



Tiềm năng thu hồi phốt pho trong nước thải chế biến cao su thiên nhiên

LÊ THỊ HẢI NINH, PHẠM THỊ HẢI THỊNH, NGUYỄN ĐỨC NÚI, DƯƠNG VĂN NAM

Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Việc thu hồi các hợp chất phốt pho từ nhà máy xử lý nước thải có thể được thực hiện từ pha lỏng, bùn lỏng hoặc hỗn hợp của chúng như là nước thải sau xử lý sinh học bậc hai, dịch nổi từ bể phân hủy kỵ khí, bùn thải và các dẫn xuất của nó như tro đốt. Kết tủa struvite là một trong những công nghệ quen thuộc và phát triển nhất, với các thông số đã được nghiên cứu rộng rãi trên nhiều loại nguyên liệu đầu vào, trong các loại thiết bị phản ứng khác nhau và thông qua nhiều tổ hợp quy trình, được tổng hợp trong nhiều công bố. Tại Châu Âu, chi phí thu hồi muối phốt phát từ nước thải được ước tính vào khoảng 2-8 euro cho mỗi kg phốt pho nước thải chế biến cao su tự nhiên là một trong những loại nước thải có hàm lượng chất ô nhiễm rất cao: pH = 4,98-5,24; BOD = 4,459 -13,820 mg/L; COD = 5,015 -26,914 mg/L, P-PO₄³⁻ là 420 - 450 mg/L,... Như vậy, lượng thu hồi phốt pho bằng công nghệ kết tủa struvite của nước thải chế biến cao su thiên nhiên năm 2024 có thể ước tính đạt 157.625 tấn. Đây được coi là một nguồn bổ sung lượng phân bón cho thị trường phân bón Việt Nam.

1. NGUỒN GỐC Ô NHIỄM PHOTPHO

Phốt pho là nguyên tố không tái tạo, tồn tại chủ yếu trong đá magma và trầm tích. Trong môi trường nước, các hợp chất phốt pho tồn tại ở dạng hòa tan, kết tủa hoặc hấp phụ do các quá trình vật lý, hóa học và sinh học [1]. Phốt pho được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực công nghiệp. Phốt pho vô cơ được sử dụng trong công nghiệp bao gồm tripolyphosphate, orthophosphate canxi và amoni, và polyphosphate (dùng làm phân bón) [2]. Trong khi đó, phosphate hữu cơ được sử dụng trong sản xuất thuốc trừ sâu, chất hóa dẻo và chất hoạt động bề mặt. trong điều kiện môi trường, cả phosphate hữu cơ và vô cơ đều trải qua quá trình phân hủy sinh học và hóa học, chuyển hóa thành orthophosphate - sản phẩm phân hủy cuối cùng [3, 4].

Nông nghiệp là lĩnh vực tiêu thụ lớn phốt pho thông qua việc bổ sung phốt pho vào thức ăn chăn nuôi hoặc sử dụng làm thành phần trong phân bón [5]. Điều này lý giải cho xu hướng gia tăng tiêu thụ phốt pho của con người, đồng thời cho thấy sự hiện diện ngày càng phổ biến các dạng phốt pho khác nhau trong nhiều lĩnh vực của đời sống hàng ngày. Phốt pho cũng được

sử dụng trong sản xuất dược phẩm và chất điện phân phục vụ nhu cầu cá nhân. Bên cạnh đó, nhiều dạng phốt pho khác cũng được ứng dụng trong công nghiệp nặng, bao gồm phụ gia cho nhựa, chất chiết tách, tác nhân tuyển nổi trong quá trình mạ niken, chất tạo hiệu ứng trong pháo hoa hoặc là phối tử [6].

Phốt pho trong nước thải đến từ nhiều nguồn nước thải khác nhau. Nguồn đóng góp lớn nhất là chất thải từ con người (28%), nước thải công nghiệp (26%). Bên cạnh đó, các nhóm nguồn khác như tái chế, sinh hoạt và nước mưa cũng chiếm tỷ lệ đáng kể [7].

Phốt pho tồn tại dưới nhiều dạng khác nhau trong từng loại chất thải như sau: [8]

- Orthophosphate (chất thải nông nghiệp - công nghiệp, phân heo, bùn thải từ các nhà máy xử lý nước thải);
- Pyrophosphate (sinh khối cây trồng);
- Polyphosphate (bùn thải từ các nhà máy xử lý nước thải);
- Acid phytic (chất thải nông nghiệp - công nghiệp);
- Phosphate diester (sinh khối cây trồng, chất thải nông nghiệp - công nghiệp)

Việc phốt pho được sử dụng rộng rãi phản ánh tầm quan trọng của nguyên tố này trong đời sống hàng ngày lẫn trong hoạt động công nghiệp, đồng thời nhấn mạnh sự cần thiết của quá trình thu hồi phốt pho từ môi trường.

2. CÔNG NGHỆ THU HỒI PHỐT PHO TỪ NƯỚC THẢI

Việc thu hồi các hợp chất phốt pho từ nhà máy xử lý nước thải có thể được thực hiện từ pha lỏng, bùn lỏng hoặc hỗn hợp của chúng như là nước thải sau xử lý sinh học bậc hai, dịch nổi từ bể phân hủy kỵ khí, bùn thải và các dẫn xuất của nó như tro đốt [9-11]. Những thách thức đối với việc thu hồi phốt pho một cách tối ưu bao gồm sự khác biệt về dòng nước thải với nồng độ các hợp chất P thay đổi, sự tồn tại của photpho ở dạng hòa tan hoặc liên kết sinh học - hóa học, yêu cầu về hiệu suất thu hồi cao và mức độ ô nhiễm của dòng thải, cũng như chất lượng của sản phẩm thu hồi được [12-14].

Các công nghệ thu hồi phốt pho từ nước thải chủ yếu được thực hiện trực tiếp tại cơ sở xử lý, dựa trên quá trình kết tinh và kết tủa. Khi bổ sung các hợp chất



của Mg hoặc Ca, phosphate hòa tan sẽ được thu hồi dưới dạng magiê amoni phosphate $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ (MAP, struvite) hoặc các dạng phosphate canxi (CaP) như $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ (brushite), $Ca(H_2PO_4)_2$, hydroxyapatite (HAP) hoặc octacalcium phosphate $Ca_8H_2(PO_4)_6 \cdot 5H_2O$ (OCP). Điểm khác biệt chủ yếu giữa hai phương pháp này nằm ở thời gian phản ứng: quá trình kết tủa diễn ra nhanh hơn nhưng sản phẩm thu được có cấu trúc vô định hình; trong khi kết tinh diễn ra chậm hơn nhưng cho ra sản phẩm có cấu trúc tinh thể, giúp tăng độ hòa tan và giá trị sử dụng làm phân bón [9, 15-17]. Việc thu hồi P dưới dạng vivianite ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$) cũng được quan tâm do sự tồn tại tự nhiên và giá trị kinh tế tiềm năng của khoáng vật này [18].

Kết tủa struvite là một trong những công nghệ quen thuộc và phát triển nhất, với các thông số đã được nghiên cứu rộng rãi trên nhiều loại nguyên liệu đầu vào, trong các loại thiết bị phản ứng khác nhau và thông qua nhiều tổ hợp quy trình, được tổng hợp trong nhiều công bố [12, 19-24]. Các kết luận của Li và cộng sự dựa trên 1.424 bài báo cho thấy một số yếu tố chính ảnh hưởng đến công nghệ struvite bao gồm: pH, nhiệt độ và thời gian trộn, bổ sung magiê và mầm kết tinh, cũng như các biến nhiễu như ion ngoại lai hoặc chất hữu cơ [12] (Bảng 1).

Một thông số quan trọng của quá trình kết tủa là tỷ lệ mol Mg:N:P tối ưu cho



Hồ chứa nước thải tại nhà máy chế biến cao su

struvite là 1:1:1 và giá trị pH trong khoảng 7,5-9. pH thích hợp được điều chỉnh bằng cách bổ sung NaOH hoặc tách CO_2 thông qua sục khí [9, 12, 26]. Trong khi đó, đối với quá trình kết tủa, thời gian phản ứng thường khoảng 1 giờ, pH nằm trong khoảng 8,5-9 và tỷ lệ mol Mg:N:P cần thiết cho struvite là 1,5:1:1 [20]. Quá trình kết tinh chủ yếu được tiến hành trong các thiết bị phản ứng lớp sôi hoặc thiết bị phản ứng khuấy trộn.

Ngoài công nghệ kết tủa struvite, nhiều nghiên cứu khác cũng được triển khai nhằm thu hồi photpho từ nước thải. Một số hướng tiếp cận bao gồm sử dụng quá trình trao đổi ion, trong đó ion phosphate được giữ lại trên nhựa trao đổi anion và ion amoni trên nhựa trao đổi cation; struvite có độ tinh khiết cao được kết tủa từ dung dịch sau khi tái sinh các nhựa trao đổi ion [23]. Các công nghệ khác từng được khảo sát bao gồm: bể phản ứng màng kỵ khí [27], trao đổi ion và hấp phụ, vi hạt hấp phụ từ tính, lọc phản ứng, điện thẩm tách, hệ thống sinh hóa và điện hóa [28, 29], thẩm thấu

Bảng 1. Các yếu tố ảnh hưởng tới kết tủa struvite [25]

Thông số	Khoảng tối ưu	Ảnh hưởng tích cực khi giá trị tăng	Ảnh hưởng tiêu cực
pH	8-10,5	Hiệu suất loại bỏ P cao hơn (trên 9), tốc độ tăng trưởng tinh thể (9,5)	Độ tinh khiết (trên 9), kích thước tinh thể (10,5), độ hòa tan, thế zeta
Nhiệt độ và khuấy trộn	15-35°C, 160 rpm	Tốc độ tăng trưởng (50°C), thay đổi cấu trúc tinh thể, chỉ số bão hòa, độ hòa tan, khả năng loại bỏ P, tốc độ tạo mầm	Độ tinh khiết, kích thước, pK_{sp} , độ đục, thời gian cảm ứng
Bổ sung magiê	Tỷ lệ mol Mg:P 1-2	Loại bỏ P, kích thước, mức độ quá bão hòa	Tăng chi phí hóa chất
Vật liệu gieo mầm	Nồng độ từ thấp đến cao	Tăng trưởng tinh thể, kích thước, loại bỏ P, tốc độ kết tinh	Lắng đọng, thời gian cảm ứng
Ion ngoại lai	Tỷ lệ Ca:Mg 0,5	Loại bỏ P, thời gian cảm ứng, phân bố P, kích thước, tốc độ kết tinh	Kích thước, độ tinh khiết, khả năng hình thành mầm, thời gian cảm ứng, loại bỏ P



Khảo sát lấy mẫu nước thải tại nhà máy chế biến cao su

thuận [30] hoặc đất ngập nước nhân tạo tích hợp (ICW) [31], cùng nhiều nghiên cứu liên quan khác [27, 28, 30-34].

3. TIỀM NĂNG THU HỒI STRUVITE TỪ NƯỚC THẢI

Khi các mỏ giàu phốt pho dần cạn, chất lượng quặng suy giảm, làm tăng chi phí khai thác và tạp chất. Trong khi đó, nhu cầu phân bón tổng hợp vẫn đang tăng khoảng 15 Tg/năm, chủ yếu ở các nước đang phát triển [35]. Việc sử dụng phân bón chứa phốt pho đã góp phần quan trọng trong việc tăng năng suất nông nghiệp và giảm tỷ lệ suy dinh dưỡng, đặc biệt ở các quốc gia đang phát triển [36].

Theo Liên minh châu Âu (EU), các thông số mà muối phốt phát kết tủa phải đáp ứng để trở thành vật liệu cấu thành của sản phẩm phân bón bao gồm: tối thiểu 16% P_2O_5 trong chất khô; hàm lượng arbon hữu cơ dưới 3%; tổng hàm lượng nhôm và sắt nguyên tố không vượt quá 10%; không có sự hiện diện của Salmonella spp. trong mẫu 25 g; không có Escherichia coli hoặc Enterococcaceae với nồng độ vượt quá 1000 CFU/g khối lượng tươi; không có Clostridium perfringens vượt quá 100 CFU/g khối lượng tươi; và không có trứng Ascaris sp. còn sống trong mẫu 25 g khối lượng tươi. Sản phẩm cuối cùng phải không chứa các tạp chất vật lý có thể nhìn thấy như chất hữu cơ, đá, thủy tinh và kim loại có kích thước lớn hơn 2 mm với hàm lượng <0,3%, và phải được bảo quản trong điều kiện khô ráo [37].

Theo các ước tính, đến năm 2030, khoảng 60% lượng muối phốt phát thu hồi sẽ có nguồn gốc từ nước thải đô thị và 39% từ phân chuồng. Các dòng thải khác có tiềm năng thu hồi phốt pho bao gồm nước thải công nghiệp, dung dịch ổn định dạng lỏng từ phân chuồng và các chất thải chăn nuôi khác giàu phốt pho và amoniac [38-40]. Tiềm năng thu hồi phốt pho từ nước thải đô thị và công nghiệp được ước tính vào khoảng 635.300 Mg P mỗi năm. Hiện nay chỉ khoảng 15.000 Mg struvite/năm được trao đổi thương mại trong EU với các giấy phép riêng (CrystalGreen, BioSTRU và Phốt phoGREEN). Mặc dù tiềm năng thu hồi phốt pho từ nước thải rất lớn, nhưng tổng lượng sản phẩm kết tủa từ các dòng này chỉ có thể đạt 99.000 Mg P mỗi năm do hiệu suất

thu hồi thấp và thiếu hệ thống thu hồi quy mô lớn [37, 41].

Tại châu Âu, chi phí thu hồi muối phốt phát từ nước thải được ước tính vào khoảng 2-8 euro cho mỗi kg phốt pho. Bên cạnh đó, chi phí hàng năm cho việc triển khai các quy trình thu hồi phốt pho được ước tính khoảng 2-6 euro trên đầu người [42]. Struvite thu được từ nước thải có thể được bán cho các công ty sản xuất phân bón hoặc phân phối trên thị trường với mức giá từ 188-763 euro/Mg [43-45].

Phốt pho trong các nhà máy xử lý nước thải (đô thị và công nghiệp) có thể được thu hồi bằng các công nghệ với hiệu suất 10-90%, gồm thu hồi trực tiếp sau giai đoạn xử lý sinh học có tăng cường loại bỏ phốt pho (EBPR) hoặc sau xử lý bùn (tách nước và tiêu hóa) khi áp dụng hòa tan cưỡng bức hoặc thủy phân bùn. Việc thu hồi phốt pho sau xử lý bùn là rất quan trọng, nếu không phốt pho có thể quay lại EBPR, khiến toàn bộ quy trình trở nên kém hiệu quả. Sản phẩm thu hồi cuối cùng là amoni magiê sunfat - struvite, được công nhận là phân bón hiệu quả và được gọi là “phân bón thế hệ mới” nhờ khả năng hòa tan tốt trong nước. Bên cạnh đó, kết tinh struvite còn được sử dụng như một bước tinh sạch và được áp dụng rộng rãi nhằm cải thiện hiệu suất kỹ thuật của các công nghệ xử lý nước thải. Lợi thế chính của phương pháp sinh học là chi phí vận hành thấp. Đối với các nhà máy xử lý nước thải có lưu lượng lớn nhưng nồng độ phốt pho thấp, chi phí mua chất kết tủa có thể trở nên không khả thi về mặt kinh tế. Do đó, khi việc lưu trữ chất lỏng trong nhiều ngày không phải là vấn đề (ví dụ: bể chứa chất thải, hồ điều tiết nhân tạo), các phương pháp sinh học có thể mang lại lợi ích. Phương pháp hấp phụ sinh học cũng có thể được áp dụng như một bước tiền tập trung phốt pho từ các nguồn rất loãng trước khi thu hồi. Trong các điều kiện căng thẳng đặc biệt, vi sinh vật có thể tích lũy tới 8% phốt pho trong sinh khối



Bảng 2. Ước tính lượng kết tủa struvite với nước thải chế biến cao su thiên nhiên

Năm	Sản lượng (nghìn tấn)	Tổng lượng nước thải (m ³)	Kết tủa Struvite (tấn)
2015	1013,3	25.332.500	122.863
2016	1030,0	25.750.000	124.888
2017	1090,2	27.255.000	132.187
2018	1138,3	28.457.500	138.019
2019	1185,2	29.630.000	143.706
2020	1226,1	30.652.500	148.665
2021	1227,0	30.675.000	148.774
2022	1339,5	33.487.500	162.414
2023	1270,0	31.750.000	153.988
2024	1300,0	32.500.000	157.625

khô; sau đó, photpho có thể được thu hồi bằng phương pháp nhiệt hoặc bằng kết tủa thông qua tiêu hóa yếm khí [46].

4. TIỀM NĂNG THU HỒI STRUVITE TRONG NƯỚC THẢI CHẾ BIẾN CAO SU THIÊN NHIÊN TẠI VIỆT NAM

Tại Việt Nam, nhu cầu sử dụng photpho trong nông nghiệp là rất lớn. Theo thống kê của Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên hợp quốc (FAO), lượng phân bón chứa P₂O₅ sử dụng trong nông nghiệp Việt Nam đạt khoảng 740 nghìn tấn vào năm 2020 [47]. Trong khi đó, trong các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng, nguồn thải giàu photpho phát sinh từ hoạt động nông nghiệp và các nhà máy xử lý nước thải ở khu vực Nam bộ có thể chứa tổng cộng khoảng 50 nghìn tấn P/năm, trong đó bùn thải từ hệ thống xử lý nước thải chế biến mủ cao su được xem là nguồn tiềm năng và dễ tiếp cận nhất [48].

Việt Nam là một trong số các nước dẫn đầu thế giới về khai thác và xuất khẩu CSTN. Theo số liệu của Tổng cục thống kê, năm 2022, diện tích trồng cao su đạt 918,6 nghìn ha với sản lượng khai thác hàng năm khoảng 1.339,5 nghìn tấn. Mặc dù Việt Nam chỉ đứng thứ 4 về sản lượng khai thác và xuất khẩu nhưng năng suất khai thác cao su đạt rất cao, khoảng 1,72 tấn/ha, đứng thứ 2 thế giới, chỉ sau Ấn Độ (1,78 tấn/ha) và cao hơn nhiều so với mức bình quân 1,45 tấn/ha của thế giới.

Nước thải chế biến cao su tự nhiên là một trong những loại nước thải có hàm lượng chất ô nhiễm rất cao. Theo Nguyễn Trung Việt (1999), nước thải chế biến cao su tự nhiên có thể có hàm lượng COD đến 9.962 mg/l [4]. Theo Trần Hiếu Nhuệ (2001), Lương Đức Phẩm và ctv (2009), Nguyễn Văn Phước (2010), nước thải chế biến cao su thường có độ pH thấp do việc sử dụng axit để làm đông tụ mủ cao su; nồng độ chất ô nhiễm rất cao bởi các thành phần COD, BOD, amonium, photpho, cụ thể: nồng độ COD có thể lên đến 28.450 mg/l và BOD khoảng

17.500 mg/l; nồng độ N-NH₃ trong nước thải cao, có thể đạt gần 900 mg/l, chủ yếu do việc sử dụng amoniac là chất đông tụ trong quá trình thu hoạch, vận chuyển và tồn trữ mủ cao su; hàm lượng photpho trong nước thải cũng rất cao, có thể đạt 110 mg/l. Ngoài ra, trong nước thải còn chứa hàm lượng chất rắn lơ lửng cao, có thể đạt 5.700 mg/l trong công đoạn đánh đông [5-7]. Theo khảo sát của Viện Nghiên cứu Cao su Việt Nam, thành phần trung bình các chất bẩn trong nước thải chế biến cao su Việt Nam là pH = 4,98-5,24; BOD = 4,459 -13,820 mg/L; COD = 5,015 -26,914 mg/L, P-PO₄³⁻ là 420 - 450 mg/L, ... [49, 50]. Do đó, nước thải từ các nhà máy chế biến cao su thiên nhiên, nếu không được xử lý triệt để, sẽ trở thành một trong những nguyên nhân gây ô nhiễm môi trường ngày càng nghiêm trọng như: phú dưỡng làm mất mỹ quan và chất lượng nước nguồn, xả thải vào nguồn nước sử dụng cho mục đích sinh hoạt và làm tăng chi phí xử lý [51].

Tại Việt Nam, công nghệ và hệ thống thiết bị xử lý nước thải tại các nhà máy chế biến cao su thiên nhiên là các công nghệ và thiết bị được áp dụng tại một số nước Đông Nam Á như Thái Lan, Malaysia và Indonesia. Tuy nhiên, các hệ thống xử lý này không đạt yêu cầu. Nguyen Nhu Hien và Luong Thanh thao (2012) đã khảo sát, lấy mẫu phân tích và đánh giá hiệu quả xử lý nước thải của một số nhà máy chế biến CSTN khu vực Đông Nam bộ cho thấy, trong số 07 nhà máy được khảo sát có tới 6/7 nhà máy có nước thải đầu ra không đảm bảo quy chuẩn xả thải đối với các chỉ tiêu BOD, COD, TSS, T-N và N-amoni, đặc biệt tại một số nhà máy, chỉ tiêu TN sau khi xử lý vẫn cao hơn tiêu chuẩn cho phép 2-2,6 lần, TSS cao hơn tiêu chuẩn cho phép 5 lần [49]. Do đó, việc tái sử dụng photpho từ nước thải là rất cần thiết.

Theo Viện Nghiên cứu Cao su Việt Nam, lượng nước thải phát sinh trung bình trong chế biến mủ cao su tại nước ta khoảng 25 m³ nước thải/tấn sản phẩm [50]. Theo Tổng cục thống kê, sản lượng khai thác cao su thiên nhiên tại Việt Nam có xu hướng tăng trong các năm gần đây. Điều đó dẫn tới lượng nước thải phát sinh trong ngành chế biến cao su cũng tăng theo các năm. Nước thải chế biến



cao su thiên nhiên là loại nước thải giàu nitơ và photpho, là nguồn tiềm năng để thu hồi photpho bằng phương pháp kết tủa struvite làm phân bón. Dương Văn Nam và các cộng sự đã bước đầu nghiên cứu thu hồi photpho bằng kết tủa struvite từ nước thải chế biến cao su thiên nhiên. Kết quả nghiên cứu đã thu được khối lượng kết tủa là 4,85g/L nước thải khi có bổ sung Mg và photphate [52]. Bảng 2 đã ước tính lượng kết tủa struvite được tạo ra với hàm lượng photphat trong nước thải cao su thiên nhiên.

Như vậy, lượng thu hồi photpho bằng công nghệ kết tủa struvite của nước thải chế biến cao su thiên nhiên năm 2024 có thể ước tính đạt 157.625 tấn. Đây được coi là một nguồn bổ sung lượng phân bón cho thị trường phân bón Việt Nam

Bài viết được hoàn thành với sự hỗ trợ của đề tài mã số UQSNMT.01/22-24 do Viện Khoa học vật liệu chủ trì

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Neset, T.S.S., J.O. Drangert, and H.P. Bader. *Recycling of phosphorus in urban Sweden: a historical overview to guide a strategy for the future*. 2010.
2. Vaneekhaute, C., et al., *Phosphorus use efficiency of bio-based fertilizers: bioavailability and fractionation*. . *Pedosphere*, 2016. 26(3): p. 310–325.
3. Van Wazer, J.R., *Volume II: Technology, Biological Functions and Applications. Phosphorus and its compounds*. Vol. 2. 1958: New York: Interscience Publishers
4. Snoeyink, V.L. and D. Jenkins, *Water Chemistry*. 1980: Wiley.
5. Gumbo, B., H.G. Savenije, and P. Kelderman, *Ecologising societal metabolism: the case of phosphorus*. 2002.
6. Humphreys, M., *Sustainable development in the European union 2017: Abandon Oxon (UK)*.
7. Azam, H.M., S.T. Alam, and M. Hasan, *Phosphorus in the environment: characteristics with distribution and effects, removal mechanisms, treatment technologies, and factors affecting recovery as minerals in natural and engineered system*. *Environmental Science Pollution Resources*, 2019. 26: p. 20183–20207.
8. Huang, R., C. Fang, and X. Lu, *Transformation of phosphorus during (hydro)thermal treatments of solid biowastes: reaction mechanisms and implications for P reclamation and recycling*. *Environmental Science and Technology*, 2017. 51: p. 10284–10298.
9. Egle, L., H. Rechberger, and M. Zessner, *Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015. 105: p. 325–346.
10. Sengupta, S., T. Nawaz, and J. Beaudry, *Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater*. *Current Pollution Reports*, 2015. 1: p. 155–166.
11. Jansson, A.T., R.J. Patinoh, and T. M.J., *Effect of organic compounds on dry anaerobic digestion of food and paper industry wastes*. *Biological Engineering*, 2020. 11: p. 502–509.
12. Li, B., et al., *Phosphorus recovery through struvite crystallisation: recent development in the understanding of operational factors*. *Journal of Environmental Management*, 2019. 248.
13. Mehta, C.M., et al., *Technologies to recover nutrients from waste streams: a critical review*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015. 45(4): p. 385–427.
14. Melia, P.M., et al., *Trends in the recovery of phosphorus in bioavailable forms from wastewater*. *Chemosphere*, 2017: p. 381–395.
15. Mukherjee, D., R. Ray, and N. Biswas, *Mining phosphate from wastewater: treatment and reuse*, in *Green Energy and Technology*. 2020, Sprinkers. p. 67–81.
16. Cichy, B., E. Kuzdzal, and H. Krzton, *Phosphorus recovery from acidic wastewater by hydroxyapatite precipitation*. *Journal of Environmental Management*, 2019. 232: p. 421–427.
17. Weeks, J.J. and G.M. Hettiarachchi, *A review of the latest in phosphorus fertilizer technology: possibilities and pragmatism*. *Journal of Environmental Quality*, 2019. 48: p. 1300–1313.
18. Wu, Y., et al., *Potentials and challenges of phosphorus recovery as vivianite from wastewater: a review* *Chemosphere*, 2015. 226: p. 246–258.
19. Tansel, B., G. Lunn, and O. Monje, *Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: a review of magnesium - ammonia - phosphate interactions*. *Chemosphere*, 2018. 194: p. 504–514.
20. Rahman, M.M., M.A.M. Salleh, and U. Rashid, *Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization - a review*. *Arabian Journal of Chemistry*, 2014. 7(1): p. 139–155.
21. Le Corre, K.S., E. Valsami-Jones, and P. Hobbs, *Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: a review*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2009. 39(36): p. 433–477.
22. Ghosh, S., S. Lobanov, and V.K. Lo, *An overview of technologies to recover phosphorus as struvite from wastewater : advantages and shortcomings*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019. 26: p. 19063–19077.
23. Liu, Y., et al., *Magnesium ammonium phosphate formation, recovery and its application as valuable*



- resources: a review *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2013. 88: p. 181–189.
24. Peng, L., et al., A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes. *Chemosphere*, 2018. 197: p. 768–781.
25. Zhang, X., H. Lin, and B. Hu, Phosphorus removal and recovery from dairy manure by electrocoagulation. *RSC Advances*, 2016. 6(63).
26. Hao, X., C. Wang, and M.C. van Loosdrecht, Looking Beyond Struvite for P- recovery. *Environmental Science and Technology*, 2013. 47(10): p. 4965–4966.
27. Song, X., et al., Resource recovery from wastewater by anaerobic membrane bioreactors: opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, 2002. 270: p. 669–677.
28. Kelly, P.T. and Z. He, Nutrients removal and recovery for bioelectrochemical systems: a review. *Bioresource Technology*, 2014. 153: p. 351–360.
29. Devda, V., K. Chaudhary, and S. Varjani, Recovery of resources from industrial wastewater employing electrochemical technologies: status, advancements and perspectives. *Bioengineering*, 2021. 12: p. 4679–4718.
30. Ansari, A.J., F.I. Hai, and W.E. Price, Forward osmosis as a platform for resource recovery from municipal wastewater - A critical assessment of literature. *Journal of Membrane Science*, 2017. 529.
31. Harrington, R. and R. McInnes, Integrated constructed wetlands (ICW) for livestock wastewater management. *Bioresource Technology*, 2009. 1000: p. 5498–5505.
32. Carey, D.E., Y. Yang, and P.J. McNamara, Recovery of agricultural nutrients from biorefineries. *Bioresource Technology*, 2016. 215: p. 186–198.
33. Gobbitt, J.M., Yara hemihydrate (hh) and hemidihydrate (HDH) processes for phosphoric acid production. *Procedia Engineering*, 2012. 46: p. 143–153.
34. Zou, S. and Z. He, Efficiency "pumping out" value - added resources from wastewater by bioelectrochemical systems: a review from energy perspectives. *Water Resources*, 2018. 131: p. 62–73.
35. Fields, S., Global nitrogen: cycling out of control. *Environmental Health Perspect*, 2004. 112.
36. Smil, V., Nitrogen and food production: proteins for human diets. *AMBIO: J Human Environment*, 2002. 31(2): p. 126–131.
37. Huygnes, D., et al., Technical proposals for selected new fertilising materials under the fertilising products regulation (Regulation (EU) 2019/1009). 2019, Publications Office of the European Union
38. Driver, J., D. Lijmbach, and I. Steen, Why recover phosphorus for recycling, and how? *Environmental Technology*, 1999. 20: p. 651–662.
39. Christel, W., S. Bruun, and J. Magid, Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment. *Bioresource Technology*, 2014. 169: p. 47–56.
40. Kuroda, A., N. Takiguchi, and T. Gotanda, A simple method to release polyphosphate from activated sludge for phosphorus reuse and recycling *Biotechnology and Bioengineering*, 2002. 78(3).
41. Huygnes, D., et al., Pre-final strubias report draft strubias recovery rules and market study for precipitated phosphate salts and derivatives, thermal, oxidation materials & derivatives and pyrolysis & gasification materials in view of their possible inclusion as component material. 2018.
42. Cornel, P. and C. Schaum, Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs. *Water Science and Technology*, 2009. 59: p. 1069–1076.
43. Chrispim, M.C., M. Scholz, and M.A. Nolasco, Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of Environmental Management*, 2019. 248.
44. Mehta, C.M., et al., The value of wastewater derived struvite as a source of phosphorus fertilizer. *Clean Soil, Air, Water*, 2018. 46.
45. M., M.-S., et al., Economic feasibility study for phosphorus recovery processes. *Ambio*, 2011. 40(4): p. 408–416.
46. Chaparro, S.K. and D.R. Noguera, Controlling biosolids phosphorus content in enhanced biological phosphorus removal reactors. *Water Environmental Resources*, 2003. 75: p. 254–262.
47. FAO, Fertilizers by Nutrient, in Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2023.
48. Dinh, K.V., A. Le Hung, and A. Pfennig, Phosphorus in waste sources in Southern Vietnam: potential for recovery. *Sustainable Environmental Resources*, 2023. 33: p. 7.
49. Hien, N.N. and L.T. Thao, Situation of wastewater treatment of natural rubber processing in the Southeastern region, Vietnam. *Journal of Vietnamese Environment*, 2012. 2(2): p. 58–64.
50. (RRIV), V.N.c.C.s.V.N., Báo cáo tổng kết Dự án tạo lập chu trình vòng khí thải cacbon với cao su thiên nhiên (ESCANBER). 2016, Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST) và Đại học Công nghệ Nagaoka (NUT): Hà Nội.
51. Doino, V., et al., Study on struvite in mechanically stirring fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Transactions*, 2011. 24: p. 679–684.
52. Nam, D.V., P.V. Hung, and D.V. Vien, Nghiên cứu thu hồi photpho từ nước thải chế biến cao su tự nhiên bằng phương pháp kết tủa struvite. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn*, 2017. 21: p. 82–87.