyle, L., Hay, P., & Cooling, D. (2005). Use of flue gas for carbonation of bauxite residue. In *Proceedings of the 7th International Alumina Quality Workshop* (pp. 218-220). AQW Inc.: Perth.
- Lê, V. H., Phạm, V. L., & Nguyễn, A. T. (2024). Thực tế xử lý bùn đỏ tại các nhà máy nhôm trên thế giới. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị ERSD 2024*.
- Liu, Y., Lei, X., Liu, S., Zhu, H., Ding, E., Ning, P. (2022a). Novel method for high-performance simultaneous removal of NO_x and SO₂ by coupling yellow phosphorus emulsion with red mud. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131991. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131991>.
- Liu, X., Geng, R., Li, B., Ning, P., Zhu, T. (2022b). Sodium ascorbate as additive in red mud slurry for simultaneous desulfurization and denitrification: Insights into the multiple influence factors and reaction mechanism, *Chemosphere*, Volume 307, Part 1, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135683>.
- Liu, S., Liu, Z., Zhu, H., Wang, Z., Gou, J., Zhang, X., Yu, H., Yue, X., Ning, P., Li, B. (2023). The roles of red mud as desulfurization and denitrification in flue gas: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109770. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109770>.
- Niu, J., Zhang, H., Li, L., Gou, Y. (2021). Cost-effective activated carbon (AC) production from partial substitution of coal with red mud (RM) as additive for SO₂ and NO_x abatement at low temperature, *Fuel*, Volume 293, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120448>.
- Raahauge, B. E., & Williams, F. S. (2022). Smelter grade alumina from bauxite: History, best practices, and future challenges.
- Sahu, R.C., Patel, R.K., Ray, B.C. (2010). Neutralization of red mud using CO₂ sequestration cycle, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 179, Issues 1–3, 2010, Pages 28-34, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.05>.
- Sripriya, R., & Murty, C. V. (Eds.). (2023). *Mineral processing: beneficiation operations and process optimization through modeling*. Elsevier.
- Tao, L., Wu, H., Wang, J., Li, B., Wang, X.Q., Ning, P. (2019). Removal of SO₂ from flue gas using Bayer red mud: Influence factors and mechanism. *Journal of Central South University*, 26(2), 467–478. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4019-5>.
- Valluri, S., and Kawatra, S.K. (2021). Simultaneous Removal of CO₂, NO_x and SO_x Using Single Stage Absorption Column. *Journal of Environmental Sciences (China)*, vol. 103, pp. 279–87, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.006>.
- Venancio, L.C., Souza, J.A.S., Macedo, E.N., Botelho, F.A., César, G.C. (2013). Pilot test of bauxite residue carbonation with flue gas. In *Light Metals 2013* (pp. 113-118). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1_20.
- Venancio, L. A., Santos, P.A.M., Macedo, E.N., Souza, J.A.S., Rodrigues, W.S. (2011). Bauxite Residue Use to Remove SO₂ from Gas Effluents. *Energy Technology 2011: Carbon Dioxide and Other Greenhouse Gas Reduction Metallurgy and Waste Heat Recovery*, 209-217. <https://doi.org/10.1002/9781118061886.ch21>.
- Vishwajeet S. Yadav, và nnk (2010), Sequestration of carbon dioxide (CO₂) using red mud, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 176, Issues 1–3, 2010, Pages 1044-1050, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.14>.
- Wang, X., Zhang, Y., Liu, J., Hu, P., Meng, K., Lv, F., Tong, W., Chu, P.K. (2018), Dealkalization of Red Mud by Carbide Slag and Flue Gas. *Clean – Soil, Air, Water*, 46: 1700634. <https://doi.org/10.1002/clen.201700634>.