

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

**BẢN GIẢI TRÌNH TIẾP THU, CHỈNH SỬA LUẬN ÁN
CỦA NGHIÊN CỨU SINH THEO Ý KIẾN CỦA PHẢN BIỆN ĐỘC LẬP SỐ 2**

Kính gửi: Viện Tài nguyên và Môi trường, ĐHQGHN

Họ và tên: Trương Mạnh Tuấn Mã NCS: 9440301.04

Công tác tại: Cục Môi trường, Bộ Nông nghiệp và Môi trường.

Tôi đã được công nhận nghiên cứu sinh theo Quyết định số 463/QĐ-TN&MT ngày 02/12/2020 của Viện Tài nguyên và Môi trường về việc công nhận nghiên cứu sinh năm 2020.

Thuộc chuyên ngành: Môi trường và phát triển bền vững

Mã số: 9440301.04

Người hướng dẫn khoa học:

Hướng dẫn chính: GS. TS. Nguyễn Ngọc Minh

Đồng hướng dẫn: TS. Lê Văn Giang

Tháng 9 năm 2025 Hồ sơ Luận án của tôi đã được gửi cho 02 phản biện độc lập để đánh giá. Tôi đã nhận được các ý kiến nhận xét, góp ý rất quý giá của các thành viên của hội đồng. Bản thân đã tiếp thu và nghiêm túc chỉnh sửa luận án, và xin giải trình các điểm đã chỉnh sửa trong luận án như sau:

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
1	Toàn bộ luận án Rà soát tổng thể để sửa các lỗi văn phong và lỗi đánh máy.	Nghiên cứu sinh tiếp thu nội dung này và đã nghiêm túc rà soát lại tổng thể toàn bộ nội dung luận án để chỉnh sửa các lỗi kỹ thuật.
2	Bổ sung giải thích cụ thể lý do chọn công nghệ FBHC, nhấn mạnh các ưu điểm vượt trội so với các phương pháp khác để thu hồi Fe, Al từ bùn đỏ.	Nghiên cứu sinh đã tiếp thu và bổ sung thêm 1 mục 1.5.3 về lý do lựa chọn nghiên cứu công nghệ FBHC tại trang 60 của Luận án, cụ thể: - Chỉ rõ việc lựa chọn công nghệ FBHC cho việc nghiên cứu trong Luận án nhằm giải quyết triệt để các hạn chế của những phương pháp truyền thống

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
		và khai thác tối đa tiềm năng tài nguyên từ bùn đỏ đặc thù của Việt Nam; - So sánh các ưu thế của công nghệ FBHC so với các công nghệ truyền thống dựa trên các khía cạnh gồm: + Hiệu suất thu hồi và chất lượng sản phẩm vượt trội + Loại bỏ vấn đề bùn thải thứ cấp trong quá trình xử lý + Tăng cường hiệu quả quy trình và giảm chi phí đầu tư + Tính bền vững và phù hợp với kinh tế tuần hoàn
3	3.1. Nghiên cứu sinh nên xem lại và bổ sung thêm tổng quan các nghiên cứu trong nước và quốc tế gần đây đến 2025 về công nghệ thu hồi kim loại từ bùn đỏ, đặc biệt là các công nghệ tương tự FBHC hoặc các phương pháp tiên tiến khác. 3.2. Bổ sung bảng hoặc nội dung so sánh định lượng/định tính chi tiết giữa công nghệ FBHC và các phương pháp khác dựa trên các tiêu chí (hiệu suất, chi phí, tác động môi trường, khả năng triển khai).	3.1. Về việc xem xét bổ sung thêm tổng quan các nghiên cứu trong nước và quốc tế gần đây đến 2025 về công nghệ thu hồi kim loại từ bùn đỏ, đặc biệt là các công nghệ tương tự FBHC hoặc các phương pháp tiên tiến khác Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã bổ sung thêm mục 1.4.3 về xu hướng nghiên cứu bùn đỏ thời gian gần đây, đã nêu rõ giai đoạn 2021-2025 chứng kiến một sự chuyển dịch mô hình tư duy mạnh mẽ trong cộng đồng khoa học quốc tế: từ quan điểm xem bùn đỏ là "chất thải cần xử lý" (waste disposal) sang coi đây là một "nguồn tài nguyên thứ cấp" (secondary resource) hay một dạng "mỏ trong đô thị" (urban mining). Cách tiếp cận này hoàn toàn phù hợp với các nguyên tắc của kinh tế tuần hoàn và mục tiêu không rác thải (zero-waste), nhằm tận dụng tối đa giá trị vật chất chứa trong bùn đỏ. Kèm theo nội dung bổ sung là các tài liệu tham khảo bổ sung gồm có các tài liệu số [137], [138]. 3.2. Bổ sung bảng hoặc nội dung so sánh định lượng/định tính chi tiết giữa công nghệ FBHC và các phương pháp khác dựa trên các tiêu chí (hiệu suất, chi phí, tác động môi trường, khả năng triển khai). Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã bổ sung bảng so sánh tại mục 1.5.3 dựa trên các tài liệu tham khảo được nghiên cứu bổ sung gồm có các tài liệu số [133], [134], [135], [136], [139], [140], [141], [142].

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
	3.3. Bổ sung thông tin về thành phần bùn đỏ từ các nhà máy quốc tế (Úc, Brazil, Trung Quốc) để làm rõ tính đại diện của mẫu nghiên cứu. 3.4. Phần đánh giá tổng thể tình hình nghiên cứu về vấn đề thu hồi kim loại nặng từ bùn đỏ bằng FBHC ở trên thế giới và Việt Nam chưa nổi bật, chưa thấy rõ được khoảng trống trong nghiên cứu. Vì thế, cần thêm nội dung vào kết luận của chương 1 tóm tắt đánh giá các nghiên cứu về xử lý bùn đỏ trên thế giới và tại Việt Nam để chỉ ra rằng vấn đề nghiên cứu áp dụng FBHC này còn hạn chế, từ đó cho thấy hạn chế, khoảng trống và khẳng định tính mới của luận án..	3.3. Bổ sung thông tin về thành phần bùn đỏ từ các nhà máy quốc tế (Úc, Brazil, Trung Quốc) để làm rõ tính đại diện của mẫu nghiên cứu. Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã bổ sung thêm nội dung bảng thành phần các loại bùn đỏ của một số quốc gia để so sánh tại trang 86, 87 của Luận án, trong đó đã: - Bổ sung bảng so sánh 3.3. - Bổ sung nội dung đánh giá bình luận: Thành phần các oxit chính trong bùn đỏ Việt Nam hoàn toàn nằm trong phổ biến động của các nhà sản xuất toàn cầu. Đặc biệt, bùn đỏ Việt Nam thuộc nhóm giàu sắt (hàm lượng $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 46\%$), tương tự bùn đỏ từ Úc, và có hàm lượng SiO_2 tương đối thấp ($< 7\%$). Đây là một lợi thế kỹ thuật vì silic thường gây tiêu tốn hóa chất trong các quy trình thủy luyện. Sự tương đồng này khẳng định mẫu nghiên cứu của luận án là một đại diện tiêu biểu cho loại bùn đỏ phổ biến, phát sinh từ quy trình Bayer. Do đó, quy trình công nghệ FBHC được phát triển không chỉ có ý nghĩa cho Việt Nam mà còn có tiềm năng ứng dụng quốc tế, đặc biệt cho các nguồn bùn đỏ có đặc tính tương tự. 3.4. Nghiên cứu sinh xin tiếp thu và đã bổ sung phần tiểu kết Chương 1 (trang 65) cụ thể như sau: “Tổng quan các nghiên cứu cho thấy, các công nghệ xử lý bùn đỏ hiện nay đối mặt với sự đánh đổi cố hữu giữa hiệu quả và tính bền vững. Các phương pháp hòa luyện, dù có hiệu suất thu hồi sắt cao, nhưng bị hạn chế bởi chi phí năng lượng khổng lồ và tác động môi trường tiêu cực. Các phương pháp thủy luyện truyền thống, tuy vận hành ở điều kiện ôn hòa hơn, lại tạo ra một lượng lớn bùn hydroxit kim loại thứ cấp. Loại bùn này có giá trị thương mại thấp, khó xử lý và làm tăng đáng kể chi phí vận hành, trở thành rào cản lớn nhất đối với việc triển khai ở quy mô công nghiệp. Từ đó, khoảng trống nghiên cứu được xác định rõ ràng là sự thiếu vắng một công nghệ có khả năng kết hợp đồng thời ba yếu tố: (1) hiệu suất thu hồi kim loại cao, (2) điều kiện vận hành tiết kiệm năng lượng, và (3) loại bỏ hoàn toàn vấn đề bùn thải thứ cấp bằng cách tạo ra sản phẩm rắn có giá trị thương mại trực tiếp”.

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
4	4.1. Giải thích rõ cơ sở lý thuyết hoặc trích dẫn tài liệu để làm rõ lý do lựa chọn các thông số nghiên cứu (pH, tỷ lệ H_2O_2/Al^{3+}, tốc độ khuấy, tải trọng bề mặt). 4.2. Bổ sung nội dung thảo luận về phương pháp xử lý chất thải thứ cấp (bùn sau hòa tách, nước thải chứa axit). 4.3. Bổ sung phương pháp luận cho việc phân tích chi phí – lợi ích. 4.4. Làm rõ phương pháp chuyên gia: Nêu cụ thể số lượng chuyên gia đã tham vấn và lồng ghép ý kiến của họ vào phần bàn luận ở Chương 3.	4.1. Về cơ sở lựa chọn các thông số nghiên cứu: Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã bổ sung thêm mục d về lựa chọn các thông số nghiên cứu tại mục 2.2.4 của Luận án (trang 78): “Để phát triển một quy trình hóa học từ quy mô phòng thí nghiệm đến ứng dụng công nghiệp, việc lựa chọn và tối ưu hóa các thông số vận hành đóng vai trò quyết định. Luận án này cung cấp một luận giải khoa học và kỹ thuật toàn diện cho việc lựa chọn bốn thông số nghiên cứu then chốt trong luận án: pH, tỷ lệ H_2O_2/Al^{3+}, tốc độ khuấy, và tải trọng bề mặt. Bốn thông số này đại diện cho các cơ chế kiểm soát cơ bản và độc lập, bao gồm: (1) chọn lọc nhiệt động học (pH), (2) kiểm soát động học thông qua trạng thái oxy hóa (tỷ lệ H_2O_2), (3) hiệu quả thủy động và truyền khối (tốc độ khuấy/vận tốc dòng lên), và (4) cường độ và khả năng mở rộng quy mô của quy trình (tải trọng bề mặt)”. 4.2. Bổ sung nội dung thảo luận về phương pháp xử lý chất thải thứ cấp (bùn sau hòa tách, nước thải chứa axit) Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã bổ sung tại mục 3.7 của Luận án: - Xử lý bùn sau hòa tách - Xử lý nước thải sau khi đi qua cột FBHC: Dòng nước thải sau khi đi qua các cột FBHC đã được loại bỏ phần lớn Fe và Al nhưng vẫn còn tính axit và chứa nồng độ cao các muối hòa tan (chủ yếu là Na_2SO_4 từ việc sử dụng H_2SO_4 và NaOH). Một số phương pháp được bổ sung để xử lý gồm: Trung hòa và kết tủa cặn, Khử muối hòa tan (Desalination), loại bỏ sunfat... 4.3. Bổ sung phương pháp luận cho việc phân tích chi phí – lợi ích Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã bổ sung thêm mục 2.2.8 về việc giới thiệu phương pháp này: “Luận án có sử dụng sử dụng là phương pháp phân tích chi phí – lợi ích (Cost–Benefit Analysis, CBA) ở quy mô pilot (thí điểm). Luận án thực hiện tính toán các chi phí trực tiếp (năng lượng bơm, năng lượng sấy, hóa chất NaOH) và các lợi ích kinh tế thu được (doanh thu từ bán sản phẩm

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
		Fe(OH)₃ và Al(OH)₃, cùng với phần chi phí tiết kiệm được từ xử lý nước thải). Phân tích này được mô tả là một dạng “phân tích chi phí – lợi ích ở quy mô pilot”, không nhằm thương mại hóa ngay mà dùng để đánh giá tính định hướng và khả năng mở rộng quy mô. 4.4. Về phương pháp chuyên gia, nội dung luận án nêu rõ: các ý kiến này được tham vấn trong quá trình làm luận án gồm có: - Tham vấn cán bộ tại nhà máy về quy trình hoạt động - Tham vấn các chuyên gia thông qua các cuộc họp chuyên đề, seminar (có các bảng giải trình, bổ sung luận án theo ý kiến của các chuyên gia).
5	5.1. Giải thích sâu hơn kết quả: Không chỉ mô tả, cần giải thích nguyên nhân đạt được kết quả và so sánh với các nghiên cứu trước đây để tăng tính thuyết phục.	5.1. Về các kết quả đạt được, nghiên cứu sinh xin tiếp thu và bổ sung các bình luận về nguyên nhân dẫn tới các kết quả, cụ thể như sau: - Thành phần bùn đỏ có hàm lượng Fe và Al cao, tồn tại ở dạng thuận lợi cho hòa tách: Các mẫu bùn đỏ tại Nhà máy Alumin Tân Rai và Nhân Cơ có hàm lượng Fe₂O₃ đạt ~44,4% và Al₂O₃ ~19,7%, chủ yếu tồn tại dưới dạng hematit, goethit, gibbsite, boehmite, diaspor. Điều này tạo thuận lợi cho quá trình hòa tách chọn lọc Fe và Al, đặc biệt khi dùng tác nhân H₂SO₄ kết hợp H₂O₂ ở nhiệt độ thấp (dưới 80°C), giúp hiệu suất hòa tách cao và ít tạp chất - Tối ưu hóa pH và điều kiện phản ứng trong giai đoạn kết tủa: Fe được thu hồi tối ưu ở pH 3,5–4,0 với hiệu suất ~97,6% và độ tinh khiết 93,4%; Al được thu hồi tối ưu ở pH 6,0–7,0, hiệu suất đạt 99,2%, độ tinh khiết ~98,5%. Việc xác định chính xác vùng pH tối ưu giúp kiểm soát quá trình kết tủa chọn lọc, hạn chế đồng kết tủa của Ca²⁺, Mg²⁺ và hiện tượng tái hòa tan Al trong môi trường kiềm mạnh; - Thiết kế hệ thống FBHC hai cột hoạt động tuần tự: Luận án đã thiết kế hệ thống tầng sôi hai cột, vận hành tuần tự để thu hồi Fe và Al: Fe thu hồi ở pH ≈ 4, thời gian lưu 20–30 phút, Al thu hồi ở pH ≈ 9,5, thời gian lưu chỉ 5 phút. Cấu hình này giúp duy trì độ bão hòa ổn định, tăng tốc độ kết tinh, tạo sản phẩm có kích thước hạt lớn, tinh thể đồng nhất, và giảm thời gian xử lý đáng kể;

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
	5.2. Tăng độ tin cậy của số liệu: Bổ sung thông tin về phân tích thống kê (độ lệch chuẩn, sai số), số lần lặp lại thí nghiệm cho các dữ liệu trong bảng và hình vẽ.	- Ứng dụng công nghệ FBHC tạo điều kiện kết tinh đồng thể: Công nghệ FBHC thúc đẩy quá trình tạo mầm và phát triển tinh thể đồng đều trong dòng tầng sôi do duy trì dòng chảy ổn định, tránh bám dính và kết tụ cục bộ, Kiểm soát tốt nhiệt độ, pH và tải bề mặt, Hình thành tinh thể $\text{Fe}(\text{OH})_3$ hình cầu và $\text{Al}(\text{OH})_3$ dạng bayerit có cấu trúc lõi-vỏ, dễ lọc và rửa sạch. Đây là nguyên nhân quan trọng giúp tăng hiệu suất thu hồi lên tới 99,9% (Fe) và 99,6% (Al); - Kiểm soát tốt yếu tố nhiễu và tối ưu hóa vận hành: Các yếu tố ảnh hưởng (nồng độ ion Ca^{2+}, Mg^{2+}, tốc độ dòng, HRT, pH) được phân tích định lượng và hiệu chỉnh theo mô hình tầng sôi, giúp ổn định kết tinh và tránh kết tủa tạp chất. 5.2. Tăng độ tin cậy của số liệu: nghiên cứu sinh xin tiếp thu và đã bổ sung độ lệch chuẩn tại Bảng 3.1 và nội dung nhận định tại mục 3.1.2, cụ thể: Kết quả phân tích thành phần oxit chính của mẫu bùn đỏ trong nghiên cứu cho thấy sự tương đồng rõ rệt với các kết quả đã được công bố cho bùn đỏ Tân Rai và Nhân Cơ, đặc biệt ở các thành phần chủ đạo như Fe_2O_3, Al_2O_3 và TiO_2. Hàm lượng Fe_2O_3 dao động quanh 44–46 %, phản ánh đặc trưng giàu sắt của bùn đỏ Bayer tại khu vực Tây Nguyên. Hàm lượng Al_2O_3 và TiO_2 cũng nằm trong giới hạn sai khác cho phép (dưới $\pm 15\%$), cho thấy tính nhất quán về bản chất khoáng hóa của nguồn nguyên liệu. Một số sai khác được ghi nhận ở SiO_2, Na_2O và CaO được giải thích hợp lý bởi sự khác biệt trong phương pháp tiêu hủy mẫu (US EPA 3051A chỉ hòa tan một phần silicat) và mức độ trung hòa bằng vôi tại nhà máy. Các khác biệt này không làm thay đổi quan hệ tương đối giữa các oxit chính, mà phản ánh đúng quá trình xử lý thực tế của bùn đỏ tại Việt Nam. 5.3. Thảo luận về sự biến động của nguyên liệu: nghiên cứu sinh xin tiếp thu và đã bổ sung mục 3.8 về ảnh hưởng sự biến động của nguyên liệu. 5.4. So sánh hiệu suất với quốc tế: nghiên cứu sinh tiếp thu và đã rà soát, bổ sung nội dung so sánh về hiệu suất tại mục 3.6 (bảng 3.3) của Luận án.

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
	5.3. Thảo luận về sự biến động của nguyên liệu: Phân tích sự khác biệt thành phần giữa các mẫu bùn đỏ và thảo luận cách điều chỉnh quy trình FBHC để thích ứng với sự biến động này trong thực tế. 5.4. So sánh hiệu suất với quốc tế: Bổ sung bảng hoặc đoạn văn so sánh hiệu suất thu hồi Fe, Al của FBHC với các công nghệ khác đã được công bố trên thế giới. 5.5. Tăng tính chặt chẽ của lập luận: Cung cấp dẫn chứng, trích dẫn khoa học cho các nhận định/suy đoán của tác giả (ví dụ: giải thích về tỷ lệ kết tinh giảm khi $L > 2$). 5.6. Phân tích chi tiết sản phẩm: Bổ sung dữ liệu về tính chất vật lý của sản phẩm thu hồi (kích thước hạt, diện tích bề mặt) Thảo luận thêm về tiềm	5.5. Tăng tính chặt chẽ của lập luận: Cung cấp dẫn chứng, trích dẫn khoa học cho các nhận định/suy đoán của tác giả (ví dụ: giải thích về tỷ lệ kết tinh giảm khi $L > 2$) Nghiên cứu sinh xin tiếp thu và bổ sung lập luận này trong Luận án cụ thể như sau: Hiện tượng tỷ lệ kết tinh (CR%) giảm mạnh khi tốc độ tải bề mặt (L) vượt ngưỡng tối ưu (trong trường hợp này là $2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$) là hệ quả trực tiếp của sự thay đổi trong hai yếu tố cốt lõi của quá trình kết tinh: (1) Mức độ siêu bão hòa và (2) Điều kiện thủy động lực học trong tháp phản ứng. Nội dung này được trình bày tại mục 3.4 về các yếu tố ảnh hưởng tới công nghệ của Luận án 5.6. Phân tích chi tiết sản phẩm: Bổ sung dữ liệu về tính chất vật lý của sản phẩm thu hồi (kích thước hạt, diện tích bề mặt) Thảo luận thêm về tiềm năng ứng dụng của $\text{Fe}(\text{OH})_3$ và $\text{Al}(\text{OH})_3$ trong các ngành công nghiệp (như luyện kim, xử lý nước, sản xuất xúc tác) để tăng tính thực tiễn. Về điểm này, nghiên cứu sinh đã rà soát và trình bày tại mục 3.4.3 và 3.4.5 của Luận án, trong đó đã có phân tích hình ảnh của các mẫu tinh thể thu được từ quá trình FBHC. 5.7. Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã thực hiện Việt hóa các hình vẽ 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 trong luận án 5.8. Giải thích cơ chế hóa-lý: Giải thích chi tiết cơ chế hóa học/vật lý đằng sau ảnh hưởng của từng thông số (pH, tỷ lệ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Al}^{3+}]$,...) và bổ sung sơ đồ tổng thể minh họa cơ chế thu hồi. Nghiên cứu sinh tiếp thu và bổ sung nội dung này trong phần kết quả của luận án, bao gồm các nội dung cụ thể như sau: - Ảnh hưởng của pH đã được trình bày tại mục 3.4.2 của Luận án; - Về ảnh hưởng khác như tỷ lệ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Al}^{3+}]$: đây là điều kiện trong quy trình công nghệ khác

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
	năng ứng dụng của $\text{Fe}(\text{OH})_3$ và $\text{Al}(\text{OH})_3$ trong các ngành công nghiệp (như luyện kim, xử lý nước, sản xuất xúc tác) để tăng tính thực tiễn. 5.7. Việt hóa hình ảnh: Việt hóa các ghi chú trong Hình 3.10, 3.11, 3.12, 3.13. 5.8. Giải thích cơ chế hóa-lý: Giải thích chi tiết cơ chế hóa học/vật lý đằng sau ảnh hưởng của từng thông số (pH, tỷ lệ $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Al}^{3+}]$,...) và bổ sung sơ đồ tổng thể minh họa cơ chế thu hồi. 5.9. Phân tích chất thải thứ cấp: Bổ sung phân tích thành phần chất thải thứ cấp và đề xuất phương án xử lý. 5.10. Đánh giá thách thức khi mở rộng quy mô: Thảo luận về các thách thức tiềm tàng (tiêu thụ năng lượng, tắc nghẽn cột,...) khi triển khai ở quy mô pilot/công nghiệp và đề xuất hướng giải quyết. 5.11. - Tính logic chưa hoàn hảo do một số phần thiếu liên kết rõ ràng, ví dụ: kết quả về sản phẩm thu hồi $\text{Fe}(\text{OH})_3$ và $\text{Al}(\text{OH})_3$ được mô tả nhưng chưa giải thích đầy đủ cơ chế hình thành cấu trúc lõi-vỏ. Vì thế NCS làm rõ thêm cơ chế hóa học/vật lý đằng sau kết quả, ví dụ: giải thích tại sao pH 4,0 tối ưu cho $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bằng cách trích dẫn phương trình	(FBHG) đã được trích dẫn tại Bảng 3.3, không phải điều kiện phản ứng của tháp FBHC trong luận án này. 5.9. Phân tích chất thải thứ cấp: nội dung này đã được nghiên cứu sinh tiếp thu và bổ sung tại mục 3.7 của Luận án (tương tự như bình luận ở mục 4.2). 5.10. Đánh giá thách thức khi mở rộng quy mô: Thảo luận về các thách thức tiềm tàng (tiêu thụ năng lượng, tắc nghẽn cột,...) khi triển khai ở quy mô pilot/công nghiệp và đề xuất hướng giải quyết Nghiên cứu sinh tiếp thu. Nội dung này đã được trình bày tại mục 3.6 của Luận án. 5.11. Làm rõ thêm cơ chế hóa học/vật lý đằng sau kết quả, ví dụ: giải thích tại sao pH 4,0 tối ưu cho $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bằng cách trích dẫn phương trình cân bằng (ví dụ $\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3$) và dữ liệu động học... Với các kết quả khác cũng tương tự như vậy Nghiên cứu sinh tiếp thu và đã bổ sung tại mục 3.4.2 và 3.4.4 Luận án, trong đó đã có các phần làm rõ cụ thể như sau: - Phân tích cơ chế kết tủa Sắt(III) Hydroxide tại pH 4,0; - Nhiệt động lực học Thủy phân và Kết tủa Fe^{3+} - Cơ chế kết tủa Nhôm Hydroxide và sự hình thành dạng thù hình Bayerite; - Động học hình thành các dạng thù hình và vai trò của FBHC - Cơ chế Vật lý và Hóa học của sự Hình thành Hạt lõi-vỏ. 5.12. Trên cơ sở các ý kiến của các phản biện độc lập, nghiên cứu sinh đã nghiêm túc tiếp thu, tìm hiểu thêm các tài liệu để đưa vào cho các nhận định của Luận án, đã bổ sung trích thêm số lượng tài liệu tham khảo, tăng số lượng tài liệu tham khảo cho luận án từ 120 tài liệu lên 142 tài liệu tham khảo

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
	cân bằng (ví dụ $\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3$) và dữ liệu động học... Với các kết quả khác cũng tương tự như vậy. 5.12. Tăng cường trích dẫn: Bổ sung trích dẫn khi giải thích, minh chứng và so sánh kết quả nghiên cứu.	
6	Phần kết luận: 6.1. Trình bày rõ các số liệu cụ thể đã đạt được và sắp xếp lại cấu trúc kết luận cho logic, theo thứ tự kết quả đã trình bày ở Chương 3. 6.2. Bổ sung các kết quả quan trọng còn thiếu (ví dụ: thành phần bùn đỏ, đặc tính vật lý của sản phẩm thu hồi).	6.1. Nội dung kết luận đã được nghiên cứu sinh rà soát, đảm bảo theo đúng trình tự logic đã trình bày trong luận án 6.2. Nghiên cứu sinh xin tiếp thu và đã bổ sung các kết quả quan trọng (thành phần bùn đỏ, đặc tính vật lý của sản phẩm thu hồi) trong phần kết luận của luận án: - Phân tích thành phần hóa học của bùn đỏ từ Nhà máy Alumin Nhân Cơ cho thấy hàm lượng các oxit kim loại có giá trị rất cao, cụ thể là Fe_2O_3 chiếm 44,42% và Al_2O_3 chiếm 19,73%. Các dạng tồn tại chính của sắt được xác định là hematite (Fe_2O_3) và goethite ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), trong khi nhôm chủ yếu tồn tại ở dạng gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$), boehmite ($\text{AlO}(\text{OH})$) và các khoáng vật thứ cấp hình thành trong quy trình Bayer như sodalite. Những kết quả này không chỉ cung cấp dữ liệu nền tảng quan trọng mà còn khẳng định tính cấp thiết của việc phát triển các công nghệ thu hồi, tránh lãng phí một khối lượng tài nguyên khổng lồ đang bị chôn lấp - Sản phẩm thu hồi không phải là bùn thải thứ cấp mà là các vật liệu có giá trị. Sản phẩm sắt thu được là các hạt $\text{Fe}(\text{OH})_3$ hình cầu, đồng nhất với kích thước trung bình đạt tới 1 mm. Phân tích XRD và FTIR xác nhận sự hình thành pha $\text{Fe}(\text{OH})_3$ kết tinh. Sản phẩm nhôm thu được là các hạt $\text{Al}(\text{OH})_3$ ở dạng thù hình bayerite có độ kết tinh cao, được xác nhận qua phân tích XRD. Đặc biệt, ảnh SEM mặt cắt của hạt cho thấy một cấu trúc lõi-vỏ (core-shell) đặc trưng, phản ánh cơ chế hình thành và phát triển của hạt trong môi trường thủy động lực học không đồng nhất của lò phản ứng

STT	Ý kiến góp ý Phản biện số 2	Kết quả tiếp thu
	6.3. Nêu rõ các hạn chế của nghiên cứu (quy mô phòng thí nghiệm, chưa đánh giá chất thải thứ cấp) để tăng tính khách quan. 6.4. Nhấn mạnh mạnh mẽ hơn tính mới và tiên phong của việc áp dụng công nghệ FBHC tại Việt Nam để làm nổi bật đóng góp khoa học của luận án.	FBHC. Cấu trúc này mở ra các tiềm năng ứng dụng sản phẩm làm chất hấp phụ hoặc vật liệu xúc tác hiệu suất cao. 6.3. Nêu rõ các hạn chế của nghiên cứu ở quy mô phòng thí nghiệm: nghiên cứu sinh đã tiếp thu và bổ sung nội dung này trong phần kết luận: “Tuy vậy, luận án cũng nhận thức rõ những hạn chế cần được tiếp tục nghiên cứu để hoàn thiện và đưa công nghệ vào thực tiễn. Nghiên cứu được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm và thí điểm, do đó việc chuyển đổi sang quy mô công nghiệp đòi hỏi các nghiên cứu sâu hơn về kỹ thuật vận hành, độ bền vật liệu và tối ưu hóa chi phí. Thêm vào đó, luận án chưa đi sâu đánh giá vòng đời của các dòng thải thứ cấp (như dung dịch muối $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ sau kết tủa) mặc dù đã đề xuất hướng tận dụng.¹ Phân tích kinh tế-kỹ thuật cũng chỉ là ước tính sơ bộ, cần một mô hình kinh doanh chi tiết hơn dựa trên dữ liệu vận hành quy mô lớn và khảo sát thị trường thực tế cho các sản phẩm thu hồi”. 6.4. Nhấn mạnh mạnh mẽ hơn tính mới và tiên phong của việc áp dụng công nghệ FBHC tại Việt Nam để làm nổi bật đóng góp khoa học của luận án Nội dung này đã được Nghiên cứu sinh tiếp thu và nhấn mạnh trong phần kết luận của Luận án: - Đóng góp khoa học và thực tiễn chính của luận án là đã chứng minh được hiệu suất thu hồi kim loại của công nghệ FBHC là rất cao, đạt tới 99,89% đối với sắt và 99,60% đối với nhôm. Các sản phẩm thu hồi không chỉ có độ tinh khiết cao mà còn có cấu trúc tinh thể đồng nhất, kích thước hạt lớn (lên tới 1 mm), rất thuận lợi cho việc tách lọc, xử lý và tái sử dụng làm nguyên liệu có giá trị cho các ngành công nghiệp khác. - Về mặt môi trường, công nghệ này giải quyết triệt để tính kiềm của bùn đỏ, giảm thiểu tối đa lượng bùn thải thứ cấp và đảm bảo nước thải sau xử lý đạt quy chuẩn môi trường Việt Nam. Phân tích kinh tế - kỹ thuật sơ bộ ở quy mô thí điểm cũng cho thấy công nghệ tính khả thi với lợi nhuận ròng ước tính đạt 2,48 USD trên mỗi mét khối nước thải bùn đỏ được xử lý. Mặc dù vậy, nghiên cứu của luận án được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm và thí điểm, do đó các phân tích về hiệu quả kinh tế - kỹ thuật vẫn mang tính sơ bộ và mang tính định hướng.

Trên đây là toàn bộ nội dung chỉnh sửa theo ý kiến của phản biện độc lập số 2, nội dung này đã được tập thể giáo viên hướng dẫn thông qua.

Kính đề nghị Viện Tài nguyên và Môi trường, Đại học Quốc gia Hà Nội xem xét và cho phép tôi được tiếp tục quy trình bảo vệ luận án.

Tôi xin trân trọng cảm ơn.