

TỔNG QUAN VỀ ĐẶC ĐIỂM Bùn ĐỎ BAYER VÀ TIẾN TRÌNH NGHIÊN CỨU XỬ LÝ Bùn ĐỎ TRÊN THẾ GIỚI, ĐỊNH HƯỚNG CHO BAUXIT VIỆT NAM

VŨ ĐÌNH HIẾU¹, TRẦN TRUNG TỐI², NGUYỄN THỊ THÚY¹, VŨ THỊ HIỀN¹

¹ Viện Khoa học môi trường Biển và hải đảo

² Bộ môn Tuyển khoáng, Khoa mỏ, Đại học Mỏ - Địa chất

Tóm tắt:

Bùn đỏ là chất thải rắn phát sinh trong quá trình sản xuất alumina bằng phương pháp Bayer (bùn đỏ Bayer). Với khối lượng thải ra lớn và độ kiềm cao, phần lớn bùn đỏ hiện nay vẫn lưu trữ trong các hồ, đập, chiếm một lượng lớn tài nguyên đất và gây ra mối nguy hiểm lớn về an toàn cho môi trường sinh thái. Ngoài ra, trong bùn đỏ còn chứa các nguyên tố kim loại có giá trị như titan, sắt, scandium, nhôm... đây là một nguồn tài nguyên khoáng sản thứ cấp quan trọng. Hiện có nhiều công trình nghiên cứu sử dụng bùn đỏ cho những mục đích khác nhau, tuy nhiên các nghiên cứu này vẫn mang tính chất đơn lẻ, chưa xử lý toàn diện bùn đỏ. Bài viết mô tả đặc điểm của bùn đỏ Bayer và lịch sử các nghiên cứu xử lý bùn đỏ trên thế giới, trong đó phân tích ưu, nhược điểm của từng quá trình để từ đó có cái nhìn tổng quan nhất về công nghệ xử lý bùn đỏ toàn diện và dự đoán triển vọng về công nghệ xử lý phù hợp cho bùn đỏ ở Việt Nam trong tương lai.

Từ khóa: Bùn đỏ; Bayer; Nghiên cứu xử lý bùn đỏ; vật liệu xây dựng (VLXD) từ bùn đỏ.

Ngày nhận bài: 22/1/2025; **Ngày sửa chữa:** 17/3/2025. **Ngày duyệt đăng:** 20/5/2025.

Overview of Bayer red mud characteristics and research progress on red mud treatment in the world, orientation for Vietnam's bauxite

Abstract:

Red mud is a solid waste generated during the production of alumina by the Bayer method (Bayer red mud). Due to the large amount of emissions and high alkalinity, most of the red mud is currently stored in dams, occupying a large amount of land resources and causing a great safety hazard to the ecological environment. In addition, red mud also contains valuable metal elements, such as titanium, iron, scandium, aluminum, etc., and this is an important secondary mineral resource. Currently, there are many research projects using red mud for different purposes; however, these studies are still individual in nature and have not comprehensively treated red mud. This article focuses on the characteristics of Bayer red mud and the history of red mud treatment research in the world, analyzing the advantages and disadvantages of each process to have the most general view of comprehensive red mud treatment technology and forecast to the prospect of suitable treatment technology for red mud in Vietnam in the future.

Keywords: Red mud; Bayer; Research on red mud treatment; Construction materials from red mud.

JEL Classifications: O13, O44, Q56, R11.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong hơn một thế kỷ qua, sản xuất nhôm kim loại đòi hỏi hai giai đoạn riêng biệt: Quy trình Bayer sản xuất alumina chất lượng cao từ bauxit, trong khi quy trình Hall sản xuất nhôm kim loại bằng cách khử điện phân alumina. Phương pháp Bayer được cấp bằng sáng chế bởi Karl Josef Bayer vào năm 1888, trong khi phương pháp Hall-Heroult được phát triển gần như đồng thời và hoàn toàn độc lập bởi Charles Martin Hall và Paul Heroult vào năm 1886. Kể từ đó, cả hai quy trình đều đã trải qua các nghiên cứu sâu rộng và nhiều cải tiến kỹ thuật đã được thực hiện. Tuy nhiên, nguyên lý khoa học cơ bản và các vấn đề về môi trường của chúng vẫn

không thay đổi (Choate, W.T. and Green, J.A.S.). Bùn đỏ Bayer là chất thải rắn chứa kiềm không hòa tan, được tạo ra trong quá trình sản xuất alumina theo quy trình Bayer (Gu, N.H. and nnk). Việc sản xuất alumina theo quy trình Bayer tạo ra từ 1 - 1,5 tấn bùn đỏ cho mỗi 1 tấn alumina được sản xuất (Liao, S. and nnk; Zhu, X. and nnk; Deng, B. and nnk). Hiện nay, hơn 90% alumina của thế giới được sản xuất theo quy trình Bayer, dẫn đến ước tính tích tụ 4,6 tỷ tấn bùn đỏ trong kho dự trữ toàn cầu (Xue, S. and nnk). Tuy nhiên, tỷ lệ sử dụng toàn diện bùn đỏ chỉ đạt 4% (Liao, S. and nnk). Như vậy, sau hơn một thế kỷ phát triển, bùn đỏ vẫn là vấn đề nghiêm trọng và cấp bách trên toàn thế giới.



Bảng 1. Tính chất vật lý của bùn đỏ

Tính chất	Kích thước hạt, μm	Tỷ lệ lỗ rỗng lớn hơn đất	Diện tích bề mặt riêng, m^2/g	Mật độ, g/cm^3	Điểm nóng chảy, $^{\circ}\text{C}$
Giá trị	5 - 75	2,53 - 2,95	64,1 - 186,9	2,7 - 2,9	1. 200 - 1. 250

Nguồn: Wang, L and nnk; Guo, H and nnk

Bảng 2. Thành phần hóa học chính của bùn đỏ

Thành phần chính	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	Na_2O
%	10 - 20	3 - 20	30 - 60	0,1 - 10	2 - 8	2 - 10

Nguồn: Nan, X and nnk

Việc nghiên cứu, sử dụng toàn diện bùn đỏ trên quy mô lớn sẽ mang tính quyết định, chuyển nó như một nguồn tài nguyên là cấp thiết. Trong những năm qua, các nhà nghiên cứu ở nhiều quốc gia như Trung Quốc, Guinea, Mỹ, Việt Nam... đã công bố nhiều công trình nghiên cứu xử lý bùn đỏ để sử dụng trong các lĩnh vực VLXD, công nghiệp hóa chất, BVMT và thu hồi thành phần có giá trị. Tuy nhiên, hầu hết số công trình này chỉ tập trung nghiên cứu theo một khía cạnh riêng lẻ, chưa có tính toàn diện nên không khai thác hết giá trị tiềm năng của bùn đỏ.

Bài viết nhằm mục đích phân tích mối nguy hiểm của bùn đỏ bằng cách tổng hợp các tính chất vật lý và hóa học của nó; cung cấp tổng quan việc sử dụng bùn đỏ trong nhiều lĩnh vực khác nhau; nêu bật ưu điểm và nhược điểm của các công nghệ khác nhau. Mục tiêu cuối cùng là xác định phương pháp khả thi nhất để tái sử dụng bùn đỏ trên quy mô lớn. Đặc biệt, dựa trên phân tích, so sánh, đề xuất giải pháp xử lý phù hợp cho các loại bùn đỏ của Việt Nam.

2. TÍNH CHẤT VẬT LÝ VÀ HÓA HỌC CỦA BÙN ĐỎ

Theo phương pháp Bayer, bùn đỏ có chứa oxit sắt và các hàm lượng oxit sắt khác nhau khiến bùn đỏ thường có màu đỏ sẫm, đỏ, nâu, trắng đục. Hàm lượng oxit sắt càng cao thì màu của bùn đỏ càng đỏ (Zhu, X and nnk; Zhang, L and nnk; Zhong, C and nn; Wu, S and nnk). Không chỉ do quá trình nghiền mà còn do chính quá trình thẩm thấu, kích thước hạt bùn đỏ theo phương pháp Bayer là nhỏ. Ví dụ, quặng bauxit ở Guinea được nghiền thành 1 - 2 mm và sau khi thẩm thấu, các hạt bùn đỏ có kích thước trong khoảng 5 - 100 μm . Tính chất vật lý của bùn đỏ được thể hiện trong Bảng 1.

Kết quả vi hình thái của bùn đỏ cho thấy, bùn đỏ Bayer thường bao gồm các hạt nhỏ kết dính và kết tụ, với cấu trúc giống như kệ lỗ rỗng và tỷ lệ lỗ rỗng lớn hơn đất, thông thường từ 2,53 - 2,95. Sự hình thành

các lỗ rỗng kết dính, lỗ rỗng kết tụ tạo cho bùn đỏ có diện tích bề mặt riêng lớn, thường dao động từ 64,1 - 186,9 m^2/g (Jing, Y and nnk). Bùn đỏ có cấu trúc lỗ rỗng rời rạc, do đó có mật độ tương đối thấp, thường là 2,7 ~ 2,9 g/cm^3 và trọng lượng thể tích là 0,8 ~ 1,0 g/cm^3 (Zhou, F and nnk). Bùn đỏ tươi có độ ẩm từ 82,3% - 105,9%, độ bão hòa từ 91,1% - 99,6% và chỉ số dẻo từ 17,0 - 30,0 (Jing, Y and nnk). Do có natri oxit (Na_2O) trong bùn đỏ nên nhiệt độ nóng chảy của bùn đỏ nằm trong khoảng từ 1.200 - 1.250 $^{\circ}\text{C}$ (Liao, S and nnk).

Trong quá trình sản xuất alumina theo quy trình Bayer, thành phần hóa học của quặng bauxit thay đổi, dẫn đến thành phần bùn đỏ cũng khác nhau. Ngoài oxit nhôm, bauxit còn chứa các oxit khác như oxit sắt, silic dioxit, canxi oxit, titan dioxit và một số nguyên tố đất hiếm. Trong quá trình hòa tan bauxit để sản xuất alumina theo quy trình Bayer, oxit nhôm và oxit silic trong bauxit phản ứng với dung dịch natri hiđrôxit, trong khi oxit sắt, canxi oxit, titan dioxit không phản ứng với dung dịch natri hiđrôxit và cuối cùng đi vào bùn đỏ sau khi tách rắn - lỏng. Ngoài ra, một số nhôm kết tủa dưới dạng sản phẩm khử silic (DSP) đi vào bùn đỏ theo quy trình Bayer do sự có mặt của silic trong dung dịch. Đây là vấn đề chính của quy trình Bayer. Các thành phần hóa học chính của bùn đỏ theo phương pháp Bayer được thể hiện trong Bảng 2 là oxit nhôm, oxit silic, oxit sắt, titan dioxit, canxi oxit và natri oxit (Bảng 2).

Ngoài ra, tùy thuộc vào nguồn gốc của quặng bauxit ban đầu và phương pháp sản xuất, bùn đỏ cũng chứa một lượng nhỏ kim loại hiếm và các nguyên tố phóng xạ, chẳng hạn như vanadi, zirconi, crom, scandi, germani, gali, niobi, rheni, ytri, urani và radi (Yang, J and nnk). Do đó, bùn đỏ không nên được coi là chất thải mà là khoáng chất giàu kim loại có giá trị. Hàm lượng, giá trị của các nguyên tố có giá trị chính trong bùn đỏ Việt Nam được thể hiện tại Bảng 3 (dưới dạng kim loại nguyên chất hoặc oxit).

Bảng 3. Hàm lượng các nguyên tố có giá trị chính trong mẫu bùn đỏ Việt Nam (*)

Thành phần chính %	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Na ₂ O	CaO
Lâm Đồng	46,41	46,41	46,41	46,41	46,41	46,41
Đắk Nông	46,32	46,32	46,32	46,32	46,32	46,32

(*) *Technical design Vol 3 Alumina process in Nhan Co Alumina project of 650 KT/A*

Bảng 4. Dự kiến nhu cầu dung tích hồ chứa bùn đỏ cho Nhà máy nhôm Lâm Đồng theo công nghệ thải uớt (tính từ năm 2020)

Năm SX	650.000 tấn alumina/năm		750.000 tấn alumina/năm		1.300.000 tấn alumina/năm	
	Lũy tiến (tấn)	Lũy tiến (m ³)	Lũy tiến (tấn)	Lũy tiến (m ³)	Lũy tiến (tấn)	Lũy tiến (m ³)
2020	681.850	568.208	681.850	568.208	681.850	568.208
2025	4.091.100	3.409.250	4.615.600	3.846.333	5.192.550	4.327.125
2030	7.500.350	6.250.292	8.549.350	7.124.458	12.011.050	10.009.208
2035	10.909.600	9.091.333	12.483.100	10.402.583	18.829.550	15.691.292
2036	11.591.450	9.659.542	13.269.850	11.058.208	20.193.250	16.827.708
2037	12.273.300	10.227.750	14.056.600	11.713.833	21.556.950	17.964.125
2045	17.728.100	14.773.417	20.350.600	16.958.833	32.466.550	27.055.458
2046	18.409.950	15.341.625	21.137.350	17.614.458	33.830.250	28.191.875
2050	21.137.350	17.614.458	24.284.350	20.236.958	39.285.050	32.737.542

Nguồn: ThS. Hoàng Minh Hùng và nnk

Thành phần khoáng chất chính trong bùn đỏ Bayer của Việt Nam và nước ngoài là goethit, siderit, acanthit, calcarenit, garnet ngâm nước và calcit (Wan, M and nnk). Trong khi thành phần khoáng chất chính trong bùn đỏ Bayer của Trung Quốc là hematit, calcarenit, calixaren, diaspore, garnet ngâm nước, illit. Bùn đỏ Bayer có hàm lượng kiềm và sắt cao, khiến nó khó được sử dụng trực tiếp để chế tạo VLXD.

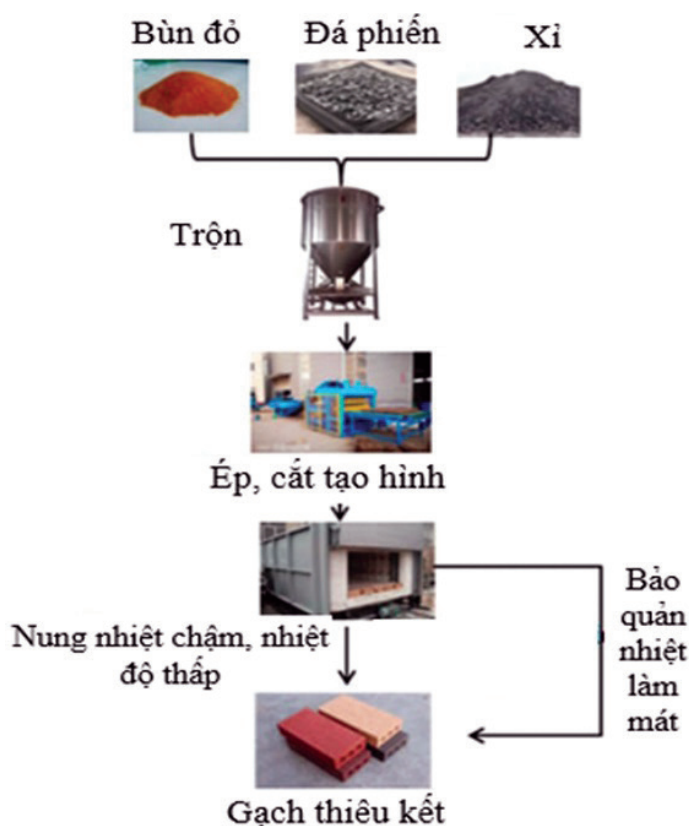
3. MỐI NGUY HIỂM CỦA BÙN ĐỎ

Với nhu cầu alumina ngày càng tăng ở Việt Nam và trên thế giới, việc tăng sản lượng alumina cũng mang đến vấn đề nghiêm trọng về tích trữ, sử dụng bùn đỏ (Bảng 4). Toàn bộ dung tích chứa bùn đỏ cho Tổ hợp nhôm Lâm Đồng của cả 2 giai đoạn được thiết kế và quy hoạch là 19.711.718 m³. Theo thống kê, đến năm 2018 đã sử dụng 1.928.648 m³, số còn lại là 17.843.070m³. Như vậy, theo lộ trình phát triển sản xuất nhôm của TKV, nếu nâng công suất Nhà máy nhôm thì đến năm 2037, toàn bộ diện tích đất đai đã thiết kế quy hoạch làm hồ chứa bùn đỏ sẽ không đáp ứng nhu cầu cho công nghệ thải uớt (Bảng 4).

Trong quá trình sản xuất alumina theo quy trình Bayer, dung dịch natri hydroxit được sử dụng để hòa tan bauxite, do đó, bùn đỏ thu được có chứa một lượng kiềm nhất định. Ngoài việc chứa kiềm tự do, bùn đỏ còn chứa kiềm liên kết hóa học dưới dạng natri silicoaluminat ngâm nước và không dễ hòa tan trong nước, dẫn đến bùn đỏ có độ kiềm cao (Xue, S and

nnk). Độ pH của nước rỉ từ bùn đỏ thường nằm trong khoảng từ 11 - 14 (Liu, W and nnk), nên hạn chế việc sử dụng bùn đỏ trong nhiều lĩnh vực. Hiện nay, phần lớn bùn đỏ chỉ có thể được tích trữ và thải vào bãi chôn lấp hoặc hồ bùn đỏ để lưu trữ (Yang, J and nnk; Yan, W and nnk). Ngày nay, diện tích các bãi chôn lấp và hồ bùn đỏ này ngày càng lớn cùng với sự phát triển của sản xuất nhôm trên thế giới và Việt Nam. Do độ kiềm cao, các bãi chôn lấp, hồ bùn đỏ cũng gây ô nhiễm cho nhiều hệ sinh thái xung quanh. Đất khu vực quanh các hồ bùn đỏ bị kiềm hóa, gây sạt lở và nghèo chất dinh dưỡng (Luo, D and nnk; Gomes, H.I and nnk). Nước thải từ các hồ bùn đỏ có thể thấm vào lòng đất theo nước mưa, làm ô nhiễm nguồn đất và nước ngầm (Yang, P and nnk).

Do kích thước hạt mịn của bùn đỏ, lớp bề mặt của các đống bùn đỏ trần sẽ bị thổi bay vào không khí và lan truyền theo gió, gây ô nhiễm không khí (Zhang, C and nnk), làm tổn thương hệ hô hấp khi con người hít phải. Đập bùn đỏ của Hungary bị vỡ vào năm 2010, khiến hơn 1 triệu m³ bùn đỏ bị rò rỉ, dòng chảy tràn ra đã làm ngập 40 km² đất nông nghiệp và đô thị; khiến 10 người tử vong, nhiều người bị thương. Dòng bùn đỏ chảy vào các con sông gần đó khiến độ pH lên tới 13, dẫn đến sự tuyệt chủng gần như hoàn toàn các loài động vật không xương sống và cá (Yang, P and Wu, W). thảm họa này đã giống lên hồi chuông cảnh tỉnh cho các doanh nghiệp alumina tại Việt Nam và thậm



Hình 1. Quá trình ứng dụng bùn đỏ để sản xuất gạch nung
 Nguồn: Yu, S and nnk

chí trên toàn thế giới trong vấn đề đảm bảo an toàn khi tích trữ bùn đỏ, tuy nhiên, tai nạn vẫn xảy ra. Ví dụ, hồ bùn đỏ CHALCO tại Hà Nam năm 2014; hồ bùn đỏ Nhà máy nhôm Luoyang Wanji năm 2016 và vụ vỡ đập gần đây tại hồ bùn đỏ của Nhà máy nhôm Shanxi Dao năm 2022 (3 địa điểm này đều ở Trung Quốc). Việc xử lý lượng bùn đỏ lớn được tích trữ, sản xuất hàng năm đã trở thành nút thắt hạn chế sự phát triển của ngành alumina và là vấn đề phải giải quyết để ngành alumina phát triển bền vững (PTBV).

4. HIỆN TRẠNG SỬ DỤNG BÙN ĐỎ BAYER

Hiện nay, việc tái sử dụng bùn đỏ Bayer chủ yếu được chia thành các hướng như sau: (1) VLXD, bao gồm việc sử dụng bùn đỏ để sản xuất xi măng hoặc bê tông; vật liệu lát đường trong xây dựng đường bộ; geopolymers, gốm sứ hoặc vật liệu composite; (2) Ứng dụng trong lĩnh vực môi trường, bao gồm sử dụng bùn đỏ để loại bỏ kim loại nặng trong nước và cải tạo đất chua; (3) Ứng dụng trong ngành công nghiệp hóa chất, bao gồm sử dụng bùn đỏ để sản xuất thuốc nhuộm, chất xúc tác, chất đông tụ hoặc chất hấp phụ; (4) Thu hồi các thành phần có giá trị từ bùn đỏ, bao gồm thu hồi sắt; chiết xuất các nguyên tố nhôm, sắt, titan, scandi và các kim loại quan trọng như vanadi, gali (Lu, H; Zhao, Y and nnk; Khairul, M.A and nnk; Archambo, M.S and nnk).

4.1. Vật liệu xây dựng

Thành phần chính của bùn đỏ là oxit nhôm, silic oxit, sắt oxit, titan oxit, canxi oxit, magie oxit và natri oxit (Zhao,

J and nnk), có thể tích nhỏ, độ dính, độ dẻo và khả năng tạo hình. Silica, canxi oxit và aluminosilicat trong bùn đỏ có hoạt tính thủy lực tốt, có thể dùng để chế tạo VLXD, gạch, xi măng, gốm thủy tinh (Lu, H and nnk; He, S and nnk).

Quy trình cụ thể sử dụng bùn đỏ để chế tạo gạch là trộn đều bùn đỏ, đá phiến sét và xi theo tỷ lệ, sau đó cắt ép thành phôi, qua công nghệ sấy, gia nhiệt trước và “nung chậm ở nhiệt độ thấp”, cuối cùng là bảo quản nhiệt và làm mát (Yu, S and nnk). Hình 1 cho thấy quy trình ứng dụng bùn đỏ để sản xuất gạch thiêu kết.

Gạch chế tạo bằng bùn đỏ làm nguyên liệu đáp ứng yêu cầu về cường độ nén, mật độ và cường độ uốn của gạch xây dựng. Chi phí sản xuất thấp, có thể tiêu thụ một lượng lớn bùn đỏ. Tuy nhiên, do hàm lượng kiềm cao trong bùn đỏ nên gạch chế tạo dễ bị đông cứng, ảnh hưởng đến độ bền của gạch, từ đó ảnh hưởng đến tính thẩm mỹ, tuổi thọ của công trình (Jin, K and nnk). Trong bùn đỏ cũng có một số zircon và monazit phóng xạ, có thể khiến gạch vượt quá mức độ phóng xạ và ảnh hưởng đến sức khỏe con người.

Các thành phần oxit nhôm, oxit silic và oxit sắt trong bùn đỏ có thể được sử dụng thay thế một phần nguyên liệu thô để sản xuất xi măng silicat hoặc clinker xi măng aluminat. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra, sắt và nhôm có trong bùn đỏ có thể cải thiện đáng kể tính chất đông kết và cường độ của xi măng (Thakur, R.S and nnk); thành phần titan có trong bùn đỏ cũng tăng cường độ đông kết của xi măng (Singh, M.; Upadhayay, S.N.). Tuy nhiên, hàm lượng kiềm (Na_2O) cao có trong bùn đỏ lại hạn chế khả năng pha trộn; tỷ lệ pha trộn của bùn đỏ cũng chỉ được tối đa 5% khi chế tạo xi măng silicat (Tsakiridis, P.E and nnk; Vangelatos, I and nnk). Điều này không thể giải quyết cơ bản vấn đề hiện tại về lượng lớn bùn đỏ phát sinh và tích trữ, ngoài ra còn làm xi măng dễ bị đông cứng khi sử dụng trong xây dựng, làm giảm tuổi thọ của các tòa nhà (Zhang, T and nnk; Zhang, T and nnk; Liu, X and nnk; Pappu, A and nnk).

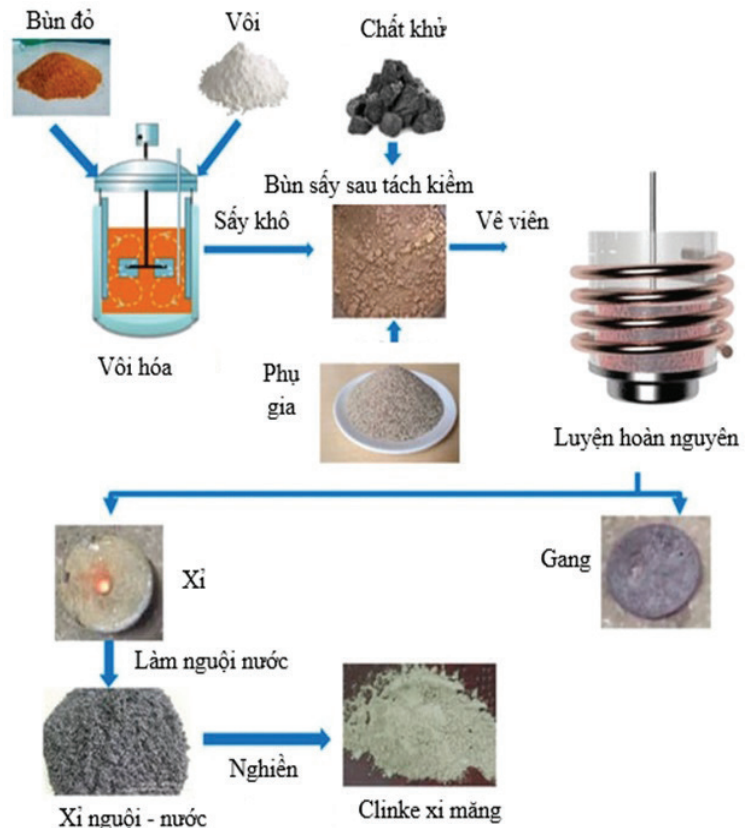
Để khắc phục ảnh hưởng của kiềm trong bùn đỏ khi sử dụng làm xi măng, nghiên cứu từ Đại học Đông Bắc, Trung Quốc (Wang, K and nnk) đã trình bày một phương pháp mới để sản xuất xi măng các-bon thấp. Bùn đỏ hàm lượng sắt cao sau khi khử kiềm được

coi như là nguyên liệu thô cho luyện gang. Xi phát sinh trong quá trình luyện được sử dụng trong sản xuất xi măng. Phương pháp này có ý nghĩa hướng dẫn cho việc xử lý bùn đỏ hàm lượng sắt cao trên quy mô lớn. Hình 3 cho thấy quá trình ứng dụng bùn đỏ để sản xuất xi măng ít các-carbon (Hình 2).

Việc sử dụng bùn đỏ làm VLXD có ưu điểm là lượng sử dụng lớn, chi phí nguyên liệu thấp, thị trường sản phẩm lớn, tuy nhiên, vấn đề đông cứng VLXD làm từ bùn đỏ ảnh hưởng nghiêm trọng đến ứng dụng của VLXD. Khoảng cách vận chuyển sản phẩm, nguyên liệu cũng sẽ làm tăng chi phí của bùn đỏ trong các ứng dụng VLXD. Đồng thời, việc sử dụng trực tiếp bùn đỏ hàm lượng sắt cao trong lĩnh vực VLXD sẽ dẫn đến lãng phí các nguồn tài nguyên kim loại như sắt, nhôm, titan trong bùn đỏ; giá trị sử dụng bùn đỏ giảm đáng kể. Do đó, trước khi chế tạo VLXD, bùn đỏ phải được khử tách kiềm, chiết xuất những kim loại có giá trị như sắt, titan; chất thải cuối cùng chứa alumina, oxit silic, oxit canxi, oxit magie có thể được sử dụng để chế tạo VLXD. Quá trình này không chỉ loại bỏ vấn đề đông băng trong quá trình chuẩn bị VLXD mà còn có thể thu hồi kim loại có giá trị trong bùn đỏ để đạt được mục đích sử dụng toàn diện, chi phí thấp, giá trị cao, quy mô lớn của bùn đỏ. Ngoài ra, các thành phần có giá trị trong bùn đỏ rất phức tạp và hàm lượng thay đổi, chẳng hạn như bùn đỏ giàu sắt kiềm thấp; bùn đỏ giàu sắt kiềm cao và bùn đỏ giàu nhôm kiềm cao cần được phân loại.

4.2. Nông nghiệp và môi trường

Ngoài oxit nhôm, silic oxit, sắt oxit, bùn đỏ còn chứa các nguyên tố như phốt pho, canxi, magie, cung cấp chất dinh dưỡng cho cây trồng phát triển, có thể được sử dụng để cải tạo đất hoặc sản xuất phân bón (Brunori, C and nnk; Hamdy, M.K and nnk; Alva, A.K and nnk; Ciccu, R and nnk). Bùn đỏ có tính kiềm mạnh, do đó có thể được sử dụng để điều chỉnh độ pH của đất chua (Snars, K and nnk; Feigl, V and nnk). Các thành phần khoáng chất sắt và nhôm có trong bùn đỏ có lợi cho việc tăng cường hiệu ứng cố định phốt pho của đất; góp phần vào sự phát triển của vi sinh vật và thực vật trong đất. Ngoài ra, tính chất hấp phụ mạnh của bùn đỏ có thể được sử dụng để xử lý đất bị ô nhiễm

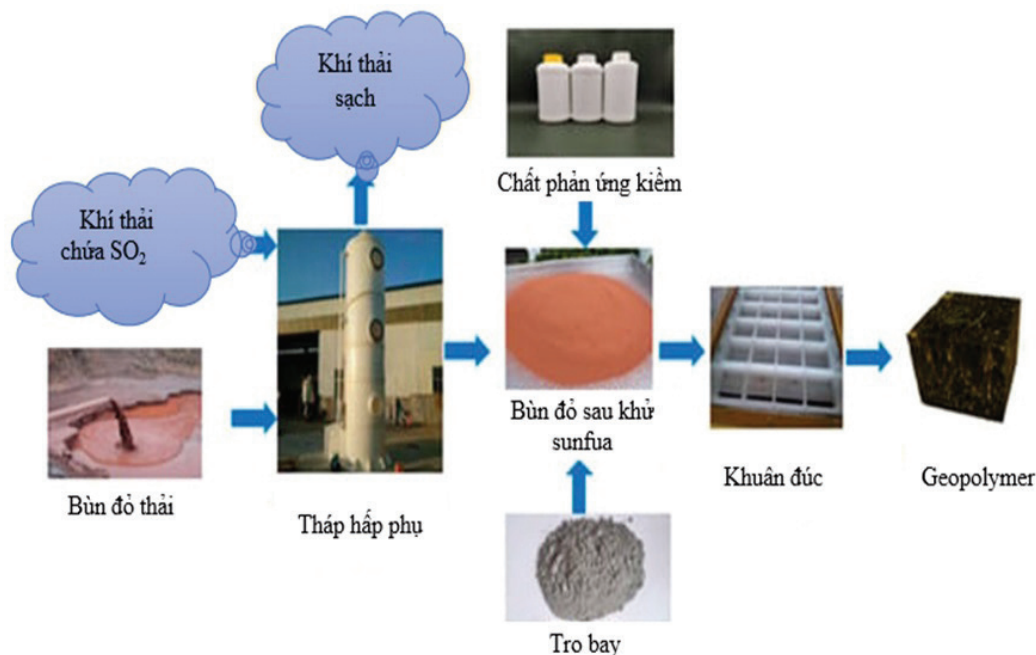


Hình 2. Quá trình ứng dụng bùn đỏ để sản xuất xi măng ít các-carbon
 Nguồn: Wang, K and nnk

kim loại nặng và đóng vai trò là chất làm đông cứng kim loại nặng. Mặc dù việc sử dụng bùn đỏ để cải tạo đất có kết quả tốt, nhưng nó chỉ áp dụng được cho đất bị ô nhiễm axit hoặc kim loại nặng. Phương pháp này sử dụng một lượng nhỏ bùn đỏ và có tính liên quan cao, không thể đạt được mục đích xử lý bùn đỏ trên diện rộng.

Bùn đỏ Bayer nếu được sử dụng trong lĩnh vực môi trường, không chỉ đạt được mục đích xử lý môi trường mà còn hiện thực hóa sự phát triển xanh và bền vững của việc tái sử dụng chất thải. Ứng dụng chính của bùn đỏ trong lĩnh vực môi trường là xử lý khí thải (XLKT) và nước thải (Khairul, M.A and nnk; Fois, E and nnk; Summers, R.N and nnk).

Với khí thải, bùn đỏ có đặc điểm là kích thước hạt nhỏ, diện tích bề mặt riêng lớn, hàm lượng oxit kim loại cao, như nhôm oxit, sắt oxit, canxi oxit, magie oxit, natri oxit, v.v, có thể được sử dụng để XLKT chứa chất ô nhiễm như H₂S, SO₂, NO_x (Nan, X and nnk). XLKT chủ yếu được chia thành xử lý khô và ướt (Zhao, Y and nnk; Wang, K and nnk). Xử lý khô dựa trên đặc điểm của bùn đỏ có kích thước lỗ rỗng lớn, hoạt tính bề mặt cao nên dễ hấp thụ trực tiếp khí thải, tuy nhiên, khi khử lưu huỳnh khô đòi hỏi phải sấy bùn đỏ và nghiền thành các hạt mịn, làm tăng chi phí XLKT (Luo, D and nnk). Hơn nữa, các hạt bùn đỏ nhỏ dễ bị kết tụ, có khả năng gây tắc nghẽn đường ống, hạn chế việc áp dụng bùn đỏ trong quy trình XLKT khô. Nghiên cứu cho thấy, với phương pháp khử lưu huỳnh khô, 1 kg bùn



Hình 3. Quá trình ứng dụng bùn đỏ sau khi khử lưu huỳnh vào quá trình chế tạo geopolymer

Nguồn: Li, B và nnk, Wang, X và nnk

đỏ có thể hấp phụ 11,3 g SO₂ và tỷ lệ khử lưu huỳnh xấp xỉ 50%. Xử lý ướt liên quan đến việc sử dụng các chất kiềm có trong bùn đỏ để phản ứng trực tiếp với khí thải có tính axit. Khi khử lưu huỳnh ướt tốt hơn phương pháp khô và tỷ lệ khử lưu huỳnh của nó đạt tới 90%. Trong thực tế, bùn đỏ Bayer luôn chứa lượng nước lớn, rất thuận lợi cho việc thực hiện khử khí thải chứa lưu huỳnh bằng phương pháp ướt. Bùn đỏ hấp phụ SO₂ có thể được sử dụng để chế tạo geopolymer như thể hiện trên sơ đồ Hình 3. Phương pháp này có khả năng hiện thực hóa sự PTBV của quản lý chất thải, tuy nhiên nhược điểm là chỉ phù hợp với khu vực công nghiệp có đủ điều kiện phát thải tương ứng giữa khối lượng bùn đỏ và khí thải chứa SO₂.

Ngoài việc được sử dụng để XLKT, bùn đỏ cũng có thể được ứng dụng để xử lý nước thải (XLNT), do có độ xốp cao, diện tích bề mặt riêng lớn và cấu trúc giống như lỗ rỗng, cho phép hấp thụ một số ion kim loại nặng hoặc các chất khác. Ngoài ra, bùn đỏ có thể đóng vai trò tích cực trong trao đổi ion và tăng hoạt động hóa học, ví dụ, bùn đỏ được chế tạo như một tác nhân XLNT sau khi xử lý biến đổi để hấp thụ các ion kim loại nặng (Cd²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺, Cr⁶⁺...); ion phi kim (F⁻, PO₄³⁻, As³⁺, As⁵⁺...) và các nguyên tố phóng xạ (U, Sr, Th, Cs...) có trong nước thải (Yan, Y and nnk). Tuy nhiên, vẫn còn nhiều vấn đề cần giải quyết trong việc sử dụng bùn đỏ để XLNT. Bùn đỏ có tính kiềm mạnh và việc sử dụng trực tiếp sẽ gây ô nhiễm thứ cấp cho các nguồn nước, vì vậy cần phải biến tính bằng cách axit hóa và hoạt hóa trước khi sử dụng để XLNT.

Điều này sẽ làm tăng chi phí xử lý và hạn chế sử dụng bùn đỏ để XLNT (Liu, Y.J and nnk).

4.3. Công nghiệp hóa chất

Ứng dụng chính của bùn đỏ trong công nghiệp hóa chất là chế tạo chất xúc tác, gốm sứ, vật liệu độn (Sutar, H and nnk; Samal, S and nnk; Fang, H and nnk). Bùn đỏ có kích thước hạt mịn, cấu trúc bên trong xốp, diện tích bề mặt riêng lớn, do đó có thể được biến đổi để chế tạo chất xúc tác công nghiệp. Vật liệu gốm xốp được chế tạo từ bùn đỏ có thể là chất xúc tác trong các quy trình xử lý nước, hiệu quả khử nước nhiễm bẩn lớn hơn nhiều so với cát thạch anh và các chỉ số hiệu suất đạt hoặc tốt hơn tiêu chuẩn quốc gia (Li, F and nnk). Mặc dù giá trị kinh tế của bùn đỏ để chế tạo chất xúc tác hoặc gốm sứ cao, nhưng lượng bùn đỏ được sử dụng trong lĩnh vực này tương đối nhỏ. So với sản lượng bùn đỏ hàng năm của Việt Nam là hơn 1,2 triệu tấn và xu hướng còn tăng khi các nhà máy nhôm sẽ được đầu tư trong thời gian tới, các ứng dụng trong ngành công nghiệp hóa chất chỉ có thể sử dụng một phần rất nhỏ bùn đỏ, không thể giải quyết cơ bản vấn đề xả thải, tích trữ bùn đỏ.

5. KẾT LUẬN

Bài viết tổng quan những nghiên cứu nhằm giảm thiểu tác hại của bùn đỏ và tái sử dụng bùn đỏ trên thế giới nói chung, Việt Nam nói riêng. Cách xử lý số lượng lớn bùn đỏ Bayer đang được triển khai trên mỗi quốc gia, thể hiện sự nỗ lực chung của thế giới hướng tới BVMT, PTBV ngành công nghiệp alumina toàn cầu.

Việc tái sử dụng bùn đỏ sẽ tận thu tối đa tài nguyên thiên nhiên và tăng nguồn thu cho những đơn vị sản xuất alumina. Các phương pháp thu hồi thành phần có giá trị tương ứng cần được nghiên cứu phát triển để đạt được khả năng thu hồi tối đa với mức tiêu thụ năng lượng thấp. Bên cạnh đó, việc xem xét xử lý theo hướng xanh, tuần hoàn đối với chất thải để tránh gây ra chất thải thứ cấp và ô nhiễm thứ cấp. Quy trình “Tách kiềm - Tách sắt - Chế tạo xi măng” có thể là phương pháp hợp lý nhất để sử dụng bùn đỏ nhằm hiện thực hóa việc sử dụng toàn diện bùn đỏ theo cách vô hại, quy mô lớn và tiết kiệm. Bùn đỏ Việt Nam phát sinh chính trong quá trình sản xuất alumina tại khu vực Tây Nguyên, ngoài chứa kiềm cao, thành phần chính gồm oxit sắt, nhôm, titan; không chứa nguyên tố phóng xạ. Do đó, quy trình này được xem là giải pháp lựa chọn hợp lý nhất cho việc xử lý bùn đỏ Việt Nam trong tương lai.

Lời cảm ơn: Bài báo được hoàn thành với sự hỗ trợ của Chương trình số 02/2024/HĐ-KHCN-DONGBAC ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Choate, W.T.; Green, J.A.S. *U.S. Energy Requirements for Aluminum Production: Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities*; TMS Annual Meeting; U.S. Department of Energy: Washington, DC, USA, 2003; pp. 99-113. (Google Scholar).
- Gu, N.H.; Guo, T.F.; Ma, S.G.; Dai, Y.; Wang, N. *Review on Separation, Recovery, Extraction and Comprehensive Utilization of Iron from Red Mud*. *Chem. Ind. Eng. Prog.* 2018, 37, 3599-3608, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Liao, S.; Yang, J.; Ma, S. *Research Progress in the Comprehensive Utilization of Red Mud*. *Conserv. Util. Miner. Resour.* 2019, 39, 21-27, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Zhu, X.; Wang, L.; Guan, X.; Wei, Z. *The Latest Development and Suggestions on Extraction of Valuable Metals from Red Mud*. *Rare Met. Cem. Carbides* 2015, 43, 28-32, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Deng, B.; Li, G.; Luo, J.; Ye, Q.; Liu, M.; Peng, Z.; Jiang, T. *Enrichment of Sc₂O₃ and TiO₂ from bauxite ore residues*. *J. Hazard. Mater.* 2017, 331, 71-80. (Google Scholar) (CrossRef) (PubMed).
- Xue, S.; Li, Y.; Guo, Y. *Environmental Impact of Bauxite Residue: A Comprehensive Review*. *J. Univ. Chin. Acad. Sci.* 2017, 34, 401-412. (Google Scholar).
- Zhu, X.; Li, W.; Guan, X. *Research Status of Comprehensive Utilization of Red Mud*. *Multipurp. Util. Miner. Resour.* 2016, 7-10, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Zhang, L.; Gao, Y.; Hong, J.; Chen, S.; Zhang, Q.; Chen, Y.; Fu, J. *Research Progress on Resource Comprehensive Utilization of Red Mud*. *Bull. Chin. Ceram. Soc.* 2020, 39, 144-149, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Zhong, C.; Xia, J. *Study on Leaching Na⁺ in Red Mud from Bayer Process*. *Bull. Chin. Ceram. Soc.* 2013, 32, 2012-2015, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Wu, S.; Zhu, L.; Sun, T.; Xu, C.; Li, X.; Wang, X. *Comprehensive Utilization Status and Prospect of Red Mud*. *Metal Mine* 2019, 38-44, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Wang, L.; Hao, Y.; Hao, Z. *Progress in valuable metal element recovery and utilization of red mud-A review*. *Chin. J. Nonferrous Met.* 2018, 28, 1697-1710, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Guo, H.; Guan, X.; Ma, X. *Study on Physical and Chemical Properties of Red Mud from Sintering Process*. *Shanxi Metall.* 2010, 33, 1-3, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Jing, Y.; Jing, Y.; Yang, Q. *Basic properties and engineering properties of red mud*. *Light Met.* 2001, 27, 20-23, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Zhou, F. *Progress in Extraction and Comprehensive Utilization of Valuable Metals in Red Mud*. *China Metal Bull.* 2019, 8, 274-275, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Nan, X.; Zhang, T.; Liu, Y.; Dou, Z.; Zhao, Q.; Jiang, X. *Main Categories of Red Mud and Its Environmental Impacts*. *Chin. J. Process Eng.* 2009, 9, 459-464, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- Yang, J.; Chen, S.; Guo, Q. *Application of red mud in the remediation of heavy metals pollution: A review*. *Chin. J. Ecol.* 2013, 32, 1937-1944, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
- United States Geological Survey Website (USGS). *Commodity Statistics and Information 2022*. Available online: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> (accessed on 18 March 2022).
- Technical design Vol 3 Alumina process in Nhan Co Alumina project of 650 KT/A.
- Wan, M.; Jiang, Y. *Present situation and progress of comprehensive utilization of red mud from alumina production*. *World Nonferrous Met.* 2021, 17, 152-153. (Google Scholar).
- ThS. Hoàng Minh Hùng và nnk. *Một số kết quả nghiên cứu xử lý bùn đỏ Nhà máy alumina Lâm Đồng bằng phương pháp thải khô*. *Tạp chí điện tử công nghiệp môi trường*, 2020.



21. Xue, S.; Li, X.; Kong, X.; Wu, C.; Li, Y.; Li, M.; Li, C. Alkaline regulation of bauxite residue: A comprehensive review. *Acta Sci. Circumstantiae* 2017, 37, 2815-2828, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
22. Liu, W.; Chen, X.; Li, W.; Yu, Y.; Yan, K. Environmental assessment, management and utilization of red mud in China. *J. Clean. Prod.* 2014, 84, 606-610, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar) (CrossRef).
23. Yang, J.; Xiao, B. Recovering iron and preparing building material with residues from Bayer red mud. *Chin. J. Nonferrous Met.* 2008, 18, 187-192. (Google Scholar).
24. Yan, W. Tailings Disposal Methods and Applications at Home and Abroad. *Met. Mine* 2016, 483, 1-14, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
25. Luo, D.; Li, Z.; Du, Q.; Zhang, J.; Zhang, X. Research progress on comprehensive utilization of red mud. *Technol. Innov. Appl.* 2020, 2009, 5-76, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
26. Gomes, H.I.; Mayes, W.M.; Rogerson, M.; Stewart, D.I.; Burke, I.T. Alkaline residues and the environment: A review of impacts, management practices and opportunities. *J. Clean. Prod.* 2016, 112, 3571-3582. (Google Scholar) (CrossRef).
27. Yang, P.; Wu, W. Analysis of the emergency response to the Hungarian red mud spill and the inspiration for China. *Sci. Technol. Innov. Her.* 2017, 14, 163-164, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
28. Zhang, C.; Wang, J.; Liu, H.; Zhao, P. Research status and progress of red mud dealkalization technology. *Multipurp. Util. Miner. Resour.* 2012, 11-14, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
29. Lu, H. Present Situation and Prospect of Comprehensive Utilization of Red Mud. *Hunan Nonferrous Met.* 2022, 38, 60-64, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
30. Zhao, Y.; Wang, H.; Wei, Y. Advances in comprehensive utilization of red mud. *Modern Chem. Ind.* 2019, 39, 55-58, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
31. Khairul, M.A.; Jafar, Z.; Moghtaderi, B. The composition, recycling and utilization of Bayer red mud. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 141, 483-498. (Google Scholar) (CrossRef).
32. Archambo, M.S.; Kawatra, S.K. Utilization of Bauxite Residue: Recovering Iron Values Using the Iron Nugget Process. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2021, 42, 222-230. (Google Scholar) (CrossRef).
33. Zhao, J.; Wang, L.; Xie, X. Preparation of Sintering-expanded Haydite with Red Mud from Byer Process. *Multipurp. Util. Miner. Resour.* 2009, 4, 41-45. (Google Scholar).
34. He, S.; Jiang, S.; Wang, W. Research progress of utilizing red mud as resource of building material in China. *Light Met.* 2007, 12, 1 - 5. (Google Scholar).
35. Pontikes, Y.; Angelopoulos, G.N. Bauxite residue in cement and cementitious applications: Current status and a possible way forward. *Resour. Conserv. Recycl.* 2013, 73, 53-63. (Google Scholar) (CrossRef).
36. Wang, Y.; Zhang, T.; Zhang, Y.; Lv, G.; Zhang, W. Transformation and characterization of cement clinker prepared from new structured red mud by sintering. *JOM J. Miner. Met. Mater. Soc.* 2019, 71, 2505-2512. (Google Scholar) (CrossRef).
37. Yu, S.; Dong, F.; Yang, X. Brief description of the industrial method of comprehensive utilization of red mud. *China Met. Bull.* 2019, 192-193, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
38. Jin, K.; Wang, J.; Lv, C.; Jia, Y. The Analysis of Efflorescence about Sintered Red Mud Brick. *Guangzhou Chem. Ind.* 2013, 41, 72-74, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
39. Thakur, R.S.; Sant, B.R. Utilization of red mud: Part I-Analysis and utilization as raw material for absorbents, building materials, catalysts, fillers, paints and pigments. *J. Sci. Ind. Res.* 1983, 42, 87 - 108. (Google Scholar).
40. Singh, M.; Upadhayay, S.N.; Prasad, P.M. Preparation of iron rich cements using red mud. *Cem. Concr. Res.* 1997, 27, 1037-1046. (Google Scholar) (CrossRef).
41. Singh, M.; Upadhayay, S.N.; Prasad, P.M. Preparation of special cements from red mud. *Waste Manag.* 1996, 16, 665- 670. [Google Scholar] [CrossRef].
42. Tsakiridis, P.E. Agatzini-Leonardou, S.; Oustadakis, P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. *J. Hazard. Mater.* 2004, 116, 103-110, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar) (CrossRef).
43. Vangelatos, I.; Angelopoulos, G.N.; Boufounos, D. Utilization of ferroalumina as raw material in the production of Ordinary Portland Cement. *J. Hazard. Mater.* 2009, 168, 473-478. (Google Scholar) (CrossRef) (PubMed).
44. Hindalco. Available online: <http://www.hindalco.com/media/Press-releases/hindalcosupply-1.2-mn-mt-of-red-mud-to-ultratech-two-flagship-aditya-birla-group> (accessed on 18 March 2022).
45. Zhang, T.; Wang, Y.; Lu, G.; Liu, Y.; Zhang, W.; Zhao, Q. Comprehensive Utilization of Red Mud: Current Research Status and a Possible Way Forward for Nonhazardous Treatment. *TMS Annu. Meeting Light Met.* 2018, 2018, 135-141. (Google Scholar).

46. Zhang, T.; Wang, K.; Liu, Y.; Lyu, G.; Li, X.; Chen, X. A review of comprehensive utilization of high-iron red mud of China. *TMS Annu. Meeting Light Met.* 2020, 2020, 65-71. (Google Scholar).
47. Liu, X.; Zhang, N. Utilization of red mud in cement production: A review. *Waste Manag. Res.* 2011, 29, 1053-1063. (Google Scholar) (CrossRef) (PubMed).
48. Pappu, A.; Saxena, M.; Asolekar, S.R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Build. Environ.* 2007, 42, 2311-2320. (Google Scholar) (CrossRef).
49. Wang, K.; Liu, Y.; Dou, Z.; Lv, G.; Li, X.; Zhang, T. A Novel Method of Extracting Iron from High-Iron Red Mud and Preparing Low-Carbon Cement Clinker from Tailings. *JOM* 2022, 74, 2750-2759. (Google Scholar) (CrossRef).
50. Brunori, C.; Cremisini, C.; Massanisso, P.; Pinto, V.; Torricelli, L. Reuse of a treated red mud bauxite waste: Studies on environmental compatibility. *J. Hazard. Mater.* 2005, 117, 55-63. (Google Scholar) (CrossRef).
51. Hamdy, M.K.; Williams, F.S. Bacterial amelioration of bauxite residue waste of industrial alumina plants. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 2001, 27, 228-233. (Google Scholar) (CrossRef).
52. Alva, A.K.; Huang, B.; Paramasivam, S.; Sajwan, K.S. Evaluation of root growth limiting factors in spodic horizons of spodosols. *J. Plant Nutr.* 2002, 25, 2001-2014. (Google Scholar) (CrossRef).
53. Ciccu, R.; Ghiani, M.; Serci, A.; Fadda, S.; Peretti, R.; Zucca, A. Heavy metal immobilization in the mining-contaminated soils using various industrial wastes. *Miner. Eng.* 2003, 16, 187-192. (Google Scholar) (CrossRef).
54. Snars, K.; Gilkes, R.J. Evaluation of bauxite residues (red muds) of different origins for environmental applications. *Appl. Clay Sci.* 2009, 46, 13-20. (Google Scholar) (CrossRef).
55. Feigl, V.; Ujaczki, E.; Vaszita, E.; Molnar, M. Influence of red mud on soil microbial communities: Application and comprehensive evaluation of the biology ecoplate approach as a tool in soil microbiological studies. *Sci. Total Environ.* 2017, 595, 903-911. [Google Scholar] [CrossRef].
56. Summers, R.N.; Guise, N.R.; Smirk, D.D.; Summers, K.J. Bauxite residue (red mud) improves pasture growth on sandy soils in Western Australia. *Aust. J. Soil Res.* 1996, 34, 569-581. (Google Scholar) (CrossRef).
57. Snars, K.E.; Gilkes, R.J.; Wong, M.T.F. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils. *Soil Res.* 2004, 42, 321-328. (Google Scholar) (CrossRef).
58. Menzies, N.W.; Snars, K.E.; Kopittke, G.R.; Kopittke, P.M. Amelioration of cadmium contaminated soils using cation exchangers. *J. Plant Nutr.* 2009, 32, 1321 - 1335. (Google Scholar) (CrossRef).
59. Fois, E.; Lallai, A.; Mura, G. Sulfur Dioxide Absorption in a Bubbling Reactor with Suspensions of Bayer Red Mud. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007, 46, 6770-6776. (Google Scholar) (CrossRef).
60. Summers, R.N.; Pech, J.D. Nutrient and metal content of water, sediment and soils amended with bauxite residue in the catchment of the Peel Inlet and Harvey Estuary, Western Australia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 1997, 64, 219-232. (Google Scholar) (CrossRef).
61. Li, B.; Wu, H.; Wang, Z.; Wang, J.; Li, M.; Ning, P. Research Progress of Desulfurization and Denitrification of Alkaline Solid Waste Red Mud. *Bull. Chin. Ceram. Soc.* 2019, 38, 1401-1407+1419, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
62. Wang, X.; Zhang, Y.; Lv, F.; An, Q.; Lu, R.; Hu, P.; Jiang, S. Removal of alkali in the red mud by SO₂ and simulated flue gas under mild conditions. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 2015, 34, 81-87. (Google Scholar) (CrossRef).
63. Chen, Y.; Li, J.Q.; Huang, F.; Zhou, J.; Liu, W. The Performance Research on Absorbing SO₂ Waste. *J. Guizhou Univ. Technol. Nat. Sci. Ed.* 2017, 30-37, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
64. Nie, Q.; Hu, W.; Huang, B.; Shu, X.; He, Q. Synergistic utilization of red mud for flue-gas desulfurization and fly ash-based geopolymer preparation. *J. Hazard. Mater.* 2019, 369, 503-511. [Google Scholar] [CrossRef].
65. Yan, Y.; Chang, Z.; Fu, Y. Advances in research on red mud utilization. *China Energy Environ. Prot.* 2020, 42, 134 - 138, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).
66. Liu, Y.J.; Naidu, R.; Ming, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. *Geoderma* 2011, 163, 1- 12. (Google Scholar) (CrossRef).
67. Sutar, H. Progress of Red Mud Utilization: An Overview. *Am. Chem. Sci. J.* 2014, 4, 255-279. (Google Scholar) (CrossRef).
68. Samal, S.; Ray, A.K.; Bandopadhyay, A. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India-A review. *Int. J. Miner. Process.* 2013, 118, 43-55. (Google Scholar) (CrossRef).
69. Fang, H.; Liang, W.; Ren, S.; Yang, F.; Ma, L. Preparation of modified red mud-based catalysts and their catalytic combustion performance for toluene. *China Environ. Sci.* 2021, 41, 5764-5770, (In Chinese with English Abstract). (Google Scholar).