

Nghiên cứu xây dựng mô hình thống kê để tối ưu quá trình agglomerat hóa ứng dụng trong hòa tách đồng quặng urani

Trần Thế Định^{1*}, Thân Văn Liên¹, Phạm Văn Thiêm²

¹Viện Công nghệ xạ hiểm, Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài 4/6/2018; ngày chuyển phản biện 6/6/2018; ngày nhận phản biện 9/7/2018; ngày chấp nhận đăng 16/7/2018

Tóm tắt:

Hòa tách đồng đã được ứng dụng phổ biến để xử lý các loại quặng hàm lượng thấp do chi phí đầu tư và vận hành thấp. Quá trình agglomerat hóa thông thường được áp dụng như một giai đoạn trung gian giữa giai đoạn đập quặng và giai đoạn tạo đồng quặng trước khi tiến hành hòa tách. Các hạt mịn được gắn với các hạt thô hơn hoặc tự liên kết với nhau thành các hạt có kích thước lớn hơn trong quá trình agglomerat hóa. Nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu là xây dựng được mô hình thống kê quá trình agglomerat hóa ứng dụng trong hòa tách đồng quặng urani bán phong hóa vùng Pà Lừa - Pà Ròng nhằm tối ưu hóa giai đoạn agglomerat. Từ kết quả nghiên cứu, các tác giả đã lựa chọn được các thông số thích hợp có ảnh hưởng đến quá trình agglomerat hóa đối với quặng bán phong hóa: chi phí 20 kg H₂SO₄/tấn quặng, nồng độ H₂SO₄ 250 g/l, độ ẩm khối quặng 8%.

Từ khóa: hòa tách đồng, mô hình thống kê, quá trình agglomerat.

Chỉ số phân loại: 2.4

Đặt vấn đề

Thời gian đầu khi đưa phương pháp hòa tách đồng vào vận hành thương mại, tính thấm của dung dịch hòa tách qua đồng quặng đã trở thành vấn đề chính khi quặng chứa một lượng đáng kể các hạt có kích thước nhỏ. Các hạt có kích thước nhỏ có thể chuyển động xuống phía dưới cùng với dung dịch hòa tách hoặc có thể bít kín các lỗ trong quá trình hòa tách đồng, từ đó dẫn tới tính thấm không tốt và làm cho hiệu suất hòa tách đồng không cao. Quá trình agglomerat được áp dụng như là một quá trình trung gian giữa công đoạn nghiền và công đoạn xếp đồng, để xử lý hiện tượng thấm nêu trên. Trong quá trình agglomerat, các hạt nhỏ được tập hợp lại với nhau hoặc các hạt nhỏ bám vào các hạt lớn hơn qua một quá trình xử lý để tạo ra các hạt có kích thước lớn hơn, đồng đều hơn, chịu được lực nén ép nhưng có độ thấm tốt [1-4].

Theo nghiên cứu của Adirek Janwong [4] thì agglomerat hóa là một trong những giải pháp có hiệu quả để nâng cao tính thấm của khối quặng, tăng cường phản ứng hòa tách xảy ra trong phương pháp hòa tách đồng để xử lý các loại quặng nghèo chứa đồng, vàng hay urani...

Đối tượng nghiên cứu cho quá trình agglomerat chủ yếu là các loại quặng có cấu trúc tơi xốp dễ gây tắc, quá trình gia

công sinh hạt mịn... Quá trình này cũng tạo ra nhiều khoảng trống hơn trong hạt quặng sau khi được agglomerat hóa, cho phép tác nhân hòa tách di chuyển dễ dàng tới từng nơi trong hạt quặng, trong đồng quặng [5].

Trong hòa tách đồng quặng urani, quá trình agglomerat hóa gồm các bước sau: quặng urani đầu tiên được gia công tới cỡ hạt thích hợp, sau đó agglomerat hóa (phần hạt mịn hoặc toàn bộ) trong thiết bị trống quay bằng cách bổ sung nước, tác nhân hòa tách, nếu cần thiết thì thêm chất kết dính. Quặng sau khi agglomerat hóa xong, được tạo đồng và tiến hành theo phương pháp hòa tách đồng [6, 7].

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố chi phí axit H₂SO₄, nồng độ axit H₂SO₄ và độ ẩm của khối quặng đến giai đoạn agglomerat đối với quặng bán phong hóa (BPH) và tính toán phương trình hồi quy mô tả hiệu suất thu hồi urani trong quá trình hòa tách đồng phụ thuộc vào các yếu tố trên.

Nội dung nghiên cứu

Đối tượng

Quặng urani dạng BPH vùng Pà Lừa - Pà Ròng (Quảng Nam) có hàm lượng urani là 0,0905% U. Quặng được lấy, gia công sơ bộ theo đúng quy trình hướng dẫn của IAEA

*Tác giả liên hệ: tranthedinhh0802@gmail.com

Study on statistical model building to optimise the agglomeration for applications in heap leaching of uranium ore

The Dinh Tran^{1*}, Van Lien Than¹, Van Thiem Pham²

¹Institute for Technology of Radioactive and Rare Elements,
Vietnam Atomic Energy Institute

²Hanoi University of Science and Technology

Received 4 June 2018; accepted 16 July 2018

Abstract:

Heap leaching has been commonly used to treat low ores due to its low capital and operating costs. The agglomeration process is generally used as the intermediate process between crushing and stacking. Fine particles are attached to the coarser particles or bonded together to form bigger particles during the agglomeration. This research was conducted to build a statistical model of the agglomeration for applications in heap leaching of semi-weathered uranium ores in Pa Lua - Pa Rong area, aiming at optimising the agglomeration stage. Based on the results obtained, we have selected the suitable parameters which affect the agglomeration process of semi-weathered ores as follows: consumption of 20 kg H₂SO₄ per a tonne of uranium ore, concentration of 250 g H₂SO₄ per litre, ore moisture of 8%.

Keywords: agglomeration process, heap leaching, statistical model.

Classification number: 2.4

đến kích thước thích hợp cho quá trình xử lý bằng phương pháp hòa tách đồng (xem bảng 1).

Bảng 1. Tỷ lệ các cấp hạt quặng nguyên liệu sau khi gia công.

TT	Cấp hạt (mm)	Tỷ lệ khối lượng (%)	TT	Cấp hạt (mm)	Tỷ lệ khối lượng (%)
1	+10	47,3	4	+1,18 - 2,36	8,2
2	+5 - 10	12,8	5	+0,6 - 1,18	8,0
3	+2,36 - 5	5,7	6	-0,6	18,0
Cộng		100			

Thiết bị, dụng cụ

Hệ thiết bị agglomerat hóa, máy đập hàm Hòa Phát (Việt Nam), máy nghiền, máy trộn mẫu (Mỹ). Các thùng chứa,

ống dẫn, bơm Cole-Parmer (Mỹ) Model No. 7553-75, máy đo pH 540 GLP (WTW) của Đức, máy đo thể oxy hóa khử...

Quá trình hòa tách đồng quặng và kiểm chứng thực nghiệm các thông số công nghệ được thực hiện trên hệ các thiết bị dạng cột nhựa PVC: D_{cột}=0,105 m, H=1,0 m; D_{cột}=0,2 m, H=2,0 m.

Phương pháp

- **Khảo sát quá trình agglomerat:** số lượng mỗi mẻ thí nghiệm là 10 kg quặng đã được gia công tới cỡ hạt ≤1 cm (95%) và 92 g MnO₂ 85% (4 kg/tấn). Quặng và chất oxy hóa MnO₂ được trộn đều và cho vào thùng quay. Các thông số khảo sát là chi phí axit, nồng độ axit và độ ẩm của khối quặng. Khi khảo sát một yếu tố thì các yếu tố còn lại của quá trình agglomerat được cố định.

- **Thực nghiệm:** xử lý quặng urani đã agglomerat bằng phương pháp hòa tách đồng với các thông số tổng chi phí axit là 40 kg H₂SO₄/tấn quặng, trong đó chi phí axit cho giai đoạn agglomerat chiếm khoảng 1/2 tổng chi phí axit; độ ẩm của khối quặng sau khi agglomerat là 8%, hòa tách đồng được tiến hành với nồng độ axit 50 g/l, chi phí MnO₂ 4 kg/tấn quặng, tốc độ tưới 30 l/m²/h và khối lượng quặng cho một mẻ hòa tách là 10 kg.

Hàm lượng urani trong quặng, trong dung dịch và trong bã quặng sau hòa tách được phân tích bằng phương pháp ICP-MS Agilent USA 7500a tại Phòng thí nghiệm VILAS 524 thuộc Trung tâm Phân tích, Viện Công nghệ xạ hiếm.

Hiệu suất thu hồi urani được xác định theo công thức:

$$H = (m_1/m_0) \times 100\%.$$

Trong đó: m₀ là khối lượng urani có trong quặng đem hòa tách, m₁ là khối lượng urani thu được trong dung dịch hòa tách.

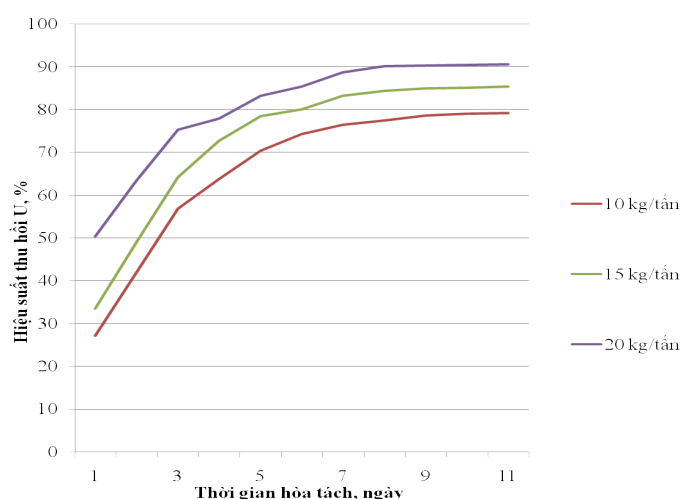
Kết quả và thảo luận

Kết quả nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình agglomerat hóa quặng urani vùng Pà Lừa - Pà Rông bằng phương pháp hòa tách đồng

Ảnh hưởng của chi phí axit dùng cho quá trình agglomerat hóa đến hiệu suất thu hồi urani bằng phương pháp hòa tách đồng:

Thí nghiệm được tiến hành như sau: cân 10 kg quặng đã được gia công + 46 g MnO₂ 85% (4 kg/tấn), sau đó trộn đều. Tiến hành khảo sát với lượng axit thay đổi: 10, 15, 20 kg H₂SO₄/tấn quặng; nồng độ axit 250 g/l; độ ẩm là 8%.

Sau khi agglomerat hóa xong toàn bộ, tiến hành hòa tách đồng trên cột. Kết quả cho thấy với chi phí axit là 20 kg/tấn quặng (chỉ dùng cho giai đoạn agglomerat hóa) cho hiệu suất thu hồi urani cao 90,58%. Kết quả cụ thể được minh họa ở hình 1.

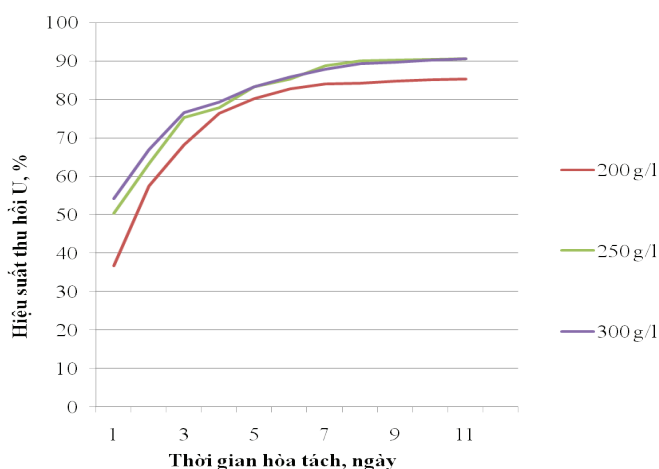


Hình 1. Sự phụ thuộc hiệu suất thu hồi vào chỉ phí axit với quặng BPH.

Ảnh hưởng của nồng độ axit dùng cho quá trình agglomerat hóa đến hiệu suất thu hồi urani bằng phương pháp hòa tách đồng:

Thí nghiệm được tiến hành như sau: cân 10 kg quặng đã được gia công + 46 g MnO_2 85% (4 kg/tấn). Tiến hành khảo sát với nồng độ axit thay đổi: 200, 250, 300 g/l; chỉ phí axit 20 kg/tấn quặng (cho giai đoạn agglomerat hóa); độ ẩm là 8%.

Sau khi agglomerat hóa xong, tiến hành hòa tách đồng trên cột. Kết quả cho thấy với nồng độ axit là 250 g/l cho hiệu suất thu hồi urani cao nhất (đạt 90,58%). Kết quả cụ thể được minh họa trên hình 2.



Hình 2. Sự phụ thuộc hiệu suất thu hồi vào nồng độ axit với quặng BPH.

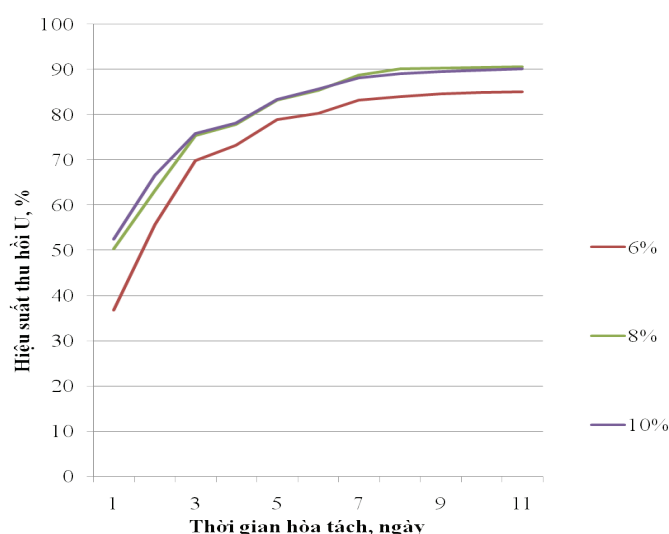
Ảnh hưởng của độ ẩm quặng dùng cho quá trình agglomerat hóa đến hiệu suất thu hồi urani bằng phương pháp hòa tách đồng:

Mục tiêu của việc xác định độ ẩm thích hợp khi tiến hành trộn khối quặng với tác nhân kết dính là axit sunfuric

làm cho có kích cỡ đồng đều hơn, không có hiện tượng bị nhão, khối quặng trở nên xốp nhằm giảm thiểu sự nén ép quặng trong quá trình hòa tách đồng, làm tăng khả năng liên kết giữa các hạt mịn với nhau hoặc giữa các hạt mịn và hạt thô, tăng hiệu quả quá trình hòa tách quặng.

Thí nghiệm được tiến hành như sau: cân 10 kg quặng đã được gia công + 46 g MnO_2 85% (4 kg/tấn). Tiến hành khảo sát với độ ẩm thay đổi: 6, 8, 10%; chỉ phí axit 20 kg/tấn quặng (cho giai đoạn agglomerat hóa); nồng độ axit 250 g/l.

Sau khi agglomerat hóa xong toàn bộ, đem hòa tách đồng trên cột. Kết quả ở hình 3 cho thấy, với độ ẩm của khối quặng là 8% cho hiệu suất thu hồi urani đạt 90,58%.



Hình 3. Sự phụ thuộc hiệu suất thu hồi vào độ ẩm với quặng BPH.

Ưu, nhược điểm của quá trình hòa tách quặng khi không agglomerat hóa và có agglomerat hóa về chế độ công nghệ, chất lượng dung dịch hòa tách:

Chúng tôi đã tiến hành thí nghiệm hoà tách quặng urani theo hai phương án: không agglomerat hóa quặng và có agglomerat hóa quặng bằng phương pháp hòa tách đồng. Quy mô mỗi cột là 10 kg/cột quặng urani (cột nhựa PVC có đường kính 0,105 m và chiều cao 1,0 m). Cả 2 phương án trên đều được tiến hành về cơ bản như nhau, chỉ có khác nhau ở chỗ: đối với quặng đã agglomerat hóa (sau khi trộn với MnO_2) được tưới đều với axit H_2SO_4 đặc, sau đó nạp vào cột và tưới gián đoạn thêm một lượng dung dịch axit nhất định, cuối cùng là rửa quặng bằng dung dịch axit loãng và thu dung dịch chứa urani; còn đối với quặng không agglomerat (sau khi trộn với MnO_2) được nạp vào cột và tưới gián đoạn dung dịch axit H_2SO_4 loãng qua cột quặng. Kết quả so sánh các thông số của quá trình được trình bày ở bảng 2.

Bảng 2. So sánh các thông số của quá trình hoà tách quặng khi không agglomerat hóa và có agglomerat hóa bằng phương pháp hòa tách đồng.

Các thông số	Không agglomerat	Có agglomerat
Kích thước quặng ban đầu, mm	≤10 (95%)	≤10 (95%)
Tiêu hao axit H ₂ SO ₄ , kg/tấn quặng	45-50	40,0
Tiêu hao chất ô xy hoá MnO ₂ , kg/tấn quặng	4	4
Thời gian hoà tách, ngày	14	11
Nồng độ urani trong dung dịch hòa tách, g/l	0,7-1,1	0,8-1,4
Nồng độ Fe trong dung dịch hòa tách, g/l	8-11	8-10
Hiệu suất thu hồi urani, %	85,2	90,58

Qua kết quả thí nghiệm cho thấy, các thông số của quá trình hoà tách quặng urani đã agglomerat so với quặng urani không agglomerat hóa bằng phương pháp hòa tách đồng có ưu điểm là thời gian, hiệu suất tăng hơn, tiêu hao axit thấp hơn, không bị tắc dòng, hạn chế bụi khi không tiến hành nạp quặng khô trực tiếp vào cột và bể; trong khi đó chất lượng dung dịch sau khi hòa tách không thay đổi nhiều so với quặng không được agglomerat. Tuy nhiên, quá trình này cũng làm tăng chi phí khi vận hành hệ thiết bị agglomerat, tốn thời gian chuẩn bị trước khi tiến hành hòa tách quặng.

Xây dựng mô hình thống kê quá trình agglomerat hóa quặng urani vùng Pà Lừa - Pà Rông

Bài toán: nghiên cứu hiệu suất thu hồi urani trong quá trình hòa tách đồng quặng urani BPH phụ thuộc vào các yếu tố: Z_1 - nồng độ axit, g/l; Z_2 - chi phí axit, kg/tấn quặng; Z_3 - độ ẩm, % trong giai đoạn agglomerat. Kết quả mã hóa các yếu tố được thể hiện ở bảng 3.

Bảng 3. Mã hóa các yếu tố trong quá trình hòa tách đồng quặng urani đã agglomerat hóa.

Các nhân tố theo tỷ lệ xích tự nhiên				Các nhân tố trong hệ mã hóa			
Số thứ tự thí nghiệm	Z_1	Z_2	Z_3	X_1	X_2	X_3	Y
1	200	20	6	-	+	-	84,5
2	200	10	6	-	-	-	76,4
3	300	10	6	+	-	-	79,8
4	300	20	6	+	+	-	86,2
5	200	10	10	-	-	+	77,8
6	300	10	10	+	-	+	80,1
7	200	20	10	-	+	+	87,9
8	300	20	10	+	+	+	87,5

Xác định phương trình hồi quy bậc 1 đầy đủ mô tả thực nghiệm, với độ tin cậy $P=95\%$.

Các bước tiến hành: phương trình hồi quy bậc một ba nhân tố đầy đủ có dạng như sau: $y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$

Để thuận tiện cho việc tính toán, ma trận kế hoạch hóa thực nghiệm được mở rộng thể hiện ở bảng 4.

Bảng 4. Kết quả tính toán, ma trận kế hoạch hóa thực nghiệm.

Stt	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y, \%$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	76,4
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	79,8
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	84,5
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	86,2
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	77,8
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	80,1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	87,9
8	1	1	1	1	1	1	1	1	87,5

* **Bước 1 - Xác định các hệ số hồi quy.**

- Xác định các hệ số b_0, b_1, b_2, b_3 :

Áp dụng công thức: $b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}y_u}{N}$ (từ số là phép toán tính tổng của các giá trị khi gán dấu cột x_i vào cột y tương ứng theo hàng). Lần lượt thay số vào, ta tính được các kết quả sau ($N=8$): $b_0=82,525$; $b_1=0,875$; $b_2=4$; $b_3=0,8$. (N được tính theo công thức: $N = 2^n$. Trong đó, N là số số hạng của phương trình hồi quy bậc 1 - chính là số thực nghiệm phải làm; n là số nhân tố ảnh hưởng đến kết quả thực nghiệm, ở đây $n=3$).

- Xác định các hệ số b_{12}, b_{23}, b_{13} :

Áp dụng công thức: $b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}x_{ju}y_u}{N}$ (từ số là phép toán tính tổng của các giá trị khi gán dấu cột x_i, x_j vào cột y tương ứng theo hàng). Lần lượt thay số vào, ta tính được các kết quả sau ($N=8$): $b_{12}=-0,55$; $b_{23}=0,375$; $b_{13}=-0,4$.

- Xác định các hệ số b_{123} :

Áp dụng công thức: $b_{ijk} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}x_{ju}x_{ku}y_u}{N}$ (từ số là phép toán tính tổng của các giá trị khi gán dấu cột x_i, x_j, x_k vào cột y tương ứng theo hàng). Lần lượt thay số vào, ta tính được các kết quả sau ($N=8$): $b_{123}=-0,125$.

* **Bước 2 - Đánh giá tính có nghĩa của các hệ số hồi quy.**

Tính có nghĩa của các hệ số hồi quy được kiểm định theo tiêu chuẩn t:

$$t_{i \text{ tính}} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}$$

Trong đó: $S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{N}$ hay: $S_{b_i} = \frac{S_0}{\sqrt{N}}$

Do vậy, ta tiến hành các bước sau:

- **Xác định giá trị S_0 :** thực hiện 3 thí nghiệm lặp ở tâm, nhận được 3 giá trị $y_1^0=85,4$; $y_2^0=86,1$; $y_3^0=85,0$. Áp dụng công thức: $\bar{y}_u^0 = \frac{\sum_{i=1}^m y_{iu}^0}{m}$ (với m là số thí nghiệm lặp ở tâm = 3), ta tính được $\bar{y}_u^0 = 85,5$.

Tiếp theo áp dụng công thức:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_{iu}^0 - \bar{y}_u^0)^2}{m - 1}$$

ta tính được $S_0^2 = 0,31$.

- **Xác định S_{b_i} :**

Áp dụng công thức: $S_{b_i} = \frac{S_0}{\sqrt{N}}$ ta tính được $S_{b_i} = 0,197$.

- **Xác định $t_{i \text{ tính}}$:**

Theo công thức: $t_{i \text{ tính}} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}$ ta tính được $t_0 = 418,91$;

$t_1 = 4,44$; $t_2 = 20,3$; $t_3 = 4,06$; $t_{12} = 2,79$; $t_{13} = 2,03$; $t_{23} = 1,90$; $t_{123} = 0,63$.

- **Xác định t tra bảng:**

Với $P=95\%$, $f=m-1=3-1=2$, tra bảng 2 chiều ta có: $t_{0,95}(2)=4,30$.

Như vậy, t_{12} , t_{13} , t_{23} và t_{123} đều nhỏ hơn $t_i(f)$, do đó các hệ số b_{12} , b_{13} , b_{23} và b_{123} cũng đều bị loại ra khỏi phương trình hồi quy. Phương trình với các hệ số hồi quy còn lại có dạng: $\hat{y} = 82,525 + 0,875 \cdot x_1 + 4,0 \cdot x_2 + 0,8 \cdot x_3$.

* **Bước 3 - Đánh giá tính phù hợp của phương trình hồi quy thu được.**

Kết quả đánh giá tính phù hợp của phương trình hồi quy được trình bày ở bảng 5.

Bảng 5. Kết quả tính toán tính phù hợp của phương trình hồi quy thu được.

Stt	x_0	x_1	x_2	x_3	y_u	$\hat{y}_u$	$(y_u - \hat{y}_u)^2$
1	1	-1	-1	-1	76,4	76,85	0,2025
2	1	1	-1	-1	79,8	78,6	1,44
3	1	-1	1	-1	84,5	84,85	0,1225
4	1	1	1	-1	86,2	86,6	0,16
5	1	-1	-1	1	77,8	78,45	0,4225
6	1	1	-1	1	80,1	80,2	0,01
7	1	-1	1	1	87,9	86,45	2,1025
8	1	1	1	1	87,5	88,2	0,49

Với $\hat{y}_u$: kết quả thực nghiệm thứ u tính theo phương trình hồi quy sau khi đã loại bỏ các hệ số không có nghĩa; y_u : kết quả thực nghiệm thứ u.

- **Xác định $S_{\text{phù hợp}}$ theo phương trình:**

$$S_{\text{phù hợp}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2}{N - L}$$

Với $N=8$, $L=4$ (số hệ số của phương trình hồi quy $\hat{y}$ tìm được), thay số vào ta có $S_{\text{phù hợp}}^2 = 1,2375$.

- **Xác định $F_{\text{tính}}$ theo phương trình:** $F_{\text{tính}} = \frac{S_{\text{phù hợp}}^2}{S_0^2}$

Thay số vào ta được $F_{\text{tính}} = 3,99$.

- **Xác định $F_{\text{tra bảng}}$**

Với $P=95\%$, $\alpha=0,05$; $f_1=N-L=8-4=4$; $f_2=m-1=3-1=2$ tra bảng ta xác định được $F_{0,95}(4,2)=19,25$.

- **Kiểm định:**

Do $F_{\text{tính}} = 3,99 < 19,25 = F_{\text{tra bảng}}$ nên phương trình hồi quy tìm được mô tả đúng thực nghiệm: $\hat{y} = 82,525 + 0,875 \cdot x_1 + 4,0 \cdot x_2 + 0,8 \cdot x_3$.

Kết luận

Đã nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố đến quá trình agglomerat quặng urani BPH vùng Pà Lừa - Pà Rông và lựa chọn được các yếu tố thích hợp: chi phí axit H_2SO_4 20 kg/tấn quặng, nồng độ axit H_2SO_4 250 g/l, độ ẩm khối quặng 8%. Kết quả nghiên cứu cho thấy, quặng urani được agglomerat cho hiệu suất thu hồi urani cao hơn (90,58%) so với quặng urani chưa agglomerat (85,2%).

Đã tìm được phương trình hồi quy mô tả đúng thực nghiệm quá trình agglomerat hóa biểu diễn hiệu suất thu hồi urani trong quá trình hòa tách đồng quặng urani BPH phụ thuộc vào các yếu tố: nồng độ axit, chi phí axit và độ ẩm khối quặng trong giai đoạn agglomerat hóa: $\hat{y} = 82,525 + 0,875 \cdot x_1 + 4,0 \cdot x_2 + 0,8 \cdot x_3$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Thân Văn Liên (2013), *Xử lý mẫu công nghệ thu nhận urani*, Báo cáo nhiệm vụ KHCN cấp nhà nước, Viện Công nghệ xạ hiếm (Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam).
- [2] Thân Văn Liên (2016), *Nghiên cứu cải tiến công nghệ xử lý quặng urani nghèo bằng phương pháp hòa tách thẩm sử dụng quá trình agglomerat hóa quặng đầu vào*, Báo cáo đề tài KHCN cấp bộ, Viện Công nghệ xạ hiếm (Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam).
- [3] Jacques Thiry, et al. (2010), *Heap leaching of low grade uranium ore in Somair*, Technical Meeting on Low grade Uranium Ore, IAEA.
- [4] Adirek Janwong (2012), *The agglomeration of nickel laterite ore*, Department of Metallurgical Engineering - The University of Utah.
- [5] S.C. Bouffard (2005), "Review of agglomeration practice and fundamentals in heap leaching", *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, **26**, pp.233-294.
- [6] S.C. Bouffard (2008), "Agglomeration for heap leaching: Equipment design, agglomerate quality control, and impact on the heap leaching process", *Minerals Engineering*, **21**, pp.1115-1125.
- [7] K.A. Lewandowski, S. Komar Kowatra (2009), "Binders for heap leaching agglomeration", *Minerals Metallurgical Processing*, **26(1)**, pp.1-24.