

TỔNG QUAN VỀ XỬ LÝ NƯỚC THẢI SỬ DỤNG CÁC LOẠI BÊ TÔNG PHẾ THẢI

Trần Hoài Sơn^{a,*}, Hồ Thị Mai Quyên^a, Trần Quốc Cường^a, Đỗ Hương Giang^a, Trần Thị Việt Nga^a

^aKhoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 08/9/2021, Sửa xong 23/9/2021, Chấp nhận đăng 23/9/2021

Tóm tắt

Lượng phế thải xây dựng phát sinh hằng năm tại Việt Nam ngày một gia tăng, trong đó các loại bê tông thải chiếm tới 20-30%. Tỷ lệ tái chế và tái sử dụng thấp, chôn lấp chất thải là hình thức xử lý chất thải xây dựng phổ biến làm lãng phí rất nhiều diện tích, tài nguyên và có nguy cơ cao gây ô nhiễm môi trường nếu không quản lý và thực hiện đúng cách. Tại các quốc gia phát triển như Đức, Anh, Nhật, ... phế thải xây dựng được tái chế, tái sử dụng với tỷ lệ trên 80% cho nhiều mục đích trong xây dựng và xử lý các vấn đề môi trường, trong đó có xử lý nước thải. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu về việc sử dụng các bê tông phế thải như là các vật liệu hấp phụ hiệu quả, các giá thể vi sinh thân thiện để xử lý các kim loại nặng, chất hữu cơ, chất dinh dưỡng trong nước thải đã được thực hiện. Bài báo này tổng quan các nghiên cứu về thành phần, tính chất của một số loại bê tông phế thải, cơ chế và hiệu quả loại bỏ các kim loại nặng, chất hữu cơ, chất dinh dưỡng trong nước thải, từ đó mở ra các hướng nghiên cứu, sử dụng phế thải xây dựng cho mục đích xử lý nước thải tại Việt Nam, đây hứa hẹn là hướng tiếp cận thân thiện, bền vững trong việc gia tăng việc tái sử dụng phế thải, giảm phát thải, giảm sử dụng nguyên liệu thô và hướng tới nền kinh tế tuần hoàn.

Từ khoá: chất thải xây dựng; bê tông phế thải; chất hấp phụ; vật liệu mang; kim loại nặng; xử lý nước thải.

OVERVIEW OF WASTEWATER TREATMENT BY USING CONCRETE WASTE

Abstract

In Vietnam, concrete waste accounts for 20% to 30% of construction waste which is increasingly generated every year, while the waste's recycling and reusing rate are slow. Waste burying is a common method of demolition waste treatment. It leads to wasteful space and resources and may cause environmental pollution if the treatment is not properly managed and implemented. In developed countries, such as Germany, UK, Japan, etc. over 80% of construction waste is recycled and reused for many purposes in terms of construction and environmental issues, especially in wastewater treatment. In recent years, many studies have been conducted regarding the use of concrete waste as effective adsorbents, and carrier materials for the removal of heavy metals, organic matter, and nutrients in wastewater treatment. This article reviewed studies on not only the composition and properties of some types of concrete waste, but also the mechanism and efficiency of removing heavy metals, organic matter, and nutrients in wastewater, thereby opening up new directions for research and applying of building debris for wastewater treatment purposes in Vietnam. It promises to be a friendly and sustainable approach to encourage the reuse of waste, reduce emissions and the misuse of raw materials, and towards a circular economy.

Keywords: construction waste; concrete waste; adsorbents; carrier materials; heavy metals; wastewater treatment.

[https://doi.org/10.31814/stce.huice\(nuce\)2021-15\(4V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huice(nuce)2021-15(4V)-03) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: sonth@nuce.edu.vn (Sơn, T. H.)

1. Giới thiệu

Tại Việt Nam, sự gia tăng dân số và phát triển kinh tế - xã hội đã kéo theo sự gia tăng các vấn nạn ô nhiễm môi trường, rác thải, nguồn nước, không khí, ... đồng thời đặt ra những yêu cầu cấp thiết cho công tác bảo vệ, xử lý, khắc phục các vấn đề này. Các Báo cáo Môi trường quốc gia của Tổng cục Môi trường, Bộ Tài nguyên và Môi trường giai đoạn từ năm 2013 đến nay đều đề cập đến các nguồn phát thải nước thải chủ yếu từ sinh hoạt, công nghiệp, y tế và cơ sở dịch vụ, làng nghề, chăn nuôi, ... Trong khi đó, các dự án xây dựng cơ sở hạ tầng phục vụ nhiệm vụ phát triển kinh tế - xã hội, công nghiệp hóa, hiện đại hóa thường chú trọng vào các công trình đem lại lợi ích kinh tế, còn các công trình xã hội dù vẫn được quan tâm đầu tư nhưng chưa đáp ứng được công suất yêu cầu, chưa phù hợp với tốc độ phát triển và chưa đáp ứng các tiêu chuẩn về bảo vệ môi trường [1].

Tính đến năm 2018, tỷ lệ đô thị (từ loại 3 trở lên) được đầu tư xây dựng hệ thống xử lý nước thải (XLNT) tập trung là 39% với 43 nhà máy XLNT đô thị tập trung đang được vận hành với tổng công suất thiết kế trên 926 nghìn $\text{m}^3/\text{ngày đêm}$ [2]. Nếu kể cả các dự án đang xây dựng, có khoảng 80 hệ thống XLNT tập trung, tổng công suất thiết kế khoảng 2,4 triệu $\text{m}^3/\text{ngày đêm}$ [2]. Mặc dù có trên 60% hộ gia đình Việt Nam đầu nối xả nước thải vào hệ thống thoát nước công cộng, song hầu hết nước thải được xả thẳng ra hệ thống tiêu thoát nước bề mặt, tỷ lệ nước thải được thu gom và xử lý mới chỉ đạt khoảng 13%. Ngoài ra, hệ thống thoát nước, XLNT tại Việt Nam còn thiếu đồng bộ, chưa tách biệt được hệ thống thoát nước thải với hệ thống thoát nước mưa khiến cho lượng nước thải sinh hoạt phát sinh lớn, làm giảm hiệu quả của các dự án XLNT đô thị [1]. Mặc dù số lượng công trình XLNT đô thị có tăng qua các năm, tuy nhiên con số này còn rất nhỏ so với yêu cầu thực tế cần xử lý. Ở các đô thị lớn, tỷ lệ lượng nước thải được xử lý cao hơn các đô thị vừa và nhỏ nhưng vẫn ở mức thấp, chưa đáp ứng được với tốc độ đô thị hóa hiện nay. Tại Hà Nội, mới có khoảng 20,62% tổng lượng nước thải sinh hoạt của thành phố được xử lý, trong khi tại Tp. Hồ Chí Minh, tỷ lệ lượng nước thải sinh hoạt được xử lý khoảng hơn 10% [2].

Theo báo cáo Hiện trạng Môi trường quốc gia của Bộ Tài nguyên và Môi trường năm 2019 [3], khối lượng chất thải rắn sinh hoạt (CTRSH) phát sinh tại các đô thị phụ thuộc vào quy mô dân số, tốc độ đô thị hóa, công nghiệp hóa của đô thị và đang có xu thế ngày càng tăng. Tổng khối lượng CTRSH phát sinh tại khu vực đô thị trong cả nước là 35.624 tấn/ngày (13.002.592 tấn/năm), chiếm 55% khối lượng CTRSH phát sinh của cả nước, trong đó Thành phố Hồ Chí Minh có khối lượng phát sinh lớn nhất cả nước và kế đến là Hà Nội. Chỉ tính riêng 2 đô thị này, tổng lượng CTRSH đô thị phát sinh tới 12.000 tấn/ngày chiếm 33,6% tổng lượng CTRSH đô thị phát sinh trên cả nước [3]. Sự phát triển của ngành xây dựng thời gian qua, đặc biệt là xây dựng hạ tầng kỹ thuật tăng cao, đã phát sinh một lượng lớn chất thải rắn (CTR) xây dựng. Mức độ đô thị hóa tăng cao, các công trình xây dựng tăng nhanh ở các đô thị lớn của cả nước và của vùng miền, nên lượng chất thải xây dựng cũng tăng rất nhanh, chiếm khoảng 10 - 15% CTR đô thị [4]. Các đô thị, đặc biệt Hà Nội và thành phố Hồ Chí Minh, CTR xây dựng chiếm 25% CTR đô thị [4]. Theo Tuấn và cs., phát sinh phế thải xây dựng (PTXD) ở Hà Nội đã vượt quá 3.000 tấn/ngày [5]. Theo Quy hoạch tổng thể xử lý CTR ở Hà Nội, các thành phần chính của PTXD là “Đất, Cát, Đá sỏi”, “Khối gạch và khối xây dựng” và “Bê tông”, và các loại khác bao gồm kim loại, nhựa và gỗ. Phương pháp xử lý PTXD phổ biến nhất hiện nay ở Việt Nam là đổ thải tại các bãi chôn lấp. Theo Quyết định số 609/QĐ-TTg khoảng 40-56% lượng PTXD sinh ra hàng ngày được đưa vào bãi chôn lấp PTXD tại Hà Nội [5].

Ngoại trừ PTXD thu thập được gửi đến bãi chôn lấp PTXD có kiểm soát và các vật liệu có thể bán được, các PTXD được tạo ra khác được ước tính bị đổ thải bất hợp pháp. Cải thiện việc đổ thải bất hợp pháp PTXD là một thách thức lớn đối với tất cả các bên liên quan và cần phải có biện pháp đối phó hiệu quả, ... CTR xây dựng có thành phần chủ yếu là đất cát, gạch vỡ, thủy tinh, bê tông và

kim loại, ... Thành phần bê tông trong CTR xây dựng tại Quảng Ninh là khoảng 14% [4], trong khi đó, nghiên cứu của Tuấn và cs. về PTXD tại Hà Nội thì bê tông chiếm một tỷ trọng tương đối cao lên tới 23% [5]. PTXD có giá trị lớn cho việc tái sử dụng và tái chế, tuy nhiên, nhà máy tái chế PTXD vẫn chưa phát triển đầy đủ ở Việt Nam dẫn tới tỷ lệ tái chế ở Việt Nam chỉ tầm khoảng 2% [5].

Trên thế giới, tại các quốc gia phát triển, PTXD được coi là nguồn tài nguyên quan trọng. Không những được sử dụng làm nguyên liệu đầu vào để sản xuất các loại bê tông nhẹ, bê tông tháo nước mà PTXD còn là vật liệu để xử lý các vấn đề môi trường. Trong lĩnh vực XLNT, trong những năm gần đây đã có các nghiên cứu cho thấy PTXD như bê tông thải, bê tông tái chế, bê tông khí chưng áp có nhiều đặc tính ưu việt như: thành phần hóa học có hàm lượng cao các oxit kim loại (CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ...); độ rỗng xốp, diện tích tiếp xúc lớn, các vật liệu này dễ dàng tham gia vào các phản ứng trao đổi, hấp phụ, hấp thụ phốt phát và các kim loại nặng như Cd, Pb, ... các loại bê tông này hứa hẹn sẽ trở thành các vật liệu hấp phụ chi phí thấp tiềm năng trong xử lý nước thải. Bên cạnh đó với độ rỗng xốp cao, bề mặt nhám, diện tích tiếp xúc lớn nên các loại bê tông phế thải đã, đang được nghiên cứu để làm các giá thể mang vi sinh trong các công trình lọc sinh học để XLNT có chứa các chất hữu cơ, các chất dinh dưỡng cho hiệu quả cao [6–37]. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về tái sử dụng phế thải, chất thải xây dựng cũng đã được quan tâm nhưng mới chỉ chủ yếu tập trung vào tái sử dụng trong hoạt động xây dựng như làm gạch bê tông rỗng, bê tông tái chế [38, 39]. Các quy trình kỹ thuật về phá dỡ, thu hồi chất thải, tái sử dụng chất thải xây dựng mới đang trong quá trình nghiên cứu để đưa ra hướng dẫn kỹ thuật. Chính vì thế, các nghiên cứu, công bố tại Việt Nam về ứng dụng, sử dụng PTXD còn rất khiêm tốn, chưa có các nghiên cứu tổng quan về hướng nghiên cứu XLNT bằng chất thải xây dựng hay bê tông phế thải để từ đó làm cơ sở lý thuyết tiền đề cho các nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo hoặc triển khai áp dụng thực tế. Bài báo này sẽ tổng quan các nghiên cứu về thành phần, tính chất của một số loại bê tông phế thải, cơ chế và hiệu quả loại bỏ các kim loại nặng, chất hữu cơ, chất dinh dưỡng trong nước thải, từ đó mở ra các hướng nghiên cứu, sử dụng PTXD cho mục đích XLNT tại Việt Nam, đây hứa hẹn là hướng tiếp cận thân thiện, bền vững trong việc gia tăng việc tái sử dụng phế thải, giảm phát thải, giảm sử dụng nguyên liệu thô và hướng tới nền kinh tế tuần hoàn.

2. Đặc tính kỹ thuật một số loại bê tông phế thải

Trong thành phần của PTXD, bê tông thường chiếm một tỷ trọng tương đối cao. Tuấn và cs. báo cáo tỷ lệ bê tông trong chất thải xây dựng là khoảng 23% [5], trong khi đó nghiên cứu của Hoang và cs. báo cáo tỷ lệ này lên tới 32% [40], Nguyễn và cs. công bố kết quả khảo sát thành phần phế thải tại hai bãi chôn lấp PTXD Thanh Trì và Vĩnh Quỳnh cho thấy thành phần phế thải bê tông lần lượt chiếm đến 39,6% và 53,8% [41]. Bê tông là sự kết hợp của cốt liệu gồm sỏi hoặc đá kết hợp với cát và xi măng. Các nghiên cứu đã sử dụng các phương pháp: nhiễu xạ tia X (X-ray diffraction-XRD), kính hiển vi điện tử quét (scanning electron microscopy-SEM) và phân tích phân tán năng lượng tia X (energy-dispersive X-ray analyses-EDX), phân tích diện tích bề mặt, độ rỗng xốp Brunauer – Emmett – Teller (BET) để xác định thành phần hóa học và đặc tính kỹ thuật của bê tông phế thải [6–17]. Thành phần các nguyên tố theo khối lượng (%) của bê tông phế thải đã được Nasreen và cs. (2015) phân tích gồm có: C = $7,12 \pm 0,18\%$; O = $16,79 \pm 0,57\%$; Na = $0,56 \pm 0,06\%$; Mg = $0,61 \pm 0,08\%$; Al = $5,63 \pm 0,81\%$; Si = $34,54 \pm 0,93\%$; Ca = $25,8 \pm 0,11\%$; Fe = $6,14 \pm 0,33\%$; nguyên tố khác = $2,84 \pm 0,26\%$ [6]. Abd Roni và cs. (2021) đã đánh giá thành phần của bê tông cốt liệu tái chế (Recycled aggregate concrete - RCA), bao gồm: C = 12,9–13,7%; O = 40,2–46,2%; Mg = 5,2–6,7%; Al = 8,8–8,9%; Si = 11,0–11,2%; Ca = 21,3–23,4%; Fe = 3,9–4,8%; trong đó CaO chiếm từ 50,8–56,2% [7].

Bên cạnh các loại bê tông truyền thống, bê tông khí chưng áp (Autoclaved Aerated Concrete – AAC) đã có lịch sử phát triển gần 100 năm nay ở các nước phát triển. Việt Nam đã nhập khẩu sử dụng

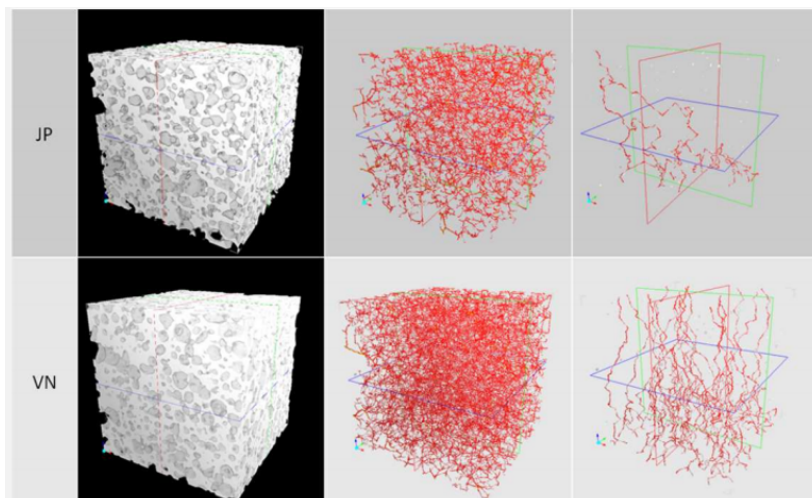
bắt đầu từ năm 2008 đến nay. Hiện nay đã nội địa hóa công nghệ và sản xuất trong nước. Bê tông khí chưng áp được sản xuất từ: xi măng, cát nghiền mịn kết hợp với vôi, thạch cao, oxit nhôm, nước và phụ gia, qua quá trình phản ứng hóa học khối, tấm bê tông nhẹ được đưa vào lò chưng áp để làm giảm trọng lượng và tăng cường độ và độ bền. Tổng hợp kết quả nghiên cứu thành phần hóa học cơ bản của bê tông khí chưng áp AAC được mô tả tại Bảng 1, thành phần chính bao gồm: $\text{SiO}_2 = 44,8\text{--}57,0\%$; $\text{CaO} = 24,9\text{--}27,6\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,95\text{--}16,06\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,0\text{--}4,2\%$; $\text{MgO} = 0,5\text{--}0,65\%$; $\text{K}_2\text{O} = 0,7\%$ [8–12].

Bảng 1. Tổng hợp thành phần hóa học của AAC trong một số nghiên cứu

Thành phần hóa học (%)	Renman và cs. [8]	Joanna và cs. [9]	Bao và cs. [10]	Sohair và cs. [11]	Trần và cs. [12]
SiO_2	51,4	44,8–57,0	44,88	45	55,18
CaO	26,3	24,9–27,6	24,98	25	28,89
Al_2O_3	1,95	1,95–16,06	16,06	17	2,76
Fe_2O_3	1,1	1,0–4,2	4,16	-	1,72
K_2O		0,7	-	-	0,87
MgO		0,5–0,65	-	-	0,63

Như vậy theo các kết quả, bê tông phế thải và bê tông khí chưng áp AAC có thành phần Ca, CaO tương đối cao do được sản xuất từ vôi, đá vôi, AAC thể hiện là vật liệu có tính kiềm. Do đó, các bề mặt hấp phụ tích điện âm có khả năng hấp phụ các cation từ nước thải và có thể trung hòa nước thải có tính axit trong quá trình hấp phụ. Hàm lượng SiO_2 và CaO tương đối cao trong AAC, điều đó cho thấy khả năng phản ứng trao đổi ion (Ca^{2+}) với kim loại nặng giống như vật liệu silicat canxi [13, 14]. Điều thú vị là trong bê tông phế thải và AAC có sự tồn tại của các nguyên tố kim loại như Fe, Al, các dạng oxit kim loại như Al_2O_3 và Fe_2O_3 , điều này cho thấy tiềm năng của nó đối với các phản ứng trao đổi ion và hấp phụ bề mặt với các chất ô nhiễm khác nhau trong nước thải.

Bên cạnh thành phần hóa học, các thông số kỹ thuật khác như độ rỗng xốp, diện tích bề mặt, kích thước lỗ rỗng, ... của vật liệu cũng rất quan trọng. Nghiên cứu của Sohair và cs. năm 2019 cho thấy hạt AACW kích thước $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ cm có diện tích bề mặt lên đến $42,8 \text{ m}^2/\text{g}$ và thể tích lỗ trung bình là $0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$, trong khi kích thước lỗ trung bình là $7,92 \text{ nm}$ [11]. So sánh với các loại giá thể vi sinh nhựa ($D = 8\text{--}15 \text{ mm}$) trong bể xử lý sinh học MBBR, có diện tích bề mặt khoảng từ $500\text{--}1200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (trọng lượng riêng $95 \text{ kg}/\text{m}^3$) như vậy diện tích bề mặt trên 1 gam vật liệu là chỉ $0,5\text{--}1,2 \text{ m}^2/\text{g}$ vật liệu thì các hạt AACW có diện tích bề mặt cao hơn từ 30–40 lần. Nghiên cứu của Yihuan Deng và cs. năm 2018 thì mô tả diện tích bề mặt của bê tông tái chế (Recycled aggregate concrete - RCA) kích thước 2–5 mm là $35 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [15]. Nghiên cứu của Dong Cheng và cs. năm 2015, cũng đo đặc diện tích bề mặt của các hạt AAC (có kích thước từ $0,5\text{--}9 \text{ mm}$) lên đến $89,21\%$, độ rỗng lên đến $89,21\%$, kích thước của các lỗ rỗng liên kết là từ $0,25\text{--}0,5 \text{ nm}$ [16]. Nghiên cứu cấu trúc rỗng, mạng lưới lỗ rỗng bên trong AAC của Matsuno và cs. cho thấy, mạng lưới rỗng trong AAC Việt Nam cao hơn 2–3 lần so với AAC Nhật Bản, cùng với đó mạng lưới này có nhiều ống rỗng liên thông giữa các bề mặt, điều này làm tăng khả năng thấm, giữ nước bên trong vật liệu [17]. Với các đặc tính thông số kỹ thuật như có độ rỗng xốp cao, diện tích bề mặt lớn và có nhiều mạng lưới lỗ rỗng liên kết bên trong (Hình 1), điều này tạo ra các lỗ rỗng mao quản, giúp tăng tính thấm, tạo ra các ưu điểm kỹ thuật phù hợp để sử dụng các loại bê tông phế thải, đặc biệt là bê tông khí chưng áp có tiềm năng cao trong việc sử dụng làm giá thể mang vi sinh trong các công trình XLNT.



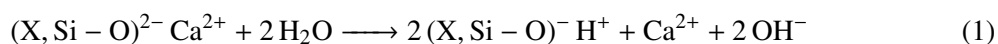
Hình 1. Cấu trúc mạng lưới rỗng của bê tông khí chưng áp AAC Nhật Bản và Việt Nam [17]

3. Xử lý kim loại nặng trong nước thải

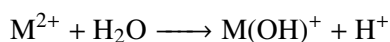
Trong vài thập kỷ gần đây, quá trình hấp phụ được biết đến như một trong những kỹ thuật xử lý tiềm năng đối với việc loại bỏ kim loại nặng trong nước. Các kết quả thí nghiệm động cho thấy chất thải phá dỡ từ xây dựng (Construction Demolition Waste – CDW) có khả năng hấp phụ với hiệu suất cao đối với Cu (II), Pb (II) và Cd (II) từ dòng nước mưa bị ô nhiễm bởi kim loại nặng [18]. Năm 2018, Kumara và cs. báo cáo về các nghiên cứu đã sử dụng CDW như gạch, bê tông, xi măng để loại bỏ kim loại nặng trong nước thải. Tuy nhiên, việc sử dụng phế thải phá dỡ CDW, AAC làm chất hấp phụ chi phí thấp rất hạn chế trong quá trình XLNT [19]. Do đó, điều quan trọng hiện nay là thúc đẩy việc tái sử dụng các vật liệu thải này như một chất hấp phụ hiệu quả trong XLNT để mang lại giá trị gia tăng cho chất thải, phế thải phá dỡ [20]. Trong những nghiên cứu gần đây, bê tông khí chưng áp phế thải AAC đã được sử dụng như là chất hấp phụ hiệu quả các kim loại nặng như Cd, Pb, ... Nghiên cứu của Zhang và cs.; Kumara và cs. sử dụng AAC để xử lý ion Cd, Pb trong nước thải, hiệu suất loại bỏ ion Cd từ 80-90%, tỷ lệ loại bỏ ion Pb là gần 100% khi sử dụng hạt AAC để XLNT nhân tạo có nồng độ ion từ 0-5000 mg/l [20, 21]. Tổng hợp một số kết quả nghiên cứu sử dụng PTXD để xử lý kim loại trong nước thải được mô tả tại Bảng 2.

Các nghiên cứu cũng chỉ ra chất hấp phụ AAC có khả năng trung hòa axit mạnh và có thể sử dụng để trung hòa, XLNT, đặc biệt là nước thải mỏ có tính axit, do bản chất vật liệu AAC có tính kiềm và giải phóng OH^- trong quá trình thủy phân [20, 21]. Năm 2019, Kumara và cs. đã sử dụng AAC để loại bỏ Pb (II), Cd (II), Cu (II), Ni (II), Zn (II) bằng các thí nghiệm hấp phụ hàng loạt. Nghiên cứu này đã chỉ ra 4 cơ chế để loại bỏ kim loại nặng khi sử dụng bê tông khí chưng áp AAC [20]:

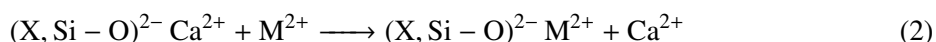
- Hydrat hóa trên bề mặt chất hấp phụ:

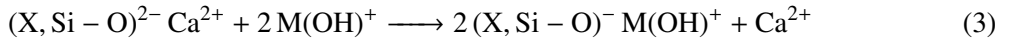


- Hydroxit hóa ion kim loại:



- Phản ứng trao đổi trên bề mặt chất hấp phụ:





- Sự tạo kết tủa trên bề mặt của ion kim loại:



trong đó X = Al, Fe, K, và Mg, và M = Cd²⁺ hoặc Pb²⁺.

Điều này ngụ ý mạnh mẽ rằng Pb(II) sở hữu các liên kết thích hợp hơn với các chất hấp phụ được thử nghiệm và chiếm chủ yếu các vị trí hấp phụ tiềm năng. Srivastava và cs. trong nghiên cứu chọn lọc cho sự hấp thụ, hấp phụ kim loại theo xu hướng hydrat hóa và thủy phân kim loại đã phát hiện ion Pb thủy phân dễ dàng hơn và nhanh chóng tương tác với bề mặt hydroxit hóa [22]. Điều kiện của các phản ứng trao đổi là cần phải hình thành hợp chất mới (kết tủa hoặc bay hơi) như vậy có thể thấy các kim loại nào có hydroxit ở dạng kết tủa sẽ dễ dàng tham gia vào phản ứng trao đổi và từ đó ion kim loại đó sẽ bị loại bỏ ra khỏi nước thải.

Bảng 2. Tổng hợp một số nghiên cứu về xử lý kim loại nặng bằng chất thải phá dỡ xây dựng

Chất hấp phụ, hấp thụ	Đối tượng	Kích cỡ VL (mm)	Tỉ lệ rắn:lỏng (g/L)	Loại nước thải	Nồng độ dung dịch TN (mg/L)	Công suất hấp phụ, hấp thụ (mg/g)	Mô hình phù hợp	Thời gian phản ứng (hours)	Tài liệu tham khảo
Bê tông vỡ	Cu	1–2	25	Nhân tạo	873 ± 29	35	Langmuir & Freundlich	3–120	[23]
	Zn		25	Nhân tạo	837 ± 17	33			
	Pb		25	Nhân tạo	1041 ± 49	37			
Bột đá cẩm thạch	Cd	0,025–0,063	2	Nhân tạo	20–60	26,99	Langmuir & Freundlich	2	[24]
	Pb	0,025–0,063	1	Nhân tạo	500–1500	101,6			
Đá ong	Cu	< 2,00	40	Nhân tạo	0–20	0,28–0,34	Langmuir & Freundlich	24	[26]
	Pb	< 2,00	20	Nhân tạo	0–20	0,74–1,55		24	
	Cd	< 2,00	60	Nhân tạo	0–20	0,12–0,21		24	
	As	< 2,00	20	Nhân tạo	0–0,5			24	
ALC/AAC	Cd	< 0,15	10	Nhân tạo	1,0–35	2,07	Langmuir & Freundlich	1,5	[21]
ALC/AAC	Pb	< 0,105	16,6	Nhân tạo	0–5000	333	Freundlich	24	[20]
		0,105–2	16,6	Nhân tạo		333		24	
		2–4,76	16,6	Nhân tạo		303		24	
	Cd	< 0,105	100	Nhân tạo		24,3	Langmuir & Freundlich	24	
		0,105–2	100	Nhân tạo		23,5		24	
		2–4,76	100	Nhân tạo		24,2		24	
Xi măng phế thải	As	1,4–3	30	Nhân tạo	0,1–1	1,92	Langmuir	1,5	[27]
Bột gạch		< 0,3	30	Nhân tạo	0,1–1	0,04	Langmuir	1,5	
Bột đá cẩm thạch		< 0,05	30	Nhân tạo	0,1–1	0,04	Langmuir	1,5	
Bột bê tông thải	Pb		50	Nhân tạo	1000	30–46	Langmuir		

4. Xử lý chất dinh dưỡng, chất hữu cơ trong nước thải

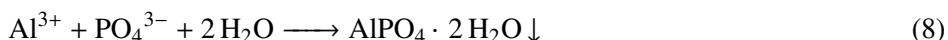
4.1. Xử lý photpho trong nước thải

Renman và cs. sử dụng AAC (đường kính 2-4 mm) theo mô hình bể lọc dòng chảy ngầm để XLNT, hiệu quả xử lý photpho đạt tới hơn 90% [8]. Nghiên cứu của Dong Chen và cs. sử dụng bê tông nhẹ (AAC) (D = 5-9 mm) trong bể lọc sinh học hiếu khí để XLNT, kết quả cho thấy hiệu quả xử

lý tổng photpho (TP) đạt từ 75,8% đến 91,3% [16]. Nghiên cứu của Bao và cs. sử dụng hạt bê tông nhẹ trong bể lọc sinh học thổi khí (Biological Aerated Filter-BAF) để xử lý nước thải sinh hoạt, hiệu quả xử lý photpho cũng đạt đến 72,45% [10]. Các nghiên cứu cho thấy hạt AAC có hiệu quả rất cao trong việc xử lý photpho, điều này được lý giải là AAC có hàm lượng oxit canxi (CaO) và các oxit kim loại rất cao, trong môi trường kiềm các chất này phản ứng với gốc PO_4^{3-} trong nước thải để tạo kết tủa.

Nghiên cứu của Adnan và cs. sử dụng cốt liệu bê tông tái chế (RCA) thu được từ chất thải bê tông nhẹ nghiền có kích thước 0-5 mm. Trong nghiên cứu này, RCA được sử dụng làm vật liệu lọc trong cột lọc sinh học có sục khí để loại bỏ TP. Mật độ khối của RCA là 1680 kg/m^3 , trong khi tỷ lệ rỗng là 36%. Kết quả cho phép thử độ hấp thụ nước của RCA là 1,27, và giá trị pH của RCA là 9,30 có tính kiềm. RCA với các kích thước 0-5 mm được sử dụng và thí nghiệm với nước thải có nồng độ TP ban đầu thấp nhất là 10 mg/L , nồng độ TP sau xử lý là $0,996 \text{ mg/L/g}$, hiệu suất loại bỏ TP cao nhất là 99,60% [32]. Ngoài việc tiết kiệm chi phí, việc sử dụng RCA sẽ giảm bớt các vấn đề môi trường hiện đang được nhận thức trên toàn cầu, RCA cũng có thể tiết kiệm không gian bãi chôn lấp, giúp giảm nhu cầu khai thác sỏi và giảm ô nhiễm. Nghiên cứu của Weijie Li và cs. [30] đã sử dụng các hạt vỡ bê tông khí chưng áp tái chế để loại bỏ nồng độ photphat thấp (1 mg/L). Ảnh hưởng của canxi hòa tan (Ca^{2+}) và pH đối với việc loại bỏ photphat đã được nghiên cứu. Các vật liệu bao gồm canxi clorua (CaCl_2) và canxi cacbonat (CaCO_3) được lựa chọn để nghiên cứu cơ chế loại bỏ nồng độ photphat thấp bằng các hạt AAC. Các phép phân tích huỳnh quang tia X, nhiễu xạ tia X, FT-IR, SEM và EDS được sử dụng để mô tả hình dạng bề mặt, các phần tử và cấu trúc bên trong của các hạt AAC trước và sau thí nghiệm. Kết quả cho thấy tốc độ loại bỏ photphat được tăng lên theo sự gia tăng của pH. CAAC cho thấy hiệu quả kém trong việc loại bỏ photphat ở điều kiện axit, nhưng có hiệu quả loại bỏ lớn trong phạm vi pH 10-12 do sự hình thành hydroxyapatite (HAP , $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$) tương ứng với đặc tính. Các hợp chất canxi hòa tan và canxi không hòa tan trong CAAC có thể kết hợp với các nhóm photphat và hydroxyl để tạo thành HAP trong điều kiện kiềm và sau đó loại bỏ photphat. Sau khi loại bỏ photphat, bề mặt của nó được bao phủ bởi một lớp kết tủa được xác nhận là HAP theo đặc tính. Để tránh điều chỉnh pH của dung dịch thành độ kiềm mạnh, CAAC đã được biến tính bằng dung dịch natri hydroxit (NaOH) để tăng hoạt tính của nó. Các sản phẩm biến tính cho thấy hiệu quả loại bỏ photphat cao (98,67%) [30]. Nói chung, các kết quả hiện tại đã chứng minh rằng việc sử dụng phế thải CAAC có thể là một công nghệ đầy hứa hẹn để xử lý photphat nồng độ thấp trong nước thải thứ cấp của thành phố.

Nghiên cứu của Deng và cs. đã chỉ ra các cơ chế phản ứng, hấp thụ photpho trên bề mặt vật liệu hấp phụ bằng các phương trình sau [15]:



4.2. Xử lý đồng thời chất hữu cơ, chất dinh dưỡng trong nước thải

Dong Chen và cs. [16] đã nghiên cứu về hạt bê tông khí chưng áp được phát triển để thay thế cho các vật liệu màng lọc sinh học để loại bỏ nitơ và photpho. Hệ thống lọc sinh học cấp khí (Biological Aerated Filter - BAF) sử dụng hạt AAC làm vật liệu mang vi sinh, vật liệu lọc sinh học. Thí nghiệm sử dụng nước thải nhân tạo có chứa các chất hữu cơ ($\text{COD}_{\text{Cr}} = 29,93\text{-}99,15 \text{ mg/l}$), photphat ($\text{PO}_4^{3-} =$

Bảng 3. Tổng hợp một số nghiên cứu về xử lý phốt pho bằng chất thải phá dỡ xây dựng

STT	Loại vật liệu	Kích cỡ vật liệu (mm)	Loại nước thải	Nồng độ dung dịch TN (mg/L)	Thời gian thí nghiệm	Công suất hấp phụ phốt phát $Q_{\max}$ (mg/g)	Tài liệu tham khảo
1	Bê tông Portland	0,045–0,3	Nhân tạo	400	16h	19,90	[31]
2	Bê tông khí	0,063–2	Nhân tạo	100	1h	11,5	[32]
3	Bê tông tái chế vỡ	0,3–2,3	Nhân tạo	20	24h	6,1	[33]
4	Bê tông tái chế	0,125-4	Nhân tạo	1000	40 ngày	19,6	[34]
5	Bê tông khí chưng áp	2–4	Nhân tạo	10	24h	28–57	[8]
6	Bê tông tái chế	2–5	Nhân tạo	15	24h	6,88	[15]
7	Phế thải bê tông khí, bê tông tường, bê tông thải	0,25–16	Nhân tạo	1000	24h	8,3–19,6	[35]
8	Bột từ phế thải phá dỡ	< 0,1	Nhân tạo	50–1600	24h	69–80,5	[36]
9	Bê tông khí chưng áp	4–5	Nhân tạo	5–20	60–1440 phút	0,053–0,313	[9]
10	Bê tông tái chế	5–20		10–30	24h	0,874–0,996	[29]

0,51-0,52 mg/l) và nitơ amoni ($\text{NH}_4\text{-N} = 9,92\text{-}10,63\text{mg/l}$). Kết quả thí nghiệm cho thấy hiệu quả loại bỏ COD, $\text{NH}_4\text{-N}$ đều tăng khi tỷ lệ COD_{Cr} so với $\text{NH}_4\text{-N}$ (C/N) trong nước thải tăng lên, hiệu quả xử lý COD đạt từ 60,21% đến 84,56%, kết quả cho thấy hiệu quả xử lý TP đạt từ 75,8% đến 91,3%. Với đặc tính độ rỗng xốp cao ($> 80\%$), hạt AAC cho diện tích bề mặt lớn lên đến $8,1 \times 10^5$ ($\text{Sw/cm}^2\text{g}$) cho phép các hạt AAC có thể sử dụng như các hạt vật liệu mang vi sinh vật dính bám trong các công trình XLNT [16]. Dong Chen và cs. đã sử dụng kính hiển vi sinh học BX41 (Olympus, Nhật Bản) để quan sát sự phát triển của màng vi sinh vật trên bề mặt giá thể AAC. Họ nhận thấy sự phát triển rất tốt của các màng vi vật này, trong đó có các vi khuẩn nitrat hóa, các vi khuẩn gắn trực tiếp vào bề mặt của các hạt AAC và màng sinh học đã được hình thành trên bề mặt của các hạt AAC, được chỉ ra bởi sự kết nối của các chất tiết ngoại bào. Các cấu trúc của màng sinh học và các tế bào được duy trì, không có dấu hiệu tắc nghẽn hoặc tan rã [16]. Sự hiện diện và phát triển của màng vi sinh vật đã cho thấy hạt AAC hoàn toàn có khả năng được sử dụng làm hạt mang, giá thể mang vi sinh.

Nghiên cứu của Bao và cs. [10], đã làm nghiên cứu so sánh khi sử dụng các hạt bê tông khí chưng áp AAC từ PTXD và các hạt Caramite (CAC) ứng dụng trong hệ thống lọc sinh học cấp khí thổi ngược BAF để đồng thời xử lý phốt pho và nitơ. Ảnh hưởng của tỷ lệ không khí/nước thải (Air/ Water - A/W) đến hiệu suất loại bỏ phốt pho (PO_4^{3-}), tổng cacbon hữu cơ (Total Organic Carbon - TOC), tổng nitơ (Total Nitrogen - TN), và nitơ amoni đã được khảo sát. Kết quả cho thấy mô hình cột lọc AAC-BAF có hiệu quả xử lý cao hơn mô hình CAC-BAF bán trên thị trường. Ví dụ, tỷ lệ loại bỏ TN của mô hình BAF-AACP và BAF-CAC tương ứng là 45,96% và 15,64%, tỷ lệ loại bỏ PO_4^{3-} tương ứng lần lượt là 72,45% và 33,97%, ở tỷ lệ A/W là 3:1. Nghiên cứu chỉ ra tính liên kết và tính đồng nhất của các lỗ xốp giúp tăng khả năng thấm và diện tích bề mặt lớn, bề mặt thô ráp của AACP được cho là thích hợp cho sự phát triển của màng sinh học vi sinh vật. Ngoài ra, sự phát triển của các lỗ rỗng bên trong hạt AAC thúc đẩy việc loại bỏ phốt pho và nitơ. Bề mặt của các hạt AAC tái chế có chứa một lượng nhỏ các tinh thể không đều và được bao phủ bởi một lớp tập hợp, được đặc trưng là hydroxyapatite [HAP , $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$] [10]. Sự hình thành HAP như một sản phẩm phụ cuối cùng đã xác nhận việc loại bỏ phốt pho thành công. Do đó, PTXD, chẳng hạn như AAC, có thể được tái chế

và sử dụng như vật liệu mang vi sinh và hấp phụ/hấp thụ đồng thời trong XLNT.

Nghiên cứu của Sohair và cs. [11] cũng sử dụng mô hình lọc sinh học BAF-AAC nhiều ngăn hiệu khí kết hợp thiếu khí để xử lý nước thải đô thị chứa đồng thời COD = $362 \pm 26,4$ mg/L, BOD = $172,6 \pm 29$ mg/L, TSS = 69-210 mg/L, Tổng nitơ Kendal (TKN) = 27,9 và N-NH₄ = 17,9 mg/L. Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả xử lý các COD, BOD, TSS, TKN, N-NH₄ đạt lần lượt là 90,48%, 90,04%, 92%, 80% và 89%. Các hạt AAC trong nghiên cứu có bề mặt nhám với tổng diện tích bề mặt khoảng 42,8 m²/g, độ rỗng xốp lớn, nhiều khe nứt. Những đặc điểm kỹ thuật này là thuận lợi để phát triển nhiều cộng đồng vi sinh vật và cải thiện khả năng loại bỏ chất ô nhiễm của lớp màng sinh học trên bề mặt vật liệu. Các thí nghiệm ảnh chụp phân tích SEM đã cho thấy sự hình thành và phát triển các cộng đồng vi sinh vật bao phủ bên ngoài các hạt AAC, các vi sinh vật cũng đồng thời xâm nhập và lấp đầy vào các lỗ rỗng [10, 11, 16]. Quá trình lấp đầy, bao phủ bởi các vi sinh vật và các chất bị hấp phụ trên bề mặt làm giảm đáng kể diện tích bề mặt của các hạt AAC. Oguz và cs. đã sử dụng phép đo BET (N₂) để so sánh, kết quả cho thấy: Diện tích bề mặt riêng của bê tông khí được tìm thấy là 22 m²/g; Diện tích bề mặt sau khi hấp phụ là 17 m²/g; Diện tích bề mặt được bao phủ bởi chất hấp phụ đã được tìm thấy là 5,23 m²/g [32]. Rõ ràng khi đã bị bao phủ bởi các chất bị hấp phụ, diện tích tiếp xúc bị giảm đi có thể dự đoán sẽ tạo ra các ảnh hưởng nhất định đến quá trình phản ứng trao đổi của các vật liệu phế thải với các tác nhân cần xử lý khác. Tuy nhiên, chưa có các nghiên cứu rõ ràng về các tác động này, và cũng chưa có các nghiên cứu thực hiện trên các loại nước thải có đồng thời các tác nhân ô nhiễm là kim loại nặng, các chất hữu cơ và các chất dinh dưỡng (nước thải công nghiệp, nước thải làng nghề).

Li và cs. [37] đã công bố kết quả nghiên cứu sử dụng các phế thải phá dỡ xây dựng (CDW) như bê tông tái chế (RCA), gạch tái chế (RBA), hỗn hợp gạch và bê tông tái chế (C&B), đá vôi (LIM), đá dung nham (LAV) và zeolite (ZEO) trong các mô hình lọc sinh học để XLNT. Kết quả thí nghiệm sau 35 ngày cho thấy, hiệu suất loại bỏ TN của các cột lọc không có quá nhiều khác biệt từ 13,3% (LIM) – 21,8% (ZEO). Tuy nhiên, hiệu quả loại bỏ TP có sự khác biệt lớn. Cột lọc RCA có hiệu quả loại bỏ cao nhất (87,1), RBA là 77,7% trong khi ZEO là 45,2% và LAV là 33,1%. Nguyên nhân được giải thích bởi thành phần hóa học, hàm lượng các ion Ca, Fe, Al tham gia vào các phản ứng trao đổi ion và kết tủa hấp phụ phốt phát trên bề mặt. Trong các vật liệu trên thì vật liệu RCA có các thành phần nguyên tố này cao hơn so với các vật liệu còn lại. Hiệu quả loại bỏ COD của các cột lọc cũng đạt từ 50-75% [37].

Các nghiên cứu bước đầu đã chứng minh được khả năng XLNT của các loại bê tông phế thải, tìm ra cơ chế, quá trình xử lý, xác định được công suất hấp phụ đối với một số kim loại nặng và phốt phát. Tuy nhiên có thể thấy, hiện nay các mô hình nghiên cứu hầu hết mới dừng lại ở các thí nghiệm hấp phụ theo mẻ và các mô hình cột lọc sinh học đơn giản một cấp. Các thí nghiệm này cho phép xác định công suất hấp phụ, hấp thụ các yếu tố ảnh hưởng, tuy nhiên khi áp dụng thực tế, rất khó để có các điều kiện tối ưu như trong phòng thí nghiệm, chưa có các nghiên cứu áp dụng trong điều kiện thực tế. Các thí nghiệm cột lọc sinh học đơn giản cho hiệu quả xử lý COD, N-NH₄, TN còn thấp, chất lượng nước đầu ra chưa đáp ứng các quy chuẩn, tiêu chuẩn hiện hành, hầu hết là thí nghiệm với nước thải nhân tạo trong phòng thí nghiệm, chính vì thế cần thiết phải tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện công nghệ. Các nghiên cứu với các loại nước thải đặc thù như nước thải công nghiệp, nước thải làng nghề, ... có chứa đồng thời nhiều tác nhân ô nhiễm để đánh giá hiệu quả xử lý và các yếu tố ảnh hưởng cần được thực hiện để đánh giá tiềm năng áp dụng vật liệu, công nghệ. Các nghiên cứu thiết lập các thí nghiệm cột lọc nhiều cấp, kết hợp các mô hình bể lọc hiếu khí - thiếu khí (bãi lọc ngầm sử dụng bê tông phế thải, bê tông tái chế thay thế cho cuội sỏi hoặc các vật liệu công nghiệp khác), các chế độ vận hành (thời gian lưu nước, tải trọng thủy lực, chế độ tuần hoàn nước thải, cấp khí, ...) để tăng hiệu

quả xử lý COD, N–NH₄, TN phù hợp với điều kiện xả thải tại Việt Nam cũng sẽ là hướng nghiên cứu triển khai trong thời gian tới để có thể phát triển công nghệ, dây chuyền XLNT phù hợp.

5. Kết luận

Sự phát triển của ngành xây dựng cùng quá trình đô thị hóa nhanh và mạnh mẽ đã dẫn đến sự phát sinh lượng lớn các phế thải, chất thải xây dựng thải ra môi trường. Bê tông phế thải, đặc biệt là bê tông khí chưng áp có thành phần hóa học và đặc tính kỹ thuật phù hợp để sử dụng làm vật liệu hấp phụ, giá thể mang vi sinh chi phí thấp và hiệu quả trong XLNT. Tổng quan các nghiên cứu đã trình bày được cơ chế, quá trình xử lý, hiệu quả xử lý các kim loại nặng, photphat, các chất hữu cơ, dinh dưỡng trong nước thải của các loại bê tông phế thải để từ đó làm cơ sở lý thuyết tiền đề cho các nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo hoặc triển khai áp dụng thực tế tại Việt Nam.

Hiện nay, tỷ lệ tái chế, tái sử dụng PTXD còn rất thấp. XLNT bằng việc sử dụng các PTXD, các vật liệu tái chế từ phế thải làm các chất hấp phụ, vật liệu mang vi sinh vẫn còn rất hạn chế. Do đó, điều quan trọng hiện nay là thúc đẩy việc tái sử dụng các vật liệu, PTXD trong XLNT để mang lại giá trị gia tăng cho chất thải, PTXD, nâng cao hiệu quả XLNT và giảm chi phí. Đây sẽ là hướng xử lý bền vững và thân thiện với môi trường, góp phần giải quyết triệt để các vấn đề môi trường, tận dụng được nguồn PTXD, giảm phát thải CTR, giảm khai thác tài nguyên và bảo vệ môi trường, từ đó hình thành, phát triển nền kinh tế tuần hoàn trong quản lý, xử lý chất thải và nước thải.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài “Nghiên cứu xử lý nước thải bằng việc ứng dụng phế thải và vật liệu tái chế từ phế thải xây dựng trong các hệ lọc sinh học”, mã số: 13-2021/KHXD-TĐ.

Tác giả chân thành cảm ơn Bộ môn Cấp thoát nước, Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã hỗ trợ phòng thí nghiệm để triển khai đề tài NCKH sinh viên: “Nghiên cứu xử lý nước thải đô thị bằng việc sử dụng phế thải và vật liệu tái chế từ phế thải xây dựng trong các hệ lọc sinh học”, mã số: MT-2021-02.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hưng, D. (2020). *Quản lý và xử lý nước thải*. Tổng cục Thống kê.
- [2] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2018). *Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia năm 2018, chuyên đề: Môi trường nước và các lưu vực sông*.
- [3] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2019). *Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia năm 2019, chuyên đề: Quản lý chất thải rắn sinh hoạt*.
- [4] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2017). *Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia năm 2017, chuyên đề: Quản lý chất thải*.
- [5] Tuân, N. K., Sơn, T. H., Phương, L. V., Hiền, N. X., Kiên, N. T., Huy, V. V., Cường, T. V. (2018). *Nghiên cứu hiện trạng quản lý phế thải xây dựng và phá dỡ ở Việt Nam*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCVND) - ĐHXDH*, 12(7):107–116.
- [6] Nasar, N., Sumaraj, B. P., Payattati, B. (2015). *Crushed Waste Concrete as Active Filter Material for Phosphate Elimination from Domestic Wastewaters*. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4:6427–6434.
- [7] Roni, N. A., Adnan, S. H., Hamidon, N., Ismail, T. N. H. T. (2021). *The vertical recycled concrete aggregate filter for removal of phosphorus in wastewater*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 646(1):012038.

- [8] Renman, G., Renman, A. (2012). Sustainable use of crushed autoclaved aerated concrete (CAAC) as a filter medium in wastewater purification. *8th International conference on sustainable management of waste and recycled materials in construction*, Gothenburg, Sweden, ISCOWA and SGI.
- [9] Castellar, J. A. C., Formosa, J., Chimenos, J. M., Canals, J., Bosch, M., Rosell, J. R., Silva, H. P., Morató, J., Brix, H., Arias, C. A. (2019). [Crushed Autoclaved Aerated Concrete \(CAAC\), a Potential Reactive Filter Medium for Enhancing Phosphorus Removal in Nature-Based Solutions—Preliminary Batch Studies](#). *Water*, 11(7):1442.
- [10] Bao, T., Yu, Z. M., Damtie, M. M., Wu, K., Jin, J., Zhang, Y., Wei, X. L., Frost, R. L. (2019). [Use of autoclaved aerated concrete particles for simultaneous removal of nitrogen and phosphorus as filter media from domestic wastewater](#). *Environmental Technology*, 41(23):3032–3042.
- [11] Abou-Elela, S. I., El-Enein, S. A. A., Hellal, M. S. (2019). [Utilization of autoclaved aerated concrete solid waste as a bio-carrier in immobilized bioreactor for municipal wastewater treatment](#). *Desalination and Water Treatment*, 168:108–116.
- [12] Sơn, T. H., Nga, T. T. V., Kawamoto, K. (2020). Xử lý kim loại nặng trong nước bằng phế thải xây dựng bê tông khí chưng áp (AAC). *Tạp chí Cấp thoát nước*, 5.
- [13] Song, Y., Li, B., Yang, E.-H., Liu, Y., Ding, T. (2015). [Feasibility study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as aerating agent for the production of autoclaved aerated concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 56:51–58.
- [14] Shabalala, A. N., Ekolu, S. O., Diop, S., Solomon, F. (2017). [Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage - column study](#). *Journal of Hazardous Materials*, 323: 641–653.
- [15] Deng, Y., Wheatley, A. (2018). [Mechanisms of Phosphorus Removal by Recycled Crushed Concrete](#). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2):357.
- [16] Chen, D., Yu, C., Bao, T., Zhu, C., Qing, C., Chen, T. (2015). [Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus using autoclaved aerated concrete particles in biological aerated filters](#). *Desalination and Water Treatment*, 57(41):19402–19410.
- [17] Matsuno, A., Ishizuka, S., Nguyen, T. L., Nguyen, T. D., Nguyen, V. T., Nguyen, H. G., Kawamoto, K. (2020). [Comparison of macropore structures and networks of Autoclaved Aerated Concrete blocks using micro-focus X-ray computed tomography](#). *International Journal of Geomate*, 19(71).
- [18] Wang, J., Zhang, P., Yang, L., Huang, T. (2015). [Adsorption characteristics of construction waste for heavy metals from urban stormwater runoff](#). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(9):1542–1550.
- [19] Kumara, G. M. P., Saito, T., Asamoto, S., Kawamoto, K. (2018). [Review of heavy metal removal from wastewater by CDWs](#). *International Journal of Geomate*, 14(42).
- [20] Kumara, G. M. P., Kawamoto, K., Saito, T., Hamamoto, S., Asamoto, S. (2019). [Evaluation of Autoclaved Aerated Concrete Fines for Removal of Cd\(II\) and Pb\(II\) from Wastewater](#). *Journal of Environmental Engineering*, 145(11):04019078.
- [21] Zhang, Y., Zeng, L., Kang, Y., Luo, J., Li, W., Zhang, Q. (2017). [Sustainable use of autoclaved aerated concrete waste to remove low concentration of Cd \(II\) ions in wastewater](#). *Desalination and Water Treatment*, 82:170–178.
- [22] Srivastava, P., Singh, B., Angove, M. (2005). [Competitive adsorption behavior of heavy metals on kaolinite](#). *Journal of Colloid and Interface Science*, 290(1):28–38.
- [23] Coleman, N. J., Lee, W. E., Slipper, I. J. (2005). [Interactions of aqueous Cu, Zn and Pb ions with crushed concrete fines](#). *Journal of Hazardous Materials*, 121(1-3):203–213.
- [24] Ghazy, S. E., Gabr, I. M., Gad, A. H. M. (2008). [Cadmium\(II\) sorption from water samples by powdered marble wastes](#). *Chemical Speciation & Bioavailability*, 20(4):249–260.
- [25] Ghazy, S. E., Gad, A. H. M. (2014). [Lead separation by sorption onto powdered marble waste](#). *Arabian Journal of Chemistry*, 7(3):277–286.
- [26] Nga, N. T. H. (2013). *Application of volcanic ash soil and laterite to water treatment*. PhD thesis, Kyushu University Institutional Repository.
- [27] Bibi, S., Farooqi, A., Hussain, K., Haider, N. (2015). [Evaluation of industrial based adsorbents for simultaneous removal of arsenic and fluoride from drinking water](#). *Journal of Cleaner Production*, 87:

882–896.

- [28] Ma, Z., Xue, R., shan Li, J., Zhao, Y., Xue, Q., Chen, Z., Wang, Q., Poon, C. S. (2021). [Use of thermally modified waste concrete powder for removal of Pb \(II\) from wastewater: Effects and mechanism.](#) *Environmental Pollution*, 277:116776.
- [29] Adnan, S. H., Roni, N. A., Hamdan, R., Yassin, N. I. M., Kamarulzaman, N. A. (2018). [A New Design of Recycled Concrete Aggregates as an Aerated Filter for Removal of Phosphorus.](#) *Journal of Physics: Conference Series*, 1049:012018.
- [30] Li, W., Zeng, L., Kang, Y., Zhang, Q., Luo, J., Guo, X. (2015). [A solid waste, crashed autoclaved aerated concrete, as a crystalline nucleus for the removal of low concentration of phosphate.](#) *Desalination and Water Treatment*, 57(30):14169–14177.
- [31] Agyei, N. M., Strydom, C. A., Potgieter, J. H. (2002). [The removal of phosphate ions from aqueous solution by fly ash, slag, ordinary Portland cement and related blends.](#) *Cement and Concrete Research*, 32(12):1889–1897.
- [32] Oguz, E., Gurses, A., Yalcin, M. (2003). [Removal of phosphate from waste waters by adsorption.](#) *Water, Air, and Soil Pollution*, 148(1/4):279–287.
- [33] Molle, P., Liénard, A., Grasmick, A., Iwema, A. (2003). [Phosphorus retention in subsurface constructed wetlands: investigations focused on calcareous materials and their chemical reactions.](#) *Water Science and Technology*, 48(5):75–83.
- [34] Egemose, S., Søndrup, M. J., Beintin, M. V., Reitzel, K., Hoffmann, C. C., Flindt, M. R. (2012). [Crushed Concrete as a Phosphate Binding Material: A Potential New Management Tool.](#) *Journal of Environmental Quality*, 41(3):647–653.
- [35] Liu, X., Zhong, H., Yang, Y., Yuan, L., Liu, S. (2020). [Phosphorus removal from wastewater by waste concrete: influence of P concentration and temperature on the product.](#) *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10):10766–10777.
- [36] dos Reis, G. S., Cazacliu, B. G., Correa, C. R., Ovsyannikova, E., Kruse, A., Sampaio, C. H., Lima, E. C., Dotto, G. L. (2020). [Adsorption and recovery of phosphate from aqueous solution by the construction and demolition wastes sludge and its potential use as phosphate-based fertiliser.](#) *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1):103605.
- [37] Li, H., Zhang, Y., Wu, L., Jin, Y., Gong, Y., Li, A., Li, J., Li, F. (2021). [Recycled aggregates from construction and demolition waste as wetland substrates for pollutant removal.](#) *Journal of Cleaner Production*, 311:127766.
- [38] Tuấn, N. K., Nhất, L. D., Thới, N. T., Khải, P. Q., Khanh, N. V. (2020). [Nghiên cứu sử dụng phế thải xây dựng và thải phẩm công nghiệp chế tạo gạch bê tông rỗng.](#) *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 14(4V):106–117.
- [39] Quang, N. T., Cường, T. V., Tân, N. N., Tân, N. H., Giang, N. H. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của tỷ lệ sử dụng cốt liệu lớn tái chế đến sự phát triển cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông theo thời gian.](#) *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(1V):48–59.
- [40] Hoang, N. H., Ishigaki, T., Kubota, R., Yamada, M., Kawamoto, K. (2019). [A review of construction and demolition waste management in Southeast Asia.](#) *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(2):315–325.
- [41] Nguyen, H. G., Nguyen, D. T., Nghiem, H. T., Tran, V. C., Kato, A., Matsuno, A., Isobe, Y., Kawasaki, M., Kawamoto, K. (2021). [Current Management Condition and Waste Composition Characteristics of Construction and Demolition Waste Landfills in Hanoi of Vietnam.](#) *Sustainability*, 13(18):10148.