



Original Article

Synthesis and Characterization of Poly-Aluminum Chloride (PAC) from Aluminum Factory Waste for Water Treatment Applications

Le Manh Cuong*, Do Thi Thanh Ha, Le Huy Hoang, Nguyen Nhu Mai

Hanoi University of Civil Engineering, 55 Giai Phong, Hai Ba Trung, Hanoi, Vietnam

Received 02nd January 2025

Revised 06th June 2025; Accepted 12th June 2025

Abstract: This paper presents the results of PAC synthesis from aluminum factory waste. PAC was synthesized under the following conditions: HCl 18%, reaction temperature of 70 °C, reaction time of 15 minutes for AlCl_3 formation reaction; NaOH 6M, pH of 5, reaction temperature of 25 °C, and reaction time of 30 minutes for PAC synthesis from AlCl_3 . The synthesized PAC meets technical requirements, with an aluminum content of approximately 13%. The surface water treatment efficiency using PAC synthesized from aluminum factory waste is quite good, with turbidity notably reducing from 13NTU to 1.8NTU, meeting current Vietnam Quality Standards requirements.

Keywords: PAC, aluminum slag waste, aluminum waste products, water treatment,...

* Corresponding author.

E-mail address: cuonglm@huce.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5862>

Tổng hợp và đặc trưng thành phần của Poly-Aluminum Chloride (PAC) từ xỉ thải nhà máy nhôm để ứng dụng trong xử lý nước

Lê Mạnh Cường*, Đỗ Thị Thanh Hà, Lê Huy Hoàng, Nguyễn Như Mai

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 02 tháng 01 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 06 tháng 6 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 12 tháng 6 năm 2025

Tóm tắt: Bài báo trình bày kết quả điều chế PAC từ xỉ thải nhà máy sản xuất nhôm. PAC được điều chế với điều kiện phản ứng tạo AlCl_3 là nồng độ dung dịch HCl 18%, nhiệt độ phản ứng 70°C , thời gian phản ứng 15 phút; điều kiện điều chế PAC từ AlCl_3 : dung dịch NaOH 6M, pH dung dịch là 5, nhiệt độ phản ứng là 25°C và thời gian phản ứng là 30 phút. PAC điều chế được thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật, với hàm lượng Al khoảng 13%. Hiệu quả xử lý nước mặt bằng PAC điều chế từ xỉ thải nhà máy sản xuất nhôm khá tốt, độ đục giảm một cách rõ rệt từ 13NTU xuống còn 1,8NTU, đạt yêu cầu theo QC Việt Nam hiện hành.

Từ khóa: PAC, xỉ thải nhôm, thải phẩm nhôm, xử lý nước,...

1. Mở đầu

Hiện nay, tình trạng nóng lên toàn cầu cùng với xu hướng sống xanh, sạch đang thu hút sự quan tâm đặc biệt của con người. Ô nhiễm môi trường do chất thải từ các hoạt động sản xuất và tái chế kim loại công nghiệp, đặc biệt là nhôm, đang trở thành vấn đề cấp bách.

Nhôm là kim loại có lượng tiêu thụ rất lớn, gắn liền với nhiều lĩnh vực trong đời sống [1-4]. Hàng ngày, các cơ sở sản xuất và tái chế nhôm ở nước ta đang thải ra một lượng xỉ thải khổng lồ [5, 8]. Nếu không được xử lý một cách khoa học, các chất thải này có thể gây ô nhiễm nghiêm trọng. Nhôm có thể tồn tại trong đất hàng trăm năm, phá hủy hệ sinh thái xung quanh khu vực xả thải [6, 7]. Chất thải nhôm có thể ngấm xuống đất, đi vào mạch nước ngầm, gây ảnh hưởng không tốt đến sức khỏe con người.

Vì mục tiêu bảo vệ môi trường và sức khỏe cộng đồng, việc xử lý xỉ thải nhôm từ các nhà máy sản xuất, tái chế nhôm là vô cùng cần thiết.

Một trong những giải pháp hữu hiệu là sử dụng xỉ thải nhôm để sản xuất Polyaluminum chloride (PAC), một hợp chất được sử dụng rộng rãi trong việc xử lý nước và nước thải [7-9]. PAC giúp kết lắng các chất lơ lửng, loại bỏ chất hữu cơ, vi khuẩn có trong nước; tăng độ trong của nước; kéo dài chu kỳ lọc và nâng cao chất lượng nước sau xử lý. So với phen nhôm thì PAC ít làm thay đổi độ pH của nước sau xử lý hơn, giúp giảm thiểu việc sử dụng hoá chất điều chỉnh pH, hiệu quả keo tụ cao hơn, ít ăn mòn thiết bị và khả năng ứng dụng rộng hơn. Việc nghiên cứu và chuyển hóa phế thải từ các nhà máy, cơ sở sản xuất, tái chế nhôm thành PAC không chỉ góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường mà còn tận dụng hiệu quả được nguồn tài nguyên không tái tạo là nhôm [9, 10].

Hiện nay có nhiều phương pháp chế tạo PAC tùy thuộc vào các nguồn nguyên liệu khác nhau có thể kể đến như nhôm kim loại tinh luyện hay phế liệu (chủ yếu) được làm sạch sau đó hòa tan bằng axit HCl . Quá trình hòa tan tạo ra AlCl_3 và khí hydro (H_2) sau đó oxy hóa bằng clo (Cl_2) hoặc hydro peroxit (H_2O_2) để loại bỏ các ion AlO_2^- rồi mới trung hòa bằng dung dịch kiềm [4, 10]. Hay từ nguồn phổ biến

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: cuonglm@huce.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5862>

như Bauxite về cơ bản quy trình cũng giống như từ nhôm kim loại nhưng quy trình chế tạo từ quặng Bauxite cần nghiền mịn hoặc nung ở nhiệt độ cao để dễ hòa tan hơn trong axit H_2SO_4 [3]. Ngoài ra còn một nguồn nguyên liệu giàu nhôm cũng được sử dụng để chế tạo PAC là cao lanh tuy nhiên cần hoạt hóa bằng nhiệt hoặc hóa chất để tăng khả năng hòa tan nhôm sau đó lại cần xử lý dịch lọc để loại bỏ các ion kim loại nặng (Fe, Ti,...) bằng phương pháp kết tủa, hấp phụ hoặc chiết [5]. Nhìn chung các phương pháp chế tạo này thường tiêu hao nhiều năng lượng và hóa chất để hòa tan nguyên liệu đầu

vào và sinh ra nhiều chất không mong muốn trong quá trình chế tạo. Vì thế, nhóm nghiên cứu đặt vấn đề chế tạo PAC từ chất thải nhà máy nhôm. PAC được chế tạo theo phương pháp này đơn giản, ít tốn kém và hạn chế tạp chất không mong muốn.

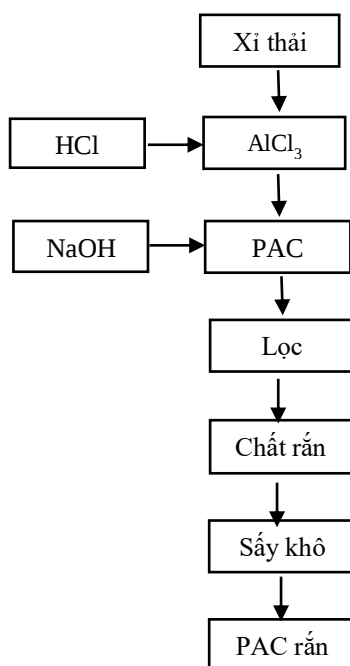
2. Nội dung

2.1. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Xi thải của nhà máy sản xuất nhôm sử dụng cho nghiên cứu có thành phần:

Oxit	Al_2O_3	Fe_2O_3	N_2O	MgO	SiO_2	CaO	CuO
Thành phần khối lượng, %	72,65	2,48	14,25	4,02	4,03	1,43	1,14

Xi thải sẽ được xử lý để tạo thành $AlCl_3$ và sau đó thành PAC theo qui trình sau:



Thuyết minh quy trình chế tạo:

Xi thải chứa nhôm được hòa tan trong axit clohidric (HCl), tạo thành dung dịch nhôm clorua ($AlCl_3$).

Dung dịch $AlCl_3$ tiếp tục được điều chỉnh pH với NaOH, giúp tạo môi trường thuận lợi hình thành PAC.

Hỗn hợp sau phản ứng được lọc để loại bỏ các chất không tan, sau đó được sấy khô để tạo PAC rắn thích hợp cho bảo quản và vận chuyển.

Sản phẩm PAC rắn được phân tích bằng các phương pháp phổ hồng ngoại FT-IR, phổ nhiễu xạ tia X, phổ tán xạ năng lượng tia X.

2.2. Kết quả và thảo luận

2.2.1. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình điều chế $AlCl_3$

i) Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu suất hoà tan xi thải

Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu suất hoà tan xi thải bằng dung dịch HCl 18% tại nhiệt độ 70 °C được đưa ra ở Bảng 1, sau 15 phút hoà tan thì xi thải mới phản ứng hết với dung dịch HCl.

Bảng 1. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu suất hoà tan xi thải, xác định theo phương pháp trọng lượng sau lọc

Thời gian phản ứng, phút	Hiệu suất hoà tan xi thải, %
5	68
7	83
10	94
12	96
15	100

ii) Ảnh hưởng của nhiệt độ phản ứng đến hiệu suất hoà tan xỉ thải và nồng độ dung dịch AlCl_3 tạo thành

Khi hoà tan xỉ thải bằng dung dịch HCl 18%, nếu phản ứng thực hiện ở nhiệt độ thấp hơn 70 °C thì sau 15 phút xỉ thải vẫn chưa được hoà tan hoàn toàn.

Bảng 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ phản ứng đến hiệu suất hoà tan xỉ thải, xác định theo phương pháp trọng lượng sau lọc

Nhiệt độ phản ứng, °C	Hiệu suất hoà tan xỉ thải, %	Nồng độ dung dịch AlCl_3 , mol/l
50	86	2,1
60	93	2,4
70	100	3,0

Nồng độ của AlCl_3 là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến quá trình tạo keo polymer vô cơ PAC. Kết quả Bảng 2 cho thấy, khi nhiệt độ phản ứng tăng làm nước bay hơi, dẫn đến giảm thể tích dung dịch và dung dịch AlCl_3 thu được có nồng độ cao hơn.

iii) Ảnh hưởng nồng độ axit HCl đến hiệu suất hoà tan xỉ thải và pH của dung dịch AlCl_3 tạo thành

Kết quả Bảng 3 cho thấy, khi sử dụng HCl có nồng độ nhỏ hơn 18% thì sau 15 phút ở nhiệt độ 70 °C xỉ thải chưa bị hoà tan hoàn toàn.

Bảng 3. Ảnh hưởng của nồng độ axit HCl đến hiệu suất hoà tan xỉ thải, xác định theo phương pháp trọng lượng sau lọc

Nồng độ axit HCl, %	Hiệu suất hoà tan xỉ thải, %	pH của dung dịch AlCl_3
14	84	3,5
16	96	3,3
18	100	2,9

pH của dung dịch AlCl_3 là một trong những yếu tố quan trọng trong quá trình tổng hợp PAC vì quá trình chuyển hóa Al^{3+} về dạng Al^{3+} của PAC phụ thuộc rất nhiều vào pH của dung dịch. Kết quả Bảng 3 cho thấy, khi nồng độ axit tăng, ở cùng điều kiện nhiệt độ phản ứng thì nước bay hơi nhanh hơn đồng thời pH của dung dịch thu được cũng thấp hơn.

Như vậy, điều kiện để điều chế AlCl_3 từ xỉ thải nhà máy sản xuất nhôm là sử dụng dung dịch HCl 18%; nhiệt độ phản ứng 70 °C; thời gian phản ứng 15 phút. Nồng độ dung dịch AlCl_3 thu được là 3 mol/l và pH của dung dịch là 2,9.

2.2.2. Các yếu tố ảnh hưởng của đến phản ứng điều chế PAC

i) Ảnh hưởng của nồng độ NaOH đến phản ứng điều chế PAC

Phản ứng được thực hiện ở nhiệt độ 25 °C; thời gian phản ứng là 30 phút, có khuấy; nồng độ AlCl_3 sử dụng là 3 mol/l.

Bảng 4. Ảnh hưởng của nồng độ NaOH đến phản ứng điều chế PAC

Nồng độ NaOH, mol/l	pH của dung dịch PAC lỏng	Khối lượng PAC rắn thu được, g
3	2,5	0,87
4	3	1,33
5	4,5	2,82
6	5	3,21
7	6	2,75

Nồng độ NaOH ảnh hưởng đến khả năng tạo PAC do tác dụng điều chỉnh pH dung dịch. PAC chỉ được tạo ra ở điều kiện pH thích hợp, pH quá thấp thì không thể hình thành PAC, pH quá cao thì sản phẩm sẽ dần kết tủa tạo ra $\text{Al}(\text{OH})_3$. Ở nồng độ NaOH là 6 mol/l, pH dung dịch thích hợp để tạo PAC là 5 sẽ cho khối lượng PAC rắn thu được cao nhất là 3,21 g.

ii) Ảnh hưởng của nhiệt độ đến phản ứng điều chế PAC

Ảnh hưởng của nhiệt độ đến phản ứng điều chế PAC được đưa ra trong Bảng 5. Thời gian phản ứng là 30 phút, có khuấy; nồng độ AlCl_3 sử dụng là 3 mol/l.

Bảng 5. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến phản ứng điều chế PAC

Nhiệt độ phản ứng, °C	Khối lượng PAC rắn thu được, g	Hiện tượng
15	1,71	Keo PAC được tạo thành
25	2,43	Keo PAC được tạo thành

35	1,94	Keo PAC chuyển hóa một phần về dạng dung dịch
45	0	Keo PAC chuyển hóa hết về dạng dung dịch

Kết quả cho thấy PAC sẽ hình thành tốt nhất ở nhiệt độ 25 °C; tăng nhiệt độ sẽ bất lợi cho quá trình hình thành PAC, khiến dung dịch keo tan dần.

iii) Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến phản ứng điều chế PAC

Phản ứng được thực hiện ở nhiệt độ 25 °C; nồng độ AlCl_3 sử dụng là 3 mol/l. Kết quả cho thấy, thời gian phản ứng 30 phút là phù hợp nhất để thu được khối lượng PAC rắn lớn nhất.

Bảng 6. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến phản ứng điều chế PAC

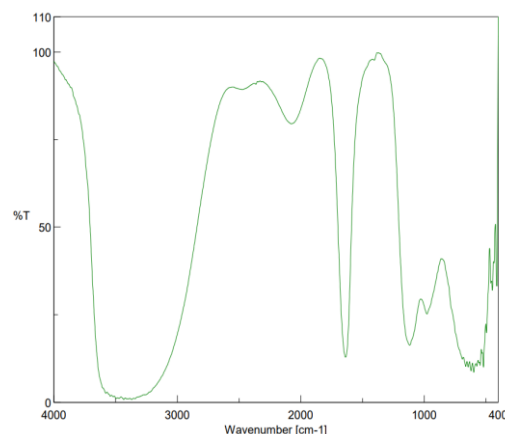
Thời gian phản ứng, phút	Khối lượng PAC rắn thu được, g	Hiện tượng
20	2,37	Lượng PAC dần xuất hiện
25	2,43	Lượng PAC thu được tăng lên
30	2,46	Lượng PAC thu được tăng lên
40	2,46	Lượng PAC thu được không đổi
50	2,46	Lượng PAC thu được không đổi

Như vậy, điều kiện để điều chế PAC từ AlCl_3 là sử dụng dung dịch NaOH 6M; pH dung dịch thích hợp tạo PAC là 5; nhiệt độ phản ứng là 25 °C; thời gian phản ứng là 30 phút.

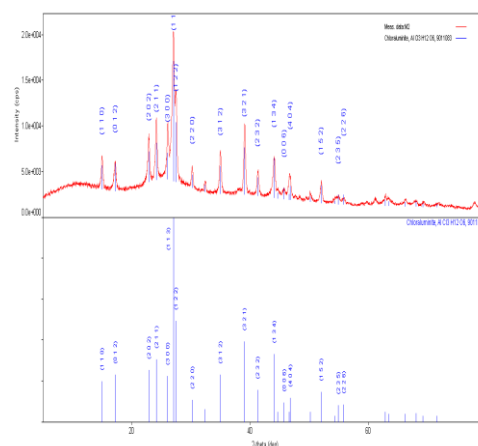
2.2.3. Kết quả phân tích sản phẩm PAC điều chế được

Phổ FT-IR (Hình 1) xác nhận sự hiện diện của các liên kết hóa học đặc trưng trong Poly Aluminium Chloride (PAC). *Đỉnh hydroxyl (O-H)* rõ ràng trong khoảng 3400 cm^{-1} cho thấy PAC có khả năng hấp phụ nước hoặc chứa các nhóm hydroxyl liên kết với nhôm. *Các đỉnh trong vùng $1200\text{-}800\text{ cm}^{-1}$* là bằng chứng quan

trọng cho cấu trúc mạng nhôm-oxy (Al-O-Al) và nhôm-hydroxyl (Al-OH), đặc trưng cho PAC. *Đỉnh tại khoảng $1600\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$* liên quan đến nước liên kết hoặc hấp phụ, điều này phổ biến trong các mẫu PAC.



Hình 1. Phổ FT-IR của mẫu PAC điều chế được.

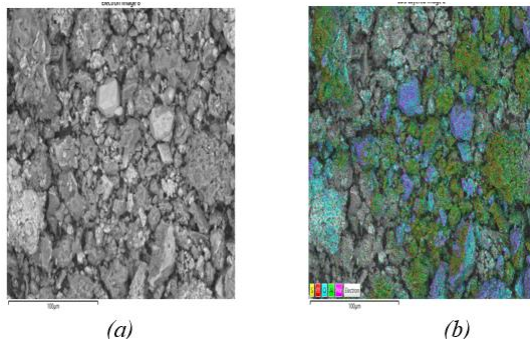


Hình 2. Giải đồ nhiễu xạ tia X của mẫu PAC điều chế được.

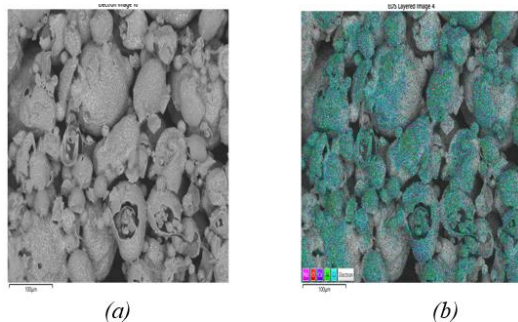
Kết quả phân tích XRD mẫu PAC điều chế được (Hình 2) cho thấy các đỉnh trên đồ thị thực nghiệm (màu đỏ) tương ứng khá tốt với vị trí các đỉnh trên đồ thị lý thuyết (màu xanh lam), chứng tỏ pha chính trong mẫu là Chloraluminite ($\text{AlCl}_3\text{H}_{12}\text{O}_6$) với độ tinh khiết cao. Đỉnh (122) có cường độ cao nhất trong cả hai đồ thị, cho thấy đây là mặt phẳng tinh thể chiếm ưu thế trong mẫu.

Hình ảnh hiển vi điện tử quét SEM (Hình 3a) cho thấy cấu trúc bề mặt của mẫu với

các hạt có kích thước và hình dạng không đồng đều, các hạt có góc cạnh và bề mặt gồ ghề, một số hạt kết tụ lại với nhau; kích thước hạt phân bố rộng. Hình ảnh phân bố nguyên tố dựa trên phổ tán xạ tia X (EDS) cho thấy vị trí các nguyên tố và phân bố không đồng đều, oxi là nguyên tố chiếm tỷ lệ cao nhất, tiếp theo là clo, nhôm và natri.



Hình 3. Kết quả đo EDS của mẫu PAC điều chế được



Hình 4. Kết quả đo EDS của mẫu PAC thương mại

Bảng 7. Thành phần của mẫu PAC điều chế được

Nguyên tố	Loại phổ	Khối lượng, %	Sai số % khối lượng	Nguyên tử, %
O	K series	38,25	0,28	53,06
Na	K series	14,85	0,13	14,33
Al	K series	16,55	0,12	13,61
Cl	K series	28,11	0,17	17,60

S	K series	1,66	0,06	1,15
Cr	K series	0,60	0,08	0,25
Tổng		100,00		100,00

Bảng 8. Thành phần của mẫu PAC thương mại

Nguyên tố	Loại phổ	Khối lượng, %	Sai số % khối lượng	Nguyên tử, %
Al	K series	12,57	0,14	12,35
Cl	K series	40,05	0,28	29,95
Na	K series	8,33	0,14	9,61
Ca	K series	7,33	0,13	4,85
O	K series	23,57	0,39	39,05
Fe	K series	7,46	0,23	3,54
Si	K series	0,69	0,06	0,65
Tổng		100,00		100,00

So sánh kết quả SEM-EDS với PAC thương mại (Hình 3, 4) thấy rằng hàm lượng Al trong PAC điều chế được (Bảng 7) khoảng 13%, lớn hơn hàm lượng Al trong PAC thương mại (Bảng 8).

Ngoài ra về thành phần khác cho thấy hàm lượng tạp chất của các mẫu là khác nhau với (Ca, Fe, Si) của PAC thương mại và (S, Cr) của PAC điều chế được, sự khác biệt ở đây có thể thấy % hàm lượng tạp chất của PAC thương mại lớn hơn và có màu vàng đặc trưng do có ion Fe, các ion dư này có thể ảnh hưởng một phần đến chất lượng nước sau xử lý trong khi hàm lượng tạp chất của nhóm là rất nhỏ và gần như không ảnh hưởng nhiều đến nước sau xử lý.

2.2.4. Kết quả xử lý nước mặt sông Hồng bằng PAC điều chế được

Mẫu nước mặt được lấy từ sông Hồng theo TCVN 6663-6:2018.

Nước mặt sau khi được xử lý bởi PAC điều chế được đã có các chỉ số độ đục, TSS và COD thuộc loại A theo tiêu chuẩn QCVN 08:2023/BTNMT, có thể sử dụng cho sinh hoạt. Kết quả xử lý nước của PAC điều chế được tương đương hoặc tốt hơn so với kết quả xử lý nước của sản phẩm PAC thương mại trên thị trường.

Bảng 9. So sánh kết quả xử lý nước mặt sông Hồng bằng PAC điều chế được và PAC thương mại trên thị trường

Mẫu nước mặt	Độ đục, NTU	TSS, mg/l	COD, mg/l	pH
Trước khi xử lý	13,1	58,4	8,7	7,0
Sau khi xử lý bằng PAC điều chế được	1,8	15,2	5,6	6,8
Sau khi xử lý bằng PAC thương mại	1,8	17,2	6,6	6,7

3. Kết quả

Nghiên cứu đã tổng hợp thành công hợp chất keo tụ trợ lắng PAC từ xỉ thải của nhà máy sản xuất nhôm. Điều kiện phản ứng tạo $AlCl_3$ là nồng độ dung dịch HCl 18%, nhiệt độ phản ứng 70 °C, thời gian phản ứng 15 phút. Điều kiện điều chế PAC từ $AlCl_3$ là dung dịch NaOH 6M, pH dung dịch là 5, nhiệt độ phản ứng là 25 °C và thời gian phản ứng là 30 phút. PAC điều chế được thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật, với hàm lượng Al khoảng 13%. Hiệu quả xử lý nước mặt bằng PAC điều chế được khá tốt, độ đục giảm một cách rõ rệt từ 13NTU xuống còn 1,8NTU, đạt yêu cầu theo QC của Việt Nam. Việc có thể điều chế PAC từ nguồn bã thải rẻ tiền của nhà máy sản xuất nhôm vừa mang lại hiệu quả kinh tế cao, vừa góp phần bảo vệ môi trường.

Tài liệu tham khảo

- [1] E. M. Aryslova, A. V. Alfimov, S. A. Chivilikhin, Modelling the Growth Process of Porous Aluminum Oxide Film During Anodization, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 643, 2015.
- [2] A. Yin, R. S. Guico, J. Xu, Fabrication of Anodic Aluminum Oxide Templates on Curved Surfaces, Nanotechnology, Vol. 18, 2007.
- [3] N. M. Chelliah et al., Surface Characterization of Nanoporous Aluminum Oxide Films Synthesized by Single-step DC and AC Anodization, Surfaces and Interfaces, Vol. 7, 2017, pp. 139-145.
- [4] M. S. Ilango et al., Anodization of Aluminium using a Fast Two-step Process, Journal of Chemical Sciences, Vol. 128, 2016, pp. 153-158.
- [5] A. E. Kassa et al., Synthesis of Polyaluminum Chloride: Optimization of Process Parameters, Characterization and Performance Investigation for Water Treatment, Journal of Water Process Engineering, Vol. No. 57, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104700>.
- [6] V. Dumitrascu, L. Benea, E. Danaila, Corrosion Behavior of Aluminium Oxide Film Growth by Controlled Anodic Oxidation, Material Science and Engineering, Vol. 209, 2017.
- [7] M. K. Alam, J. Zanganeh, B. Moghtaderi, The Composition, Recycling and Utilisation of Bayer Red Mud, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 141, 2019, pp. 483-498.
- [8] V. V. Kondratiev et al., Review of Methods of Waste Lining Processing from Aluminum Electrolyzers, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, 2016, pp. 11374-11381.
- [9] A. Y. A. Mohamed et al., Physiochemical Treatment of Wastewater Utilizing Polyaluminum Chloride for Khartoum North Wastewater Effluent, University of Khartoum Engineering Journal, Vol. 7, No. 1, 2017, pp. 44-51.
- [10] F. Li et al., Preparation and Performance of a High Purity Poly-aluminum Chloride, Chemical Engineering Journal, Vol. 156, No. 1, 2010, pp. 64-69.
- [11] X. Tang et al., An Alternative Method for Preparation of Polyaluminum Chloride Coagulant using Fresh Aluminum Hydroxide Gels: Characterization and Coagulation Performance, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 104, 2015, pp. 208-217.
- [12] H. Y. Hanan et al., Synthesis of Polyaluminum Chloride Coagulant from Waste Aluminum Foil and Utilization in Petroleum Wastewater Treatment, Advances in Materials for Separations: Energy and Environment, Vol. 10, 2023.
- [13] A. I. Zouboulis, N. Tzoupanos, Alternative Cost-Effective Preparation Method of

- Polyaluminium Chloride (PAC) Coagulant Agent: Characterization and Comparative Application for Water/Wastewater Treatment, Desalination, Vol. 250, No. 1, 2010, pp. 339-244.
- [14] F. M. Mohamed et al., Novel Method of Poly Aluminum Chloride Extraction from Kaolin and its Application for Wastewater Treatment, Desalination and Water Treatment, Vol. 317, 2024.
- [15] N. Kumar, N. Balasundaram, Efficiency of PAC in Water Treatment Plant & Disposal of its Sludge, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12, 2017, pp. 3253-3262.