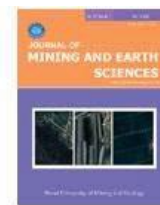




Journal of Mining and Earth Sciences

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



Study and proposal of a flotation technology for Zinc Oxide Ore from the Cho Dien deposit



Quynh Thu Thi Do ¹, Luan Van Pham ^{2,3,*}, Ha Viet Le ^{2,3}

¹ PhD student at Mining Faculty, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25th Aug. 2025

Revised 08th Dec. 2025

Accepted 28th Dec. 2025

Keywords:

Flotation,
Flotation machine,
Flotation reagent,
Zinc oxide ore.

ABSTRACT

In recent years, the rapid decline in both reserves and quality of domestic zinc sulfide ores-the primary raw material for zinc metal production in Vietnam-has posed significant challenges for the industry. This has made the development of alternative processing technologies for low-grade zinc oxide ores (5÷10% Zn) increasingly urgent. The Cho Dien deposit (Thai Nguyen province) hosts such ores, which are strongly weathered, fine-grained, and mineralogically complex, containing smithsonite, hemimorphite, and chalcophanite with goethite, clays, and carbonates as major gangue minerals.

This study investigates flotation performance under different processing regimes, including desliming versus non-desliming, reagent schemes, and flotation machine types. Experimental results demonstrate that a reagent combination of Na₂S-Tan-X-Sep-X, combined with non-desliming, is more effective than conventional depressants and dispersants. Moreover, a comparison between conventional mechanical flotation and forced-air flotation cells (TankCell) shows that TankCell achieves a zinc concentrate grading 21.75% Zn with a recovery of 62.7% after a single cleaning stage, whereas mechanical flotation requires two cleaning stages to obtain a concentrate of 21.18% Zn at 62.5% recovery. These findings confirm that flotation is a technically feasible route for complex low-grade zinc oxide ores in Vietnam and provide a practical basis for industrial application.

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

*Corresponding author

E - mail: phamvanluan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).10



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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



Nghiên cứu và đề xuất giải pháp công nghệ tuyển nổi quặng oxit kẽm mỏ Chợ Điền

Đỗ Thị Như Quỳnh¹, Phạm Văn Luận^{2,3,*}, Lê Việt Hà^{2,3}

¹ Nghiên cứu sinh tại Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

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

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 25/8/2025

Sửa xong 08/12/2025

Chấp nhận đăng 28/12/2025

Từ khóa:

Máy tuyển nổi,
Quặng oxit kẽm,
Thuốc tuyển nổi,
Tuyển nổi.

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, sự suy giảm mạnh cả về trữ lượng lẫn chất lượng của nguồn quặng kẽm sunfua trong nước - nguyên liệu chủ yếu để sản xuất kẽm kim loại tại Việt Nam - đã đặt ra những thách thức lớn cho ngành công nghiệp luyện kẽm. Do đó, việc phát triển các công nghệ chế biến thay thế cho quặng kẽm oxit nghèo ($5\div 10\%$ Zn) ngày càng trở nên cấp thiết. Mỏ Chợ Điền (tỉnh Thái Nguyên) chứa loại quặng này với đặc điểm phong hóa mạnh, hạt mịn, thành phần khoáng vật phức tạp, trong đó khoáng chứa kẽm gồm smithsonit, hemimorphit, chalcophanit và tạp chất chính là gothit, sét, cacbonat.

Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả tuyển nổi dưới các chế độ công nghệ khác nhau: khử và không khử slam, các chế độ thuốc tuyển, cũng như so sánh giữa máy tuyển nổi cơ giới và máy tuyển nổi tự tràn (TankCell). Kết quả thí nghiệm cho thấy, hệ thuốc Na_2S -Tan-X-Sep-X kết hợp với chế độ không khử slam cho hiệu quả cao hơn so với các hệ thuốc truyền thống. Ngoài ra, so sánh giữa hai loại thiết bị tuyển cho thấy, máy TankCell thu được quặng tinh chứa 21,75% Zn với thực thu 62,7% chỉ sau một lần tuyển tinh, trong khi máy cơ giới cần hai lần tuyển tinh mới đạt 21,18% Zn với thực thu 62,5%. Các kết quả này khẳng định tính khả thi về mặt công nghệ của tuyển nổi đối với quặng kẽm oxit nghèo, phức tạp tại Việt Nam, đồng thời cung cấp cơ sở thực tiễn cho khả năng áp dụng công nghệ.

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

*Tác giả liên hệ

E - mail: phamvanluan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).10

1. Mở đầu

Kẽm kim loại được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp từ kim loại đến cao su và dược phẩm. Lĩnh vực sử dụng chính của kẽm là

trong công nghiệp mạ. Zn còn sử dụng làm điện cực cho pin Zn-ion, an toàn hơn, rẻ hơn và bền hơn so với pin Li-ion. Ngoài ra, các hợp chất của kẽm còn là nguyên liệu quan trọng cho các ngành công nghiệp cao su, hóa chất, sơn, nông nghiệp và y tế (hợp kim kẽm được sử dụng cho nhiều thiết bị y tế vì kim loại này an toàn với môi trường) (Müller và nnk., 2025).

Theo Nhóm nghiên cứu chì kẽm quốc tế ước tính sản lượng kẽm tinh chế toàn cầu vào năm 2024 được dự báo sẽ giảm 1,8% xuống còn 13,7 triệu tấn do nguồn cung quặng tinh giảm và ước tính mức tiêu thụ kim loại được dự báo sẽ tăng 1,8% lên 13,8 triệu tấn, dẫn đến thâm hụt nguồn cung so với nhu cầu là 164.000 tấn (ILZSG, 2024). Sản lượng kẽm khai thác từ quặng năm 2023 trên toàn cầu đạt 12,1 triệu tấn, trong đó Trung Quốc là nhà sản xuất lớn nhất thế giới với sản lượng 4,06 triệu tấn, tiếp theo là Peru với sản lượng 1,47 triệu tấn (USGS, 2025). Nhu cầu kẽm kim loại tại Việt Nam giai đoạn 2020÷2025 vào khoảng 160.000÷200.000 tấn/năm (1997/QĐ-TTg, 2015). Nhưng nguồn kẽm kim loại tiêu thụ trong nước chủ yếu đến từ nhập khẩu, sản lượng kẽm nhập khẩu hằng năm ước tính khoảng 120.000÷150.000 tấn/năm (Stavian Metal.com, 2024). Tỷ trọng sản lượng kẽm kim loại nội địa rất thấp. Ví dụ, nhà máy sản xuất kẽm thỏi lớn nhất cả nước - Nhà máy điện phân kẽm Thái Nguyên - trong năm 2024 chỉ sản xuất được 9.158 tấn kẽm thỏi (Vimico, 2024), thấp hơn so với thiết kế 15.000 tấn/năm. Sản lượng của nhà máy không đạt thiết kế chủ yếu là do nguồn quặng tinh kẽm sunfua ngày càng khan hiếm. Từ các số liệu trên cho thấy ngành công nghiệp sử dụng kẽm trong nước hiện đang phụ thuộc rất lớn vào nguồn cung từ nước ngoài, đồng thời đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc nâng cao năng lực khai thác và chế biến quặng kẽm trong nước, đặc biệt là quặng oxit kẽm nghèo nhằm giảm thiểu rủi ro từ biến động thị trường quốc tế. Do đó, việc nghiên cứu và áp dụng các giải pháp công nghệ khả thi để tận dụng nguồn quặng kẽm oxit nghèo trở nên cấp thiết, không chỉ mang ý nghĩa khoa học mà còn có giá trị thực tiễn đối với ngành luyện kẽm tại Việt Nam.

Theo tài liệu địa chất, trữ lượng quặng oxit kẽm nghèo (5÷10% Zn) của mỏ Chợ Điền vào khoảng 873.220 tấn (Trần, 2007). Mặc dù, cho đến nay đã có nhiều nghiên cứu trong nước đưa ra các giải pháp công nghệ để tuyển loại quặng này.

Nhưng chưa có giải pháp công nghệ nào được áp dụng vào thực tế sản xuất, do thiếu tính khả thi về mặt kinh tế - kỹ thuật.

Quặng kẽm oxit nghèo mỏ Chợ Điền được xếp vào loại khó tuyển nổi do hội tụ nhiều đặc điểm bất lợi, như: (1) thành phần khoáng vật chứa kẽm đa dạng, liên kết chặt chẽ và xâm nhiễm mịn; (2) mức độ phong hóa mạnh dẫn đến hàm lượng bùn sét cao; và (3) tính nổi và đặc tính bề mặt của các khoáng vật có ích tương đồng với một số khoáng vật tạp như canxit và dolomit (Đỗ và nnk., 2024). Vì vậy, mục tiêu của chúng tôi trong nghiên cứu này là xác định và áp dụng công nghệ tuyển hợp lý nhằm hạn chế tác động bất lợi của bùn sét, nâng cao tính chọn riêng giữa khoáng vật có ích và khoáng vật tạp, từ đó cải thiện hiệu quả tuyển nổi quặng kẽm oxit nghèo nhằm thu được quặng tinh kẽm có hàm lượng trên 15% Zn cung cấp cho nhà máy sản xuất ZnO.

2. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu quả tuyển nổi quặng oxit kẽm

Đối với quặng kẽm oxit nghèo, đặc biệt là quặng bị phong hoá mạnh, nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra rằng hiệu quả tuyển nổi phụ thuộc đáng kể vào một số yếu tố công nghệ như: (1) chế độ xử lý slam (khử hoặc không khử slam); (2) chế độ và chủng loại thuốc tuyển; và (3) loại thiết bị tuyển nổi được sử dụng. Việc lựa chọn và tối ưu đồng thời các yếu tố này đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao khả năng thu hồi và chất lượng quặng tinh.

2.1. Ảnh hưởng của slam

Hosseini và Forssberg (2011) đã nghiên cứu ảnh hưởng của slam (cấp hạt -0,02 mm) đến kết quả tuyển nổi smithsonit bằng thuốc tập hợp hexyl mercaptan. Kết quả thí nghiệm ở cùng chi phí thuốc tập hợp 1300 g/t và pH = 9 thì quặng tinh không khử slam có hàm lượng Zn và thực thu kẽm (tính riêng cho khâu tuyển nổi) lần lượt là 12,6% và 55%, còn quặng tinh khử slam có hàm lượng Zn và thực thu kẽm lần lượt là 22,5% và 75%.

Có thể nhận thấy hiệu quả tuyển nổi smithsonit khi khử slam cao hơn so với khi không khử slam. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này các tác giả không sử dụng thuốc phân tán và đè chìm nên kết quả tuyển có sự khác biệt rõ rệt, đồng thời

chưa đề cập đến thực thu toàn bộ khi khử slam. Trong một nghiên cứu khác Martins và các cộng sự (Martins và nnk., 2010) đã nghiên cứu ảnh hưởng của natri sulfua, pH, thuốc phân tán, thuốc đè chìm... chế độ khử slam và không khử slam đến hiệu quả thu hồi hemimorphit. Ở cùng điều kiện thí nghiệm khi thí nghiệm trong phòng với chế độ khử slam thu được quặng tinh có hàm 38,4% Zn với thực thu 72,4%, kết quả này tương đương với thí nghiệm không khử slam ở quy mô bán công nghiệp. Còn khi các tác giả thí nghiệm ở quy mô công nghiệp với điều kiện không khử slam đã thu được quặng tinh có hàm lượng 37,3% Zn với mức thực thu đạt 76,1%. Có thể nhận thấy khi không khử slam thu được quặng tinh kẽm có chất lượng

thấp hơn nhưng thực thu kẽm cao hơn, đồng thời để đảm hiệu quả tuyển cần sử dụng thêm các thuốc phân tán, đè chìm và sunfua hoá. Ngoài ra, sơ đồ công nghệ tuyển không khử slam đơn giản hơn.

2.2. Ảnh hưởng của chế độ và chủng loại thuốc tuyển

Để lựa chọn chủng loại và chế độ thuốc tuyển trong quá trình tuyển nổi quặng oxit kẽm cần phải dựa vào thành phần khoáng vật của quặng. Hiện nay, nhiều tác giả sử dụng những phương án như trong Bảng 1 để tuyển nổi quặng oxit kẽm (Ejtemaei và nnk., 2014).

Bảng 1. So sánh các phương án chế độ thuốc tuyển quặng oxit kẽm (Ejtemaei và nnk., 2014).

Phương án	Điều kiện tối ưu	Ưu điểm	Nhược điểm / Hạn chế	Kết quả tuyển
Sunfua hóa rồi tuyển nổi bằng thuốc cation (Armac C, dodecylamine).	pH 10,5÷11,5; nồng độ bùn 30÷40%; nhiệt độ 25÷40 °C; điều chỉnh pH bằng NaOH; có thể dùng nhũ tương amin + dầu nhiên liệu/dầu thông; dùng Na ₂ SiO ₃ và Na-hexametaphosphate (SHMP) đè chìm thạch anh, canxit.	Hiệu suất thu hồi cao với khoáng hemimorphit; thích hợp quặng nghèo.	Không chọn lọc nếu không dùng thuốc đè chìm; tỷ lệ slam tăng chi phí thuốc tập hợp; Na ₂ CO ₃ làm giảm thu hồi Zn; thạch anh làm giảm tính chọn tiếng mạnh ở môi trường kiềm.	Quặng tinh đạt 25÷35% Zn; thực thu 65÷75%.
Sunfua hóa và kích động bằng ion kim loại rồi tuyển nổi bằng xanthate.	pH ~10,5; nồng độ bùn rắn 30÷40%.	Có thể thu hồi đồng thời smithsonit và hemimorphit.	Độ chọn lọc thấp, chưa phù hợp cho công nghiệp.	Quặng tinh thường 20÷28% Zn; thực thu 55÷65%.
Tuyển nổi bằng axit béo (axit oleic).	pH ~10; kiểm soát chặt pH để điều chỉnh điện tích bề mặt; tránh quặng có nhiều canxit.	Chọn lọc tốt khi quặng ít canxit; hiệu quả cho quặng sạch.	Canxit hạn chế hiệu quả do cạnh tranh hấp phụ; chịu ảnh hưởng mạnh của ion hòa tan.	Quặng tinh đạt 28÷38% Zn; thực thu 60÷70% (quặng sạch, ít canxit).
Tuyển nổi bằng Mercaptan.	pH ~9; có thể kết hợp khử slam để tăng thực thu.	Hiệu quả tương đối với smithsonit, hemimorphit.	Độ chọn lọc thấp; không phổ biến trong công nghiệp.	Quặng tinh 22÷30% Zn; thực thu 55÷65%.
Tuyển nổi bằng chelat.	Quy mô phòng thí nghiệm; chưa có số liệu tối ưu.	Có khả năng chọn lọc cao.	Chưa ứng dụng công nghiệp do thiếu gốc hydrocarbon mạch dài; giá thành cao.	Nghiên cứu trong phòng; quặng tinh đạt >30% Zn, nhưng chưa có dữ liệu thực thu ổn định.

Tuyển nổi bằng hỗn hợp thuốc cation và anion (Armac C + KAX).	Trình tự bổ sung thuốc rất quan trọng; pH thích hợp $\sim 10 \div 11$.	Có triển vọng, thu được quặng tinh đạt yêu cầu; tận dụng ưu điểm của cả thuốc cation và anion.	Cần nghiên cứu thêm về tương tác thuốc và tối ưu chi phí.	Có thể thu được quặng tinh $30 \div 35\%$ Zn; thực thu $65 \div 75\%$.
Dùng thêm thuốc đề chìm và phân tán (Na_2SiO_3 , SHMP).	Dùng ở môi trường kiềm (dùng được cho tất cả các phương án trên).	Giảm hấp phụ thuốc tập hợp vào thạch anh, canxit; tăng tính chọn riêng.	Chi phí tăng nếu bùn chứa nhiều slam mịn; không hiệu quả khi kiểm soát pH không tốt.	Làm tăng hàm lượng quặng tinh thêm $2 \div 5\%$ Zn và tăng thực thu $3 \div 7\%$.

2.3. Ảnh hưởng của loại máy tuyển nổi

Gần đây, nhiều nhà máy tuyển quặng kim loại màu trên thế giới và Việt Nam đã chuyển đổi từ máy tuyển nổi cơ giới truyền thống sang máy tuyển nổi khí nén kiểu tự tràn (TankCell) có năng suất và hiệu suất tuyển cao hơn. Ví dụ: Năm 2017, tập đoàn Hindustan Zinc Limited (HZL) của Ấn Độ đã thay hệ thống máy cũ bằng máy tuyển nổi TankCell của hãng Metso cho nhà máy tuyển nổi quặng chì - kẽm, với hệ thống máy tuyển nổi mới này thực thu và hàm lượng quặng tinh chì và kẽm của nhà máy đều tăng trên 0,5%. Cụ thể quặng tinh chì có hàm lượng 55%Pb với mức thực thu đạt 89,5%; quặng tinh kẽm đạt hàm lượng 51% Zn với thực thu đạt 91,5%; Ngoài ra mức thu hồi bạc đạt gần 84%. Đồng thời năng suất của nhà máy tăng từ 1,5 triệu tấn/năm lên 2 triệu tấn/năm (Metso, 2020); còn tại Việt Nam, năm 2017, nhà máy tuyển quặng đồng Sin Quyền 1, đã tiến hành thay thế đồng loạt máy tuyển nổi truyền thống bằng máy tuyển nổi TankCell. Sau khi thay thế thay thế, các chỉ tiêu công nghệ của nhà máy đều tăng. Cụ thể, quặng tinh đồng có hàm lượng tăng từ 25%Cu lên trên 25,52%Cu và thực thu đồng tăng từ 92,02% lên trên 94%; hàm lượng đồng trong đuôi thải giảm từ 0,08%Cu xuống khoảng 0,06%Cu; quặng tinh sắt có hàm lượng tăng từ 64,5%Fe lên trên 65%Fe và thực thu sắt tăng từ 25,2% lên 28% (Lý và nnk., 2018).

3. Mẫu và thiết bị nghiên cứu

3.1. Mẫu nghiên cứu

Mẫu quặng oxit kẽm nghèo được Công ty CP Kim loại màu Thái Nguyên cung cấp với khối

lượng 5 tấn. Mẫu sau khi được gia công trộn đều được đưa đi phân tích thành phần độ hạt, thành phần khoáng vật và hoá học. Kết quả phân tích được cho ở Bảng 2 và các biểu đồ Hình 1 và 2.

Từ kết quả phân tích tính chất của mẫu nghiên cứu nhận thấy:

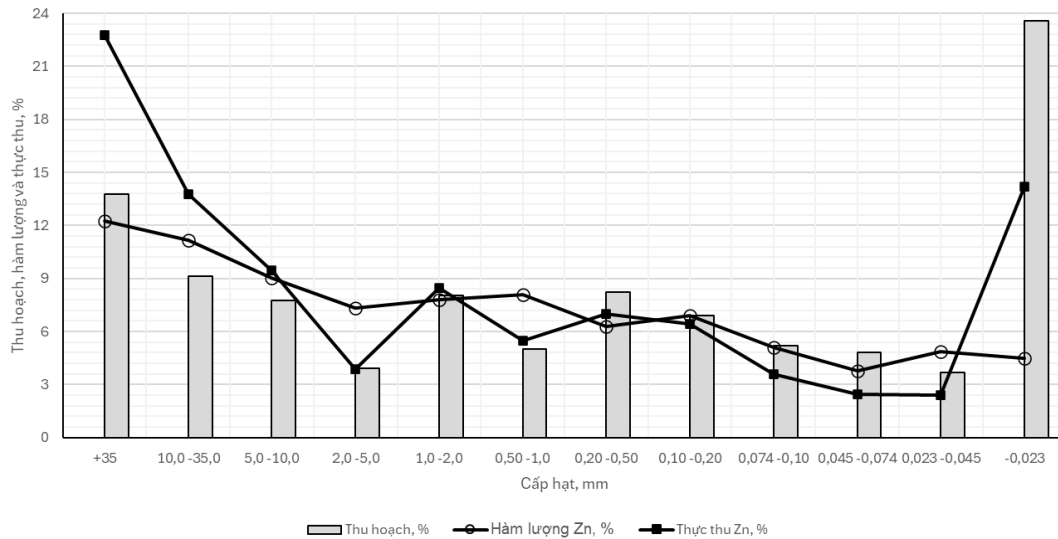
Kết quả phân tích cỡ hạt (Hình 1) cho thấy quặng chứa Zn phân bố không đồng đều theo cấp hạt: hàm lượng Zn cao nhất ở các cấp hạt thô ($+35$ mm, $10 \div 35$ mm, $11 \div 12\%$) và giảm dần về cấp hạt mịn, trong khi cấp hạt rất mịn ($-0,023$ mm) tuy có hàm lượng thấp (4,47%) nhưng chiếm khối lượng lớn (23,56%). Điều này đồng nghĩa với việc mẫu quặng chứa nhiều bùn mịn, gây khó khăn cho quá trình tuyển nổi do diện tích bề mặt lớn, làm giảm khả năng chọn riêng của quá trình tuyển nổi.

Thành phần khoáng vật (Hình 2) cho thấy Zn tồn tại chủ yếu ở dạng silicat (Hemimorphit), cacbonat (Smithsonit) và manganat (Chacophanit) chúng chiếm tổng cộng khoảng $15 \div 21\%$. Phần còn lại chủ yếu là khoáng phi quặng như Gothit + Hematit ($27 \div 29\%$), Illit ($17 \div 19\%$), Thạch anh ($11 \div 13\%$), cùng các khoáng cacbonat và silicat khác. Mẫu nghiên cứu bao gồm nhiều khoáng khoáng vật chứa Zn với bản chất hóa học khác nhau (silicat, cacbonat, manganat), khiến bề mặt phản ứng không đồng nhất và làm gia tăng độ phức tạp của quá trình tuyển nổi, đòi hỏi phải áp dụng chế độ và loại thuốc tuyển phù hợp cho từng khoáng nhằm đảm bảo thu hồi tối đa khoáng vật có ích.

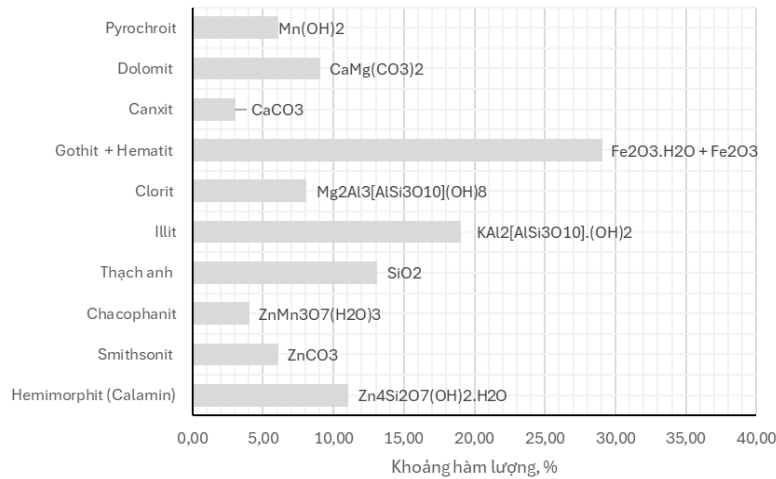
Về thành phần hóa học (Bảng 2), hàm lượng Zn trong mẫu nghiên cứu chỉ đạt 7,4%, cho thấy đây là quặng nghèo. Hàm lượng Fe cao (TFe = 17,88%) và SiO_2 (23,02%) phản ánh sự hiện diện lớn của oxit sắt và khoáng silicat - những khoáng

Bảng 2. Thành phần hoá học của mẫu nghiên cứu.

Nguyên tố/hợp chất	Zn	TFe	Mn	Cu	Pb	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	P	As
Tỷ lệ, %	7,4	17,88	5,6	0,101	3,05	1,24	10,13	23,02	0,09	0,092	0,232



Hình 1. Biểu đồ phân bố hàm lượng và thực thu kẽm theo cấp hạt.



Hình 2. Biểu đồ phân bố khoáng vật trong mẫu nghiên cứu.

tạp chất khó tách và có xu hướng tiêu hao thuốc tuyển. Hàm lượng Al₂O₃ cao (10,13%) cùng các khoáng sét như Illit, Clorit góp phần tạo bùn mịn, ảnh hưởng xấu đến khả năng nổi của khoáng vật có ích. Ngoài ra, Mn (5,6%) và Pb (3,05%) là các nguyên tố đi kèm có thể thu hồi, nhưng sự có mặt của Mn trong khoáng Chacophanit và Pyrochroit có thể làm tăng độ phức tạp của hệ tuyển.

Nhìn chung mẫu nghiên cứu có những tính chất cơ bản sau: (1) Mẫu nghiên cứu chứa nhiều cấp hạt mịn làm tăng độ nhớt của bùn quặng và

giảm hiệu quả tuyển; (2) Thành phần khoáng vật chứa kẽm đa dạng nên cần sử dụng nhiều loại thuốc tuyển; (3) Tạp chất giàu Fe, SiO₂, Al₂O₃ làm tăng chi phí thuốc và làm giảm tính chọn riêng; và (4) Hàm lượng kẽm thấp nên cần nhiều khâu tuyển tinh mới thu được quặng tinh đạt yêu cầu.

3.2. Thiết bị và phương pháp nghiên cứu

3.2.1. Thiết bị nghiên cứu và thuốc tuyển

Các thí nghiệm tuyển nổi được tuyển bằng máy cơ giới dung tích 1L, 3L và máy tuyển nổi TankCell dung tích 75 L. Hình ảnh máy tuyển được cho ở Hình 3.



a, Máy tuyển nổi cơ giới; b, Tuyển TankCell

Hình 3. Ảnh các thiết bị thí nghiệm.

Các loại thuốc tuyển dùng trong nghiên cứu cho ở Bảng 3.

Bảng 3. Các loại thuốc dùng trong nghiên cứu.

TT	Hoá chất	Tác dụng
1	Axit béo	Tập hợp
2	Dầu hoả	Tập hợp
3	Na ₂ S	Sunfua hoá
4	Na ₂ SiO ₃	Đề chìm
5	Dextrin	Đề chìm
6	Sep-X ^a	Phân tán
7	Tan-XS ^b	Đề chìm
8	Na ₂ CO ₃	Điều chỉnh pH
9	SHMP	Phân tán
10	MIBC	Tạo bọt

^a Sep-X là hỗn hợp polyme tự nhiên với 50% tanin;

^b Tan-XS là bột Bisufite chiết xuất từ cây keo Úc.

3.2.2. Phương pháp nghiên cứu

Các thí nghiệm tuyển nổi được tiến hành trên máy tuyển nổi cơ giới và TankCell với thuốc tập hợp chính là axit béo và thuốc tập hợp thứ cấp là dầu hoả. Thời gian khuấy tiếp xúc bùn quặng với các thuốc tập hợp là 5 phút, với Na₂S là 15 phút, còn các thuốc khác là 3 phút. Thứ tự cấp thuốc: điều chỉnh pH, sunfua hoá, đề chìm, phân tán, tập hợp và cuối cùng là thuốc tạo bọt (chỉ dùng cho máy TankCell).

Sản phẩm của từng thí nghiệm tuyển nổi được đem lọc, sấy khô, cân xác định khối lượng và

phân tích xác định hàm lượng Zn. Kết quả của từng thí nghiệm được đánh giá thông qua hàm lượng Zn và thực thu Zn trong quặng tinh.

4. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

4.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của slam

Slam ảnh hưởng xấu đến quá trình tuyển nổi như: thúc đẩy hiện tượng nổi cơ học làm giảm chất lượng quặng tinh; diện tích bề mặt lớn làm tăng chi phí thuốc tuyển nổi; ngoài ra, slam còn ảnh hưởng đến khâu lọc quặng tinh. Tuy nhiên, đối với mẫu nghiên cứu, nếu khử slam trước khi tuyển sẽ làm mất mát quặng tinh vào đuôi thải, đồng thời sơ đồ công nghệ tuyển sẽ phức tạp hơn. Do đó, trong nghiên cứu này chúng tôi tiến hành thí nghiệm so sánh hiệu quả tuyển nổi giữa mẫu khử và không khử slam ở chi phí thuốc tập hợp khác nhau. Tính chất của của 02 mẫu cho ở Bảng 4. Slam mịn (cấp -0,02 mm), được khử bằng hệ thống: sàng quay đánh to, máy phân cấp ruột xoắn và xiclon. Điều kiện như sau:

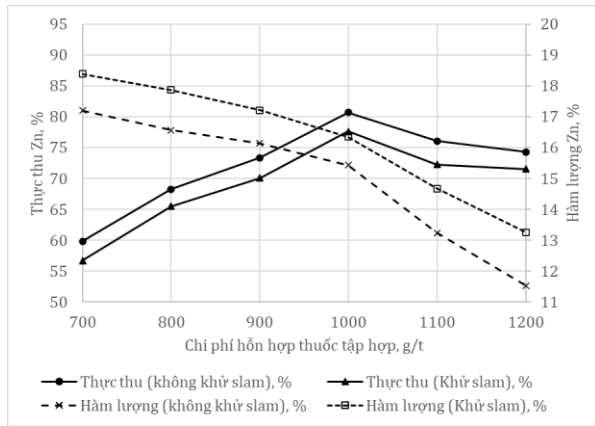
- Dung tích máy tuyển nổi: 3 lít;
- Nồng độ pha rắn: 200 g/l;
- Độ mịn nghiền: 100% cấp -0,1 mm;
- Độ pH môi trường: 9,5 (được điều chỉnh bằng Na₂CO₃)
- Chi phí Na₂S: 10.000 g/t;
- Chi phí Na₂SiO₃: 500 g/t
- Chi phí Tan - X: 500 g/t
- Chi phí Sep - X: 500 g/t;
- Chi phí thuốc tập hợp (axit béo + dầu hoả, tỷ lệ 4:1) thay đổi lần lượt là: 800; 900; 1000; 1100 và 1200 g/t.

Bảng 4. Tính chất của mẫu khử slam và không khử slam.

Sản phẩm	Thu hoạch, %	Hàm lượng Zn, %	Thực thu Zn, %
Khử slam (Cấp +0,02 mm)	74,17	8,38	84,01
Slam	25,83	4,58	15,99
Không khử slam	100,00	7,40	100,00

Sau khi thí tuyển nổi một lần 02 mẫu trên máy tuyển nổi cơ giới thu được kết quả như Hình 4.

Từ kết quả thí nghiệm ở Hình 4 nhận thấy:



Hình 4. Đồ thị so sánh hiệu quả tuyển giữa khử và không khử slam khi thay đổi chi phí thuốc tập hợp.

- Ở mọi chi phí thuốc tập hợp thực thu toàn bộ Zn trong quặng tinh của mẫu không khử slam luôn cao hơn so với mẫu khử slam, còn hàm lượng Zn trong quặng tinh của mẫu không khử slam luôn thấp hơn;

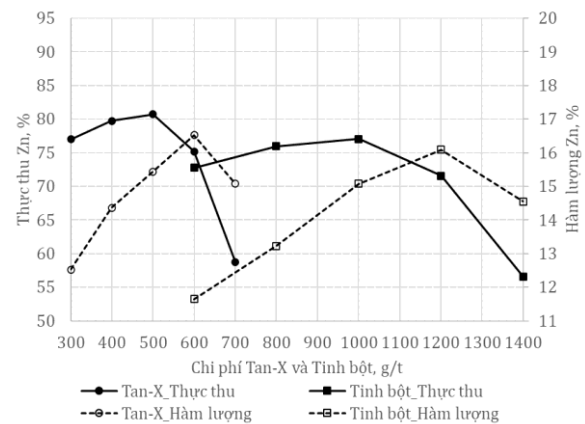
- Điểm tối ưu rõ nhất của hai mẫu nằm ở chi phí thuốc tập hợp 1000 g/t. Khi đó mẫu khử slam có hàm lượng và thực thu kẽm trong quặng tinh lần lượt là: 16,35% và 77,63%; còn mẫu không khử slam có hàm lượng và thực thu kẽm trong quặng tinh lần lượt là: 15,44% và 80,74%. Kết quả này có quy luật giống nghiên cứu của Martins và các cộng sự (Martins và nnk., 2010).

- Như vậy, để đảm bảo thực thu và đơn giản hoá sơ đồ công nghệ tuyển nên chọn chế độ tuyển không khử slam. Tuy nhiên, khi tuyển ở chế độ này cần sử dụng thêm thuốc phân tán bùn quặng để tăng hiệu quả tuyển.

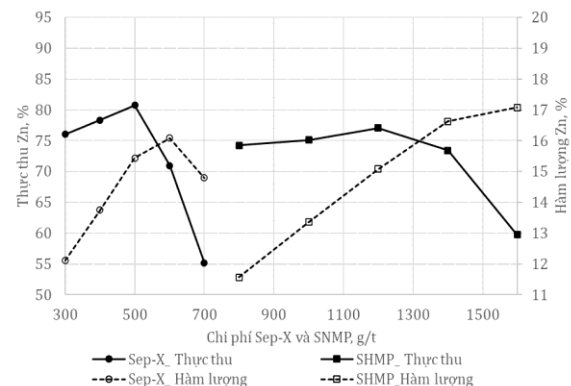
4.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ thuốc tuyển

Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng phương án sử dụng thuốc tập hợp axit béo để tập hợp các khoáng vật oxit kẽm. Tuy nhiên, khác với nhiều nghiên cứu trước chúng tôi dùng Tan - X để đè chìm và Sep - X để phân tán. Theo hãng Bondite, Tan - X có hiệu quả đè chìm tốt các khoáng vật canxit, dolomit, silicat hệ Ca-Al-Mg, Talc và sét. Còn Sep - X ngoài khả năng phân tán còn có khả năng đè chìm tốt các khoáng sắt sunfua. Cả hai hoá chất này đều có nguồn gốc hữu cơ nên thân thiện với môi trường (<https://nte.co.za/bondtite-products/>). Ngoài ra, do mẫu nghiên cứu chứa nhiều

khoáng vật chứa sắt nên dùng Na_2S để sunfua hoá các khoáng vật của sắt và chúng có thể bị đè chìm bởi Sep - X. Cơ chế về khả năng hấp phụ lưu huỳnh của các ion Fe^{3+} đã được Deng và các cộng sự làm sáng tỏ trong một nghiên cứu về khả năng hấp phụ hoá chất lên bề mặt smithsonit (Deng và nnk., 2017), đồng thời Na_2S còn có tác dụng sunfua hoá bề mặt khoáng vật oxit kẽm để làm tăng hiệu quả tuyển nổi. Do đó, trong nghiên cứu này chúng tôi trình bày kết quả nghiên cứu so sánh hiệu quả tuyển nổi khi sử dụng Tan - X và Sep - X với hệ thống đè chìm và phân tán truyền thống (thuỷ tinh lỏng, tinh bột và Natri hexametal phosphat - SHMP). Điều kiện thí nghiệm tương tự như mục 4.1 nhưng với chi phí hỗn hợp thuốc tập hợp là 1000 g/t; khi so sánh hiệu quả tuyển giữa Tan - X và tinh bột sử dụng lần lượt Sep - X và SHMP lần lượt ở chi phí 500 g/t và 1200 g/t; tương tự khi so sánh Sep - X và SHMP sử dụng lần lượt Tan - X và tinh bột lần lượt ở chi phí 500 và 1000 g/t. Kết quả thí nghiệm cho ở Hình 5 và 6.



Hình 5. Đồ thị so sánh hiệu quả tuyển giữa Tan-X và thuỷ tinh lỏng.



Hình 6. Đồ thị so sánh hiệu quả tuyển giữa Sep-X và SHMP.

Từ kết quả thí nghiệm so sánh hiệu quả đè chìm của Tan-X và tinh bột (Hình 5) nhận thấy:

- Đối với Tan-X: Hàm lượng Zn trong quặng tinh tăng dần từ 12,53% ở 300 g/t lên cực đại 16,52% tại 600 g/t, sau đó giảm xuống 15,08% ở 700 g/t; Thực thu Zn trong quặng tinh tăng từ 77,01% lên giá trị cao nhất 80,74% tại 500 g/t, sau đó giảm mạnh, chỉ còn 58,71% ở 700 g/t. Như vậy, chi phí tối ưu đối với Tan-X nằm trong khoảng 500÷600 g/t, bảo đảm đồng thời hàm lượng và thực thu cao. Chi phí Tan-X vượt quá 600 g/t đã làm giảm mạnh thực thu, có thể do Tan - X đã bắt đầu đè chìm không chọn lọc.

- Đối với tinh bột: Hàm lượng Zn trong quặng tinh tăng từ 11,65% ở 600 g/t lên cực đại 16,09% tại 1200 g/t, sau đó giảm còn 14,55% ở 1400 g/t; Còn thực thu đạt giá trị cao nhất 78,90% tại 1000 g/t, sau đó giảm rõ rệt còn 56,59% ở 1400 g/t. Từ kết quả trên nhận thấy, nếu ưu tiên đồng thời hàm lượng và thực thu, chi phí tinh bột tối ưu khoảng 1000 g/t. Việc tăng chi phí vượt mức này tuy làm hàm lượng tăng nhẹ nhưng thực thu giảm đáng kể.

- Ở điều kiện tối ưu, Tan-X cho thực thu cao hơn (80,74% so với 78,90%) và hàm lượng tương đương hoặc nhỉnh hơn tinh bột. Nhưng, Tan-X nhạy cảm hơn với hiện tượng dư thuốc, thể hiện qua sự giảm mạnh của thực thu khi chi phí quá cao. Tinh bột có xu hướng duy trì hàm lượng cao hơn ở chi phí lớn, nhưng khi chi phí quá mức thực thu cũng giảm.

Từ kết quả thí nghiệm so sánh hiệu quả của Sep-X và SHMP (Hình 6) nhận thấy:

- Khi tăng chi phí Sep - X từ 300÷600 g/t hàm lượng Zn trong quặng tinh tăng dần từ 12,11% đến cực đại 16,08%, tiếp tục tăng chi phí đến 700 g/t hàm lượng giảm còn 14,79%Zn. Thực thu Zn trong quặng tinh tăng dần và đạt cực đại 80,74% ở chi phí 500 g/t, nhưng ở chi phí 700 g/t thực thu Zn trong quặng tinh giảm mạnh xuống còn 55,21%. Điều này có thể là khi dư Sep - X đã đè chìm cả khoáng vật có ích.

- Khi tăng chi phí SHMP từ 800÷1200 g/t hàm lượng Zn trong quặng tinh tăng từ 11,57% đến 15,08% với thực thu tăng nhẹ từ 74,24÷ 77,07%. Tiếp tục tăng chi phí từ 1200 g/t đến 1600 g/t: hàm lượng tiếp tục tăng nhưng thực thu giảm mạnh từ 77,07÷59,77%, do đè chìm quá mức. Chi phí SHMP tối ưu khoảng 1200 g/t nếu muốn đảm bảo cả thực thu và hàm lượng Zn trong quặng tinh.

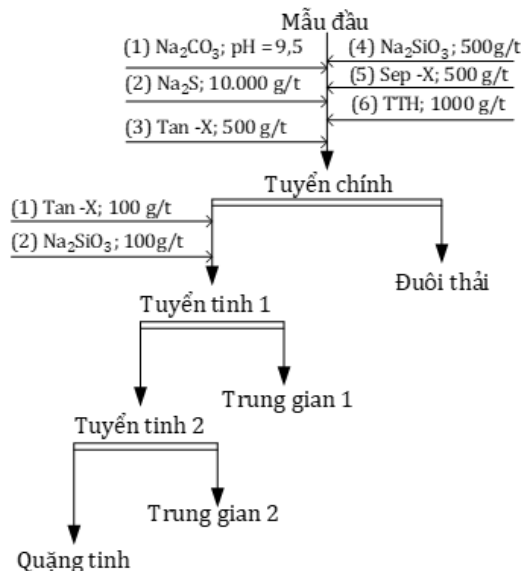
- Ở chi phí tối ưu Sep - X cho thực thu cao hơn so với SHMP (80,74% so với 77,07%), nhưng ở chi phí cao (trên 1200 g/t) thì SHMP cho hàm lượng Zn trong quặng tinh cao hơn. Nếu chọn SHMP ở chi phí cao để đạt hàm lượng thì phải chấp nhận thực thu thấp.

4.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của thiết bị tuyển

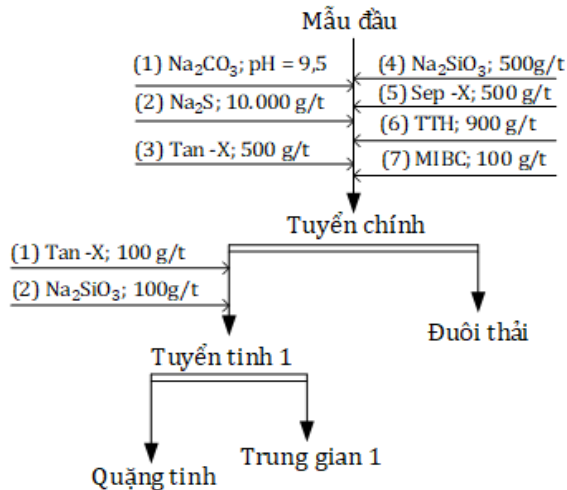
Tại các nhà máy tuyển nổi quặng kim loại màu trên thế giới hiện nay đang có xu hướng thay thế máy tuyển nổi cơ giới bằng các máy tuyển nổi khí nén (kiểu tự tràn). Các thiết bị mới này có dung tích lớn hơn, năng suất và hiệu suất tuyển cao hơn, bóng khí nhỏ và phân bố đều hơn. Đặc biệt máy tuyển nổi này có lớp bọt dày tạo điều kiện thuận lợi cho việc làm giàu thứ sinh và hạn chế ảnh hưởng của slam mịn, do đó thu được quặng tinh có chất lượng cao hơn. Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng máy tuyển nổi cơ giới (dung tích 3 lít và 1 lít) và máy tuyển TankCell dung tích 75 lít để so sánh hiệu quả tuyển chính và tuyển vòng hờ. Điều kiện thí nghiệm như Hình 7 và 8, còn các điều kiện khác như mục 4.1. Kết quả thí nghiệm tuyển chính và tuyển nổi vòng hờ cho ở Hình 9 và Bảng 5.

Từ kết quả thí nghiệm thay đổi chi phí hỗn hợp thuốc tập hợp khi tuyển nổi bằng máy cơ giới và TankCell nhận thấy:

- Đối với máy tuyển nổi cơ giới, khi tăng chi phí thuốc tập hợp từ 700÷1000 g/t hàm lượng Zn



Hình 7. Sơ đồ và chế độ tuyển nổi vòng hờ bằng máy tuyển nổi cơ giới.



Hình 8. Sơ đồ và chế độ tuyển nổi vòng hở bằng máy tuyển nổi TankCell.

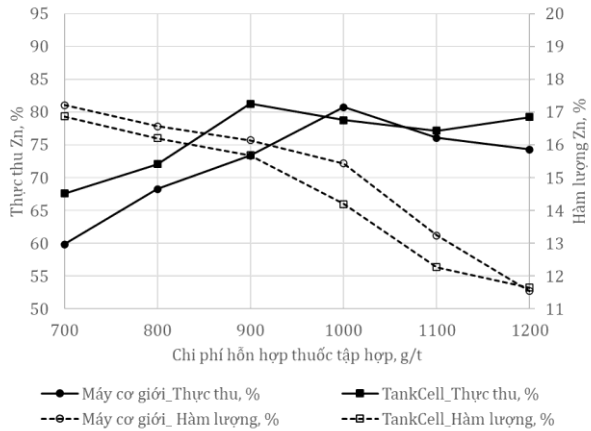
Bảng 5. Kết quả tuyển nổi vòng hở giữa máy cơ giới và TankCell.

Tên sản phẩm	Máy tuyển nổi cơ giới			Máy tuyển nổi TankCell		
	Thu hoạch,%	Hàm lượng Zn,%	Thực thu Zn,%	Thu hoạch,%	Hàm lượng Zn,%	Thực thu Zn,%
Quặng tinh	21,87	21,18	62,51	21,36	21,75	62,7
Trung gian 1	9,12	6,75	8,31	17,03	8,09	18,59
Trung gian 2	7,76	9,47	9,92			
Đuôi thải	61,25	2,33	19,26	61,61	2,25	18,71
Quặng đầu	100	7,41	100	100	7,41	100

trong quặng tinh giảm nhẹ từ 17,21÷15,44%, nhưng thực thu tăng mạnh từ 59,86÷80,74%. Tiếp tục tăng chi phí trên 1000 g/t, thực thu Zn trong quặng tinh giảm xuống còn 74,32% và hàm lượng kẽm giảm rõ rệt, chứng tỏ chi phí thuốc tập hợp đã quá mức. Chi phí tối ưu của hỗn hợp thuốc tập hợp vào khoảng 1000 g/t.

- Khi tuyển nổi bằng máy TankCell có bổ sung thêm 100 g/t MIBC nhận thấy, hàm lượng Zn trong quặng tinh giảm dần từ 16,87% (700 g/t) xuống 11,65% (1200 g/t), còn thực thu tăng từ 67,59% (700 g/t) đạt cực đại 81,29% ở 900 g/t, sau đó dao động ở mức 77÷79%. Chi phí tối ưu của hỗn hợp thuốc tập hợp vào khoảng 900 g/t.

- Ở cùng mức chi phí thấp (700÷900 g/t) thì máy tuyển TankCell cho thực thu cao hơn rõ rệt (cao hơn 7÷8% ở 700÷800 g/t; 81,29% so với 73,37% ở 900 g/t). Tuy nhiên, hàm lượng Zn trong quặng tinh TankCell thấp hơn một chút (~0,3÷0,5% ở cùng chi phí). Ở mức chi phí cao (1000÷1200 g/t), máy cơ giới cho hàm lượng cao



Hình 9. Đồ thị so sánh hiệu quả tuyển giữa máy tuyển cơ giới và TankCell khi thay đổi chi phí thuốc tập hợp.

hơn (~1÷1,3%), nhưng TankCell giữ được thực thu cao hơn hoặc tương đương.

- Hàm lượng của TankCell giảm mạnh hơn khi tăng chi phí, có thể do bọt mịn và MIBC cuốn thêm khoáng tạp khi chi phí thuốc tập hợp cao.

- MIBC làm bọt mịn và ổn định hơn, tăng khả năng thu hồi hạt mịn vì vậy TankCell đạt thực thu cao hơn, đặc biệt ở chi phí thấp. Tuy nhiên, bọt ổn định quá mức có thể kéo theo nhiều khoáng tạp dẫn đến hàm lượng giảm, đặc biệt khi ở chi phí thuốc tập hợp cao.

Từ kết quả thí nghiệm ở Bảng 5 nhận thấy:

- Máy tuyển cơ giới và TankCell cho phép thu hồi được quặng tinh có hàm lượng Zn lần lượt là 21,18% và 21,75%, còn thực thu Zn trong quặng tinh lần lượt là 62,51% và 62,70%. Có thể nhận thấy máy TankCell cho hiệu quả tuyển cao hơn không nhiều so với máy cơ giới.

- Để đạt được quặng tinh có chất lượng như Bảng 5 máy cơ giới phải qua 02 lần tuyển tinh còn TankCell chỉ cần một lần tuyển tinh.

Sản phẩm trung gian 1 và 2 của máy cơ giới có tổng thu hoạch là 16,88% với thực thu là 18,23%, giá trị này tương đương với thu hoạch và thực thu sản phẩm trung gian của máy tuyển TankCell (17,03% và 18,59%). Điều này cho thấy máy TankCell có khả năng gom quặng vào một sản phẩm trung gian duy nhất, giúp đơn giản hóa sơ đồ tuyển.

- Như vậy, TankCell giữ được hiệu quả tương đương hoặc nhỉnh hơn về hàm lượng và thực thu, nhưng quy trình đơn giản hơn (chỉ 1 khâu tuyển tinh thay vì 2). Máy cơ giới vẫn cho kết quả tốt, nhưng cần nhiều công đoạn hơn, dẫn đến chi phí vận hành và tiêu hao thuốc tuyển cao hơn. Về mặt công nghệ, TankCell có ưu thế trong việc rút gọn sơ tuyển mà không làm giảm hiệu quả thu hồi, đồng thời có tiềm năng nâng cao hàm lượng quặng tinh. Tuy nhiên, khi dùng máy TankCell cần dùng thêm thuốc tạo bọt.

4.4. So sánh với các nghiên cứu trước đây

So sánh kết quả nghiên cứu về tuyển nổi quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền với một số nghiên cứu tiêu biểu trên thế giới chúng tôi nhận thấy:

- So với Hosseini & Forssberg (2011): khi tuyển nổi smithsonit bằng mercaptan, các tác giả đạt quặng tinh 22,5% Zn với thực thu 75% ở chế độ khử slam, trong khi không khử slam chỉ thu được 12,6% Zn với thực thu 55%. Trong nghiên cứu này, chế độ không khử slam nhưng có bổ sung hệ thuốc Na_2S -Tan-X-Sep-X đạt quặng tinh 15,44% Zn - 80,74% thực thu (tuyển chính) và 21,75% Zn - 62,7% thực thu (tuyển vòng hồ bằng TankCell). Như vậy, mặc dù hàm lượng quặng tinh thấp hơn Hosseini, nhưng thực thu cao hơn rõ rệt, điều này chứng minh hiệu quả của việc kết hợp thuốc phân tán và đè chìm mới trong điều kiện quặng nhiều slam.

- So với Martins và các cộng sự (Martins và nnk., 2010): ở quy mô phòng thí nghiệm (khử slam), tác giả thu được quặng tinh 38,4% Zn và thực thu 72,4%, còn ở quy công nghiệp không khử slam là 37,3% Zn và thực thu 76,1%. Trong nghiên cứu hiện tại, quặng tinh chỉ đạt tối đa 21,75% Zn, thấp hơn nhiều so với Martins. Nguyên nhân chính là do quặng Chợ Điền nghèo Zn (7,4% so với $\geq 15\%$ Zn trong nghiên cứu của Martins) và có nhiều khoáng tạp Fe-Mn-Si. Tuy vậy, thực thu đạt 62,7%, cho thấy hệ thuốc và thiết bị TankCell đã phát huy tác dụng với loại quặng khó tuyển hơn.

- So với tổng quan của Ejtemaei và các cộng sự (Ejtemaei và nnk., 2014): các nghiên cứu này cho thấy, tuyển nổi quặng Zn oxit thường thu được quặng tinh 20÷40% Zn với thực thu 60÷80%, chủ yếu trên mẫu quặng có hàm lượng Zn đầu vào cao ($\geq 10\div 15\%$). Kết quả của nghiên cứu này (21,75% Zn với thực thu 62,7% từ quặng 7,4% Zn) nằm trong khoảng giá trị quốc tế, đồng thời có ý nghĩa đặc biệt vì chứng minh tính khả thi của tuyển nổi ngay cả với quặng nghèo, phong hóa mạnh và chứa nhiều slam như mỏ Chợ Điền.

Tóm lại, kết quả nghiên cứu tuy có hàm lượng quặng tinh thấp hơn so với nhiều công trình quốc tế, song thực thu đạt mức tương đương hoặc cao hơn. Điểm khác biệt quan trọng là nghiên cứu này khẳng định được khả năng áp dụng chế độ không khử slam kết hợp hệ thuốc Na_2S -Tan-X-Sep-X và thiết bị TankCell, trong khi phần lớn nghiên cứu trước cho rằng cần khử slam để đạt hiệu quả cao. Đây chính là đóng góp mới về mặt công nghệ và thực tiễn cho tuyển nổi quặng kẽm oxit nghèo tại Việt Nam.

5. Kết luận và kiến nghị

Từ kết quả nghiên cứu đặc điểm và thí nghiệm tuyển quặng oxit kẽm mỏ Chợ Điền, nhận thấy:

Mẫu quặng có hàm lượng Zn thấp (7,4%), phân bố không đồng đều theo cỡ hạt; phần slam mịn (-0,023 mm) chiếm tới 23,56% khối lượng nhưng hàm lượng Zn thấp, kèm theo thành phần khoáng vật phức tạp (silicat, cacbonat, manganat) và nhiều khoáng tạp giàu Fe, SiO_2 , Al_2O_3 , sét. Các yếu tố này làm tăng chi phí thuốc tuyển, giảm hiệu quả chọn riêng và đặc biệt gây khó khăn khi xử lý slam mịn.

Khi áp dụng quy trình tuyển nổi không khử slam mang lại thực thu Zn cao hơn ở mọi chi phí thuốc tập hợp so với khử slam, đồng thời giúp sơ đồ công nghệ đơn giản hơn. Tại chi phí tối ưu 1000 g/t, thực thu Zn đạt 80,74% (hàm lượng 15,44%), cao hơn so với phương án khử slam. Tuy nhiên, do bùn mịn ảnh hưởng mạnh tới quá trình nổi, cần bổ sung thuốc phân tán Sep-X (500 g/t) để phá kết tụ hạt mịn, tạo huyền phù ổn định và hạn chế hiện tượng bám dính không chọn lọc.

Trong khâu đè chìm, Tan-X (500÷600 g/t) cho hiệu quả cao khi đè chìm khoáng tạp chứa sắt, silic và mangan, giúp nâng cao tính chọn riêng, đồng thời thân thiện với môi trường hơn các

thuốc đề chìm truyền thống. Na_2S đóng vai trò kích động khoáng oxit kẽm, biến bề mặt chúng thành trạng thái tương tự sulfua, từ đó tăng khả năng hấp phụ thuốc tập hợp và nâng cao hiệu suất nổi. Ngoài ra, Na_2S còn có khả năng khử và kết tủa các ion Fe^{3+} trong bùn dưới dạng $\text{Fe}(\text{OH})_3$ hoặc FeS nhằm: (1) Giảm sự cạnh tranh hấp phụ thuốc tập hợp giữa khoáng kẽm và khoáng chứa sắt; (2) Hạn chế quá trình “tạo màng sắt” trên bề mặt hạt kẽm, vốn làm tính nổi và (3) Góp phần cải thiện tính chọn riêng và giảm tiêu hao thuốc tuyển. Sự phối hợp Na_2S - Tan-X - Sep-X tạo nên hệ thuốc đồng bộ, vừa xử lý tốt ảnh hưởng của slam, vừa tăng khả năng thu hồi Zn.

Máy tuyển nổi TankCell cho phép thu được thực thu cao hơn ở chi phí thuốc tập hợp thấp hơn (900 g/t), đồng thời chỉ cần 1 lần tuyển tinh để đạt hàm lượng ~21,75% Zn, trong khi máy cơ giới cần 2 lần tuyển tinh mới đạt ~21,18%. TankCell còn có khả năng gom quặng vào một sản phẩm trung gian duy nhất, giúp rút gọn quy trình, giảm chi phí vận hành và phù hợp với xử lý quặng nhiều slam.

Như vậy, giải pháp công nghệ tuyển nổi không khử slam, kết hợp hệ thuốc Na_2S - Tan-X - Sep-X, được xác định là phù hợp để xử lý quặng oxit kẽm mỏ Chợ Điền có hàm lượng Zn thấp và nhiều slam mịn. Trong đó, Na_2S kích động khoáng oxit kẽm, khử và kết tủa các ion Fe^{3+} trong bùn; Tan-X ức chế khoáng tạp chứa Fe, SiO_2 , Mn, nâng cao độ chọn lọc; Sep-X phân tán bùn mịn, ổn định huyền phù và hạn chế hiện tượng bám dính không chọn lọc. Kết hợp với việc sử dụng máy tuyển nổi TankCell giúp rút gọn sơ đồ công nghệ, giảm tiêu hao thuốc tập hợp, tăng thực thu và nâng cao hiệu quả tuyển đối với quặng nhiều slam.

Cần tiếp tục nghiên cứu tối ưu hóa sự kết hợp giữa thuốc tạo bọt, thuốc phân tán và thuốc tập hợp trong hệ TankCell; Đánh giá hiệu quả kinh tế - môi trường khi thay thế hoàn toàn hệ đề chìm truyền thống bằng Tan-X và Sep-X và nghiên cứu bổ sung các bước xử lý slam mịn thân thiện môi trường nhằm giảm tiêu hao thuốc tuyển và cải thiện chất lượng quặng tinh.

Đóng góp của các tác giả

Đỗ Thị Như Quỳnh - phương pháp luận, viết bản thảo bài báo, làm thí nghiệm, phân tích và xử lý số liệu; Phạm Văn Luận - phương pháp luận, viết bản thảo, phân tích đánh giá số liệu, kiểm chứng, viết nhận xét, chỉnh sửa và biên tập; Lê Việt Hà -

thực hiện các thí nghiệm tuyển, gia công và phân tích số liệu.

Tài liệu tham khảo

- 1997/QĐ-TTg (2015). Quyết định phê duyệt Quy hoạch thăm dò, khai thác, chế biến và sử dụng quặng chì kẽm đến năm 2020, có xét đến năm 2030. Thủ tướng Chính phủ.
- Deng, R., Hu, Y., Ku, J., Zuo, W., & Yang, Z. (2017). Adsorption of Fe (III) on smithsonite surfaces and implications for flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 533, 308-315.
- Đỗ, T. N. Q., Phạm, V.L., Lê, V.H. (2024). Nghiên cứu xác định chế độ thuốc tuyển hợp lý để tuyển quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền - Bắc Kạn. *Hội nghị ERSĐ 2024*.
- Ejtemaei, M., Gharabaghi, M. & Irannajad, M. (2014). A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method. *Advances in Colloid and Interface Science*. Vol 26. Page 68 - 78. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.02.003>.
- Hosseini, S. H., & Forssberg, E. (2011). Studies on selective flotation of smithsonite from silicate minerals using mercaptans and one stage desliming. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section C*. Vol 120. No 2. Page 79 - 84. <https://doi.org/10.1179/1743285510Y.0000000001>.
- <https://nte.co.za/bondtite-products/>
- ILZSG. (2024). ILZSG session forecasts. International Lead and Zinc Study Group. https://www.ilzsg.org/wp-content/uploads/3.PRESS%20RELEASES/20240930_ILZSG%20September%202024%20Press%20Release.pdf.
- Lý, X. T., Trần, T. D., Đỗ, V. Q., Tạ, Q. H., Phạm, V. L. (2018). Kết quả nghiên cứu thay thế máy tuyển nổi cũ bằng máy tuyển nổi cơ giới - khí nén tự tràn tại nhà máy tuyển đồng Sin Quyền, Lào Cai. *Hội nghị ERSĐ 2018*.
- Martins, L., Pereira, C. A., Galery, R., & Peres, A. E. C. (2010). Flotation of oxidized zinc ore without desliming. *Mining, Metallurgy &*

- Exploration*, 27(1), 34-41. <https://doi.org/10.1007/BF03402314>.
- Metso.com. (2020). HZL enhances output of lead, zinc, and silver with Metso's solutions. <https://www.metso.com/insights/case-studies/mining-and-metals/hzl-enhances-output-of-lead-zinc-and-silver/?r=3>.
- Müller, D., Groves, D. I., & Santosh, M. (2024). Metallic mineral resources: the critical components for a sustainable earth. *Elsevier*. Page 32.
- Stavian Metal.com (2024). Các loại kẽm thời tiêu thụ tại Việt Nam phổ biến nhất. <https://stavianmetal.com/cac-loai-kem-thoi-tieu-thu-tai-viet-nam/>
- Trần, T. H. (2007). Nguyên cứu công nghệ tuyển quặng ôxit kẽm (dưới 10 phần trăm) mỏ Chợ Điền phục vụ yêu cầu sản xuất bột kẽm. *Đề tài Bộ Công thương*.
- USGS. (2025). Zinc 2025. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-zinc.pdf>
- Vimico (2024). Báo cáo thường niên năm 2024. <https://vimico.vn/bao-cao-thuong-nien-nam-2024/>.