

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Khả năng sử dụng tro xỉ sau đốt rác thải sinh hoạt thay thế cốt liệu trong bê tông

Feasibility of using municipal solid waste incineration bottom ash as aggregate replacement in concrete

► PGS.TS **Đồng Kim Hạnh**

Trường Đại học Thủy lợi

Email liên hệ: dongkimhanh@tlu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 10/5/2026

Ngày sửa bài: 16/6/2026

Ngày chấp nhận đăng: 24/6/2026

Ngày xuất bản Online: 29/6/2026

Tác giả liên hệ:

Email: dongkimhanh@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Công nghệ đốt rác phát điện (Waste-to-Energy - WtE) đang được nhân rộng như một giải pháp thay thế, tuy nhiên lượng tro xỉ phát sinh sau đốt, bao gồm tro đáy lò (bottom ash - BA) và tro bay (fly ash - FA) cần được đánh giá kỹ lưỡng trước khi tái sử dụng. Nghiên cứu này phân tích hàm lượng kim loại nặng trong tro xỉ và tro bay thu được từ hệ thống đốt rác phát điện tại cơ sở xử lý chất thải công nghiệp URENCO, Sóc Sơn, Hà Nội, đồng thời đánh giá tính tương đồng về thành phần hạt của tro xỉ với cốt liệu (cát sông và đá dăm) dùng trong bê tông.

Mẫu được lấy tại băng tải của 5 lò ngay sau khi đốt. Kết quả phân tích 16 chỉ tiêu kim loại nặng theo Tiêu chuẩn EPA Method 1311 và SMEWW 3125:2012 cho thấy nồng độ ngấm chiết của cả tro xỉ và tro bay đều thấp hơn ngưỡng cho phép tại QCVN 07:2009/BTNMT (100 - 1.000 lần), không vượt tiêu chí phân loại chất thải nguy hại. Phân tích thành phần hạt theo TCVN 7570:2006 cho thấy tro xỉ có phân bố cỡ hạt rộng ($D_{10} = 0,21$ mm; $D_{60} = 5,48$ mm; $D_{max} = 14$ mm), tương đồng với nhóm cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn trong bê tông thường. Kết quả nghiên cứu bước đầu cho thấy tro xỉ sau đốt rác phát điện tại Việt Nam có tiềm năng sử dụng làm cốt liệu bê tông.

Từ khóa: Cốt liệu; tro xỉ sau đốt rác; Waste-to-Energy.

ABSTRACT

Waste-to-Energy (WtE) incineration is increasingly adopted as an alternative treatment, yet the bottom ash (BA) and fly ash (FA) generated require thorough

evaluation prior to reuse. This study analysed the heavy metal content of BA and FA collected from the URENCO industrial waste-to-energy facility in Sóc Sơn, Hà Nội and assessed the particle size compatibility of BA with conventional concrete aggregates (river sand and crushed stone).

Samples were collected from conveyor belts of 5 combustion units immediately after incineration. Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) analysis of 16 heavy metal parameters according to EPA Method 1311 and SMEWW 3125:2012 showed that leachate concentrations of both BA and FA were 100 - 1,000 times below the threshold limits of QCVN 07:2009/BTNMT, confirming non-hazardous classification. Particle size analysis per TCVN 7570:2006 revealed that BA exhibits a wide grading distribution ($D_{10} = 0.21$ mm; $D_{60} = 5.48$ mm; $D_{max} = 14$ mm), comparable to both fine and coarse aggregate groups in conventional concrete. These preliminary findings indicate that MSWI bottom ash from Vietnamese WtE facilities has potential as a concrete aggregate substitute.

Keywords: Aggregate; bottom ash; Waste-to-Energy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Là nước đang phát triển, Việt Nam muốn phát triển bền vững không chỉ cần chú trọng phát triển kinh tế mà cần tính đến các giải pháp an sinh xã hội và bảo vệ môi trường. Xét riêng vấn đề bảo vệ môi trường, rác thải được quan tâm chú ý từ thập niên 70 - 80 của thế kỷ trước, đặc biệt là chất thải từ hoạt động sinh hoạt của con người (chất thải rắn sinh hoạt-CTRSH). Do đó, việc thu gom, xử lý CTRSH vẫn chỉ ở mức độ đơn giản. Chất thải sau khi được tập kết thì đổ thải tại nơi quy định. Phương pháp chủ yếu xử lý là chôn lấp. Cách làm này không chỉ gây lãng phí tài nguyên đất, "tài nguyên" rác mà còn ảnh hưởng xấu đến môi trường nước mặt, nước ngầm, đất và không khí ở khu vực bãi chôn lấp rác.

Quá trình đô thị hóa càng nhanh càng kéo theo sự gia tăng khối lượng CTRSH. Theo Báo cáo Hiện trạng Môi trường Quốc gia năm 2023, tổng lượng CTRSH phát sinh cả nước đạt khoảng 67.877 tấn/ngày, trong đó khu vực đô thị chiếm khoảng 38.143 tấn/ngày [1]. Tỷ lệ chôn lấp vẫn chiếm ~64% tổng lượng chất thải được xử lý, gây áp lực lớn về quỹ đất và ô nhiễm môi trường (như khu xử lý Nam Sơn - Sóc Sơn, Hà Nội) đã vượt quá công suất thiết kế.

Công nghệ đốt rác phát điện (Waste-to-Energy - WtE) đang được triển khai tại Việt Nam như một giải pháp thay thế, với ưu điểm giảm 90 - 95% thể tích chất thải, thu hồi năng lượng và giảm phát thải khí nhà kính. Tuy nhiên, quá trình đốt phát sinh một lượng đáng kể tro xỉ, bao gồm tro đáy lò (bottom ash - BA, chiếm 15 - 20% khối lượng đầu vào) và tro bay (fly ash - FA, chiếm 1 - 5%), cần được đánh giá tính an toàn trước khi tái sử dụng [2].

Trên thế giới, tái sử dụng tro xỉ đốt rác đô thị (Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash - MSWIBA) trong xây dựng đã được nghiên cứu rộng rãi. Sivayogaraj và Elavenil [3] tổng hợp từ 38 nghiên cứu độc lập cho thấy tỷ lệ thay thế 6% cốt liệu mịn bằng MSWIBA giúp bê tông đạt cường độ nén tối ưu ~36 MPa và khả năng chống băng giá F100. Tại Việt Nam, nghiên cứu về lĩnh vực này còn rất hạn chế, nhất là đánh giá tính an toàn môi trường của tro xỉ theo QCVN 07:2009/BTNMT.

Bài báo hướng đến hai mục tiêu: (1) Đánh giá mức độ nguy hại của 16 chỉ tiêu kim loại nặng trong tro xỉ và tro bay theo QCVN 07:2009/BTNMT; (2) phân tích tính tương đồng về thành phần hạt của tro xỉ so với cốt liệu thông thường trong bê tông theo TCVN 7570:2006.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Tro xỉ từ lò đốt rác và đặc điểm

CTRSH có thành phần phức tạp từ nhiều nguồn: Hộ gia đình, bệnh viện, cơ sở thương mại và công nghiệp. Khi đốt ở 850 - 1.100°C, CTRSH chuyển hóa thành hai dạng tro:

(i) Tro đáy lò (BA): Chiếm 15 - 20% khối lượng đầu vào, bị đẩy ra ở phần đáy buồng đốt sau khi cháy hoàn tất. Thành phần chủ yếu là silicat, canxi oxit, sắt và các kim loại nặng tỉ lệ thấp.

(ii) Tro bay (FA): Chiếm khoảng 1 - 5% khối lượng đầu vào, thu hồi từ hệ thống lọc bụi điện và túi lọc. Hạt rất mịn, thường có hàm lượng kim loại nặng cao hơn BA do cơ chế ngưng tụ hơi kim loại trên bề mặt hạt nhỏ [2].

2.2. Tiêu chuẩn và quy chuẩn liên quan

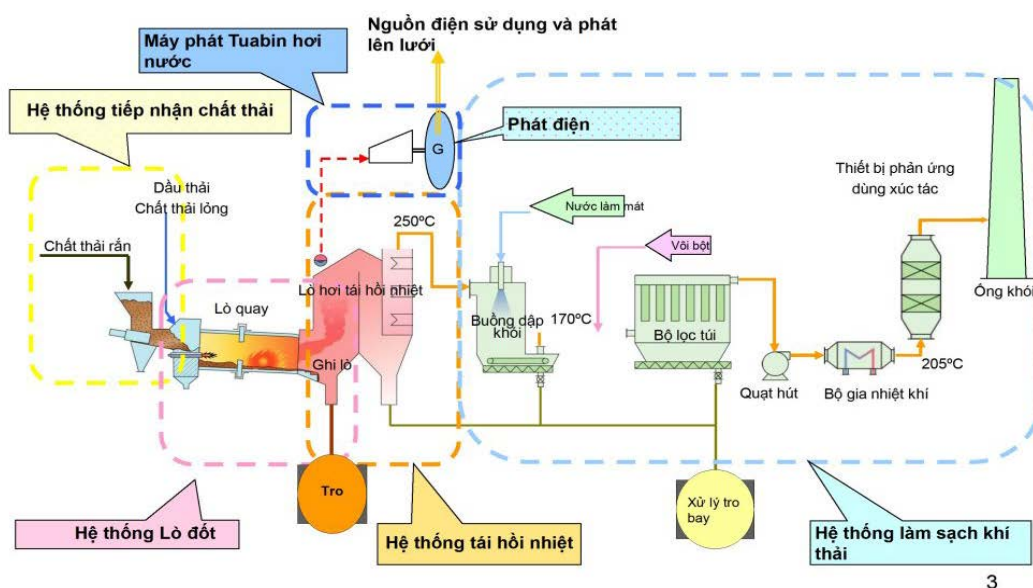
QCVN 07:2009/BTNMT quy định ngưỡng nồng độ ngấm chiết (Ctc) của 16 chỉ tiêu nguy hại trong chất thải; phương pháp thử theo EPA Method 1311 (TCLP). TCVN 7570:2006 quy định chỉ tiêu thành phần hạt của cốt liệu nhỏ (cát) và cốt liệu lớn (đá dăm, sỏi) dùng trong bê tông nặng, bao gồm đường cong cấp phối, hàm lượng bùn sét và các chỉ tiêu cơ lý.

3. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Đối tượng và lấy mẫu

Đối tượng nghiên cứu là tro đáy lò (tro xỉ thải) và tro bay thu được từ cơ sở xử lý chất thải công nghiệp phát điện URENCO, xã Trung Giã, huyện Sóc Sơn (cũ), TP Hà Nội, công suất xử lý 75 tấn/ngày [2]. Mẫu được lấy trực tiếp tại băng tải của 5 lò đốt, mỗi lò lấy khoảng 10 kg mẫu ngay sau khi đốt (mẫu nguyên bản, chưa qua xử lý), đảm bảo tính đại diện cho toàn bộ hệ thống. Mẫu được bao gói kín, bảo quản khô và vận chuyển đến Phòng Thí nghiệm Viện Công nghệ Môi trường trong vòng 48 giờ.

Vật liệu đối chứng gồm cát sông và đá dăm là cốt liệu bê tông thông thường đang sử dụng trên địa bàn. Cả ba loại vật liệu được sấy khô ở 110°C đến khi khối lượng không đổi trước khi thí nghiệm.



Hình 1. Quy trình thiêu hủy rác phát điện tạo tro đáy và tro bay

Nguồn: URENCO [2]

3.2. Phương pháp thí nghiệm

a) Phân tích kim loại nặng - thử độc tính ngấm chiết (TCLP)

Mỗi loại tro được tiến hành thí nghiệm độc lập với 3 mẫu lặp lại (n = 3). Phương pháp: EPA Method 1311 (TCLP) cho ngấm chiết; SMEWW 3125:2012 kết hợp EPA 3051:1996 cho phân tích ICP-MS; EPA 1311:2007 kết hợp EPA 9013A+9012B cho Crom VI. Kết quả so sánh với Ctc theo QCVN 07:2009/BTNMT.

b) Phân tích thành phần hạt (cấp phối hạt)

Theo TCVN 7570:2006, phương pháp sàng rung, mẫu vật liệu được đưa vào bộ sàng rung máy 10 phút. Bộ sàng gồm có cỡ đá dăm và cát theo thứ tự giảm dần: 25 mm → 20 mm → 16 mm → 10 mm → 5 mm → 2,5 mm → 1,25 mm → 0,63 mm → 0,315 mm → 0,16 mm → 0,063 mm → đáy. Khối lượng mẫu thử: 5 kg cho đá dăm và tro xỉ (phân bố hạt rộng); 1 kg cho cát sông. Kết quả sàng cho mẫu tro xỉ (m₀ = 5.000 g). Lần lượt mỗi loại cốt liệu được phân chia kích cỡ sau khi tiến hành sàng và đo khối lượng tích lũy lọt qua mỗi loại mắt sàng (dùng kết hợp cả sàng cho cát và cho đá), được trình bày trong Bảng 4.



a)

b)

c)

Hình 2. Mẫu tro xỉ thải sau đốt (a), cát sỏi (b), đá cấp phối (c)

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Đánh giá mức độ nguy hại của kim loại nặng

Bảng 1. Kết quả phân tích kim loại nặng trong tro xỉ thải (tro đáy lò)

TT	Chỉ tiêu phân tích	Phương pháp thử	Kết quả (mg/l)			Số lần vượt QC	Nồng độ ngấm chiết C _{tc} (mg/l) QCVN 07:2009
			Lần 1	Lần 2	Lần 3		
1	Asen (Ast)	SMEWW 3125:2012 & EPA 3051:1996	0,002	0,003	0,004	-	2
2	Bari (Ba)		0,194	0,156	0,306	-	100
3	*Cadimi (Cd)		0,0232	0,0024	0,0009	-	0,5
4	*Crom VI (Cr VI)	EPA 1311:2007	<0,10	<0,10	<0,10	-	-
5	Chì (Pb)	SMEWW 3125:2012 & EPA 3051:1996	0,004	0,002	0,001	-	15
6	Thủy ngân (Hg)		0,0005	0,0005	0,0004	-	0,2
7	Niken (Ni)		1,140	0,620	0,295	-	70
8	Antimom (Sb)		0,005	0,003	0,002	-	1
9	Berili (Be)		0,001	<0,001	<0,001	-	0,1
10	Selen (Se)		0,014	0,033	0,040	-	1

11	Talium (Tl)	<0,001	<0,001	<0,001	-	7
12	*Valadi (V)	0,008	0,012	0,012	-	25
13	Bạc (Ag)	<0,001	0,001	<0,001	-	5
14	Molypden (Mo)	0,090	0,123	0,102	-	350
15	Coban (Co)	0,202	0,039	0,008	-	80
16	Kẽm (Zn)	3,743	0,134	0,042	-	250

Ghi chú: Ctc: Nồng độ ngâm chiết cho phép; (—): Không vượt ngưỡng hoặc không áp dụng cho chỉ tiêu này.

Bảng 2. Kết quả phân tích kim loại nặng trong tro bay

TT	Chỉ tiêu phân tích	Phương pháp thử	Kết quả (mg/l)			Số lần vượt QC	Nồng độ ngâm chiết C _{tc} (mg/l) QCVN 07:2009
			Lần 1	Lần 2	Lần 3		
1	Asen (As)	SMEWW	0,001	0,008	0,007	-	2
2	Bari (Ba)	3125:2012 & EPA	0,916	0,908	0,531	-	100
3	*Cadimi (Cd)	3051:1996	0,0013	0,0012	0,0018	-	0,5
4	*Crom VI (Cr VI)	EPA 1311:2007 & EPA 9013A+9012B	<0,10	<0,10	<0,10	-	-
5	8Chì (Pb)	SMEWW 3125:2012 & EPA 3051:1996	0,133	0,032	0,002	-	15
6	Thủy ngân (Hg)		0,0007	0,0006	0,0005	-	0,2
7	Niken (Ni)		0,291	0,335	0,158	-	70
8	Antimom (Sb)		0,011	0,009	0,007	-	1
9	Berili (Be)		<0,001	<0,001	<0,001	-	0,1
10	Selen (Se)		0,329	0,278	0,116	-	1
11	Talium (Tl)		0,064	0,017	0,002	-	7
12	*Valadi (V)		0,037	0,045	0,024	-	25
13	Bạc (Ag)		0,001	0,001	<0,001	-	5
14	Molypden (Mo)		0,297	0,184	0,191	-	350
15	Coban (Co)		0,012	0,013	0,009	-	80
16	Kẽm (Zn)		0,443	0,380	0,146	-	250

Ghi chú: Ctc = nồng độ ngâm chiết cho phép; (—): Không vượt ngưỡng quy định hoặc phương pháp không áp dụng cho chỉ tiêu này.

Toàn bộ 16 chỉ tiêu kim loại nặng trong tro xỉ thải (Bảng 1) đều có nồng độ ngâm chiết thấp hơn ngưỡng C_{tc} của QCVN 07:2009/BTNMT, tỷ lệ dao động 1/100 - 1/1.000 lần, không có chỉ tiêu nào vượt quy chuẩn. Tương tự, tro bay (Bảng 2) cũng đáp ứng QCVN 07:2009, tuy nhiên hàm lượng kim loại nặng có xu hướng cao hơn tro xỉ ở phần lớn các chỉ tiêu, phù hợp với cơ chế tích tụ theo hạt mịn trong quá trình đốt. Đáng chú ý là một số chỉ tiêu như selen (Se) đạt 0,329 mg/l (lần 1), chì (Pb) đạt 0,133 mg/l (lần 1) và bari (Ba) đạt 0,916 mg/l (lần 1) trong tro bay - cao hơn đáng kể so với tro đáy nhưng vẫn trong giới hạn cho phép. Sự biến thiên lớn giữa các lần lặp (như kẽm trong tro xỉ: 3,743 - 0,042 mg/l; chì trong tro bay: 0,133 - 0,002 mg/l) phản ánh tính không đồng nhất của thành phần rác đầu vào giữa các mẻ đốt.

Cả tro xỉ và tro bay đều không thuộc loại chất thải nguy hại xét về tiêu chí kim loại nặng theo QCVN 07:2009/BTNMT, có thể xem xét tái sử dụng trong xây dựng. Kết quả này nhất quán với các nghiên cứu quốc tế về MSWIBA từ các lò đốt hiện đại [3, 4].

4.2. Đánh giá tính tương đồng về cốt liệu

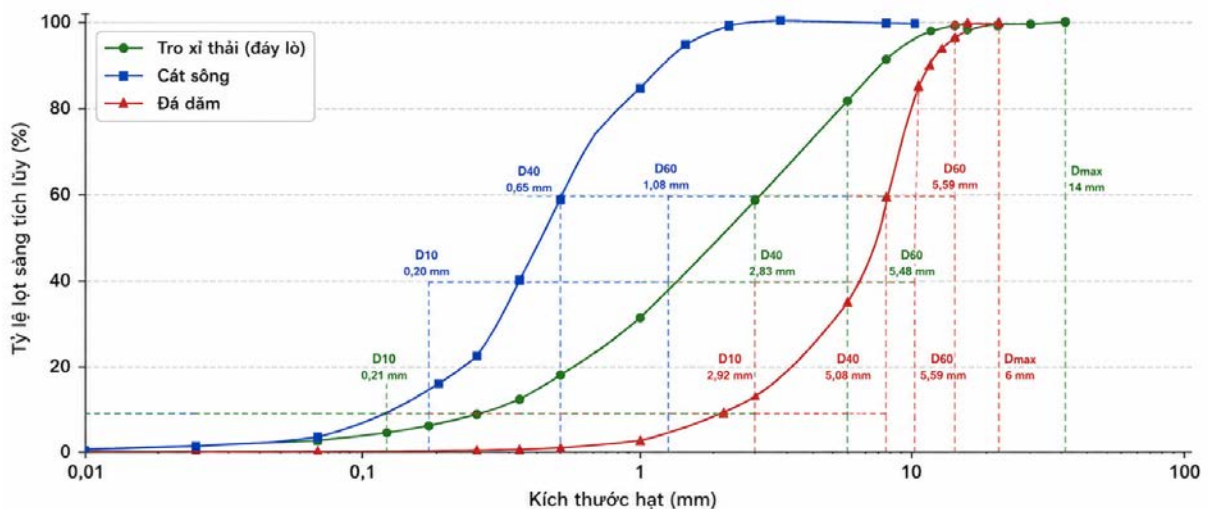
Kết quả phân tích thành phần hạt theo TCVN 7570:2006 được trình bày trong Bảng 3 và tính toán sàng tích lũy trong Bảng 4.

Bảng 3. Đặc trưng thành phần hạt của tro xỉ thải, cát sông và đá dăm

Cốt liệu	Hàm lượng hạt mịn <0,063 mm (%)	D10 (mm)	D40 (mm)	D60 (mm)	Dmax (mm)
Tro xỉ thải (đáy lò)	4,8	0,21	2,83	5,48	14
Cát sông	0,2	0,20	0,65	1,08	2,5
Đá dăm	0,4	2,92	5,08	5,59	6

Ghi chú: Dmax - kích thước hạt lớn nhất.

Đối chiếu kết quả tính toán lượng sót sàng tổng cộng trên mỗi bộ sàng tương ứng với cát và đá dăm dùng trong bê tông theo tiêu chuẩn TCVN 7570-2006 thì lượng tro xỉ và tro bay có phân bố trong giới hạn cho phép và nằm trong đường bao cấp phối hạt của cát và đá dăm với kích thước hạt phân bố khá rộng từ hạt mịn đến hạt thô. Giá trị D10, D40 và D60 của tro xỉ lần lượt đạt 0,21 mm; 2,83 mm và 5,48 mm, lớn hơn đáng kể so với cát sông nhưng nhỏ hơn hoặc xấp xỉ đá dăm. Kích thước hạt lớn nhất Dmax của tro xỉ đạt 14 mm, cho thấy vật liệu này chứa cả các hạt có kích thước tương đối lớn, tuy nhiên phân bố hạt thô chưa đủ rõ rệt để đóng vai trò hoàn toàn như cốt liệu đá dăm trong bê tông. Đồng thời, hàm lượng hạt mịn nhỏ hơn 0,063 mm của tro xỉ đạt 4,8%, cao hơn nhiều so với cát sông (0,2%) và đá dăm (0,4%), chứng tỏ vật liệu có lượng hạt bụi và hạt siêu mịn đáng kể.



thiếu tỷ lệ hạt lớn ổn định và khả năng chịu lực cơ học của hạt cần được đánh giá thêm. Vì vậy, vật liệu này phù hợp hơn khi sử dụng như nguồn thay thế cát ở tỷ lệ nhất định thay vì thay thế hoàn toàn đá dăm. Để đảm bảo chất lượng bê tông, cần tiến hành xử lý sơ bộ như sàng lọc, rửa giảm hàm lượng hạt mịn và kiểm soát độ hút nước của tro xỉ trước khi sử dụng. Các nghiên cứu tiếp theo cần đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế đến cường độ chịu nén, độ bền lâu, co ngót và khả năng chống xâm thực của bê tông nhằm xác định phạm vi ứng dụng phù hợp trong thực tế xây dựng.

Bảng 4. Kết quả phân tích thành phần hạt của tro xỉ thải ($m_0 = 5.000$ g)

Mắt sàng	Khối lượng sót (g)	Sốt tích lũy (%)	Lọt qua tích lũy (%)
25 mm	320	6,4	93,6
20 mm	180	10,0	90,0
16 mm	210	14,2	85,8
10 mm	490	24,0	76,0
5 mm	680	37,6	62,4
2,5 mm	520	48,0	52,0
1,25 mm	610	60,2	39,8
0,63 mm	480	69,8	30,2
0,315 mm	340	76,6	23,4
0,16 mm	290	82,4	17,6
0,063 mm	120	84,8	15,2
<0,063 mm (đáy)	240	89,6	10,4

Ghi chú: Giá trị D10, D40, D60 được xác định bằng nội suy trên đường cong cấp phối hạt.

Tro xỉ thải có phân bố hạt rộng từ mịn đến thô. Hàm lượng hạt mịn (<0,063 mm) đạt 4,8% - cao hơn cát (0,2%) và đá (0,4%) - phần này có đặc tính pozzolanic và có thể dùng như phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng. D10 của tro xỉ (0,21 mm) tương đương cát sông (0,20 mm), trong khi D60 (5,48 mm) và Dmax (14 mm) tương đồng với đá dăm (D60 = 5,59 mm). Như vậy, sau khi sàng phân loại, tro xỉ có thể được ứng dụng cho ba nhóm: (i) hạt mịn (<0,063 mm) làm phụ gia khoáng; (ii) hạt nhỏ (0,063 - 5 mm) làm cốt liệu mịn; (iii) hạt lớn (>5 mm) làm cốt liệu thô.

5. KẾT LUẬN

Cả tro xỉ thải và tro bay từ hệ thống đốt rác phát điện URENCO Sóc Sơn đều có 16 chỉ tiêu kim loại nặng thấp hơn ngưỡng QCVN 07:2009/BTNMT (100 - 1.000 lần), không thuộc loại chất thải nguy hại. Tro xỉ thải có hàm lượng kim loại nặng thấp hơn tro bay, phù hợp hơn cho ứng dụng trực tiếp làm cốt liệu.

Phân bố cỡ hạt của tro xỉ thải (D10 = 0,21 mm; D60 = 5,48 mm; Dmax = 14 mm) tương đồng với cả cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn theo TCVN 7570:2006. Sau khi sàng phân loại, tro xỉ có thể ứng dụng cho ba nhóm vật liệu: Phụ gia khoáng, cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn.

Để triển khai ứng dụng thực tế, cần tiếp tục nghiên cứu: (i) Cường độ nén và độ bền bê tông khi thay thế cốt liệu bằng tro xỉ ở các tỷ lệ khác nhau; (ii) hàm lượng SO_3 , chloride và tạp chất theo TCVN 7570:2006; (iii) đường cong cấp phối đầy đủ so sánh với đường bao theo tiêu chuẩn; (iv) nghiên cứu trên quy mô rộng hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Báo cáo Hiện trạng Môi trường Quốc gia năm 2023, Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2023.

[2] URENCO. Hồ sơ pháp lý dự án Xử lý chất thải công nghiệp phát điện. Công ty TNHH MTV Môi trường Đô thị Hà Nội, Hà Nội, 2017.

[3] Sivayogaraj, A., & Elavenil, S. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as a sustainable construction material - A meta-analysis of 38 studies. Scientific Reports, 15, Article 23774, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23774-6>.

[4] Zhu, J., et al. Influence of municipal solid waste incineration bottom ash as fine aggregate replacement on mechanical and durability properties of concrete. Materials, 15(13), e4620, 2022. Internet: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9267427/>.

[5] Bộ Tài nguyên và Môi trường. QCVN 07:2009/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về ngưỡng chất thải nguy hại. Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, 2009.

[6] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 7570:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2006.

[7] US EPA. Method 1311 - Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Washington D.C., United States Environmental Protection Agency, 2007.

[8] SMEWW. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition. Method 3125 - Metals by ICP-MS. Washington D.C., APHA/AWWA/WEF, 2012.