

ĐÁNH GIÁ CÁC ĐẶC TÍNH VẬT LÝ, HÓA HỌC CỦA TRO ĐÁY TỪ QUÁ TRÌNH ĐỐT CHẤT THẢI RẮN ĐÔ THỊ VÀ TÁC ĐỘNG ĐẾN TÍNH NĂNG CỦA BÊ TÔNG

EVALUATION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION BOTTOM ASH AND ITS IMPACT ON THE PERFORMANCE OF CONCRETE

➔ **Ths. Kỹ Minh Hưng** - Khoa Kỹ thuật xây dựng - Trường Đại học Trà Vinh.

Email: kmhung12@tvu.edu.vn - Điện thoại: 0947.014.050

➔ **TS. Nguyễn Thanh Tâm** - Khoa Kỹ thuật xây dựng - Trường Đại học Trà Vinh.

Email: tamteam15@yahoo.com - Điện thoại: 0982.284.405

Tóm tắt: Nghiên cứu này đánh giá các đặc tính vật lý, hóa học và khoáng vật của tro đáy từ lò đốt chất thải rắn đô thị và tác động của vật liệu này khi sử dụng thay thế cốt liệu thông thường trong bê tông. Dữ liệu được thu thập từ Scopus trong giai đoạn 2010-2024 theo hướng tiếp cận định tính và được xử lý bằng WOSviewer nhằm trực quan hóa có hệ thống nhu cầu nghiên cứu. Kết quả tổng hợp cho thấy tro đáy có tiềm năng trở thành vật liệu thay thế khả thi cho cốt liệu truyền thống. Các tính chất của bê tông như cường độ nén, co ngót, độ rỗng, độ thấm nước và sự giãn nở thay đổi đáng kể khi sử dụng tro đáy. Những thay đổi này có thể được hạn chế thông qua các phương pháp xử lý cơ học, hóa học và nhiệt, qua đó nâng cao khả năng ứng dụng của tro đáy trong bê tông nhưng vẫn duy trì độ bền và tính toàn vẹn kết cấu. Việc sử dụng tro đáy trong xây dựng góp phần giảm tác động môi trường, tiết kiệm tài nguyên cốt liệu tự nhiên và thúc đẩy phát triển bền vững trong ngành xây dựng.

Từ khóa: Tính năng bê tông; Tro đáy lò đốt chất thải rắn đô thị; ảnh hưởng của tro đáy MSWI đến bê tông; xử lý tro đáy MSWI.

Abstract: This study evaluates the physical, chemical, and mineral properties of bottom ash from municipal solid waste incinerators and its impact when used as a substitute for conventional aggregates in concrete. Data were gathered from scopus.com between 2010 and 2024 using a qualitative study methodology and subsequently integrated using the WOSviewer application to provide systematic visual representations demonstrating the necessity of the research. An examination of these investigations revealed significant trends in the field, highlighting the potential of bottom ash as a viable alternative to conventional aggregates. The review's findings indicate that the properties of concrete, such as compressive strength, shrinkage, porosity, water permeability, and expansion, significantly differ when bottom ash is used as a replacement for normal particles. These changes, although first alarming, can be alleviated by the application of diverse therapeutic methodologies. The extraction of bottom ash using mechanical, chemical, and thermal methods enhances its applicability in concrete while maintaining essential properties, including durability and structural integrity. The study highlights the potential to enhance the quality of bottom ash to meet construction industry norms. Utilizing bottom ash in construction reduces adverse environmental impacts and conserves natural aggregate resources. This consequently alleviates reliance on newly sourced materials, thereby diminishing the environmental impact of conventional aggregate extraction. This research endorses supplementary sustainable development in the construction sector, facilitating environmental conservation and resource optimization throughout time.

Keywords: Concrete performance; Municipal solid waste incineration bottom ash; Effect of MSWI bottom ash on concrete; MSWI bottom ash treatment.

1. Đặt vấn đề

Cùng với sự gia tăng dân số và phát triển kinh tế toàn cầu, lượng chất thải rắn đô thị (MSW) được dự báo tăng mạnh, có thể đạt 3,4 tỷ tấn vào năm 2050[1]. Hạ tầng đốt rác là một giải pháp hiệu quả để xử lý các loại chất thải khó phân hủy sinh học hoặc khó tái chế, đồng thời chuyển hóa chúng

thành năng lượng nhiệt. Tuy nhiên, phát thải khí ô nhiễm và phát sinh tro, xỉ sau đốt vẫn là những vấn đề sinh thái chủ yếu của hệ thống đốt rác phát điện[2]. Ô nhiễm khí thải có thể được kiểm soát bằng hệ thống xử lý phù hợp, nhưng quản lý sản phẩm phụ sau đốt vẫn là vấn đề cần được giải quyết hiệu quả. Quá trình đốt làm giảm đáng kể thể tích

chất thải, nhưng các sản phẩm phụ của đốt rác đô thị vẫn chiếm khoảng 20% thể tích ban đầu. Tùy theo công nghệ, hệ thống đốt rác tạo ra ba nhóm sản phẩm phụ gồm tro bay, tro đáy và cặn xử lý khí thải [3][8]. Trong đó, chỉ tro đáy thường được phân loại là chất thải không nguy hại [4]. Tro đáy từ quá trình đốt chất thải rắn đô thị (MSWI) thường được thu ở đáy buồng đốt và chiếm khoảng 80-90% khối lượng sản phẩm phụ sau đốt [5]. Tại Việt Nam, tốc độ đô thị hóa và tăng dân số nhanh làm gia tăng lượng rác thải đô thị, gây ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng đến sức khỏe con người. Vì vậy, nhiều cơ sở đốt rác đã được xây dựng và vận hành, tạo ra lượng tro đáy đáng kể, phần lớn hiện vẫn được chôn lấp. Dữ liệu năm 2019 cho thấy tổng lượng chất thải rắn đô thị phát sinh trên toàn quốc là 64.658 tấn/ngày; cùng với việc phát triển nhiều nhà máy đốt rác, lượng tro phát sinh ngày càng lớn.

Việc sử dụng tro đáy từ quá trình đốt chất thải rắn đô thị trong vật liệu xây dựng đang trở nên cần thiết. Các thành phần khoáng trong tro đáy có thể được dùng để sản xuất gốm và nhiều vật liệu xây dựng như clinker xi măng, cốt liệu và chất kết dính. Tro đáy MSWI cũng được sử dụng làm vật liệu san lấp, nền đường và đê kè [6]. Ở Việt Nam, dù đã có một số quy định và tiêu chuẩn liên quan đến việc sử dụng một phần tro đáy trong xây dựng, phạm vi ứng dụng vẫn còn hạn chế, đặc biệt là nghiên cứu sử dụng tro đáy trong sản xuất bê tông. Các nghiên cứu về tối ưu hóa sử dụng tro đáy và phát triển bê tông thân thiện môi trường vẫn chưa nhiều. Việc dùng tro đáy MSWI làm vật liệu xi măng bổ sung hoặc tiền chất cho vật liệu hoạt hóa kiềm còn gặp nhiều thách thức do thành phần không đồng nhất và phức tạp. Đặc tính hóa học, vật lý của tro đáy chịu ảnh hưởng mạnh bởi thành phần rác đầu vào, quá trình đốt và phương pháp xử lý, vì vậy cần nghiên cứu toàn diện để nâng cao hiệu quả sử dụng trong bê tông.

Nghiên cứu này sử dụng phân tích phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) và phổ huỳnh quang tia X để đánh giá các đặc tính hóa học, vật lý của tro đáy MSWI, tập trung vào việc nhận diện các nguyên tố như Ca, Si, Al, Fe và Mg. Sự tương tác giữa tro đáy và xi măng cũng như quá trình thủy hóa chịu ảnh hưởng đáng kể bởi thành phần khoáng như thạch anh, canxit, oxit sắt và các đặc tính vật lý như độ rỗng, kích thước hạt và phân bố pha khoáng. Nghiên cứu xem xét tác động của tro đáy MSWI đến chất lượng bê tông, đặc biệt là cường độ nén và độ bền lâu. Việc thay thế một phần cốt liệu truyền thống bằng tro đáy MSWI làm thay đổi cường độ nén của bê tông. Tỷ lệ thay thế 30% có thể làm giảm cường độ đáng kể, trong khi tỷ lệ thấp hơn như 10% có thể chỉ làm giảm nhẹ hoặc trong một số trường hợp còn cải

thiện tính năng. Cần tiếp tục nghiên cứu các tham số ảnh hưởng đến giãn nở và co ngót của bê tông chứa tro đáy, nhất là cơ chế hình thành tinh thể ettringite từ các pha sulfate và alumina. Tổng hợp các nghiên cứu tại Việt Nam cho thấy vật liệu thải này có tiềm năng ứng dụng trong sản xuất bê tông, đồng thời mở ra cơ hội cho ngành Xây dựng và bảo vệ môi trường.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phân tích thư mục nhằm nhận diện xu hướng nghiên cứu về đặc tính vật lý, hóa học của tro đáy MSWI và ảnh hưởng của chúng đến sản xuất bê tông. Độ tin cậy và tính bao quát của nguồn thông tin được bảo đảm thông qua việc tổng hợp dữ liệu từ cơ sở dữ liệu Scopus, một kho tài liệu nghiên cứu có uy tín. Để bảo đảm độ chính xác, phương pháp tìm kiếm và thu thập dữ liệu được thực hiện theo các tiêu chí xác định trước, bao gồm khoảng thời gian 2010-2024, loại tài liệu là bài báo tạp chí, bài hội nghị và bài tổng quan, ngôn ngữ tiếng Anh. Các thuật ngữ “MSWI”, “concrete”, “treatment”, “bottom ash” và “cement” được kết hợp với các toán tử logic OR, AND và NOT để tối ưu hóa kết quả. Cuối cùng, các bài trùng lặp, không liên quan hoặc thiếu thông tin quan trọng được loại bỏ trong bước lọc dữ liệu.

Choose type of analysis and counting method

Type of analysis: Co-authorship Co-occurrence Citation Bibliographic coupling Co-citation

Unit of analysis: All keywords Author keywords Index keywords

Counting method: Full counting Fractional counting

VOSviewer thesaurus file (optional):

(a)

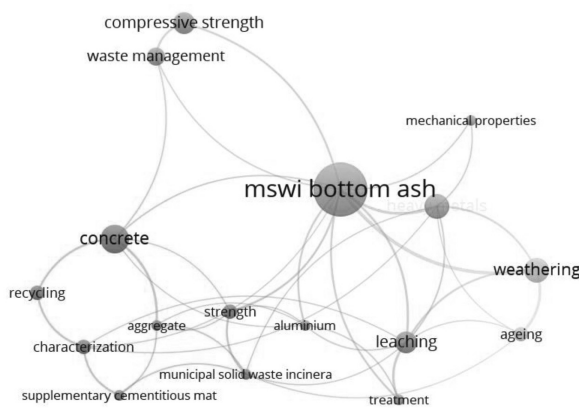
Verify selected keywords

Selected	Keyword	Occurrences	Total link strength
<input type="checkbox"/>	bottom ash	15	12.00
<input checked="" type="checkbox"/>	mswi bottom ash	15	12.00
<input checked="" type="checkbox"/>	weathering	7	7.00
<input checked="" type="checkbox"/>	heavy metals	7	6.00
<input checked="" type="checkbox"/>	leaching	6	6.00
<input checked="" type="checkbox"/>	concrete	8	5.00
<input checked="" type="checkbox"/>	ageing	4	4.00
<input checked="" type="checkbox"/>	characterization	4	4.00
<input checked="" type="checkbox"/>	compressive strength	6	4.00
<input type="checkbox"/>	mswi	5	4.00
<input checked="" type="checkbox"/>	recycling	4	4.00
<input checked="" type="checkbox"/>	waste management	5	4.00
<input checked="" type="checkbox"/>	aggregate	3	3.00
<input checked="" type="checkbox"/>	aluminium	3	3.00
<input type="checkbox"/>	fly ash	3	3.00
<input type="checkbox"/>	incineration	4	3.00
<input type="checkbox"/>	incinerator bottom ash	3	3.00
<input checked="" type="checkbox"/>	municipal solid waste incineration bottom ash	3	3.00
<input checked="" type="checkbox"/>	strength	4	3.00
<input checked="" type="checkbox"/>	treatment	3	3.00

(b)

Hình 1. Tạo bản đồ: (a) Chọn loại phân tích và phương pháp đếm để tạo bản đồ; (b) Kiểm tra các từ khóa được chọn để tạo bản đồ

Sau khi thu thập dữ liệu, tệp giá trị phân tích bằng dấu phẩy được nhập vào WOSviewer theo phương pháp của Van và cộng sự [26] để tạo biểu diễn trực quan mạng đồng xuất hiện từ khóa, qua đó nhận diện các chủ đề nghiên cứu chính. Quy trình bắt đầu bằng lựa chọn loại dữ liệu, trong đó người dùng chọn “Create a map based on bibliographic data”, sau đó trích xuất dữ liệu từ tệp thư mục Scopus. Phân tích đồng xuất hiện từ khóa là kỹ thuật chính, sử dụng từ khóa tác giả làm đơn vị phân tích. Các từ khóa đáp ứng ngưỡng xuất hiện được chọn để tạo bản đồ (Hình 2).



Hình 2. Mạng lưới nghiên cứu về tro đáy MSWI

3. Kết quả và thảo luận

Phần này phân tích các đặc tính hóa học và vật lý của tro đáy từ quá trình MSWI, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của chúng đến sản xuất bê tông. Trước hết, các đặc tính hóa học của tro đáy được trình bày dựa trên kết quả phân tích huỳnh quang tia X và các oxit chính, làm rõ vai trò tiềm năng của các thành phần này trong quá trình thủy hóa xi măng. Tiếp theo, đặc tính bề mặt và cấu trúc của tro đáy được phân tích vì chúng ảnh hưởng đến tính chất cơ học và tuổi thọ bê tông. Các nghiên cứu về cường độ nén, độ thấm nước, độ rỗng và sự giãn nở của bê tông chứa tro đáy cũng được tổng hợp nhằm xác định tác động của các tỷ lệ thay thế khác nhau. Cuối cùng, các biện pháp xử lý tro đáy trước khi sử dụng trong bê tông được đề cập nhằm nâng cao khả năng tái sử dụng và giảm tác động môi trường.

3.1. Đặc tính hóa học

Phần này tổng quan và tổng hợp các nghiên cứu đã công bố về ảnh hưởng hóa học của tro đáy MSWI, sử dụng các dữ liệu thí nghiệm khác nhau để làm rõ thành phần ban đầu và vai trò tiềm năng của chúng trong chế tạo bê tông.

Thành phần hóa học của tro đáy từ quá trình đốt chất thải rắn đô thị được xác định bằng phương pháp huỳnh quang tia X. Tro đáy MSWI chứa lượng

đáng kể Al_2O_3 , SiO_2 và CaO , đây là các thành phần quan trọng đối với quá trình thủy hóa xi măng. Hàm lượng CaO trong hạt nhỏ hơn 0,125 mm đạt 38,41%, trong khi SiO_2 và Al_2O_3 lần lượt là 16,46% và 15,68% [7]. Hàm lượng các oxit thay đổi theo kích thước hạt, trong đó SiO_2 tăng ở các hạt lớn hơn [29]. Đây cũng là các thành phần chính của xi măng Portland thông thường (OPC) [8].

Bên cạnh Si có hàm lượng cao (>10.000 mg/kg), các cation chính gồm Ca, Al, Na và Fe. Các kim loại nặng đáng quan tâm về môi trường như Zn, Pb, Cr và Cu cũng được phát hiện ở mức tương đối cao (>100 mg/kg) [9]. Thành phần hóa học trung bình của tro đáy MSWI phong hóa tự nhiên được trình bày trong Bảng 1, trong đó có 49,38% SiO_2 và 14,68% CaO cùng các thành phần khác [10].

Trong bảng này, giá trị clo (Cl) được ghi là “n.d.”, nghĩa là “không phát hiện”. Điều này cho thấy nồng độ clo trong mẫu tro đáy phong hóa tự nhiên thấp hơn giới hạn đo hoặc giới hạn phát hiện của phương pháp phân tích.

Các thành phần oxit ban đầu của tro đáy MSWI được trình bày trong Bảng 1 và phù hợp với các nghiên cứu trước. Phân tích các oxit chính cho thấy thành phần chiếm ưu thế là SiO_2 (34,0%), CaO (28,4%) và Al_2O_3 (8,3%) cùng với các oxit khác. Các thành phần cấp ảnh hưởng đáng kể đến tính chất của tro đáy và biến đổi theo đặc điểm rác đầu vào cũng như điều kiện vận hành, chẳng hạn nhiệt độ đốt. Một số nghiên cứu cho thấy việc xử lý chất thải mặn và polyvinyl chloride có thể làm tăng hàm lượng chloride trong tro đáy MSWI [11]. Trong tro đáy MSWI, SiO_2 chủ yếu tồn tại dưới dạng thạch anh, đóng vai trò tạo mầm trong thủy hóa nhưng đóng góp tổng thể còn hạn chế. Loginova và cộng sự [12] cho thấy hàm lượng silicon trong hạt tro đáy thô có thể gấp đôi hạt nhỏ, nhấn mạnh nhu cầu nghiên cứu các hạt thô [12]. Phần lớn các pha chứa nhôm trong tro đáy tồn tại ở dạng kim loại. Các hợp chất Al, Pb và Zn là những thành phần đáng chú ý đối với sản phẩm bê tông. Hàm lượng Al cao có thể gây trương nở trong bê tông tươi, trong khi Pb và Zn có thể làm chậm thời gian đông kết [13].

Bảng 1. Thành phần hóa học trung bình của tro đáy MSWI phong hóa tự nhiên.

Oxit	Tro đáy MSWI (%)
SiO_2	49.38
CaO	14.68
Fe_2O_3	8.38
Na_2O	7.78
Al_2O_3	6.58
MgO	2.32

K ₂ O	1.41
CuO	1.26
SO ₃	0.57
Cl	n.d.
ZnO	0.38

Dữ liệu ở Bảng 2 cho thấy nồng độ kim loại nặng thấp hơn nhiều so với ngưỡng quy định tại QCVN 07:2009/BTNMT[14], chứng tỏ tro đáy MSWI được phân loại là chất thải rắn không nguy hại. Thành phần hóa học của tro đáy được phân tích bằng phương pháp hóa ướt (Bảng 3), cho thấy vật liệu chủ yếu gồm các oxit thông dụng.

Bảng 2. Thành phần kim loại nặng trong tro đáy MSWI

Chỉ tiêu	Nồng độ rò rỉ (mg/L)	Hàm lượng tuyệt đối (ppm)
Bari (Ba)	2.604	209.8
Crom VI (CrVI)	0.400	< 6
Kẽm (Zn)	0.279	1,476
Chì (Pb)	0.170	774.6
Molybden (Mo)	0.075	2.4
Thủy ngân (Hg)	0.024	0.86
Thali (Tl)	0.023	< 1
Niken (Ni)	0.013	15.8
Asen (As)	0.009	10.7
Coban (Co)	0.009	4.3
Selen (Se)	0.007	2.5
Antimon	0.002	22.9
Cadimi (Cd)	0.002	144.4
Vanadi (V)	< 0.01	10.5
Bạc (Ag)	< 0.001	37.2
Berili (Be)	< 0.001	0.14

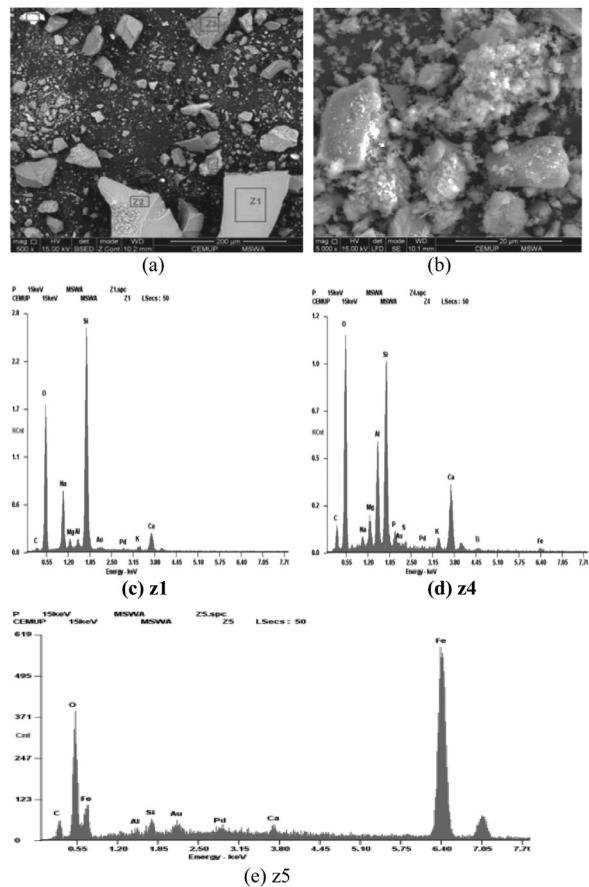
Bảng 3. Thành phần hóa học cơ bản của tro đáy MSWI

Công thức hóa học	Tên	Đơn vị	Kết quả
Al ₂ O ₃	Oxit nhôm	%	7.77
CaO	Oxit canxi	%	19.32
Cl-	Ion chloride	%	1.33
Fe ₂ O ₃	Oxit sắt	%	3.44
K ₂ O	Oxit kali	%	1.64
LOI	Mất khi nung	%	5.73
MgO	Oxit magie	%	2.02
Na ₂ O	Oxit natri	%	3.51
SiO ₂	Dioxit silic	%	52.84
SO ₃	Trioxit lưu huỳnh	%	0.75
TiO ₂	Dioxit titan	%	0.44
	Hàm lượng silica hòa tan	mMol/L	105
	Độ giảm kiềm	mMol/L	269

3.2. Đặc tính vật lý

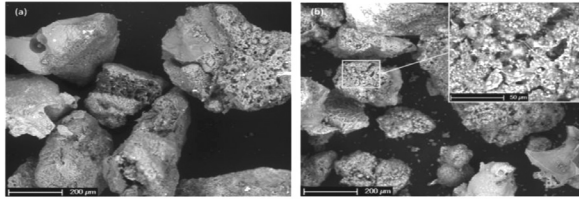
Phần này phân tích các đặc tính vật lý của tro đáy MSWI dựa trên các nghiên cứu đã công bố. Thông qua tổng hợp nhiều kết quả nghiên cứu, bài viết làm rõ cách các đặc điểm vật lý của vật liệu ảnh hưởng đến khả năng ứng dụng thực tế.

Phân tích phổ EDX của các hạt tro đáy nghiên cứu cho thấy sự hiện diện của Al, Fe, Mg và Si (Hình 3c-e), phù hợp với các thành phần oxit chính được xác định bằng huỳnh quang tia X như trình bày ở Bảng 1. Titan cũng được ghi nhận (Hình 3c.z4) [15]. Phổ EDX cho thấy các hạt lớn hơn (Hình 3c.z1) chứa nhiều silicon, oxy và natri hơn. Một số hạt sáng gồm sắt và oxy, có thể là oxit sắt (Hình 3c.z5) [16]. Hình 3a cho thấy các hạt tro đáy nghiên cứu, quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM), có hình thái không đều, góc cạnh, với các mảnh vỡ xuất hiện trên bề mặt một số hạt. Hình 3b cho thấy đặc điểm này phù hợp với các nghiên cứu trước. Tính chất bề mặt của hạt MSWI chủ yếu xuất phát từ các hợp chất đệm, chất ô nhiễm còn lại trong chất thải và các nguyên tố phức hợp có thể gây kết tụ hạt ở nhiệt độ cao trong quá trình đốt [17]. Các hạt có cấu trúc dạng xốp như Hình 3a.z3



Hình 3. Ảnh SEM ở chế độ điện tử thứ cấp của hạt tro đáy: (a) Tổng quan hạt ($\times 500$), (b) Đặc điểm chi tiết hạt ($\times 5000$), (c) Phổ EDX tại vùng z1, (d) Phổ EDX tại vùng z4, (e) Phổ EDX tại vùng z5

có thể gồm các thành phần khoáng bị nóng chảy một phần hoặc hoàn toàn, sau đó trở nên rỗng khi khí bị giữ bên trong thoát ra.



Hình 4. Hình thái tro đáy MSWI thu hồi khô trong không khí (0-2 mm) được phân tích bằng SEM (độ phóng đại 100 và 500x, điện áp gia tốc 10 kV)

Ảnh SEM (Hình 4) cho thấy các hạt tro có nhiều lỗ rỗng và hốc, tạo nên bề mặt thô ráp và diện tích bề mặt lớn. Đặc điểm này làm tăng nhu cầu nước khi đưa vào hỗn hợp xi măng và tăng khả năng tương tác hóa học trong quá trình thủy hóa [18]. Thành phần hạt và các thông số vật lý của tro đáy MS được đánh giá theo TCVN 7572:2006 [19]. Thí nghiệm mài mòn Los Angeles được thực hiện với các hạt lớn hơn 5mm. Các thành phần nguy hại trong tro đáy MSWI được xác định theo phương pháp US EPA 1311 và SMEWW 3125B:2012. Tro đáy MSWI có thể thay thế cốt liệu mịn trong bê tông và gạch bê tông nhờ kích thước hạt phù hợp và quy trình sản xuất đơn giản. Tuy nhiên, tro đáy chứa muối chloride dễ hòa tan và một lượng nhỏ kim loại nặng, cần xử lý để giảm Cl⁻ và nồng độ kiềm. Kim loại nặng trong tro có thể gây giãn nở và nứt trong kết cấu bê tông. Nhiệt độ nóng chảy thấp của tro đáy thuận lợi cho sản xuất cốt liệu gồm có tính chất cơ học tốt, nhưng chi phí xử lý cao hơn. Cấu trúc hạt rỗng của tro đáy làm tăng nhu cầu nước cho hỗn hợp bê tông và quá trình tạo hình gạch bê tông.

3.3. Thành phần khoáng vật

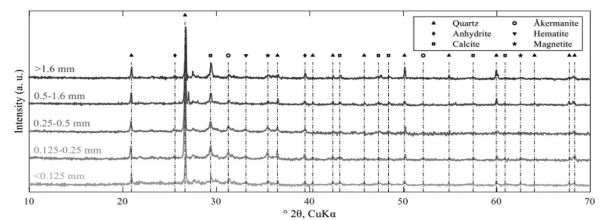
Phần này trình bày tổng quan về thành phần khoáng của tro đáy MSWI, tổng hợp các phát hiện quan trọng từ nhiều nghiên cứu. Thành phần khoáng và tác động của chúng đến chế tạo bê tông được xem xét, đặc biệt là các pha ảnh hưởng đến quá trình thủy hóa và độ bền lâu.

Các thành phần chính của tro đáy MSWI là kim loại và khoáng vật [20]. Tro đáy MSWI sau phong hóa gồm nhiều khoáng như silica, oxit sắt, phosphate, hydroxide, carbonate, sulfate, oxit kim loại màu, silicate, muối chloride, sulfide và các khoáng khác. Các khoáng được phân thành 11 nhóm như trình bày ở Bảng 4. Nhóm silicate gồm bốn phân nhóm: pyroxene, melilite, feldspar và các silicate khác. Các khoáng thường được ghi nhận

trong tài liệu gồm oxit sắt, thạch anh và canxit. Hàm lượng oxit sắt thường dưới 5% khối lượng, trong đó magnetite là thành phần chủ yếu. Tổng hàm lượng silicate trong tro thường không vượt quá 15% khối lượng và bao gồm các silicate phổ biến như gehlenite, akermanite, albite, anorthite và diopside [21].

Bảng 4. Các nhóm khoáng vật có trong tro đáy MSWI sau phong hóa

Nhóm	Khoáng vật/nhóm khoáng	Tài liệu tham khảo
Dioxit silic	Quartz, Cristobalite	[22]
Iron Oxit	Magnetite, Hematite, Wustite	[22, 23]
Silicate	Melilite, Feldspar, Pyroxene, Other silicates (Gehlenite, Akermanite, Albite, Anorthite)	[22, 23]
Carbonate	Calcite, Dolomite	[22]
Sulfate	Ettringite, Gypsum, Anhydrite	[24]
Khoáng khác	-	-



Hình 5. Phổ XRD của các mẫu tro đáy ban đầu ở các kích thước hạt khác nhau

Phân tích XRD (Hình 5) cho thấy tro gồm các pha khoáng chính như thạch anh (SiO₂), canxit (CaCO₃), akermanite và magnetite. Sự phân bố các pha khoáng này ảnh hưởng đến tương tác giữa tro và xi măng cũng như quá trình thủy hóa [18].

3.4. Đặc tính của bê tông sử dụng tro đáy MSWI

Đánh giá độ bền lâu là yêu cầu cần thiết để đạt được bê tông bền vững vì độ bền ảnh hưởng đến tính năng dài hạn. Tuổi thọ của bê tông chứa tro đáy đã xử lý phụ thuộc vào tương tác với điều kiện môi trường và sự xâm nhập của các hóa chất có hại. Do đó, cấu trúc lỗ rỗng và các đặc tính vận chuyển như tốc độ hút mao dẫn, dòng khí, xâm nhập chloride và carbonat hóa được đánh giá để so sánh tính năng dài hạn của bê tông chứa tro đáy đã xử lý với hỗn hợp đối chứng tiêu chuẩn [25].

Kim và cộng sự [65] đã sử dụng tro đáy MSWI làm vật liệu thay thế cốt liệu mịn. Cường độ nén, nhiệt thủy hóa và biến dạng co ngót của hỗn hợp được đánh giá. Kết quả làm rõ ảnh hưởng của tro đáy MSWI đến tính chất vữa và tiềm năng sử dụng như phụ gia trong ngành xây dựng, đặc biệt trong sản xuất vữa và bê tông [25].

3.4.1. Cường độ nén của bê tông

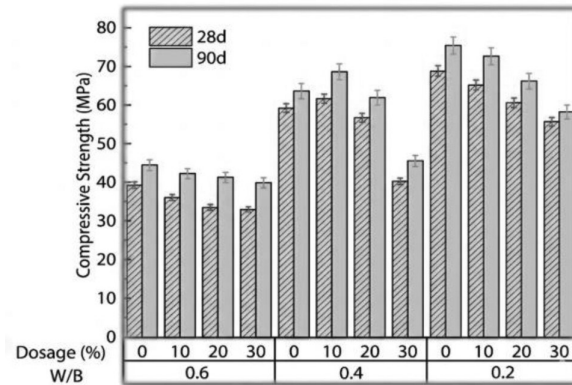
Li và cộng sự [26] nghiên cứu ảnh hưởng của bột mịn tro đáy MSWI và tỷ lệ nước/chất kết dính đến cường độ nén bê tông (Bảng 5). Hình 6 trình bày cường độ nén của bê tông có sử dụng bột mịn tro đáy MSWI sau 28 và 90 ngày. Cường độ nén của bê tông thường và bê tông chứa hạt mịn tro đáy MSWI có xu hướng tương đương. Khi tỷ lệ nước/chất kết dính tăng, cường độ nén giảm. Ngoài ra, khi thời gian dưỡng hộ kéo dài và cấp phối không đổi, cường độ nén của bê tông thường thấp hơn bê tông chứa hạt mịn tro đáy MSWI.

Việc bổ sung 30% bột mịn tro đáy MSWI làm giảm khoảng 25% cường độ nén, trong khi mức 10% gây giảm khoảng 8%. Với tỷ lệ nước/chất kết dính 0,4 và hàm lượng bột phù hợp 10%, cường độ nén của bê tông chứa hạt mịn tro đáy MSWI cao hơn bê tông thường. Trong giai đoạn 28-90 ngày, mức tăng cường độ nén của bê tông chứa hạt mịn tro đáy MSWI lớn hơn bê tông thường, đặc biệt ở mức 20% và 30%, với mức tăng trên 20%. Khi được dùng ở dạng hạt mịn trong bê tông, tro đáy MSWI có phản ứng thủy hóa chậm, làm cường độ nén tăng dần theo thời gian dưỡng hộ như minh họa ở Hình 6 [26].

Bảng 5. Cấp phối bê tông có sử dụng hạt mịn tro đáy MSWI

Nước/chất kết dính	Hàm lượng (%)	Nước (kg)	Phụ gia giảm nước (kg)	Xi măng (kg)	Bột mịn tro (kg)	Cát (kg)	Đá (kg)
0.2	0	165	10.8	825.0	0.0	700	726
	10	165	10.8	742.5	82.5	700	726
	20	165	13.0	660.0	165.0	700	726
	30	165	13.0	577.5	247.5	700	726
0.4	0	170	2.5	425.0	0.0	777	985
	10	170	2.5	382.5	42.5	777	985
	20	170	2.9	340.0	85.0	777	985
	30	170	5.1	297.5	127.5	777	985
0.6	0	180	1.2	300.0	0.0	742	1064
	10	180	1.2	270.0	30.0	742	1064
	20	180	2.4	240.0	60.0	742	1064
	30	180	2.4	210.0	90.0	742	1064

Tỷ lệ thay thế tro đáy MSWI trong cốt liệu granite và ảnh hưởng đến cường độ bê tông được đánh giá thông qua kết quả nén ở điều kiện thủy hóa. Dữ liệu cho thấy cường độ giảm khi tỷ lệ thay thế tăng. Bê tông chứa 50% cốt liệu MSWI đạt cường độ tương đương mẫu chứa 50% Litex ở cả 1 ngày và 28 ngày. Cường độ 1 ngày đạt 12,4 MPa và tăng lên 25,3 MPa sau 28 ngày, đáp ứng yêu cầu ASTM C90 đối với cường độ bê tông kết cấu [27].



Hình 6. Cường độ nén của bê tông sử dụng bột mịn tro đáy MSWI

Tro đáy MSWI có ảnh hưởng đến tính chất cơ học của bê tông và vữa xi măng, với cường độ nén có thể đạt khoảng 40 MPa [16].

Việc sử dụng tro MSWI đã xử lý thông qua sàng, tự nghiền và tách từ tạo ra mẫu xi măng có cường độ nén cao và hàm lượng chất thải thấp (nhỏ hơn 5% tổng khối lượng cốt liệu). Tuy nhiên, khi tỷ lệ thay thế tro vượt quá 10%, các tính chất cơ học suy giảm rõ rệt [13].

3.4.2. Đánh giá độ rỗng

Để sản xuất các khối bê tông khí khác biệt, Weng và cộng sự [28] đã sử dụng tro đáy MSWI như một thành phần bê tông.

Độ rỗng của bê tông bị ảnh hưởng khi bột mịn tro đáy MSWI thay thế cốt liệu, đặc biệt ở tỷ lệ thay thế cao 30% như trình bày ở Bảng 6. Ngoại trừ mẫu chứa 30% bột mịn tro đáy MSWI với tỷ lệ W/B = 0,2 có độ rỗng tăng nhẹ sau 90 ngày, nhìn chung độ rỗng giảm theo thời gian dưỡng hộ [26].

Nhiều giả định phụ thuộc vào lượng nước không tham gia bôi trơn vật liệu hoặc lấp đầy lỗ rỗng. Nước mao dẫn được lưu giữ trong hạt tro đáy không thúc đẩy hình thành lỗ rỗng mao dẫn [29]. Dù khả năng hút nước của tro đáy làm thay đổi hàm lượng nước thiết kế của bê tông, đặc điểm này khiến tro hoạt động như cốt liệu rỗng, lưu giữ nước cho quá trình thủy hóa xi măng về sau [26].

Bảng 6. Độ rỗng của bê tông với các tỷ lệ thay thế khác nhau

Nước/chất kết dính	Hàm lượng	Độ rỗng	
		28d	90d
0.4	0%	12.91%	11.31%
	10%	11.96%	10.71%
	30%	14.75%	13.83%
0.2	0%	9.66%	9.33%
	30%	12.54%	12.77%

3.4.3. Giãn nở và co ngót

Nhiều yếu tố có thể gây giãn nở gồm sự hình thành gel từ ettringite, quá trình oxy hóa nhôm

kim loại và thủy hóa vôi, oxit magie. Tuy nhiên, tác động của cơ chế cuối thường nhỏ hơn hai cơ chế đầu [30].

Hàm lượng sulfate đo được dưới dạng SO_3 có ý nghĩa quan trọng vì sulfate cao có thể gây phát triển bất lợi trong nền xi măng. Ước tính theo cân bằng hóa học cho thấy nồng độ SO_3 trung bình trong tro đáy đã xử lý là 0,41%. Do đó, ảnh hưởng của tro đáy đã xử lý như một vật liệu xi măng bổ sung (SCM) đến tổng hàm lượng sulfate có thể không đáng kể. Hàm lượng magie cũng ảnh hưởng đến ổn định của vật liệu xi măng; lượng ghi nhận trong tro đáy nghiền là mức trung bình (2,83%), phù hợp với kết quả của Matos và cộng sự [16]. SO_4^{2-}

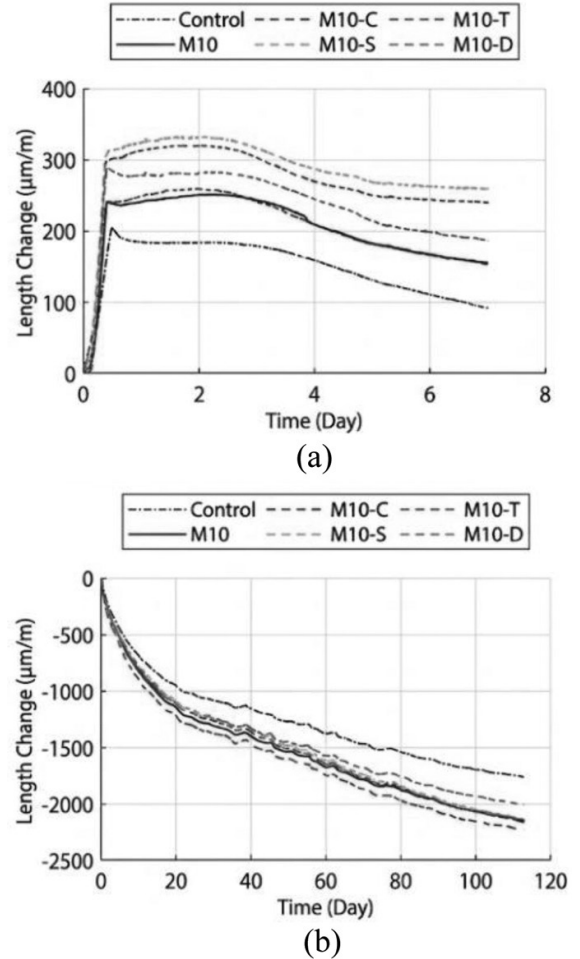
Nồng độ sulfate hòa tan trong axit cao ở các hạt tro đáy MSWI thô kích thước 0-10 μm , có thể dẫn đến giãn nở bê tông. Khi bê tông chứa tro đáy thô, nên sử dụng tỷ lệ nước/xi măng thấp hơn và xi măng bên sulfate. Ở tất cả các nhóm chất thải, nồng độ sulfate hòa tan trong nước thấp hơn ít nhất một bậc so với sulfate hòa tan trong axit [31].

Kim và cộng sự [65] khảo sát biến đổi thể tích của hỗn hợp vữa chứa tro đáy MSWI thông qua loạt thí nghiệm. Trong Hình 7, giá trị 10 cho biết 10% cát tự nhiên trong cấp phối được thay bằng tro đáy. Tro đáy MSWI chưa xử lý được ký hiệu M10. Cốt liệu tro đáy MSWI ngâm trong dung dịch natri chloride 3% ký hiệu M10-C; tro đáy MSWI ngâm trong nước biển ký hiệu M10-S; tro đáy MSWI bão hòa bằng nước máy ký hiệu M10-T; và cốt liệu ngâm trong nước khử ion ký hiệu M10-D [65]. Hình 7a cho thấy tất cả mẫu đều tăng chiều dài trong 12 giờ đầu sau khi đúc. Sau đó, trong khi mẫu đối chứng bắt đầu co lại, các mẫu chứa tro đáy MSWI tiếp tục giãn nở đến khoảng ngày thứ hai sau khi đúc. Sự giãn nở này liên quan đến hình thành tinh thể ettringite từ các pha chứa ion nhôm và sulfate [32]. Mẫu M10-S có mức tăng mạnh nhất, có thể do ion sulfate từ xử lý bằng nước mặn và ion canxi có trong tro đáy [25].

Về co ngót, các mẫu được bảo quản trong 7 ngày đầu trước khi đánh giá co ngót khô như thể hiện ở Hình 7-b. Đến ngày 113, tất cả các mẫu vữa chứa tro đáy MSWI đều có độ co ngót lớn hơn mẫu đối chứng, với mức tăng lần lượt 21,84%, 21,62%, 26,62% và 14,05% đối với M10, M10-C, M10-S, M10-T và M10-D. Nguyên nhân có thể do độ rỗng của hạt tro đáy MSWI cao hơn, giúp nước di chuyển dễ hơn trong giai đoạn thủy hóa [25].

3.5. Biện pháp xử lý nhằm tăng tỷ lệ sử dụng tro đáy trong bê tông

Chất thải kim loại trong tro đáy MSWI có thể được tái sử dụng. Bên cạnh thu hồi kim loại, việc



Hình 7. So sánh biến đổi chiều dài giữa vữa xi măng Portland và vữa có tro đáy MSWI: (a) Giãn nở trước khi tháo khuôn; (b) Co ngót sau khi tháo khuôn

thu hồi khoáng từ tro đáy MSWI cũng rất cần thiết. Biện pháp này giúp giảm sự suy kiệt nguồn khoáng sản thiết yếu của thế giới, vì các mỏ khoáng trên đất liền không thể tái tạo trong vòng đời con người [33].

3.5.1. Xử lý tại nhà máy đốt rác

Ngay sau khi phát sinh, tro đáy MSWI thường được xử lý tại chỗ để thu hồi kim loại còn lại và giảm phát thải ion kim loại nguy hại ra môi trường. Ở cấp nhà máy, các quá trình này gồm giảm kích thước hạt, thu hồi kim loại, ổn định, làm sạch và phân loại tro, mỗi quá trình sử dụng phương pháp riêng [31, 32]. Giảm kích thước hạt rất quan trọng vì giúp giải phóng các thành phần bị liên kết trong quá trình đốt, từ đó nâng cao hiệu quả tách và phân loại vật liệu. Thu hồi kim loại tập trung vào sắt và kim loại màu bằng bộ tách từ và dòng điện xoáy [34, 35]. Ngoài ra, tro đáy MSWI mới phát sinh được ổn định thông qua phong hóa, làm giảm pH và giảm rò rỉ kim loại nặng [36]. Quá trình phong hóa thường kéo dài một đến ba tháng, giúp ổn định tro và giảm nguy cơ rò rỉ kim loại nặng, qua đó cải thiện khả

năng dùng làm cốt liệu thay thế trong sản xuất bê tông. Bảng 7 trình bày các tinh thể sản phẩm phụ và pha gel hình thành trong quá trình phong hóa tro đáy MSWI mới. Vì vậy, tro đáy MSWI có tiềm năng lớn để tăng cường sử dụng trong sản xuất vật liệu xây dựng, đặc biệt khi cốt liệu tự nhiên ngày càng hạn chế [36].

Bảng 7. Cấu trúc khoáng và gel sản phẩm phụ hình thành trong quá trình phong hóa

Nhóm	Loại pha	Các pha thường quan sát
Khoáng thứ sinh	Khoáng carbonate	Calcite [37, 38]
	Khoáng sulfate ngậm nước	Gypsum [39, 40], Ettringite [40, 41]
	Hydroxide kim loại kết tinh	Aluminum hydroxides: Gibbsite [42], Nordstrandite [42]
	Khoáng zeolite	Boggsite [42], Gismondine [42], Heulandite [40], Laumontite [40]
	Khoáng khác	Weddellite [40]
Pha gel vô định hình	Hydroxide vô định hình	Amorphous Aluminum Hydroxide, Amorphous Iron Hydroxide [43]
	Gel kim loại-silicate	Ca-Al-Si-rich Gel [43], Fe-Al-Si-rich Gel [43]

3.5.2. Xử lý bằng phương pháp hóa học

Các quá trình tiền xử lý tập trung vào việc loại bỏ các nguyên tố kim loại có thể gây đổi màu hoặc gỉ trên bề mặt bê tông. Đồng thời, cần bảo đảm không còn vật liệu chưa cháy và độ ẩm dư nhỏ hơn 30%.

Ba quy trình xử lý hóa học chính đối với tro đáy MSWI gồm xử lý bằng dung dịch kiềm, nước và axit. Xử lý kiềm, thường sử dụng NaOH, nhằm giảm nồng độ Al và Zn kim loại. Hiệu quả phụ thuộc vào kích thước hạt, nồng độ dung dịch NaOH, tỷ lệ lỏng/rắn và nhiệt độ gia nhiệt [44]. Sau xử lý, bùn tro đáy MSWI có thể dùng trực tiếp để sản xuất vật liệu hoạt hóa kiềm (AAM) hoặc thay thế một phần cốt liệu trong bê tông sau khi rửa nước để loại bỏ kiềm dư [45]. Xử lý bằng nước tạo môi trường kiềm bằng cách hòa tách kiềm từ tro đáy MSWI; hiệu quả phụ thuộc vào kích thước hạt và tỷ lệ nước/rắn [45], đồng thời cải thiện tính chất vật lý của tro khi dùng thay cốt liệu. Xử lý axit kết hợp rửa nước làm giảm đáng kể nồng độ chloride và sulfate, nâng cao độ phù hợp của tro trong ứng dụng bê tông [46]. Ngoài ra, bổ sung Na_2CO_3 vào nước không chỉ hỗ trợ loại bỏ muối sulfate mà còn tăng tính kiềm của hỗn hợp bê tông, từ đó cải thiện cường độ và tính năng tổng thể của bê tông làm từ tro đã xử lý [47].

Rửa tro đáy giúp giảm nồng độ chất ô nhiễm, ngoại trừ một số nguyên tố như sắt, asen, bari và mangan. Ở cùng kích thước hạt, lượng chất ô nhiễm trong tro đáy thấp hơn so với phụ phẩm rửa đất. Tro

đáy chưa rửa có các đặc tính kém hơn. Các hạt lớn của tro đáy MSWI sau rửa và sỏi từ rửa đất thể hiện tính chất tốt hơn so với cốt liệu tự nhiên [9].

3.5.3. Xử lý bằng phương pháp cơ học

Các phụ phẩm của quá trình rửa và các cỡ hạt thô hơn thường có đặc tính thuận lợi nhất. Kỹ thuật rửa loại bỏ hiệu quả các chất ô nhiễm, vốn thường tập trung ở phần hạt mịn [9].

Các phương pháp xử lý cơ học đối với tro đáy MSWI gồm nghiền khô và sàng nhằm giảm kích thước hạt và đạt thành phần đồng đều. Quá trình nghiền làm tăng diện tích bề mặt và cải thiện hoạt tính của tro, giúp vật liệu phù hợp hơn khi dùng làm cốt liệu bê tông. Nghiền khô trong thời gian ngắn với vận tốc thấp làm vỡ các khoáng giòn và biến kim loại dẻo thành mảnh dạng vảy, dễ tách ra trong quá trình sàng [48]. Phương pháp này có thể loại bỏ đến 80% khối lượng nhôm kim loại khỏi tro đáy MSWI đã phong hóa. Việc bổ sung nước vào quá trình nghiền tăng cường oxy hóa nhôm kim loại, tạo môi trường kiềm hỗ trợ chuyển hóa này. Tuy nhiên, chỉ một phần nhôm kim loại bị oxy hóa trong nghiền ướt [49]. Sau xử lý cơ học, tro đáy MSWI ít kim loại hơn và có kích thước hạt cùng đặc tính vật lý phù hợp để thay thế một phần cốt liệu trong bê tông.

3.5.4. Xử lý bằng phương pháp nhiệt

Xử lý nhiệt tro đáy MSWI cải thiện đáng kể chất lượng tro thông qua loại bỏ hợp chất hữu cơ, thúc đẩy hình thành các pha phản ứng, cố định kim loại nặng và hỗ trợ oxy hóa nhôm, kẽm [50]. Dải nhiệt độ xử lý 500-900°C và 1000-1500°C ảnh hưởng đến hiệu quả quá trình, đặc biệt trong việc giảm rò rỉ các nguyên tố như Cu và Sb [49]. Xử lý nhiệt nâng cao cường độ nén và hoạt tính của tro đáy, giúp vật liệu trở thành cốt liệu bê tông thay thế khả thi [50]. Ngoài ra, xử lý ở nhiệt độ cao làm giảm hàm lượng nhôm kim loại, loại bỏ kim loại nặng thông qua bay hơi và tăng tỷ lệ pha vô định hình, qua đó nâng cao khả năng sử dụng tro đáy MSWI như phụ gia pozzolan trong bê tông [50]. Điều này cải thiện chất lượng bê tông và hỗ trợ bảo vệ môi trường bằng cách giảm lượng chất thải chôn lấp.

Bảng 8. Thành phần hóa học của các phần dư MSWI

Oxit	Tro đáy MSWI	Tro đáy MSWI đã xử lý	BLA	Tro xử lý khí thải
CaO	16.21	22.91	40.03	49.12
SiO ₂	26.69	28.64	27.34	2.44
Al ₂ O ₃	9.66	14.18	15.16	1.42
Fe ₂ O ₃	6.20	6.49	4.50	0.31
MnO	0.14	0.17	0.31	0.02
MgO	2.27	2.62	4.08	1.22

Na ₂ O	2.36	2.63	-	-
K ₂ O	1.00	1.12	0.05	0.65
TiO ₂	1.85	2.88	4.76	0.22
P ₂ O ₅	1.74	2.34	3.42	0.12
Cl	2.14	2.62	0.20	14.82
LOI	29.74	14.87	0.15	29.65
Total-C	19.30	3.13	0.10	2.31
Total-S	0.59	1.17	2.06	1.01

Việc xử lý tro đáy nhằm nâng cao tỷ lệ tích hợp vào bê tông xanh, thay thế một phần cốt liệu granite sử dụng. Tro đáy MSWI được nhiệt phân ở 200°C để xử lý hàm lượng carbon cao và giá trị mất khi nung (LOI), làm giảm đáng kể cả hai thông số như trình bày ở Bảng 8. Sau đó, tro đáy được tách từ và phân loại kích thước để chuẩn bị lưu trữ và sử dụng trong tương lai. Nghiên cứu sử dụng cốt liệu thương mại Litex và granite làm vật liệu đối chứng để đánh giá mức độ phù hợp của tro đáy trong ứng dụng bê tông [68]. Cheeseman và cộng sự [9] khảo sát tính chất của cốt liệu nhẹ được sản xuất bằng thiêu kết nhanh tro đáy lò đốt cho bê tông và các ứng dụng khác. Kết quả cho thấy gia nhiệt ở 1000-1050°C tạo ra viên cốt liệu có mật độ, độ hút nước và cường độ nén tương đương cốt liệu nhẹ thương mại [9].

4. Kết luận

Gần đây, việc sử dụng tro đáy MSWI trong sản xuất bê tông thu hút nhiều quan tâm nhờ khả năng thay thế cốt liệu tự nhiên và giảm tác động môi trường. Nghiên cứu cho thấy tro đáy MSWI có thể được sử dụng hiệu quả để sản xuất vật liệu xây dựng, đặc biệt là bê tông, gạch không nung và cải tạo đất nông nghiệp. Một lợi ích quan trọng của tro đáy MSWI là khả năng cải thiện một số đặc tính vật lý, hóa học của bê tông nhờ thành phần hóa học đa dạng, trong đó có CaO, SiO₂ và Al₂O₃ là các thành phần quan trọng cho quá trình thủy hóa xi măng. Các biện pháp xử lý tro đáy như nghiền khô, sàng và xử lý nhiệt giúp loại bỏ tạp chất và kim loại nặng, qua đó nâng cao tiềm năng sử dụng như phụ gia bê tông.

Tuy nhiên, việc sử dụng rộng rãi tro đáy MSWI vẫn còn nhiều trở ngại do thành phần hóa học phức tạp có thể ảnh hưởng đến thủy hóa và tính chất cơ học của bê tông. Điều này đòi hỏi các nhà nghiên cứu tiếp tục phát triển các phương pháp xử lý và ứng dụng mới nhằm tối đa hóa lợi ích của tro đáy MSWI. Việc tìm kiếm và sử dụng vật liệu thay thế là cần thiết trong bối cảnh tài nguyên tự nhiên suy giảm. Tro đáy MSWI giúp giảm chất thải chôn lấp và mở ra cơ hội mới cho phát triển bền vững trong

ngành xây dựng. Các kết quả nghiên cứu và ứng dụng thực tế cho thấy tro đáy MSWI có thể trở thành vật liệu quan trọng trong tương lai của sản xuất bê tông và vật liệu xây dựng. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1].Kaza, S., et al., What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. 2018: World Bank Publications.
- [2].Liu, C., et al., CCET guideline series on intermediate municipal solid waste treatment technologies Waste-to-Energy Incineration. 2020.
- [3].Phua, Z., et al., Characteristics of incineration ash for sustainable treatment and reutilization. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019. 26(17): p. 16974-16997.
- [4].Margallo, M., et al., Environmental sustainability assessment of the management of municipal solid waste incineration residues: a review of the current situation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015. 17(5): p. 1333-1353.
- [5].Chimenos, J.M., et al., Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials*, 1999. 64(3): p. 211-222.
- [6].Oehmig, W.N., et al., Contemporary practices and findings essential to the development of effective MSWI ash reuse policy in the United States. *Environmental Science & Policy*, 2015. 51: p. 304-312.
- [7].Mian, M.M., et al., Municipal solid waste management in China: a comparative analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2017. 19(3): p. 1127-1135.
- [8].Zhang, S., Z. Ghoulah, and Y. Shao, Green concrete made from MSWI residues derived eco-cement and bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 2021. 297: p. 123818.
- [9].Sorlini, S., A. Abbà, and C. Collivignarelli, Recovery of MSWI and soil washing residues as concrete aggregates. *Waste Management*, 2011. 31(2): p. 289-297.
- [10].Ginés, O., et al., Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. 169(1): p. 643-650.
- [11].Lynn, C.J., R.K. Dhir Obe, and G.S. Ghataora, Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 2016. 127: p. 504-517.
- [12].Loginova, E., et al., Municipal solid waste incineration bottom ash fines: Transformation into a minor additional constituent for cements. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. 166: p. 105354.
- [13].Shih, P.-H., J.-E. Chang, and L.-C. Chiang, Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash. *Cement and Concrete Research*, 2003. 33(11): p. 1831-1836.
- [14].Ministry of Natural, R. and V. Environment of, QCVN 07:2009/BTNMT. National technical regulation on hazardous waste thresholds. 2009, Ministry of Natural Resources and Environment of Vietnam: Hanoi, Vietnam.
- [15].Siddique, R., Utilization of municipal solid waste (MSW) ash in cement and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010. 54(12): p. 1037-1047.
- [16].Mafalda Matos, A. and J. Sousa-Coutinho, Municipal solid waste incineration bottom ash recycling in concrete:

- Preliminary approach with Oporto wastes. *Construction and Building Materials*, 2022. 323: p. 126548.
- [17]. Chang, F.-Y. and M.-Y. Wey, Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes. *Journal of Hazardous Materials*, 2006. 138(3): p. 594-603.
- [18]. Sun, Y., et al., Characterization, pre-treatment, and potential applications of fine MSWI bottom ash as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 2024. 421: p. 135769.
- [19]. Ministry of, S. and V. Technology of, TCVN 7572:2006. Aggregates for concrete and mortar - test methods. 2006, Ministry of Science and Technology of Vietnam: Hanoi, Vietnam.
- [20]. Bayuseno, A.P. and W.W. Schmahl, Understanding the chemical and mineralogical properties of the inorganic portion of MSWI bottom ash. *Waste Management*, 2010. 30(8): p. 1509-1520.
- [21]. del Valle-Zermeño, R., et al., Material characterization of the MSWI bottom ash as a function of particle size. Effects of glass recycling over time. *Science of The Total Environment*, 2017. 581-582: p. 897-905.
- [22]. Sun, Y., et al., Characterization, pre-treatment, and potential applications of fine MSWI bottom ash as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 2024. 421: p. 135769.
- [23]. Maldonado-Alameda, A., et al., Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Sole Precursor in the Alkali-Activated Binder Formulation. *Applied Sciences*, 2020. 10(12): p. 4129.
- [24]. Bayuseno, A.P. and W.W. Schmahl, Understanding the chemical and mineralogical properties of the inorganic portion of MSWI bottom ash. *Waste Management*, 2010. 30(8): p. 1509-1520.
- [25]. Kim, H.J., et al., A study of chloride pretreatment methods for enhancing strength of mortar by recycling Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) bottom ash. *Case Studies in Construction Materials*, 2023. 19: p. e02349.
- [26]. Hanghang, L., et al., Analysis of pore structure characteristics of MSWI bottom ash micro powder concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 2024. 20: p. e02999.
- [27]. Andrade, L.B., J.C. Rocha, and M. Cheriaf, Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(2): p. 609-614.
- [28]. Šebestová, P., V. Černý, and R. Drochytka, Experimental study of autoclaved aerated concrete using circulating fluidized-bed combustion fly ash. *Materiali in tehnologije*, 2020.
- [29]. Cheriaf, M., J.C. Rocha, and J. Péra, Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. *Cement and Concrete Research*, 1999. 29(9): p. 1387-1391.
- [30]. Pecqueur, G., C. Crignon, and B. Quénée, Behaviour of cement-treated MSWI bottom ash, in *Waste Management Series*, G.R. Woolley, J.J.M. Goumans, and P.J. Wainwright, Editors. 2000, Elsevier. p. 541-547.
- [31]. Eighmy, T.T., O. Hjelmar, and A.J. Chandler. *Municipal Solid Waste Incinerator Residues*. 1997.
- [32]. Vaičienė, M. and E. Simanavičius, The Effect of Municipal Solid Waste Incineration Ash on the Properties and Durability of Cement Concrete. *Materials*, 2022. 15.
- [33]. Prior, T., et al., Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change*, 2012. 22(3): p. 577-587.
- [34]. Vries, W.d. ADR: The use of Advanced Dry Recovery in recycling fine moist granular materials. 2017.
- [35]. Šyc, M., et al., Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. *Journal of Hazardous Materials*, 2020. 393: p. 122433.
- [36]. Chen, B., et al., A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *Journal of Building Engineering*, 2023. 71: p. 106386.
- [37]. Yao, J., et al., Effect of weathering on the mobility of zinc in municipal solid waste incinerator bottom ash. *Fuel*, 2012. 93: p. 99-104.
- [38]. Yao, J., et al., Effect of weathering treatment on the fractionation and leaching behavior of copper in municipal solid waste incinerator bottom ash. *Chemosphere*, 2010. 81 5: p. 571-6.
- [39]. Santos, R.M., et al., Comparative study of ageing, heat treatment and accelerated carbonation for stabilization of municipal solid waste incineration bottom ash in view of reducing regulated heavy metal/metalloid leaching. *Journal of environmental management*, 2013. 128: p. 807-21.
- [40]. Freyssinet, P., et al., Chemical changes and leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash submitted to weathering. *Waste management*, 2002. 22 2: p. 159-72.
- [41]. Alam, Q., et al., In-depth mineralogical quantification of MSWI bottom ash phases and their association with potentially toxic elements. *Waste management*, 2019. 87: p. 1-12.
- [42]. Vaičienė, M. and E. Simanavičius, The Effect of Municipal Solid Waste Incineration Ash on the Properties and Durability of Cement Concrete. *Materials*, 2022. 15.
- [43]. Wei, Y., et al., Geoenvironmental weathering/deterioration of landfilled MSWI-BA glass. *Journal of hazardous materials*, 2014. 278: p. 610-9.
- [44]. Vries, W.d. ADR: The use of Advanced Dry Recovery in recycling fine moist granular materials. 2017.
- [45]. Mary Joseph, A., et al., Pre-treatment and utilisation of municipal solid waste incineration bottom ashes towards a circular economy. *Construction and Building Materials*, 2020. 260: p. 120485.
- [46]. Lo, F.C., S.-L. Lo, and M.-G. Lee, Effect of partially replacing ordinary Portland cement with municipal solid waste incinerator ashes and rice husk ashes on pervious concrete quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020. 27: p. 23742-23760.
- [47]. Saikia, N., et al., Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilisation in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2015. 96: p. 76-85.
- [48]. Tang, P., et al., Application of thermally activated municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash fines as binder substitute. *Cement and Concrete Composites*, 2016. 70: p. 194-205.
- [49]. Clavier, K.A., et al., Risk and performance assessment of cement made using municipal solid waste incinerator bottom ash as a cement kiln feed. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019. 146: p. 270-279.
- [50]. Santos, R.M., et al., Comparative study of ageing, heat treatment and accelerated carbonation for stabilization of municipal solid waste incineration bottom ash in view of reducing regulated heavy metal/metalloid leaching. *Journal of environmental management*, 2013. 128: p. 807-21.