NGHIÊN CỨU TIỀN XỬ LÝ MẪU VÀ LỰA CHỌN ĐIỀU KIỆN THÍCH HỢP CHO QUÁ TRÌNH HÒA TÁCH NHÔM (AL) TỪ TẤM PIN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

Nguyễn Thành Trung*, Trịnh Kim Yến
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội

Tóm tắt

Bài báo này trình bày kết quả thực nghiệm về quá trình tiền xử lý mẫu và hòa tách kim loại nhôm (Al) từ các tấm pin năng lượng mặt trời. Trong nghiên cứu này, tấm pin năng lượng mặt trời được làm sạch bề mặt, cắt nhỏ và tiến hành tiền xử lý nhằm tách tấm kính cường lực ra khỏi bề mặt pin năng lượng mặt trời. Phần còn lại được nung, nghiền nhỏ, thu được bột mịn để tiến hành hòa tách Al. Kết quả thực nghiệm cho thấy quá trình tiền xử lý bằng dung môi Toluen ở 450 °C đã thu được 54,4 % kính cường lực và 12,3 % sợi kim loại, phần còn lại dạng bột chiếm 33,3 %. Mẫu sau khi tiền xử lý được hòa tách bằng dung dịch NaOH 5 M theo phương pháp vô cơ hóa ướt. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng tỷ lệ rắn/lỏng (R:L) phù hợp là 1 g mẫu/15 mL NaOH 5 M, đạt hiệu suất hòa tan 65,5 %. Thời gian hòa tan được lựa chọn là 60 phút ở nhiệt độ 60 °C, cho hiệu suất hòa tan đạt 76,2 %.

Từ khóa: Pin năng lượng mặt trời; Hòa tách nhôm (Al); Tiền xử lý.

Abstract

Study on sample pre-treatment and selection of optimal conditions for aluminum (Al) leaching from solar panel modules

This paper presents the experimental results on the sample pre-treatment process and aluminum (Al) extraction from solar panel modules. In this study, the solar panel modules were cleaned, cut into small pieces, and pre-treated to separate the tempered glass from the surface of the solar panel modules. The remaining material was then heated, ground into fine powder, and used for aluminum extraction. Experimental results show that the pre-treatment process with Toluene solvent at 450 °C resulted in 54.4 % tempered glass and 12.3 % metal fibers, with the remaining powder accounting for 33.3 %. The pre-treated samples were then subjected to aluminum extraction using a NaOH 5 M solution through wet inorganic dissolution. The research indicates that the optimal solid-to-liquid (S:L) ratio is 1 g sample/15 mL NaOH 5 M, achieving a dissolution efficiency of 65.5 %. The chosen dissolution time was 60 minutes at 60 °C, yielding a dissolution efficiency of 76.2 %.

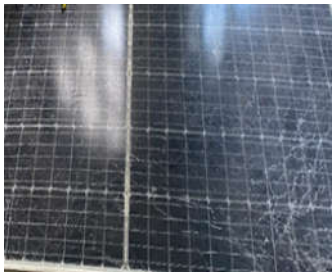
Keywords: Solar Panel Modules; Aluminum extraction; Pre-treatment process.
BBT nhận bài: 14/5/2025; Phản biện xong: 05/6/2025; Chấp nhận đăng: 27/6/2025
*Tác giả liên hệ, Email: nttrung@hunre.edu.vn
DOI: http://doi.org/10.63064/khtnmt.2025.689

1. Đặt vấn đề

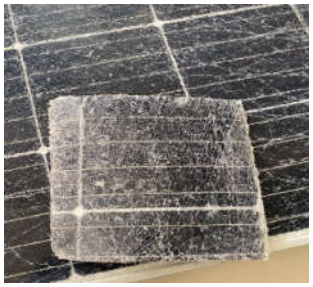
Trước tình trạng ô nhiễm môi trường và thiếu hụt năng lượng, nhiều quốc gia ưu tiên phát triển các công nghệ năng lượng sạch và tái tạo, vì thế công nghệ sản xuất điện từ năng lượng mặt trời được coi là một trong những công nghệ sản xuất năng lượng đầy hứa hẹn và phát triển trong những năm gần đây [1]. Trong thập kỷ qua, công nghệ điện mặt trời (ĐMT) đã trở thành một giải pháp quan trọng trong chiến lược phát triển năng lượng bền vững của nhiều quốc gia. Việc xây dựng các nhà máy ĐMT quy mô lớn đã dẫn đến sự gia tăng số lượng tấm pin năng lượng mặt trời (PMT) cũ bị thải bỏ khi không còn hiệu quả sử dụng. Điều này tạo ra một lượng lớn chất thải rắn, trong đó số lượng PMT hết hạn sử dụng hoặc bị hư hỏng đang ngày càng gia tăng. Tuổi thọ trung bình của tấm pin mặt trời là khoảng 25 - 30 năm, chính vì vậy lượng chất thải tạo ra từ nhà máy ĐMT là rất đáng kể [2]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, thành phần chính của tấm PMT thải bao gồm: Kính cường lực (61 - 63 %); Hợp kim nhôm (11 - 13 %); Hộp nối, dây dẫn điện (10 - 13 %); EVA (6 - 8 %), nhựa nền (xấp xỉ 3 %) và tế bào quang điện (3 - 4 %) [3, 4]. Trong tế bào quang điện có chứa nhiều kim loại có giá trị như Al, Ag, Cu, cũng như các kim loại độc hại như Pb, Cr, As. Các kim loại này có thể gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến môi trường nếu không được quản lý và xử lý đúng cách [5]. Xuất phát từ những vấn đề nêu trên mục đích của nghiên cứu này nhằm đưa ra quy trình tiền xử lý PMT và xác định điều kiện phù hợp để hòa tách nhôm (Al) trong PMT. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp thông tin khoa học và cơ sở dữ liệu cần thiết cho quá trình tái chế và thu hồi kim loại từ các tấm pin năng lượng mặt trời

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Tiền xử lý mẫu



a. PMT (1,2 × 1,5 m)



b. PMT (5 × 5 cm)

c. Ngâm trong Toluen

d. Mẫu sau khi nung

e. Mẫu sau khi tách

f. Mẫu bột mịn

Hình 1: Mẫu pin năng lượng mặt trời sau quá trình tiền xử lý

Tấm PMT ban đầu có kích thước 1,2 × 1,5 m đã được bóc tách khung bảo vệ, được làm sạch bề mặt, sau đó cắt thành các tấm nhỏ có kích thước 5 × 5 cm. Các mẫu này được ngâm trong dung dịch Toluen, tiếp theo đó được nung ở nhiệt độ 450 ^{o}C trong thời gian 60 phút.

Sau quá trình nung, mẫu được tách riêng lớp kính cường lực, thu hồi các sợi hợp kim nhôm, phần còn lại là bản mạch được nghiền nhỏ bằng thiết bị nghiền cối đến kích thước hạt nhỏ hơn 0,25 mm. Mẫu bột được sử dụng cho các thí nghiệm khảo sát nhằm tối ưu hóa quá trình hòa tách nhôm [6, 7]. Các bước tiền xử lý mẫu được trình bày trong sơ đồ (Hình 1).

2.2. Bố trí thí nghiệm hòa tách nhôm

- Khảo sát hàm lượng một số kim loại trong mẫu ban đầu

Mẫu bột PMT sau khi được nghiền nhỏ đến kích thước hạt < 0,25 mm được sử dụng để phân tích hàm lượng một số kim loại như Al, Ag, Cu và Pb. Phép phân tích được thực hiện bằng kỹ thuật phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) [8].

- Khảo sát lựa chọn nồng độ NaOH trong quá trình hòa tan Al

+ Quá trình khảo sát được thực hiện với 5 mức nồng độ dung dịch NaOH: 0,1 M; 0,5 M; 1 M; 5 M và 10 M. Mỗi mẫu được hòa tan trong 10 mL dung dịch, gia nhiệt ở 90 ^{o}C trong 45 phút và khuấy đều liên tục. Sau phản ứng, hỗn hợp được lọc, tráng rửa và định mức bằng nước khử ion.

+ Tỷ lệ giữa khối lượng mẫu rắn (gam) và thể tích dung dịch (mL) được khảo sát với bốn mức: 1:5, 1:10, 1:15 và 1:20. Mỗi tỷ lệ được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng đến hiệu suất hòa tan nhôm trong điều kiện giữ nguyên các thông số khác.

+ Thời gian phản ứng được khảo sát với các mức: 15 phút, 30 phút, 45 phút, 60 phút và 90 phút, nhằm xác định thời điểm tối ưu cho quá trình hòa tách.

+ Quá trình hòa tan được thực hiện ở bốn mức nhiệt độ: 45 ^{o}C, 60 ^{o}C, 90 ^{o}C và 120 ^{o}C để xác định nhiệt độ tối ưu cho phản ứng.

Trong mỗi thí nghiệm, một lượng mẫu được cân chính xác với sai số ± 0,0001 g, sau đó thực hiện quá trình hòa tan theo phương pháp vô cơ hóa ướt. Hỗn hợp sau phản ứng được lọc chân không bằng giấy lọc chịu axit có kích thước lỗ 45 μm.

- Xác định hàm lượng nhôm (Al)

Dung dịch thu được sau quá trình lọc trong thí nghiệm hòa tan được sử dụng để phân tích hàm lượng nhôm (Al) tại Phòng thí nghiệm Môi trường, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội, phép phân tích được thực hiện bằng kỹ thuật quang phổ phát xạ plasma cảm ứng cao tần (ICP-OES - Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) theo EPA Method 6010D [9].

2.3. Phương pháp xử lý số liệu

** Hàm lượng nhôm (Al) có trong PMT:*

$$Y = \frac{C \times V}{W} \times 100\ (\%)$$

trong đó: - Y là hàm lượng Al trong mẫu phân tích (%)

- C là nồng độ Al có trong mẫu (g/L)

- V là thể tích dung dịch lọc (L)

- W là khối lượng của mẫu đem hòa tách (g)

** Hiệu suất hòa tách nhôm (Al):*

$$H = \frac{M_s}{M_t} \times 100\ (\%)$$

trong đó: - H là hiệu suất hòa tách kim loại Al ra khỏi PMT (%)

- M_s là khối lượng kim loại thu được sau khi hòa tách (g)

- M_t là khối lượng kim loại có trong mẫu ban đầu (g)

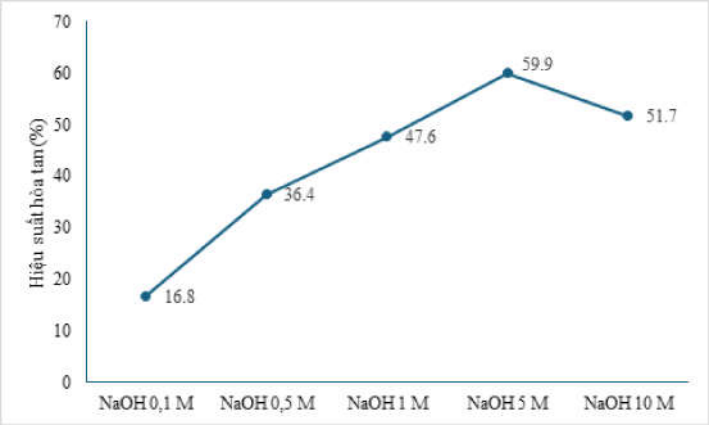
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả tiền xử lý phân tách một số thành phần trong pin năng lượng mặt trời

Khi ngâm mẫu trong dung môi Toluene, lớp nhựa EVA (Ethylene Vinyl Acetate) bị phồng lên, làm suy yếu liên kết giữa lớp kính cường lực và bề mặt tấm PMT. Nhờ đó, quá trình tiền xử lý đã tách được 54,4 % kính cường lực và 12,3 % sợi kim loại. Phần còn lại, chiếm 33,3 %, bao gồm đế bản mạch, tế bào quang điện và phần nhựa EVA chưa loại bỏ hoàn toàn. Kết quả cho thấy các kim loại có giá trị chủ yếu tập trung trong phần tế bào quang điện. Do đó, để tách nhôm (Al), phần còn lại sau tiền xử lý được nghiền mịn đến kích thước hạt < 0,25 mm và tiến hành hòa tan trong dung dịch NaOH. Dung dịch sau hòa tan được đem phân tích hàm lượng Al bằng kỹ thuật ICP-OES.

3.2. Khảo sát lựa chọn nồng độ NaOH để hòa tan Al trong PMT

Hiệu suất hòa tan nhôm (Al) phụ thuộc đáng kể vào nồng độ dung dịch NaOH sử dụng. Kết quả thí nghiệm cho thấy, tại nồng độ NaOH 0,1 M, khả năng hòa tan Al rất thấp, hiệu suất thu được chỉ đạt 16,8 %. Khi nồng độ NaOH tăng, hiệu suất hòa tan cũng tăng theo tỷ lệ thuận. Giá trị hiệu suất hòa tan Al đạt cao nhất là 59,9 % tại nồng độ 5 M. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng nồng độ lên 10 M, hiệu suất hòa tan không tăng thêm mà có xu hướng giảm nhẹ. Nguyên nhân có thể do sự hình thành một lớp màng mỏng trên bề mặt nhôm, cản trở sự tiếp xúc giữa dung dịch và vật liệu, làm chậm quá trình hòa tan (Hình 2).

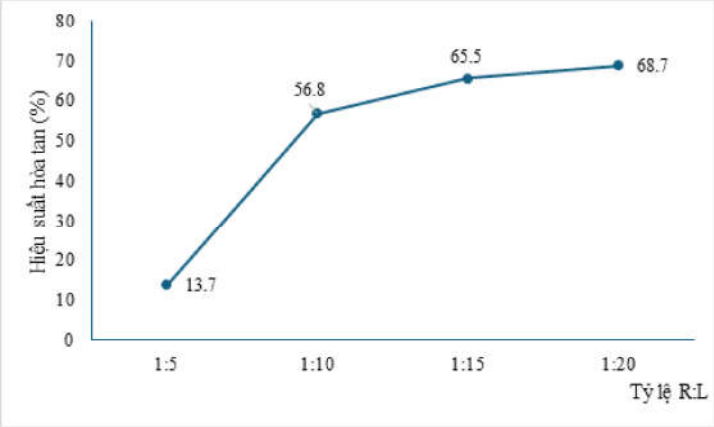


Hình 2: Kết quả khảo sát ảnh hưởng của nồng độ NaOH đến khả năng hòa tan Al

3.3. Khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ rắn/lỏng (R:L)

Kết quả thực nghiệm cho thấy, hiệu suất hòa tan nhôm (Al) tăng lên khi tỷ lệ rắn/lỏng (R:L) được điều chỉnh. Khi tỷ lệ R:L là 1:5, hiệu suất hòa tan Al đạt 13,7 %. Khi tăng tỷ lệ R:L lên 1:10, hiệu suất hòa tan đạt 56,8 %. Tại tỷ lệ R:L là 1:15, hiệu suất hòa tan tăng lên 65,5 %. Hiệu suất hòa tan Al cao nhất đạt 68,7 % tại tỷ lệ R:L là 1:20.

Tuy nhiên, sự khác biệt về hiệu suất giữa tỷ lệ R:L là 1:15 và 1:20 là không đáng kể. Do đó, để đảm bảo phản ứng ổn định và hiệu quả, tỷ lệ R:L thích hợp cho nghiên cứu được chọn là 1:15 (Hình 3).

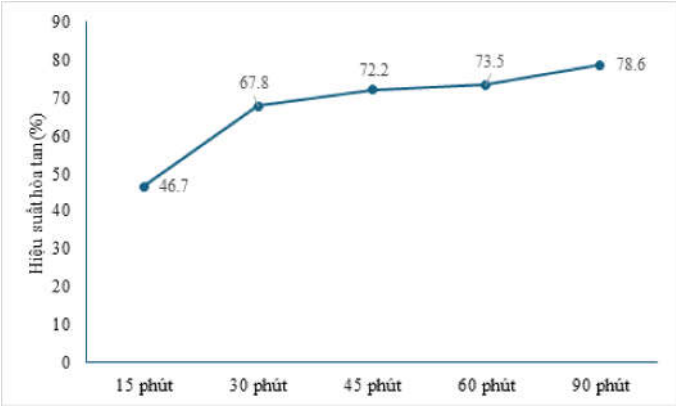


Hình 3: Ảnh hưởng tỷ lệ R:L đến hiệu suất hòa tan Al

3.4. Khảo sát ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hòa tan

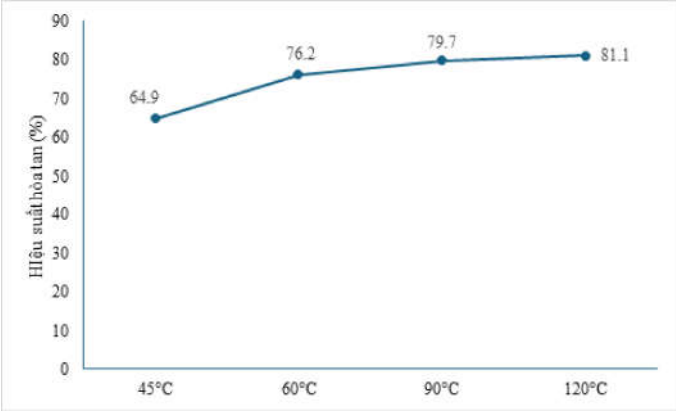
Kết quả khảo sát cho thấy hiệu suất hòa tan nhôm (Al) tỷ lệ thuận với thời gian hòa tan mẫu. Sau 15 phút, hiệu suất hòa tan chỉ đạt 46,7 %. Sau 45 phút, hiệu suất tăng lên 72,2 %. Tiếp theo, sau 60 phút, hiệu suất đạt 73,2 %, và sau 90 phút, hiệu suất cao nhất là 78,6 %.

Mặc dù hiệu suất hòa tan tăng theo thời gian, tuy nhiên, để tối ưu hóa quá trình và giảm thiểu thời gian, chi phí và năng lượng tiêu thụ, thời gian hòa tan 45 phút được chọn là tối ưu cho nghiên cứu (Hình 4).



Hình 4: Ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hòa tan Al

3.5. Khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ đến hiệu suất hòa tan



Hình 5: Ảnh hưởng của nhiệt độ đến hiệu suất hòa tan Al

Từ các kết quả thực nghiệm cho thấy, tại nhiệt độ 45 °C hiệu suất hòa tan Al chỉ đạt 64,9 %. Khi nhiệt độ tăng lên là 60 °C hiệu suất hòa tan tăng đáng kể đạt 76,2 %. Tại 90 °C hiệu suất chỉ tăng không đáng kể đạt 79,7 % và ở nhiệt độ 120 °C hiệu suất hòa tan Al đạt 81,1 %. Như vậy, có thể thấy rằng khi nhiệt độ càng cao, tốc độ phản ứng càng nhanh, dẫn đến lượng Al trong mẫu được hòa tan càng nhiều. Tuy nhiên, việc sử dụng nhiệt độ cao cũng làm tăng năng lượng tiêu hao và chi phí, do đó nhiệt độ 60 °C được chọn là phù hợp cho nghiên cứu (Hình 5).

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng quy trình tiền xử lý tấm PMT bằng dung môi Toluen, nung mẫu ở 450 °C trong 60 phút. Kết quả thu được 54,4 % kính cường lực; 12,3 % sợi kim loại và 33,3 % là tế bào quang điện và EVA.

Từ mẫu bột PMT, nghiên cứu đã khảo sát và lựa chọn được điều kiện thích hợp để hòa tan nhôm (Al) có trong PMT. Hóa chất hòa tan được chọn là NaOH 5 M, với hiệu suất hòa tan đạt 59,9 %. Tỷ lệ rắn/lỏng (R:L) phù hợp được chọn là 1g mẫu/15 mL dung dịch NaOH 5 M, mang lại hiệu suất hòa tan 65,5 %. Thời gian hòa tan tối ưu là 60 phút ở nhiệt độ 60 °C, với hiệu suất hòa tan đạt 76,2 %. Kết quả thu được của nhóm nghiên cứu cũng tương đồng với công bố của nhóm tác giả Punathil et al., khi sử dụng dung dịch NaOH 10 M ở nhiệt độ 63 °C để hòa tách nhôm (Al) trong pin năng lượng mặt trời, với hiệu suất đạt khoảng 76 % [10].

Với các kết quả thực nghiệm trên, có thể khẳng định rằng quy trình xử lý và hòa tan kim loại nhôm trong PMT là phù hợp, phục vụ hiệu quả cho các nghiên cứu tinh chế và thu hồi kim loại nhôm từ dung dịch hòa tan.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C., (2018). *Global status of recycling waste solar panels: A review*. Waste management, 75, 450 - 458.

[2]. S. Weckend, A. Wase, and G. Heath (2016). *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA).

[3]. Hà Vĩnh Hưng, Huỳnh Trung Hải, Trần Phương Hà, Vũ Minh Trang, Đào Duy Nam, Nguyễn Đức Quảng (2023). *Pin năng lượng mặt trời thải: Thành phần nguy hại và định hướng xử lý*. Tạp chí Môi trường, 6, 6 - 7,12.

[4]. Jung, B.; Park, J.; Seo, D.; Park, N., (2016). *Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: From noble-metal extraction to lead removal*. ACS Sustain. Chem. Eng. 2016, 4, 4079 - 4083.

[5]. Chen, W. S., Chen, Y. J., Lee, C. H., Cheng, Y. J., Chen, Y. A., Liu, F. W., & Chueh, Y. L. (2021). *Recovery of valuable materials from the waste crystalline-silicon photovoltaic cell and ribbon*. Processes, 9(4), 712.

[6]. Huỳnh Trung Hải, Hà Vĩnh Hưng, Nguyễn Đức Quảng (2016). *Tái sử dụng và tái chế chất thải*. Nxb. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội (99 - 106).

[7]. Nguyễn Thành Trung, Lê Thu Thủy (2019). *Nghiên cứu lựa chọn điều kiện thích hợp cho quá trình hòa tan kim loại đồng trong bản mạch điện tử thải*. Tạp chí phân tích Hóa, Lý và Sinh học - Tập 24, Số 4A/2019, 97 - 100.

[8]. ASTM F1375-92 (2005). *Standard test method for Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDX) Analysis of Metallic Surface Condition for Gas Distribution System Components*.

[9]. EPA Method 6010D: *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)*.

[10]. Punathil, L., Mohanasundaram, K., Tamilselavan, K. S., Sathyamurthy, R., & Chamkha, A. J., (2021). *Recovery of pure silicon and other materials from disposed solar cells*. International Journal of Photoenergy.