

# Optimization of reagent conditions for flotation of oxidized zinc ore from the Cho Dien deposit using the RSM-BBD approach



Quynh Nhu Thi Do <sup>1</sup>, Luan Van Pham <sup>2,3,\*</sup>, Ha Viet Le <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> PhD Student at Mining Faculty, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup> Mining Faculty, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup> MinPro Research Group, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 29<sup>th</sup> Nov. 2025

Revised 25<sup>th</sup> Mar. 2026

Accepted 14<sup>th</sup> April 2026

### Keywords:

Box-Behnken Design,  
Response Surface Methodology (RSM),  
Flotation,  
Optimization,  
Zinc oxide ore.

## ABSTRACT

The Cho Dien zinc oxide ore, composed mainly of hemimorphite and smithsonite, exhibits poor floatability due to its highly oxidized surface and the presence of iron oxyhydroxides. In this study, the Response Surface Methodology (RSM) combined with a Box-Behnken Design (BBD) was employed to optimize the interactive effects of three reagents (Tan-XS, Sep-X, and Na<sub>2</sub>S) on the flotation performance of zinc oxide ore. Experiments were conducted using a 3-L mechanical flotation cell, with a constant collector dosage (fatty acid + kerosene = 4:1, 800 g/t) and without frother addition.

Quadratic regression models were developed for Zn grade and Zn recovery, both exhibiting coefficients of determination ( $R^2 > 0.95$ ), indicating excellent agreement between predicted and experimental data. The models were expressed in parabolic form to identify the response maxima. Multi-objective optimization based on the composite desirability function (equal weighting) identified the optimum reagent dosages as approximately 510 g/t Tan-XS, 495 g/t Sep-X, and 10,200 g/t Na<sub>2</sub>S, from which a flotation concentrate was obtained containing about 30.5% Zn and achieving an overall zinc recovery of approximately 79%, with a prediction error of less than 5%. The established RSM-BBD models demonstrate reliable predictive capability and can serve as a powerful tool for designing and optimizing flotation processes of refractory zinc oxide ores in Vietnam.

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(3).05



## Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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

# 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

Đỗ Thị Như Quỳnh<sup>1</sup>, Phạm Văn Luận<sup>2,3,\*</sup>; Lê Việt Hà<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Nghiên cứu sinh tại Khoa Mỏ, trường Đại học Mỏ - Địa chất

<sup>2</sup> Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup> Nhóm nghiên cứu MinPro, trường Đại học Mỏ - Địa chất

### THÔNG TIN BÀI BÁO

#### Quá trình:

Nhận bài 29/11/2025

Sửa xong 25/3/2026

Chấp nhận đăng 14/4/2026

#### Từ khóa:

Thiết kế Box-Behnken,  
Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM),

Tối ưu hóa,  
Tuyển nổi,

Quặng kẽm oxit.

### TÓM TẮT

Quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền chứa chủ yếu các khoáng vật hemimorphit và smithsonit, có đặc tính bề mặt bị oxy hóa mạnh, gây khó khăn cho quá trình tuyển nổi. Trong nghiên cứu này, phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) kết hợp thiết kế Box-Behnken được áp dụng nhằm tối ưu hóa ảnh hưởng của ba loại thuốc tuyển Tan-XS, Sep-X và Na<sub>2</sub>S đến hiệu quả tuyển nổi. Thí nghiệm được thực hiện trên máy tuyển nổi cơ giới dung tích 3 L với thuốc tập hợp cố định là hỗn hợp axit béo + dầu hỏa (tỷ lệ 4:1, chi phí 800 g/t).

Kết quả mô hình hóa hồi quy bậc hai ( $R^2 > 0,95$ ) cho thấy các phương trình dự báo có độ chính xác cao, sai lệch dưới 5% so với giá trị thực nghiệm. Dạng phương trình được chuyển về dạng parabol để xác định cực đại đáp ứng. Tối ưu hóa đa mục tiêu (trọng số 50-50 giữa hàm lượng và thực thu) xác định được chi phí tối ưu của Tan-XS  $\approx$  510 g/t, Sep-X  $\approx$  495 g/t, Na<sub>2</sub>S  $\approx$  10.200 g/t, khi đó thu được quặng tinh có hàm lượng Zn  $\approx$  30,5% và thực thu kẽm trong quặng tinh  $\approx$  79%. Mô hình được đánh giá có khả năng ứng dụng cao đối với các loại quặng kẽm oxit khó tuyển tại Việt Nam.

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

\*Tác giả liên hệ

E - mail: [phamvanluan@humg.edu.vn](mailto:phamvanluan@humg.edu.vn)

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).05

## 1. Mở đầu

Quặng kẽm oxit ngày càng trở thành đối tượng được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm do trữ lượng quặng sunfua đang suy giảm trên phạm vi toàn cầu (Ejtemaei và nnk, 2014; Sun & Deng, 2025). Nhưng, tuyển nổi quặng kẽm oxit gặp nhiều khó khăn do: (1) khoáng vật có ích chủ yếu ở dạng hydrat như smithsonit và hemimorphit, (2) bề mặt khoáng có tính ưa nước tự nhiên, (3) cấp hạt mịn giàu sét gây nổi cơ học, và (4) tương tác phức tạp giữa thuốc tập hợp axit béo với các ion trong bùn tuyển (Hosseini & Forssberg, 2006a; Bulatovic, 2010; Ejtemaei và nnk, 2012; Deng và nnk, 2017).

Hệ thuốc tập hợp gốc axit béo đã được ứng dụng từ thập niên 1960, hoạt động theo cơ chế hình thành lớp muối hydrophobic hóa bề mặt khoáng oxit ở pH kiềm (Hosseini & Forssberg, 2006b; Quast, 1999; Bulatovic, 2007). Để tăng hiệu quả hấp phụ, quá trình sunfua hóa bằng  $\text{Na}_2\text{S}$  thường được áp dụng nhằm tạo lớp ZnS nhân tạo trên bề mặt khoáng (Song và nnk, 2023). Tuy nhiên, hiệu quả của  $\text{Na}_2\text{S}$  phụ thuộc nhiều vào chi phí: nếu quá thấp, bề mặt chưa sunfua hóa hoàn toàn; nếu quá cao, xuất hiện hiện tượng “đè chìm” do sunfua dư tạo lớp hấp phụ thứ cấp, làm suy giảm tính nổi (Fuerstenau và nnk, 1985; Önal và nnk, 2005; Bulatovic, 2010).

Đối với quặng giàu sét, sự hấp phụ ưu tiên của slam mịn lên bề mặt khoáng làm giảm đáng kể hiệu quả tuyển nổi. Các nghiên cứu điển hình chỉ đã ra rằng trong một số trường hợp, có thể tuyển hiệu quả không khử slam nếu hệ thuốc điều chỉnh và phân tán được lựa chọn hợp lý (Laskowski, 2001; Martins và nnk, 2010). Do đó, vai trò của các thuốc điều chỉnh bề mặt như phân tán, đè chìm và sunfua hoá trở nên quan trọng (Liu và nnk, 2021; Chelgani và nnk, 2024). Trong đó, các polyphosphate hoặc silicate có khả năng tạo lớp hấp phụ ưu tiên trên khoáng tạp giàu Fe-Al, giúp tăng tính chọn riêng cho hệ axit béo-sunfua hóa (Liao và nnk, 2022; Luo và nnk, 2020).

Các nghiên cứu tối ưu hóa tuyển nổi quặng kẽm oxit trước đây chủ yếu tập trung vào: (1) hỗn hợp thuốc tập hợp anion-cation (Khaleghi và nnk., 2016), (2) hoặc tối ưu thực thu vào biến  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  và thuốc đè chìm (Li và nnk, 2015), và (3) hoặc chỉ tối ưu một chỉ tiêu công nghệ tuyển (ví dụ: chỉ thu hồi hoặc chỉ hàm lượng).

Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu nào tối ưu đồng thời hệ 3 thuốc điều chỉnh (Sunfua hóa - Phân tán - Đè chìm) cho quặng kẽm oxit giàu sét khi tuyển nổi bằng hỗn hợp thuốc tập hợp axit béo + dầu hoả. Đặc biệt, là quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền - nơi đặc trưng bởi khoáng vật xâm nhiễm mịn, hàm lượng Fe-oxhydroxide cao và tỷ lệ hạt siêu mịn lớn. (Luan và nnk, 2025)

Bên cạnh đó, các nghiên cứu trên mới chỉ dừng ở tối ưu một mục tiêu, trong khi yêu cầu thực tiễn tại nhà máy tuyển đòi hỏi tối ưu đồng thời hàm lượng và thực thu - vốn có xu hướng biến thiên ngược chiều nhau. Việc sử dụng hàm mong muốn tổng hợp (Desirability Function Approach) trong RSM cho phép giải quyết bài toán tối ưu đa mục tiêu đồng thời, phù hợp với yêu cầu thiết kế thông số công nghệ ở quy mô pilot và công nghiệp (Li và nnk, 2015).

Từ những cơ sở trên, nghiên cứu này được thực hiện với ba mục tiêu chính: (1) xây dựng mô hình hồi quy bậc hai mô tả định lượng ảnh hưởng của Tan-XS, Sep-X và  $\text{Na}_2\text{S}$  đến hàm lượng và thực thu kẽm; (2) tối ưu hóa đồng thời hai chỉ tiêu công nghệ tuyển thông qua hàm mong muốn; và (3) đề xuất chế độ thuốc tuyển có khả năng ứng dụng thực tiễn cho quặng kẽm oxit phong hóa mạnh tại mỏ Chợ Điền.

Khoảng trống nghiên cứu: (1) Chưa có nghiên cứu tối ưu hóa tuyển nổi quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền theo mô hình RSM-BBD; (2) chưa có công trình nào đánh giá định lượng tương tác giữa Tan-XS, Sep-X và  $\text{Na}_2\text{S}$  và (3) chưa có phương pháp tối ưu hàm lượng và thực thu đồng thời cho hệ thuốc axit béo - sunfua hóa.

Nghiên cứu này lần đầu tiên: (1) Ứng dụng RSM-BBD để mô hình hóa quá trình tuyển nổi quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền; (2) tối ưu đồng thời 3 yếu tố Tan-XS - Sep-X -  $\text{Na}_2\text{S}$ , thay vì tối ưu 1 hoặc 2 yếu tố như các nghiên cứu trước; và (3) áp dụng hàm mong muốn tổng hợp để tìm vùng tối ưu đa mục tiêu (hàm lượng + thực thu) có khả năng áp dụng cho mỏ Chợ Điền.

Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn cho việc hoàn thiện sơ đồ tuyển quặng kẽm oxit nghèo, giàu sét của Việt Nam, trong bối cảnh nguồn quặng sunfua tại Việt Nam ngày càng suy giảm (Luan và nnk, 2025).

## 2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Mẫu quặng và đặc điểm khoáng vật

Thành phần khoáng vật của mẫu nghiên cứu phức tạp, với sự có mặt của khoáng sét và các hydroxyt sắt là nguyên nhân chính làm giảm khả năng tương tác và tính chọn riêng giữa khoáng vật kẽm với thuốc tập hợp. Do đó, việc lựa chọn và tối ưu hóa hệ thuốc điều chỉnh - sunfua hoá là yếu tố quyết định hiệu quả của quá trình tuyển nổi.

Mẫu quặng nghiên cứu được lấy tại mỏ Chợ Điền (Bắc Kạn), có hàm lượng Zn 17,94%. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật cho thấy mẫu chứa chủ yếu smithsonit (30÷32%) và hemimorphit (15÷17%), ngoài ra còn có thạch anh (3÷5%), illit (2÷4%), goethit (34÷36%) và hematit (5÷7%). Thành phần khoáng vật chi tiết được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần khoáng vật mẫu nghiên cứu.

| Tên khoáng vật | Tỷ lệ, % |
|----------------|----------|
| Hemimorphit    | 15÷17    |
| Smithsonit     | 30÷32    |
| Canxit         | -        |
| Thạch anh      | 3÷5      |
| Illit          | 2÷4      |
| Gotit          | 34÷36    |
| Hematit        | 5÷7      |

## 2.2. Thuốc tuyển sử dụng

Thuốc tập hợp được sử dụng là hỗn hợp axit béo và dầu hỏa theo tỷ lệ 4:1, với chi phí thuốc tuyển cố định 800 g/t.

Ba yếu tố được chọn để khảo sát tối ưu gồm: (1)  $\text{Na}_2\text{S}$  (chất sunfua hóa bề mặt), (2) Tan-XS và (3) Sep-X (chất điều chỉnh bề mặt). Trong đó Sep-X là hỗn hợp polyme tự nhiên với 50% tanin và Tan-XS là bột Bisulfite chiết xuất từ cây keo Úc.

Các thí nghiệm tuyển nổi được thực hiện ở pH =9,5 điều chỉnh bằng  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , đồng thời sử dụng  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ở chi phí cố định 500 g/t để đè chìm các khoáng thạch anh.

## 2.3. Thiết bị và điều kiện tuyển nổi

Thí nghiệm được tiến hành tuyển nổi 1 lần trên máy tuyển nổi cơ giới dung tích 3 L ở nồng độ bùn 25% rắn và tốc độ khuấy 1200 vòng/phút. Thời gian khuấy tiếp xúc bùn quặng với thuốc tập hợp là 5 phút, với  $\text{Na}_2\text{S}$  là 15 phút, còn các thuốc

khác là 3 phút. Thứ tự cấp thuốc: điều chỉnh pH, sunfua hoá, đè chìm, phân tán và tập hợp. Các điều kiện này được lựa chọn dựa trên kết quả khảo sát sơ bộ trước đó nhằm đảm bảo tính ổn định của bọt và mức độ phân tán thuốc tuyển.

## 2.4. Quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken

Trong nghiên cứu này, sử dụng phần mềm Design-Expert 11 làm công cụ để thiết lập ma trận quy hoạch thực nghiệm, xử lý thống kê số liệu và mô hình hóa bề mặt đáp ứng. Mô hình Box-Behnken (BBD) với ba yếu tố được lựa chọn trong thư viện thiết kế của phần mềm, để khảo sát ảnh hưởng tương tác giữa các biến độc lập. Đây là thiết kế hiệu quả cho phép ước lượng các hệ số của mô hình bậc hai với số lượng thí nghiệm ít hơn so với thiết kế tâm xoay mà vẫn đảm bảo độ chính xác thống kê (Montgomery, 2019).

Các thông số đầu vào cho quá trình thiết kế bao gồm:

|                                  |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| Tan-XS ( $X_1$ ):                | 400 ÷ 600 g/t      |
| Sep-X ( $X_2$ ):                 | 400 ÷ 600 g/t      |
| $\text{Na}_2\text{S}$ ( $X_3$ ): | 7.500 ÷ 12.500 g/t |

Dựa trên các thiết lập này, phần mềm đã tạo ra ma trận ngẫu nhiên gồm 15 thí nghiệm, gồm 12 điểm giai thừa và 3 điểm tâm để đánh giá sai số lặp, (Bảng 2). Sau khi nhập dữ liệu thực nghiệm (Hàm lượng Zn -  $Y_1$  và Thực thu Zn -  $Y_2$ ), phần mềm tự động thực hiện phân tích phương sai (ANOVA), kiểm định độ phù hợp và xuất các đồ thị 3D để xác định vùng tối ưu.

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Mô hình hồi quy bậc hai và đánh giá độ phù hợp

Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) được sử dụng nhằm mô tả định lượng ảnh hưởng đồng thời của ba biến độc lập - Tan-XS ( $X_1$ ), Sep-X ( $X_2$ ) và  $\text{Na}_2\text{S}$  ( $X_3$ ) - lên hai chỉ tiêu công nghệ chính là hàm lượng kẽm trong quặng tinh ( $Y_1$ ) và thực thu kẽm ( $Y_2$ ). Mối quan hệ giữa các biến được biểu diễn bằng mô hình hồi quy bậc hai tổng quát (phương trình 1), bao gồm các thành phần tuyến tính, bậc hai và tương tác, cho phép mô tả hình dạng bề mặt đáp ứng phi tuyến điển hình trong tuyển nổi quặng oxit (Li và nnk, 2015; Khaleghi và nnk, 2016; Montgomery, 2019).

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm.

| TT | Tan-XS (g/t) | Sep-X (g/t) | Na <sub>2</sub> S (g/t) | Hàm lượng Zn (%) | Thực thu Zn (%) |
|----|--------------|-------------|-------------------------|------------------|-----------------|
| 1  | 400,0        | 400,0       | 10000,0                 | 24,71            | 56,99           |
| 2  | 600,0        | 400,0       | 10000,0                 | 24,02            | 56,77           |
| 3  | 400,0        | 600,0       | 10000,0                 | 24,89            | 54,81           |
| 4  | 600,0        | 600,0       | 10000,0                 | 29,3             | 45,09           |
| 5  | 400,0        | 500,0       | 7500,0                  | 18,37            | 52,52           |
| 6  | 600,0        | 500,0       | 7500,0                  | 19,05            | 52,1            |
| 7  | 400,0        | 500,0       | 12500,0                 | 33,28            | 32,7            |
| 8  | 600,0        | 500,0       | 12500,0                 | 32,63            | 38,75           |
| 9  | 500,0        | 400,0       | 7500,0                  | 17,08            | 74,16           |
| 10 | 500,0        | 600,0       | 7500,0                  | 21,25            | 70,66           |
| 11 | 500,0        | 400,0       | 12500,0                 | 29,17            | 51,72           |
| 12 | 500,0        | 600,0       | 12500,0                 | 27,34            | 71,02           |
| 13 | 500,0        | 500,0       | 10000,0                 | 30,14            | 81,52           |
| 14 | 500,0        | 500,0       | 10000,0                 | 31,06            | 79,18           |
| 15 | 500,0        | 500,0       | 10000,0                 | 30,88            | 80,94           |

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

Trong đó:  $\beta_0$  - hệ số chặn;  $\beta_i$  - biểu thị ảnh hưởng tuyến tính của từng yếu tố;  $\beta_{ii}$  - hệ số bậc hai phản ánh độ cong của bề mặt đáp ứng;  $\beta_{ij}$  - thể hiện ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố;  $\varepsilon$  - sai số ngẫu nhiên.

Kết quả xử lý dữ liệu thí nghiệm cho thấy cả hai hàm đáp ứng đều được mô tả tốt bởi phương trình hồi quy bậc hai (phương trình 2 và 3), với hệ số xác định  $R^2 > 0,95$  - ngưỡng thường được xem là chấp nhận được đối với các hệ tuyến nổi đa biến (Wills & Finch, 2016).

Hàm lượng Zn:

$$Y_1 = -183,7654 + 0,09628X_1 + 0,36029X_2 + 0,01701X_3 + 0,0001275X_1X_2 - 1,33 \times 10^{-6}X_1X_3 - 6 \times 10^{-6}X_2X_3 - 0,0001420X_1^2 - 0,0003543X_2^2 - 5,50 \times 10^{-7}X_3^2 \quad (2)$$

Thực thu Zn:

$$Y_2 = -666,0647 + 2,54860X_1 + 0,10621X_2 + 0,01949X_3 - 0,0002375X_1X_2 + 6,46 \times 10^{-6}X_1X_3 + 2,28 \times 10^{-5}X_2X_3 - 0,0024999X_1^2 - 0,0002130X_2^2 - 1,844 \times 10^{-6}X_3^2 \quad (3)$$

Ý nghĩa thống kê và độ phù hợp của các mô hình hồi quy được kiểm định thông qua Phân tích phương sai (ANOVA), với kết quả chi tiết được trình bày trong Bảng 3 và 4.

So sánh giá trị thực nghiệm và dự đoán cho thấy sai lệch nhỏ hơn 5% đối với cả hàm lượng và thực thu, chứng tỏ mô hình có độ tin cậy thống kê đủ cao để sử dụng trong phân tích tối ưu hóa. Đây cũng là điều kiện quan trọng để mô hình RSM không chỉ dừng ở mức "khớp dữ liệu" mà còn có ý nghĩa dự báo cho các điều kiện ngoài điểm thí nghiệm (Li và nnk, 2015).

Phân tích phương sai (ANOVA) cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê rất cao ( $p < 0,01$ ), trong đó Na<sub>2</sub>S là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến cả  $Y_1$  và  $Y_2$ , phù hợp với cơ chế kiểm soát mức độ sunfua hóa bề mặt khoáng vật oxit (Önal và nnk, 2005; Bulatovic, 2010).

Bảng 3. Phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình bậc hai của hàm lượng Zn.

| Nguồn biến thiên      | Sum of squares | df | Mean square | F-value | p-value |
|-----------------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model                 | 384,36         | 9  | 42,71       | 12,8    | 0,0059  |
| A - Tan-XS            | 1,76           | 1  | 1,76        | 0,53    | 0,5095  |
| B - Sep-X             | 7,6            | 1  | 7,6         | 2,28    | 0,1915  |
| C - Na <sub>2</sub> S | 272,26         | 1  | 272,26      | 81,61   | 0,0001  |
| AB                    | 6,5            | 1  | 6,5         | 1,95    | 0,2215  |
| AC                    | 0,44           | 1  | 0,44        | 0,14    | 0,7307  |
| BC                    | 9              | 1  | 9           | 2,7     | 0,1614  |
| A <sup>2</sup>        | 7,45           | 1  | 7,45        | 2,23    | 0,1953  |
| B <sup>2</sup>        | 46,35          | 1  | 46,35       | 13,89   | 0,0136  |
| C <sup>2</sup>        | 43,7           | 1  | 43,7        | 13,1    | 0,0152  |
| Residual              | 16,68          | 5  | 3,34        |         |         |
| Lack of Fit           | 16,21          | 3  | 5,4         | 22,72   | 0,0424  |
| Pure Error            | 0,48           | 2  | 0,24        |         |         |
| Tổng độ lệch          | 401,04         | 14 |             |         |         |

Bảng 4. Phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình bậc hai của thực thu Zn.

| Nguồn biến thiên      | Sum of squares | df | Mean square | F-value | p-value |
|-----------------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model                 | 3 198,04       | 9  | 355,34      | 11,2    | 0,008   |
| A - Tan-XS            | 2,34           | 1  | 2,34        | 0,74    | 0,3976  |
| B - Sep-X             | 0,46           | 1  | 0,46        | 0,15    | 0,7046  |
| C - Na <sub>2</sub> S | 381,4          | 1  | 381,4       | 12,09   | 0,0179  |
| AB                    | 22,55          | 1  | 22,55       | 0,76    | 0,4356  |
| AC                    | 1,71           | 1  | 1,71        | 0,39    | 0,592   |
| BC                    | 129,9          | 1  | 129,9       | 4,09    | 0,0909  |
| A <sup>2</sup>        | 2 307,54       | 1  | 2 307,54    | 72,72   | 0,0004  |
| B <sup>2</sup>        | 16,76          | 1  | 16,76       | 0,53    | 0,5     |
| C <sup>2</sup>        | 490,55         | 1  | 490,55      | 15,63   | 0,0111  |
| Residual              | 158,66         | 5  | 31,73       |         |         |
| Lack of Fit           | 155,71         | 3  | 51,9        | 31,37   | 0,0278  |
| Pure Error            | 2,95           | 2  | 1,48        |         |         |
| Tổng độ lệch          | 3 356,71       | 14 |             |         |         |

Các thành phần bậc hai (B<sup>2</sup> và C<sup>2</sup> với Y<sub>1</sub>; A<sup>2</sup> và C<sup>2</sup> với Y<sub>2</sub>) có p < 0,05, chứng tỏ cả hàm lượng và thực thu đều biểu hiện tính phi tuyến rõ rệt theo chi phí thuốc tuyển - đặc trưng của hệ thống bề mặt có giới hạn hấp phụ và trạng thái bão hòa thuốc (Liu và nnk, 2019).

Độ phù hợp của mô hình được đánh giá thông qua hệ số R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>adj</sub> và R<sup>2</sup><sub>pred</sub>. Các giá trị này được cho ở Bảng 5. Các giá trị R<sup>2</sup> đều lớn hơn 0,95 cho thấy mô hình giải thích được trên 95% sự biến thiên của dữ liệu thực nghiệm.

Bảng 5. Các giá trị sai số của mô hình.

| Sai số                         | Hàm lượng | Thực thu |
|--------------------------------|-----------|----------|
| R <sup>2</sup>                 | 0,958     | 0,953    |
| R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>  | 0,884     | 0,868    |
| R <sup>2</sup> <sub>pred</sub> | 0,351     | 0,256    |
| Adeq Precision                 | 10,100    | 9,676    |

Mặc dù giá trị R<sup>2</sup><sub>pred</sub> thấp, nhưng chỉ số Adeq Precision > 9 của cả hai hàm mục tiêu xác nhận tỷ lệ tín hiệu/nhiều cao đủ để định hướng không gian

thiết kế. Đồng thời, kết quả thực nghiệm kiểm chứng tại điểm tối ưu do mô hình đề xuất rất sát với giá trị dự đoán (trình bày tại mục 3.2). Cụ thể, sai lệch thực nghiệm so với dự đoán chỉ ở mức 3,2% đối với hàm lượng và 4,6% đối với thực thu. Những dữ liệu thực tế này cho thấy, dù  $R^2_{pred}$  thấp, mô hình vẫn đạt độ tin cậy cao và hoạt động hiệu quả trong việc xác định vùng không gian tối ưu.

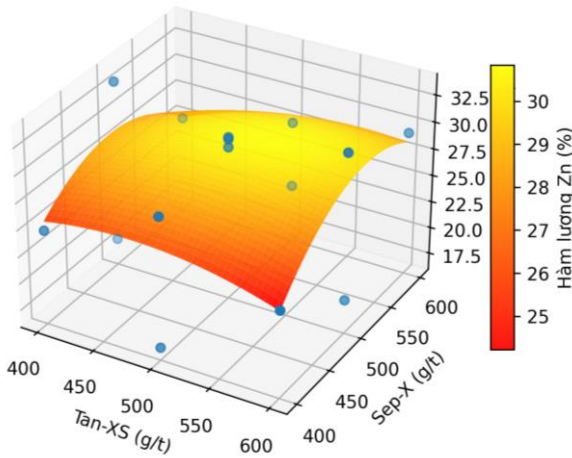
Các đồ thị Hình 1÷4 minh họa mối quan hệ giữa giá trị thực và giá trị dự đoán, cũng như hình dạng bề mặt đáp ứng ba chiều của hai chỉ tiêu hàm lượng và thực thu. Hình 1, 2 Mặt đáp ứng 3D mô tả ảnh hưởng của Tan-XS và Sep-X (với  $Na_2S = 10\ 000$  g/t) đến hàm lượng và thực thu; Hình 3, 4 Đồ thị so

sánh giữa giá trị dự đoán - thực tế, thể hiện sai lệch nhỏ và xu hướng tương quan tuyến tính rõ ràng.

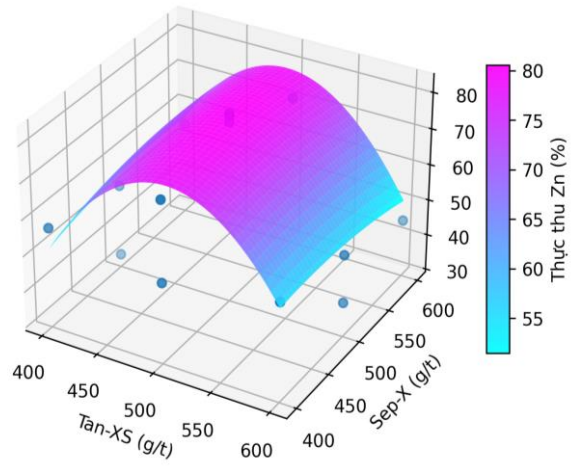
*Phân tích các đồ thị cho thấy:*

Khi Tan-XS và Sep-X tăng từ 400 lên 500 g/t, hàm lượng Zn tăng rõ rệt nhờ khả năng phân tán tốt và hạn chế hấp phụ của khoáng sắt. Tuy nhiên, ở mức quá cao ( $\geq 600$  g/t), sự cạnh tranh hấp phụ giữa Tan-XS và Sep-X gây hiện tượng bề mặt khoáng bị “bão hòa thuốc”, làm giảm nhẹ hàm lượng và thực thu (Liu và nnk, 2021; Chelgani và nnk, 2024).

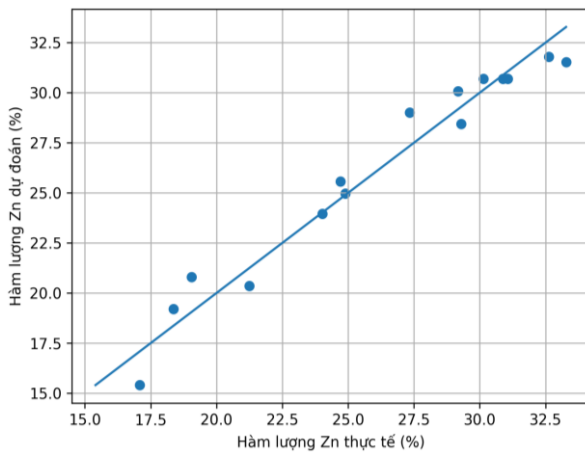
$Na_2S$  có ảnh hưởng phi tuyến mạnh: khi tăng từ 7.500 đến 10.000 g/t, thực thu tăng đáng kể; nhưng nếu vượt 12.000 g/t, lượng sunfua dư gây



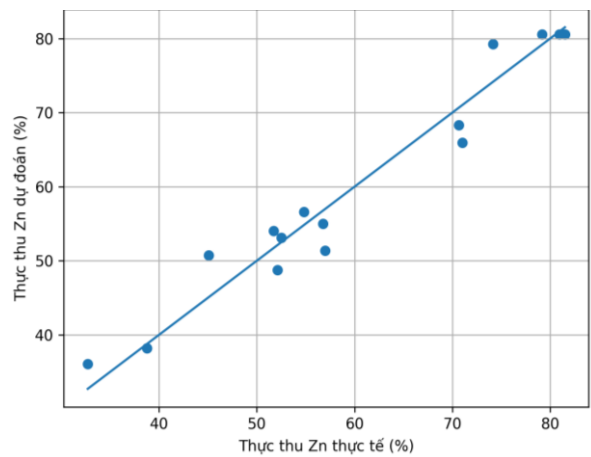
Hình 1. Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của hàm lượng Zn trong quặng tinh vào Tan-XS và Sep-X ở chi phí  $Na_2S = 10.000$  g/t.



Hình 2. Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của thực thu Zn trong quặng tinh vào Tan-XS và Sep-X ở chi phí  $Na_2S = 10.000$  g/t.



Hình 3. Đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa giá trị dự đoán và thực tế về hàm lượng Zn trong quặng tinh.



Hình 4. Đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa giá trị dự đoán và thực tế về thực thu Zn trong quặng tinh.

hiện tượng “đề chìm” bề mặt khoáng, làm giảm tính nổi của khoáng vật oxit kẽm (Önal và nnk, 2005).

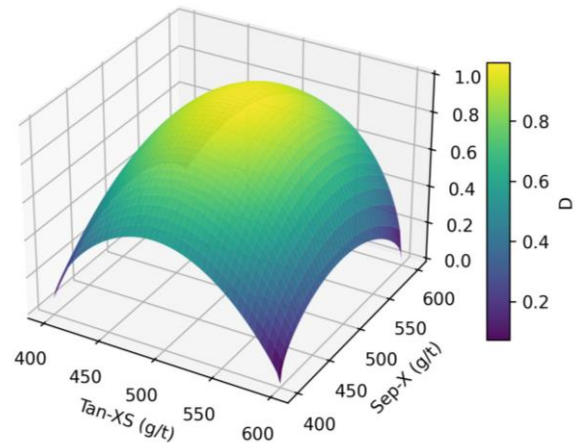
Các mặt đáp ứng 3D (Hình 1 và 2) cho thấy hiệu ứng tương tác rõ rệt giữa Tan-XS và Sep-X khi  $\text{Na}_2\text{S}$  cố định ở 10.000 g/t. Cả hàm lượng và thực thu đều tăng đáng kể trong vùng 400-500 g/t, chứng tỏ sự kết hợp giữa hai chất điều chỉnh này giúp ổn định lớp sunfua trên bề mặt khoáng vật kẽm oxit, đồng thời hạn chế hiện tượng hấp phụ cạnh tranh của các khoáng tạp (goethit và hematit) thông qua cơ chế chelat hóa và phân tán chọn lọc (Luo và nnk, 2020; Somasundaran & Moudgil, 1988). Tuy nhiên, khi nồng độ Tan-XS và Sep-X vượt 600 g/t, bề mặt khoáng xuất hiện trạng thái “bão hoà thuốc” do mật độ hấp phụ quá cao, làm giảm năng lượng bề mặt kỵ nước và dẫn đến suy giảm hiệu suất - hiện tượng đã được ghi nhận trong tuyển nổi hemimorphit (Chelgani và nnk, 2024).

Ảnh hưởng phi tuyến của  $\text{Na}_2\text{S}$  thể hiện rõ trên đồ thị đáp ứng: khi nồng độ tăng từ 7500 → 10 000 g/t, hiệu suất thu hồi tăng nhanh nhờ quá trình sunfua hóa chuyển tiếp bề mặt  $\text{ZnCO}_3$  và  $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7$  thành  $\text{ZnS}$  sunfua hóa. Tuy nhiên, khi vượt 12.000 g/t, sự dư thừa sunfua tạo ra các pha  $\text{Zn}(\text{HS})_2$  và  $\text{H}_2\text{S}\cdot\text{ZnS}$  hấp phụ ngược lại lên bề mặt, gây “đề chìm” khoáng vật và làm giảm tính nổi (Bulatovic, 2010; Önal và nnk, 2005).

Hai đồ thị Dự đoán - Thực tế (Hình 3 và 4) cho thấy các điểm dữ liệu phân bố gần theo đường thẳng, với sai lệch nhỏ và không xuất hiện giá trị bất thường. Điều này chứng tỏ mô hình hồi quy thu được không chỉ khớp tốt với dữ liệu mà còn phản ánh đúng xu hướng vật lý - hoá học của hệ tuyển nổi, không phải dạng khớp nội suy thuần túy thống kê.

Từ các kết quả trên có thể rút ra:  $\text{Na}_2\text{S}$  là tham số điều khiển sunfua hóa bề mặt, trong khi Tan-XS và Sep-X đóng vai trò điều khiển tính chọn riêng của thuốc tập hợp. Điều này có ý nghĩa quan trọng khi chuyển sang quy mô pilot, vì hệ thống tuyển nổi quy mô lớn thường nhạy với dư lượng sunfua và nồng độ chất điều chỉnh trong bùn tuyển.

Từ các phân tích trên, có thể xác định sơ bộ vùng điều kiện tối ưu tập trung quanh Tan-XS ≈ 500 g/t, Sep-X ≈ 500 g/t và  $\text{Na}_2\text{S}$  ≈ 10 000 g/t; điều này được khẳng định rõ hơn trong biểu đồ hàm mong muốn tổng hợp (Hình 5), nơi cả hàm lượng và thực thu cùng đạt giá trị cực đại, giải quyết bài toán tối ưu đa mục tiêu thường gặp trong chế biến khoáng sản (Li và nnk, 2015).



Hình 5. Đồ thị biểu diễn hàm mong muốn tổng hợp  $D$  (ở chi phí  $\text{Na}_2\text{S}$  = 10.000 g/t).

### 3.2. Tối ưu song song và kiểm chứng thực nghiệm

Do hàm lượng và thực thu Zn thường biến thiên ngược chiều nhau trong tuyển nổi, việc tối ưu hóa chỉ một chỉ tiêu riêng lẻ sẽ dẫn đến kết quả mất cân bằng công nghệ. Do đó, phương pháp hàm mong muốn tổng hợp (Desirability Function Approach) được sử dụng để tối ưu đồng thời cả hai đáp ứng ( $Y_1, Y_2$ ), trong đó mỗi đáp ứng được chuẩn hóa về thang  $d_i \in [0;1]$  (phương trình 4), với  $d_i = 1$  ứng với kết quả mong muốn nhất và  $d_i = 0$  tương ứng với kết quả không chấp nhận được, kỹ thuật này đã được Derringer và Suich phát triển vào năm 1980. (Derringer và Suich, 1980; Djimtoingar và nnk, 2022).

$$D = (d_1^{w_1} \cdot d_2^{w_2} \cdot \dots \cdot d_n^{w_n})^{\frac{1}{w_1+w_2+\dots+w_n}} \quad (4)$$

Trong đó:  $w_i$  là trọng số của từng chỉ tiêu. Khi  $D$  đạt cực đại, toàn bộ các hàm mục tiêu đạt trạng thái tối ưu cân bằng. Phương pháp này đặc biệt hữu ích đối với tuyển nổi, nơi hàm lượng và thực thu quặng tinh thường biến thiên ngược chiều nhau, như đã được đề cập trong các nghiên cứu tương tự sử dụng RSM (Li và nnk, 2015)

Trong nghiên cứu này, cả hàm lượng Zn ( $Y_1$ ) và thực thu Zn ( $Y_2$ ) được gán trọng số bằng nhau (50-50). Khi đó, hàm tổng hợp được rút gọn như công thức (5).

$$D = (d_1 \cdot d_2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Kết quả tối ưu hóa (Hình 5) cho thấy giá trị hàm mong muốn tổng hợp D đạt cực đại ( $\approx 0,92$ ) tại bộ thông số:

| Yếu tố            | Giá trị tối ưu       |
|-------------------|----------------------|
| Tan-XS            | $\approx 510$ g/t    |
| Sep-X             | $\approx 495$ g/t    |
| Na <sub>2</sub> S | $\approx 10.200$ g/t |

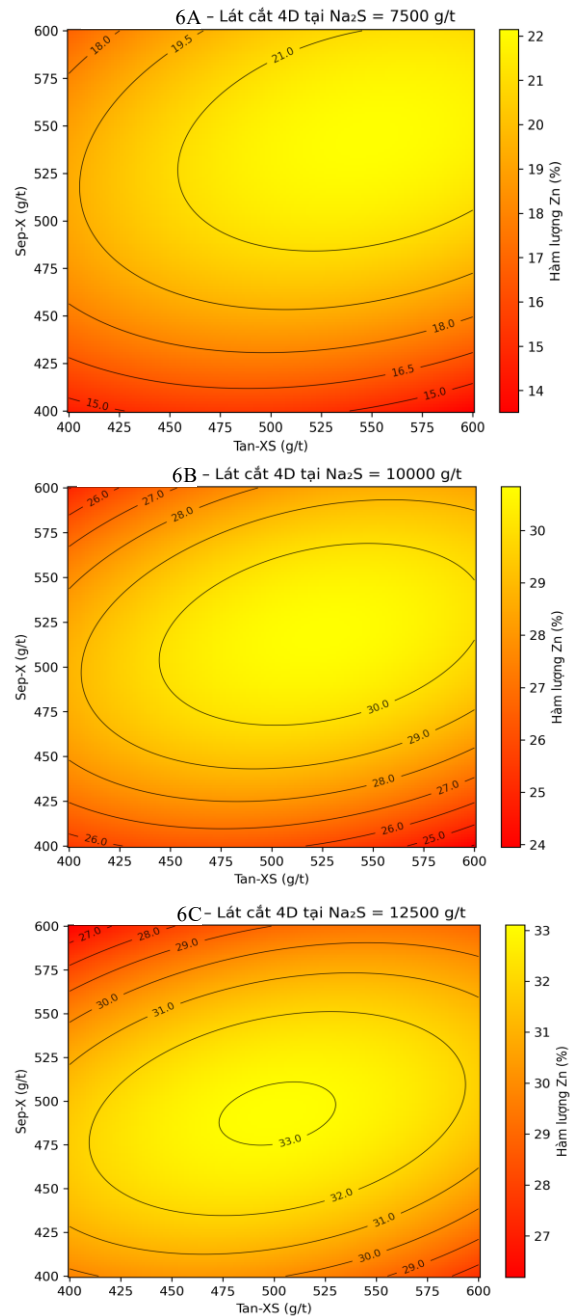
Tại điều kiện này, thu được quặng tinh có hàm lượng Zn  $\approx 30,5\%$  và thực thu Zn  $\approx 79\%$ , với giá trị hàm mong muốn tổng hợp D  $\approx 0,92$ .

Kết quả thực nghiệm kiểm chứng tại điểm tối ưu ( $X_1 = 510; X_2 = 495$  g/t,  $X_3 = 10.200$  g/t), thu được hàm lượng Zn đạt  $29,5\%$  và thực thu đạt  $75,4\%$ . Sai lệch thực nghiệm so với giá trị dự đoán lần lượt khoảng  $3,2\%$  đối với hàm lượng và  $4,6\%$  đối với thực thu, trong đó thực thu thấp hơn do phụ thuộc trực tiếp vào mức độ sunfua hóa khoáng vật - phù hợp với kết luận về vai trò quyết định của ion S<sup>2-</sup> trong việc hình thành lớp kỵ nước giả định trên bề mặt oxit kẽm (Önal và nnk, 2005).

Hình 5 minh họa hiệu ứng tương tác giữa Tan-XS và Sep-X tại mức cố định Na<sub>2</sub>S (10.000 g/t). Kết quả cho thấy trong khi Na<sub>2</sub>S là yếu tố quyết định “biên độ” của thực thu, thì cặp đôi Tan-XS và Sep-X đóng vai trò thiết lập “tính chọn riêng” của vùng cực trị. Hiện tượng này phù hợp với cơ chế bề mặt: Dưới 7.500 g/t Na<sub>2</sub>S, bề mặt ZnCO<sub>3</sub> chưa sunfua hóa hoàn toàn dẫn đến tính nổi kém; Trên 12.000 g/t Na<sub>2</sub>S, lượng sunfua dư gây hấp phụ ngược, tạo lớp Zn(HS)<sub>2</sub> ưa nước, dẫn đến hiệu ứng “đè chìm”. Cơ chế này đã được giải thích chi tiết trong các nghiên cứu cơ bản về thuốc tuyển (Bulatovic, 2010).

Các lát cắt 4D theo Na<sub>2</sub>S (Hình 6, 7) cho thấy vùng tối ưu rõ rệt tập trung quanh 10.000 g/t. Ở mức thấp hơn (7.500 g/t), bề mặt khoáng chưa được sunfua hóa hoàn toàn; trong khi ở mức cao hơn (12.500 g/t), sunfua dư gây hiện tượng “đè chìm”, làm suy giảm cả hàm lượng và thực thu. Điều này phản ánh đúng cơ chế sunfua hóa - hấp phụ phân tử S<sup>2-</sup>/HS<sup>-</sup> trên bề mặt khoáng vật và phù hợp với các kết quả đã công bố (Önal và nnk, 2005).

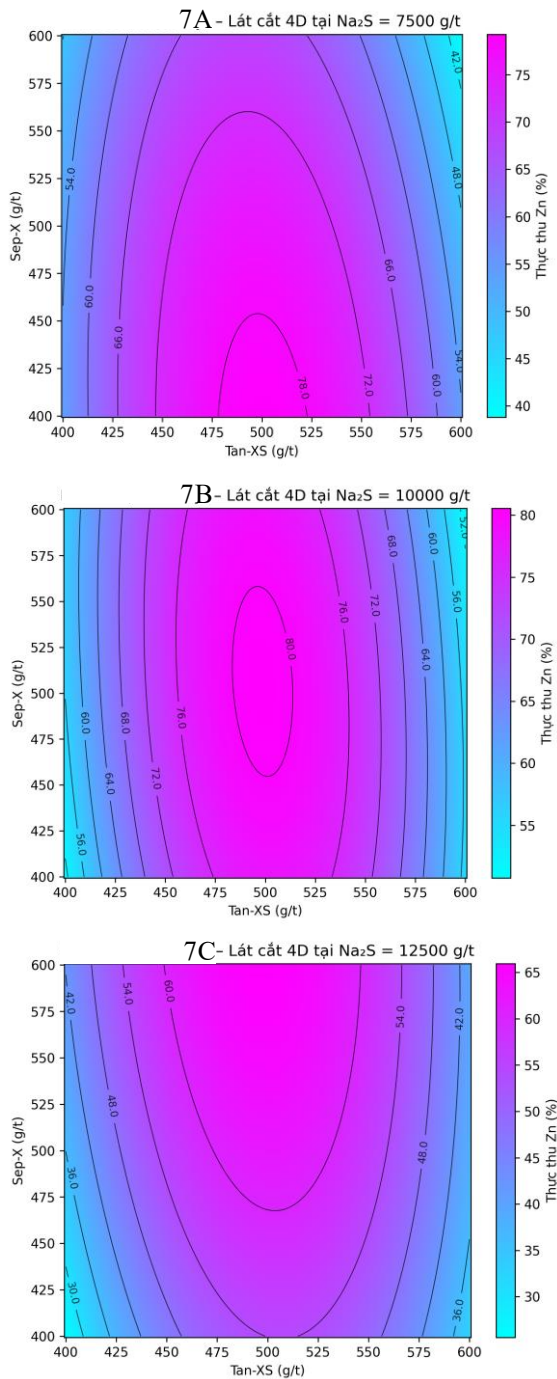
Điều này chứng minh rằng vùng tối ưu rộng nhưng không đối xứng, và mô hình RSM-BBD không chỉ phù hợp về mặt thống kê mà còn phản ánh đúng bản chất hấp phụ-sunfua hóa của hệ tuyển nổi quặng kẽm oxit. Do đó, kết quả nghiên cứu mang lại ý nghĩa thực tế: thay vì xác định một “điểm tối ưu duy nhất”, vùng tối ưu mới là thông số giá trị đối với quy mô pilot hoặc công nghiệp, vì hệ



Hình 6. Biểu đồ lát cắt 4D biểu diễn sự phụ thuộc của hàm lượng kẽm trong quặng tinh vào chi phí Tan-XS, Sep-X và Na<sub>2</sub>S.

tuyển nổi thực tế luôn biến động về pH, độ mịn, hàm lượng sét và hàm lượng ion hòa tan.

Việc kết hợp RSM - BBD với hàm mong muốn tổng hợp cho phép tối ưu hóa song song hai mục tiêu công nghệ quan trọng, đồng thời xác định được vùng vận hành an toàn trong điều kiện biến động quặng.



Hình 7. Biểu đồ lát cắt 4D biểu diễn sự phụ thuộc của thực thu kẽm trong quặng tinh vào chi phí Tan-XS, Sep-X và Na<sub>2</sub>S.

Bộ thông số Tan-XS  $\approx$  500 g/t, Sep-X  $\approx$  500 g/t và Na<sub>2</sub>S  $\approx$  10.000 g/t là cơ sở khả thi để triển khai thử nghiệm pilot cho quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền.

Kết quả thu được trong nghiên cứu này (hàm lượng Zn  $\approx$  30,5%, thực thu  $\approx$  79%) đối với quặng kẽm oxit phong hóa mạnh mỏ Chợ Điền cho thấy

hiệu quả tuyển nổi đạt được cao hơn nghiên cứu của Martins và nnk. (2010), nơi thực thu chỉ đạt 72-75% trong điều kiện tuyển không khử slam bằng thuốc tập hợp dodecylamine. Điều này đặc biệt đáng chú ý vì mẫu nghiên cứu chứa nhiều hạt siêu mịn, giàu khoáng sét và chứa nhiều pha Fe-Al-Si, vốn là những yếu tố gây bất lợi cho quá trình tuyển nổi.

So với nghiên cứu của Li và nnk. (2015), nơi tối ưu hóa quá trình tuyển bằng RSM cho quặng oxit kẽm có độ sạch khoáng vật cao hơn, thực thu chỉ đạt được 78÷80% sau khi khử slam và phân cấp hạt. Do đó, kết quả 79% trong nghiên cứu này được thực hiện hoàn toàn không khử slam, chứng tỏ vai trò quyết định của hệ phối hợp Tan-XS + Sep-X trong kiểm soát phân tán và hạn chế bám dính bùn sét. Tương tự, nghiên cứu của Khaleghi và nnk. (2016) đạt 82÷85% thực thu nhưng với hệ hỗn hợp thuốc tập hợp anion-cation và quặng có hàm lượng Fe-Al thấp hơn nhiều so với mẫu Chợ Điền.

Sự khác biệt này phản ánh rõ ràng ưu thế của hệ thuốc phân tán - đè chìm (Sep-X, Tan-XS) kết hợp sunfua hóa chọn lọc trong việc duy trì bề mặt khoáng vật sunfua hóa dạng ZnS, ngay cả khi bùn tuyển chứa lượng lớn goethit, hematit và khoáng sét ưa nước. Khả năng duy trì độ kỵ nước ổn định ở cấp hạt mịn là yếu tố quan trọng giúp tăng thực thu mà không cần khử slam.

Kết quả phân tích mô hình hồi quy cũng cho thấy Na<sub>2</sub>S là yếu tố chi phối mạnh nhất, khẳng định vai trò trung tâm của quá trình sunfua hóa bề mặt. Tuy nhiên, sự ổn định của quá trình tuyển nổi không chỉ phụ thuộc vào cường độ sunfua hóa, mà còn vào khả năng kiểm soát hấp phụ cạnh tranh thông qua cặp Tan-XS/Sep-X - điều này giải thích vì sao chỉ tăng Na<sub>2</sub>S đơn lẻ (như trong các nghiên cứu quốc tế) không đem lại hiệu quả tương tự trên mẫu nghiên cứu.

Việc đạt 79% thực thu Zn mà không cần khử slam chứng minh rằng công nghệ tuyển nổi quặng phong hóa mạnh vẫn có thể đạt hiệu quả cao, miễn là hệ thuốc tuyển được thiết kế dựa trên đúng bản chất bề mặt khoáng vật, thay vì chỉ tăng chi phí thuốc tập hợp như các nghiên cứu truyền thống.

So với nghiên cứu trong nước gần nhất (Luan và nnk., 2015), nghiên cứu này không chỉ dừng lại ở xác định chế độ hợp lý, mà tiến xa hơn bằng cách tối ưu hóa song song hai tiêu chí (hàm lượng - thực thu) trên cơ sở mô hình hóa RSM-BBD, từ đó xác định không chỉ một điểm tối ưu đơn lẻ mà là một

vùng điều kiện tối ưu có thể áp dụng linh hoạt trong thực tế vận hành.

Như vậy, nghiên cứu này là công trình đầu tiên tại Việt Nam ứng dụng tối ưu hóa RSM-BBD cho quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền không khử slam, chứng minh được tính khả thi công nghệ và tạo cơ sở khoa học để thiết kế thí nghiệm pilot ở quy mô xưởng tuyển.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình hồi quy bậc hai mô tả ảnh hưởng đồng thời của ba yếu tố Tan-XS, Sep-X và  $\text{Na}_2\text{S}$  đến quá trình tuyển nổi quặng kẽm oxit phong hóa mạnh mỏ Chợ Điền. Kết quả phân tích ANOVA cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê cao ( $p < 0,01$ ), hệ số xác định  $R^2 > 0,95$  và sai lệch dự đoán dưới 5%, chứng tỏ mô hình có khả năng mô phỏng đáng tin cậy trong phạm vi khảo sát.

Phân tích bề mặt đáp ứng và tối ưu hóa đa mục tiêu bằng hàm mong muốn tổng hợp xác định được vùng điều kiện tối ưu tập trung quanh Tan-XS  $\approx 510$  g/t, Sep-X  $\approx 495$  g/t và  $\text{Na}_2\text{S} \approx 10.200$  g/t, tại đó đạt hàm lượng Zn  $\approx 30,5\%$  và thực thu  $\approx 79\%$ . Kết quả kiểm chứng thực nghiệm tại điểm gần tối ưu cho thấy sai lệch  $< 5\%$  so với giá trị mô hình dự đoán, khẳng định tính phù hợp của mô hình RSM-BBD khi áp dụng cho quặng tuyển thực tế.

Điểm nổi bật của nghiên cứu là chứng minh được rằng tuyển nổi không khử slam vẫn đạt hiệu quả cao đối với quặng kẽm oxit giàu sét - điều trước đây được coi là bất lợi công nghệ. Quặng tinh trong nghiên cứu này có thực thu đạt 79% và hàm lượng kẽm đạt 31%, cho thấy hệ thuốc điều chỉnh  $\text{Na}_2\text{S} + \text{Tan-XS} + \text{Sep-X}$  đóng vai trò quan trọng trong kiểm soát phân tán bề mặt và hạn chế hấp phụ cạnh tranh của khoáng Fe-Al-Si.

Nghiên cứu không chỉ xác định một giá trị tối ưu đơn lẻ, mà còn khoanh vùng được dải điều kiện công nghệ có thể vận hành ổn định trong thực tế - đây là cơ sở quan trọng để chuyển tiếp sang thí nghiệm pilot, đặc biệt trong bối cảnh các mỏ kẽm oxit có đặc trưng quặng nguyên khai thay đổi theo chiều sâu khai thác.

Kết quả nghiên cứu cho thấy tuyển nổi quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền có thể đạt hiệu quả cao ngay cả khi không khử slam, nếu kiểm soát hợp lý ba thông số chính Tan-XS, Sep-X và  $\text{Na}_2\text{S}$ . Do đó, cần triển khai thí nghiệm quy mô pilot nhằm kiểm chứng độ ổn định của vùng tối ưu trong điều kiện

vận hành liên tục. Đặc biệt, cần theo dõi chặt chẽ độ biến thiên hàm lượng sét theo mỏ khai thác, vì đây là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí Sep-X. Bên cạnh đó, nên mở rộng khảo sát ảnh hưởng động lực bọt và thuốc tạo bọt (MIBC) trên các loại máy tuyển khác nhau, nhất là TankCell và máy cơ giới dạng RCS, để lựa chọn cấu hình thiết bị phù hợp trước khi nhân rộng ở quy mô công nghiệp.

#### Đóng góp của tác giả

Đỗ Thị Như Quỳnh - viết bản thảo bài báo, 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

- Bulatovic, S. M. (2007). Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice (Vol. 1: Flotation of Sulfide Ores). *Elsevier*.
- Bulatovic, S. M. (2010). Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice (Vol. 2: Flotation of Gold, PGM and Oxide Minerals). *Elsevier*.
- Chelgani, S. C., Neisiani, A. A., Wonyen, D., Mohammad Zadeh, A. H., & Saneie, R. (2024). Green Flotation Depressants. *Springer Nature*.
- Deng, R., Yu, H., Yang, B., Liu, C., & Chen, J. (2017). Adsorption of Fe(III) on smithsonite surfaces and implications for flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 533, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.09.004>.
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>.
- Djimtoingar, S. S., Derkyi, N. S. A., Kuranchie, F. A., & Yankyera, J. K. (2022). A review of response surface methodology for biogas process optimization. *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2115283>.
- Ejtemaei, M., Gharabaghi, M., & Irannajad, M. (2014). A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method. *Advances*

- in *Colloid and Interface Science*, 206, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.02.003>.
- Ejtemaei, M., Irannajad, M., & Gharabaghi, M. (2012). Role of dissolved mineral species in selective flotation of smithsonite from quartz using oleate as collector. *International Journal of Mineral Processing*, 114-117, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.09.004>.
- Fuerstenau, M. C., Miller, J. D., & Kuhn, M. C. (1985). Chemistry of Flotation. *Society of Mining Engineers*.
- Hosseini, S. H., & Forssberg, E. (2006a). Physico-chemical studies of smithsonite flotation using mixed anionic/cationic collectors. *Minerals Engineering*, 19(6-8), 958-971. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.12.001>.
- Hosseini, S. H., & Forssberg, E. (2006b). Adsorption studies of smithsonite flotation using dodecylamine and oleic acid. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 23, 87-96. <https://doi.org/10.1007/BF03403341>.
- Khaleghi, B., Noaparast, M., Shafaei, S.Z., và nnk. (2016). Flotation study of oxide zinc ore using cationic-anionic mixed collectors. *Russian Journal of Non-ferrous Metals*, 57, 647-658. <https://doi.org/10.3103/S1067821216070117>.
- Laskowski, J. S. (2001). Coal Flotation and Fine Coal Utilization. *Elsevier*.
- Li, M., Liu, F., Wang, X., & Wang, G. (2015). Optimization of flotation process of zinc oxide ore by response surface methodology. *Proceedings of the Int Conf. on Materials Engineering and Information Technology Applications*. DOI:10.2991/meita-15.2015.189.
- Liao, R., Wen, S., Liu, J., & Feng, Q. (2022). Flotation separation of fine smithsonite from calcite using sodium hexametaphosphate as the depressant in the Na<sub>2</sub>S-Pb(II)-KIAX system. *Separation and Purification Technology*, 295, 121245. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121245>.
- Liu, D., Zhang, X., & Zhang, W. (2021). Research Progress of Application and Interaction Mechanism of Polymers in Mineral Flotation: A Review. *Polymers*, 13(23), 3335. <https://doi.org/10.3390/polym16233335>.
- Luan, V. P., Thanh, H. P., Nhu, Q. T. D., & Ha, V. L. (2025). Research to Determine the Appropriate Flotation Reagents for Zinc Oxide Ore Beneficiation: Case Study at Cho-Dien Mine, Vietnam. *Inżynieria Mineralna*, 1(2), 191-199. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-17>.
- Luo, X., Wang, Y., Wen, S., Ma, M., Sun, C., Yin, W., & Ma, Y. (2020). Tannin: An eco-friendly depressant for the green flotation separation of hematite from quartz. *Journal of Molecular Liquids*, 311, 113349. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106917>.
- Martins, L., Pereira, C.A., và nnk. (2010). Flotation of oxidized zinc ore without deslaming. *Minerals & Metallurgical Processing*, 27(1), 34-41. <https://doi.org/10.1007/BF03402314>.
- Montgomery, D. C. (2019). Design and Analysis of Experiments (10th Edition). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Önal, G., Bulut, G., Gül, A., Kangal, O., Perek, K. T., & Arslan, F. (2005). Flotation of Aladağ oxide lead-zinc ores. *Minerals Engineering*, 18(3), 279-282. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.018>.
- Quast, K. (1999). Flotation of hematite using sodium oleate as a collector. The AusIMM Proceedings Volume 304, No 1.
- Somasundaran, P., & Moudgil, B. M. (Eds.). (1988). Reagents in Mineral Technology. *Marcel Dekker*.
- Song, Z., Wen, S., Han, G., & Feng, Q. (2023). Recent Progress on chelating reagents in flotation of Zinc Oxide Ores: A Review. *Minerals*, 13(10), 1278. <https://doi.org/10.3390/min13101278>.
- Sun, R., & Deng, J. (2025). Flotation of smithsonite: A review. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 61(2), 202816. <https://doi.org/10.37190/ppmp/202816>.
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). Wills' Mineral Processing Technology (8th Edition). Butterworth-Heinemann.