

NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH TỔNG HOẠT ĐỘ PHÓNG XẠ ALPHA, BETA TRONG CÁC MẪU NƯỚC THẢI ĐÃ XỬ LÝ TỪ QUÁ TRÌNH CHẾ BIẾN CÁC LOẠI QUẶNG SA KHOÁNG

Đến tòa soạn 17-10-2023

Đoàn Thanh Sơn*, Ngô Quang Huy, Lê Quốc Việt, Đỗ Thị Ánh Tuyết,
Ngô Văn Tuyển, Vương Hữu Anh

Viện Công nghệ xạ hiếm

*Email. doanson2018@gmail.com

SUMMARY

DETERMINATION OF GROSS ALPHA AND BETA RADIOACTIVITIES IN TREATED WASTE WATER FROM THE BEACH SAND MINERAL PROCESSING

The determination of gross alpha and beta activities in waters with the low dissolved solid materials can be easily done. However, for the treatment of liquid wastes containing high radioactivity from the beach sand mineral processing, a large amount of chemicals have been introduced to form soluble salts, which are mainly NaCl, that contributes to the decrease in performance, and in sensitivity of the measurement, resulting in the inaccurate or even impossible determination of the gross alpha and beta activities. The method of separating radioactive elements from the interfering salt background by co-precipitation using BaRa(SO₄)₂, and Fe(OH)₃ was performed in this paper. The study was carried out on treated waste samples from the beach sand mineral processing. The results showed that the efficiency of the radioactive elements separation when the alpha activity was from 3.5 Bq/L and the beta from 2 Bq/L reached up to 95% and then we could easily determine the gross alpha and beta radioactivity in the separated fractions with high stability and accuracy. Limit of detection with alpha and beta for treated waste water from the beach sand mineral processing was 0.0074 Bq/L and 0.021 Bq/L, respectively.

Keywords: Gross alpha and beta activities, high radioactivity wastes water, beach sand mineral processing, co-precipitation method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các nguyên tố phóng xạ tự nhiên như ²²⁶Ra, ²³⁸U, ²³²Th trong quá trình phân rã phóng xạ thường phát ra đồng thời các bức xạ gamma, beta, alpha. Bức xạ gamma là các sóng điện từ có độ đâm xuyên lớn nhưng có mức độ ion hóa nhỏ thường gây nguy hiểm khi bị chiếu ngoài. Trong khi bức xạ alpha, beta có độ đâm xuyên nhỏ, bị che chắn bởi chỉ một tờ giấy mỏng lại có mức độ ion hóa lớn, gây nguy hiểm khi bị chiếu trong. Các loại nước có tổng hoạt độ phóng xạ alpha và beta lớn hơn giới hạn cho phép nếu đưa vào cơ thể sẽ tạo

thành nguồn chiếu trong và do khả năng ion hóa rất mạnh, chúng sẽ gây ra nguy hiểm cho sức khỏe con người. Vì vậy vấn đề xác định tổng hoạt độ phóng xạ alpha, beta trong các loại nước sinh hoạt, nước thải công nghiệp để đánh giá tiêu chí về an toàn phóng xạ đối với con người và môi trường là vấn đề hết sức quan trọng.

Về phương pháp xác định tổng hoạt độ phóng xạ alpha, beta đã có các Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 8879:2011 (ISO10704:2009) về đo tổng hoạt độ phóng xạ alpha và beta trong nước không mặn – phương pháp lắng đọng nguồn mỏng [1], tiêu chuẩn

quốc gia TCVN 6053:2011 đo tổng hoạt độ phóng xạ alpha trong nước không mặn – phương pháp nguồn dày [2]. Các tiêu chuẩn trên áp dụng rất phù hợp cho việc xác định tổng hoạt độ alpha và beta trong các loại nước có tổng lượng chất rắn hòa tan nhỏ như các loại nước sông, hồ, nước ngầm, nước thải sinh hoạt. Khi đó hiệu suất đếm alpha và beta rất lớn, hầu như không bị suy giảm do hiện tượng tự hấp thụ, giới hạn phát hiện xuống rất thấp, dễ dàng xác định được tổng hoạt độ phóng xạ alpha và beta trong mẫu.

Hiện nay, các hoạt động thăm dò, khai thác và chế biến các loại khoáng sản chứa chất phóng xạ có nguồn gốc tự nhiên (Naturally Occurring Radioactive Material - NORM) như đất hiếm, sa khoáng titan, than đá, dầu khí... có xu hướng ngày càng gia tăng. Bên cạnh lợi ích về kinh tế, các hoạt động này cũng ảnh hưởng không nhỏ đến sức khỏe con người và môi trường. Hiện tại, việc kiểm soát và quản lý chất thải phóng xạ trong các ngành công nghiệp vẫn đang còn nhiều hạn chế và thiếu những quy định và tiêu chí cụ thể, rất cần được chúng ta quan tâm.

Sa khoáng ven biển thường chứa zircon, ilmenit và rutile, xenotime và monazite. Những khoáng chất này được khai thác ở nhiều quốc gia và sản lượng lên tới hàng triệu tấn zircon và titan (từ rutile và ilmenite) mỗi năm. Các sa khoáng này được sử dụng chủ yếu trong các xưởng đúc, sản xuất vật liệu chịu lửa và công nghiệp gốm sứ, các ngành sản xuất mỹ phẩm, hoá chất. Các khoáng chất trong sa khoáng này nhiều loại có tính phóng xạ lớn, lên tới 10.000 Bq/kg. Vì vậy các loại chất thải rắn và lỏng từ quá trình chế biến sa khoáng trên rất cần được quan tâm vì tính phóng xạ cao của chúng

Các loại thải lỏng trong quá trình chế biến quặng sa khoáng nói trên đều chứa các chất phóng xạ nhất định mà chủ yếu trong đó là các nhân phóng xạ trong dãy U, Th, Ra và các con cháu của chúng. Để xử lý loại bỏ các nhân phóng xạ này bằng quá trình kết tủa, một lượng lớn các hóa chất như NaOH, Na₂S, PAC, Na₂CO₃ đã được đưa vào dung dịch thải làm cho lượng muối kim loại kiềm chủ yếu như NaCl hòa tan trong dung dịch nước thải là rất lớn (có thể đến vài hay vài chục g/L) [4,5]. Chính lượng muối hòa tan tạo cặn lớn đó làm giảm hiệu suất đếm alpha và beta. Điều này

làm cho việc xác định alpha, beta trong các dung dịch nước thải đã xử lý từ các quá trình chế biến quặng sa khoáng gặp sai số rất lớn, thậm chí là hoàn toàn không thể xác định được.

Vì vậy, nghiên cứu tách các nguyên tố phóng xạ phát alpha và beta ra khỏi nền muối cao tạo điều kiện cho việc xác định tổng hoạt độ phóng xạ alpha, beta trong các mẫu nước thải của quá trình chế biến quặng sa khoáng trở nên dễ dàng, chính xác là vô cùng cần thiết. Việc tách các nguyên tố phóng xạ có nguồn gốc tự nhiên có thể được thực hiện bằng các phương pháp chiết, trao đổi ion hoặc đồng kết tủa BaRa(SO₄)₂. Trong bài báo này, với đối tượng mẫu là nước thải từ quá trình chế biến quặng sa khoáng Zircon và Monazite có nhiều ²²⁶Ra, ²³⁸U, ²³²Th, việc tách ²²⁶Ra ra khỏi nền muối cao bằng phương pháp đồng kết tủa BaRa(SO₄)₂, ²³⁸U, ²³²Th tách bằng cộng kết với Fe(OH)₃ được sử dụng do phương pháp đơn giản, dễ thực hiện [7, 8].

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Thiết bị, dụng cụ, hóa chất

- Thiết bị LB5500 của hãng Canberra (Mỹ) có các thông số sau: Detector dòng khí tỷ lệ Series5 hiệu suất cao có đường kính 12,7cm, hiệu suất đếm Alpha 35%; hiệu suất đếm Beta: 45%; giá trị phòng alpha: 0,04 cpm; giá trị phòng beta 2,0 cpm.
- Thiết bị ICP-MS Agilent 8900 QQQ (Mỹ).
- Đèn hồng ngoại, bếp điện, tủ sấy (Trung Quốc).
- Khay đếm: thép không gỉ có đường kính 13 cm, thể tích 60 mL
- Các dung dịch H₂SO₄ (1 mol/L); dung dịch Fe³⁺ (5 mg/mL); dung dịch Ba²⁺ (2,5 mg/mL)
- Giấy lọc chày chậm.

2.2. Chuẩn bị mẫu

2.2.1. Chuẩn bị mẫu nghiên cứu ảnh hưởng của lượng chất rắn hoà tan trong nước đến việc xác định tổng hoạt độ phóng xạ alpha và beta

Mẫu nghiên cứu được lấy từ nước thải sau xử lý của quá trình chế biến quặng sa khoáng: 20 mẫu nước thải sau xử lý quặng Zircon và 10 mẫu nước thải sau xử lý quặng Monazite được lấy định kỳ 1 tuần/2 lần với thể tích 5 L/mẫu. Mẫu được phân

tích thành phần hóa học, tổng chất rắn hòa tan, tổng hoạt độ phóng xạ alpha và beta theo quy chuẩn Việt Nam về quản lý nước thải môi trường.

Lấy thể tích mẫu thử từ 200 mL đến 500 mL chuyển vào cốc thủy tinh chịu nhiệt và làm bay hơi trên bếp điện thông thường. Sau khi mẫu cạn còn khoảng từ 20 đến 50 mL, chuyển mẫu vào khay đếm đã được cân khối lượng trước. Sấy khay đếm trong tủ sấy ở 85° C đến trọng lượng không đổi, cân khối lượng khay đếm có mẫu, tính khối lượng cặn trong khay đếm ứng với thể tích mẫu tương ứng [1]. Cho khay đếm vào buồng đo của thiết bị đo tổng hoạt độ alpha và beta LB5500, xác định tổng hoạt độ alpha và beta trong mẫu.

2.2.2. Chuẩn bị mẫu sử dụng phương pháp đồng kết tủa tách các nguyên tố phóng xạ ra khỏi nền mẫu có lượng chất rắn hòa tan cao

Lấy thể tích mẫu thải là 500 mL cho vào cốc 1000 mL. Thêm 30 mL acid sunfuric 1M, đun mẫu đến sôi, khuấy trong 3 phút để đuổi khí CO₂ (quá trình này để tránh CO₂ tạo phức tan với các hợp chất của U), sau đó để nguội. Mẫu sau đó được đun nóng đến 50° C, thêm 3 mL dung dịch 2,5mg/mL Ba²⁺ vào để kết tủa BaSO₄, khuấy ở nhiệt độ trên trong 30 phút để thu được kết tủa tối ưu, sau đó để nguội, lại gia nhiệt lên 50° C. Cho 2mL dung dịch 5mg/mL Fe³⁺ và 20 mL dung dịch 6M NH₄OH vào để kết tủa Fe(OH)₃, tiếp tục khuấy trong 30 phút và dung dịch kết tủa chứa các nguyên tố phóng xạ được để qua đêm để tạo kết tủa hạt to. Kết tủa sau đó được lọc trên giấy lọc chảy chậm và được chuyển định lượng vào khay đếm để đo trên thiết bị đo tổng hoạt độ alpha và beta LB5500 [9, 10].

2.3. Tính toán kết quả

Hoạt độ alpha và beta trong mẫu được tính theo công thức:

$$A_{\alpha(Bq/L)} = (\text{Count}_{\alpha\text{mẫu}} - \text{Count}_{\alpha\text{phông}}) / 60 / V_{\text{mẫu(L)}} / \epsilon_{\alpha\alpha}$$

$$A_{\beta(Bq/L)} = (\text{Count}_{\beta\text{mẫu}} - \text{Count}_{\beta\text{phông}}) / 60 / V_{\text{mẫu(L)}} / \epsilon_{\alpha\beta}$$

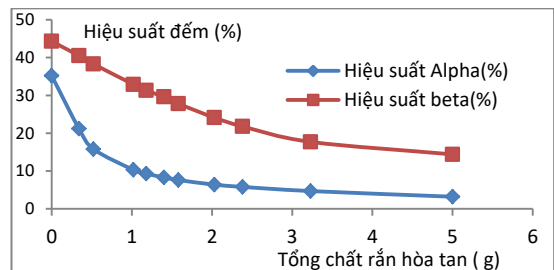
$\epsilon_{\alpha\alpha}$, $\epsilon_{\alpha\beta}$: hiệu suất đếm của mẫu α đối với α và β

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

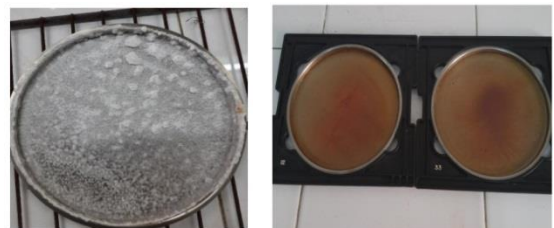
3.1. Ảnh hưởng của lượng chất rắn hòa tan lớn trong nước thải của quá trình chế biến quặng đến việc xác định tổng hoạt độ alpha và beta

Tiến hành phân tích thành phần hoá học của 20 mẫu nước thải sau xử lý của quá trình chế biến các

loại quặng sa khoáng như Monazite, Zircon bằng ICP-MS nhận thấy rằng nước thải của chúng có thành phần chủ yếu là các nguyên tố Al, Mg, Ca với hàm lượng trung bình từ 0,5g/L đến 3g/L; Na với hàm lượng trung bình từ 8g/L đến 15g/L, hàm lượng K trong đó rất thấp, trung bình từ 100 đến 200 ppm. Tổng lượng chất rắn hòa tan trong nước thải sau xử lý rất lớn (từ 5 đến 20 g/L), trung bình cỡ 10g/L, trong đó thành phần chính là muối NaCl. Nền muối cao này đã làm giảm hiệu suất đếm alpha và beta. Tiến hành thực nghiệm bằng cách tạo ra một dãy mẫu trong đó lượng chất phóng xạ trong mỗi mẫu là bằng nhau, sau đó thêm dần lượng muối NaCl vào các mẫu. Chuyển các mẫu có khối lượng khác nhau vào khay đếm và đo tổng hoạt độ alpha và beta trên thiết bị đo LB5500. Kết quả cho thấy rằng khi phân tích các mẫu nước thải, với thể tích mẫu thử là 500 mL, lượng cặn lắng trong khay đếm đã lớn hơn 5 g, khi đó hiệu suất đếm alpha đã giảm xuống chỉ còn hơn 3% và hiệu suất đếm beta đã giảm còn 14 %, độ nhạy, độ chính xác của phép đo trở nên rất thấp (Hình 1).



Hình 1. Kết quả ảnh hưởng của lượng chất rắn hòa tan(g) đến hiệu suất đếm alpha và beta



a)

b)

Hình 2. Khay mẫu sau khi xử lý mẫu đem đo trên thiết bị LB5500. a)- Bề mặt khay đếm khi không tách các nguyên tố phóng xạ ra khỏi nền. b)- Bề mặt khay đếm khi tách các nguyên tố phóng xạ ra khỏi nền muối.

Mặt khác do lượng cặn trong khay đếm lên đến 5g nên khi đó bề mặt hình học của mẫu không đồng đều, mẫu ở trong khay đếm dễ dàng bị trào ra ngoài (Hình 2a). Các yếu tố trên khiến việc xác định tổng hoạt độ alpha, beta trong dung dịch nước thải sau xử lý của quá trình chế biến các loại quặng sa khoáng gặp sai số rất lớn, thậm chí là hoàn toàn không xác định được.

3.2. Phương pháp tách các nguyên tố phóng xạ ra khỏi nền mẫu có lượng chất rắn hoà tan lớn

Để tăng độ chính xác của phép đo hoạt độ alpha và beta trong mẫu có lượng chất rắn hòa tan cao, việc tách các nhân phóng xạ ra khỏi nền muối bằng phương pháp đồng kết tủa BaRa(SO₄)₂ và cộng kết với Fe(OH)₃ nêu trong mục 2.2.2 đã được thực hiện và cho kết quả khả quan. Kết tủa chứa các nhân phóng xạ sau khi tách ra khỏi nền mẫu được chuyển vào khay đếm, theo đó lượng tủa trong khay đếm còn khoảng 0,08 g. Khi đó hiệu suất đếm alpha đạt cỡ 32% và hiệu suất đếm beta đạt 44%, nghĩa là hầu như không bị suy giảm so với hiệu suất của nguồn chuẩn. Bề mặt hình học của mẫu đo rất mỏng và đều, thuận lợi cho việc xác định tổng hoạt độ alpha và beta (Hình 2b).

Tuy nhiên khi thực hiện quá trình tách các nguyên tố phóng xạ ra khỏi nền mẫu có lượng chất rắn hoà tan cao, lượng chất phóng xạ bị mất đi so với ban đầu hay hiệu suất thu hồi cũng được nghiên cứu và khảo sát bằng thực nghiệm như sau. Tạo một dãy mẫu bằng cách cố định lượng chất hoà tan, sau đó thêm dần dung dịch chuẩn phóng xạ tự nhiên có hoạt độ phóng xạ biết trước vào các mẫu. Tiến hành kết tủa tách phóng xạ các mẫu này như trong quy trình. Sau đó đo hoạt độ alpha, beta trong các mẫu vừa kết tủa và so sánh với hoạt độ alpha, beta trong dung dịch chuẩn phóng xạ ban đầu để tính hiệu suất thu hồi.

Kết quả cho thấy rằng khi tách các nguyên tố phóng xạ ở giá trị hoạt độ alpha 0,1 Bq/L, hiệu suất thu hồi alpha đạt cỡ 86%. Khi hoạt độ phóng xạ tăng thì hiệu suất thu hồi cũng tăng và đạt cỡ 95% khi hoạt độ phóng xạ trong mẫu ở mức 3,5 Bq/L (Bảng 1). Với hoạt độ beta thì mặc dù ⁴⁰K bị mất trong quá trình kết tủa nhưng hàm lượng K trong nước thải sau xử lý của các loại quặng sa khoáng rất thấp (mục 3.1), nên hoạt độ beta trong mẫu chủ yếu là do quá trình phân rã của các nguyên

tố phóng xạ ²²⁶Ra, ²³⁸U, ²³²Th tạo thành. Thực nghiệm cho thấy rằng hiệu suất thu hồi beta đạt 90% ở giá trị hoạt độ beta 0,2 Bq/L và đạt tới 98% khi hoạt độ beta trong mẫu ở mức 2 Bq/L (Bảng 1).

Bảng 1: Hiệu suất thu hồi alpha và beta khi tách các nguyên tố phóng xạ bằng kết tủa.

Hoạt độ alpha ban đầu (Bq/L)	Hoạt độ alpha thu hồi (Bq/L)	Hiệu suất thu hồi alpha (%)	Hoạt độ beta ban đầu (Bq/L)	Hoạt độ beta thu hồi (Bq/L)	Hiệu suất thu hồi Beta (%)
0,13	0,11	86,3	0,2	0,18	90
0,28	0,25	87,9	0,4	0,36	92
0,56	0,50	89,5	0,8	0,75	93
1,12	1,07	92,3	1,6	1,50	96
2,25	2,19	94,2	3,1	3,06	98
3,31	3,17	95,7	4,6	4,55	99
4,5	4,29	95,4	6,2	6,07	98
9	8,69	96,5	12	11,89	98

Giá trị LOD và LOQ của phương pháp đối với mẫu nước thải sau khi tách ra khỏi nền muối cao được xác định: LOD với tổng alpha 0,0074 Bq/L, LOQ 0,022 Bq/L; giá trị LOD với tổng beta 0,021 Bq/L, LOQ 0,06 Bq/L.

3.3. Đánh giá độ chính xác

Việc đánh giá độ lặp lại và độ chính xác của phép xác định tổng hoạt độ alpha và beta được thực hiện thông qua việc so sánh với các giá trị chuẩn của các mẫu chuẩn thứ cấp CTC1, CTC2 và CTC3 được tạo thành thông qua phương pháp xác định độ thu hồi bằng cách thêm chuẩn CRM1 của IAEA -2021 vào các dung dịch chứa chất phóng xạ tự nhiên để tạo thành các mẫu chuẩn thứ cấp. Sau khi xác định được giá trị chính xác của các mẫu chuẩn CTC1, CTC2 và CTC3, thêm nền muối NaCl vào cho giống mẫu thật và tiến hành các bước kết tủa như trong quy trình.

Từ bảng 2, ta nhận thấy rằng kết quả giá trị về độ lệch bias, z-score của mẫu phân tích sau khi kết tủa với hoạt độ chuẩn ban đầu đều nằm trong giới hạn cho phép [11,12]. Phương pháp xác định tổng hoạt độ alpha và beta trên thiết bị LB5500 có độ lặp lại và độ chính xác cao.

Bảng 2: Kết quả đánh giá độ chính xác hoạt độ alpha và beta đối với 3 mẫu chuẩn thử cấp CTC1, CTC2 và CTC3

Ký hiệu mẫu	Chỉ tiêu	Giá trị chuẩn (Bq/L)	Giá trị trung bình sau kết tủa (Bq/L)	Hiệu suất thu hồi (%)	Kết quả mẫu phân tích (Bq/L)	Độ lệch tối đa cho phép (%)	Độ lệch Bias (%)	Z-Score
CTC1	Alpha	0,60	0,52	90	0,58	20	3,71	0,31
	Beta	0,85	0,78	94	0,83	20	2,38	0,42
CTC2	Alpha	1,45	1,39	93	1,49	20	3,08	0,54
	Beta	1,80	1,75	98	1,80	20	1,34	0,26
CTC3	Alpha	7,20	6,96	95	7,33	20	1,75	0,33
	Beta	8,80	8,25	98	8,42	20	4,34	0,61

3.4. Phân tích mẫu thực

Bảng 3: Kết quả phân tích tổng hoạt độ alpha và beta mẫu nước thải sau xử lý của quá trình chế biến quặng Zircon, Monazite.

Số TT	Ký hiệu mẫu	V mẫu (mL)	Lượng cặn (g)	Hiệu suất thu hồi alpha (%)	Kết quả tổng hoạt độ alpha (Bq/L)	Hiệu suất thu hồi beta (%)	Kết quả tổng hoạt độ beta (Bq/L)
1	PX1	500	0,09	97	2,80	98	2,12
2	PX2	500	0,08	86	0,01	90	0,11
3	PX3	500	0,09	95	1,37	96	1,16
4	PX4	500	0,08	92	0,75	93	0,61
5	PX5	500	0,09	97	2,76	98	2,26
6	ZOC1	500	0,07	93	1,37	95	0,82
7	MX1	500	0,09	90	0,32	94	0,61
8	MX2	500	0,09	90	0,36	94	0,65

Tiến hành phân tích một số lô mẫu nước thải sau xử lý từ quá trình chế quặng Ziron ZOC PX1, PX2, PX3, PX4, PX5, ZOC1 và quặng Monazite MX1, MX2 bằng phương pháp kết tủa ở trên, trong đó mẫu PX1 và PX5 là mẫu lập. Mẫu PX2 là mẫu trắng (nước cất). Mẫu PX3 là mẫu pha loãng 50% từ PX1 và mẫu PX4 là mẫu pha loãng 50% từ mẫu PX3, mẫu MX1 và MX2 là các mẫu lập (Bảng 3). Từ kết quả phân tích cặp mẫu lập PX1với PX5, cặp MX1 với MX5 là tương đối

trùng khớp, mẫu trắng PX2 có hoạt độ gần bằng không, mẫu pha loãng PX3 và PX4 có kết quả tỷ lệ với hệ số pha loãng, có thể đánh giá được độ chính xác, ổn định của phép xác định tổng hoạt độ alpha và beta trong các mẫu nước thải.

4. KẾT LUẬN

Việc nghiên cứu và áp dụng phương pháp đồng kết tủa BaRa(SO₄)₂ và cộng kết với Fe(OH)₃ nhằm tách các nguyên tố phóng xạ ra khỏi nền mẫu có

ưu điểm rất lớn, khi đó ảnh hưởng nền mẫu phức tạp gây cản trở, hấp thụ tia alpha và beta đã bị loại trừ hoàn toàn, hiệu suất đếm alpha và beta rất cao đạt tới 32% và 44% nghĩa là hầu như không bị suy giảm so với hiệu suất của nguồn chuẩn. Hiệu suất thu hồi alpha và beta khi kết tủa cũng đạt giá trị rất cao từ 86% tới 95 %. Giới hạn phát hiện tổng hoạt độ alpha và beta xuống rất thấp, alpha 0,0074 Bq/L, beta 0,021 Bq/L. Việc xác định tổng hoạt độ alpha và beta trong các loại nước có lượng chất rắn hoà tan cao trở nên dễ dàng, chính xác. Phương pháp kết tủa tách phóng xạ có ứng dụng rất lớn đối với việc phân tích các mẫu nước thải sau xử lý từ quá trình chế biến các loại quặng sa khoáng biển và cũng có thể áp dụng để phân tích nước thải từ quá trình chế biến các loại quặng phóng xạ có nguồn gốc tự nhiên (NORM) hiện nay tại Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

- [1] TCVN 8879 (2011), Chất lượng nước. Đo tổng hoạt độ phóng xạ beta trong nước không mặn - Phương pháp lắng đọng nguồn mỏng.
- [2] TCVN 6219 (2011), Chất lượng nước. Đo tổng hoạt độ phóng xạ beta trong nước không mặn - Phương pháp nguồn dày.
- [3] TCVN 6053 (2011), Chất lượng nước. Đo tổng hoạt độ phóng xạ alpha trong nước không mặn- Phương pháp nguồn dày.
- [4] Nguyễn Huy Cường, (2018). Quy trình xử lý chất thải lỏng độc hại có chứa kim loại nặng và nguyên tố phóng xạ. Hướng dẫn vận hành trạm xử lý nước thải tập trung khu vực Phùng. *Hội thảo khoa học*, Viện Công nghệ Xạ hiếm.
- [5] Vũ Hưng Triệu, (2009). Nghiên cứu quy trình công nghệ xử lý chất thải phóng xạ của quá trình thủy luyện quặng uran. *Đề tài cấp Bộ*. Viện Công nghệ xạ hiếm.
- [6] ASTM D7283-17 Standard Test Method for Alpha and Beta Activity in Water By Liquid Scintillation Counting.
- [7] S. Happel, M. Beyermann, P. Letessier, A. Bombard, A. H. Thakkar & E. P. Horwitz, (2008). Gross alpha determination in salt rich water samples using an extraction chromatographic resin and LSC. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **277**(1), 241–247.
- [8] W. C. Burnett, P. H. Cable and R. Moser, (1995). Determination of radium-228 in natural waters using extraction chromatographic resins. *Radioactivity & Radiochemistry*, **6**(3), 36-44.
- [9] P. Pakkong, S. Wongsanit, Y. Tumnoi & S. Udomsomporn, (2013). Determination of gross alpha and beta activities in seawater and plankton from the Upper Gulf of Thailand. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **297**(2), 297 - 302.
- [10] J. A. Suarez-Navarro, Ll. Pujol & M. A. de Pablo, (2002), Rapid determination of gross alpha-activity in sea water by coprecipitation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **253**, 47–52.
- [11] ISO 13528:2015. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. *ISO 13528:2015*. Geneva: Switzerland.
- [12] ISO/IEC 17043:2010. Conformity assessment - General requirements for proficiency testing. International Organization for Standardization.