

XÁC ĐỊNH CHẾ ĐỘ TUYỂN NỔI NGHỊCH VỚI AXIT H_3PO_4 ĐỂ PHÂN TÁCH APATIT VÀ ĐOLOMIT TRONG QUẶNG APATIT LOẠI II - LÀO CAI

Trần Thị Duyên^{1*}, Bùi Kim Dung¹

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

*Email: duyentk50@gmail.com

TÓM TẮT

Trong công nghệ tuyển nổi quặng apatit loại II vùng Lào Cai, việc tách triệt để các khoáng vật tạp chất carbonat (như dolomit và calcite) luôn là một thách thức lớn do đặc tính cộng sinh mịn và tính chất bề mặt tương đồng giữa các khoáng vật này với apatit. Nghiên cứu này tập trung dẫn dắt vào giải pháp thay thế các loại thuốc tập hợp truyền thống bằng thuốc đề chìm là axit H_3PO_4 và thuốc tập hợp chọn lọc mới VH10 nhằm tối ưu hóa quá trình làm giàu P_2O_5 . Bằng phương pháp thực nghiệm tuyển nổi trên mẫu quặng nguyên khai có hàm lượng thấp, bài báo đã phân tích chi tiết sự ảnh hưởng của các thông số vận hành đến các chỉ tiêu công nghệ. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã xác lập được chế độ thuốc tuyển tối ưu, cho phép nâng cao đáng kể hiệu suất thu hồi và chất lượng tinh quặng so với các chế độ cũ.

Từ khóa: Tính chọn lọc bề mặt, axit H_3PO_4 , thuốc tập hợp VH10, hiệu suất thu hồi, quặng apatit loại II, tuyển nổi nghịch.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Apatit là nguồn nguyên liệu quan trọng trong sản xuất phân bón và công nghiệp hóa chất, tuy nhiên trong thực tế khai thác và chế biến, quặng apatit thường đi kèm với các khoáng vật chứa carbonat như dolomit, calcit..., đặc biệt phổ biến ở quặng apatit loại II. Các khoáng vật này có tính chất bề mặt gần tương đồng với apatit do cùng mang cation Ca^{2+} trên bề mặt và có các nhóm anion như PO_4^{3-} và CO_3^{2-} có cấu trúc gần giống nhau, dẫn đến khó khăn trong quá trình tuyển nổi phân tách chọn lọc. Điều này làm giảm chất lượng tinh quặng cũng như hiệu quả thu hồi, gây ảnh hưởng đến hiệu quả kinh tế và khả năng sử dụng tài nguyên.

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước đã tập trung cải thiện hiệu quả tuyển nổi hệ apatit – carbonat thông qua việc sử dụng các chất điều chỉnh môi trường, các loại thuốc tập hợp mới nhằm thay đổi tính chất bề mặt khoáng vật. Một số kết quả cho thấy axit phosphoric (H_3PO_4) có thể đóng vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh pH và tương tác với bề mặt hạt khoáng, góp phần tăng tính chọn lọc trong quá trình tuyển. Bên cạnh đó,

các thuốc tập hợp thế hệ mới như VH10 được ghi nhận có khả năng tương tác mạnh với các cation Ca^{2+} và Mg^{2+} , từ đó nâng cao hiệu quả thu hồi apatit và hạn chế kéo theo tạp chất carbonat.

Giải pháp công nghệ tuyển nổi nghịch đã được chứng minh là mang lại hiệu quả vượt trội thông qua việc chủ động điều chỉnh tính chất bề mặt khoáng vật. Trong nghiên cứu này, việc sử dụng axit phosphoric H_3PO_4 đóng vai trò là chất đề chìm chọn lọc, tạo ra môi trường pH phù hợp và hình thành lớp màng bảo vệ ngăn cản sự bám dính của thuốc tập hợp lên bề mặt các hạt apatit. Đồng thời, việc kết hợp với thuốc tập hợp thế hệ mới VH10 – một loại thuốc có ái lực mạnh với các cation Mg^{2+} và Ca^{2+} trong mạng lưới tinh thể dolomit – giúp đưa các tạp chất carbonat lên lớp bọt một cách triệt để.

Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích đặc điểm thành phần vật chất của quặng apatit loại II vùng Cam Đường – Lào Cai, đồng thời đưa ra chế độ thuốc tuyển tối ưu trong quá trình tuyển nổi nhằm nâng cao hàm lượng P_2O_5 và thực thu apatit trong tinh quặng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phân tích thành phần vật chất của mẫu nghiên cứu

Mẫu nghiên cứu là mẫu quặng apatit loại 2 (apatit – carbonat) vùng Cam Đường – Lào Cai

có hàm lượng 21 – 22 % P₂O₅.

Phân tích thành phần độ hạt mẫu nghiên cứu tiến hành bằng phương pháp rây ướt, kết quả trình bày tại bảng 1

Bảng 1: Kết quả phân tích thành phần độ hạt mẫu Apatit Cam Đường

STT	Cấp hạt (mm)	Thu hoạch (%)	P ₂ O ₅		MgO	
			Hàm lượng (%)	Phân phối (%)	Hàm lượng (%)	Phân phối (%)
1	1-2	30.03	22.20	30.44	5.80	30.03
2	0.63 - 1	20.76	22.30	21.14	6.20	22.19
3	0.315 – 0.63	11.09	21.60	10.94	6.60	12.62
4	0.15 – 0.315	7.38	21.10	7.11	6.40	8.14
5	0.074 – 0.15	3.21	18.30	2.68	7.00	3.87
6	0.04 – 0.074	4.35	16.40	3.26	6.80	5.10
7	- 0.04	23.18	26.50	28.05	4.60	18.38
	Tổng cộng	100.00	21.9	100.00	5.80	100.00

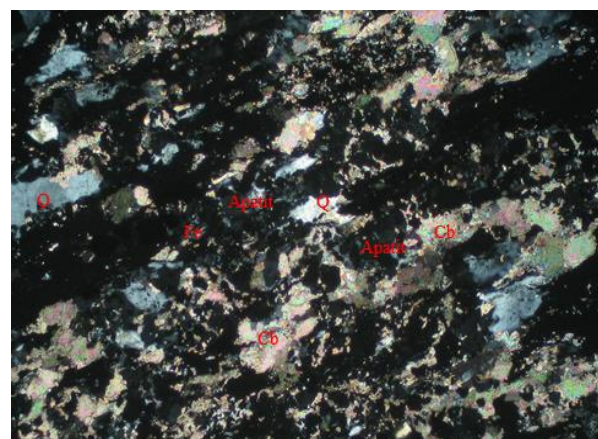
Mẫu quặng được nghiên cứu thông qua các phương pháp phân tích hóa toàn phần, phân tích nhiễu xạ Rơnghen, phân tích nhiệt vi sai và phân tích thạch học lát mỏng để xác định thành phần khoáng vật. Kết quả cho ở bảng 2,3 và hình 1

Bảng 2: Bảng phân tích hoá toàn phần

STT	Chỉ tiêu phân tích	Đơn vị	Hàm lượng phân tích
			Mẫu Cam Đường
1	P ₂ O ₅	%	21.9
2	SiO ₂	%	7.76
3	MgO	%	5.80
4	Al ₂ O ₃	%	1.35
5	CaO	%	34.9
6	CO ₂	%	15.9
7	Mất khi nung	%	16.1

Bảng 3: Bảng thành phần khoáng vật khi phân tích rơnghen

STT	Tên khoáng vật	Công thức	Tỷ lệ % khối lượng
1	Fluorapatit	Ca ₅ (F,Cl)[PO ₄] ₃	35 – 37
2	Đolomit	MgCO ₃	26 – 28
3	Canxit	CaCO ₃	6 – 8
4	Thạch anh	SiO ₂	9 – 11
5	Illit		16 – 18



Hình 1: Ảnh chụp mẫu quặng apatit phóng to 160 lần.

(Cb: Cacbonat; Q: Thạch anh; Fe: Felspat)

Quặng apatit Cam Đường là loại quặng khó tuyển nổi do tính chất tuyển nổi của 2 khoáng vật apatit và đolomit khá giống nhau. Điều này cho thấy cần thiết phải có các thuốc tập hợp có tính chọn riêng cao cũng như các chế độ đề chìm đặc thù.

Mẫu quặng nghiên cứu có độ xâm nhiễm khá mịn (kích thước hạt apatit 20-50 μm), do đó cần phải nghiền mịn quặng trước khi đưa tuyển.

Do trong quặng có ba nhóm thành phần khoáng vật có tỷ lệ lớn là apatit, carbonat (đolomit + canxit), siliccat (thạch anh, fenspat) xâm nhiễm tương đối mịn với nhau nên để đạt được chất lượng tinh quặng apatit cao thì có thể phải tuyển nổi nhiều giai đoạn.

2.2. Phương pháp nghiên cứu tuyển nổi nghịch

Thiết bị sử dụng trong nghiên cứu là máy tuyển nổi thí nghiệm dung tích 1 lít, dạng cơ học, làm việc theo nguyên lý khuấy trộn kết hợp sục khí. Hệ thống khuấy giúp phân tán khí thành các bọt khí mịn, đảm bảo sự tiếp xúc hiệu quả giữa bọt khí và hạt khoáng. Thiết bị cho phép điều chỉnh và kiểm soát các thông số công nghệ cơ bản như thời gian tuyển, nồng độ bùn và chế độ cấp thuốc tuyển, đảm bảo độ lặp lại và độ tin cậy của kết quả thí nghiệm.

Tuyển nổi nghịch là quá trình tuyển nổi trong đó các khoáng vật không có ích được làm nổi lên bề mặt bọt khí và tách ra khỏi pha bùn, trong khi khoáng vật có ích được giữ lại trong pha lỏng (không nổi). Cơ chế của quá trình này dựa trên sự khác biệt về tính chất bề mặt giữa các khoáng vật, thông qua việc sử dụng các thuốc tuyển phù hợp, bề mặt của khoáng vật không có ích được làm trở nên kỵ nước nhờ sự hấp phụ của thuốc tập hợp, trong khi khoáng vật có ích được duy trì trạng thái ưa nước nhờ tác dụng của các chất ức chế hoặc điều chỉnh môi trường.

Quặng apatit nguyên khai được nghiền đến độ mịn $d < 0.074 \text{ mm}$ từ 85-100%. Thuốc đề chìm H_3PO_4 được nạp trước để ổn định bề mặt apatit, sau đó thuốc tập hợp VH10 được đưa vào để thu hồi đolomit lên sản phẩm bọt

Chế độ tuyển nổi nghịch với H_3PO_4 là chế độ điển hình để phân tách apatit và đolomit. Trong môi trường axit thì quá trình tuyển nổi đolomit được cải thiện do quá trình hình thành các vi bóng khí CO_2 tạo ra trên bề mặt khoáng vật đolomit. Đồng thời trong môi trường axit H_3PO_4 thì apatit bị đề chìm.

Sau khi phân tích thành phần độ hạt và thành phần mẫu, tiến hành các thí nghiệm điều kiện với các thông số được nghiên cứu khảo sát theo trình tự sau đây:

- Độ mịn nghiền tối ưu;
- Nồng độ bùn tối ưu;
- Chi phí thuốc điều chỉnh môi trường axit H_3PO_4 ;
- Chi phí thuốc tập hợp VH10;

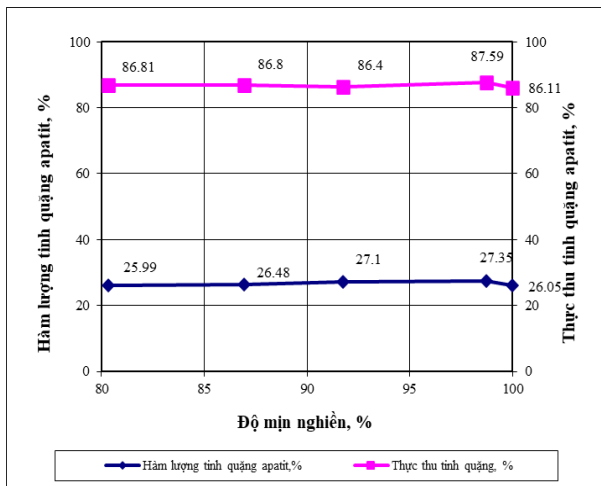
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**3.1. Thí nghiệm xác định độ mịn nghiền tối ưu**

Độ mịn nghiền ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng giải phóng khoáng vật có ích khỏi khoáng vật đi kèm, từ đó quyết định hiệu quả tuyển nổi. Nếu nghiền chưa đủ mịn, khoáng vật chưa được giải phóng hoàn toàn, làm giảm khả năng thu hồi; ngược lại, nghiền quá mịn tạo ra nhiều hạt bùn mịn gây tiêu hao thuốc tuyển và làm giảm tính chọn lọc. Vì vậy, cần xác định độ mịn nghiền tối ưu để đạt được sự cân bằng giữa độ giải phóng khoáng vật và hiệu quả tuyển nổi.

Với các điều kiện sau:

- Mẫu thí nghiệm: 300g/lít;
- Độ mịn nghiền: 80.35; 86.93; 91.76; 98.72; 100%, cấp -0.074 mm
- Chi phí H_3PO_4 : 9kg/tấn;
- Chi phí VH10: 500g/tấn;

Kết quả thí nghiệm tuyển nổi được biểu diễn tại hình 2



Hình 2: Ảnh hưởng của độ mịn nghiền đến kết quả tuyển nổi.

Ở các độ hạt thô thì tinh quặng apatit có hàm lượng thấp và đuôi carbonat có hàm lượng cao chứng tỏ các khoáng vật chưa giải phóng hết.

Khi tăng dần độ mịn nghiền thì hàm lượng tinh quặng tăng dần, hàm lượng quặng đuôi giảm dần, chứng tỏ độ giải phóng tăng.

Thí nghiệm được tiến hành thêm với độ mịn nghiền 100% cấp -0.074 cho hàm lượng P₂O₅ đạt 26.05% và thực thu đạt 86.11% do hiện tượng bùn hóa làm giảm khả năng tiếp xúc giữa hạt khoáng và bọt khí nên hàm lượng và thực thu P₂O₅ đều giảm

Đối với độ mịn nghiền 98.72% cấp -0.074mm cho hàm lượng và thực thu cao nhất nên ta chọn độ mịn nghiền tối ưu là 98.72% cấp -0.074mm.

3.2. Thí nghiệm xác định nồng độ bùn tối ưu

Nồng độ bùn là một trong những yếu tố có ý nghĩa quyết định đến hiệu quả của quá trình tuyển nổi. Nó ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng va chạm và bám dính giữa các hạt khoáng với bọt khí, từ đó chi phối hiệu suất thu hồi và độ sạch của sản phẩm. Khi nồng độ bùn quá thấp, số lượng hạt khoáng trong môi trường tuyển giảm, làm giảm xác suất tiếp xúc với bọt khí, dẫn đến hiệu quả tuyển không cao. Ngược lại, nếu nồng độ bùn quá cao, độ nhớt của huyền phù tăng lên, cản trở sự chuyển động của bọt khí và hạt khoáng, đồng thời dễ gây hiện tượng kết tụ hoặc kéo theo tạp chất, làm giảm chất lượng tinh quặng.

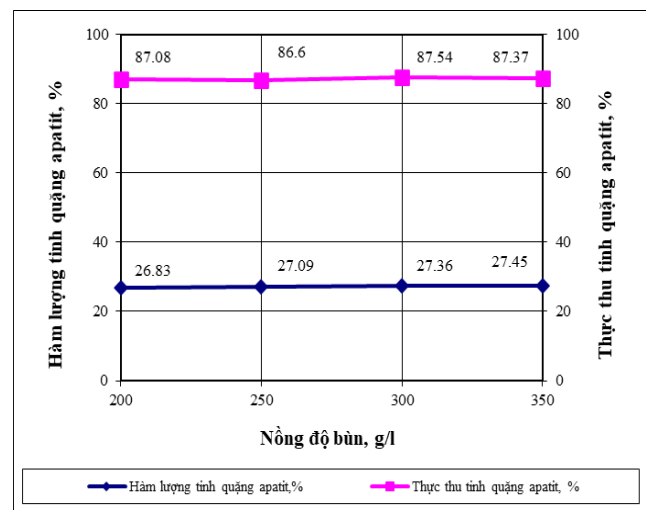
Vì vậy, việc xác định nồng độ bùn tối ưu là hết sức cần thiết nhằm đảm bảo sự cân bằng

giữa khả năng thu hồi và độ chọn lọc của quá trình tuyển nổi, góp phần nâng cao hiệu quả công nghệ và tiết kiệm chi phí sản xuất.

Các thí nghiệm xác định nồng độ bùn tối ưu được xác định với điều kiện sau:

- Nồng độ bùn: 200; 250; 300; 350 gam/lít;
- Độ mịn nghiền: 98.72% cấp -0,074mm;
- Chi phí axit phosphoric: 9kg/tấn;
- Chi phí thuốc tập hợp VH10: 500gam/tấn;

Kết quả thí nghiệm được biểu diễn tại hình 3



Hình 3: Ảnh hưởng của nồng độ bùn đến kết quả tuyển nổi

Khi tăng nồng độ bùn quặng từ 200gam/lít đến 300gam/lít thực thu và hàm lượng tinh quặng đều tăng (thực thu tăng từ 87.08% đến 87.54%; hàm lượng tăng từ 26.83% đến 27.36) tuy nhiên, nếu tiếp tục tăng nồng độ bùn quặng lên 350g/l thì thực thu tinh quặng có xu hướng giảm từ 87.54% xuống 87.37% mà hàm lượng tinh quặng tăng không đáng kể (27.45%). Do đó, chọn nồng độ bùn quặng cho các thí nghiệm tiếp theo là 300gam/lít.

3.3. Thí nghiệm xác định chi phí axit H₃PO₄ tối ưu.

Axit H₃PO₄ là yếu tố quan trọng quyết định môi trường và chi phí thuốc đè chìm, lượng axit nhiều hay ít ảnh hưởng rất lớn đến hiệu quả tuyển cũng như môi trường tuyển.

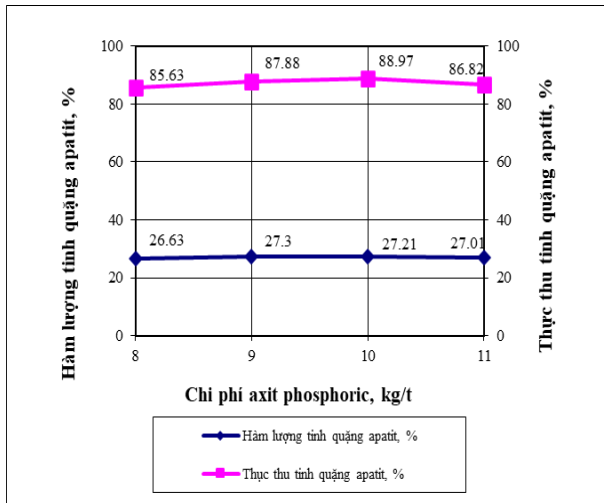
Các thí nghiệm xác định chi phí axit được xác định với điều kiện sau:

- Mẫu thí nghiệm: 300g/lít;
- Độ mịn nghiền: 98.72% cấp -0.074mm;

- Chi phí H_3PO_4 : 8kg/tấn, 9kg/tấn; 10kg/tấn; 11kg/tấn

- Chi phí VH10: 500g/tấn;

Kết quả thí nghiệm được biểu diễn tại hình 4



Hình 4: Ảnh hưởng của chi phí axit H_3PO_4 đến kết quả tuyển nổi

Ở mức chi phí 8kg/tấn độ chọn lọc chưa cao: Tinh quặng hàm lượng thấp, quặng đuôi hàm lượng cao so với quy định

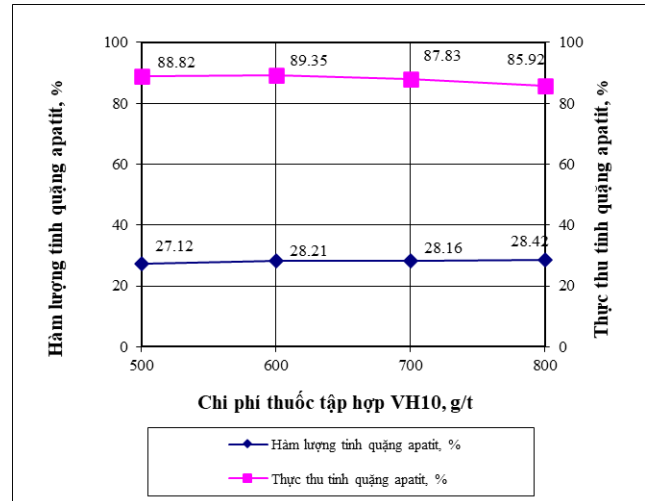
Khi thay đổi chi phí axit từ 8 đến 11kg/tấn thì hàm lượng P_2O_5 thay đổi từ 26.63 đến 27.3% và thực thu đạt cao nhất (88.97%), cho nên ta chọn chi phí axit H_3PO_4 là 10kg/tấn

3.4. Thí nghiệm xác định chi phí thuốc tập hợp (VH10)

Các thí nghiệm xác định chi phí thuốc tập hợp (VH10) được tiến hành với điều kiện sau:

- Mẫu thí nghiệm: 300g/lít;
- Độ mịn nghiền: 98.72% cấp -0.074mm;
- Chi phí axit: 10kg/tấn;
- Chi phí thuốc tập hợp VH10: 500g/tấn, 600g/tấn; 700g/tấn; 800g/tấn;

Kết quả thí nghiệm được biểu diễn tại hình 5



Hình 5: Ảnh hưởng của chi phí thuốc tập hợp VH10 đến kết quả tuyển nổi

Chi phí thuốc tập hợp VH10 là 500 đến 800g/tấn thì hàm lượng P_2O_5 thay đổi từ 27.12% đến 28.42%, thực thu thay đổi từ 85.92 đến 89.35%.

Khi chi phí lớn hơn 600g/tấn hàm lượng tăng nhưng thực thu lại giảm mạnh.

Chi phí thuốc tập hợp VH10 là 600g/tấn đạt được hàm lượng (28.21%) và thực thu cao (89.35%). Chọn chi phí thuốc tập hợp là 600g/tấn.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

4.1. Kết luận

Kết quả nghiên cứu đã làm rõ đặc điểm quặng apatit loại II vùng Cam Đường – Lào Cai là loại quặng có mức độ xâm nhiễm mịn, trong đó apatit và dolomit có tính chất bề mặt tương đồng, gây khó khăn cho quá trình tuyển nổi phân tách chọn lọc. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đã định hướng áp dụng công nghệ tuyển nổi nghịch kết hợp axit H_3PO_4 làm chất đè chìm và thuốc tập hợp VH10 nhằm cải thiện tính chọn lọc của quá trình tuyển.

Kết quả thực nghiệm đã xác lập được chế độ công nghệ phù hợp, cho phép nâng cao rõ rệt chất lượng và hiệu quả thu hồi apatit. Cụ thể, từ quặng nguyên khai có hàm lượng khoảng 21,9% P_2O_5 , đã thu được tinh quặng đạt khoảng 28,21% P_2O_5 với thực thu đạt gần 89,35%. So với các nghiên cứu trước đây sử dụng tuyển nổi thuận với các thuốc tập hợp truyền thống như axit béo hoặc amin, thường chỉ đạt hàm lượng

ting quặng khoảng 23–26% P_2O_5 và thực thu 55–72%, kết quả nghiên cứu này cho thấy ưu điểm rõ rệt về cả hàm lượng và thực thu. Điều này chứng tỏ việc sử dụng tổ hợp H_3PO_4 – VH10 trong tuyển nổi nghịch đã cải thiện đáng kể tính chọn lọc giữa apatit và các khoáng vật carbonat.

Qua các thí nghiệm tuyển nổi điều kiện xác định chế độ tuyển nổi tối ưu như sau:

- Nồng độ bùn: 300gam/lít
- Độ mịn nghiền: 98.72% cấp -0.074mm
- Chi phí axit: 10kg/tấn;
- Chi phí thuốc tập hợp VH10: 600g/tấn;

Như vậy, nghiên cứu không chỉ có ý nghĩa trong việc đề xuất chế độ tuyển phù hợp cho quặng apatit loại II vùng Cam Đường mà còn góp phần bổ sung cơ sở khoa học cho việc áp

dụng công nghệ tuyển nổi nghịch trong xử lý các loại quặng apatit có thành phần carbonat cao.

4.2. Kiến nghị

Từ các kết quả đạt được, để nâng cao độ tin cậy và khả năng áp dụng trong thực tế, cần tiếp tục thực hiện các nghiên cứu theo các hướng cụ thể sau:

Tiến hành thí nghiệm tuyển nổi vòng hở, vòng kín nhằm mục đích nâng cao chất lượng quặng tinh đảm bảo yêu cầu... (31-32% P_2O_5 , xác định sơ đồ tuyển nổi đối tượng quặng (số lượng khâu tuyển tinh, tuyển vét, điểm quay lại của sản phẩm trung gian ...)

Nghiên cứu khả năng kết hợp tuyển nổi nghịch với các phương pháp tuyển khác (như tuyển trọng lực hoặc tuyển nổi nhiều giai đoạn) nhằm nâng cao hơn nữa chất lượng tinh quặng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Bơi (1998), *Tuyển nổi*, NXB GTVT, Hà Nội.
- [2] Đinh Thu Hiền (2006), *Luận văn thạc sĩ kỹ thuật: Nghiên cứu một chế độ tuyển nổi quặng apatit - carbonat Lào Cai*, Hà Nội.
- [3] Nguyễn Hoàng Sơn, Phùng Tiến Thuật & Trần Văn Được (2018), “Nghiên cứu tuyển quặng apatit loại II Mỏ Cóc- Lào Cai ở chế độ nghiền thô bằng sơ đồ kết hợp tuyển nổi tầng sôi và tuyển nổi thông thường”, *Tạp chí Công nghiệp mỏ*, số 01/2018, trang 7-12.
- [4] Nguyễn Hoàng Sơn (2014), “Nghiên cứu thí nghiệm tuyển nổi quặng apatit loại 2 Lào Cai bằng thuốc tập hợp axit hydroxamic”, *Tạp chí Công nghiệp mỏ*, số 01/2014
- [5] Trần Văn Được (2023), “Nghiên cứu thu hồi apatit trong bãi thải của nhà máy tuyển quặng apatit Bắc Nhạc Sơn, Lào Cai”, *Tạp chí Công nghiệp mỏ*, số 05/2023, trang 24-29.

Thông tin của tác giả:

ThS. Trần Thị Duyên

Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).977.203.343 - Email: duyentk50@gmail.com

ThS. Bùi Kim Dung

Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).389.352.799 - Email: dungtk50@gmail.com

DETERMINATION OF REVERSE FLOTATION CONDITIONS USING H_3PO_4 FOR THE SEPARATION OF APATITE AND DOLOMITE IN TYPE II APATITE ORE – LAO CAI

Information about authors:

Tran Thi Duyen, M.Sc., Quang Ninh University of Industry, email: duyentk50@gmail.com

Bui Kim Dung, M.Sc., Quang Ninh University of Industry

ABSTRACT:

In the flotation processing of Type II apatite ore in the Lao Cai region, the complete separation of carbonate gangue minerals (such as dolomite and calcite) remains a major challenge due to their fine intergrowth and surface properties similar to those of apatite. This study focuses on replacing conventional collectors with a new selective collector, VH10, in combination with phosphoric acid (H_3PO_4) as a depressant, in order to optimize the enrichment of P_2O_5 . Based on flotation experiments conducted on low-grade run-of-mine ore samples, the paper systematically analyzes the influence of operating parameters on key technological indicators. The experimental results establish an optimal reagent regime, significantly improving recovery efficiency and concentrate quality compared with conventional flotation schemes.

Keywords: Surface selectivity, H_3PO_4 acid, VH10 collector, recovery efficiency, type II apatite ore, reverse flotation.

REFERENCES

- [1] Nguyen Boi (1998), *Flotation*, Transport Publishing House, Ha Noi.
- [2] Đinh Thu Hien (2006), *Master's Thesis in Engineering: Study on a flotation regime for apatite-carbonate ore in Lao Cai*, Ha Noi.
- [3] Nguyen Hoang Son, Phung Tien Thuat, Tran Van Duoc (2018), " Study on flotation of type II apatite ore in Lao Cai using a combined column flotation and conventional flotation process", *Journal of Mining Industry*, No. 01/2018, pp. 7–12.
- [4] Nguyen Hoang Son (2014), "Experimental study on flotation of type II apatite ore in Lao Cai using hydroxamic acid collector," *Journal of Mining Industry*, No. 01/2014.
- [5] Tran Van Duoc (2023), "Study on recovery of apatite from tailings of the Bac Nhat Son apatite processing plant, Lao Cai," *Journal of Mining Industry*, No. 05/2023, pp. 24–29.

Ngày nhận bài: 28/03/2026;

Ngày nhận bài sửa: 16/04/2026;

Ngày chấp nhận đăng: 17/04/2026.