

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

ĐỒ THỊ NHƯ QUỲNH

XÂY DỰNG CHẾ ĐỘ CÔNG NGHỆ NHẪM NÂNG CAO
HIỆU QUẢ TUYỂN NỔI QUẶNG OXIT KẼM
VÙNG BẮC KẠN

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: KỸ THUẬT TUYỂN KHOÁNG

Hà Nội – 2026

Công trình được hoàn thành tại **Bộ môn Tuyển khoáng, Khoa
Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất**

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS Phạm Văn Luận

Trường Đại học Mỏ - Địa chất

Phản biện 1:

PGS.TS Trần Văn Lùng

Hội Tuyển khoáng Việt Nam

Phản biện 2:

TS Nguyễn Văn Hạnh

Hội Tuyển khoáng Việt Nam

Phản biện 3:

TS. Trần Trung Tới

Trường Đại học Mỏ - Địa chất

Luận án bảo vệ tại **Hội đồng đánh giá luận án cấp trường họp tại
Trường Đại học Mỏ - Địa chất** vào hồi...giờ, ngày...tháng....năm 2026

Có thể tìm luận án tại:

- Thư viện Quốc gia

- Thư viện Trường Đại học Mỏ - Địa chất

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Kẽm là kim loại màu quan trọng trong công nghiệp, trong khi nguồn quặng kẽm sunfua giàu ngày càng suy giảm. Ở vùng Bắc Kạn, một phần đáng kể tài nguyên chì - kẽm tồn tại dưới dạng quặng oxit kẽm phong hóa, có hàm lượng thấp, thành phần khoáng vật phức tạp, xâm nhiễm mịn, giàu bùn sét và thường đi kèm các khoáng vật oxit sắt - mangan và silicat. Những đặc điểm này làm cho quá trình làm giàu bằng các phương pháp truyền thống gặp nhiều khó khăn và hiệu quả tuyển nổi thiếu ổn định.

Theo các nghiên cứu và thực tế sản xuất cho thấy hiệu quả tuyển nổi quặng oxit kẽm không chỉ phụ thuộc vào thuốc tập hợp mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể của slam mịn, ion hòa tan, trạng thái bề mặt khoáng vật và hệ thuốc điều chỉnh. Vì vậy, việc nghiên cứu đồng thời thành phần vật chất, môi trường ion hòa tan, cơ chế tác động của hệ thuốc và mô hình hóa quá trình tuyển là cần thiết để xây dựng chế độ công nghệ phù hợp cho quặng oxit kẽm vùng Bắc Kạn.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Xây dựng cơ sở khoa học và chế độ công nghệ nhằm nâng cao hiệu quả tuyển nổi quặng oxit kẽm vùng Bắc Kạn trên cơ sở nghiên cứu đặc điểm thành phần vật chất, ảnh hưởng của môi trường ion hòa tan và tối ưu hóa hệ thuốc điều chỉnh.

Các mục tiêu cụ thể gồm: làm rõ đặc điểm thành phần vật chất của các mẫu quặng; làm rõ ảnh hưởng của môi trường ion hòa tan và tối ưu hóa hệ thuốc điều chỉnh bằng mô hình bề mặt

đáp ứng; xây dựng và kiểm chứng chế độ công nghệ tuyển nổi phù hợp đối với hai kiểu quặng oxit kẽm nghèo vùng Chợ Đồn.

3. Đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu gồm mẫu quặng oxit kẽm giàu C17 và hai mẫu quặng oxit kẽm nghèo KN, KĐ vùng Chợ Đồn, Bắc Kạn; quá trình tuyển nổi bằng thuốc tập hợp axit béo trong môi trường có sự tham gia của ion hòa tan và hệ thuốc điều chỉnh.

Luận án sử dụng các phương pháp phân tích khoáng vật học và hóa học (XRD, phân tích hóa đa nguyên tố, ICP), thí nghiệm tuyển nổi trong phòng thí nghiệm, phân tích cơ chế hóa học - bề mặt, thiết kế thí nghiệm và mô hình hóa toán học bằng phần mềm Design-Expert 11 theo RSM và quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken, kết hợp xử lý thống kê số liệu.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Về khoa học, luận án làm rõ mối quan hệ giữa đặc điểm thành phần vật chất, môi trường ion hòa tan và hiệu quả tuyển nổi; xây dựng cơ sở lựa chọn và tối ưu hóa hệ thuốc điều chỉnh bằng mô hình toán học.

Về thực tiễn, kết quả là cơ sở lựa chọn chế độ thuốc và xây dựng quy trình tuyển nổi phù hợp với các kiểu quặng oxit kẽm vùng Bắc Kạn.

5. Luận điểm bảo vệ

Luận điểm 1: Nghiên cứu thành phần vật chất đã làm rõ đặc điểm tồn tại của khoáng vật kẽm trong hai kiểu quặng oxit kẽm nghèo vùng Chợ Đồn, Bắc Kạn. Mẫu KN có kẽm chủ yếu tồn tại trong các khoáng hemimorphit và smithsonit ở dạng hạt tương đối riêng biệt, kích thước từ vừa đến mịn và cấu trúc xốp,

tạo điều kiện thuận lợi cho giải phóng và tuyển nổi trực tiếp. Trong khi đó, mẫu KĐ, kẽm tồn tại đồng hình hoặc cộng sinh chặt với chalcophanit và các khoáng Fe–Mn oxit, có cấu trúc đặc chắc, khó giải phóng và khó tuyển nổi. Đặc điểm thành phần vật chất này là yếu tố chi phối khả năng tuyển nổi và là cơ sở khoa học để lựa chọn hệ thuốc điều chỉnh cũng như xây dựng quy trình công nghệ riêng cho từng kiểu quặng.

Luận điểm 2: Thông qua phương pháp quy hoạch thực nghiệm Box–Behnken kết hợp phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM), luận án đã xác lập được mức độ ảnh hưởng và sự tương tác của tổ hợp các thuốc điều chỉnh, gồm thuốc sunfua hóa Na_2S , thuốc làm sạch bề mặt Tan-X và thuốc đè chìm – phân tán Sep-X, đối với quá trình tuyển nổi quặng oxit kẽm. Kết quả nghiên cứu trên mẫu quặng giàu C17 đã xác lập cơ sở khoa học cho việc lựa chọn hệ thuốc, chế độ thuốc..., làm định hướng để nghiên cứu tối ưu hóa quá trình tuyển nổi đối với hai kiểu quặng oxit kẽm nghèo đại diện vùng Chợ Đồn, Bắc Kạn.

Luận điểm 3: Trên cơ sở đặc điểm thành phần vật chất và kết quả tối ưu hóa chế độ thuốc tuyển, luận án đã xác lập được quy trình công nghệ tuyển nổi phù hợp cho hai kiểu quặng oxit kẽm nghèo vùng Chợ Đồn, Bắc Kạn. Đối với mẫu KN, áp dụng hệ thuốc Na_2S – Tan-X – Sep-X kết hợp thuốc tập hợp gốc axit béo; đối với mẫu KĐ, áp dụng hệ thuốc Na_2S – tinh bột – SHMP. Kết quả kiểm chứng trên thiết bị tuyển nổi TankCell theo sơ đồ vòng kín đã thu được quặng tinh mẫu KN đạt hàm lượng Zn 21,05%, thực thu 66,70% sau một khâu tuyển tinh; mẫu KĐ đạt hàm lượng Zn 16,10%, thực thu 60,19% sau hai

khâu tuyển tinh, khẳng định tính khả thi của quy trình công nghệ đã đề xuất.

6. Những điểm mới của luận án

- Luận án đã cơ bản làm rõ ảnh hưởng của một số cation đa hoá trị trong môi trường tuyển nổi quặng kẽm oxit nghèo vùng Chợ Đồn Bắc Kạn. Đây là nguyên nhân chính dẫn đến việc áp dụng một số sơ đồ tuyển nổi quặng kẽm oxit trước đây không đạt hiệu quả mong muốn do các cation hòa tan tích tụ quá mức trong nước tuần hoàn. Trên cơ sở đó đã tiến hành nghiên cứu xác lập được các tổ hợp thuốc tuyển hữu hiệu để kiểm soát hiệu quả các tác động tiêu cực của các ion hòa tan trong quá trình tuyển nổi quặng oxit kẽm nghèo vùng Chợ Đồn, Bắc Kạn.

- Ứng dụng phương pháp RSM và thiết kế quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken (BBD) để mô hình hóa và tối ưu hóa chế độ thuốc tuyển quặng oxit kẽm; đồng thời sử dụng biểu diễn ellipsoid để đánh giá các chỉ tiêu công nghệ tuyển khi có sự biến thiên của hệ thuốc điều chỉnh trong vùng khảo sát.

- Bằng thực nghiệm đã xác lập được các tổ hợp thuốc điều chỉnh thích ứng với 2 loại quặng oxit kẽm có thành phần khoáng vật khác nhau, cụ thể: tổ hợp Tan-X/Sep-X cho loại quặng silicat-carbonat (mẫu KN) và tổ hợp tinh bột/SHMP cho loại quặng oxit Zn giàu Fe-Mn (mẫu KĐ), đồng thời đề xuất các sơ đồ công nghệ tuyển nổi phù hợp cho 2 loại quặng oxit kẽm này ở vùng Chợ Đồn - Bắc Kạn với các chỉ tiêu công nghệ đạt được: Quặng tinh kẽm có hàm lượng Zn = 21,05% với thực thu kẽm 66,7% (mẫu KN) và quặng tinh kẽm có hàm lượng Zn = 16,10% với thực thu kẽm 60,19% (mẫu KĐ).

7. Bố cục và logic nghiên cứu của luận án

Luận án được tổ chức thành bốn chương theo trình tự từ cơ sở khoa học đến kiểm chứng công nghệ.

Chương 1 - Tổng quan về công nghệ và cơ sở hóa lý của quá trình tuyển nổi quặng oxit kẽm. Chương này đã tổng quan được các công nghệ tuyển quặng oxit kẽm, cơ sở hóa lý của quá trình sunfua hóa – tuyển nổi bằng axit béo và ảnh hưởng của các ion hòa tan, từ đó xác định khoảng trống nghiên cứu.

Chương 2 - Nghiên cứu thành phần vật chất mẫu: Phân tích đặc trưng hóa các mẫu C17, KN và KĐ, tập trung vào thành phần hóa học, khoáng vật, trạng thái tồn tại của kẽm và các đặc điểm có khả năng chi phối quá trình tuyển.

Chương 3 - Nghiên cứu tối ưu hóa hệ thuốc điều chỉnh bằng phương pháp bề mặt đáp ứng: Sử dụng mẫu C17 để khảo sát có hệ thống ảnh hưởng của pH, Na_2S và các thuốc điều chỉnh; ba biến Na_2S , Tan-X và Sep-X được đưa vào thiết kế BBD và mô hình RSM để xác định miền thông số phù hợp và kiểm chứng khả năng dự báo.

Chương 4 - Nghiên cứu công nghệ tuyển quặng oxit kẽm hàm lượng thấp vùng mỏ Chợ Đồn: Chuyển kết quả nghiên cứu sang hai mẫu quặng nghèo KN và KĐ, xác lập điều kiện nghiền, nồng độ pha rắn, lựa chọn phương án xử lý slam, hệ thuốc riêng và kiểm chứng bằng tuyển vòng hở, vòng kín trên máy cơ giới và TankCell.

Cách tổ chức này nhằm bảo đảm mỗi kết luận công nghệ đều có căn cứ từ đặc điểm vật chất và kết quả thực nghiệm tương ứng. Các số liệu trong bản tóm tắt chỉ lựa chọn những kết quả trực tiếp phục vụ các luận điểm và chế độ công nghệ đề xuất;

các bảng số liệu chi tiết, phương trình hồi quy, đồ thị bề mặt đáp ứng và kết quả phân tích đầy đủ được trình bày trong toàn văn luận án.

Trong xử lý và đánh giá kết quả, hai chỉ tiêu công nghệ chính được sử dụng xuyên suốt là hàm lượng Zn trong sản phẩm và thực thu Zn. Các thí nghiệm điều kiện được so sánh theo xu hướng biến đổi đồng thời của hai chỉ tiêu này thay vì lựa chọn chỉ theo giá trị cực đại của một đáp ứng. Đối với phần mô hình hóa, mức độ phù hợp của mô hình được xem xét thông qua phân tích phương sai, ý nghĩa của các hệ số hồi quy, Lack of Fit và độ phù hợp giữa giá trị dự báo với kết quả kiểm chứng. Đối với phần xây dựng công nghệ, kết quả trên máy cơ giới được dùng làm đối chứng với TankCell; số khâu tuyển tinh, chất lượng quặng tinh và thực thu được xem xét đồng thời khi lựa chọn sơ đồ. Cách đánh giá này phù hợp với mục tiêu của luận án là xây dựng chế độ công nghệ cho từng kiểu quặng, đồng thời tránh suy rộng một điều kiện thí nghiệm đơn lẻ thành chế độ chung cho toàn bộ quặng oxit kẽm vùng nghiên cứu.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ VÀ CƠ SỞ HÓA LÝ CỦA QUÁ TRÌNH TUYỂN NỔI QUẶNG OXIT KẼM

1.1 Tổng quan về công nghệ tuyển nổi quặng oxit kẽm

Các giải pháp công nghệ tuyển được nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới sử dụng gồm: (1) Sunfua hóa rồi tuyển nổi bằng thuốc tập hợp cation như amin; (2) tuyển nổi bằng thuốc tập hợp axit béo; (3) sunfua hóa và kích động bằng ion kim loại (Cu^{2+}) rồi tuyển nổi bằng thuốc tập hợp dạng sunfua hydro như

xanthat, hoặc bằng hỗn hợp thuốc tập hợp cation/anion (4) tuyến bằng thuốc tập hợp mercaptans và chelat.

Các nghiên cứu trong nước chủ yếu tập trung vào các công nghệ tuyển nổi, tuyển trọng lực, tuyển từ và hoá tuyển. Khó khăn lớn nhất khiến các công nghệ (đặc biệt là tuyển nổi) chưa thể triển khai ra sản xuất ổn định là: (1) Mất mát lớn ở cấp hạt mịn; (2) chưa khống chế được môi trường ion hòa tan, dẫn đến tiêu hao thuốc tuyển và thực thu thấp khi dùng nước tuần hoàn. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải nghiên cứu tuyển nổi oxit kẽm dựa trên nền tảng hóa học bề mặt và hóa học dung dịch chuyên sâu.

1.2 Cơ sở khoa học của quá trình tuyển nổi quặng oxit kẽm bằng axit béo

Tuyển nổi quặng oxit kẽm bằng thuốc tập hợp axit béo là quá trình chịu ảnh hưởng đồng thời của trạng thái bề mặt khoáng vật, môi trường ion hòa tan, quá trình sunfua hóa và chế độ thuốc tuyển. Các ion hòa tan của Ca, Mg, Fe ... có thể làm thay đổi trạng thái bề mặt khoáng vật và ảnh hưởng đến tính chọn riêng của quá trình tuyển nổi. Vì vậy, việc kiểm soát môi trường ion và sử dụng hệ thuốc điều chỉnh phù hợp đóng vai trò quan trọng.

Đối với các khoáng vật oxit kẽm, quá trình sunfua hóa bằng Na_2S có tác dụng cải tạo bề mặt, tạo điều kiện thuận lợi cho sự tương tác của thuốc tập hợp với khoáng vật. Bên cạnh đó, việc phối hợp thuốc tập hợp gốc axit béo với dầu hỏa góp phần tăng tính kỵ nước và cải thiện khả năng tuyển nổi trong những điều kiện thích hợp.

Trên cơ sở đó, luận án tập trung nghiên cứu mối quan hệ giữa môi trường ion hòa tan, quá trình sunfua hóa và hệ thuốc điều chỉnh nhằm xác lập cơ sở lựa chọn chế độ thuốc phù hợp cho quặng oxit kẽm vùng Chợ Đồn, Bắc Kạn.

1.3 Ảnh hưởng của các ion hoà tan đến tuyển nổi quặng oxit kẽm bằng axit béo

Trong công nghệ tuyển nổi quặng oxit kẽm bằng axit béo, quá trình thu hồi không đơn thuần là phản ứng độc lập giữa hai cấu tử (khoáng vật và thuốc tập hợp), mà là một hệ nhiệt động học phức tạp bao gồm ba thành phần tương tác qua lại: Dung dịch (hệ ion hòa tan) – bề mặt khoáng – thuốc tập hợp.

Cơ chế cạnh tranh hấp phụ của ion vô cơ và thuốc tập hợp gồm cạnh tranh trên bề mặt khoáng vật; cạnh tranh trong bùn quặng; cạnh tranh gián tiếp (phá hủy quá trình sunfua hóa). Sự cạnh tranh này cho thấy môi trường ion hòa tan có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả sunfua hóa và tuyển nổi hemimorphit.

Tuy nhiên, ảnh hưởng của các ion hòa tan không hoàn toàn mang tính tiêu cực mà phụ thuộc vào nồng độ, điều kiện hóa học và trình tự sử dụng thuốc tuyển. Vì vậy, việc kiểm soát hệ ion trong bùn quặng, cô lập các ion có hại và lựa chọn đúng trình tự bổ sung thuốc tuyển là yếu tố quan trọng để nâng cao hiệu quả tuyển nổi quặng oxit kẽm bằng axit béo. Chuỗi điều khiển tuyển tính 3 tầng đề xuất gồm: Tầng 1 - điều khiển bùn quặng; tầng 2 (tiền xử lý và làm sạch pha lỏng) - sunfua hóa và tái cấu trúc bề mặt ($\text{Hệ thống Tan-X} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} \rightarrow \text{Sep-X}$); tầng 3 - hình thành lớp kỵ nước bền vững (hỗn hợp thuốc tập hợp oleat + dầu hỏa)

1.4 Quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken

Mô hình được sử dụng để mô tả mối quan hệ định lượng và tương tác giữa ba biến công nghệ: chi phí Na_2S , Sep-X và Tan-X. Luận án sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) với thiết kế Box-Behnken (BBD) trên phần mềm Design-Expert. Phương trình hồi quy đa thức bậc 2 của thực thu và hàm lượng kẽm trong quặng tinh có dạng như phương trình (1.6).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1.6)$$

Trong đó:

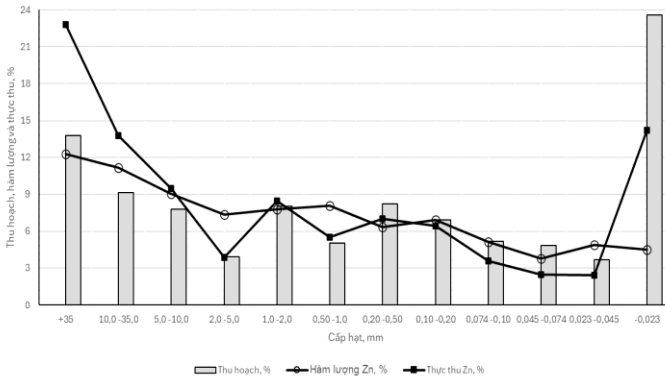
- Y là hàm mục tiêu cần tối ưu (thực thu /hàm lượng kẽm);
- X_i , X_j là các biến điều khiển đã mã hóa (Na_2S , Sep-X, Tan-X);
- β_0 là hệ số chặn;
- β_i là các hệ số hồi quy bậc nhất phản ánh mức độ tác động tuyến tính độc lập của từng hóa chất;
- β_{ii} là các hệ số bậc hai phản ánh độ cong (phi tuyến) của bề mặt đáp ứng;
- β_{ij} là các hệ số tương tác chéo, cực kỳ quan trọng để đánh giá tính phối hợp hay đối kháng giữa các loại thuốc (ví dụ sự hỗ trợ của Tan-X đối với Na_2S);
- ε là sai số dư.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU THÀNH PHẦN VẬT CHẤT MẪU

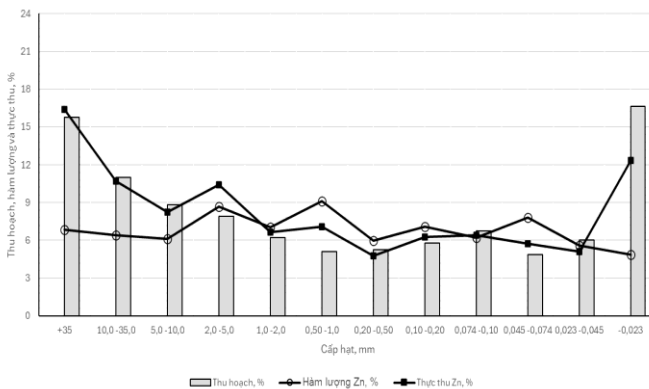
2.1 Nghiên cứu thành phần vật chất mẫu công nghệ

Mẫu công nghệ dùng trong nghiên cứu của luận án là quặng oxit kẽm nghèo vùng mỏ Chợ Đồn gồm có quặng oxit kẽm màu nâu (gọi tắt là quặng màu nâu, ký hiệu mẫu là KN) và quặng oxit kẽm màu đen (gọi tắt là quặng màu đen, ký hiệu mẫu là KĐ),

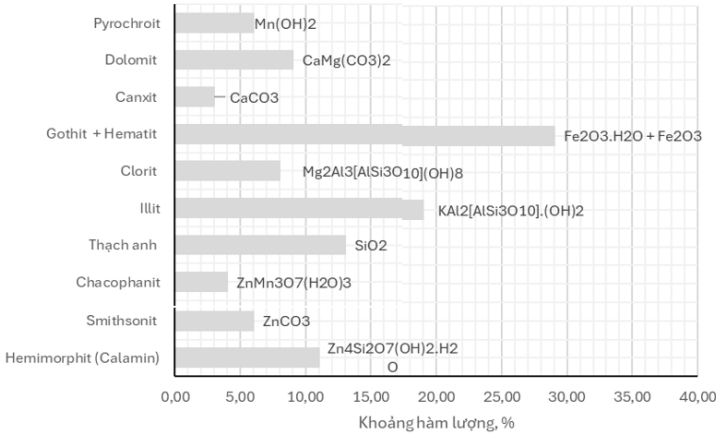
Tính chất của các mẫu nghiên cứu cho ở các Hình 2.3 đến 2.6.



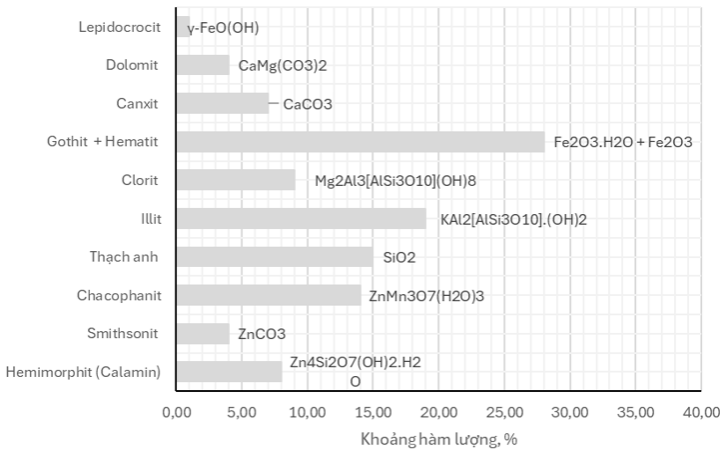
Hình 2.1. Thành phần độ hạt và phân bố kim loại mẫu KN



Hình 2.2 Thành phần độ hạt và phân bố kim loại mẫu KĐ



Hình 2.3. Thành phần khoáng vật mẫu quặng KN



Hình 2.4. Thành phần khoáng vật mẫu KĐ

Kết quả phân tích thành phần vật chất cho thấy mẫu KN thuận lợi cho tuyển nổi hơn mẫu KĐ. Trong môi trường nước, một số thành phần khoáng vật của hai mẫu có thể hòa tan, tạo ra các ion $\text{Fe}^{2+/3+}$, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} và Zn^{2+} có khả năng ảnh hưởng đến quá trình tuyển nổi. Do đó, cần nghiên cứu làm rõ ảnh hưởng của các ion này.

Đặc trưng	Mẫu KN	Mẫu KĐ
Hàm lượng Zn quặng đầu	7,40%	6,57%
Khoáng vật chứa Zn chủ yếu	Hemimorphit (9–11%); smithsonit (4–6%)	Chalcophanit (12–14%); hemimorphit (6–8%)
Khoáng vật đi kèm đáng chú ý	Dolomit và khoáng vật sét	Canxit và các pha Fe–Mn
Đặc điểm công nghệ	Thuận lợi hơn cho hoạt hóa và tuyển nổi	Khó giải phóng và khó nâng cao hàm lượng hơn

2.2 Mẫu nghiên cứu ảnh hưởng của ion đến quá trình tuyển

Mẫu quặng nghiên cứu ký hiệu C17, lấy từ tầng phong hóa của quặng oxit kẽm tại mỏ Chợ Điện. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật cho thấy mẫu chứa chủ yếu smithsonit (30–32 %) và hemimorphit (15–17 %) là các khoáng mang kẽm chính; thành phần đất đá đi kèm gồm goethit (34–36 %), hematit (5–7 %), thạch anh (3–5 %), illit (2–4 %) và khoáng khác (canxit, kaolinit–clorit) chiếm không đáng kể. Phân tích hóa học quặng mẫu cho thấy hàm lượng kẽm tổng là 17,94 % Zn. Mẫu được nghiền khô xuống 100 % cấp -0,1 mm để chuẩn bị cho các thí nghiệm xác định thành phần ion và tuyển nổi.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA HỆ THUỐC ĐIỀU CHỈNH ĐỐI VỚI MẪU QUẶNG OXIT KẼM GIÀU VÙNG BẮC KẠN BẰNG MÔ HÌNH BỀ MẶT ĐÁP ỨNG

3.1 Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của chương là nghiên cứu xác lập ảnh hưởng của hệ thuốc điều chỉnh đến quá trình tuyển nổi mẫu quặng giàu oxit kẽm vùng Bắc Kạn và tối ưu hóa chế độ thuốc bằng

phương pháp quy hoạch thực nghiệm Box–Behnken kết hợp mô hình bề mặt đáp ứng (RSM). Kết quả nghiên cứu nhằm xác định vùng chế độ thuốc phù hợp và xây dựng cơ sở khoa học phục vụ lựa chọn hệ thuốc cho nghiên cứu công nghệ tuyển nổi hai loại quặng oxit kẽm nghèo vùng Chợ Đồn, Bắc Kạn

3.2 Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm Box–Behnken kết hợp mô hình bề mặt đáp ứng (RSM)

Ba biến được đưa vào thiết kế BBD là Tan-X, Sep-X và Na_2S . Kết quả tối ưu hóa được sử dụng như một vùng tham chiếu để kiểm chứng thực nghiệm, không coi là một định mức cố định cho mọi loại quặng.

3.3 Thí nghiệm lựa chọn hệ thuốc điều chỉnh

Các thí nghiệm lựa chọn thuốc điều chỉnh được chia thành 9 nhóm lần lượt khảo sát ảnh hưởng: (1) thuốc điều chỉnh pH, (2) giá trị pH, (3) chi phí Na_2S , (4) Tan-X, (5) Na_2SiO_3 , (6) Sep-X, (7) SHMP, (8) tinh bột và (9) ma trận ba biến Tan-X–Sep-X– Na_2S . Điều kiện thí nghiệm với các thuốc điều chỉnh như sau:

- Các thí nghiệm (1) chỉ xác định ảnh hưởng của pH và thuốc điều chỉnh môi trường Na_2CO_3 và NaOH (không cho hoá chất khác);

- Các thí nghiệm (2) đến (8) cố định pH = 9,5 điều chỉnh bằng Na_2CO_3 , không cho hoá chất khác (chỉ đánh giá ảnh hưởng của hoá chất cần nghiên cứu);

- Các thí nghiệm (9), thay đổi ba biến Tan-X–Sep-X– Na_2S , cố định chi phí Na_2SiO_3 là 500 g/t và pH = 9,5 đ điều chỉnh bằng Na_2CO_3 ;

- Tất cả các thí nghiệm tuyển nổi đều thực hiện trên mẫu không khử slam, cố định chi phí hỗn hợp thuốc tập hợp 800 g/t, tuyển bằng nước cất 2 lần và bằng máy tuyển cơ giới dung tích 1 lít. Các thí nghiệm tuyển nổi được đánh giá thông qua hàm lượng và thực thu Zn trong sản phẩm bột.

Từ kết quả nghiên cứu lựa chọn thuốc điều chỉnh, đối với hệ quặng oxit kẽm phong hóa mang đặc trưng silicat-carbonat, để xây dựng mô hình RSM, luận án lựa chọn hệ thuốc Tan-X và Sep-X làm các biến số điều khiển, tạm thời không đưa SHMP và tinh bột vào ma trận thí nghiệm. Định hướng tích hợp đối với mô hình sẽ là: (1) Sử dụng Na_2CO_3 làm nhiệm vụ điều chỉnh pH và góp phần làm giảm nồng độ Ca/Mg trong pha lỏng; (2) Sử dụng hệ thuốc Na_2SiO_3 kết hợp với Sep-X và Tan-X nhằm phân tán bùn mịn và hạn chế ảnh hưởng của các thành phần chứa Fe. Sự kết hợp này được lựa chọn để kiểm soát môi trường bùn quặng, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình sunfua hóa và tác dụng của thuốc tập hợp oleat.

3.4 Quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken

Luận án lựa chọn ba biến Na_2S , Tan-X và Sep-X để thiết kế thí nghiệm Box-Behnken (BBD) và xây dựng mô hình bề mặt đáp ứng (RSM) đối với hai chỉ tiêu hàm lượng và thực thu Zn (như phương trình 3.11 và 3.12). Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) và mô hình hồi quy bậc hai cho phép đánh giá ảnh hưởng riêng lẻ, tương tác giữa các biến và xác định vùng chế độ thuốc phù hợp.

Hàm lượng Zn:

$$Y_1 = -183.7654 + 0.09628X_1 + 0.36029X_2 + 0.01701X_3 + 0.0001275X_1X_2 - 1.33 \times 10^{-6}X_1X_3 - 6 \times 10^{-6}X_2X_3 -$$

$$0.0001420X_1^2 - 0.0003543X_2^2 - 5.50 \times 10^{-7}X_3^2 \quad (3.11)$$

Thực thu Zn:

$$Y_2 = -666.0647 + 2.54860X_1 + 0.10621X_2 + 0.01949X_3 - 0.0002375X_1X_2 + 6.46 \times 10^{-6}X_1X_3 + 2.28 \times 10^{-5}X_2X_3 - 0.0024999X_1^2 - 0.0002130X_2^2 - 1.844 \times 10^{-6}X_3^2 \quad (3.12)$$

Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu bằng hàm mong muốn xác định bộ thông số phù hợp tại Tan-X $\approx$ 510 g/t, Sep-X $\approx$ 495 g/t và Na₂S $\approx$ 10.200 g/t, với giá trị hàm mong muốn tổng hợp D $\approx$ 0,92. Tại điều kiện này, mô hình dự báo quặng tinh đạt khoảng 30,5% Zn với thực thu khoảng 79%. Kết quả 03 thí nghiệm kiểm chứng cho giá trị trung bình 29,5% Zn và thực thu 75,4%; sai số giữa thực nghiệm và dự báo tương ứng là 3,2% và 4,6%, đều dưới 5%, cho thấy mô hình có khả năng dự báo phù hợp trong miền khảo sát.

Phân tích bề mặt đáp ứng và biểu diễn Ellipsoid cho thấy mức độ ảnh hưởng và độ nhạy của hai đáp ứng đối với ba biến có sự khác nhau trong miền khảo sát. Kết quả này hỗ trợ xác định vùng chi phí thuốc tuyển phù hợp quanh điểm tối ưu và cho thấy thứ tự ưu tiên kiểm soát chi phí thuốc là Tan-X $\rightarrow$ Na₂S $\rightarrow$ Sep-X.

Kết quả nghiên cứu bằng RSM sử dụng thiết kế BBD đã xác định được vùng chế độ thuốc phù hợp trên mẫu C17 và được kiểm chứng bằng thực nghiệm, làm cơ sở tham chiếu cho nghiên cứu chế độ tuyển hai mẫu quặng nghèo KN và KĐ.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ TUYỂN QUẶNG OXIT KẼM HÀM LƯỢNG THẤP VÙNG MỎ CHỢ ĐỒN

4.1 Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của chương 4 là nghiên cứu xác lập quy trình công nghệ tuyển nổi phù hợp cho hai mẫu quặng oxit kẽm nghèo KN và KĐ vùng mỏ Chợ Đồn, Bắc Kạn, trên cơ sở đặc điểm thành phần vật chất của từng mẫu và kết quả nghiên cứu hệ thuốc điều chỉnh ở Chương 3.

4.2 Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện bằng phương pháp thực nghiệm công nghệ tuyển nổi theo trình tự thí nghiệm điều kiện đến thí nghiệm sơ đồ. Trong từng nhóm thí nghiệm, một thông số được thay đổi, các thông số còn lại được giữ cố định theo chế độ đã lựa chọn ở bước nghiên cứu trước.

4.3 Định hướng công nghệ tuyển cho hai mẫu KN và KĐ

Từ kết quả nghiên cứu ở chương 2 và chương 3 cho thấy dù cùng thuộc nhóm quặng oxit kẽm phong hóa của mỏ Chợ Đồn, hai mẫu quặng có sự khác biệt rõ rệt về thành phần khoáng vật và các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tuyển nổi. Do đó, việc áp dụng cùng một chế độ công nghệ cho cả hai mẫu quặng có thể không mang lại hiệu quả tối ưu. Trên cơ sở định hướng công nghệ các nghiên cứu tiếp theo tập trung đánh giá ảnh hưởng của từng thông số công nghệ nhằm xác lập chế độ tuyển phù hợp cho từng đối tượng quặng.

4.4 Nghiên cứu xác lập điều kiện tuyển nổi

Luận án đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của độ mịn nghiền; ảnh hưởng của slam; ảnh hưởng của nồng độ pha rắn

trong bùn quặng; ảnh hưởng của các thuốc điều chỉnh. Kết quả nghiên cứu cho thấy:

Độ mịn nghiền ảnh hưởng đồng thời đến hàm lượng và thực thu Zn. Trong khoảng độ mịn khảo sát, khi tăng mức độ giải phóng khoáng vật, hiệu quả tuyển nổi được cải thiện rõ rệt. Tuy nhiên, nếu tiếp tục nghiền quá mịn, mặc dù khả năng giải phóng vẫn tăng nhưng lượng hạt mịn phát sinh nhiều hơn, làm giảm tính chọn lọc của quá trình tuyển nổi. Xu hướng này phù hợp với đặc điểm khoáng vật của quặng oxit kẽm phong hóa đã phân tích ở Chương 2.

Khử slam có tác dụng cải thiện nhất định hàm lượng Zn trong quặng tinh, nhưng đồng thời làm mất một phần Zn theo sản phẩm slam và làm giảm thực thu Zn tính theo quặng đầu. Trong phạm vi điều kiện thí nghiệm của luận án, mức cải thiện hàm lượng quặng tinh khi khử slam chưa bù được sự suy giảm về thực thu Zn. Vì vậy, phương án không khử slam được lựa chọn cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm ưu tiên bảo toàn lượng Zn trong cấp liệu và đơn giản hóa sơ đồ công nghệ. Kết luận này được đưa ra trong phạm vi mẫu quặng, chế độ thuốc tuyển và điều kiện thí nghiệm đã khảo sát; ảnh hưởng tích lũy của bùn mịn và các ion hòa tan khi tuần hoàn nước nhiều lần chưa được đánh giá trong nghiên cứu này.

Với ảnh hưởng của các thuốc điều chỉnh có thể nhận thấy hiệu quả của hệ thuốc điều chỉnh phụ thuộc rõ vào đặc điểm của từng loại quặng. Đối với mẫu KN, hệ Tan-X-Sep-X cho các chỉ tiêu tuyển nổi phù hợp hơn so với hệ tinh bột-SHMP trong phạm vi khảo sát. Ngược lại, đối với mẫu KĐ, hệ tinh bột-SHMP cho kết quả hàm lượng và thực thu Zn phù hợp hơn. Vì

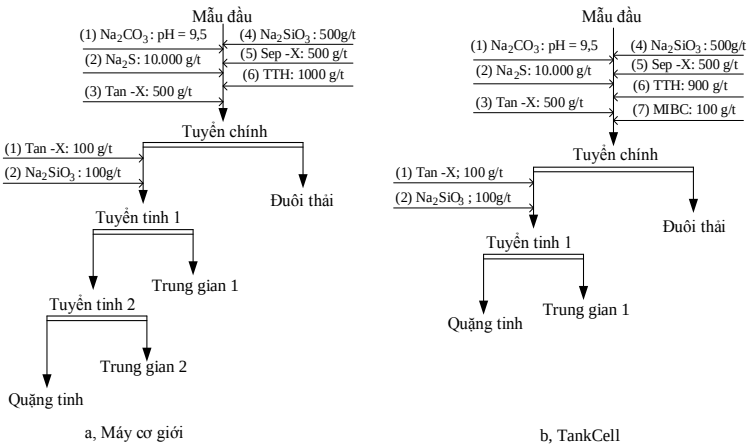
vậy, hai hệ thuốc này được lựa chọn tương ứng cho mẫu KN và KĐ để tiếp tục nghiên cứu chế độ Na_2S và xây dựng sơ đồ tuyển ở các bước tiếp theo.

4.5 Thí nghiệm tuyển nổi bằng máy tuyển cơ giới và TankCell

Trong điều kiện thí nghiệm khảo sát, TankCell cho một số chỉ tiêu tuyển nổi và tính ổn định tốt hơn so với máy tuyển cơ giới. Kết quả thí nghiệm trên TankCell 75 lít cho thấy chi phí hỗn hợp thuốc tập hợp phù hợp dao động trong khoảng 900–1.000 g/t. Đồng thời, kết quả thu được cho thấy TankCell là lựa chọn thiết bị phù hợp để tiếp tục kiểm chứng chế độ tuyển đối với hai mẫu KN và KĐ, đặc biệt trong phương án không khử slam.

4.6 Thí nghiệm tuyển nổi vòng hở

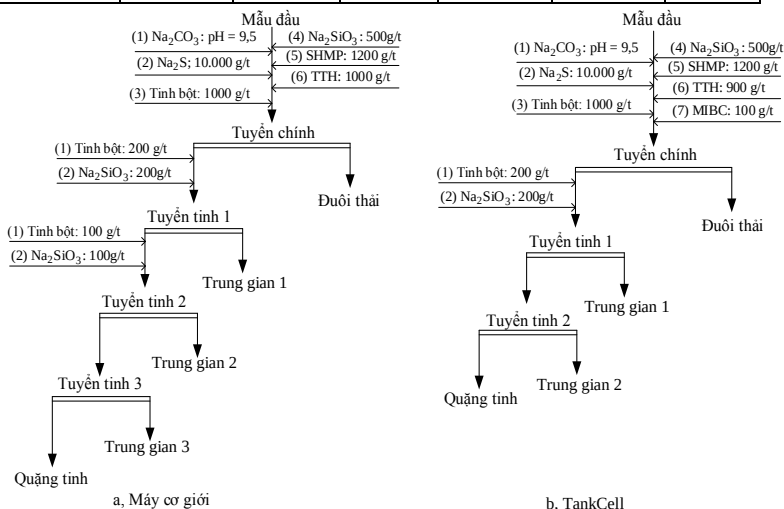
Sơ đồ và chế độ tuyển mẫu KN và KĐ được trình bày tại hình 4.18 và hình 4.19. Kết quả thí nghiệm tuyển vòng hở mẫu KN và KĐ được thể hiện tại bảng 4.4 và bảng 4.5



Hình 4.1. Sơ đồ và chế độ tuyển nổi vòng hở mẫu KN

Bảng 4.1. Kết quả thí nghiệm tuyển vòng hở mẫu KN

Tên sản phẩm	Máy tuyển nổi cơ giới			Máy tuyển nổi TankCell		
	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %
Quặng tinh	21,87	21,18	62,51	21,46	21,75	62,99
Trung gian 1	9,12	5,8	7,14	17,07	8,07	18,59
Trung gian 2	7,76	10,59	11,09			
Đuôi thải	61,25	2,33	19,26	61,47	2,22	18,42
Quặng đầu	100	7,41	100	100	7,41	100



Hình 4.2. Sơ đồ và chế độ tuyến vòng hở mẫu KĐ

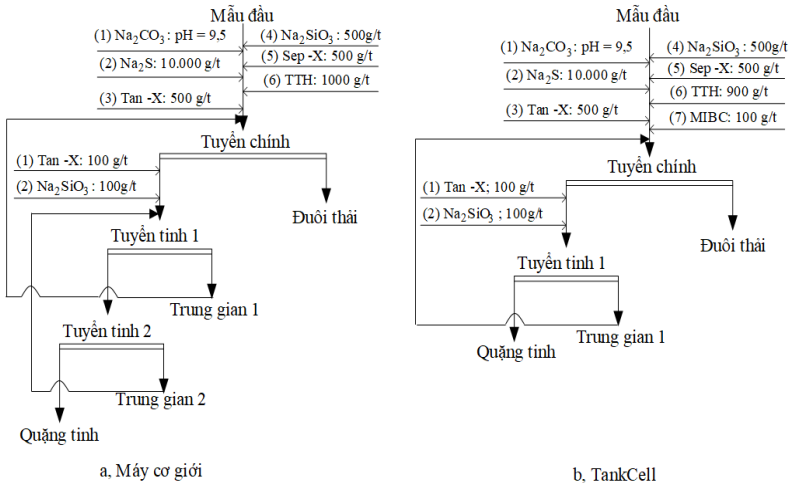
Bảng 4.2. Kết quả thí nghiệm tuyển vòng hở mẫu KĐ

Tên sản phẩm	Máy tuyển nổi cơ giới			Máy tuyển nổi TankCell		
	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %
Quặng tinh	23,27	16,08	56,87	22,86	16,63	57,78
Trung gian 1	11,81	4,9	8,79	17,03	5,18	13,41
Trung gian 2	8,46	7,97	10,25	6,94	10,85	11,44
Trung gian 3	4	9,19	5,59			

Tên sản phẩm	Máy tuyển nổi cơ giới			Máy tuyển nổi TankCell		
	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %
Đuôi thải	52,46	2,32	18,5	53,17	2,15	17,37
Quặng đầu	100	6,58	100	100	6,58	100

4.7 Thí nghiệm tuyển nổi vòng kín

Sơ đồ và chế độ tuyển vòng kín mẫu KN và KĐ cho ở hình 4.20 và hình 4.21. Kết quả thí nghiệm được trình bày tại Bảng 4.6 và bảng 4.7



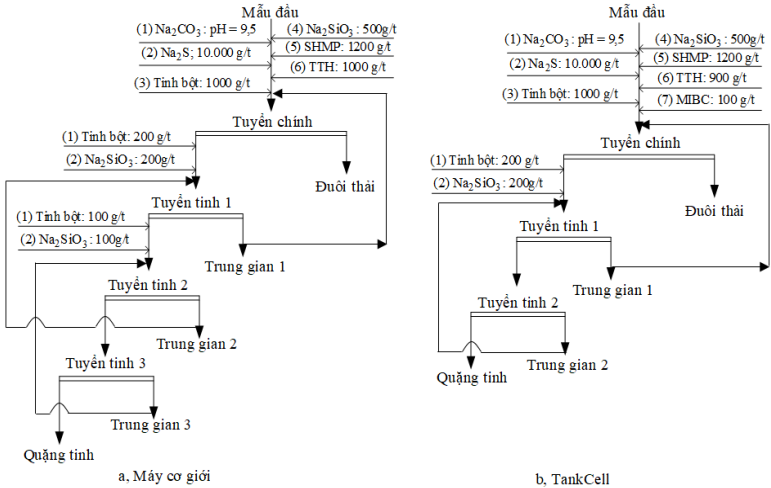
a. Máy cơ giới

b. TankCell

Hình 4.3. Sơ đồ và chế độ tuyển vòng kín mẫu KN

Bảng 4.3. Kết quả thí nghiệm tuyển vòng kín mẫu KN

Tên sản phẩm	Máy tuyển nổi cơ giới			Máy tuyển nổi TankCell		
	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %
Quặng tinh	24,55	20,32	67,32	23,48	21,05	66,70
Đuôi thải	75,45	2,94	32,68	76,52	2,91	33,30
Quặng đầu	100	7,41	100	100	7,41	100



Hình 4.4. Sơ đồ và chế độ tuyển vòng kín mẫu KĐ

Bảng 4.4. Kết quả thí nghiệm tuyển vòng kín mẫu KĐ

Tên sản phẩm	Máy tuyển nổi cơ giới			Máy tuyển nổi TankCell		
	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %	Thu hoạch, %	Hàm lượng, %	Thực thu, %
Quặng tinh	25,23	15,60	59,82	24,6	16,1	60,19
Đuôi thải	74,77	3,54	40,18	75,4	3,47	39,81
Quặng đầu	100,00	6,58	100,00	100	6,58	100,00

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu, luận án đã đạt được các kết quả sau:

1. Đã làm rõ đặc điểm thành phần vật chất và sự khác biệt về trạng thái tồn tại của kẽm trong các mẫu quặng nghiên cứu, làm cơ sở lựa chọn chế độ công nghệ tuyển nổi. Mẫu C17 có hàm lượng Zn cao hơn, được lựa chọn để nghiên cứu ảnh hưởng của môi trường ion hòa tan và tối ưu hóa hệ thuốc. Đối với hai mẫu

quặng nghèo, mẫu KN thuộc kiểu quặng silicat–cacbonat, kẽm chủ yếu tồn tại trong hemimorphit và smithsonit, có mức độ giải phóng thuận lợi hơn; mẫu KĐ chứa nhiều pha Fe–Mn, kẽm tồn tại chủ yếu trong chalcophanit và cộng sinh chặt với các khoáng vật oxit Fe–Mn, cấu trúc đặc chắc và khó giải phóng. Sự khác biệt này chi phối khả năng tuyển nổi và là cơ sở xây dựng chế độ thuốc, sơ đồ công nghệ riêng cho từng loại quặng.

2. Đã xác lập được ảnh hưởng của môi trường ion hòa tan và vai trò của hệ thuốc điều chỉnh đối với quá trình sunfua hóa – tuyển nổi quặng oxit kẽm bằng thuốc tập hợp gốc axit béo. Kết quả nghiên cứu trên mẫu C17 cho thấy hiệu quả tuyển nổi phụ thuộc đồng thời vào trạng thái ion trong pha lỏng, mức độ sunfua hóa và hệ thuốc điều chỉnh. Na_2S giữ vai trò quan trọng trong quá trình sunfua hóa bề mặt khoáng vật kẽm; Tan-X, Sep-X, SHMP, Na_2SiO_3 và tinh bột có tác dụng khác nhau tùy thuộc thành phần vật chất và môi trường tuyển. Kết quả là cơ sở lựa chọn Na_2S , Tan-X và Sep-X làm các biến nghiên cứu tối ưu hóa, đồng thời định hướng lựa chọn hệ thuốc phù hợp cho hai mẫu quặng nghèo KN và KĐ.

3. Đã xây dựng được mô hình định lượng và xác định vùng chế độ thuốc phù hợp bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) sử dụng thiết kế Box–Behnken (BBD). Mô hình với ba biến Na_2S , Tan-X và Sep-X đã xác định được ảnh hưởng riêng lẻ và tương tác của các yếu tố đến hàm lượng và thực thu Zn. Tại điều kiện kiểm chứng với Tan-X khoảng 510 g/t, Sep-X khoảng 495 g/t và Na_2S khoảng 10.200 g/t, quặng tinh đạt 29,5% Zn, thực thu 75,4%; sai lệch giữa kết quả thực nghiệm và dự báo lần lượt là 3,2% và 4,6%, đều dưới 5%. Kết quả cho phép xác định vùng thông số công nghệ

phù hợp, làm cơ sở chuyển sang nghiên cứu chế độ tuyển đối với quặng nghèo KN và KĐ.

4. Đã xác lập được các điều kiện công nghệ chủ yếu và hệ thuốc điều chỉnh phù hợp riêng cho hai loại quặng KN và KĐ. Kết quả nghiên cứu độ mịn nghiền, nồng độ pha rắn, ảnh hưởng của slam và chế độ thuốc cho thấy phương án không khử slam phù hợp với hai mẫu quặng trong điều kiện khảo sát, góp phần hạn chế tổn thất Zn theo cấp hạt mịn và đơn giản hóa sơ đồ công nghệ. Đối với mẫu KN, hệ Na_2S – Tan-X – Sep-X phù hợp với đặc điểm quặng silicat–cacbonat; đối với mẫu KĐ, hệ Na_2S – tinh bột – SHMP cho kết quả phù hợp hơn với đặc điểm quặng chứa nhiều pha Fe–Mn. Qua đó, luận án đã xác lập chế độ thuốc riêng phù hợp với đặc điểm thành phần vật chất và khả năng tuyển của từng loại quặng.

5. Đã xây dựng và kiểm chứng chế độ công nghệ tuyển nổi riêng cho hai loại quặng oxit kẽm nghèo trên thiết bị TankCell. Với mẫu KN, sơ đồ vòng kín gồm 01 khâu tuyển chính – 01 khâu tuyển tinh, từ quặng đầu 7,41% Zn thu được quặng tinh 21,05% Zn, thực thu 66,70%. Với mẫu KĐ khó tuyển hơn, sơ đồ gồm 01 khâu tuyển chính – 02 khâu tuyển tinh, từ quặng đầu 6,57% Zn thu được quặng tinh 16,10% Zn, thực thu 60,19%. Kết quả vòng kín khẳng định sự cần thiết và tính phù hợp của việc xây dựng chế độ thuốc, số khâu tuyển tinh riêng theo đặc điểm của từng loại quặng.

6. Trên cơ sở các điều kiện công nghệ đã xác lập và kết quả kiểm chứng vòng kín, luận án đã đề xuất sơ đồ công nghệ áp dụng thực tế riêng cho hai loại quặng KN và KĐ. Sơ đồ bao gồm các khâu chuẩn bị quặng, nghiền – phân cấp, tuyển nổi chính, tuyển tinh, tuyển vét và tuần hoàn sản phẩm trung gian;

trong đó chế độ thuốc, số khâu tuyển được bố trí phù hợp với đặc điểm và mức độ khó tuyển của từng loại quặng. Hai sơ đồ kiến nghị là cơ sở để tiếp tục kiểm chứng và hoàn thiện chế độ công nghệ ở quy mô bán công nghiệp.

2. Kiến nghị

Các kết quả của luận án đã thiết lập được cơ sở khoa học và chế độ công nghệ tuyển nổi quặng oxit kẽm vùng Chợ Đồn trong phạm vi nghiên cứu. Để tiếp tục làm rõ các vấn đề còn tồn tại và hoàn thiện cơ sở khoa học, công nghệ, NCS đề xuất một số hướng nghiên cứu tiếp theo:

1. Tiếp tục nghiên cứu ảnh hưởng của slam, cỡ hạt khử slam và ảnh hưởng của các ion hòa tan trong điều kiện tuần hoàn nước qua nhiều chu kỳ, nhằm đánh giá sự tích lũy của bùn mịn và các ion trong pha lỏng, từ đó có cơ sở đầy đủ hơn để lựa chọn chế độ xử lý slam phù hợp cũng như lựa chọn chế độ thuốc điều chỉnh.

2. Nghiên cứu sâu hơn cơ chế tương tác giữa thuốc tuyển, các ion hòa tan và bề mặt khoáng vật chứa kẽm, đặc biệt đối với hemimorphit, smithsonit và chalcophanit, bằng các phương pháp hóa lý bề mặt như đo thế zeta, góc tiếp xúc, FTIR, XPS và SEM-EDS. Qua đó làm rõ cơ sở khoa học của quá trình sunfua hóa và tác dụng của các thuốc điều chỉnh Tan-X, Sep-X, tinh bột và SHMP đối với từng loại quặng.

3. Tiếp tục kiểm chứng sơ đồ và chế độ công nghệ đã đề xuất ở quy mô bán công nghiệp, nhằm đánh giá tính ổn định của các chỉ tiêu công nghệ, chế độ tuần hoàn sản phẩm trung gian và nước tuyển trước khi xem xét mở rộng quy mô.

DANH MỤC CÁC BÀI BÁO, CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

Tiếng Anh

1. Luan Van Pham, Thanh Hai Pham, Nhu Quynh Thi Do, Ha Viet Le (2025), “Research to Determine the Appropriate Flotation Reagents for Zinc Oxide Ore Beneficiation: Case Study at Cho-Dien Mine, Vietnam”, *Inżynieria Mineralna WMCEES*, 1(2), DOI: <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-17>.

Tiếng Việt

2. Đỗ Thị Như Quỳnh, Phạm Văn Luận, Lê Việt Hà (2024), “Nghiên cứu xác định chế độ thuốc tuyển hợp lý để tuyển quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền – Bắc Kạn”, *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Toàn quốc Khoa học trái đất và tài nguyên với phát triển bền vững*, NXB Giao thông vận tải, tr. 1024.
3. Đỗ Thị Như Quỳnh, Phạm Văn Luận, Lê Việt Hà (2026), “Nghiên cứu và đề xuất giải pháp công nghệ tuyển nổi quặng oxit kẽm mỏ Chợ Điền”, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 67(1), tr. 18 - 30.
4. Đỗ Thị Như Quỳnh, Phạm Văn Luận, Lê Việt Hà (2026), “Tối ưu hóa chế độ thuốc tuyển trong tuyển nổi quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) và thiết kế BOX-BEHNKEN”, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 67(3), tr. 54-65.