

Overview of new technologies in fine bauxite ore processing: orientation of fine tailings recovery from the tailing pond of Dak Nong Aluminum Company - Vinacomin



Hai Thanh Pham *, Ha Viet Le, Luan Van Pham

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18th Dec. 2025

Revised 06th Apr. 2026

Accepted 26th Apr. 2026

Keywords:

Bauxite,
Dak Nong aluminum,
Fine grain fraction.
Material composition,
Tailings,

ABSTRACT

Bauxite is an important raw material in the production of alumina and aluminum. In Vietnam, bauxite is primarily found in the Central Highlands, with gipxit being the most abundant mineral. The processing technology at Vinacomin companies includes the following technological stages: crushing, washing, and screening; clay removal and screening. After the processing, the over 1 mm fraction size is recovered as concentrate, while the below 1 mm fraction size is discharged into the tailings pond. Currently, the washing plants operate stably and achieve the technological indicators compared to the design. However, because the processing plants cannot fully recover the fine ore in the below 1 mm fraction size, the amount of tailings discharged into the pond accounts for more than 50% compared to the raw ore. Currently, with technological advances, the fraction size of bauxite fine ore has been reduced to 0.25 mm, even to 0.035 mm. This article presents an overview of current advanced technologies to recover small and fine-grained bauxite. The technologies are a combination of washing - classification - gravity separation - ultrasonic pretreatment - chemical pretreatment - flotation, and bioleaching. Based on these technologies, the material composition and processing technology orientation of the tailings sample of Dak Nong Aluminum Company have been studied. Accordingly, the tailings sample should be separated with a cut size of 0.074 mm before using gravity separation for coarse fraction size. The fraction size below 0.074 mm is recommended to remove the clay below 0.01 mm and bio-treatment, while the 0.01÷0.074 mm fraction is recovered by flotation.

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

*Corresponding author

E - mail: phamthanhhai@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).07



Tổng quan về các công nghệ mới trong tuyển quặng Bauxit cỡ hạt mịn: định hướng thu hồi quặng đuôi mịn từ bãi thải Công ty Nhôm Đắk Nông - TKV

Phạm Thanh Hải *, Lê Việt Hà, Phạm Văn Luận

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

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
 Nhận bài 18/12/2025
 Sửa xong 06/4/2026
 Chấp nhận đăng 26/4/2026

Từ khóa:
 Bauxit,
 Nhôm Đắk Nông,
 Quặng đuôi,
 Thành phần vật chất,
 Tuyển cấp hạt mịn.

TÓM TẮT

Bauxit là nguồn nguyên liệu quan trọng trong sản xuất nhôm và nhôm. Tại Việt Nam, bauxit tồn tại chủ yếu ở khu vực Tây Nguyên với khoáng vật chính là gipxít. Công nghệ tuyển tại các Công ty thuộc TKV bao gồm các khâu công nghệ: đập; sàng rửa, máy đánh tơi; khử mùn sét và sàng phân loại. Sau quá trình tuyển thu hồi cấp hạt + 1 mm làm quặng tinh, còn cấp hạt - 1 mm được thải bỏ ra hồ thải quặng đuôi. Hiện tại, các xưởng tuyển rửa hoạt động ổn định và đạt được các chỉ tiêu công nghệ so thiết kế. Nhưng do các xưởng tuyển không tận thu được quặng tinh ở cấp hạt - 1 mm nên lượng quặng đuôi thải ra hồ chiếm hơn 50 % so với quặng nguyên khai. Hiện nay, với sự tiến bộ về công nghệ, độ hạt quặng tinh bauxit được giảm đến 0,25 mm, thậm chí đến 0,035 mm. Bài báo trình bày tổng quan các công nghệ tiến tiến hiện nay để thu hồi bauxit cỡ hạt nhỏ và mịn. Các công nghệ là sự kết hợp của tuyển rửa - phân cấp - tuyển trọng lực - công nghệ siêu âm - công nghệ tiền xử lý hóa học - tuyển nổi và vi sinh. Dựa trên các công nghệ này, mẫu quặng đuôi mịn của công ty nhôm Đắk Nông đã được nghiên cứu thành phần vật chất và định hướng công nghệ chế biến. Theo đó, mẫu quặng đuôi nên được phân cấp với độ hạt ranh giới 0,074 mm trước khi sử dụng tuyển trọng lực cho cấp hạt thô. Cấp hạt - 0,074 mm được kiến nghị loại bỏ mùn -0,01 mm và vi sinh trong khi cấp 0,01÷0,074 mm được thu hồi bằng tuyển nổi.

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

*Tác giả liên hệ

E - mail: phamthanhhai@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).07

1. Mở đầu

Bauxit là một trong số các khoáng sản có trữ lượng lớn, quan trọng và chiến lược trong việc phát triển kinh tế xã hội của đất nước (866/QĐ-TTg, 2023). Việc thăm dò, khai thác loại khoáng sản này phải gắn với chế biến sâu để đảm bảo và nâng cao giá trị kinh tế của bauxit. Mục tiêu trong giai đoạn 2021 - 2030 nước ta có 18 mỏ khai thác và tuyển quặng bauxit với sản lượng hàng năm đạt 114,5 triệu tấn. Trong thời gian tới, nhà máy nhôm Nhân Cơ (thuộc công ty nhôm Đắk Nông - TKV) có kế hoạch tăng công suất từ 0,65 triệu tấn lên khoảng 2 triệu tấn/năm, tương ứng với lượng quặng tinh sau tuyển khoáng 4 triệu tấn/năm và quặng nguyên khai vào khoảng 8 triệu tấn/năm.

Hiện nay, xưởng tuyển quặng bauxit của Công ty Nhôm Đắk Nông đang sử dụng công nghệ tuyển rửa với độ sâu tuyển đến 1 mm. Lượng quặng tinh cấp + 1mm thu được sau khi tuyển chỉ đạt 50 % so với quặng nguyên khai, gây mất mát quặng tinh bauxit theo cấp -1 mm và tổn diện tích hồ thải. Khối lượng bùn (tính theo khối lượng khô) thải ra hàng năm của Công ty Nhôm Đắk Nông vào khoảng 1,5 triệu tấn và đang thải vào hồ có diện tích 54 ha. Hiện nay, hồ thải gần như đã đầy và đang tiến hành xây dựng hồ thải mới.

Ngày nay, với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ và thiết bị tuyển các nhà máy tuyển quặng bauxit trên thế giới đã đưa độ sâu tuyển đến 0,1 mm hoặc nhỏ hơn, nhằm tận thu tối đa quặng tinh bauxit cỡ hạt mịn.

Theo các số liệu phân tích trước đó, mẫu bùn tại hồ thải của Công ty Nhôm Đắk Nông có hàm lượng Al_2O_3 trên 30 % với cấp hạt +0,25 mm trong mẫu đủ tiêu chuẩn làm quặng tinh bauxit. Cấp hạt -0,25 mm có chất lượng thấp và chứa nhiều mùn sét cần phải được xử lý thu hồi. Hiện chưa có nghiên cứu nào về việc tách cấp +0,25 mm trong bùn thải và tuyển quặng cấp - 0,25 mm. Như vậy, việc nghiên cứu các công nghệ tiên tiến và định hướng công nghệ tận thu quặng tinh bauxit từ bùn thải xưởng tuyển rửa không chỉ giúp Công ty nhôm Đắk Nông có các cơ sở khoa học để đánh giá khả năng triển khai dự án mà còn đóng góp trong các mục tiêu kinh tế chung như tiết kiệm và tận thu tài nguyên, giảm diện tích hồ thải, tiết kiệm diện tích khai thác và kinh phí đền bù đất xây dựng hồ đập.

2. Các công nghệ mới trong tuyển quặng Bauxit nhỏ và mịn

Về cơ bản, các tiến bộ công nghệ trong tuyển quặng bauxit cỡ hạt mịn vẫn xoay quanh các công nghệ lõi như tuyển trọng lực, tuyển nổi, tuyển rửa và phối hợp các phương pháp tuyển với nhau. Tính mới ở đây chủ yếu là ở sự kết hợp hợp lý các công nghệ, thiết bị và các thiết bị phụ trợ nhằm nâng cao hiệu suất tuyển.

2.1. Công nghệ phân cấp - tuyển rửa - tuyển trọng lực

Gao và cộng sự (2008) đã tiến hành nghiên cứu tuyển mẫu quặng Bauxit từ nhà máy Henan Changcheng Alumina. Mẫu quặng có chất lượng thấp với hàm lượng Al_2O_3 , SiO_2 lần lượt là 59,80% và 13,62%. Các khoáng vật chứa nhôm chủ yếu là diaspor (59,47%), bômit, gipxit (6,57%). Hàm lượng Al_2O_3 của cấp hạt +0,1 mm là 65,56% với modul Si ($A/S = 6,05$). Cấp hạt -0,074 mm chiếm 61,91% với hàm lượng Al_2O_3 là 35,72%, modul Si 3,80. Thách thức chủ yếu với loại mẫu này không chỉ là hàm lượng Al_2O_3 thấp mà còn modul Si thấp hơn rất nhiều so với tiêu chuẩn để có thể sản xuất nhôm bằng phương pháp Bayer. Giải pháp của nhóm nghiên cứu tập trung vào xử lý các khó khăn trên bằng xiclôn thủy lực đường kính 75 mm, góc côn 15 độ. Theo đó, đối với xiclôn có đường kính ống tháo bùn tràn: 17 mm; áp suất cấp liệu: 0,4 MPa; nồng độ bùn: 10%; đường kính ống tháo cát: 6 mm, thực thu Al_2O_3 trong sản phẩm cát, sản phẩm bùn lần lượt đạt gần 80%, modul silic 7. Nghiên cứu đã chỉ ra được ảnh hưởng của các thông số công nghệ của xiclôn tới thực thu Al_2O_3 và modul Si của các sản phẩm. Khi tăng đường kính ống cát dẫn đến giảm modul Si trong bùn tràn và tăng thực thu Al_2O_3 trong sản phẩm cát. Trong khi tăng áp lực cấp liệu cải thiện tốt hiệu quả phân chia bùn - cát thì tăng nồng độ bùn lại làm giảm hiệu quả này.

Husaini và cộng sự (2014) đã nghiên cứu hai loại mẫu bauxit mỏ Tayan. Một loại quặng hàm lượng thấp chứa 34,63% Al_2O_3 và 5,20% SiO_2 trong khi loại thứ hai hàm lượng cao chứa 47,30% Al_2O_3 và 5,79% SiO_2 . Sàng quay đánh toi dạng tang trống (đường kính 80 cm, dài 200 cm, lỗ sàng 2 mm) đã được sử dụng để tuyển quặng bauxit thô. Nghiên cứu được bắt đầu bằng cách đập, sau đó là rửa và sàng. Máy rửa được hỗ trợ bởi máy phun

nước để thu được quặng tinh (kích thước hạt +2 mm) và quặng đuôi (kích thước hạt -2 mm). Các thông số thay đổi là tốc độ cấp liệu (300÷2100 kg/giờ), nồng độ bùn (14÷36%) và lưu lượng nước (35÷78 L/phút). Kết quả cho thấy tốc độ cấp liệu và nồng độ bùn có tác động lớn đến chất lượng quặng tinh bauxit thu được. Tốc độ cấp liệu và nồng độ bùn càng cao thì hàm lượng Al_2O_3 trong quặng tinh bauxit càng thấp. Điều kiện tối ưu đạt được ở tốc độ cấp liệu 1600 kg/giờ, nồng độ bùn 25% và thời gian rửa là 8 phút có khả năng thu được quặng tinh bauxit có hàm lượng 45,25% Al_2O_3 và 3,27% SiO_2 (khi rửa quặng nghèo) và 55,50% Al_2O_3 , 0,47% SiO_2 (khi rửa quặng giàu). Hàm lượng tạp chất có kích thước hạt <2mm là khoảng 2,1% (khi quặng bauxit thô làm nguyên liệu thường là loại cấp cao). Hàm lượng Al_2O_3 tăng trung bình trong quặng bauxit đã rửa là 6,63% và hàm lượng SiO_2 phản ứng giảm trung bình là 2,87%. Quặng bauxit đã rửa được sản xuất có thể làm nguyên liệu đầu vào đáng tin cậy cho quy trình Bayer. Về cơ bản, công nghệ này tương đối phổ biến khi chế biến quặng Bauxit, tuy nhiên các thông số công nghệ của sàng quay đánh toại cũng là một điểm mới có thể tham khảo khi xử lý nguồn quặng có chất lượng tương tự.

Ahmad và cộng sự (2016) đã chỉ ra rằng các silic ở dạng sét gây bất lợi lớn cho quá trình sản xuất alumin bằng phương pháp Bayer. Do đó, bauxit được xử lý và rửa trong các sàng quay để loại bỏ sét. Trong nghiên cứu hiện tại, một kỹ thuật rửa bằng sóng siêu âm đơn giản đã được phát triển để loại bỏ sét và xác định tính khó để rửa vật liệu ở các kích thước ranh giới phân chia khác nhau. Theo đó, bốn phần cấp liệu của quặng bauxit sét được rửa trong phòng thí nghiệm trong 1, 3, 5 và 6 phút bằng siêu âm. Sau 5 phút, các điều kiện rửa ở trạng thái ổn định đã được quan sát. Kết quả cho thấy ở kích thước phân chia 36 μm , 70% khối lượng và 77,5% alumin được thu hồi trong khi 69% tổng lượng silic đi vào quặng đuôi. Khi tăng kích thước ranh giới phân chia từ 36 μm lên 100 μm , thực thu Al_2O_3 giảm 5% trong khi lượng silic chỉ giảm nhẹ trong quặng tinh.

Tác giả Li và cộng sự (2008) đã công bố về một công nghệ để tuyển rửa quặng bauxit với độ sâu đưa tuyển xuống đến 0,5 mm. Theo đó, quá trình công nghệ là nghiền chọn lọc quặng bauxit. Bùn sau nghiền được khuấy và phân loại với phần mịn là quặng đuôi và phần thô là quặng tinh.

Lớp bùn sau nghiền được pha loãng và tạo thành bùn với nước, trong khi quặng thô tiếp tục được nghiền và được giải phóng khỏi khối tạp chất bên trong. Việc kiểm soát lượng vật nghiền bổ sung giúp ngăn ngừa tình trạng quá nghiền. Phần thô và mịn được phân tách thông qua kiểm soát nồng độ bùn và điều chỉnh các thông số của thiết bị phân chia (sàng rung, phân cấp ruột xoắn, xyclone thủy lực, máy lắng, bàn đãi) (Li và nnk., 2008).

Các thông số lưu ý trong quá trình nghiền rửa là kích thước bi nghiền gấp 2÷10 lần kích thước hạt tối đa của quặng cần rửa, và thể tích bi chiếm từ là 0,2÷10% tang nghiền. Máy nghiền có thể là nghiền tháo tải qua tâm hoặc bán tự nghiền. Vật nghiền cũng có thể là thanh nghiền. Nồng độ phần trăm chất rắn của bùn trong quá trình nghiền chọn lọc là từ 2÷70%. Quá trình khuấy bùn có tốc độ khuấy từ 100 vòng/phút đến 3000 vòng/phút; nồng độ phần trăm chất rắn của bùn trong quá trình khuấy và tạo bùn là từ 1÷60%; phần hạt mịn sau quá trình rửa có kích thước nhỏ hơn 0,5 mm. Việc nghiền chọn lọc quặng tạo ra tinh quặng mịn, tiết kiệm chi phí nghiền cho nhà máy alumin (Li và nnk., 2008).

Các thí nghiệm nghiền quy mô phòng thí nghiệm cho thấy tốc độ tạo ra các hạt có kích thước -200 mesh thay đổi đáng kể tùy thuộc vào các khoáng chất khác nhau trong quặng bauxit. Diaspore là pha khó phá vỡ nhất trong khi kaolinit có thể dễ phá vỡ hơn nhiều (Wei và nnk., 2001a). Sau khi nghiền chọn lọc, modul Si của quặng bauxit Bình Quốc có thể được cải thiện từ 5,61÷9,76 ở cấp kích thước +0,037 mm, với năng suất 46,49% (Wei và nnk., 2001b). Các thử nghiệm nghiền chọn lọc đã được tiến hành bằng cách sử dụng ba hình dạng khác nhau cho vật nghiền: bi nghiền, thanh nghiền và kết hợp cả hai loại (hỗn hợp). Sự thay đổi kích thước sản phẩm, modul Si và tốc độ nghiền đã được nghiên cứu và kết quả nghiền chọn lọc tốt nhất thu được với vật nghiền hỗn hợp (Zhang và nnk., 2004). Bốn chất trợ nghiền đã được nghiên cứu để xác định tác động của việc tăng cường nghiền chọn lọc. Chất trợ nghiền tốt nhất có thể làm tăng hàm lượng -200 mesh lên 7,88% và tăng năng suất sản phẩm với modul Si trên 9÷24,62% (Yan và nnk., 2004) (Tian và nnk., 2006). Một số quy trình tuyển, chẳng hạn như tuyển nổi sử dụng xyclone thủy lực, đã được nghiên cứu thử nghiệm để tăng hiệu quả (Ren và nnk., 2004).

Ahmad và cộng sự (2014) đã chỉ ra tạp chất sét ảnh hưởng tiêu cực đến quy trình Bayer trong sản xuất alumina và có thể loại bỏ bằng phương pháp tuyển rửa. Rửa bauxit là một quá trình vật lý gây ra sự phân hủy và tách kết tụ của nền sét, và bauxit được giải phóng khỏi đất sét (giàu silica). Sau đó, quá trình tách diễn ra với sự hỗ trợ của sàng ướt ở kích thước hạt ranh giới được xác định trước. Ba kỹ thuật đã được nghiên cứu trong phòng thí nghiệm: rửa tang trống, rửa sử dụng tia nước và rửa sử dụng sóng siêu âm. Các thông số vận hành khác nhau đã được nghiên cứu cho quá trình rửa tang trống và rửa tia nước, bao gồm thời gian lưu giữ vật liệu, tốc độ quay trống, nồng độ chất rắn, thời gian phun tia nước, áp suất và chiều cao. Ở nồng độ pha rắn 55%, và tốc độ quay của tang 31 vòng/phút, thời gian lưu mẫu ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả tách sét. Nghiên cứu đã xác định được mẫu sau rửa có kích thước hạt lớn hơn 0,036 mm với hàm lượng Al_2O_3 trên 50%, modul Si 8,32 ở mức chấp nhận được.

Trong báo cáo tổng quan về các công nghệ tuyển quặng bauxit, Buntenbach và cộng sự (2010) đã chỉ ra công nghệ tuyển quặng bauxit đơn giản nhất là sự kết hợp của các quá trình đập - nghiền, sàng, rửa sét và xyclon (có kết hợp với sàng khử nước). Mục đích của công nghệ này là giảm hàm lượng silic phản ứng (kaolinit). Các mỏ lớn trên thế giới áp dụng công nghệ này là Juruti, Trombetas (Brazil), Awaso (Ghana), Weipa (Australia), Coermotibo (Suriname).

Cũng trong báo cáo của Buntenbach và cộng sự (2010), loại công nghệ thứ hai sử dụng để tuyển quặng bauxit ở Hy Lạp với độ sâu đưa tuyển 0,355 mm. Đặc điểm của loại quặng bauxit này chứa hàm lượng cao sắt và titan. Do đó công nghệ sẽ tập trung tách cấp +0,355 mm để thu được quặng tinh thứ nhất. Phần -0,355 mm được khử slime bởi xyclon hai giai đoạn sau đó tách sản phẩm nặng bằng băng vít xoắn và tuyển từ.

2.2. Công nghệ tuyển nổi

Báo cáo của Buntenbach và cộng sự (2010) đã chỉ ra triển vọng ứng dụng tuyển nổi trong thu hồi bauxit cỡ hạt mịn mỏ Arkansas (Mỹ). Theo đó, quặng đuôi của quá trình tuyển rửa được đưa tuyển nổi ngược (tuyển nổi thạch anh và đê chìm bauxit) sử dụng hồ tinh bột (thuốc đê chìm), amine (thuốc tập hợp) ở pH 10. Thông thường các khoáng chứa sắt và titan cũng sẽ bị đê chìm với

bauxit nên cần một bước tuyển từ để tách chúng ra ở công đoạn cuối cùng.

Trong nghiên cứu của Cheng và cộng sự (2006), các hóa chất DTAL (muối amoni bậc 4 - thuốc tập hợp), SFL (Sodium Formaldehyde Sulfoxylate - thuốc đê chìm), MIBC (Methyl Isobutyl Carbinol - thuốc tạo bọt) đã được sử dụng để thu được quặng tinh Bauxit với thực thu $Al_2O_3 > 86\%$, modul Si > 10 . Nghiên cứu này có kết quả tương tự với kết quả nghiên cứu trước đó của Wang và cộng sự (2004) với các nhận định: (1) DTAL có độ chọn lọc cao hơn dodecylamine và cetyl trimethylammonium bromide trong quá trình tuyển nổi ngược loại bỏ silicat quặng diaspor-bauxit trong khoảng pH 6-7; (2) Bùn có kích thước hạt dưới 0,01 mm ảnh hưởng đến quá trình tuyển nổi ngược bằng thuốc tập hợp cation, do đó cần loại bỏ bùn có kích thước 0,010 mm bằng cách sử dụng Na_2CO_3 làm chất phân tán; (3) Kết quả tuyển nổi thu được tinh quặng bauxit (modul Si 10, thực thu Al_2O_3 85%) bằng sơ đồ thuốc tuyển kiến nghị sử dụng DTAL, SFL và MIBC.

Liên quan đến công nghệ tuyển nổi ngược quặng bauxit, Xu và cộng sự (2004) đã chỉ ra một số khó khăn như khử slime và xử lý bùn mịn (các khoáng silicat có kích thước $< 0,01$ mm), tìm kiếm loại thuốc tập hợp và đê chìm phù hợp. Ở các nghiên cứu trước đây, các thuốc tuyển phổ biến được sử dụng cho tuyển nổi ngược cation bao gồm các amin béo (thuốc tập hợp), NaF và Na_2SiF_6 (thuốc kích động), thủy tinh lỏng, tinh bột và tanin (thuốc đê chìm), và H_2SO_4 , Na_2CO_3 (thuốc điều chỉnh pH). Các thuốc tuyển nổi ngược anion bao gồm các muối amin béo, các muối kim loại, tinh bột và tanin.

Wulandari và cộng sự (2018) đã chỉ ra rằng điều kiện tuyển nổi ngược tốt đạt được ở pH 6, với kích thước hạt -140+270 mesh, với hiệu suất thu hồi alumina là 86,20%. Tuy nhiên, hàm lượng alumina trong tinh quặng vẫn tương tự, chỉ 35,78% so với 36,80% từ cấp liệu. Hàm lượng silic trong tinh quặng cũng tương tự ở mức 25% so với 24,05% từ cấp liệu. Độ phức tạp của các khoáng chất silica-alumina trong đuôi quặng ngăn cản việc tách hoàn toàn quặng chỉ bằng cách sử dụng tuyển nổi ngược.

Nghiên cứu gần đây cho thấy hiệu suất thu hồi Al_2O_3 thấp khi sử dụng amin béo C10-C12 làm thuốc tập hợp (Yu và nnk., 2008). Các thuốc tập hợp mới được phát hiện có hiệu quả trong việc thu

hồi kaolinit, illit và pyrophyllit, chẳng hạn như N-(2-aminoethyl)-lauramide, N-(3-aminoethyl)-lauramide, N-alkyl-1,3-propane diamine, alpha naphthylamine, 313 N,N-demethyl-dodecyl Amine (DRN) và Nn-Decyl-1,3-diaminopropanes (DN12). Tinh bột biến tính đã được chứng minh là chất đê chìm hiệu quả sự hình thành diaspoire trong điều kiện axit. Thuốc đê chìm SA13 có thể ức chế 90% diaspoire và thu hồi 80% kaolinit (Chen và nnk., 2006). Một thử nghiệm bán công nghiệp đã được hoàn thành bằng kỹ thuật “tách bùn chọn lọc bauxit - tuyển nổi ngược cation” và kết quả tốt nhất với sản phẩm quặng tinh có modul Si 10,12, thực thu 82,4% từ quặng đầu có modul Si 5,88 (Wu và Dong, 2008).

Đối với tuyển nổi thuận, thuốc tập hợp thường được sử dụng là natri oleat, dầu trung tính, dầu tall, xà phòng parafin oxy hóa, natri dodecyl benzen sulfonat, natri lauryl sulfat và thuốc tập hợp thương mại khác. Các thuốc đê chìm là thủy tinh lỏng, natri hexametaphosphat, natri sulfit, natri humat và tinh bột biến tính (Ling và Liu, 2008). Một kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng với natri cacbonat và natri hexametaphosphat làm thuốc đê chìm; xà phòng hóa parafin oxit và dầu tall làm thuốc tập hợp, modul Si của bauxit loại diaspoire-hydromica đã tăng từ 5,33 lên 10,35 với thực thu 88,9% (Huang, 2005). Ngoài ra, thuốc tập hợp dạng chelat mới được phát triển có hiệu quả thu hồi diaspoire cao hơn thuốc tập hợp axit hydroxamic (Cui và nnk., 2008).

Liên quan đến tuyển nổi quặng bauxit, một báo cáo tổng quan của Gibson và cộng sự (2017) đã mô tả tương đối đầy đủ và chi tiết. Theo đó, tuyển nổi (trực tiếp hoặc ngược) sau đó kết bông là một phương pháp tiền xử lý hiệu quả, là kỹ thuật tuyển nổi chính để nâng cấp diaspoire. Tiền xử lý diaspoire bằng tuyển nổi có nhiều điều kiện thuận lợi và có những hạn chế nhất định. Nghiên cứu đã khảo sát một cách có hệ thống các yếu tố tuyển nổi hiệu quả khác nhau (kích thước hạt, điện tích bề mặt, thuốc tập hợp, thuốc đê chìm, chất phân tán, kết bông và kết tụ) cũng như các hạn chế trong quá trình tiền xử lý diaspoire, đồng thời tổng hợp các kết quả tối ưu cho quá trình tuyển nổi. tác giả cũng đã cung cấp các giải pháp khác nhau cho xử lý loại quặng này.

Đối với tuyển nổi quặng bômit-bauxit, Birinci và cộng sự (2020) đã thí nghiệm từ quặng đầu chứa 57,33% Al_2O_3 và 9,01% SiO_2 , (modul Si =

6,36). Kết quả nghiên cứu đã xác định bômit liên kết với các khoáng vật sét (kaolinit và illit), các khoáng vật chứa sắt (hematit và gotit) và các khoáng vật chứa titan (ví dụ rutil và ilmenit). Bằng phương pháp tuyển nổi ngược, quặng đã thu được quặng bauxit tinh chất lượng cao với modul Si là 8,54, tuy nhiên tỷ lệ thu hồi Al_2O_3 vẫn ở mức thấp là 42,87%. Mặc dù modul Si đạt được bằng phương pháp tuyển nổi là đủ cho quy trình Bayer, nhưng tỷ lệ thu hồi Al_2O_3 được coi là thấp đối với quy trình tuyển nổi. Có thể suy ra rằng việc tách silic phản ứng bằng phương pháp tuyển nổi với tỷ lệ thu hồi hợp lý là khó khăn, chủ yếu là do thành phần khoáng vật phức tạp và khả năng giải phóng khoáng chất kém.

Công nghệ tuyển nổi cột dạng tấm được giới thiệu như là một công nghệ mới để cải thiện hiệu quả tuyển quặng bauxit. Các thí nghiệm tuyển nổi cho thấy các tấm đệm trong vùng tập hợp của cột có thể cải thiện hiệu suất tuyển nổi bauxit và tăng khả năng thu hồi các hạt bauxit nhỏ hơn. Sử dụng các tấm đệm, khả năng thu hồi Al_2O_3 tăng 2,11% và hàm lượng Al_2O_3 tăng 1,85%. Tỷ lệ các hạt khoáng vật có kích thước $20\ \mu m$ trong quặng tinh tăng từ 47,31÷54,79%. Kết quả mô phỏng động lực học chất lỏng tính toán (CFD) cho thấy các tấm đệm đã tối ưu hóa đặc tính phân bố bột khí và tăng tỷ lệ các bong bóng siêu nhỏ trong cột tuyển nổi, góp phần cải thiện khả năng thu hồi các hạt bauxit mịn.

Đối với tuyển quặng đuôi bauxit (có khoáng vật chính là gipxit) của nhà máy tuyển rửa Companhia Bra sileira de Alumínio (Brasil), phương pháp tuyển nổi được sử dụng với tinh bột được sử dụng làm thuốc đê chìm và ete-amin làm thuốc tập hợp cation. Độ pH tối ưu vào khoảng 10,0. Ở quy mô bán công nghiệp, quặng tinh thu được có hàm lượng 42,3% Al_2O_3 với modul Si 11,1. Do thành phần khoáng vật chủ yếu trong tinh quặng là gipxit và các khoáng chất chứa sắt và titan, quặng tinh được nâng cấp thêm bằng tuyển từ đến 54,0% Al_2O_3 , modul Si 12,6 với thực thu 69,3% (sản phẩm không từ tính) (Massola và nnk, 2009).

Nhằm mục đích tuyển tách kaolinit từ quặng bauxit bằng phương pháp tuyển nổi, Liu và cộng sự (2015) đã chỉ ra tính kỵ nước được cải thiện của các hạt nano kaolinit và sự kết tụ các hạt là yếu tố chính góp phần cải thiện phản ứng tuyển nổi ở

pH thấp. Cả kết quả mô phỏng và kết quả chụp CT tia X đều chứng minh sự kết tụ và hình thành các cụm kaolinit ở pH thấp. Các cụm kaolinit này có đủ khối lượng và tính kỵ nước để giải thích cho việc tuyển nổi ngược kaolinit thành công từ quặng bauxit ở pH thấp, sử dụng dodecylamine hydrochloride làm thuốc tập hợp.

2.3. Các công nghệ khác

Dyussenova và cộng sự (2022) đã tiến hành nghiên cứu mẫu quặng bauxit của mỏ Krasnogorsk (Kazakhstan) với hàm lượng Al_2O_3 42,0%; SiO_2 11,5%; modul Si 3,65. Mẫu quặng đã được nghiền đến độ hạt -0,25 mm. Nghiên cứu đề cập đến việc tiền xử lý bằng phương pháp hóa, cho phép chuyển đổi thành phần pha trước khi tuyển trọng lực và loại bỏ silic hiệu quả trong quá trình xử lý kiểm tiếp theo, nhằm thu được nguyên liệu thô phù hợp cho sản xuất alumina bằng phương pháp Bayer. Phân tích kính hiển vi điện tử của quặng bauxit ban đầu cho thấy phần tinh thể thô bị nén chặt bởi phần tinh thể mịn. Modul silic của mẫu bauxit trung bình là 3,65. Sau khi tiền xử lý hóa học quặng bauxit trong dung dịch natri bicacbonat, phần tinh thể mịn được tách ra khỏi phần thô và thành phần pha thay đổi, tức là pha canxi silicat biến mất và pha canxit được hình thành. Tiền xử lý ở nhiệt độ 90 và 120 °C trong 20 phút đã làm tăng thực thu bauxit lần lượt là 12,1 và 15,2%. Quặng tinh có chứa 95,4% cấp hạt 0,05-0,25 mm với modul Si 4,25. Để thu được quặng bauxit chất lượng cao có modul silic 9,1, phần quặng tinh Bauxit hạt thô này phải được tuyển hóa trong dung dịch kiềm ở giai đoạn thứ hai.

Pattanaik và cộng sự (2020) đã chỉ ra quặng bauxit có chất lượng thấp chỉ có thể phù hợp làm vật liệu chịu lửa hoặc vật liệu mài mòn, không phù hợp để sản xuất alumin bằng phương pháp Bayer do có hàm lượng sắt và silic cao. Sự có mặt của các tạp chất làm giảm năng lượng liên kết giữa các hạt alumin, cuối cùng làm giảm tính chất cơ học và vật lý của nhôm. Các tạp chất này nên được loại bỏ bằng các phương pháp chi phí thấp và thân thiện với môi trường. Trong bối cảnh này, các kỹ thuật tuyển thông thường như tuyển trọng lực hoặc tuyển từ, tuyển nổi bọt và nung khử có thể được áp dụng; tuy nhiên, chúng đòi hỏi thiết bị nhà máy lớn, lượng hóa chất lớn và năng lượng đầu vào cao.

Tất cả đều làm tăng chi phí tuyển và tất nhiên không thân thiện với môi trường. Việc ứng dụng vật liệu sinh học trong kỹ thuật tuyển kim loại, đặc biệt là để loại bỏ các tạp chất khác nhau từ quặng bauxit chất lượng thấp, là một giải pháp thay thế phù hợp để khắc phục các vấn đề liên quan đến chi phí quy trình cũng như rủi ro môi trường trong quá trình tuyển kim loại thông thường. Tương tác của vi sinh vật với quặng dẫn đến việc chiết xuất hoặc hòa tan chọn lọc các kim loại khác nhau thông qua các cơ chế sau:

a) Sự bám dính của vi sinh vật trên nền quặng.
b) Sự biến đổi bề mặt do hoạt động của vi sinh vật.

c) Phản ứng sinh hóa với các sản phẩm trao đổi chất được tạo ra trong quá trình trao đổi chất của vi sinh vật.

Các loại vi khuẩn được sử dụng trong quá trình tuyển quặng bauxit đã được thống kê. Vi khuẩn *Bacillus polymyxa* được biết là đóng vai trò quan trọng trong việc loại bỏ các tạp chất như canxi và sắt từ quặng bauxit hàm lượng thấp (Anand và nnk., 1996). Papassiopi và cộng sự (2006) đã nghiên cứu tác động của các axit hữu cơ (axit oxalic và axit citric) được tạo ra từ quá trình chuyển hóa của *Aspergillus niger* đối với việc loại bỏ oxit sắt khỏi quặng bauxit. Papassiopi và cộng sự (2010) đã nghiên cứu tác động kết hợp của axit ethylenediamine tetracetic (EDTA) và quá trình chuyển hóa của *Desulfuromonas palmitatis* trong việc loại bỏ oxit sắt khỏi quặng bauxit. Trong quặng bauxit hàm lượng thấp, aluminosilicat được coi là tạp chất chính. *Bacillus circulans* và *Bacillus mucilaginosus* được đề xuất để loại bỏ silic khỏi bauxit. Hai loại vi khuẩn hòa tan silic như *Arthrobacter pascens* H19 và *Burkholderia anthina* G21 đã được phân lập từ đá phong hóa có khả năng khử silic sinh học cao hơn. Các chủng vi khuẩn này loại bỏ Si từ quặng Bauxit giàu silic nhờ sự hỗ trợ của exopolysaccharides và sản xuất axit hữu cơ (axit succinic, malic và citric). Tác giả đã chỉ ra rằng vẫn còn một số vấn đề trong việc duy trì thời gian xử lý cũng như điều kiện thực địa để triển khai quy trình ở quy mô thương mại. Do đó, cần thiết phải có các công trình nghiên cứu chuyên sâu và toàn diện là điều kiện tiên quyết để ứng dụng quy trình này vào thương mại một cách hiệu quả.

3. Hiện trạng và công nghệ xử lý quặng đuôi công ty nhôm Đắk Nông - TKV

Quặng bauxit ở nước ta chủ yếu tập trung ở Tây Nguyên và thuộc loại gipxit. Tuy có hàm lượng Al_2O_3 thấp nhưng modul silic cao nên có thể áp dụng phương pháp Bayer nhiệt độ thấp là phương pháp phổ biến và hiệu quả nhất hiện nay để sản xuất alumin. Trước khi đưa vào quá trình nghiền hòa tách, quặng bauxit cần được làm giàu sơ bộ bằng phương pháp tuyển rửa nhằm thu được quặng tinh có hàm lượng $\geq 49,93\% \text{Al}_2\text{O}_3$; $\leq 3,5\% \text{SiO}_2$; $\sim 16,83\% \text{Fe}_2\text{O}_3$; $\sim 2,70 \text{SiO}_2$ và khoảng $\sim 26,35 \text{MKN}$ (mất khi nung). Đây là tiêu chuẩn thiết kế và cũng là tiêu chuẩn cho quặng tinh sau tuyển cần thiết phải đạt được.

Hiện nay, công nghệ tuyển tại các công ty nhôm Đắk Nông bao gồm các khâu: đập, sàng rửa, máy đánh toi, khử mùn sét và sàng phân loại. Sau quá trình tuyển thu hồi cấp hạt + 1 mm làm quặng tinh, còn cấp hạt - 1 mm được thải bỏ ra hồ thải quặng đuôi như minh họa ở Hình 1 (Thuyết minh thiết kế kỹ thuật nhà máy tuyển Nhân Cơ, 2013).

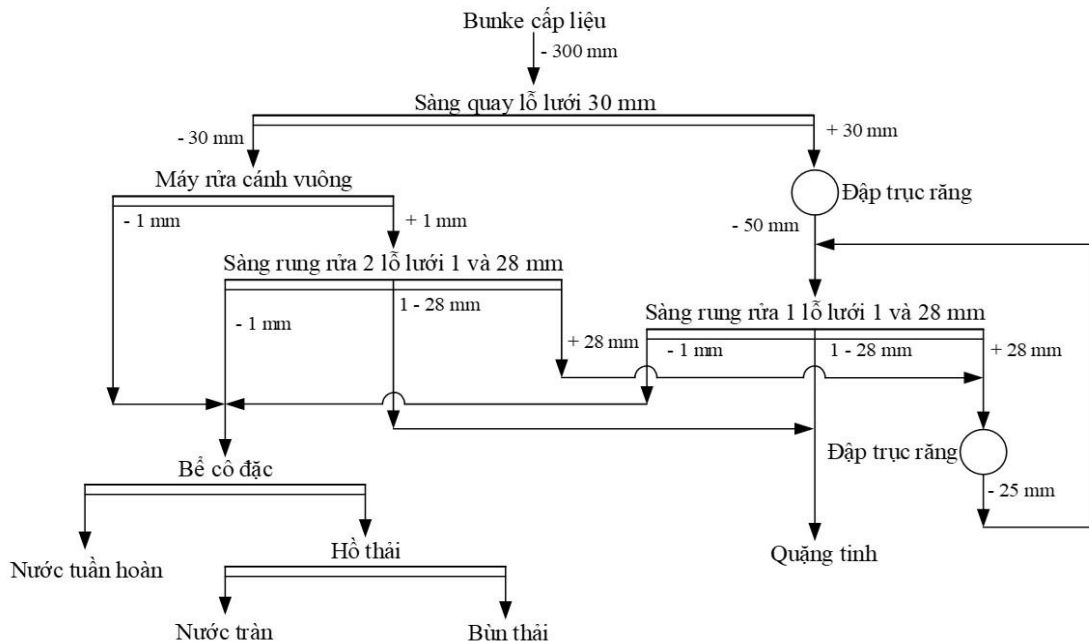
Hiện tại, các xưởng tuyển rửa hoạt động ổn định và đạt được các chỉ tiêu công nghệ so thiết kế như Bảng 1. Nhưng do các xưởng tuyển không tận thu được quặng tinh ở cấp hạt - 1mm nên lượng quặng đuôi thải ra hồ chiếm hơn 50 % so với quặng nguyên khai (Bảng 1). Tức là, tỷ lệ thu hồi quặng tinh tại các xưởng tuyển rửa của TKV đang

ở mức thấp hơn so với một số các nhà máy tuyển quặng bauxit trên thế giới khi tuyển cùng một loại quặng đối tượng (Chaves và nnk., 2009) (Rajendran và Murty, 2023). Điều này gây mất mát một lượng lớn tài nguyên bauxit cũng như tạo gánh nặng cho hồ chứa quặng thải (vốn đã quá tải), tiềm ẩn nguy cơ đến an toàn và môi trường.

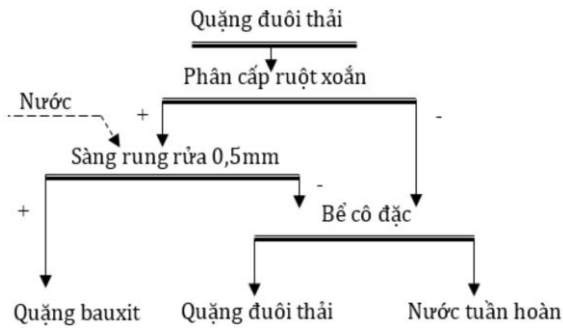
Bảng 1. Số liệu thiết kế của xưởng tuyển rửa tại Đắk Nông - các chỉ tiêu về quặng đuôi.

Sản phẩm	Giá trị
Khối lượng đuôi thải (khô)	1.441.316 tấn/năm
Chất lượng đuôi thải	
Al_2O_3	$\sim 31,50 \%$
SiO_2	$\sim 12 \%$
Fe_2O_3	$\sim 32,5 \%$
TiO_2	$\sim 6 \%$

Cho đến nay, tại Việt Nam mới chỉ có một công trình duy nhất nghiên cứu thu hồi quặng tinh bauxit từ bùn thải xưởng tuyển rửa có tính chất tương tự tại Công ty Nhôm Lâm Đồng của tác giả Nguyễn Văn Minh. Theo nghiên cứu của tác giả, từ bùn thải quặng đuôi có nồng độ pha rắn khoảng 70 g/l với hàm lượng Al_2O_3 và SiO_2 lần lượt là: 32,02 % và 6,96 %. Sau khi tuyển theo sơ đồ nghiên cứu như Hình 2, thu được 7,07 % quặng tinh bauxit cấp hạt + 0,5 mm với hàm lượng Al_2O_3 và SiO_2 lần lượt là: 45,81 % và 3,05 %.



Hình 1. Sơ đồ tuyển rửa của Công ty Nhôm Đắk Nông.



Hình 2. Sơ đồ nghiên cứu thu hồi quặng tinh bauxit cấp +0,5 mm từ bùn thải xưởng tuyển rửa của Công ty Nhôm Lâm Đồng.

Quặng tinh cấp + 0,5 mm được tác giả khuyến nghị trộn với quặng tinh chất lượng cao (cấp + 1mm) để cung cấp cho nhà máy alumin. Như vậy, sau nghiên cứu tác giả Nguyễn Văn Minh đã đưa ra được sơ đồ công nghệ tuyển thu hồi quặng tinh bauxit từ bùn thải quặng đuôi, thu được quặng tinh đạt yêu cầu đem phối trộn với quặng tinh chất lượng cao. Tuy nhiên, nhược điểm chính của nghiên cứu là: Chưa đưa ra được phương án thu hồi quặng tinh bauxit dưới cỡ 0,5 mm; bùn quặng đuôi có nồng độ pha rắn thấp nên cần nhiều máy phân cấp ruột xoắn và diện tích lắp đặt; hiệu suất của máy phân cấp ruột xoắn thấp và hiệu quả tách rác hữu cơ kém nên làm suy giảm chất lượng quặng tinh. Có lẽ vì những lý do này, nên cho đến nay nghiên cứu này chưa được áp dụng vào thực tế tuyển tại các Công ty Nhôm thuộc TKV (Nguyễn và Nguyễn, 2021).

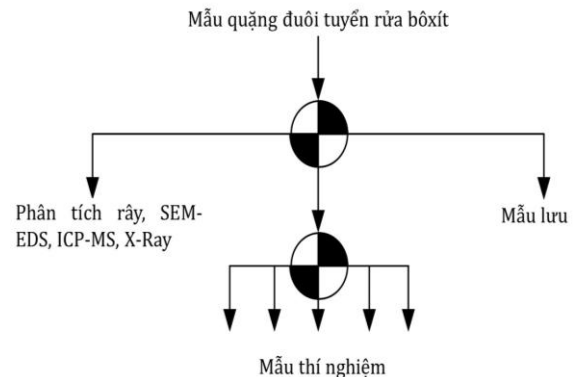
Năm 2024, Phạm Văn Luận và các cộng sự đã nghiên cứu về tính chất bùn cấp - 1mm trong quặng nguyên khai cấp cho Công ty Nhôm Đắk Nông và Lâm Đồng. Theo nghiên cứu này bùn nguyên khai có những tính chất cơ bản sau: chứa chủ yếu cấp hạt siêu mịn với thu hoạch cấp - 0,02 mm của Đắk Nông và Lâm Đồng lần lượt là 62,04 % và 72,82 %; cấp hạt + 0,5 mm có chất lượng tương tự như nghiên cứu của tác giả Nguyễn Văn Minh, nhưng chứa nhiều rác hữu cơ (ảnh hưởng đến hiệu suất thu hồi alumin) (Phạm và nnk., 2024). Như vậy, để thu hồi triệt để được quặng tinh từ bùn thải tác giả đã có kiến nghị sử dụng thiết bị tách rác cỡ lớn; tiếp theo dùng thiết bị vừa có khả năng loại bỏ cấp hạt siêu mịn (bùn sét) và vừa có khả năng tuyển trọng lực để loại bỏ tạp chất hữu cơ và các khoáng vật nhẹ; sau đó dùng sàng phân loại để thu hồi cấp hạt thô (+0,25 mm) làm

quặng tinh còn cấp hạt mịn đưa đi xử lý tiếp bằng phương pháp tuyển nổi. Tuy nhiên các nghiên cứu thành phần vật chất vẫn chỉ dừng ở mức sơ bộ nhằm mục đích thăm dò mà chưa có các đánh giá cụ thể.

4. Nghiên cứu thành phần vật chất và định hướng thu hồi bauxit từ quặng đuôi

4.1. Mẫu và phương pháp nghiên cứu

Mẫu nghiên cứu được lấy tại hai vị trí là hồ thải (Mẫu 1 - lấy mẫu cố định bằng phương pháp xúc) và tại đường ống (Mẫu 2 - lấy mẫu di động bằng gáo lấy mẫu). Mỗi loại mẫu có khối lượng 200 kg, được lấy theo tiêu chuẩn, đảm bảo khối lượng và tính đại diện. Mẫu được vận chuyển về phòng thí nghiệm bộ môn Tuyển khoáng, khu B, trường Đại học Mỏ - Địa chất. Mẫu được khuấy trộn cùng với nước dưới dạng bùn nhằm mục đích phân tán các cấp hạt mịn và sét, ngăn tình trạng vón cục, kết tụ trước khi được giản lược bằng máng chia bùn chuyên dụng. Mẫu thí nghiệm được gia công theo sơ đồ Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ gia công và giản lược mẫu.

Mẫu phân tích thành phần độ hạt có khối lượng 2000 gam được đưa xác định thành phần độ hạt với bộ rây có kích thước 0,5; 0,25; 0,074; 0,02 mm. Phương pháp rây ướt được lựa chọn nhằm tăng hiệu suất và rút ngắn thời gian phân tích. Các phân tích được tiến hành tại phòng thí nghiệm Tuyển khoáng và môi trường, Trường Đại học Mỏ - Địa chất.

Mẫu phân tích SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) nhằm mục đích xác định độ hạt, hình dạng hạt, đặc tính bề mặt của hạt khoáng vật, đóng vai trò quan trọng trong hành vi chuyển

động của các hạt trong các quá trình phân cấp, tuyển trọng lực cũng như khả năng tuyển nổi hạt mịn của mẫu quặng đuôi. Mẫu được tiến hành phân tích bởi Trung tâm phân tích thí nghiệm công nghệ cao, trường đại học Mỏ - Địa chất.

Kỹ thuật phổ khối plasma cảm ứng ICP - MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) là một phương pháp phân tích hiện đại được sử dụng rộng rãi trong việc phát hiện và định lượng các nguyên tố vi lượng ở nồng độ cực thấp. Đây là một kỹ thuật kết hợp giữa nguồn plasma và máy quang phổ khối để phân tích mẫu vật chất. Trong khuôn khổ nghiên cứu, phương pháp ICP-MS được dùng để xác định hàm lượng 36 nguyên tố và oxit trong mẫu bùn sau tuyển rửa bauxit bằng thiết bị ICP-MS tại Trung tâm phân tích và kiểm định địa chất, Cục địa chất và khoáng sản Việt Nam.

Phương pháp nhiễu xạ tia X được sử dụng để nghiên cứu cấu trúc vật rắn, với khối lượng mẫu rất nhỏ, không cần phá hủy mẫu và thời gian phân tích được rút ngắn hơn nhiều so với các phương pháp phân tích truyền thống. Trong khuôn khổ nghiên cứu, phương pháp nhiễu xạ tia X được dùng để xác định thành phần khoáng vật của mẫu nghiên cứu. Phép phân tích được thực hiện trên máy D8 Advance-Bruker-Germany tại Trung tâm phân

tích và kiểm định địa chất, Cục địa chất và khoáng sản Việt Nam.

4.2. Kết quả và thảo luận

Kết quả phân tích rây, hóa và SEM-EDS của mẫu đầu được trình bày ở Bảng 2, 3 và Hình 4.

Nhìn chung, về thành phần độ hạt, mẫu 1 và mẫu 2 có sự tương đồng khi hàm lượng cấp hạt mịn $-0,02$ mm chiếm ưu thế (trên 70%), các cấp hạt còn lại dao động từ $4\div 9\%$. Việc hàm lượng $-0,02$ mm cao, tồn tại chủ yếu dạng sét dẫn đến thách thức lớn trong thu hồi các khoáng vật có ích, kể cả bằng các phương pháp hiện đại và đắt tiền.

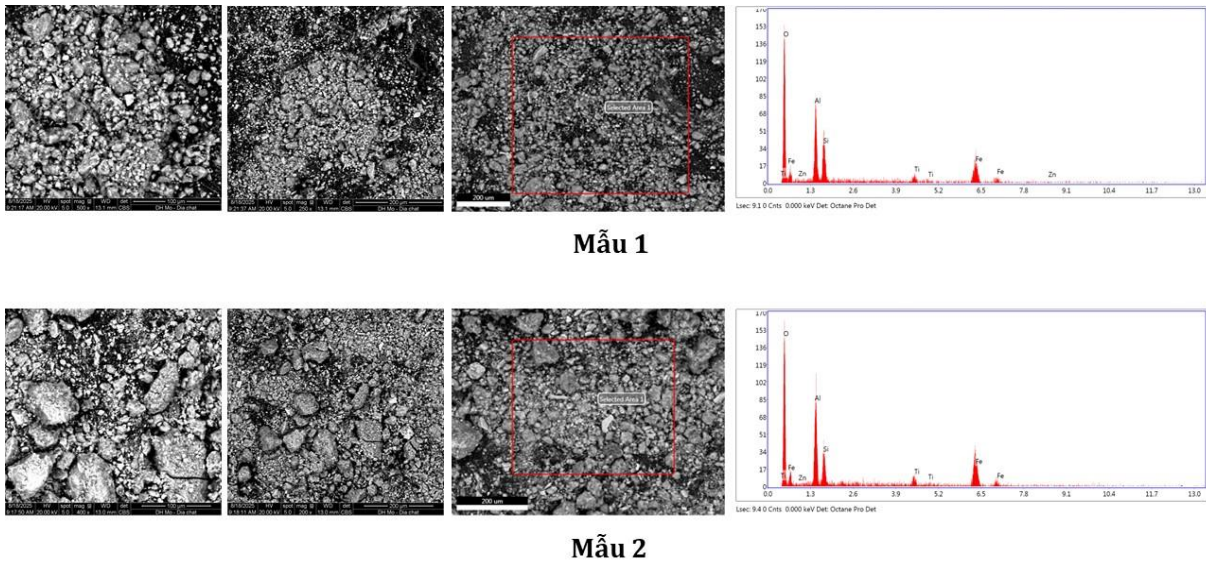
Chất lượng của mẫu 1 và mẫu 2 có sự khác biệt đáng kể. Trong khi mẫu 1 có hàm lượng Al_2O_3 29,10% với modul Si là 1,58 thì mẫu 2 có hàm lượng Al_2O_3 đạt 33,35% với modul Si đạt 2,42. Xét về hàm lượng chất có ích thì mẫu 2 có chất lượng tốt hơn và dễ tuyển hơn so với mẫu 1. Nguyên nhân của sự khác biệt 2 mẫu nằm ở vị trí lấy mẫu và loại quặng đưa vào tuyển. Trong khi mẫu 2 được lấy ở hồ thải qua nhiều năm vận hành thương mại quặng có chất lượng tốt dẫn đến chất lượng quặng đuôi cũng cao hơn. Mẫu 1 được lấy trực tiếp tại thời điểm nhà máy đang hoạt động trong năm 2025, khi mà nguồn quặng chất lượng tốt tại khai trường đã hết.

Bảng 2. Kết quả phân tích rây và hóa mẫu nghiên cứu.

Cấp hạt	Mẫu 1			Mẫu 2		
	Thu hoạch %	Hàm lượng %		Thu hoạch %	Hàm lượng %	
		Al_2O_3	SiO_2		Al_2O_3	SiO_2
+0,5	6,45	39,0	9,95	9,18	46,39	3,61
$0,25\div 0,5$	7,43	33,53	12,2	6,15	45,92	4,21
$0,074\div 0,25$	8,97	32,74	11,76	4,70	40,64	8,65
$0,02\div 0,074$	5,42	30,88	11,67	5,47	36,66	11,21
-0,02	71,73	27,16	21,19	74,50	30,01	16,34
Tổng	100	29,10	18,44	100,00	33,35	13,78

Bảng 3. Kết quả phân tích ICP-MS mẫu nghiên cứu.

Nguyên tố	Mẫu 1	Mẫu 2
Al_2O_3	29,89 %	31,32%
CaO	0,19%	0,2%
TFe ₂ O ₃	32,49%	34,76 %
K ₂ O	0,05%	0,03 %
MgO	0,14%	0,03 %
MnO	0,09%	0,09 %
P ₂ O ₅	0,26%	0,01 %
TiO ₂	5,11%	5,21 %



Hình 4. Kết quả phân tích SEM-EDS mẫu nghiên cứu.

Như vậy, mẫu 2 sẽ là mẫu thể hiện chất lượng chung của quặng đuôi trong hồ thải còn mẫu 1 thể hiện chất lượng quặng đuôi tại thời điểm hiện tại. Đây cũng là một cơ sở quan trọng để định hướng xây dựng nhà máy tuyển quặng đuôi hay cải tạo nâng cấp nhà máy đang hoạt động.

Kết quả phân tích ICP-MS cho thấy hàm lượng Fe ở mẫu 1 và 2 rất cao với lần lượt là 32,49% và 34,76%. Việc thu hồi lượng và sử dụng hợp lý loại Fe này không chỉ mang lại thêm hiệu quả kinh tế mà có ý nghĩa lớn trong việc sử dụng tổng hợp tài nguyên khoáng sản.

Về các nguyên tố vi lượng khác, nhìn chung là có hàm lượng thấp đến vô cùng thấp dù một số thực sự có giá trị như Cr, Cu, Co, Ni, Sc, V hay Zn. Việc thu hồi các nguyên tố này gặp khó khăn do rất khó xác định được dạng khoáng vật chứa nguyên tố đó, độ hạt sản phẩm rất mịn, hàm lượng thấp và thành phần phức tạp dẫn đến chi phí thu hồi cao và không mang lại hiệu quả kinh tế.

Kết quả mẫu SEM-EDS cho thấy các hạt khoáng vật có kích thước mịn, có các hạt sét siêu mịn bám lên bề mặt hạt. Trong khi các hạt lớn có hình dạng khối, góc cạnh, các hạt nhỏ có hình dạng dẹt, dính kết với nhau. Điều này dẫn đến thuận lợi khi phân tách cấp hạt nhỏ ra khỏi các hạt mịn và siêu mịn bằng các phương pháp phân cấp truyền thống. Các hạt mịn cần phải được khuấy, hay tiền xử lý bằng hóa chất và cơ giới để tách sét và phá vỡ các kết tụ trước khi xử lý thu hồi. Kết quả sử dụng đầu dò EDS để xác định một điểm trong mẫu

nghiên cứu khẳng định thêm các kết quả nghiên cứu trước đó là các khoáng vật có ích cần thu hồi là các khoáng chứa Al, Ti Fe, loại bỏ các khoáng vật có chứa Si.

Trên cơ sở bảng thành phần độ hạt và thành phần hóa các cấp hạt, các phân tích nhiễu xạ Ronghen được tiến hành để xác định hàm lượng khoáng vật ở các cấp hạt của hai mẫu kể trên. Kết quả cho ở Bảng 4.

Các khoáng vật trong các cấp hạt ở cả hai mẫu tương tự nhau với hàm lượng chiếm ưu thế là các khoáng gipxit, gotit và kaolinit.

Nhìn chung, cấp hạt +0,074 mm của mẫu 1 và mẫu 2 có hàm lượng gipxit trung bình chiếm ưu thế lần lượt là 33,87% và 49,52%. Như vậy, công nghệ hiệu quả trước tiên đó là phân tách cấp +0,074 mm và -0,074 mm bằng các thiết bị phân cấp.

Tạp chất chủ yếu trong các mẫu nghiên cứu là kaolinit, gotit và một phần là illit, clorit. Định hướng nghiên cứu nên tập trung vào việc loại bỏ các tạp chất này, đặc biệt là các khoáng có nguồn gốc silicat (loại có thể phản ứng với xút - gây bất lợi cho quy trình sản xuất alumin bằng công nghệ Bayer). Làm tốt việc loại bỏ tạp chất này sẽ giúp tăng đáng kể hàm lượng gipxit trong các cấp hạt.

Đối với cấp +0,074 mm, giải pháp tối ưu là sử dụng tuyển trọng lực bởi tỷ trọng của các khoáng silicat phản ứng từ 2,1÷2,6 trong khi của gipxit là 2,7÷3,5. Sản phẩm nặng của khâu tuyển này bao gồm các khoáng gipxit, hemantit, gotit, ilmenit sẽ

Bảng 4. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật mẫu nghiên cứu.

	Gipxit	Gotit	Hematit	Thạch anh + Felspat	Illit	Kaolinit	Clorit	Ilmenit	
Cấp hạt, mm	Mẫu 1								
+0,5	42÷44	18÷20	1÷3	1÷3	1÷3	20÷22	2÷4	4÷6	
0,25÷0,5	26÷28	26÷28	2÷4	4÷6	2÷4	25÷27	2÷4	4÷6	
0,074÷0,25	32÷34	25÷27	2÷4	3÷5	2÷4	20÷22	2÷4	6÷8	
0,02÷0,074	25÷27	26÷28	2÷4	1÷3	2÷4	24÷26	2÷4	5÷7	
-0,02	12÷14	29÷31	2÷4	1÷3	2÷4	36÷38	2÷4	4÷6	
Cấp hạt, mm	Mẫu 2								
-0,5	42÷44	18÷20	1÷3	1÷3	1÷3	20÷22	2÷4	4÷6	
0,25÷0,5	26÷28	26÷28	2÷4	4÷6	2÷4	25÷27	2÷4	4÷6	
0,074÷0,25	32÷34	25÷27	2÷4	3÷5	2÷4	20÷22	2÷4	6÷8	
0,02÷0,074	25÷27	26÷28	2÷4	1÷3	2÷4	24÷26	2÷4	5÷7	
-0,02	12÷14	29÷31	2÷4	1÷3	2÷4	36÷38	2÷4	4÷6	

được tiếp tục tuyển trọng lực nhằm mục đích thu hồi được gipxit trong sản phẩm nhẹ. Sản phẩm nặng là các khoáng vật chứa Fe.

Đối với cỡ hạt -0,074 mm, giải pháp tối ưu là sử dụng phương pháp tuyển nổi ngược với các thuốc tuyển nổi có thể sử dụng như tuyển nổi ngược cation bao gồm các amin béo (thuốc tập hợp), NaF và Na_2SiF_6 (thuốc kích động), thủy tinh lỏng, tinh bột và tanin (thuốc đè chìm), và H_2SO_4 và Na_2CO_3 (thuốc điều chỉnh pH); các thuốc tuyển nổi ngược anion bao gồm các muối amin béo, các muối kim loại, tinh bột và tanin. Lượng Ilmenit và hematit được định hướng tuyển từ trong khi gotit có thể được thu hồi bằng kỹ thuật keo tụ kết bông kết hợp tuyển nổi. Một lưu ý đó là các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra cỡ hạt -0,01 mm ảnh hưởng rất lớn đến hiệu quả tuyển nổi nên cần phải được tách ra trước khi thí nghiệm. Ngoài ra, các thiết bị tuyển nổi tiến tiến để tuyển quặng mịn và siêu mịn nên được ứng dụng để cải thiện hiệu quả tuyển nổi.

Cấp -0,01 mm bị tách bởi quá trình tuyển nổi có thể thải lại hồ chứa và ứng dụng các công nghệ vi sinh nhằm thu hồi tối đa khoáng sản và tối ưu hóa hiệu quả kinh tế.

Mặc dù với các định hướng công nghệ như trên, việc tuyển nâng cao hàm lượng Al_2O_3 trong quặng cấp hạt nhỏ tiềm ẩn rất nhiều thách thức (cỡ hạt mịn, thành phần hóa học và khoáng vật phức tạp, các hóa chất, thuốc tuyển chưa có tính chọn riêng cao, hiệu suất phân cấp thấp, chưa thực sự làm chủ công nghệ vi sinh,...) đòi hỏi phải có các nghiên cứu thực nghiệm công nghệ một cách chi tiết và đầy đủ. Các chỉ tiêu công nghệ quặng tinh đạt được dự đoán (dựa trên các tài liệu tham khảo

và thành phần vật chất mẫu nghiên cứu) là >45% Al_2O_3 , modul Si >12 với thực thu ở mức tối ưu.

5. Kết luận

Bauxit là một trong số các khoáng sản có trữ lượng lớn, quan trọng và chiến lược trong việc phát triển kinh tế xã hội của đất nước. Công nghệ chế biến bauxit hiện nay chủ yếu thu hồi quặng tinh + 1mm bằng phương pháp tuyển rửa.

Lượng quặng đuôi cỡ hạt - 1 mm có hàm lượng Al_2O_3 tương đối cao bị thải bỏ lên đến 50% gây mất mát tài nguyên và quá tải hồ thải.

Các công nghệ mới trong tuyển quặng bauxit cỡ hạt nhỏ và mịn có thể liệt kê như phân cấp - tuyển rửa - tuyển trọng lực; tuyển nổi thuận, tuyển nổi ngược với sự cải tiến về hệ thống thuốc tuyển, sơ đồ công nghệ tuyển và loại thiết bị tuyển; công nghệ tiền xử lý bằng hóa chất và vi sinh. Hầu hết các công nghệ mới đều chỉ ra rằng, độ hạt đưa tuyển có thể giảm xuống đến 0,3 mm hay thậm chí còn mịn hơn nữa.

Khối lượng quặng đuôi sau tuyển của công ty nhôm Đắk Nông hiện nay hơn 1,4 triệu tấn/năm với cỡ hạt -1mm, hàm lượng Al_2O_3 trung bình khoảng 31% (theo thiết kế).

Hai mẫu nghiên cứu được tiến hành lấy và phân tích thành phần độ hạt, phân tích hóa, thành phần khoáng vật, SEM-EDS cho thấy triển vọng có thể ứng dụng các công nghệ phân cấp - tuyển trọng lực - tuyển nổi - vi sinh trong chế biến toàn diện quặng đuôi tuyển rửa công ty nhôm Đắk Nông. Các kết quả chỉ dừng lại ở nghiên cứu thành phần vật chất và kiến nghị hướng thu hồi đối tượng quặng đuôi sau tuyển của công ty nhôm

Đăk Nông dựa trên các tổng quan công nghệ tiên tiến chế biến loại quặng nghèo và độ hạt mịn này.

Lời cảm ơn

Tập thể tác giả gửi lời cảm ơn tới Công ty Nhôm Đăk Nông - TKV đã hỗ trợ mẫu trong nghiên cứu này. Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp cơ sở mã số T25-29 của Trường đại học Mỏ - Địa chất.

Đóng góp của tác giả

Phạm Thanh Hải - phương pháp luận, viết bản thảo bài báo, kiểm chứng, phân tích dữ liệu; Lê Việt Hà - phân tích mẫu, điều tra, khảo sát; Phạm Văn Luận - đánh giá và chỉnh sửa bài báo.

Tài liệu tham khảo

Quyết định số 866/QĐ-TTg. (2023). Phê duyệt Quy hoạch thăm dò, khai thác, chế biến và sử dụng các loại khoáng sản thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. 866/QĐ-TTg. Hà Nội, Việt Nam: Thủ tướng Chính phủ.

Ahmad, I., Hartge, E.-U., Werther, J., & Wischnewski, R. (2014). Bauxite washing for the removal of clay. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 21(11), 1045. doi:DOI: 10.1007/s12613-014-1008-4.

Ahmad, I., Hartge, E.-U., Werther, J., & Wischnewski, R. (2016). Ultrasonic Processing of Bauxite Ore to Estimate Its Washing. *Journal of Mining Science*, Vol. 52, No. 1, 201-206.

Anand, P., Modak, J., & Natarajan, K. (1996). Biobeneficiation of bauxite using *Bacillus polymyxa*: calcium and iron removal. *Int. J. Miner. Process.*, 48, 51-60.

Birinci, M., & Gok, R. (2020). Characterization and flotation of low-grade boehmitic bauxite ore from Seydis,ehir (Konya, Turkey). *Minerals Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106714>.

Buntenbach, S., Baumann, T., & Donhauser, F. (2010). Beneficiation of bauxite- upgrading of recoverable Al₂O₃. *18th International Committee for Study of Bauxite, Alumina&Aluminium-ICSOBA 2010*, 117-124.

Chaves, A. P., Bergerman, M. G., & Bigogno, A. D. (2009). Concentration of bauxite fines via gravity concentration. *Rem Revista Escola de*

Minas, 62(3), 277-281. doi:10.1590/S0370-44672009000300004.

Chen, X. Q., Bai, W. Q., & Wan, W. Z. (2006). Status and research progress of bauxite flotation desilication (tiếng Trung Quốc). *Light Metals*, 2, 8-12.

Cheng, X., Ren, A., & Zheng, G. (2006). Study on improved silicates removal technology in direct Bauxite Flotation. *XXIII International Mineral Processing Congress* (pp. 719-722). Istanbul, Turkey: Promed Advertising Agency.

Cui, P. P., Huang, Z. M., & Zhou, L. S. (2008). Overview of bauxite resources in China. *Light Metals*, 2, 6-8.

Dyussenova, S., R., A., Akcil, A., Gladyshev, S., & Manapova, A. (2022). Gravity beneficiation of low quality gibbsite-kaolinite bauxite. *Journal of materials research and technology*, 1802-1813. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.194>

Gao, S.-l., LI, X.-a., WEI, D.-z., FANG, P., JIA, C.-y., LIU, W.-g., & HAN, C. (2008). Beneficiation of low-grade diasporic bauxite with hydrocyclone. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 444-448.

Gibson, B., Wonyen, D., & Chelgani, S. C. (2017). A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation. *Minerals Engineering*, 114, 64-73. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.09.009>.

Huang, C. B. (2005). Current status and development trends of desilication of bauxite by reverse flotation (tiếng Trung Quốc). *Light Metals*, 5, 7-10.

Husaini, Cahyono, S. S., & Damayanti, R. (2014). Upgrading of Tayan's crude bauxite using rotary drum scrubber. *Indonesia Mining Journal*, Vol.17, No.1, 40-52.

Li, W., Liu, J., Liu, Z., & Wang, Y. (2008). The most important sustainable development issues of Chinese alumina industry. In *LIGHT METALS-WARRENDALE-PROCEEDINGS-* (Vol. 2008, p. 191). TMS.Ling, S. S., & Liu, S. Q. (2008). A review of reagents on desilication of bauxite ores by reverse flotation. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 3, 49-54.

- Ling, S. S., & Liu, S. Q. (2008). A review of reagents on desilication of bauxite ores by reverse flotation. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 3, 49-54.
- Liu, J., Wang, X., Lin, C.-L., & Miller, J. D. (2015). Significance of particle aggregation in the reverse flotation of kaolinite from bauxite ore. *Minerals Engineering*, 78, 58-65.
- Massola, C., Chaves, A., Lima, J., & Andrade, C. (2009). Separation of silica from bauxite via froth flotation. *Minerals Engineering*, 315-318. doi:doi:10.1016/j.mineng.2008.09.001
- Nguyễn, V. M., & Nguyễn, V. H. (2021). Nghiên cứu công nghệ tuyển thu hồi quặng bauxit trong đuiôi thải cấp hạt -1 mm nhà máy tuyển bauxit Tân Rai bằng phân cấp ruột xoắn. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 62(3b), 51 - 57.
- Papassiopi, N., Vaxevanidou, K., & Paspaliaris, I. (2010). Effectiveness of iron reducing bacteria for the removal of iron from bauxite ores. *Minerals Engineering*, 23, 25-31.
- Papassiopi, N., Vaxevanidou, K., Paspaliaris, I., Katapodis, P., & Kekos, D. (2006). Iron removal from bauxite ores using biologically produced organic acids. *Proc. of the 2nd International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology* (pp. 275-280). Amireg: In: Agioutantis, Z., Komnitsas, K. editors.
- Pattanaik, A., Sukla, L. B., & Pradhan, D. (2020). Biological Opportunity for Beneficiation of Low-grade Bauxite. *Journal of advanced microbiology*, 129-136.
- Phạm, V. L., Phạm, T. H., Lê, V. H., & Phạm, T. N. (2024). Nghiên cứu hiệu quả lắng động bùn của các Công ty Nhôm ở Việt Nam bằng ống lắng thí nghiệm. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 65(1), 74-87.
- Rajendran, S., & Murty, C. V. (2023). Mineral Processing: Beneficiation Operations and Process Optimization Through Modeling. *Elsevier*. doi:https://doi.org/10.1016/C2019-0-03555-8
- Ren, A. J., Fang, Q. X., & Fu, K. B. (2004). Study on selective classification of diasporic-type bauxite. *Nonferrous Metals*, 2, 7-10.
- Thuyết minh thiết kế kỹ thuật nhà máy tuyển Nhân Cơ (2013). Hà Nội: Liên danh nhà thầu Vmc - Vmac - Narime - Vinaincon.
- Tian, W. L., Han, Y. X., & Yang, X. S. (2006). On enhancing selective separation of aluminum-bearing minerals from silicon-bearing minerals by using a grinding aid. *Metal Mine*, 3, 42-45.
- Wang, Y., Hu, Y., He, P., & Gu, G. (2004). Reverse flotation for removal of silicates from diasporic-bauxite. *Minerals Engineering*, 63-68. doi:doi:10.1016/j.mineng.2003.09.010
- Wei, X. C., Han, Y. X., & Yin, W. Z. (2001a). Study on the necessity and flexibility of selective grinding for bauxite. *Metal Mine*, 10-13.
- Wei, X., Han, Y. X., & Yin, W. Z. (2001b). Experimental research on the selective grinding of Henan bauxite. *Gold Journal*, 192-195.
- Wu, B. H., & Dong, J. (2008). Overview of flotation for desilication of bauxite (tiếng Trung Quốc). *Coal Technology*, 27(4), 120-122.
- Wulandari, W., Purwasasmita, M., Sanwani, E., Malatsih, W., & Fadilla, F. (2018). A study of bauxite tailing quality improvement by reverse flotation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012025. doi:doi:10.1088/1757-899X/285/1/012025
- Xu, Z., Plitt, V., & Liu, Q. (2004). Recent advances in reverse flotation of diasporic ores-a Chinese experience. *Minerals Engineering*, 17, 1007-1015.
- Yan, Z. T., Wang, Z. H., & Yin, W. Z. (2004). Study on intensifying selective grinding of bauxite ores by grinding aid. *Metal Mine*, 7, 22-24.
- Yu, X. Y., Zhong, H., & Liu, G. Y. (2008). Current research status on cationic collector of reverse flotation desilication (in Chinese). *Light Metals*, 6, 6-10.
- Zhang, G. F., Feng, Q. M., & Chen, Q. Y. (2004). Study on grinding media of selective grinding of bauxite. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 35(4), 552-556.