



## Journal of Mining and Earth Sciences

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



# Nickel recovery in tailing from the Chromite beneficiation process in Mau Lam, Thanh Hoa by the reduction roasting-magnetic separation process



Thuat Tien Phung <sup>1,\*</sup>, Toi Trung Tran <sup>1</sup>, Luan Van Pham <sup>1</sup>, Khanh Tuan Nguyen <sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Southern Branch of the Vietnam Institute of Geosciences and Minerals, Hochiminh City, Vietnam

### ARTICLE INFO

*Article history:*  
Received 12<sup>th</sup> Jan. 2024  
Revised 2<sup>nd</sup> May 2024  
Accepted 21<sup>th</sup> May 2024

### Keywords:

Nickel beneficiation,  
Nickel laterite,  
Nickel recovery,  
Reduction - magnetic  
separation.

### ABSTRACT

*In Thanh Hoa province, large chromite ore deposits were discovered. These types of ores also contain significant quantity of nickel metal, with total nickel reserves estimated to be over three million tones. According to the practices of mining and beneficiation of these chromite ores, nickel is discarded in the waste dumps as a non-valuable metal and has not been recovered ever. Through many years of mining and processing of chromite ores, large dumps are formed to such huge volumes that can be considered as a significantly secondary resource of valuable nickel metal. Nickel exists in the form of laterite ores so that it is difficult to be recovered. Currently, there is no commercial technology available for recovery of nickel or other valuable metals from this type of raw material sources. This article presents some research results on applying the reduction calcination – magnetic separation process for recovery of nickel. In particular, some important reduction operating variables such as temperature, calcination time, fuel coal ratio, and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> additive were investigated. From the tailing samples of the Mau Lam – Thanh Hoa chromite beneficiation process, important optimal reducing conditions have been determined including 1,100°C of reduction temperature, 8% of anthracite coal, 8% of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> additive, and the reduction time of 90 minutes. The reduced product was finely grounded and separated at a magnetic field of 0.3T using the wet magnetic separator. At optimal operating variables, the nickel content of the final nickel concentrate was 4.02% Ni and the overall nickel recovery was 91.2%. The positive results necessarily lead to a need to continue researching the possibility of practical application to recover nickel and thus contribute to the rational utilization of mineral resources of the country.*

Copyright © 2024 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

\*Corresponding author

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

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(3).04



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

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

# Thu hồi niken trong đuôi thải tuyển Cromit khu vực Mậu Lâm, Thanh Hóa bằng quá trình nung hoàn nguyên-tuyển từ

Phùng Tiến Thuật<sup>1,\*</sup>, Trần Trung Tới<sup>1</sup>, Phạm Văn Luận<sup>1</sup>, Nguyễn Tuấn Khanh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup> Phân viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản phía Nam, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

### TÓM TẮT

#### Quá trình:

Nhận bài 12/1/2024

Sửa xong 2/5/2024

Chấp nhận đăng 21/5/2024

#### Từ khóa:

Đuôi thải cromit,

Niken laterit,

Nung hoàn nguyên-tuyển từ,

Tuyển niken.

Tại Thanh Hóa, các mỏ quặng cromit được phát hiện là có chứa kim loại niken với trữ lượng lớn, ước tính tổng trữ lượng trên 3 triệu tấn. Theo quy trình công nghệ khai thác và tuyển cromit, thì niken hiện đang nằm trong các bãi thải và chưa được thu hồi. Trải qua nhiều năm, các bãi thải của mỏ quặng cromit đã có quy mô rất lớn và được coi là nguồn quặng thứ sinh chứa Ni. Tuy nhiên loại hình tồn tại dưới dạng quặng laterit khó tuyển là nguyên nhân chưa có công nghệ nào được áp dụng để xử lý thu hồi niken hay một số kim loại khác có giá trị từ nguồn nguyên liệu này. Trong bài báo này sẽ trình bày kết quả nghiên cứu thử nghiệm quy trình nung hoàn nguyên - tuyển từ để tuyển thu hồi tinh quặng niken, trong đó các chế độ hoàn nguyên như thời gian, nhiệt độ, tỷ lệ than và chất trợ dung  $Na_2SO_4$  được khảo sát. Các thí nghiệm ban đầu được thực hiện với mẫu đuôi thải của quá trình tuyển cromit khu vực Mậu Lâm, Thanh Hóa cho thấy, trong điều kiện hoàn nguyên ở nhiệt độ  $1.100^{\circ}C$  với 8% than antraxit, 8%  $Na_2SO_4$  làm chất phụ gia, thời gian hoàn nguyên là 90 phút. Sản phẩm sau hoàn nguyên đem nghiền mịn rồi tuyển từ trên máy tuyển từ ướt ở cường độ từ trường 0,3T, thu được tinh quặng chứa 4,02% Ni với tỉ lệ thu hồi niken 91,2%. Đây là kết quả khả quan để tiếp tục nghiên cứu khả năng ứng dụng thực tế nhằm tận thu niken, sử dụng hợp lý nguồn tài nguyên khoáng sản.

© 2024 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

## 1. Mở đầu

Kim loại niken tồn tại trong tự nhiên ở hai loại hình quặng là quặng sunfua và quặng oxit (hay còn gọi là quặng laterit). Trữ lượng hai loại

quặng này lần lượt chiếm khoảng 30% và 70% tổng trữ lượng niken. Tuy nhiên 60% niken trên thế giới được sản xuất từ quặng sunfua. Loại hình quặng laterit thường chứa niken với hàm lượng thấp, khó áp dụng các phương pháp tuyển hay luyện kim nên mới chỉ được khai thác một phần ít ỏi. Quặng sunfua dễ xử lý hơn bằng phương pháp tuyển nổi nên được khai thác trước và ngày càng cạn kiệt. Do vậy, việc nghiên cứu những phương án xử lý quặng niken laterit được quan tâm bởi

\*Tác giả liên hệ

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

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(3).04

nhiều nhà khoa học trên thế giới (Vahed và nnk., 2021).

Ở nước ta, ngoài các mỏ quặng chính, niken còn được phát hiện tại hai điểm quặng gốc Cromit tại tỉnh Thanh Hóa, tổng trữ lượng khoảng 3.067.020 tấn niken (Hoàng và nnk., 2010; Trần và nnk., 2000, Nguyễn và nnk., 2020). Tuy nhiên, niken tồn tại dưới dạng quặng laterit khó tuyển nên trong quá trình tuyển cromit, niken chưa được quan tâm nghiên cứu thu hồi. Trải qua nhiều năm, các bãi bùn thải có chứa Ni với quy mô rất lớn đã được hình thành tại các khu vực mỏ. Việc tìm ra phương án xử lý tận thu niken từ nguồn nguyên liệu này có ý nghĩa không chỉ về khoa học mà còn có ý nghĩa thực tiễn.

Trên thế giới hiện nay, quy trình nung hoàn nguyên - tuyển từ được đánh giá là có hiệu quả để tuyển niken từ quặng niken laterit. Trong đó, quá trình hoàn nguyên giữ vai trò là khâu tiền xử lý và quyết định đến chất lượng sản phẩm tinh quặng thu được sau tuyển từ (Gao và nnk., 2019; Li và nnk., 2011; Elliott, 2015). Do đó, các nghiên cứu về chế độ hoàn nguyên ảnh hưởng tới hiệu quả tuyển từ thu hồi niken từ bãi thải của quá trình tuyển cromit khu vực Mậu Lâm, Thanh Hóa sẽ được trình bày trong bài báo này.

## 2. Mẫu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Mẫu nghiên cứu

Các nghiên cứu được thực hiện với mẫu đuôi thải của mỏ quặng cromit khu vực Mậu Lâm, Thanh Hóa, hàm lượng niken trong mẫu là 1,179% Ni (Bảng 1).

Bảng 1. Thành phần hóa học mẫu nghiên cứu.

TT	Thành phần	Hàm lượng (%)
1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,17
2	Ni	<b>1,179</b>
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,19
4	CaO	1,26
5	Co	0,259
6	Cr	2,06
7	MgO	11,02
8	MnO	6,81
9	Khác	43,05

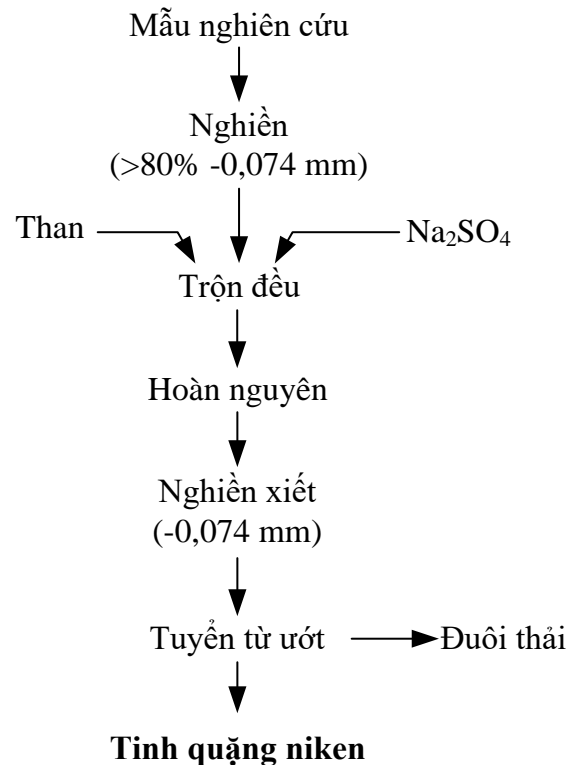
Bảng 2. Thành phần than sử dụng.

TT	Thành phần	Hàm lượng (%)
1	Độ tro (A <sup>k</sup> )	12
2	Chất bốc	6,1
3	Lưu huỳnh	<0,5
4	Độ ẩm	8

Chất hoàn nguyên sử dụng là than antraxit có thành phần chính được thể hiện trong Bảng 2. Than được nghiền xuống kích thước dưới 0,2 mm và được lấy theo khối lượng đã tính toán cho thí nghiệm khảo sát.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Mẫu nghiên cứu được nghiền khô xuống kích thước hạt trên 80% cấp hạt -0,074 mm bằng thiết bị nghiền bi thép, sau đó trộn đều giản lược chia làm nhiều mẫu nhỏ có khối lượng 50 gam cho một lần thí nghiệm. Mẫu được trộn đều với than, chất trợ dung theo tỷ lệ khảo sát, sau đó đặt trong cốc graphit có nắp đậy. Đưa cốc chứa mẫu vào trong buồng lò và tiến hành nung hoàn nguyên theo thời gian khảo sát. Sơ đồ thí nghiệm trên Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ thí nghiệm.

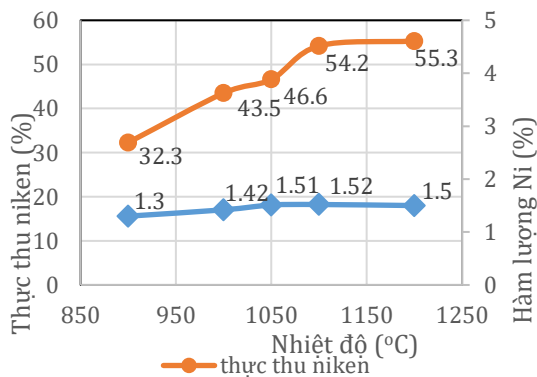
Mẫu sau hoàn nguyên được làm nguội tự nhiên trong điều kiện kín (tránh tiếp xúc với oxy) rồi đem nghiền xiết xuống kích thước hạt  $-0,074$  mm trước khi phân tích từ ướt ở cường độ từ trường  $0,3T$ . Sản phẩm có từ (tinh quặng) được sấy khô rồi cân khối lượng và đưa phân tích hàm lượng Ni để đánh giá hiệu quả của quá trình. Các thông số công nghệ khảo sát bao gồm: Nhiệt độ nung, thời gian nung, chi phí than cho hoàn nguyên, chi phí chất phụ gia  $Na_2SO_4$ . Các thiết bị nghiền bi, nghiền xiết, lò nung, máy tuyển từ ướt và các thiết bị khác đặt tại phòng thí nghiệm Tuyển khoáng, trường Đại học Mỏ - Địa chất.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Kết quả khảo sát nhiệt độ hoàn nguyên

Nhiệt độ ảnh hưởng đến khả năng phân ly của oxit kim loại, cũng ảnh hưởng tới cân bằng của phản ứng khí hóa than tạo ra CO để hoàn nguyên oxit kim loại. Nhiệt độ cao dẫn đến tỷ lệ CO cao, do đó khả năng hoàn nguyên oxit kim loại cao. Tuy nhiên nhiệt độ càng cao thì chi phí năng lượng càng lớn. Trong các thí nghiệm này, nhiệt độ khảo sát ở các mức  $900^{\circ}C$ ,  $950^{\circ}C$ ,  $1.000^{\circ}C$ ,  $1.050^{\circ}C$ ,  $1.100^{\circ}C$  và  $1.200^{\circ}C$ . Tỷ lệ than sử dụng là 10%, thời gian nung hoàn nguyên là 60 phút. Kết quả xác định hàm lượng và thực thu niken trong sản phẩm tinh quặng ở các thí nghiệm điều kiện thể hiện trên đồ thị Hình 2.

Từ đồ thị cho thấy nhiệt độ tăng làm tăng tỷ lệ thu hồi niken trong tinh quặng. Mức độ tăng mạnh trong khoảng từ  $900^{\circ}C$  đến  $1.100^{\circ}C$  và tăng chậm khi tiếp tục tăng nhiệt độ lên  $1.200^{\circ}C$ . Không



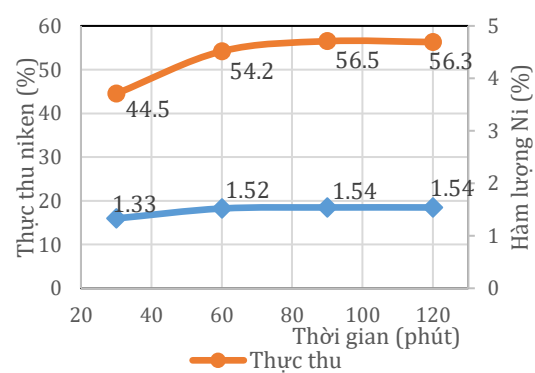
Hình 2. Ảnh hưởng nhiệt độ nung tới hàm lượng và tỷ lệ thu hồi niken trong tinh quặng.

giống với tỷ lệ thu hồi, hàm lượng niken trong tinh quặng tăng từ 1,3%Ni lên 1,51%Ni khi nhiệt độ hoàn nguyên tăng từ  $900^{\circ}C$  đến  $1.050^{\circ}C$ , nhưng gần như không đổi khi nhiệt độ hoàn nguyên tiếp tục tăng. Để đảm bảo cả về thực thu và chất lượng tinh quặng, nhiệt độ  $1.100^{\circ}C$  được xem là tối ưu. Trong điều kiện này, hàm lượng niken trong sản phẩm thu là 1,52%, với tỷ lệ thu hồi niken đạt 54,2%.

#### 3.2. Khảo sát thời gian hoàn nguyên

Trong các thí nghiệm khảo sát thời gian hoàn nguyên, nhiệt độ hoàn nguyên lựa chọn là  $1100^{\circ}C$  (nhiệt độ được chọn theo kết quả khảo sát ở mục 3.1); Chi phí than sử dụng là 10%. Thời gian hoàn nguyên khảo sát ở các mức 30, 60, 90 và 120 phút. Thời gian hoàn nguyên là yếu tố đảm bảo cho quá trình hoàn nguyên được thực hiện tối đa. Tùy theo tốc độ quá trình hoàn nguyên mà thời gian cần thiết là dài hay ngắn. Thời gian càng dài thì lượng kim loại được hoàn nguyên càng lớn, tuy nhiên khi mức độ hoàn nguyên đạt tối đa thì quá trình sẽ dừng lại.

Kết quả đánh giá hàm lượng và thực thu niken trong tinh quặng (Hình 3) phù hợp với quy luật ảnh hưởng của thời gian. Khi tăng thời gian hoàn nguyên từ 30 phút lên 90 phút, hàm lượng và thực thu niken trong tinh quặng thu được đều tăng. Tiếp tục tăng thời gian hoàn nguyên, hàm lượng và thực thu niken gần như không đổi. Do đó thời gian 90 phút được xem là tối ưu cho quá trình hoàn nguyên. Với thời gian 90 phút hoàn nguyên, tinh quặng sau tuyển từ thu được chứa 1,54%Ni, tỷ lệ thu hồi niken đạt 56,5%.

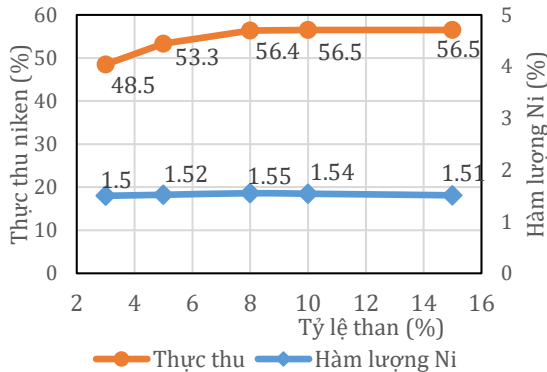


Hình 3. Kết quả khảo sát thời gian nung ảnh hưởng tới hàm lượng và tỷ lệ thu hồi niken.

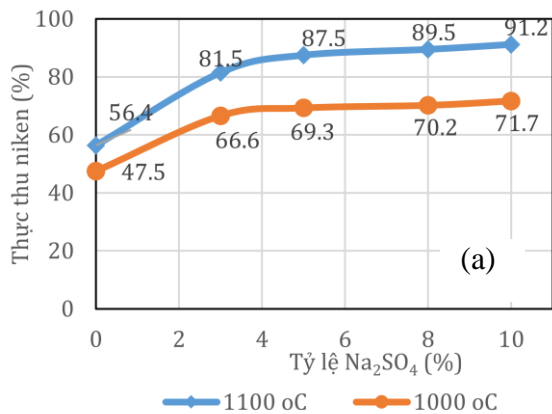
### 3.3. Ảnh hưởng của chi phí chất hoàn nguyên

Chất hoàn nguyên sử dụng trong nghiên cứu là than antraxit tại Quảng Ninh, có thành phần như trong Bảng 2. Than cung cấp cacbon để khử oxit niken về dạng kim loại có từ tính mạnh, các khoáng chứa sắt goetit và hematit có từ tính thấp sang pha sắt kim loại (có thể cả manhetit) có từ tính. Do đó lượng than cần phải đủ để khử tối đa oxit niken nhưng cũng không thể quá lớn dẫn tới lượng lớn oxit sắt và oxit mangan cũng được khử và đi vào sản phẩm tinh quặng tuyển từ.

Các thí nghiệm khảo sát với tỷ lệ than là 3%; 5%; 8%; 10% và 15%, trong điều kiện nhiệt độ hoàn nguyên là 1.100<sup>o</sup>C, thời gian hoàn nguyên là 90 phút. Kết quả khảo sát (Hình 4) cho thấy, khi tăng tỷ lệ than tăng từ 3% đến 8%, hàm lượng niken trong tinh quặng tăng nhẹ nhưng thực thu tăng mạnh từ 48,5% lên 56,4% và dường như với tỷ lệ than là 8% đã đủ cho quá trình hoàn nguyên



Hình 4. Ảnh hưởng của chi phí than tới hàm lượng và thực thu niken trong tinh quặng.



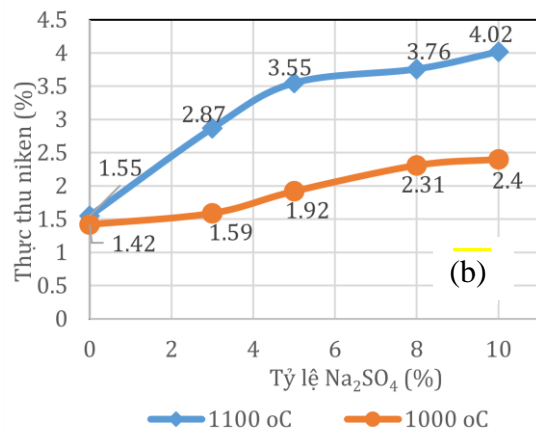
trong điều kiện khảo sát. Tiếp tục tăng tỷ lệ than, hàm lượng và thực thu gần như không đổi. Do đó, tỷ lệ than 8% được chọn cho các thí nghiệm điều kiện tiếp theo.

### 3.4. Hoàn nguyên trong điều kiện có chất phụ gia

Chất phụ gia cho vào với mục đích cường hóa quá trình hoàn nguyên, hạ nhiệt độ nóng chảy của hệ xỉ, tăng tính lưu động của các chất khi hoàn nguyên, tạo điều kiện cho niken kim loại được tập trung vào pha sắt kim loại, hình thành pha feroniken có từ tính, do đó tăng hiệu quả tuyển từ thu hồi niken (Dong và nnk., 2018).

Chất phụ gia có rất nhiều loại khác nhau, nhưng điển hình là hai nhóm: nhóm chứa clorua và nhóm chứa lưu huỳnh (Dong và nnk., 2018). Trong nghiên cứu này sử dụng muối Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, đây là hợp chất đang được các nhà khoa học đánh giá cao do vừa có tác dụng hạ nhiệt nóng chảy của xỉ, vừa cung cấp lưu huỳnh nhằm cản trở sự hoàn nguyên của sắt (Jiang và nnk., 2013; Xueming Lv và nnk., 2018). Quá trình nghiên cứu ảnh hưởng của chất phụ gia được tiến hành ở 1.000<sup>o</sup>C và 1.100<sup>o</sup>C. Với thời gian nung là 90 phút, tỷ lệ than là 8%. Chi phí Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> khảo sát ở các mức 0, 3, 5, 8 và 10%. Các kết quả thể hiện trên đồ thị Hình 5a và Hình 5b.

Trong khi niken được hoàn nguyên đáng kể thì việc bổ sung Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> lại ngăn chặn quá trình khử oxit sắt do tạo ra nhiều FeS. FeS không có từ nên khi tuyển từ sẽ đi vào sản phẩm không từ, dẫn đến hàm lượng niken trong sản phẩm có từ (tinh quặng) tăng (Jiang và nnk., 2013; Xueming và nnk.,



Hình 5. Ảnh hưởng của Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tới: (a) - Thực thu niken và (b) - Hàm lượng niken trong tinh quặng.

2018). Kết quả thí nghiệm trên Hình 5 cũng phù hợp với lý giải này. Cả hàm lượng và thực thu niken trong tinh quặng đều tăng khi tăng tỷ lệ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Ngoài ra, tính linh động của các chất khi hoàn nguyên còn phụ thuộc vào nhiệt độ chảy lỏng và độ nhớt của xỉ. Nhiệt độ cao, độ chảy của xỉ cao (độ nhớt của xỉ thấp) dẫn tới tăng khả năng khuếch tán và tích tụ của niken kim loại (Elliott, 2015). Điều này giải thích lý do các mẫu hoàn nguyên ở nhiệt độ 1.1000C có hàm lượng và thực thu niken cao hơn các mẫu hoàn nguyên ở nhiệt độ 1.0000C. Tuy nhiên ở nhiệt độ cao, xỉ chảy lỏng nhiều, sản phẩm sau hoàn nguyên có cấu trúc đặc xít sẽ dẫn tới sự khó khăn cho khâu đập nghiền phía sau. Điều này cần phải được xem xét với khả năng và tính hiệu quả của các thiết bị nghiền.

Xem xét kỹ hơn về tác dụng của  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  trong việc ngăn chặn sự khử oxit sắt, mẫu sau hoàn nguyên ở 1.100<sup>0</sup>C, được đem phân tích SEM-EDS tại Trung tâm phân tích thí nghiệm công nghệ cao, Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Hình 6 là kết quả phân tích cho thấy trong mẫu sau hoàn nguyên xuất hiện pha có thành phần chủ yếu là Fe và S, thành phần quy đổi về oxit thể hiện trong Bảng 3. Điều này chứng tỏ lưu huỳnh trong  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  đã tham gia vào việc hình thành sunfua sắt. Sự hình thành sunfua sắt là có tác dụng tích cực trong việc

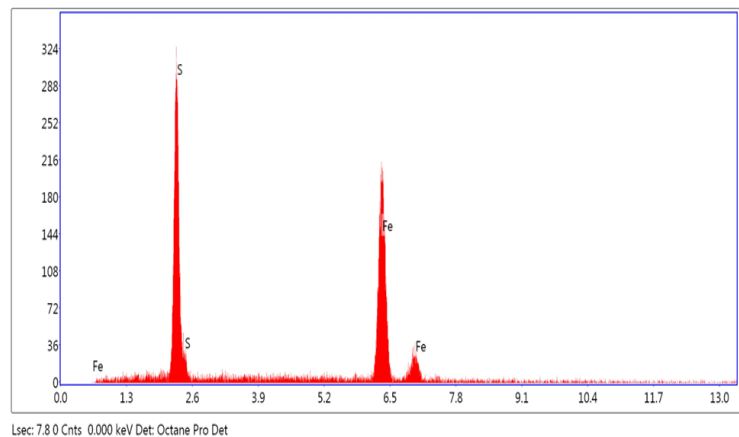
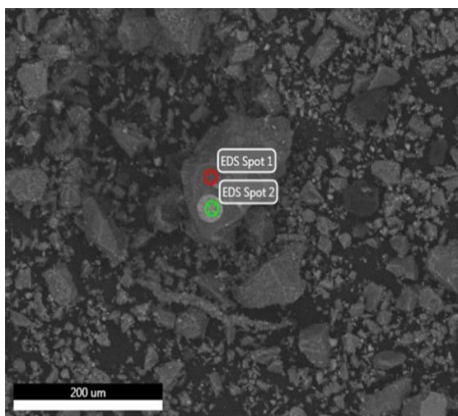
hạn chế sắt đi vào sản phẩm tinh quặng như các tài liệu đã nói.

#### 4. Kết luận

Kết quả thử nghiệm quy trình nung hoàn nguyên - tuyển từ trên đối tượng là đuôi thải tuyển cromit khu vực Mậu Lâm, Thanh Hóa cho thấy: nếu chỉ sử dụng than làm chất hoàn nguyên và không sử dụng thêm chất phụ gia thì mức độ làm giàu niken trong tinh quặng chưa cao, thực thu niken trong tinh quặng cũng ở mức thấp. Trong điều kiện hoàn nguyên ở 1.1000C, tỷ lệ than là 8%, thời gian hoàn nguyên 90 phút, tinh quặng thu được có hàm lượng niken là 1,55% với tỷ lệ thu hồi niken chỉ đạt 56,4%.

Việc sử dụng chất phụ gia  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  đã cải thiện rõ rệt quá trình hoàn nguyên. Khi có mặt phụ gia  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , đã phát hiện pha FeS không có từ tính hình thành trong sản phẩm sau hoàn nguyên và điều này hạn chế Fe đi vào sản phẩm tinh quặng, từ đó chất lượng của tinh quặng được cải thiện.

Kết quả thí nghiệm với cùng điều kiện hoàn nguyên ở 1.100<sup>0</sup>C, tỷ lệ than là 8%, thời gian 90 phút, việc bổ sung 8÷10% chất phụ gia  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , thu được tinh quặng tuyển từ có hàm lượng niken đạt khoảng 4% và thực thu đạt khoảng 90%. Kết quả này là khả quan để phương pháp này tiếp tục được nghiên cứu đánh giá khả năng ứng dụng để xử lý



Hình 6. Kết quả phân tích SEM-EDS mẫu sau hoàn nguyên ở 1.100<sup>0</sup>C.

Bảng 3. Thành phần pha Fe-S được phát hiện.

Thành phần	% Khối lượng	% Nguyên tử
$\text{SO}_3$	38,98	56,03
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	61,02	43,97

đuôi thải tuyển cromit, tận thu niken, góp phần tiết kiệm và bảo vệ tài nguyên khoáng sản.

### Đóng góp của tác giả

Phùng Tiến Thuật - tham gia thực hiện thí nghiệm, phân tích dữ liệu, viết bản thảo bài báo; Trần Trung Tới - thực hiện các thí nghiệm, kiểm chứng, chỉnh sửa nội dung; Phạm Văn Luận - cung cấp tài liệu, đánh giá và chỉnh sửa; Nguyễn Tuấn Khanh - điều tra, khảo sát, cung cấp số liệu thí nghiệm.

### Tài liệu tham khảo

- Dong, J., Wei, Y., Zhou, S., Li, B., Yang, Y., McLean, A. (2018). The Effect of Additives on Extraction of Ni, Fe and Co from Nickel Laterite Ores. *JOM volume 70*, pages 2365–2377.
- Elliott, R. (2015). *A Study on the Role of Sulphur in the Thermal Upgrading of Nickeliferous Laterite Ores*. Ph.D. thesis, Queen's University.
- Gao, L., Liu, Z., Pan, Y., Ge, Y., Feng, C., Chu M., Tang J. (2019). Separation and Recovery of Iron and Nickel from Low-Grade Laterite Nickel Ore Using Reduction Roasting at Rotary Kiln Followed by Magnetic Separation Technique. *Mining, Metallurgy & Exploration volume 36*, pages 375–384.
- Hoàng, V. K. và nnk. (2010). *Kết quả nghiên cứu hoàn thiện quy trình công nghệ tuyển và sử dụng hợp lý quặng cromit Cổ Định, Thanh Hóa*. Viện khoa học và Công nghệ Mỏ - Luyện kim, Mã số 2038.

Li, Y., Li, S., Han, Y. (2011). Deep reduction/magnetic separation of laterite for concentration of Ni and Fe. *J Northeast Univ (Natural Science) 32*:740–744.

Jiang, M., Sun, T., Liu, Z., Kou, Z., Liu, N., Zhang, S. (2013). Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process. *International Journal of Mineral Processing Volume 123*, Pages 32-38.

Nguyễn, K. G., Lê, T. D., Tô, X. B., Trần, V. Đ., Phạm, T. Đ., Đinh, Đ. A. (2020). Đặc điểm phân bố và tiềm năng của cobalt và niken tại khu vực núi nưa – Thanh Hóa. *Hội nghị toàn quốc khoa học trái đất và tài nguyên với phát triển bền vững ERSĐ 2020*. Trang 47-52.

Trần, V. T., Phan, C. T., Lâm, T. Q. (2000). *Tài nguyên Khoáng sản Việt Nam*. Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam-Viện nghiên cứu Địa chất và Khoáng sản. Hà Nội, 215 trang.

Vahed, A., Mackey, P.J. and Warner, A. E. M. (2021). “Around the Nickel World in Eighty Days”. A Virtual Tour of World Nickel Sulphide and Laterite Operations and Technologies. *The 5th International Symposium on Nickel and Cobalt*. Pages 3-39.

Xueming, L., Wei, L., Liu, M., You, Z., Xuwei, L., Bai, C. (2018). Effect of Sodium Sulfate on Preparation of Ferronickel from Nickel Laterite by Carbothermal Reduction. *ISIJ International 58 (5)*: 799-807.