

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
VIỆN TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG

TRƯỜNG MẠNH TUẤN

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ TẠO HẠT TÀNG SÔI
ĐỂ THU HỒI SẮT, NHÔM TRONG Bùn ĐỎ CỦA QUÁ TRÌNH
SẢN XUẤT ALUMIN GÓP PHẦN BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG**

Chuyên ngành: Môi trường và phát triển bền vững

Mã số: 9440301.04

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÔI TRƯỜNG

HÀ NỘI – 2025

Công trình được hoàn thành tại:

Viện Tài nguyên và Môi trường - Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học: 1. GS.TS. Nguyễn Ngọc Minh
2. TS. Lê Văn Giang

Phản biện: PGS.TS. Đỗ Văn Mạnh
*Viện Khoa học Công nghệ Năng lượng và Môi trường,
Viện Hàn lâm KH&CN VN*

Phản biện: PGS.TS. Ngô Xuân Thành
Trường Đại học Mở - Địa chất

Phản biện: TS. Dương Thị Lịm
Viện Các Khoa học Trái đất, Viện Hàn lâm KH&CN VN

Luận án đã được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ
hợp tại: Viện Tài nguyên và Môi trường, ĐHQGHN
vào hồi: giờ phút, ngày tháng năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, ĐHQGHN
- Viện Tài nguyên và Môi trường, ĐHQGHN

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Manh Tuan Truong**, Gia Cuong Nguyen, Van Giang Le, Xuan Thanh Bui, The Anh Luu (2025). Selective recovery of iron and aluminum from red mud wastewater using fluidized bed homogeneous crystallization. Sustainable Chemistry One World, Vol.7, 100087.
2. The Anh Luu, Gia Cuong Nguyen, **Manh Tuan Truong**, Van Giang Le, Xuan Thanh Bui (2025). Recovery of high-quality struvite fertilizer product from swine wastewater using fluidized bed homogeneous crystallization. RSC Advances, Vol.15, 24122.
3. **Trương Mạnh Tuấn**, Lê Phú Đông, Nguyễn Ngọc Minh, Lê Văn Giang (2025). Thu hồi chọn lọc Fe(III) và Al(III) từ dịch lọc bùn đỏ bằng phương pháp hòa tác axit và kết tủa hóa học. Tạp chí Môi trường, số tháng 09/2025.
4. Lê Phú Đông, **Trương Mạnh Tuấn**, Nguyễn Ái Quỳnh, Lê Văn Giang (2025). Nghiên cứu áp dụng kết tinh đồng thể tầng sôi để thu hồi sắt và đồng từ nước thải mạ điện. Tạp chí Môi trường, số tháng 09/2025.
5. Lưu Đức Hải, Nguyễn Ngọc Minh, Nguyễn Mạnh Khải, **Trương Mạnh Tuấn** (2019). Bùn đỏ và giải pháp xử lý bùn đỏ phát sinh từ các nhà máy nhôm Tây Nguyên. Tạp chí Kinh tế Môi trường, số tháng 09/2019, tr.45-51.
6. Lưu Đức Hải, Nguyễn Ngọc Minh, Nguyễn Mạnh Khải, **Trương Mạnh Tuấn** (2019). Công nghệ điện phân nhôm và các vấn đề môi. Tạp chí Kinh tế Môi trường, số tháng 10/2019, tr.56-60.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Luận án "Nghiên cứu ứng dụng công nghệ tạo hạt tầng sôi để thu hồi sắt, nhôm trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm góp phần bảo vệ môi trường" được thực hiện dựa trên tính cấp thiết cao. Bùn đỏ là chất thải nguy hại phát sinh từ quá trình sản xuất nhôm từ quặng bôxít, chứa hỗn hợp các ôxít kim loại và xút dư với giá trị pH rất cao, thường từ 11-12. Hiện tại, hai nhà máy nhôm Tân Rai và Nhân Cơ tại Tây Nguyên thải ra khoảng 1,05 tấn bùn đỏ khô cho mỗi tấn nhôm sản xuất.

Phương pháp xử lý thải ướt đang được áp dụng bộc lộ nhiều nhược điểm như chiếm dụng diện tích đất lớn, thu hồi xút loãng thấp, tiềm ẩn nguy cơ ô nhiễm môi trường cao (rò rỉ, vỡ đập, ô nhiễm nước ngầm) và chi phí hoàn thổ lớn. Với kế hoạch nâng công suất sản xuất nhôm lên 2.000.000 tấn/năm sau năm 2030, các hồ chứa bùn đỏ hiện tại sẽ cạn kiệt, đòi hỏi phải tìm kiếm địa điểm đổ thải mới, gây áp lực lớn về đất đai và môi trường.

Công nghệ tạo hạt tầng sôi (Fluidized-bed homogeneous crystallization - FBHC) nổi lên như một giải pháp tiên tiến để thu hồi các chất có giá trị từ chất thải, nhưng việc nghiên cứu chuyên sâu ứng dụng công nghệ này vào thu hồi kim loại trong bùn đỏ chưa được quan tâm trên thế giới, và hoàn toàn chưa được đề cập tại Việt Nam. Do đó, nghiên cứu này là cần thiết nhằm xây dựng và thử nghiệm quy trình công nghệ FBHC để thu hồi sắt, nhôm từ bùn đỏ, góp phần thúc đẩy kinh tế tuần hoàn, giảm chi phí xử lý, tránh lãng phí tài nguyên, và tăng hiệu quả kinh tế lẫn bảo vệ môi trường trong hoạt động sản xuất nhôm ở Việt Nam.

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1. Mục tiêu tổng quát

Xây dựng cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc áp dụng công nghệ kết tinh đồng thể tầng sôi (FBHC) trong thu hồi sắt (Fe) và nhôm (Al) từ bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm tại Việt Nam, góp phần giảm thiểu chất thải và phát triển mô hình kinh tế tuần hoàn trong ngành khai thác khoáng sản.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Xây dựng và thử nghiệm được quy trình công nghệ FBHC để thu hồi Fe và Al trong bùn đỏ từ quá trình sản xuất nhôm tại tỉnh Lâm Đồng.

- Đánh giá được các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình chạy mô hình thử nghiệm sử dụng công nghệ FBHC để thu hồi Fe, Al từ dung dịch hòa tách bùn đỏ.

- Xác định hiệu suất thu hồi và thành phần cấu trúc sản phẩm Fe, Al sau khi được thu hồi.

- Đánh giá được hiệu quả BVMT và tiềm năng ứng dụng công nghệ FBHC thu hồi Fe và Al trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm tại tỉnh Lâm Đồng.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Thành phần kim loại trong bùn đỏ và khả năng thu hồi Fe, Al trong bùn đỏ của 02 Nhà máy Nhôm Tân Rai và Nhà máy Nhôm Nhân Cơ tại tỉnh Lâm Đồng.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

- Phạm vi không gian: Nghiên cứu hiện trường tại các hồ chứa bùn đỏ của Nhà máy Nhôm Tân Rai (tại xã Bảo Lâm 1) và Nhà máy Nhôm Nhân Cơ (tại xã Nhân Cơ), tỉnh Lâm Đồng. Các hoạt động phân tích và thí nghiệm được thực hiện tại Phòng Công nghệ Xanh và Phân tích Môi trường, Viện Tài nguyên và Môi trường, Đại học Quốc gia Hà Nội, cơ sở tại Hòa Lạc.

- Phạm vi thời gian: Luận án sử dụng các chuỗi số liệu thống kê về tình hình phát sinh và quản lý bùn đỏ tại 02 Nhà máy Nhôm Tân Rai và Nhân Cơ tại tỉnh Lâm Đồng trong giai đoạn 2020-2025. Các đợt khảo sát thực địa, lấy mẫu bùn đỏ và thực hiện các hoạt động phân tích, thí nghiệm từ 2022-2024.

- Phạm vi về khoa học: Phạm vi khoa học giới hạn ở việc phân tích đặc điểm và thành phần bùn đỏ, xác định các dạng tồn tại của Fe và Al, đồng thời xây dựng và thử nghiệm quy trình công nghệ tạo hạt tầng sôi kết tinh đồng thể (FBHC) nhằm thu hồi Fe và Al ở quy mô phòng thí nghiệm. Nghiên cứu chưa mở rộng đến quy mô công nghiệp mà tập trung đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất thu hồi và khả năng ứng dụng công nghệ theo hướng bảo vệ môi trường, góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho tái sử dụng bùn đỏ và thúc đẩy định hướng kinh tế tuần hoàn trong ngành công nghiệp nhôm.

4. CÂU HỎI NGHIÊN CỨU

- Thực trạng phát sinh, công tác quản lý và xử lý bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm tại 02 nhà máy nhôm Tân Rai và Nhân Cơ hiện nay như thế nào?

- Thành phần hóa học và hàm lượng Fe, Al trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm tại 02 nhà máy Tân Rai và Nhân Cơ là bao nhiêu?

- Công nghệ FBHC có thể được thiết kế và tối ưu ra sao để thu hồi Fe và Al từ bùn đỏ ở quy mô phòng thí nghiệm? Những yếu tố nào ảnh hưởng đến áp dụng quy trình công nghệ này?

- Việc áp dụng công nghệ FBHC trong xử lý bùn đỏ mang lại hiệu quả khoa học và tiềm năng thực tiễn như thế nào trong định hướng kinh tế tuần hoàn và bảo vệ môi trường?

5. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

- Nội dung 1: Nghiên cứu cơ sở lý luận và thực tiễn phát sinh, quản lý bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm và những rủi ro về môi trường.

- Nội dung 2: Phân tích thành phần hóa học, đánh giá hàm lượng Fe, Al trong bùn đỏ của quá trình sản xuất tại hai nhà máy nhôm Tân Rai và Nhân Cơ.

- Nội dung 3: Phân tích, đánh giá các công nghệ xử lý thu hồi Fe, Al đã được nghiên cứu trên thế giới và ở Việt Nam.

- Nội dung 4: Nghiên cứu xây dựng quy trình công nghệ FBHC để thu hồi Fe và Al trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm.

- Nội dung 5: Thiết kế và vận hành mô hình thí nghiệm thu hồi Fe và Al trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm trong điều kiện phòng thí nghiệm.

- Nội dung 6: Phân tích, đánh giá yếu tố ảnh hưởng và hiệu quả BVMT của công nghệ FBHC thu hồi Fe và Al trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm.

- Nội dung 7: Đề xuất giải pháp ứng dụng công nghệ FBHC để thu hồi Fe và Al trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm tại tỉnh Lâm Đồng góp phần BVMT.

6. NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

Luận án này xác định công nghệ Kết tinh tạo hạt đồng thể tăng sôi (FBHC) là một giải pháp trực tiếp và đột phá để lấp đầy khoảng trống nghiên cứu đã được xác định. Một số tính mới trong Luận án này gồm có:

- Đã xây dựng và kiểm chứng quy trình hòa tách sắt, nhôm từ bùn đỏ bằng axit sunfuric kết hợp oxy hóa với các điều kiện hòa tách là H_2SO_4 đặc 37%, bổ sung H_2O_2 tỷ lệ 1:5, tốc độ khuấy 150 rpm và nhiệt độ phản ứng là 75°C ;

- Đã xác định được các dạng tồn tại chính của Fe, Al trong bùn đỏ và các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hòa tách Fe, Al từ bùn đỏ nhằm tăng hiệu quả của quá trình thu hồi, gồm giá trị pH, tỷ lệ mol $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Al}^{3+}]$, tốc độ khuấy và tải trọng bề mặt.

- Đã xây dựng được quy trình công nghệ FBHC thu hồi Fe và Al trong bùn đỏ từ quá trình sản xuất nhôm tại tỉnh Lâm Đồng, với hiệu suất thu hồi tương ứng đạt 99,9% ở pH tối ưu 3,5 - 4,0 và 99,6% ở giá trị pH tối ưu 6,0 - 7,0 và trong thời gian lưu thủy tối ưu là 20 phút.

Luận án này khẳng định đóng góp khoa học quan trọng khi là nghiên cứu đầu tiên đề xuất và kiểm chứng việc ứng dụng quy trình FBHC hai giai đoạn để thu hồi chọn lọc sắt và nhôm từ bùn đỏ trong bối cảnh Việt Nam.

7. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ THỰC TIỄN CỦA LUẬN ÁN

7.1. Ý nghĩa khoa học

Kết quả nghiên cứu của luận án đã góp phần bổ sung và hoàn thiện giải pháp công nghệ xử lý bùn đỏ theo hướng thu hồi và tái sử dụng giá trị tài nguyên của bùn đỏ, góp phần thúc đẩy phát triển kinh tế tuần hoàn và tăng cường BVMT trong hoạt động sản xuất nhôm tại tỉnh Lâm Đồng.

7.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu của luận án cung cấp cơ sở khoa học cho cơ quan quản lý và 02 Nhà máy Nhôm Tân Rai và Nhân Cơ tham khảo để định hướng phương án công nghệ xử lý bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm theo hướng thu hồi và tái sử dụng giá trị tài nguyên, nhằm thúc đẩy phát triển mô hình kinh tế tuần hoàn, nâng cao hiệu quả kinh tế và BVMT.

8. CẤU TRÚC CỦA LUẬN ÁN

Ngoài phần mở đầu, kết luận và kiến nghị, tài liệu tham khảo và phụ lục, luận án được cấu trúc trong 03 chương chính, bao gồm:

- Chương 1: Tổng quan vấn đề nghiên cứu
- Chương 2: Cơ sở lý luận và phương pháp nghiên cứu
- Chương 3: Kết quả nghiên cứu và thảo luận.

Chương 1. TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Hiện trạng phát sinh và quản lý bùn đỏ trên thế giới

1.1.1. Quặng bôxít và công nghệ sản xuất Alumin

Quặng bôxít là nguyên liệu đầu vào chính để sản xuất nhôm (Al). Bôxít là khoáng vật được hình thành nhờ quá trình phong hóa các đá giàu Al, được tìm thấy chủ yếu ở các vùng nhiệt đới và cận nhiệt đới. Các khoáng vật chính bao gồm gibbsite, boehmite và diaspor. Theo Báo cáo của Cục Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ (USGS) năm 2023, trữ lượng bôxít toàn cầu ước tính khoảng 55 – 75 tỷ tấn, trong đó khu vực Châu Phi có trữ lượng lớn nhất (khoảng 32%). Việt Nam đứng thứ hai thế giới về trữ lượng quặng bôxít nguyên khai, với khoảng 5.800 triệu tấn, chỉ đứng sau Guinea (7.400 triệu tấn).

Khoảng 90% lượng alumin sản xuất trên thế giới hiện nay vẫn sử dụng công nghệ Bayer. Quy trình này sử dụng NaOH để hòa tan ôxít Al trong quặng bôxít, tạo ra natri aluminat, còn lại cặn không hòa tan chính là bùn đỏ (chủ yếu là các ôxít Fe, Ti, Si). Sản lượng alumin toàn cầu năm 2023 đạt khoảng 141,8 triệu tấn. Bốn nước sản xuất lớn nhất là Trung Quốc, Australia, Brazil và Ấn Độ, chiếm khoảng 80-82% tổng sản lượng toàn cầu.

1.1.2. Hiện trạng phát sinh bùn đỏ

Với sự gia tăng sản lượng alumin, khối lượng bùn đỏ phát sinh cũng tăng nhanh chóng, tạo ra thách thức lớn về môi trường. Bùn đỏ mang màu đỏ đặc trưng do hàm lượng Fe bị ôxy hóa, có thể chiếm đến 60% khối lượng bùn. Với công nghệ Bayer, để sản xuất ra 01 tấn alumin, trung bình thải ra 1,25 - 1,5 tấn bùn đỏ. Năm 2023, các nhà máy alumin trên thế giới đã thải ra khoảng 177,25 triệu tấn bùn đỏ, tuy nhiên chỉ khoảng 15% lượng bùn đỏ này được tái sử dụng, phần lớn còn lại được đưa đến các hồ chứa để lưu giữ. Ước tính hiện có hơn 4 tỷ tấn bùn đỏ đã tích lũy trên toàn thế giới trong các hồ chứa đã ngừng hoặc đang hoạt động.

1.1.3. Thành phần và tính chất lý hóa

Bùn đỏ là một hỗn hợp các hạt rắn dị thể, có kích thước nhỏ, mịn. Diện tích bề mặt các hạt ảnh hưởng lớn đến các tính chất bên trong của hạt cũng như giữa các hạt với nhau, khi có thành phần nước và các muối hòa tan. Đặc tính bề mặt bùn đỏ phụ thuộc vào bản chất của hạt khoáng vật chứa trong đó.

Các khoáng dư còn lại của quặng bôxít thường có diện tích bề mặt thay đổi theo giá trị pH (các ôxít Fe, Al, Ti, Si). Đồng thời, khoáng vật trong bùn đỏ, như sodalite luôn tích điện âm, không phụ thuộc vào giá trị pH.

Tính kiềm cao: Bùn đỏ có độ pH rất cao, dao động từ 9,2-12,8. Do đó, bùn đỏ được xếp vào loại chất thải nguy hại, có nguy cơ cao gây ô nhiễm môi trường.

Tính chất vật lý: Bùn đỏ có kích thước hạt rất mịn (trung bình 2-100 μm), khó đông cứng. Kích thước hạt nhỏ khiến bùn khô dễ phát tán bụi, gây ô nhiễm không khí.

1.1.4. Rủi ro Môi trường

Bùn đỏ gây ra nhiều rủi ro nghiêm trọng nếu không được quản lý chặt chẽ:

- ✓ Lãng phí tài nguyên và chiếm dụng đất
- ✓ Ô nhiễm nguồn nước
- ✓ Ô nhiễm không khí
- ✓ Biến đổi đất đai

1.1.5. Phương thức quản lý và thách thức

Phương pháp phổ biến nhất hiện nay là lưu trữ trong các hồ chứa có thiết kế đặc biệt. Các phương pháp khác bao gồm sử dụng làm vật liệu xây dựng (gạch, bê tông), xử lý hóa học (trung hòa pH), xử lý sinh học, hoặc sử dụng trong trồng trọt (sau xử lý). Tuy vậy một số thách thức đặt ra bao gồm: chi phí xử lý và lưu trữ cao; thiếu cơ sở hạ tầng và công nghệ phù hợp để tái chế hiệu quả; khó khăn trong việc giám sát và kiểm soát hoạt động liên quan đến bùn đỏ.

1.1.6. Thảm họa môi trường điển hình

Sự cố Ajka, Hungary (04/10/2010) là thảm họa điển hình do bùn đỏ gây ra, khi đập hồ chứa tại Nhà máy alumina Ajkai Timföldgyár bị vỡ. Hậu quả là khoảng 1,9 triệu m^3 bùn đỏ đã tràn ra môi trường, làm ngập lụt và ô nhiễm nghiêm trọng thị trấn Devecser và hai ngôi làng lân cận. Sự cố này đã gây ra 10 người chết, 123 người bị thương, và thiệt hại ước tính hàng triệu USD. Đây được đánh giá là một trong những thảm họa sinh thái nghiêm trọng nhất trong lịch sử Hungary và Châu Âu.

1.2. Hiện trạng sản xuất alumin, phát sinh và quản lý bùn đỏ tại Việt Nam

1.2.1. Tiềm năng bôxít ở Việt Nam

Việt Nam đứng thứ hai thế giới về trữ lượng quặng bôxít nguyên khai, ước tính khoảng 5.800 triệu tấn, chỉ đứng sau Guinea (7.400 triệu tấn). Quặng bôxít tập trung chủ yếu ở Tây Nguyên (chiếm 91% trữ lượng toàn quốc). Khu vực Đắk Nông (nay thuộc tỉnh Lâm Đồng) chứa khoảng 1.440 triệu tấn, chiếm 60% trữ lượng Tây Nguyên.

Quặng bôxít ở Việt Nam được đánh giá có chất lượng ở mức trung bình. Hai loại quặng chính là bôxít nguồn gốc trầm tích (ở miền Bắc) và bôxít nguồn gốc phong hóa laterit từ đá bazan (chủ yếu ở Tây Nguyên). Trữ lượng bôxít khổng lồ này nếu được khai thác hết để sản xuất alumin, lượng bùn đỏ sinh ra có thể lên tới khoảng 1,45 tỷ tấn, đặt ra nhu cầu cấp thiết về một chiến lược quản lý dài hạn và bền vững.

1.2.2. Hoạt động của Nhà máy Alumin Tân Rai và Nhân Cơ

Hiện có 02 Nhà máy Alumin thuộc Tập đoàn Công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam (Vinacomin) tại tỉnh Lâm Đồng: (i) Nhà máy Alumin Tân Rai (huyện Bảo Lộc, tỉnh Lâm Đồng) hoạt động từ năm 2011; (ii) Nhà máy Alumin Nhân Cơ (huyện Đắk R'lấp, tỉnh Đắk Nông, nay thuộc tỉnh Lâm Đồng) hoạt động từ năm 2014. Công suất thiết kế giai đoạn I của mỗi nhà máy là 650.000 tấn alumin/năm. Cả hai nhà máy đã hoạt động vượt công suất thiết kế (Tân Rai đạt 740.000 tấn năm 2023; Nhân Cơ đạt 115% công suất từ quý I/2021). Tổng sản lượng đạt hơn 1,3 triệu tấn/năm.

1.2.3. Công nghệ sản xuất Alumin

Cả hai nhà máy đều sử dụng công nghệ Bayer, được đánh giá là hiện đại và tiên tiến, phù hợp với quặng bôxít dạng gibbsite ở Lâm Đồng và đạt trình độ quốc tế. Quy trình gồm hai giai đoạn chính:

✓ Tuyển quặng: Quặng bôxít nguyên khai được sàng, đập nhỏ, rồi rửa sạch để loại bỏ khoáng sét và vật liệu mịn, thu được quặng bôxít tinh. Hiệu suất thu hồi tinh quặng đạt khoảng 48-50% quặng nguyên khai. Khoáng sét và vật liệu mịn tạo ra bùn đỏ, lắng ở hồ bùn thải quặng đuôi.

✓ Sản xuất Alumin: Tinh quặng từ kho chứa của nhà máy tuyển bôxít được chuyển đến kho chứa của nhà máy alumin bằng băng tải. Giai đoạn này được thực hiện theo nguyên lý công nghệ Bayer dựa trên tính chất của Al khi phản ứng với NaOH..

1.2.4. Hiện trạng phát sinh và quản lý bùn đỏ

Để sản xuất ra 01 tấn alumin, trung bình thải ra khoảng 1,05 tấn bùn đỏ khô. Hai nhà máy đã chuyển sang sử dụng công nghệ thải ướt do đặc trưng khí hậu ở Tây Nguyên (mùa mưa tập trung). Bùn đỏ được bơm ra hồ lắng, loãng được thu hồi qua lớp lọc dưới đáy hồ và qua ngưỡng tràn để tái sử dụng một phần hoặc xử lý trung hòa trước khi xả thải.

Nhà máy Alumin Nhân Cơ đang đối mặt với việc hồ bùn đỏ số 1 gần đầy, vượt sức chứa thiết kế. Theo tính toán, nếu tiếp tục thải ướt, Nhà máy Nhân Cơ sẽ sử dụng hết hồ bùn đỏ số 2 vào năm 2034, và từ năm 2035 phải tìm vị trí mới để đổ thải bùn đỏ ướt. Nhà máy Tân Rai cũng đang thải vào khoang số 7 và cần đầu tư khoang mới từ năm 2029.

1.2.5. Thành phần hóa học và đặc điểm bùn đỏ

Theo kết quả phân tích thành phần chính của bùn đỏ tại 02 Nhà máy Alumin Tân Rai và Nhân Cơ của tác giả Lưu Đức Hải cho thấy hàm lượng Fe_2O_3 trong bùn đỏ rất cao và tương đương nhau, tại Nhà máy Alumin Tân Rai đạt 46,41% và tại Nhà máy Alumin Nhân Cơ đạt 46,32%; hàm lượng Al_2O_3 cũng rất cao, tại Nhà máy Alumin Tân Rai đạt 16,91% và tại Nhà máy Alumin Nhân Cơ đạt 17,56%; hàm lượng SiO_2 tại Nhà máy Alumin Tân Rai đạt 6,61% và tại Nhà máy Alumin Nhân Cơ đạt 6,72%

Tính kiềm là một đặc điểm nổi bật của bùn đỏ. Bùn đỏ của 02 Nhà máy có pH cao, thường từ 11-12 hoặc 11-13. Cụ thể, bùn đỏ sau lọc tại Nhà máy Alumin Tân Rai có pH trung bình 11,61.

1.3. Những vấn đề môi trường chính tại hai nhà máy alumin Tân Rai và Nhân Cơ

1.3.1. Tác động đến môi trường và sức khỏe cộng đồng

Các vấn đề môi trường chính tại hai nhà máy này chủ yếu xoay quanh đặc điểm của bùn đỏ (có tính kiềm cao và chứa hóa chất độc hại) và phương pháp quản lý thải ướt đang được áp dụng.

- ✓ Ô nhiễm nước ngầm
- ✓ Ô nhiễm không khí
- ✓ Ô nhiễm đất đai
- ✓ Tác động đến sức khỏe con người:

1.3.2. Các vấn đề môi trường liên quan đến sự cố và quản lý hồ chứa

Các sự cố tại hồ chứa bùn đỏ và bùn thải quặng đuôi đã gây ra lo ngại trong cộng đồng và làm lộ rõ những bất cập trong quản lý.

a) Tại Nhà máy Alumin Nhân Cơ: vào năm 2018, Khoang số 2 của hồ bùn đỏ đã xảy ra sự cố sụt lún và sạt trượt do mưa lớn kéo dài, mặc dù khoang này là khoang dự trữ và chưa đi vào hoạt động.

b) Tại Nhà máy Alumin Tân Rai: vào tháng 10 năm 2014, Nhà máy Alumin Tân Rai đã xảy ra sự cố vỡ đê quai hồ thải quặng đuôi, làm tràn khoảng 20.000 m³ nước và bùn ra ngoài.

1.4. Tổng quan tình hình nghiên cứu xử lý bùn đỏ theo hướng thu hồi sắt và nhôm

1.4.1. Tình hình nghiên cứu trên thế giới

Từ những năm 1950 của thế kỷ XX, các nhà khoa học trên thế giới đã tiến hành các nghiên cứu xử lý và sử dụng bùn đỏ. Trong đó, các phương pháp khác nhau đã được thử nghiệm để tách Fe từ bùn đỏ, như các phương pháp vật lý, hóa học, thủy luyện và hỏa luyện. Các phương pháp vật lý như tách từ tính và tuyển nổi, cùng với các phương pháp hóa học và thủy luyện như ngâm axit, thường gặp phải những trở ngại, như tỷ lệ thu hồi Fe thấp và tạo ra nước thải có tính axit.

Nhìn chung, các phương pháp xử lý bùn đỏ đã được nghiên cứu có thể chia thành các nhóm:

- Thu hồi các nguyên tố kim loại từ bùn đỏ, tập trung vào các kim loại và ôxít kim loại (Al₂O₃, Na₂O, Fe, Mn, Ti...), kim loại hiếm (galli, urani, yttri, scandi).

- Sử dụng bùn đỏ làm vật liệu xây dựng (gạch không nung, đất san nền, xi măng, bê tông, gốm thủy tinh, vật liệu chống ăn mòn), làm thuốc nhuộm.

- Sử dụng bùn đỏ làm chất độn, xử lý nước (loại bỏ flo, nitrat, photpho, ion kim loại, màu, chất hữu cơ, vi sinh vật).

- Sử dụng bùn đỏ làm chất hấp phụ, làm sạch khí độc và làm chất xúc tác (xúc tác hydro hóa, khử clo, phản ứng hydrodechlorination, oxy hóa hydrocarbon).

1.4.2. Tình hình nghiên cứu tại Việt Nam

Các Nhà máy Alumin Tân Rai và Nhân Cơ chuyển sang sử dụng công nghệ thải ướt, phương pháp này bộc lộ nhiều nhược điểm (chiếm dụng đất lớn, lượng NaOH thu hồi thấp, nguy cơ ô nhiễm cao). Tương tự như thế giới, các nghiên cứu tại Việt Nam cũng chủ yếu ở quy mô phòng thí nghiệm hoặc pilot.

a) Thu hồi kim loại: Công trình sản xuất sắt xộp và thép quy mô pilot do Vũ Đức Lợi (Viện Hóa học) chủ trì đã sử dụng 20 tấn bùn đỏ Tân Rai để thu được 1,8 tấn thép.

b) Ứng dụng vật liệu xây dựng và khác: bài toán xử lý bùn đỏ tại Việt Nam đã nhận được sự quan tâm đặc biệt, nhưng đến nay, chưa có giải pháp công nghệ tối ưu có hiệu quả cả về kinh tế và môi trường để áp dụng rộng rãi.

1.5. Giới thiệu công nghệ kết tinh tạo hạt đồng thể tầng sôi và tình hình nghiên cứu ứng dụng

1.5.1. Nguyên lý công nghệ kết tinh tạo hạt đồng thể tầng sôi (FBHC)

✓ *Định nghĩa và nguyên lý:* Công nghệ FBHC là một giải pháp tiên tiến được Lê Văn Giang và cộng sự nghiên cứu và phát triển từ công nghệ kết tinh tạo hạt tầng sôi (FBC) thông thường. Bản chất của FBHC là dựa trên quá trình kết tinh trong điều kiện dòng nước thải được tuần hoàn liên tục trong tháp phản ứng.

✓ *Mục đích:* Công nghệ này được thiết kế để thu hồi các ion kim loại, ion vô cơ hoặc một số gốc muối (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} ...) tồn tại trong nước thải hoặc bùn thải.

✓ *Cơ chế hoạt động:*

+ Dung dịch chứa ion cần thu hồi (sau khi phá hủy và hòa tách bùn đỏ bằng axit) được bơm từ dưới lên trong cột phản ứng, tạo ra mạch nước tuần hoàn.

+ Hệ thống duy trì một vùng kết tinh tăng cường dưới dạng hạt. Nhờ sự va đập mạnh và liên tục trong dòng chảy tuần hoàn, các hạt tinh thể phát triển kết dính.

+ Khi các hạt kết tinh đạt kích thước đủ lớn (thường từ 1 - 2 mm), chúng lắng xuống đáy tháp phản ứng và được thu hồi để tái sử dụng hoặc thải bỏ.

+ Ưu điểm của sản phẩm: Các hạt tinh thể thu được có hàm lượng nước rất thấp, độ tinh khiết và chất lượng cao, đáp ứng yêu cầu để tái sử dụng cho các quy trình sản xuất khác.

✓ *Phản ứng hóa học*: FBHC được áp dụng cho nhiều quá trình kết tủa khác nhau.

✓ *Các yếu tố kiểm soát*: hiệu suất vận hành FBHC phụ thuộc vào việc kiểm soát chính xác các thông số như độ siêu bão hòa, pH của dung dịch, và vận tốc dòng chảy (Upflow velocity).

1.5.2 Khả năng ứng dụng công nghệ FBHC để thu hồi tài nguyên

FBHC không tạo ra các chất ô nhiễm thứ cấp (bùn thải) trong suốt quá trình xử lý, đây là ưu điểm lớn nhất, giúp giảm đáng kể chi phí và diện tích xây dựng công trình, cũng như thời gian xử lý, do các bước keo tụ, kết tủa và lắng của công nghệ hóa lý thông thường trở nên không cần thiết, giúp giảm chi phí vận hành do hạn chế sử dụng hóa chất đầu vào. Nó phù hợp với định hướng thúc đẩy phát triển nền kinh tế tuần hoàn, kinh tế xanh và kinh tế ít phát thải.

1.5.3. Lý do lựa chọn nghiên cứu áp dụng công nghệ FBHC

Công nghệ FBHC được chọn vì hiệu suất thu hồi vượt trội (gần như tuyệt đối, >99%) trong thời gian lưu thủy lực ngắn (< 30 phút), tạo ra các hạt tinh thể $\text{Fe}(\text{OH})_3$ và bayerit $\text{Al}(\text{OH})_3$ có độ tinh khiết cao. Ưu điểm cốt lõi là loại bỏ hoàn toàn bùn thải thứ cấp khó xử lý của phương pháp kết tủa truyền thống, chuyển hóa ion kim loại hòa tan trực tiếp thành sản phẩm rắn có giá trị. Quy trình FBHC giúp giảm đáng kể chi phí đầu tư xây dựng và diện tích nhà máy nhờ thời gian phản ứng cực nhanh. Công nghệ này là một quy trình sạch, tiêu thụ năng lượng thấp, hoàn toàn phù hợp với định hướng kinh tế tuần hoàn của Việt Nam.

Chương 2. CÁCH TIẾP CẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cách tiếp cận

Luận án tiếp cận vấn đề nghiên cứu theo ba hướng chính để đảm bảo tính toàn diện và bền vững:

- Tiếp cận phát triển bền vững (PTBV): đây là quan điểm xuyên suốt, định hướng cho toàn bộ quá trình nghiên cứu, nhằm giải quyết các bất cập và thiếu tính bền vững trong ngành công nghiệp khai thác và chế biến khoáng sản, đặc biệt là sản xuất nhôm tại Tây Nguyên.

- Tiếp cận kinh tế tuần hoàn: Luận án coi đây là một chiến lược đột phá để xử lý ô nhiễm chất thải và quản lý tài nguyên hiệu quả, hướng tới PTBV và giảm phát thải.

- Tiếp cận giá trị tài nguyên của bùn đỏ: Mặc dù bùn đỏ được phân loại là chất thải nguy hại, luận án khẳng định nó vẫn chứa nhiều thành phần có giá trị kinh tế và có thể tái sử dụng cho các mục đích khác sau khi loại bỏ hoặc giảm bớt các thành phần độc hại.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Luận án đã kết hợp các phương pháp truyền thống và hiện đại để thực hiện các nội dung nghiên cứu:

2.2.1. Phương pháp kế thừa và tổng hợp tài liệu thứ cấp

Luận án đã kế thừa có chọn lọc các công trình nghiên cứu đã công bố của các tác giả trong và ngoài nước.

2.2.2 Phương pháp khảo sát thực địa và lấy mẫu bùn đỏ

Nghiên cứu sinh đã thực hiện khảo sát thực địa tại Nhà máy Nhôm Nhân Cơ và Tân Rai. Mẫu bùn đỏ được lấy tại 5 vị trí khác nhau trong hồ chứa số 1 để đảm bảo tính đại diện cao. Kỹ thuật lấy mẫu tuân thủ TCVN 7538-2:2005 (ISO 10381-2:2002). Mẫu được lấy ở độ sâu 20 - 30 cm dưới bề mặt nhằm loại bỏ lớp bùn khô đã bị thay đổi tính chất

2.2.3 Phương pháp phân tích trong thí nghiệm

Các mẫu bùn đỏ được xử lý, gia công và phân tích tại Phòng Công nghệ xanh và Phân tích Môi trường, Viện Tài nguyên và Môi trường, Đại học Quốc gia Hà Nội.

✓ Hoạt động phân tích: Xác định nồng độ Al, Fe và các kim loại khác sau khi phân hủy mẫu hoàn toàn (để đánh giá hiệu suất hòa tách) và phân tích nồng độ trong dung dịch nước đầu vào/đầu ra của quá trình thu hồi.

✓ Thiết bị chính: Thiết bị phân tích ICP/MS.

✓ Xử lý mẫu: Quy trình tạo mẫu tổ hợp từ các mẫu riêng lẻ để đảm bảo tính đồng nhất. Mẫu bùn được xử lý để xác định các kim loại theo US EPA Method 3051A.

2.2.4. Phương pháp thiết kế và chạy mô hình thực nghiệm thu hồi sắt và nhôm trong bùn đỏ

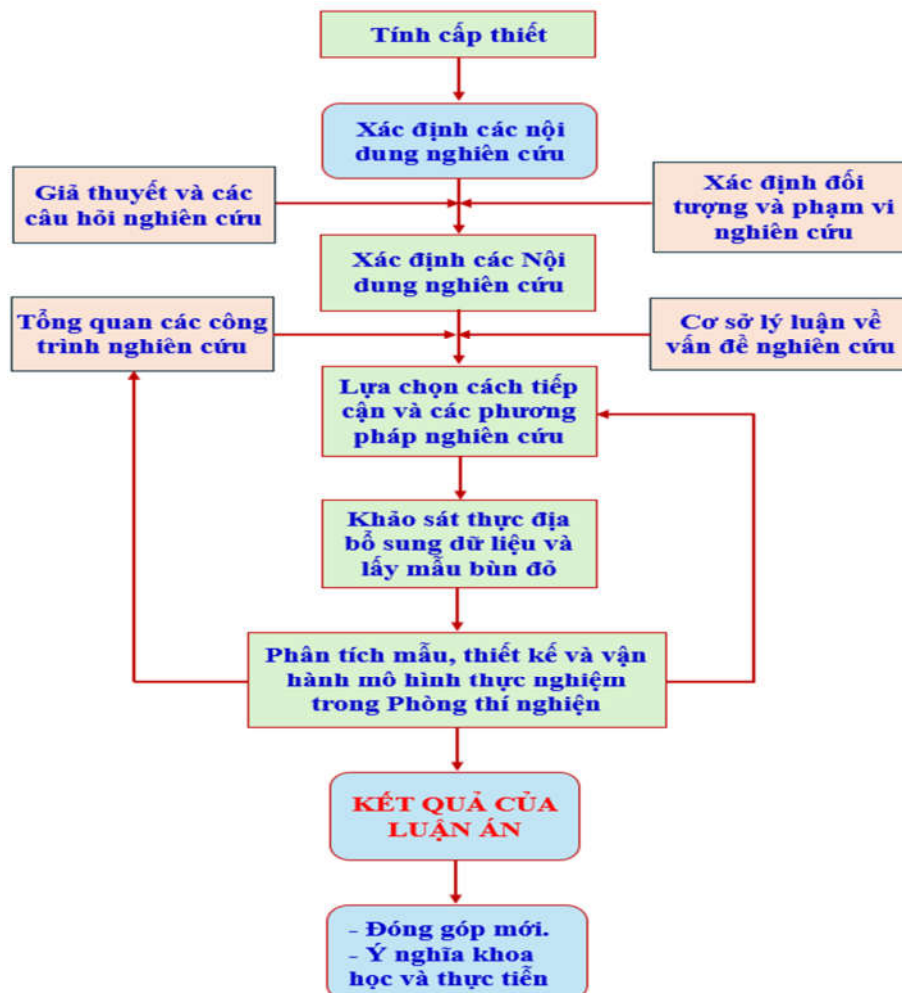
2.2.5. Phương pháp phân tích hiệu quả môi trường và các yếu tố ảnh hưởng

2.2.6. Phương pháp chuyên gia

2.2.7. Phương pháp xử lý thống kê

2.2.8. Phương pháp phân tích chi phí lợi ích

2.3. Sơ đồ quy trình nghiên cứu



Chương 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hàm lượng và các dạng tồn tại của sắt, nhôm trong bùn đỏ

Nghiên cứu đã phân tích mẫu bùn đỏ thu thập từ Nhà máy Alumin Nhân Cơ, cho thấy hàm lượng các ôxít kim loại rất cao: Fe_2O_3 đạt 44,42% và Al_2O_3 đạt 19,73%. Ngoài ra, SiO_2 chiếm 13,41% và TiO_2 chiếm 7,25%.

- Các dạng tồn tại của sắt:

- + Hematite
- + Goethite
- + Magnetite

- Các dạng tồn tại của nhôm: Nhôm tồn tại trong nước dưới nhiều dạng phức chất thủy phân khác nhau, với sự phân bố phụ thuộc mạnh vào pH. Tốc độ hình thành kết tủa Al^{3+} cũng bị chi phối bởi pH.

3.2. Quy trình công nghệ kết tinh tạo hạt đồng nhất tầng sôi để thu hồi sắt, nhôm trong bùn đỏ

Luận án đề xuất một quy trình công nghệ tiềm năng về mặt kinh tế nhằm thu hồi trên 99% Fe và Al từ bùn đỏ thông qua hòa tách và kết tinh tạo hạt tầng sôi (FBHC). Quy trình sử dụng các hóa chất công nghiệp giá rẻ và dễ kiếm như axit sulfuric thải và amonia thải.

- Nguyên lý quy trình:

+ Hòa tách: Bùn đỏ được hòa tách bằng axit sulfuric thải để tạo ra dung dịch chứa Fe(III) và Al^{3+} .

+ Oxy hóa: Bổ sung H_2O_2 để oxy hóa hoàn toàn Fe(II) thành Fe(III) .

+ Kết tủa chọn lọc: Sử dụng amonia thải làm chất kết tủa. Dựa vào sự khác biệt về tích số tan (K_{sp}), ion Fe(III) và Al^{3+} được tách biệt thông qua quá trình kết tủa dần dần.

+ Sản phẩm và tái sử dụng: các sản phẩm kết tủa Fe và Al có thể được cung cấp cho nhà máy luyện thép và nhà máy luyện nhôm tương ứng; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ trong dung dịch mẹ có thể được sử dụng làm nguyên liệu sản xuất phân bón hóa học; phần cặn không tan sau phản ứng thủy nhiệt, giàu SiO_2 và TiO_2 , có thể được sử dụng tại các nhà máy vật liệu xây dựng.

3.3. Yếu tố ảnh hưởng tới quá trình thu hồi kim loại bằng phương pháp hòa tách và kết tủa hóa học thông thường

a) Ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hòa tách

Quá trình hòa tách được thực hiện bằng H_2SO_4 đặc 37% và oxy hóa bằng H_2O_2 , với tỉ lệ Rắn/Lỏng (S/L) là 1:5, tốc độ khuấy 150 rpm và nhiệt độ 75°C . Hiệu suất hòa tách Fe và Al tăng theo thời gian phản ứng. Kết quả sau 5 giờ phản ứng, hiệu suất hòa tách đạt 83% đối với Fe và 94,8% đối với Al. Nồng độ các kim loại chính trong dung dịch hòa tách sau 5 giờ phản ứng là: 423 mg/L đối với Fe và 339,5 mg/L đối với Al.

Việc kéo dài thời gian phản ứng làm tăng nguy cơ hòa tan Ti và các nguyên tố không mong muốn khác, điều này có thể ảnh hưởng đến độ chọn lọc nếu xử lý ở quy mô lớn.

b) Ảnh hưởng của pH đến độ hòa tan và thu hồi kim loại

Giá trị pH là yếu tố quyết định sự hòa tan và kết tủa của Fe và Al. Việc kiểm soát pH là yếu tố quan trọng quyết định hiệu suất thu hồi và chất lượng sản phẩm thu hồi.

Hiệu suất thu hồi Fe đạt lớn hơn 98% ở pH lớn hơn hoặc bằng 3,5. Khoảng pH từ 3,5 - 4,0 được xác định là tối ưu cho thu hồi Fe, đạt hiệu suất thu hồi lớn hơn 98,6% và độ tinh khiết vẫn duy trì trên 93,4%. Khoảng pH từ 6,0 - 7,0 được xác định là điều kiện tối ưu để thu hồi Al, đảm bảo hiệu suất cao (lớn hơn 95%) và độ tinh khiết thích hợp.

Phương pháp kết tủa hóa học thông thường có khả năng thu hồi chọn lọc Fe và Al theo từng giai đoạn pH. Ưu điểm của phương pháp này là dễ dàng tích hợp vào hệ thống trung hòa nước thải hiện có, với chi phí vận hành thấp nhờ sử dụng các chất kiềm phổ biến như Natri Hydroxit (NaOH) hoặc Amoniac (NH_3).

3.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến công nghệ kết tinh tạo hạt đồng nhất tầng sôi thu hồi sắt, nhôm trong bùn đỏ

Các thông số vận hành chính như pH, thời gian lưu thủy lực (HRT), tốc độ tải bề mặt (L) và tỷ lệ tuần hoàn ảnh hưởng mạnh mẽ đến hiệu suất thu hồi của FBHC.

- Ảnh hưởng của pH:

+ Đối với sắt (Fe^{3+}): Fe^{3+} kết tủa chủ yếu ở pH $4 \pm 0,1$. Ở pH này, hiệu suất thu hồi tổng (TR%) đạt tối ưu 99,45% và tỷ lệ kết tinh (CR%) đạt 94,23%. Khi pH tăng trên 6, CR% giảm đáng kể do hình thành các hạt nhỏ, nhẹ.

+ Đối với nhôm (Al^{3+}): Al^{3+} bắt đầu kết tủa đáng kể ở pH từ 6 đến 7 và có xu hướng tan trở lại ở pH từ 8,5 đến 9. pH tối ưu để thu hồi Al^{3+} là 9,5, tại đây tỷ lệ kết tinh (CR%) đạt đỉnh 98,10%. Việc kiểm soát pH chính xác ở mỗi bước xử lý là rất quan trọng để tối đa hóa hiệu quả và tính chọn lọc của quá trình thu hồi.

- Ảnh hưởng của thời gian lưu thủy lực (HRT):

+ Đối với sắt: HRT tối ưu để tối đa hóa cả hiệu suất kết tinh và thu hồi Fe^{3+} là khoảng 20 đến 30 phút (TR% đạt 99% và CR% đạt 94,34% ở 30 phút). HRT quá ngắn không đủ thời gian cho quá trình kết tinh hoàn tất.

+ Đối với nhôm: HRT ngắn thúc đẩy độ bão hòa quá mức cao và quá trình tạo nhân nhanh, tăng cường sự hình thành bayerit. CR% giảm mạnh (khoảng 45%) khi HRT vượt quá 10 phút.

- Ảnh hưởng của tốc độ tải bề mặt (L):

+ Đối với sắt: Tốc độ tải bề mặt tối ưu khoảng $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, tại đó TR% và CR% lần lượt đạt 99,34% và 92,22%. Khi L vượt quá $2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, CR% giảm đáng kể do hệ thống vượt quá khả năng kết tinh đồng nhất.

+ Đối với nhôm: TR% và CR% duy trì ở mức cao khi L trong khoảng $0,5\text{--}1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Khi L vượt quá $1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, CR% giảm mạnh do tích tụ hạt và va chạm.

- Ảnh hưởng của tỷ lệ tuần hoàn: đối với sắt: Tăng tỷ lệ tuần hoàn cải thiện TR% (từ 98,42% lên 99,89%), nhưng tỷ lệ quá cao lại ảnh hưởng tiêu cực đến CR% (giảm xuống 87,34% ở tỷ lệ 22). Tỷ lệ tuần hoàn tối ưu được xác định nằm trong khoảng từ 14 đến 18

3.5. Hiệu suất thu hồi và thành phần cấu trúc sản phẩm sắt, nhôm thu hồi

Công nghệ FBHC cho thấy hiệu suất thu hồi kim loại rất cao: gần 99,9% đối với sắt và 99,6% đối với nhôm chỉ trong thời gian vận hành ngắn (20

phút). Nồng độ kim loại còn lại trong nước thải sau xử lý luôn thấp hơn giới hạn quy định của tiêu chuẩn môi trường Việt Nam.

- Cấu trúc sản phẩm sắt ($\text{Fe}(\text{OH})_3$):

+ Hình ảnh SEM cho thấy các tinh thể hiđrôxít Fe có cấu trúc rõ ràng và đồng nhất, hạt hình cầu lớn với đường kính ước tính lên đến 1 μm .

+ Phổ EDS xác nhận thành phần chính là Fe (81,87%), O (11,88%) và P (6,25%).

+ Phổ FTIR biểu hiện các dải đặc trưng của nhóm H_2O và $-\text{OH}$, và liên kết Fe–OH.

+ Phổ XRD xác nhận sự hình thành pha $\text{Fe}(\text{OH})_3$ kết tinh.

- Cấu trúc sản phẩm nhôm ($\text{Al}(\text{OH})_3$):

+ Phổ XRD có các đỉnh sắc nét và rõ ràng, phù hợp rất tốt với chuẩn bayerite (JCPDS số 20-0011), xác nhận sự hình thành của bayerite có tính kết tinh cao. Không phát hiện đỉnh của boehmite hoặc gibbsite.

+ Phổ FTIR thể hiện các dải đặc trưng xác nhận sự hình thành bayerite.

+ Ảnh SEM cho thấy sự hình thành các viên hạt có dạng gần như hình cầu hoặc bán cầu, đường kính vài trăm micromet, với cấu trúc lõi-vỏ đặc trưng.

+ Phổ EDS xác nhận sự hiện diện của Al và O với tỷ lệ nguyên tử phù hợp với $\text{Al}(\text{OH})_3$, cho thấy sự phân bố đồng đều của các nguyên tố trong toàn bộ cấu trúc hạt

3.5. Đánh giá hiệu quả của công nghệ kết tinh tạo hạt đồng nhất tầng sôi trong thu hồi sắt, nhôm từ bùn đỏ

Công nghệ FBHC cho thấy hiệu suất vượt trội so với các kỹ thuật truyền thống như kết tủa hóa học, hấp phụ hay điện kết tủa.

- Hiệu quả kỹ thuật: FBHC đạt hiệu quả loại bỏ 99,89% đối với Fe^{3+} và 99,6% đối với Al^{3+} trong thời gian ngắn (20 phút), trong khi các kỹ thuật khác cần thời gian dài hơn và điều kiện khắc nghiệt hơn. Nồng độ kim loại sau xử lý (Fe: 0,94 mg/L, Al: 1,52 mg/L) đều thấp hơn ngưỡng cho phép xả thải theo quy chuẩn môi trường Việt Nam (2 mg-Fe/L và 0,2 mg-Al/L).

- Hiệu quả kinh tế:

- + Hệ thống FBHC giúp giảm thiểu lượng bùn thải sinh ra.
- + Chi phí tiêu thụ NaOH ước tính là 8,78 kg cho 1 m³ nước thải bùn đỏ.
- + Lợi nhuận ròng ước tính đạt khoảng 2,48 USD cho mỗi mét khối bùn đỏ được xử lý.
- + Nguồn thu chính đến từ việc tái sử dụng các viên Bayerite và Fe(OH)₃ làm vật liệu hấp phụ và xúc tác.

- Hiệu quả môi trường:

- + Không tạo ra các chất ô nhiễm thứ cấp (bùn thải) và thu hồi hầu hết các kim loại.
- + Giúp giảm chi phí và diện tích xây dựng công trình do không cần các bước keo tụ, kết tủa và lắng.
- + Giảm hoặc hạn chế sử dụng hóa chất đầu vào và không phát sinh thêm chi phí xử lý chất thải thứ cấp.
- + Trung hòa tính kiềm cao của bùn đỏ, giảm nguy cơ ô nhiễm nguồn nước và đất.
- + Cố định kim loại nặng trong cặn không tan hoặc thu hồi, giảm phát tán vào môi trường.
- + Có tiềm năng giảm lượng phát thải khí nhà kính tổng thể so với các phương pháp nhiệt luyện.
- + Biến chất thải thành tài nguyên có giá trị, đóng góp trực tiếp vào mô hình kinh tế tuần hoàn.

3.6. Tiềm năng ứng dụng và tính khả thi của công nghệ

Việc triển khai công nghệ FBHC tại Việt Nam đòi hỏi một lộ trình rõ ràng và sự phối hợp chặt chẽ giữa các bên.

- Định hướng thiết kế thử nghiệm:

- + Giai đoạn Lab-scale (đang thực hiện/hoàn thiện): Tập trung tối ưu hóa thông số kỹ thuật cho từng bước riêng lẻ và nghiên cứu động học kết tinh, hình thái hạt.

+ Giai đoạn Pilot-scale (1-3 năm): Xây dựng mô hình pilot tại một trong các nhà máy alumin (Nhân Cơ, Tân Rai) để xác minh quy trình liên tục, đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường ở quy mô bán công nghiệp.

+ Giai đoạn triển khai bán công nghiệp (3-5 năm): Xây dựng nhà máy quy mô bán công nghiệp, sản xuất sản phẩm với số lượng lớn để đánh giá thị trường thực tế và tối ưu chi phí.

+ Giai đoạn ứng dụng toàn ngành (trong 10 năm tới): Nhân rộng công nghệ tại tất cả các nhà máy alumin và thiết lập chuỗi giá trị hoàn chỉnh cho các sản phẩm thu hồi.

- Sản phẩm thu hồi dự kiến:

+ Oxit sắt: Hematit (Fe_2O_3) và Magnetit (Fe_3O_4), có thể dùng làm bột màu hoặc nguyên liệu luyện kim.

+ Nhôm hiđrôxít/ôxít: $\text{Al}(\text{OH})_3$ và Al_2O_3 , dùng làm nguyên liệu cho sản xuất nhôm kim loại, gốm sứ, vật liệu chịu lửa.

- Tính hiệu quả và khả thi:

+ Thách thức lớn nhất là chi phí đầu tư ban đầu cao.

+ Lợi ích gián tiếp như giảm chi phí lưu trữ bùn đỏ, tránh phạt môi trường, và nâng cao trách nhiệm xã hội của doanh nghiệp là rất quan trọng. Cần có các cơ chế chính sách để chuyển hóa các lợi ích môi trường và xã hội thành giá trị kinh tế.

- So sánh với các công nghệ khác: FBHC nổi bật với chất lượng sản phẩm cao, giảm thiểu chất thải và thân thiện với môi trường. Mặc dù chi phí đầu tư ban đầu cao và vận hành phức tạp hơn, nó là ứng cử viên lý tưởng cho "công nghiệp hóa xanh" nếu có sự hỗ trợ chính sách.

3.7. Vấn đề xử lý chất thải thứ cấp trong quá trình hòa tách và thu hồi kim loại

Bã sau hòa tách rất giàu TiO_2 và SiO_2 , được định hướng là nguồn tài nguyên thứ cấp ưu tiên sử dụng làm vật liệu xây dựng (phụ gia xi măng, gạch không nung) và tiềm năng thu hồi Titan. Dòng nước thải sau khi thu hồi Fe và Al vẫn còn tính axit và chứa muối hòa tan nồng độ cao (Na_2SO_4). Nước

thải này cần được xử lý đa giai đoạn, trước tiên là trung hòa bằng kiềm ($\text{Ca(OH)}_2/\text{NaOH}$) để đưa pH về trung tính và kết tủa kim loại sót. Để loại bỏ triệt để các muối hòa tan còn lại và thu hồi nước chất lượng cao, các công nghệ khử muối tiên tiến như thẩm thấu ngược (RO) được xem xét để hướng tới mục tiêu không xả thải lỏng (ZLD).

3.8. Sự biến động của nguyên liệu và những ảnh hưởng

Phần này tập trung vào sự biến động cố hữu trong thành phần bùn đỏ, xuất phát từ tính không đồng nhất của quặng bô-xít và sự điều chỉnh trong quy trình Bayer, làm thay đổi đáng kể hàm lượng Fe_2O_3 (44,42% - 46,41%) và Al_2O_3 (16,91% - 19,73%). Sự biến động này gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến quy trình xử lý tiếp theo. Cụ thể, trong giai đoạn hòa tách bằng axit, nếu hàm lượng SiO_2 hòa tan vượt quá ngưỡng (100-120 mg/L), axit silicic sẽ trùng hợp tạo thành gel silica. Gel silica này gây ra các thách thức kỹ thuật như tắc nghẽn thiết bị và cản trở việc tách pha lỏng-rắn. Đối với cột FBHC, sự biến động làm mất ổn định độ siêu bão hòa, dẫn đến các tạp chất như Mg, Ti, Zn bị đồng kết tủa với Fe(OH)_3 và Al(OH)_3 , làm giảm độ tinh khiết và giá trị thương mại của sản phẩm thu hồi.

3.9. Tiềm năng ứng dụng và tính khả thi của công nghệ

Công nghệ đã chứng minh hiệu suất cao và tạo ra sản phẩm (hydrôxít Fe và bayerit Al(OH)_3) có độ tinh khiết cao, hình thái hạt đồng nhất, phù hợp làm nguyên liệu thương mại (luyện kim, xúc tác). Thách thức kỹ thuật lớn nhất khi mở rộng quy mô là tích hợp các công đoạn tuần tự (hòa tách, trung hòa, FBHC) và thiết lập hệ thống kiểm soát quy trình mạnh mẽ để ứng phó với sự biến động cố hữu của thành phần bùn đỏ. Về mặt kinh tế, mặc dù chi phí đầu tư ban đầu cao hơn, nhưng công nghệ này hứa hẹn lợi nhuận dài hạn nhờ doanh thu từ sản phẩm và tiết kiệm chi phí khổng lồ cho việc xử lý và chôn lấp bùn thải thứ cấp. Công nghệ FBHC là giải pháp đột phá, an toàn, hoàn toàn phù hợp với định hướng kinh tế tuần hoàn của Việt Nam, biến chất thải nguy hại thành tài nguyên có giá trị.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. KẾT LUẬN

Luận án “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ tạo hạt tầng sôi để thu hồi sắt, nhôm trong bùn đỏ của quá trình sản xuất nhôm góp phần bảo vệ môi trường” đã giải quyết một trong những thách thức môi trường cấp bách nhất của ngành công nghiệp khai khoáng Việt Nam, đó là xử lý và tận dụng nguồn thải bùn đỏ nguy hại từ các nhà máy nhôm tại Tây Nguyên. Luận án đã hoàn thành các mục tiêu nghiên cứu đề ra, cung cấp cái nhìn toàn diện về thực trạng quản lý bùn đỏ và xây dựng thành công quy trình công nghệ mới, chứng minh được tính khả thi trong việc thu hồi tài nguyên từ chất thải. Các kết quả chính đạt được bao gồm:

- Các phân tích cho thấy khối lượng bùn đỏ phát sinh tại hai Nhà máy Nhôm Tân Rai và Nhân Cơ (Lâm Đồng) đã vượt quá 40 triệu tấn (ước tính đến cuối năm 2024), với tốc độ tăng trưởng ổn định nhưng quản lý vẫn chủ yếu dựa trên phương pháp lưu giữ thải ướt trong hồ chứa.

- Các công nghệ xử lý bùn đỏ hiện tại (như sản xuất vật liệu xây dựng, san lấp) vẫn chưa giải quyết được bài toán bùn đỏ một cách toàn diện do chỉ xử lý được một phần nhỏ tổng lượng bùn thải và không tối ưu việc thu hồi các nguyên tố có giá trị. Phương pháp lưu giữ hiện nay gây lãng phí tài nguyên (Fe, Al, Ti) có trong bùn đỏ, tốn kém chi phí vận hành hồ chứa và chiếm dụng diện tích đất đai lớn. Nghiêm trọng hơn, việc lưu giữ khối lượng lớn bùn đỏ tiềm ẩn nguy cơ cao gây ô nhiễm môi trường (đất, nước ngầm) và ảnh hưởng đến sức khỏe con người, đặc biệt trong các tình huống thiên tai (vỡ đập hồ chứa).

- Luận án đã xác định được bùn đỏ của hai nhà máy có hàm lượng kim loại chính cao, đặc biệt là Fe và Al, chủ yếu tồn tại dưới dạng Oxit (Fe_2O_3 , Al_2O_3) và Hydroxit ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Việc xác định chính xác các dạng tồn tại này là cơ sở khoa học để xây dựng quy trình hòa tách chọn lọc. Phân tích thành phần hóa học của bùn đỏ từ Nhà máy Nhôm Nhân Cơ cho thấy hàm lượng các oxit kim loại có giá trị rất cao, cụ thể là Fe_2O_3 chiếm 44,42% và Al_2O_3 chiếm 19,73%. Các dạng tồn tại chính của sắt được xác định là hematite (Fe_2O_3) và goethite ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), trong khi nhôm chủ yếu tồn tại ở dạng gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$), boehmite ($\text{AlO}(\text{OH})$) và các khoáng vật thứ cấp hình

thành trong quy trình Bayer như sodalite. Những kết quả này không chỉ cung cấp dữ liệu nền tảng quan trọng mà còn khẳng định tính cấp thiết của việc phát triển các công nghệ thu hồi, tránh lãng phí một khối lượng tài nguyên khổng lồ đang bị chôn lấp.

- Đã nghiên cứu và xác định được quy trình hòa tách chọn lọc Fe và Al. Fe được hòa tách hiệu quả nhất bằng axit H_2SO_4 kết hợp H_2O_2 ở điều kiện nhiệt độ thấp (dưới 80°C). Kết quả nghiên cứu cho thấy, quá trình kết tủa và thu hồi Fe và Al bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi pH, nồng độ tác nhân kết tủa và thời gian phản ứng. Việc kiểm soát pH là yếu tố quan trọng quyết định hiệu suất thu hồi và chất lượng sản phẩm thu hồi

- Luận án đã nghiên cứu thành công và xây dựng quy trình công nghệ Kết tinh tạo hạt đồng thể tầng sôi (FBHC) ứng dụng trong việc thu hồi Fe và Al từ dịch hòa tách. Hệ thống FBHC tuần tự hai cột đã được thiết kế và vận hành ở quy mô phòng thí nghiệm. Luận án đã xây dựng được một quy trình công nghệ hoàn chỉnh, bắt đầu từ giai đoạn hòa tách hiệu quả sắt và nhôm từ bùn đỏ bằng axit sunfuric, tiếp đến là thu hồi chọn lọc tuần tự trong hệ thống FBHC hai cột. Các thông số vận hành tối ưu đã được xác định rõ ràng: sắt (Fe^{3+}) được thu hồi hiệu quả nhất dưới dạng $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ở pH khoảng 4 với thời gian lưu thủy lực 20-30 phút, trong khi nhôm (Al^{3+}) được thu hồi tối ưu dưới dạng bayerit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ở pH khoảng 9,5 với thời gian lưu chỉ 5 phút.

- Các thông số vận hành như pH dung dịch (pH 4.0 cho Fe, pH 9.5 cho Al), Thời gian lưu thủy lực (HRT) (20-30 phút), tốc độ dòng lên, và tỷ lệ tải bề mặt là những nhân tố ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu suất kết tinh (CR%) và thu hồi tổng (TR%). Việc duy trì độ bão hòa tối ưu thông qua kiểm soát các yếu tố trên là cần thiết để tạo ra sản phẩm tinh thể lớn, đồng nhất và có độ tinh khiết cao. Sản phẩm thu hồi không phải là bùn thải thứ cấp mà là các vật liệu có giá trị. Sản phẩm sắt thu được là các hạt $\text{Fe}(\text{OH})_3$ hình cầu, đồng nhất với kích thước trung bình đạt tới 1 mm. Phân tích XRD và FTIR xác nhận sự hình thành pha $\text{Fe}(\text{OH})_3$ kết tinh. Sản phẩm nhôm thu được là các hạt $\text{Al}(\text{OH})_3$ ở dạng thù hình bayerite có độ kết tinh cao, được xác nhận qua phân tích XRD. Đặc biệt, ảnh SEM mặt cắt của hạt cho thấy một cấu trúc lõi-vỏ (core-shell) đặc trưng, phản ánh cơ chế hình thành và phát triển của hạt trong môi trường thủy động lực học không đồng nhất của lò phản ứng FBHC. Cấu trúc này mở

ra các tiềm năng ứng dụng sản phẩm làm chất hấp phụ hoặc vật liệu xúc tác hiệu suất cao.

- Đóng góp khoa học và thực tiễn chính của luận án là đã chứng minh được hiệu suất thu hồi kim loại của công nghệ FBHC là rất cao, đạt tới 99,89% đối với sắt và 99,60% đối với nhôm. Các sản phẩm thu hồi không chỉ có độ tinh khiết cao mà còn có cấu trúc tinh thể đồng nhất, kích thước hạt lớn (lên tới 1 mm), rất thuận lợi cho việc tách lọc, xử lý và tái sử dụng làm nguyên liệu có giá trị cho các ngành công nghiệp khác.

- Về mặt môi trường, công nghệ này giải quyết triệt để tính kiềm của bùn đỏ, giảm thiểu tối đa lượng bùn thải thứ cấp và đảm bảo nước thải sau xử lý đạt quy chuẩn môi trường Việt Nam. Phân tích kinh tế - kỹ thuật sơ bộ ở quy mô thí điểm cũng cho thấy công nghệ tính khả thi với lợi nhuận ròng ước tính đạt 2,48 USD trên mỗi mét khối nước thải bùn đỏ được xử lý. Mặc dù vậy, nghiên cứu của luận án được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm và thí điểm, do đó các phân tích về hiệu quả kinh tế - kỹ thuật vẫn mang tính sơ bộ và mang tính định hướng.

Như vậy, luận án đã cung cấp một bộ cơ sở khoa học và thực tiễn vững chắc, khẳng định công nghệ kết tinh tạo hạt đồng thể tầng sôi là một giải pháp đột phá, hiệu quả và bền vững cho bài toán xử lý bùn đỏ tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu không chỉ mở ra một hướng đi mới để biến chất thải nguy hại thành tài nguyên có giá trị kinh tế mà còn đóng góp trực tiếp vào mục tiêu phát triển công nghiệp xanh và kinh tế tuần hoàn của đất nước.

Tuy vậy, luận án cũng nhận thức rõ những hạn chế cần được tiếp tục nghiên cứu để hoàn thiện và đưa công nghệ vào thực tiễn. Nghiên cứu được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm và thí điểm, do đó việc chuyển đổi sang quy mô công nghiệp đòi hỏi các nghiên cứu sâu hơn về kỹ thuật vận hành, độ bền vật liệu và tối ưu hóa chi phí. Thêm vào đó, luận án chưa đi sâu đánh giá vòng đời của các dòng thải thứ cấp (như dung dịch muối $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ sau kết tủa) mặc dù đã đề xuất hướng tận dụng.¹ Phân tích kinh tế-kỹ thuật cũng chỉ là ước tính sơ bộ, cần một mô hình kinh doanh chi tiết hơn dựa trên dữ liệu vận hành quy mô lớn và khảo sát thị trường thực tế cho các sản phẩm thu hồi.

2. KIẾN NGHỊ

Từ những kết quả khoa học đã đạt được và các hạn chế trong phạm vi nghiên cứu, luận án xin đề xuất các nhóm kiến nghị chính, bao gồm các định hướng cho nghiên cứu tiếp theo và các hành động cần thiết để triển khai công nghệ vào thực tiễn, góp phần giải quyết bài toán bùn đỏ tại Việt Nam.

Dựa trên nền tảng của luận án, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung giải quyết các vấn đề còn tồn tại để hoàn thiện công nghệ:

- Nghiên cứu chuyển đổi quy mô công nghệ: Luận án đã chứng minh thành công hiệu quả của công nghệ FBHC ở quy mô thí điểm. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất là sự tích hợp hệ thống khi vận hành ở quy mô lớn hơn. Vì vậy, kiến nghị ưu tiên hàng đầu là thực hiện các nghiên cứu xây dựng và vận hành mô hình pilot quy mô lớn hơn hoặc bán công nghiệp tại một trong các nhà máy alumin, nhằm đánh giá chính xác hiệu suất trong điều kiện vận hành liên tục, xác định mức tiêu thụ năng lượng, hóa chất thực tế và thu thập dữ liệu tin cậy cho thiết kế quy mô công nghiệp.

- Thực hiện phân tích kinh tế - kỹ thuật: phân tích chi phí - lợi ích trong luận án mới chỉ mang tính sơ bộ. Cần có một nghiên cứu chuyên sâu hơn để xây dựng một mô hình kinh doanh khả thi, trong đó định lượng rõ ràng các chi phí đầu tư, vận hành và các lợi ích gián tiếp như chi phí tiết kiệm được từ việc không phải xây dựng bãi thải. Đồng thời, cần khảo sát và đánh giá thị trường thực tế cho các sản phẩm thu hồi để đảm bảo tính bền vững về mặt tài chính.

Tối ưu hóa quy trình và mở rộng khả năng thu hồi tài nguyên: các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc tối ưu hóa quy trình để giảm chi phí, chẳng hạn như nghiên cứu khả năng tái sử dụng hóa chất và các giải pháp tiết kiệm năng lượng. Bên cạnh đó, cần mở rộng phạm vi nghiên cứu để đánh giá khả năng thu hồi các nguyên tố có giá trị khác còn tồn tại trong bùn đỏ (như titan, silic, và các nguyên tố đất hiếm), nhằm tận dụng triệt để giá trị tài nguyên của chất thải.