

CHÌ CŨ CHO NĂNG LƯỢNG MỚI: GIẢI PHÁP TÁI CHẾ BÌNH ẮC QUY CHÌ-AXIT VÌ MỘT TƯƠNG LAI BỀN VỮNG

Trần Thị Dung
Khoa điện, Trường Cao đẳng Việt Đức Nghệ An

Tóm tắt: Bài báo trình bày quá trình tái chế chì từ bình ắc quy chì-axit đã qua sử dụng nhằm hướng tới một mô hình kinh tế tuần hoàn trong ngành năng lượng. Với sự phát triển của phương tiện giao thông điện và hệ thống lưu trữ năng lượng, nhu cầu sử dụng ắc quy tăng mạnh, kéo theo lượng chất thải nguy hại từ chì cũng gia tăng. Việc tái chế chì không chỉ giúp thu hồi vật liệu quý giá và còn góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường và tiết kiệm tài nguyên. Bài viết phân tích quy trình tái chế hiện nay, các phương pháp xử lý chì hiệu quả, và đề xuất giải pháp nâng cao hiệu quả, an toàn trong thu hồi chì từ ắc quy cũ. Những kết quả này có ý nghĩa thiết thực trong việc phát triển năng lượng sạch, bền vững và bảo vệ sức khỏe cộng đồng.

Từ khóa: Tái chế pin, tái chế chì, công nghệ xử lý chất thải, năng lượng tái tạo, kinh tế tuần hoàn, EPR (Trách nhiệm mở rộng của nhà sản xuất), môi trường bền vững.

OLD LEAD FOR NEW ENERGY: LEAD-ACID BATTERY RECYCLING SOLUTIONS FOR A SUSTAINABLE FUTURE

Tran Thi Dung
Faculty of Electrical Engineering, Viet Duc College, Nghe An

Abstract: This paper presents the process of recycling lead from used lead-acid batteries, aiming to promote a circular economy model in the energy sector. With the growing development of electric vehicles and energy storage systems, the demand for batteries has increased significantly, leading to a surge in hazardous lead-containing waste. Recycling lead not only enables the recovery of valuable materials but also contributes to reducing environmental pollution and conserving natural resources. The article analyzes current recycling processes, effective lead treatment methods, and proposes solutions to enhance efficiency and safety in lead recovery from spent batteries. These findings are practically significant for the development of clean, sustainable energy and the protection of public health.

Keywords: Battery recycling, lead recycling, waste treatment technology, renewable energy, circular economy, EPR (Extended Producer Responsibility), sustainable environment.

Nhận bài: 05/07/2025

Phản biện: 08/08/2025

Duyệt đăng: 12/08/2025

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ắc quy chì-axit là một trong những nguồn tích trữ điện năng lâu đời và phổ biến nhất trong ngành công nghiệp và dân dụng. Với sự bùng nổ của ngành công nghiệp ô tô, đặc biệt là xe điện, lượng ắc quy thải ra môi trường sau khi hết vòng đời ngày càng tăng. Chì – nguyên tố chính trong ắc quy – tuy có giá trị tái sử dụng cao nhưng cũng là một kim loại nặng độc hại, có thể gây ô nhiễm nghiêm trọng đất, nước, không khí và ảnh hưởng đến sức khỏe con người nếu không được xử lý đúng cách.

Vì vậy, tái chế chì từ bình ắc quy đã qua sử dụng vừa mang ý nghĩa môi trường, vừa đem lại hiệu quả kinh tế, hướng đến mô hình “Năng lượng mới từ chì cũ”. Bài báo tập trung làm rõ vai trò của tái chế chì trong nền kinh tế tuần hoàn, đồng thời đánh giá các công nghệ xử lý hiện có và đề xuất các giải pháp khả thi trong điều kiện Việt Nam.

II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

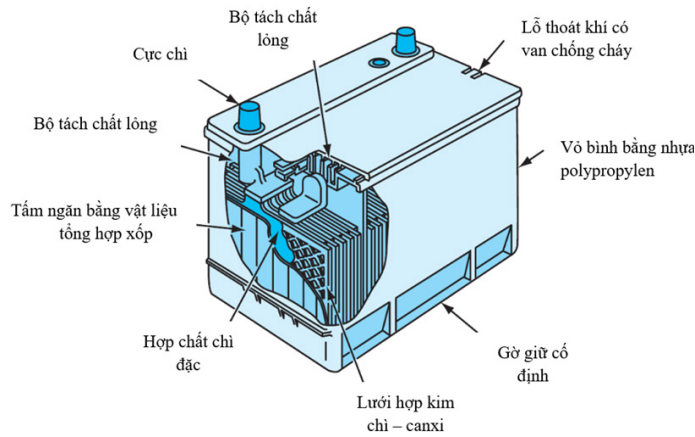
2.1. Cấu tạo và thành phần ắc quy chì-axit

Sự phát triển mạnh mẽ của công nghiệp hóa và đô thị hóa kéo theo nhu cầu sử dụng ắc quy ngày càng lớn. Bình ắc quy axit–chì chiếm hơn 85% thị phần lưu trữ năng lượng trong các lĩnh vực vận tải, điện mặt trời, và thiết bị công nghiệp. Tuy nhiên, ắc quy sau khi thải bỏ lại chứa nhiều thành phần độc hại như chì (Pb), axit sulfuric (H_2SO_4) và nhựa PVC, gây nguy cơ ô nhiễm nghiêm trọng nếu không được xử lý đúng quy trình.

Trong bối cảnh nền kinh tế tuần hoàn đang được đẩy mạnh, việc tái chế ắc quy không chỉ là trách nhiệm môi trường, mà còn mở ra cơ hội thu hồi tài nguyên giá trị – đặc biệt là chì nguyên chất, phục vụ cho sản xuất mới và các ngành công nghệ cao.

Cấu trúc và thành phần chính của bình ắc quy

Ắc quy axit–chì là loại thiết bị lưu trữ điện hóa học hoạt động dựa trên phản ứng oxi hóa–khử giữa các tấm chì và dung dịch điện phân. Cấu trúc của bình ắc quy được thiết kế để vừa đảm bảo khả năng dẫn điện, hóa học ổn định, vừa có tính cơ học cao.



Cấu trúc và thành phần chính của bình ắc quy

Ắc quy chì-axit bao gồm các thành phần chính như:

Tấm cực âm (Pb) và cực dương (PbO_2)

Dung dịch điện phân là axit sulfuric (H_2SO_4)

Vỏ bình bằng nhựa polypropylene (PP)

Tấm ngăn, tấm cách, thanh nối, cực đầu ra,...

Trong chu trình hoạt động, chì đóng vai trò tích và phóng điện thông qua phản ứng điện hóa giữa Pb và PbO_2 . Sau nhiều chu kỳ nạp xả, ắc quy giảm hiệu năng và trở thành chất thải. Tuy nhiên, chì trong ắc quy cũ có thể được thu hồi với hiệu suất lên đến 95% nếu được tái chế đúng quy trình.

2.1.2. Tấm cực âm và cực dương

Thành phần: chủ yếu là chì nguyên chất (Pb) hoặc hợp kim chì-antimony (Pb-Sb), một số loại có thêm calcium (Pb-Ca) để cải thiện độ bền.

Chức năng: là nơi diễn ra phản ứng điện hóa, tạo và tích trữ dòng điện thông qua quá trình chuyển đổi hóa trị của chì ($\text{Pb}^0 \leftrightarrow \text{Pb}^{2+}$).

Tỷ trọng: chiếm khoảng 60–75% khối lượng của bình ắc quy.

Giá trị tái chế: rất cao – chì có thể được nấu chảy, tinh luyện và tái sử dụng nhiều lần mà không mất tính chất vật lý. Chì thu hồi có thể dùng cho sản xuất ắc quy mới, vật liệu chống bức xạ, hợp kim công nghiệp,...

2.1.2. Dung dịch điện phân

Thành phần: dung dịch axit sulfuric (H_2SO_4) loãng, nồng độ khoảng 30–40%.

Chức năng: đóng vai trò truyền ion giữa hai điện cực trong quá trình sạc/xả điện, tạo môi trường cho phản ứng điện hóa diễn ra.

Đặc tính nguy hại: có tính ăn mòn cao và gây ô nhiễm môi trường, nếu không xử lý sẽ phá hủy lớp đất và ô nhiễm nguồn nước.

Giải pháp xử lý, gồm: trung hòa hóa học bằng kiềm (NaOH , Ca(OH)_2), thu hồi sau khi lọc và điều chỉnh pH, và tái chế để sản xuất phân bón

sunfat theo mô hình kinh tế tuần hoàn.

2.1.3 Vỏ bình (hộp chứa)

Chất liệu: thường làm bằng nhựa polypropylene (PP), một số loại cũ sử dụng PVC.

Chức năng: bảo vệ các tấm cực và chứa toàn bộ dung dịch điện phân; chống ăn mòn hóa học, va đập cơ học.

Giá trị tái chế: Có thể nghiền nhỏ, rửa sạch, tái tạo hạt nhựa tái chế để sử dụng trong sản xuất công nghiệp như: thùng nhựa, hộp kỹ thuật, chi tiết máy, ... Nhựa PP khi tái chế có chất lượng ổn định, dễ tạo hình.

2.1.4. Tấm ngăn (separator) và phụ kiện

Tấm ngăn bằng nhựa PE, PVC mềm hoặc cao su tổng hợp, có chức năng cách điện và giữ khoảng cách giữa các tấm cực, đồng thời cho phép ion đi qua. Khả năng tái chế thấp hơn PP, nhưng vẫn có thể dùng cho sản phẩm nhựa kỹ thuật thấp cấp.

2.1.5. Thực trạng xử lý ắc quy chì-axit thải tại Việt Nam

Tại Việt Nam, phần lớn ắc quy thải được tái chế thủ công, gây ô nhiễm đất, nước, không khí và đe dọa sức khỏe cộng đồng, đặc biệt tại làng nghề Đông Mai (Hưng Yên). Cơ sở xử lý chính quy còn hạn chế, chính sách EPR triển khai chậm, thiếu hệ thống thu gom đồng bộ và xảy ra cạnh tranh không lành mạnh. Tỷ lệ xử lý an toàn thấp, đòi hỏi khẩn cấp hoàn thiện pháp lý, giám sát chặt chẽ, hỗ trợ công nghệ sạch và phát triển hệ thống thu gom – tái chế theo hướng kinh tế tuần hoàn.

2.2. Công nghệ tái chế hiện nay

Các công nghệ tái chế ắc quy có thể chia làm 3 nhóm:

Tái chế thủ công: phổ biến ở các cơ sở nhỏ, phi chính thức. Gồm các bước phá vỡ vỏ bình, rút axit và nấu chảy chì bằng lò than. Gây ô nhiễm nghiêm trọng do thiếu kiểm soát khí thải và nước thải.

Tái chế cơ học bán tự động: có dây chuyền nghiền, phân loại cơ bản. Có cải thiện về an toàn nhưng vẫn thải khí SO_2 và bụi chì ra môi trường.

Tái chế khép kín hiện đại: tích hợp các công nghệ như thu hồi khí thải, trung hòa axit, lọc bụi chì, hệ thống tự động hóa. Hiệu suất thu hồi chì đạt >95%, đảm bảo yêu cầu môi trường và tiết kiệm năng lượng.

Các bước cơ bản trong quy trình tái chế hiện đại:

Tách rời và phân loại: Bình ắc quy được tháo rời hoặc nghiền nhỏ.

Tách axit: Dung dịch H_2SO_4 được thu hồi để trung hòa hoặc tái sử dụng.

Tách chì: Các tấm chì được nấu chảy trong lò quay, thu hồi thành chì nguyên chất hoặc hợp kim.

Xử lý nhựa: Vỏ nhựa được nghiền, làm sạch và tái chế thành sản phẩm công nghiệp.

2.3. Công nghệ tách rời và tái chế thành phần phi kim

2.3.1. Phương pháp tách rời và phân loại trong quy trình tái chế bình ắc quy axit - chì

Tách rời và phân loại là giai đoạn đầu tiên và then chốt trong chuỗi quy trình tái chế bình ắc quy axit-chì, quyết định đến hiệu suất thu hồi vật liệu và mức độ an toàn trong các bước xử lý tiếp theo. Bài báo trình bày các phương pháp tách rời thủ công và tự động, nguyên lý phân loại theo trọng lực và từ tính, đồng thời phân tích hiệu quả và hạn chế của từng kỹ thuật dưới góc nhìn công nghệ và môi trường.

Bình ắc quy axit-chì sau sử dụng chứa nhiều thành phần có giá trị tái chế như chì, nhựa polypropylene và axit sulfuric. Tuy nhiên, các thành phần này nằm trong một kết cấu liên kết cơ khí chặt chẽ, có tính ăn mòn và chứa nhiều chất thải nguy hại. Do đó, việc tách rời và phân loại các thành phần của bình ắc quy thải là bước tiền xử lý quan trọng, tạo tiền đề cho các công đoạn tái chế vật liệu tiếp theo như xử lý chì, axit và nhựa.

Yêu cầu kỹ thuật của quá trình tách rời, phân loại:

Tách rời hoàn toàn các bộ phận cấu thành: vỏ bình, tấm cực, chất điện phân, tấm ngăn và phụ kiện.

Phân loại theo tính chất vật lý: khối lượng riêng, từ tính, kích thước hạt.

Không gây phát tán chất nguy hại: tránh rò rỉ axit, bụi chì và bùn độc hại.

Phù hợp với quy mô công nghiệp hoặc bán công nghiệp.

2.3.2. Các phương pháp tách rời và phân loại

Tách rời thủ công

Áp dụng phổ biến tại các cơ sở thu gom nhỏ, hộ gia đình hoặc các cơ sở tái chế thủ công.

Quy trình gồm các bước:

- o Rút axit bằng tay hoặc thiết bị hút đơn giản.
- o Dùng cưa tay, dao hoặc máy cắt để mở vỏ bình.
- o Tách từng phần: điện cực, tấm ngăn, vỏ nhựa.

Tách rời cơ khí tự động

Áp dụng tại các nhà máy tái chế quy mô lớn. Phương pháp này sử dụng hệ thống máy nghiền sơ cấp, băng chuyền, máy phân loại.

Quy trình chính gồm:

- Máy cắt hoặc ép phá vỏ: cắt nhanh vỏ nhựa và giải phóng các phần tử bên trong.
- Hệ thống nghiền thô: làm nhỏ hỗn hợp thành các mảnh kích thước 20–80 mm.
- Tách axit sơ cấp: rút axit bằng bơm chân không hoặc để chảy tự nhiên trong quá trình nghiền.

Sau khi nghiền, hỗn hợp vật liệu bao gồm: Hạt nhựa (PP), tấm cực chì và bùn chứa PbO_2 , PbSO_4 , mảnh ngăn bằng vật liệu polymer, bùn lắng axit và cặn vô cơ.

Các kỹ thuật phân loại chính:

a) Phân loại trọng lực (Gravity Separation)

- Dựa trên sự khác biệt về tỷ trọng:
- o Chì ($\sim 11,3 \text{ g/cm}^3$) → lắng xuống đáy.
- o Nhựa ($\sim 0,9 \text{ g/cm}^3$) → nổi trên mặt.

• Thiết bị: bể lắng, bể tách nổi, máng rửa.

b) Phân loại từ tính (Magnetic Separation)

- Loại bỏ các mảnh kim loại sắt (nếu có).
- Thường sử dụng nam châm vĩnh cửu hoặc nam châm điện.

c) Phân loại khí động (Air Classification)

- Dùng dòng khí để tách bụi mịn và vật liệu nhẹ.
- Hữu ích để loại bỏ mảnh nhựa vụn, bụi chì.

d) Sàng phân cấp (Screening)

- Phân loại theo kích thước hạt sau nghiền.
- Hỗ trợ các bước xử lý sau như rửa, tuyển nổi.

Đề xuất quy trình tích hợp

Để đảm bảo hiệu quả kỹ thuật và an toàn môi trường, một quy trình tách rời – phân loại tích hợp phù hợp như sau:

Rút axit: Hút chân không hoặc xả có kiểm soát.

Nghiền sơ cấp: Tách vỏ bình và các thành phần chính.

Tách trọng lực: Thu hồi chì, nhựa và tấm ngăn.

Sàng và phân loại khí động: Loại bỏ bụi, cặn.

Chuẩn bị đầu vào cho các giai đoạn xử lý chuyên biệt: luyện chì, rửa nhựa, xử lý axit.

Phân tách vật liệu từ bình ắc quy đã qua sử dụng là bước khởi đầu thiết yếu trong toàn bộ quy trình tái chế. Các phương pháp tách rời cơ học kết hợp với phân loại vật lý hiện đại cho thấy hiệu quả

vượt trội về tốc độ xử lý, an toàn lao động và mức độ thu hồi vật liệu. Trong bối cảnh tăng cường năng lực tái chế xanh và kinh tế tuần hoàn, đầu tư vào công nghệ phân loại tự động hóa là hướng phát triển bền vững cho ngành tái chế ắc quy tại Việt Nam và khu vực.

2.3.3. Phương pháp xử lý nhựa

Nhựa trong ắc quy chì-axit, chủ yếu là polypropylene (PP), chiếm 10–15% khối lượng và có giá trị tái chế cao. Tuy nhiên, do nhiễm axit, kim loại nặng, bùn thải, quá trình xử lý cần công đoạn làm sạch chuyên biệt.

Thành phần và đặc tính: PP chiếm phần lớn, có tỷ trọng 0,90–0,95 g/cm³, dễ tách bằng trọng lực, nhưng thường bị nhiễm H₂SO₄, bùn chì, tạp chất, có thể lão hóa hoặc giòn vỡ.

Quy trình xử lý

Bước 1 – Tách, phân loại cơ học: Nghiền phá vỡ, tách nhựa bằng phân loại trọng lực (>90% hiệu quả nếu vận hành ổn định).

Bước 2 – Làm sạch hóa lý: Rửa axit, trung hòa bằng kiềm, tẩy kim loại nặng, làm sạch cơ học nhằm giảm chì và sunfat xuống <50 ppm.

Bước 3 – Tái chế và ép đùn: Sấy khô, nấu chảy ở 180–220°C, ép đùn, cắt hạt PP tái chế dùng cho sản phẩm công nghiệp.

2.4. Quy trình xử lý các thành phần chính: axit và chì

Bình ắc quy axit–chì là thiết bị lưu trữ điện hóa sử dụng rộng rãi trong các phương tiện giao thông và hệ thống năng lượng. Bên trong bình ắc quy, axit sulfuric đóng vai trò là dung dịch điện phân, chiếm khoảng 15–25% khối lượng toàn bộ thiết bị. Khi bình ắc quy đến cuối vòng đời, lượng axit còn lại trong bình trở thành một dạng chất thải nguy hại, gây ăn mòn, ô nhiễm nước ngầm và hủy hoại môi trường nếu không được thu hồi và xử lý đúng quy trình. Do đó, việc nghiên cứu và triển khai các phương pháp tách axit hiệu quả là nhu cầu cấp thiết trong hệ thống tái chế khép kín.

Đặc điểm và thành phần axit trong ắc quy thải: Dung dịch axit sulfuric trong bình ắc quy có nồng độ dao động từ 4,2 mol/L đến 5 mol/L, tùy theo mức độ sử dụng và trạng thái sục. Trong bình ắc quy đã qua sử dụng, dung dịch này thường bị nhiễm các sản phẩm phụ như:

- Ion kim loại (Pb²⁺, Sb³⁺, ...),
- Cặn sunfat (PbSO₄),
- Chất hữu cơ hòa tan hoặc bùn lắng điện cực.

Việc tách axit cần đảm bảo loại bỏ tạp chất, tránh ăn mòn thiết bị và đáp ứng tiêu chuẩn đầu ra

nếu muốn tái sử dụng.

2.4.1. Các phương pháp tách và xử lý axit

Axit sulfuric (H₂SO₄) trong ắc quy chì–axit là thành phần nguy hại, chiếm khoảng 15–25% khối lượng bình, cần xử lý hoặc tái sử dụng an toàn. Khi ắc quy hết vòng đời, axit có thể gây ăn mòn, ô nhiễm nguồn nước và môi trường nếu không thu hồi đúng cách. Nồng độ axit trong ắc quy thải thường 4,2–5 mol/L, kèm theo các tạp chất như ion kim loại (Pb²⁺, Sb³⁺), cặn sunfat (PbSO₄), chất hữu cơ hòa tan. Việc tách axit cần loại bỏ tạp chất, tránh ăn mòn thiết bị và đạt tiêu chuẩn đầu ra.

- **Thu hồi axit trực tiếp:** Áp dụng khi nồng độ trên 4 mol/L. Gồm rút axit bằng bơm chân không hoặc thiết bị tháo rút tự động, lọc thô qua cát, than hoạt tính để loại bỏ cặn, điều chỉnh pH cho tái sử dụng. Ưu điểm: tiết kiệm hóa chất, phù hợp dây chuyền khép kín; nhược điểm: đòi hỏi kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt.

- **Trung hòa hóa học:** Phổ biến ở cơ sở thủ công hoặc bán công nghiệp, dùng Ca(OH)₂ tạo kết tủa CaSO₄ hoặc NaOH tạo muối Na₂SO₄. Bùn thạch cao có thể tận dụng hoặc xử lý tiếp. Ưu điểm: thiết bị đơn giản, xử lý nhanh; nhược điểm: sinh nhiều bùn thải, cần xử lý nước thải sau trung hòa.

- **Cô đặc và tái chế:** Ở quy mô lớn, có thể chưng cất áp suất thấp hoặc dùng trao đổi ion, màng lọc nano để tinh chế axit thương phẩm. Ưu điểm: tạo sản phẩm thương mại; nhược điểm: đầu tư cao, cần vật liệu chống ăn mòn.

- **Phương pháp phụ trợ:** Sinh học (vi sinh vật hấp thu ion kim loại), điện hóa (tinh chế axit qua màng điện phân); hiện mới ở giai đoạn nghiên cứu.

Đề xuất quy trình tích hợp xử lý axit: (1) Tách axit bằng bơm chuyên dụng; (2) Lọc sơ bộ; (3) Trung hòa bằng Ca(OH)₂; (4) Tách bùn, xử lý nước thải đạt chuẩn QCVN; (5) Thu hồi axit đạt chuẩn nếu tái sử dụng.

2.4.2. Phương pháp tách chì trong quy trình tái chế bình ắc quy

Tách chì chủ yếu kết hợp phân tách cơ học và luyện kim nhiệt khử, đảm bảo hiệu quả kinh tế và an toàn môi trường.

- **Bước 1 – Nghiền và phân loại cơ học:** Ắc quy được nghiền phá, hỗn hợp sau nghiền phân loại qua sàng rung (tách nhựa, tấm ngăn) và bể lắng hoặc tách trọng lực (chì lắng, nhựa nổi). Kết quả thu được chì, nhựa và chất dẻo tách riêng.

- **Bước 2 – Tách và xử lý chì:**

a) **Phương pháp cơ học + luyện kim:** Thu gom

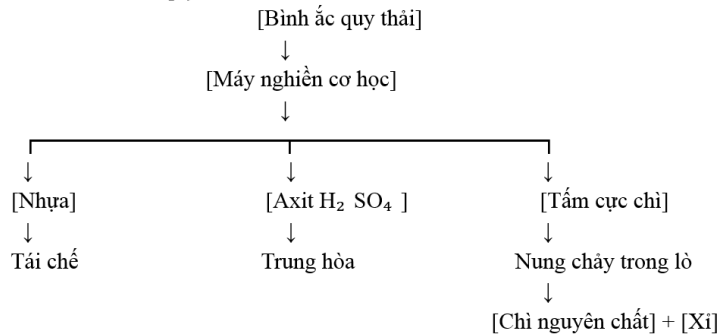
tám cực chứa Pb/PbO₂, đưa vào lò phản xạ hoặc lò quay, thêm than cốc và soda để khử PbO₂ về Pb kim loại và loại tạp chất thành xỉ, sau đó đúc chì thỏi. Ưu điểm: hiệu suất cao, thu hồi chì nguyên chất và hợp kim.

b) Phương pháp hóa học: Ít phổ biến, dùng axit/bazơ mạnh để hòa tan PbO₂, kết tủa Pb²⁺ thành

PbS hoặc hợp chất, sau đó điện phân hoặc nhiệt phân. Nhược điểm: tốn hóa chất, xử lý nước thải phức tạp.

• Bước 3 – Xử lý phần còn lại: Axit được trung hòa bằng Ca(OH)₂ tạo thạch cao dùng lại hoặc chôn lấp; nhựa và vật liệu dẻo được làm sạch, nấu chảy, ép khuôn thành sản phẩm mới.

Sơ đồ minh họa quy trình tái chế và tách chì:



Một số lưu ý an toàn và môi trường:

Quá trình nung luyện tạo ra khí độc CO, SO₂ → cần hệ thống xử lý khí thải.

Xử lý bùn chì và nước rửa đảm bảo không rò rỉ chì ra môi trường.

Phải tuân thủ quy định nghiêm ngặt về chất thải nguy hại và bảo hộ lao động.

Tách chì là công đoạn trọng yếu trong quy trình tái chế bình ắc quy axit-chì, quyết định đến hiệu quả kinh tế và mức độ an toàn môi trường. Phương pháp luyện kim nhiệt khử hiện nay được xem là giải pháp chủ đạo, có tính khả thi cao trong quy mô công nghiệp, đặc biệt khi kết hợp với các bước phân loại cơ học tiên tiến. Bên cạnh đó, việc ứng dụng các công nghệ xử lý phụ trợ (như hóa học hoặc sinh học) vẫn đang được nghiên cứu để tối ưu hóa hiệu suất thu hồi và giảm thiểu tác động môi trường.

2.5. Đề xuất giải pháp

Tăng cường chính sách EPR: buộc nhà sản xuất và nhập khẩu chịu trách nhiệm thu hồi sản phẩm sau sử dụng.

Khuyến khích đầu tư công nghệ khép kín: hỗ trợ tài chính cho các doanh nghiệp xử lý chính quy.

Phát triển chuỗi thu gom thông minh: kết nối từ người dùng cuối đến đơn vị tái chế.

Nâng cao nhận thức người tiêu dùng: truyền thông về tác hại của ắc quy thải và lợi ích tái chế.

III. KẾT LUẬN

Tái chế ắc quy không chỉ là một phương pháp xử lý chất thải mà còn là một chiến lược phục hồi tài nguyên quý giá. Chì – khi được tái chế đúng cách – có thể tái sinh trong các chu trình năng lượng mới, giúp giảm khai thác khoáng sản và góp phần vào phát triển kinh tế tuần hoàn. Để hiện thực hóa điều này, cần sự chung tay giữa doanh nghiệp, nhà nước và cộng đồng nhằm thúc đẩy công nghệ tái chế hiện đại, an toàn và bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2023). Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia.
2. Trần Văn Hiếu (2022). Công nghệ tái chế kim loại từ chất thải nguy hại. NXB Khoa học & Kỹ thuật.
3. UNEP (2021). Global Assessment of Lead Pollution and Recycling.
4. International Lead Association (2020). Lead Battery Recycling Industry Guide.
5. Nguyễn Quang Minh et al. (2021). 'Xử lý chất thải ắc quy chì-axit theo hướng kinh tế tuần hoàn', Tạp chí Kỹ thuật Môi trường, 34(2), 45–52.
6. Chaturvedi, D. et al. (2022). 'Lead-Acid Battery Recycling and Environmental Impact', Journal of Cleaner Production.
7. Đặng Thị Hằng (2020). Ứng dụng công nghệ sinh học trong xử lý kim loại nặng.
8. Tổ chức Y tế Thế giới (WHO). (2020). Lead Poisoning and Health Fact Sheet.