

CÔNG NGHỆ “XANH” TÁI CHẾ NEODYMIUM SỬ DỤNG VẬT LIỆU NANOCELLULOSE LÔNG

Vũ Thế Hà^{1*}

¹*Khoa Môi trường, Trường Đại học Hạ Long*

** Email: vutheha@daihochalong.edu.vn*

Ngày nhận bài: 12/08/2021

Ngày chấp nhận đăng: 15/12/2021

TÓM TẮT

Các nguyên tố đất hiếm là nguyên liệu chiến lược đối với nhiều ngành công nghiệp công nghệ cao quan trọng. Neodymium (Nd) là nguyên tố đất hiếm có nhu cầu lớn nhất trên toàn cầu. Các diễn biến khó lường của thị trường đất hiếm thế giới tạo ra những thách thức nhất định trong việc đảm bảo nguồn cung và giá cả ổn định của loại nguyên liệu này. Một trong những giải pháp hữu hiệu cho phép các quốc gia có thể tự chủ trong nguồn cung Neodymium là tái chế và thu hồi Nd từ các nguồn nguyên liệu thứ cấp như rác thải điện tử, nam châm đất hiếm đã qua sử dụng, chất thải công nghiệp... Bài viết giới thiệu về công nghệ tái chế và thu hồi Nd sử dụng vật liệu nanocellulose lông, một công nghệ mới được phát triển, thân thiện với môi trường, có tiềm năng ứng dụng và thương mại hoá lớn trong các quá trình tái chế Nd ở quy mô công nghiệp.

Từ khóa: hấp phụ, nanocellulose lông, Neodymium, tái chế.

“GREEN” TECHNOLOGY FOR NEODYMIUM-RECYCLING USING HAIRY NANOCELLULOSE MATERIALS

ABSTRACT

Rare earth elements are strategic raw materials for many important high-tech industries. Neodymium is the most demanded rare earth element on the world market. Unpredictable movements of the world rare earth market raises certain challenges for ensuring a stable supply and price of this material. One of the effective solutions that allows countries to be self-sufficient in the supply of Neodymium is to recycle and recover Nd from secondary material sources such as e-waste, used rare-earth magnets, and other industrial waste...The article introduces Nd recycling and recovery technology using hairy nanocellulose particles, a newly developed, environmentally friendly technology with great potential for applications and commercialization in industrial-scale Nd recycling processes.

Keywords: adsorption, hairy nanocellulose, Neodymium, recycling.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các nguyên tố đất hiếm là nguyên liệu chiến lược quan trọng đối với nhiều ngành công nghiệp công nghệ cao và quá trình chuyển đổi sang các nền kinh tế xanh của các

quốc gia trên thế giới. Chúng được sử dụng làm thành phần trong các thiết bị công nghệ cao, bao gồm ổ cứng máy tính, điện thoại thông minh, máy ảnh kỹ thuật số, đèn huỳnh quang và đèn đi-ốt phát quang (LED), tivi màn hình phẳng, màn hình máy tính và màn

hình điện tử. Một lượng lớn các nguyên tố đất hiếm được sử dụng trong năng lượng sạch và các công nghệ quốc phòng. Việc tách các nguyên tố đất hiếm từ quặng của chúng đòi hỏi một lượng lớn hoá chất và kèm theo hàng loạt chất thải nguy hại, gây ra những lo ngại lớn về ô nhiễm môi trường (Reimer và nnk, 2018). Hiện tại, Trung Quốc là nhà sản xuất và xuất khẩu đất hiếm số 1 trên thế giới. Tính đến năm 2019, Trung Quốc vẫn sản xuất khoảng 85% lượng oxit đất hiếm trên thế giới và khoảng 90% kim loại đất hiếm, hợp kim và nam châm vĩnh cửu. Nhu cầu về đất hiếm ngày càng tăng và sự thiếu đa dạng các nhà cung cấp trên thị trường toàn cầu đã dẫn đến việc tăng giá đáng kể của nguyên liệu này. Cùng với đó, căng thẳng địa chính trị hiện tại và tương lai giữa Mỹ và Trung Quốc cộng với sự độc quyền của Trung Quốc trên thị trường đất hiếm có thể dẫn đến rủi ro lớn về nguồn cung và giá cả; ảnh hưởng xấu đến nền kinh tế toàn cầu. Vì lẽ đó, các quốc gia trên thế giới đang đẩy mạnh quá trình tự chủ trong nguồn cung loại vật liệu chiến lược này bằng cách khai thác các khu mỏ mới tại nhiều khu vực khác nhau trên thế giới. Tuy nhiên, những cố gắng này chưa thể giải quyết triệt để được vấn đề trong tương lai gần do sự phức tạp và mất thời gian trong việc phát triển những công nghệ khai thác và chế biến đất hiếm bền vững, thân thiện với môi trường. Vì vậy, chiến lược mới của các ngành công nghiệp công nghệ cao trong việc đảm bảo nguồn cung đất hiếm là khai thác và tái chế các nguồn nguyên liệu thứ cấp như rác thải điện tử, phế liệu trước khi tiêu dùng, phế liệu công nghiệp và các sản phẩm cuối vòng đời có chứa đất hiếm (Binnemans và nnk, 2013; Reimer và nnk, 2018).

Neodymium (Nd) là một trong những nguyên tố đất hiếm có nhu cầu lớn nhất trên thị trường toàn cầu. Nd là thành phần chính trong nam châm NdFeB, một trong những nam châm vĩnh cửu mạnh nhất hiện tại. Nam châm NdFeB được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp, liên quan đến các thiết bị điện tử, trong động cơ công nghiệp và máy quét hình ảnh cộng hưởng từ. Những nam châm này cũng là thành phần then chốt trong các ngành năng lượng xanh như máy phát điện tuabin gió và tấm pin mặt trời. Nd

cũng được sử dụng trong các phương tiện giao thông chạy trên đệm từ trường, các loại xe ô tô điện, các ổ đĩa cứng, các thiết bị âm thanh cũng như các thiết bị điện tử tiên tiến thế hệ mới. Những ngành công nghiệp này đang và sẽ là trụ cột trong chiến lược tăng trưởng xanh của tất cả các quốc gia trong các thập kỷ tới và sự phát triển mạnh mẽ của chúng đã dẫn đến sự tăng lên đáng kể đối với nhu cầu và giá cả của Nd trên toàn thế giới. Năm 2020, quy mô thị trường nam châm NdFeB toàn cầu là 12,5 tỷ USD và dự kiến sẽ đạt 19,3 tỷ USD vào cuối năm 2026 (Expert Market Research, 2020).

Thông thường, việc tái chế và sản xuất Nd từ các nguồn nguyên liệu thứ cấp như rác thải điện tử (các bảng mạch điện tử, ổ đĩa cứng...), nam châm đất hiếm đã qua sử dụng, nước thải công nghiệp... được bắt đầu bằng việc chiết Nd có trong các nguyên liệu thứ cấp ban đầu vào các dung dịch và sau đó thu hồi Nd từ các dung dịch chiết có chứa các ion Nd^{3+} bằng các kỹ thuật khác nhau chẳng hạn như chiết xuất dung môi, trao đổi ion, kết tủa hóa học, và hấp phụ. Hiện nay, chiết xuất bằng dung môi là kỹ thuật thương mại chính trên thị trường. Tuy nhiên, nó thường không có tính chọn lọc cao, tốn kém và mất thời gian, gây ô nhiễm nghiêm trọng đến môi trường vì sử dụng một lượng lớn dung môi hữu cơ độc hại. Để giải quyết những điểm nghẽn này, các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào các quá trình hấp phụ nhằm phát triển kỹ thuật tái chế Nd với hiệu quả cao, chi phí thấp, mức tiêu thụ năng lượng thấp, đáp ứng được quy mô tái chế công nghiệp và thân thiện với môi trường. Vì vậy, các chất hấp phụ “xanh” như cellulose đã được đặt vào trọng tâm của các nghiên cứu gần đây trong lĩnh vực này (Wamea và nnk, 2022).

Mới đây, một nhóm nghiên cứu của Trường Đại học Quốc gia Penn tại Mỹ đã phát triển một công nghệ nano mới dựa trên các tinh thể nanocellulose có lông tích điện âm để tách Neodymium từ các dung dịch chiết bằng cách sử dụng cellulose thực vật, được tìm thấy trong giấy, bông và bột giấy. Vật liệu nano mới này có tiềm năng ứng dụng cao trong các quá trình sản xuất và tái chế Neodymium ở quy mô công nghiệp (Wamea và nnk, 2022). Các quốc gia có tiềm năng đất

hiếm lớn nhưng chưa có ngành công nghiệp đất hiếm như Việt Nam có thể ứng dụng và tiếp tục hoàn thiện công nghệ này để phát triển nền tảng công nghệ và công nghiệp đất hiếm của riêng mình.

2. CƠ SỞ CỦA CÔNG NGHỆ

Cellulose, chất polymer sinh học phong phú nhất trên thế giới, là một nguồn tài nguyên tái tạo, có thể luôn được cung cấp ở quy mô công nghiệp. Nó là một polysaccharide, bao gồm các đơn vị D-glucose liên kết β (1 \rightarrow 4), mang một số lượng lớn các nhóm hydroxyl, cho phép điều chỉnh hóa học để có thể hấp phụ chọn lọc các ion kim loại từ các dung dịch. Cellulose có các nhóm hydroxyl được điều chỉnh hoá học được gọi là cellulose biến tính có khả năng tách chọn lọc Neodymium (Nd^{3+}) khỏi các dung dịch nước bằng quá trình tạo phức với các ion Nd^{3+} . Khả năng và tốc độ tách Nd^{3+} của cellulose biến tính phụ thuộc vào số lượng các nhóm chức năng hydroxyl và đặc tính của chúng.

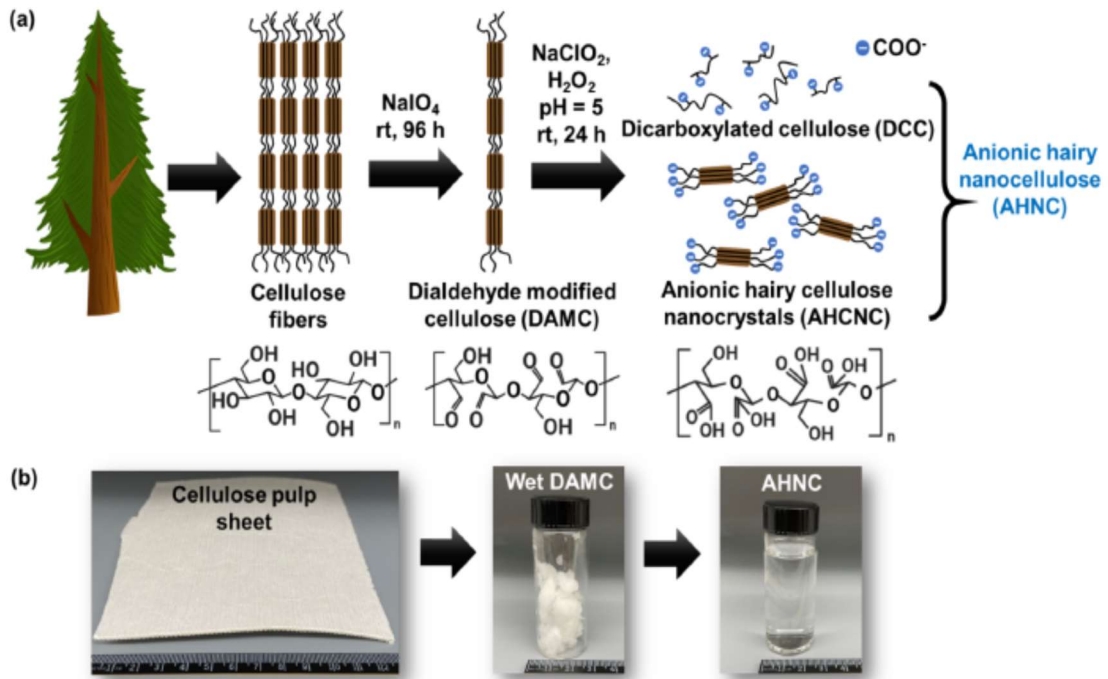
Các tinh thể sợi cellulose và nanocellulose thông thường chỉ có mật độ hạn chế các nhóm chức năng hydroxyl, cản trở sự phát triển của chất hấp phụ công suất cao với thời gian tiếp xúc ngắn để có thể đáp ứng được các quá trình tái chế ở quy mô công nghiệp. Để tăng mật độ của các nhóm chức năng, các sợi cellulose được ưu tiên oxy hóa ở các vùng vô định hình, tạo ra các nanocellulose lỏng. Cấu trúc của các tinh thể nanocellulose có lỏng về cơ bản khác với các nanocellulose thông thường. Các tế bào nano này có cấu trúc tinh thể tương tự như các tinh thể nanocellulose thông thường, nhưng được kẹp giữa các lớp của chuỗi cellulose vô định hình có chức năng hấp phụ cao hơn ở mỗi đầu, tạo ra mật độ nhóm chức năng cao hơn tới một bậc so với nanocellulose thông thường, qua đó tăng cường khả năng hấp phụ của vật liệu. Trong các nghiên cứu đã công bố trước đây, các tinh thể nanocellulose có lỏng đã được sử dụng để tách một số chất ô nhiễm như methylen xanh và các ion đồng.

3. CÁC NỘI DUNG CHÍNH CỦA CÔNG NGHỆ

Hình 1 mô tả sơ đồ các bước tổng hợp vật

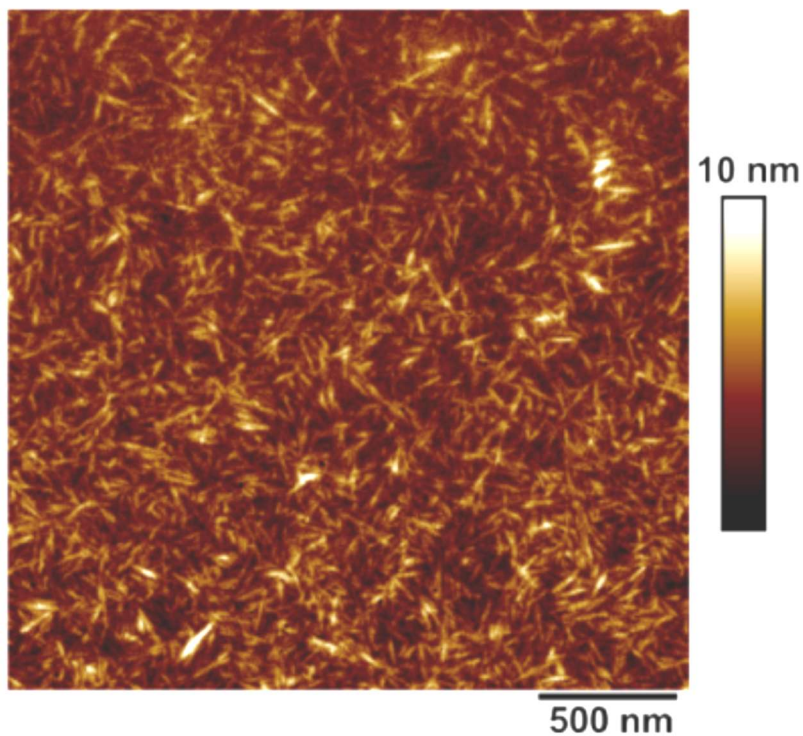
liệu nanocellulose lỏng tích điện âm. Trong dung dịch NaCl và $NaIO_4$ bột giấy cellulose chuẩn bị từ các tấm vật liệu bột giấy ban đầu được oxy hóa ở nhiệt độ phòng. Quá trình oxy hoá đã chuyển đổi các sợi cellulose thô ban đầu thành các sợi cellulose biến tính (dialdehyde modified cellulose – DAMC) – một chất trung gian. Tiếp theo, trong dung dịch chứa NaCl, $NaClO_2$ và H_2O_2 nhóm aldehyde của DAMC được chuyển đổi thành dicarboxylate. Sản phẩm của quá trình này là vật liệu nanocellulose lỏng tích điện âm (anionic hairy nanocellulose – AHNC) – một hỗn hợp dạng gel chứa ~ 70.6% các tinh thể nanocellulose lỏng tích điện âm (anionic hairy cellulose nanocrystals – AHCNC) và ~ 29.4% các chuỗi dicarboxylated cellulose (DCC). Hình ảnh AFM của các tinh thể của AHCNC thu được sau khi làm khô gel (Hình 2) cho thấy AHCNC là các tinh thể nano dạng que với chiều dài ~ 76 ± 27 nm và chiều rộng ~ 14 ± 3 nm. Các chuỗi DCC là vô định hình và bị tan rã khi sấy khô, do đó không thể chụp ảnh bằng AFM. Điện tích âm của AHCNC và các chuỗi DCC được tạo thành từ các liên kết chứa các ion âm dicarboxylate COO^- . Mỗi một đầu lỏng của AHCNC đều có một liên kết với COO^- và mỗi chuỗi DCC chứa hai liên kết với COO^- . Khả năng hấp phụ Nd^{3+} của AHNC được tạo ra bởi lực hút tĩnh điện và sự trung hòa điện tích của các nhóm carboxylate tích điện âm - COO^- của AHNC với các ion Nd^{3+} trong dung dịch.

Vật liệu nanocellulose lỏng được tạo ra có mật độ điện tích cao hơn khoảng một bậc so với các tinh thể nanocellulose thông thường nhờ vào mật độ cao của các sợi lỏng tích điện âm. Khi vật liệu AHNC được đưa vào dung dịch có chứa Nd^{3+} , các phần tử AHCNC và DCC thu hút và liên kết với các ion neodymium (Nd^{3+}) tích điện dương trong dung dịch, dẫn đến sự tập hợp các ion thành các hạt lớn hơn dưới dạng kết tủa; sau đó chúng được lọc/tách ra khỏi dung dịch, tái chế và tái sử dụng một cách hiệu quả (Hình 3a,b). AHNC cho phép tách ~ 264 ± 14 mg Nd^{3+} trên mỗi gam chất hấp phụ nano trong vòng vài giây (Hình 3c,d), đặt vật liệu tiên tiến này trong số các chất hấp phụ hiện tại có khả năng tách Nd^{3+} cao nhất với thời gian tiếp xúc ngắn nhất.



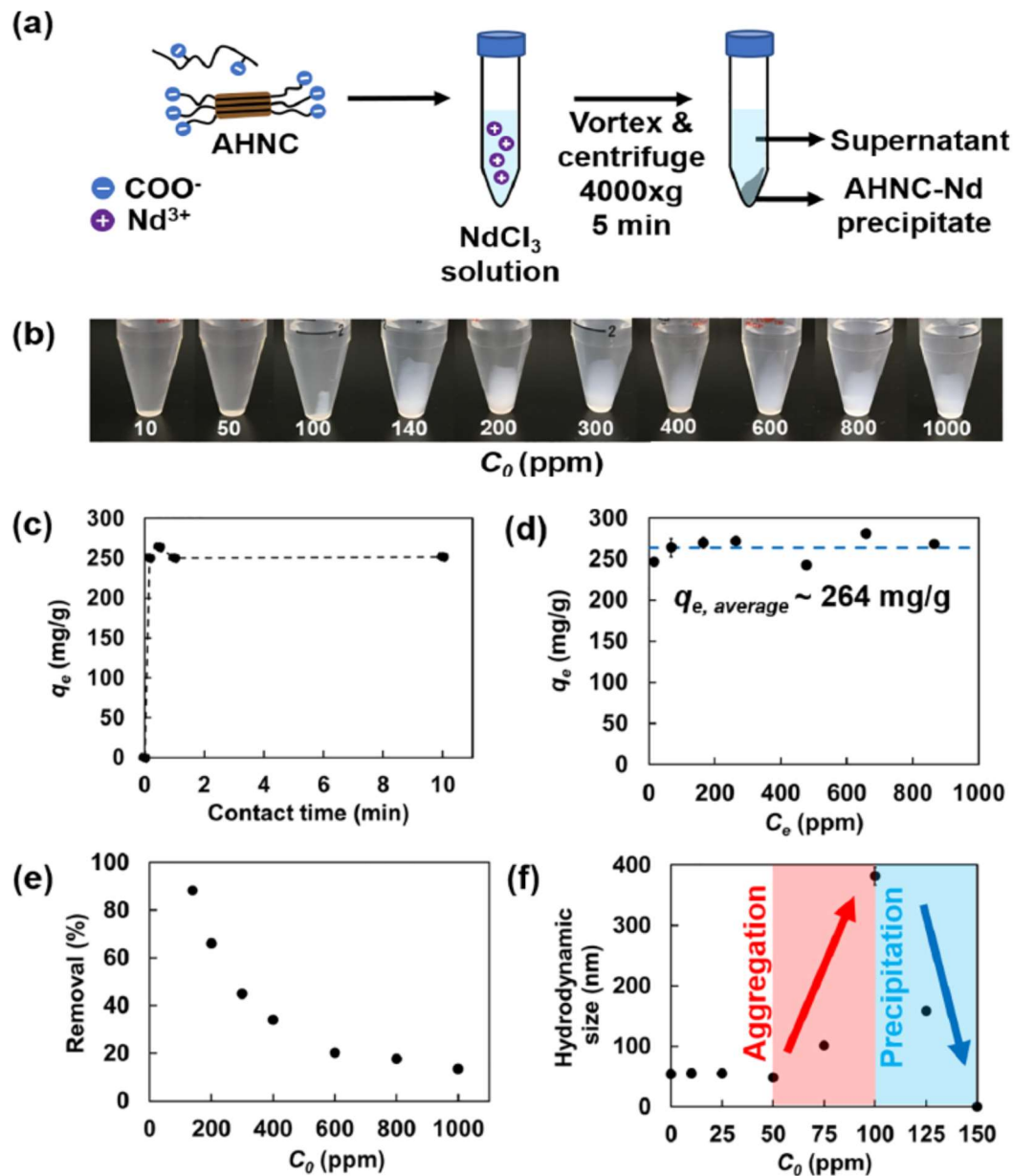
(Nguồn: Wamea và nnk., 2022)

Hình 1. Sơ đồ các bước tổng hợp vật liệu nanocellulose lông tích điện âm từ bột giấy (a). Hình ảnh của nguyên liệu ban đầu (tấm bột giấy cellulose), chất trung gian, và gel có chứa các hạt nanocellulose lông tích điện âm (b)



(Nguồn: Wamea và nnk., 2022)

Hình 2. Hình ảnh AMF của AHNC, cho thấy các tinh thể nanocellulose lông tích điện âm



(Nguồn: Wamea và nnk., 2022)

Hình 3. Sơ đồ mô tả quá trình tách Neodymium trong dung dịch NdCl₃ có chứa Nd³⁺ bằng cách sử dụng AHNC (a). Sự hình thành kết tủa AHNC-Nd sau ly tâm ở các nồng độ ban đầu khác nhau (C₀) của Nd³⁺ (b). Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc đến hiệu quả tách Nd³⁺ (C₀ = 200 ppm) (c). Sự phụ thuộc khả năng tách tối đa của AHNC (q_e) vào nồng độ ban đầu C₀ của Nd³⁺ (d). Sự phụ thuộc của tỷ lệ % Nd³⁺ được tách vào C₀ (e). Sự phụ thuộc của kích thước của các hạt kết tủa AHNC-Nd vào C₀ (f).

Các yếu tố quan trọng liên quan tới khả năng ứng dụng công nghiệp của vật liệu AHNC như các ảnh hưởng của nồng độ Nd³⁺ ban đầu trong dung dịch được xử lý đến hiệu quả hấp phụ, khả năng tạo kết tủa của phản ứng hấp phụ, tính chọn lọc của vật liệu trong

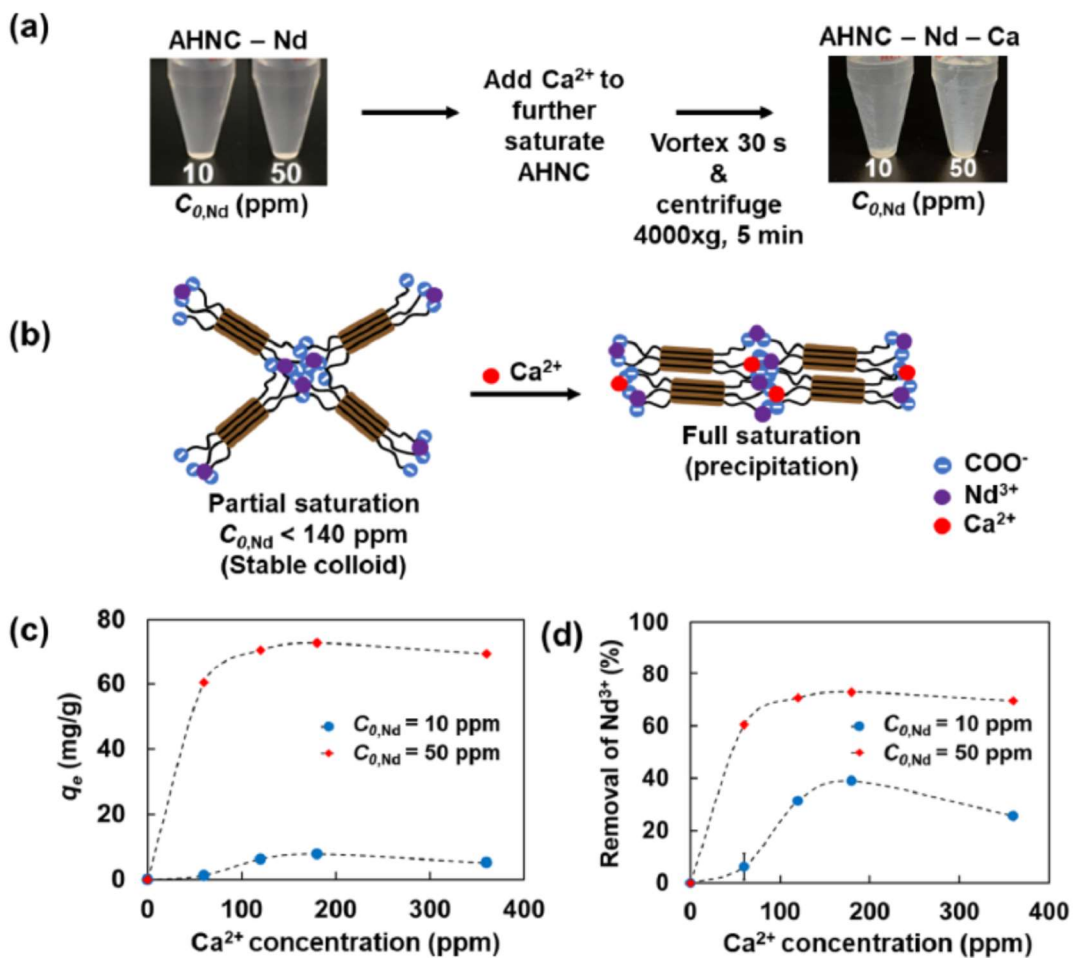
quá trình hấp phụ... đã được xem xét trong quá trình nghiên cứu. Các quá trình thực nghiệm cho thấy một số kết quả đáng chú ý:

1) Quá trình hấp phụ Nd³⁺ của AHNC trong dung dịch đạt đến trạng thái cân bằng gần như ngay lập tức (Hình 3c), làm cho

việc tách Nd^{3+} ra khỏi dung dịch nhanh chóng và dễ dàng. Đối với các quá trình tái chế Nd ở quy mô công nghiệp thì đây là một ưu điểm lớn của công nghệ. Thời gian tách Nd ngắn sẽ cho phép tăng công xuất xử lý và giảm giá thành trên 1 đơn vị khối lượng Nd được tái chế.

2) Kết tủa AHNC-Nd chỉ bắt đầu hình thành đáng kể ở nồng độ ban đầu của Nd^{3+} tương ứng với tỷ lệ mol $\text{COO}^- : \text{Nd}^{3+} \sim 3:1$, tức là hàm lượng Nd^{3+} trong dung dịch ban đầu cần phải đủ lớn để có thể trung hòa hết các nhóm carboxylate của AHNC. Sự tăng nồng độ ban đầu của Nd^{3+} lớn hơn giá trị tương ứng với tỷ lệ mol $\text{COO}^- : \text{Nd}^{3+} \sim 3:1$

không làm thay đổi hiệu quả tách Nd^{3+} cực đại đạt được do điện tích âm của các nhóm chức năng COO^- đã hoàn toàn bị trung hoà (Hình 3d,e). Khi nồng độ ban đầu của Nd^{3+} thấp hơn mức tối thiểu tương ứng với tỷ lệ mol $\text{COO}^- : \text{Nd}^{3+} \sim 3:1$, chỉ có một lượng nhỏ kết tủa AHNC-Nd hình thành; hoặc hoàn toàn không hình thành ở những nồng độ ban đầu của Nd^{3+} rất thấp do lượng Nd^{3+} không đủ để trung hoà hết lượng AHNC được sử dụng (Hình 3f). Việc thêm một lượng cần thiết Ca^{2+} đủ để trung hoà hết tất cả các nhóm carboxylate còn dư lại sẽ làm cho kết tủa AHNC-Nd-Ca được hình thành (Hình 4).



(Nguồn: Wamea và nnk., 2022)

Hình 4. Sơ đồ mô tả sự hình thành kết tủa AHNC-Nd sau khi bổ sung Ca^{2+} khi nồng độ ban đầu của Nd^{3+} thấp hoặc rất thấp (a). Giả thuyết về cơ chế hình thành kết tủa sau khi bổ sung Ca^{2+} (b). Sự phụ thuộc của hiệu quả tách Nd^{3+} bằng vật liệu AHNC vào nồng độ Ca^{2+} bổ sung (c). Sự phụ thuộc của tỷ lệ % tách Nd^{3+} vào nồng độ Ca^{2+} bổ sung (d).

3) Thông thường, trong quá trình tái chế, các nam châm NdFeB được khử từ và bị hoà tan trong các axit mạnh (ví dụ, axit sulfuric hoặc axit clohydric) để tạo thành dung dịch chiết có chứa các thành phần của nam châm là Nd, Fe và B. Để tách được Nd ra khỏi dung dịch chiết có chứa nhiều loại ion khác nhau, một trong những đặc tính quan trọng nhất của chất hấp phụ được sử dụng là tính chọn lọc – khả năng của chất hấp phụ chỉ tạo phức với một loại ion được chỉ định (trong trường hợp này là Nd^{3+}). Vật liệu AHNC có tính chọn lọc cao trong quá trình tách Nd^{3+} . Khi trong dung dịch có chứa cả ion Nd^{3+} và Fe^{2+} , khả năng tách Nd^{3+} của AHNC không bị ảnh hưởng ngay cả ở những nồng độ Fe^{2+} rất cao. Điều này có thể là do năng lượng liên kết cao hơn (~ 300 lần) giữa Nd^{3+} và COO^- so với $Fe^{2+}-COO^-$. Nhờ có tính chọn lọc này, vật liệu có khả năng ứng dụng cao trong các quá trình tái chế nam châm NdFeB đã qua sử dụng.

4. CÁC HƯỚNG HOÀN THIỆN TIẾP THEO

Các dung dịch chiết của các nguyên liệu thứ cấp như rác thải điện tử, chất thải công nghiệp... ngoài Nd còn chứa một số lượng lớn các ion của các nguyên tố khác như cobalt (Co), dysprosium (Dy), boron (B), praseodymium (Pr), copper (Cu), aluminum (Al), gallium (Ga), silicon (Si), gadolinium (Gd), and molybdenum (Mo)... Để có thể sử dụng AHNC như một chất hấp phụ có tính chọn lọc Nd^{3+} cao trong xử lý các dung dịch này cần nghiên cứu thêm về sự tương tác giữa AHNC với các ion tạp chất có trong dung dịch chiết. Tính chọn lọc Nd^{3+} của AHNC trong dung dịch chứa nhiều loại ion khác nhau có thể phụ thuộc vào hoá trị và nồng độ ban đầu của các ion tạp chất. Sẽ rất phức tạp khi phát triển một chất hấp phụ chỉ có tính chọn lọc duy nhất đối với một loại ion nhất định trong một phức hệ chứa vô số các loại

ion khác nhau. Một quá trình công nghệ gồm nhiều bước hấp phụ khác nhau, sử dụng các chất hấp phụ thích hợp để tách lần lượt từng loại hoặc nhóm ion ra khỏi dung dịch sẽ là lời giải khả thi trong vấn đề này.

Vật liệu AHNC có thể tiếp tục được hoàn thiện theo hướng sử dụng các liên kết với các nhóm chức năng khác nhau để có thể hấp phụ ion hoặc nhóm ion được chỉ định cụ thể. Các vật liệu hấp phụ sinh học dựa trên nền cellulose đã được nghiên cứu cho thấy tiềm năng ứng dụng cao của chúng không chỉ trong tái chế và sản xuất đất hiếm mà còn trong thu hồi và xử lý các kim loại và ô nhiễm khác như Au và Pt (Biswas và nnk, 2021; Guo và nnk, 2018), các kim loại nặng (Zhou và nnk, 2020), Auramin O (Pinto và nnk, 2020),... Việc tiếp tục nghiên cứu và hoàn thiện các vật liệu hấp phụ này sẽ góp phần tạo ra các công nghệ sản xuất, tái chế và xử lý môi trường bền vững; tạo nền tảng cho việc hình thành và phát triển một nền kinh tế tuần hoàn – chiến lược chính trong tăng trưởng xanh của các quốc gia trên thế giới.

5. KẾT LUẬN

Công nghệ mới được phát triển có tiềm năng đầy hứa hẹn trong các quá trình tái chế và sản xuất Nd ở quy mô công nghiệp thân thiện với môi trường do sử dụng cellulose, một nguồn tài nguyên tái tạo rẻ tiền và dễ kiếm. Sử dụng cellulose làm vật liệu hấp phụ chính trong tái chế và sản xuất Nd là một giải pháp sạch, bền vững và hiệu quả về chi phí. Với công nghệ này, các quốc gia khác sẽ có thể cạnh tranh với Trung Quốc để thu hồi đất hiếm từ các nguyên liệu thứ cấp và sản xuất chúng một cách độc lập.

Với trữ lượng các mỏ đất hiếm lục địa vào khoảng 22 triệu tấn (US Geological Survey, 2021) và những dự báo không chính thức về trữ lượng đất hiếm vô cùng lớn ở biển Đông,

Việt Nam là quốc gia có tiềm năng đất hiếm hàng đầu thế giới chỉ sau Trung Quốc. Để khai thác được tiềm năng này và phát triển ngành công nghiệp đất hiếm của riêng mình thì vấn đề then chốt là phải sở hữu các công nghệ sản xuất, chế biến đất hiếm bền vững, thân thiện với môi trường. Việc tiếp tục hoàn thiện và phát triển những công nghệ hấp phụ dựa trên nền tảng vật liệu nanocellulose sẽ là một lựa chọn hợp lý góp phần vào việc hình thành nền tảng công nghệ cho ngành công nghiệp đất hiếm của đất nước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Binnemans, K., Jones, T. P., Blanpain, B., Gerven T. V., Yang Y., Walton A., Buchert B. (2013). Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22.
- Biswas, F. B., Rahman, I. M. M., Nakakubo, K., Endo, M., Nagai, K., Mashio, A. S., Taniguchi, T., Nishimura, T., Maeda, K., Hasegawa, H. (2021). Highly selective and straightforward recovery of gold and platinum from acidic waste effluents using cellulose-based bio-adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 410, 124569.
- Expert Market Research. (2020). *Global Neodymium-Iron-Boron Magnet Market Outlook*. Truy cập 15/12/2021 từ <https://www.expertmarketresearch.com/reports/neodymium-iron-boron-magnet-market>.
- Guo, W., Yang, F., Zhao, Z., Liao, Q., Cai, C., Zhang, Y., Bai, R. (2018). Cellulose-based ionic liquids as an adsorbent for high selective recovery of gold. *Minerals Engineering*, 125, 271-278.
- Pinto, H. A., Taylor, K. J., Chandradat, R., Lam, E., Liu, Y., Leung, A. C.W., Keating, M., Sunasee, R. (2020). Wood-based cellulose nanocrystals as adsorbent of cationic toxic dye, Auramine O, for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 104187.
- Reimer, W. M., Schenk-Mathes, Y. H., Hoffmann, F.H., Elwert, T. (2018). Recycling Decisions in 2020, 2030, and 2040-When Can Substantial NdFeB Extraction be Expected in the EU??. *Metals*, 8, 867.
- US Geological Survey. (2021). *Mineral Commodity Summaries, January 2021*. Truy cập ngày 15/12/2021 từ <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information>
- Wamea, P., Pitcher, M. L., Muthami, J., Sheikhi, A. (2022). Nanoengineering cellulose for the selective removal of neodymium: Towards sustainable rare earth element recovery. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131086.
- Zhou, H., Zhua H., Xue F., He H., Wang S. (2020). Cellulose-based amphoteric adsorbent for the complete removal of low-level heavy metal ions via a specialization and cooperation mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123879.

THÔNG TIN TÁC GIẢ

TS. Vũ Thế Hà

- Giảng viên khoa Môi trường, Trường Đại học Hạ Long. Tốt nghiệp Tiến sĩ về Khoa học và kỹ thuật vật liệu nano, Viện Khoa học và Công nghệ Hàn Quốc (KIST).
- Lĩnh vực nghiên cứu: Công nghệ vật liệu nano và ứng dụng trong lĩnh vực môi trường.