

Tổng quan về sử dụng cốt liệu xỉ thép ở vật liệu xi măng trong xây dựng mặt đường

Nguyễn Thanh Cường¹, Huỳnh Phương Nam¹, Phạm Ngọc Phương^{1*}

¹ Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

TỪ KHOÁ

Cốt liệu xỉ thép
SSA
Vật liệu gia cố xi măng
Vật liệu cường độ thấp có kiểm soát
Bê tông đầm lăn
Bê tông xi măng SSA

TÓM TẮT

Bài báo tổng quan các tính chất của vật liệu xi măng mặt đường sử dụng cốt liệu xỉ thép (SSA), bao gồm vật liệu gia cố xi măng (CTBA), vật liệu cường độ thấp có kiểm soát (CLSM), bê tông đầm lăn (RCC) và bê tông xi măng (PCC). Kết quả cho thấy SSA có khối lượng riêng lớn (2,80–3,44 g/cm³), độ hút nước cao (1,5–10%) góp phần hỗ trợ dưỡng hộ bên trong và khả năng chống mài mòn tốt với độ hao mòn giảm 21–40%, do đó phù hợp sử dụng trong vật liệu mặt đường. Độ trương nở phụ thuộc chủ yếu vào hàm lượng CaO tự do (0,5–10%) và cần được kiểm soát dưới 1% để đảm bảo ổn định thể tích. SSA có thể thay thế cốt liệu thiên nhiên trong khoảng 5–100%, với hiệu quả rõ rệt thường ghi nhận ở khoảng 30–50%. Đối với CTBA, cường độ chịu nén tăng 22,7–45,9% và co ngót giảm 12,9–32,8%; trong khi đối với RCC, tỷ lệ thay thế dưới 50% thường cho hiệu quả tốt và SSA mịn có xu hướng cải thiện cường độ kéo uốn. Tuy nhiên, tính chất vật liệu phụ thuộc loại SSA và trạng thái xử lý và có thể suy giảm khi hàm lượng SSA tăng. Bài báo cũng đề xuất các hướng nghiên cứu để tăng khả năng ứng dụng của xỉ thép trong xây dựng đường, đặc biệt đánh giá đặc tính CLSM ứng dụng làm tầng móng mặt đường.

KEYWORDS

Steel slag aggregates
Cement-treated bases
Controlled low-strength material
Roller cement concrete
Steel slag concrete

ABSTRACT

This review paper summarizes the properties of steel slag aggregate (SSA)-based cementitious paving materials, including cement-treated base aggregates (CTBA), controlled low-strength materials (CLSM), roller-compacted concrete (RCC), and Portland cement concrete (PCC). The results indicated that SSA possessed a high specific gravity (2.80–3.44 g/cm³), high water absorption (1.5–10%), which contributes to internal curing, and excellent abrasion resistance, with Los Angeles abrasion loss reduced by 21–40%, making it suitable for pavement applications. The volumetric expansion of SSA was primarily governed by the free CaO (0.5–10%) and should be controlled below 1% to ensure volumetric stability. SSA could replace natural aggregates from 5% to 100%, with the most significant improvements generally observed at replacement ratios of 30–50%. For CTBA, compressive strength increased by 22.7–45.9% while shrinkage decreased by 12.9–32.8%. In RCC mixtures, the replacement below 50% typically exhibited the best performance, and fine SSA tended to improve flexural strength. However, the engineering properties of SSA-delivered cement materials strongly depended on SSA type and treatment conditions and were positively affected by high SSA content. The review also proposes future research directions to enhance the applicability of SSA in road construction, particularly by evaluating CLSM characteristics for base applications.

1. Giới thiệu chung

1.1. Thực trạng phế thải xỉ thép

Xỉ thép là phế thải phát sinh trong quá trình luyện thép, chiếm tỷ lệ đáng kể trong tổng phát thải của ngành. Nhiều nghiên cứu chỉ ra lượng xỉ thép thường tương đương 15–20 %, phổ biến khoảng 17 % sản lượng thép thô [1]. Theo Hiệp hội Thép thế giới, sản lượng thép toàn cầu đã tăng từ 189 triệu tấn năm 1950 lên 850 triệu tấn năm 2000, đạt 1.883 triệu tấn vào năm 2020 và duy trì ở mức khoảng 1.886 triệu tấn vào năm 2024 [2], dự báo đạt 1.937 triệu tấn vào năm 2030 [3].

Bảng 1 trình bày sản lượng thép của 12 quốc gia đứng đầu giai đoạn 2020–2024, trong đó Việt Nam tăng từ vị trí thứ 14 với 19,9 triệu tấn năm 2020 lên vị trí thứ 11 với 22,0 triệu tấn năm 2024, chiếm khoảng

1,16 % sản lượng thép toàn cầu [2]. Với tỷ lệ phát sinh trung bình khoảng 17 % [1], lượng xỉ thép tại Việt Nam ước tính đạt khoảng 3,7 triệu tấn mỗi năm. Mặc dù xỉ thép đã được tận dụng hiệu quả tại nhiều quốc gia phát triển, tỷ lệ tái sử dụng ở các nước trong khu vực vẫn còn hạn chế, điển hình tại Trung Quốc chỉ đạt khoảng 29,5 % [4]. Do đó, việc nghiên cứu xử lý và tái sử dụng xỉ thép là cần thiết nhằm giảm thiểu tác động môi trường và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên.

1.2. Tính chất SSA

1.2.1. Thành phần hóa

Tương ứng với công nghệ sản xuất thép, các loại SSA phổ biến gồm xỉ lò hồ quang điện (EAF), xỉ lò thổi oxy (BOF), xỉ lò cao hạt hóa

*Liên hệ tác giả: pnphuong@dut.udn.vn

Nhận ngày 14/05/2026, sửa xong ngày 13/06/2026, chấp nhận đăng ngày 15/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1366>

(GBF), xỉ lò tối ưu hóa năng lượng (EOF), xỉ lò tinh luyện (LF), xỉ khử cacbon oxy argon (AOD), xỉ lò cảm ứng (IF) [1], xỉ khử lưu huỳnh (DS) [5], xỉ feroniken (FNS) [6]. Thành phần hóa học của các loại SSA này cũng khác nhau tùy công nghệ luyện được trình bày ở Bảng 2 gồm các oxit phổ biến như CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO và Fe, FeO, Fe₂O₃ cùng các thành phần khác như MnO, P₂O₅, K₂O, TiO₂ và SO₃. Xỉ AOD giàu CaO (58,4 %) và SiO₂ (26,4 %), trong khi xỉ EAF chứa oxit sắt rất cao (36,8 %). Xỉ BOF có CaO ở mức trung bình (36,53 %) kèm FeO khoảng 17 %, còn xỉ LF nghèo SiO₂ (6,53 %) và Al₂O₃ (2,33 %). Ngược lại, xỉ GBF có SiO₂ và Al₂O₃ vượt trội (35,09 % và 17,54 %) do đặc trưng được làm nguội nhanh. Xỉ IF có CaO thấp (15,94 %) nhưng SiO₂ và Al₂O₃ cao (36,1 % và 26,4 %). Những khác biệt này chi phối hoạt tính và khả năng ứng dụng của từng loại xỉ ở vật liệu xi măng.

Theo Pan và cs. [14], đặc trưng hóa học quyết định trực tiếp đến khả năng tái sử dụng bền vững của SSA và điều này được thể hiện rõ trong biểu đồ tam giác thành phần oxit (Hình 1). Sơ đồ này biểu diễn

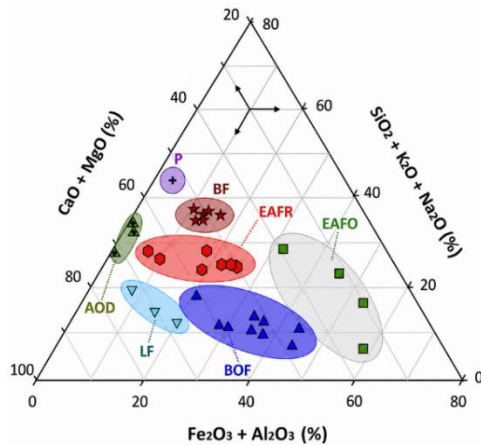
sự phân bố của các loại SSA theo ba nhóm oxit chính: (i) CaO + MgO - đại diện cho tính kiềm, khả năng gây nở và hấp thụ CO₂, (ii) Fe₂O₃ + Al₂O₃ - phản ánh khả năng tăng độ cứng và (iii) SiO₂ + K₂O + Na₂O - liên quan đến tính chất thủy hóa pozzolan. Sơ đồ còn cho thấy các loại xỉ giàu CaO-MgO như xỉ AOD và LF nằm gần đỉnh bazơ, thể hiện tiềm năng hoạt tính hóa học cao và nguy cơ trương nở thể tích, do đó cần được ổn định hóa trước khi ứng dụng. Ngược lại, xỉ BOF và EAF có hàm lượng Fe₂O₃ cao, khối lượng riêng lớn và độ cứng tốt nhưng hoạt tính xi măng thấp, nên chủ yếu phù hợp sử dụng làm cốt liệu. Tuy nhiên, các loại xỉ này thường chứa các oxit tự do như f-CaO và f-MgO [15], [16], [17], có thể gây mất ổn định thể tích khi sử dụng trong vật liệu xi măng. Xỉ BF nằm trong vùng cân bằng CaO-SiO₂, thể hiện hoạt tính thủy lực tiềm tàng vượt trội, thích hợp làm phụ gia khoáng cho xi măng và bê tông. Sự phân bố này phản ánh đặc trưng hóa học và định hướng ứng dụng riêng của từng nhóm xỉ, góp phần nâng cao hiệu quả tái chế SSA.

Bảng 1. Sản lượng thép của các nước sản xuất thép đứng đầu thế giới năm 2020–2024, nghìn tấn [2].

STT	Nước	2020	2021	2022	2023	2024
	Toàn thế giới	1.883.323,1	1.962.510,3	1.889.246,6	1.904.105,0	1.886.252,5
1	Trung Quốc	1.064.766,8	1.035.242,6	1.017.959,0	1.028.859,7	1.005.090,0
2	Ấn Độ	100.256,5	118.201,4	125.377,2	140.760,7	149.421,0
3	Nhật Bản	83.186,5	96.336,0	89.226,8	87.000,8	84.008,9
4	Mỹ	72.732,1	85.791,4	80.535,4	81.392,2	79.456,6
5	Nga	71.621,0	77.019,9	71.469,2	76.028,6	71.006,9
6	Hàn Quốc	67.078,8	70.418,0	65.846,2	66.683,3	63.611,5
7	Đức	35.680,0	40.241,2	36.860,4	35.395,1	37.309,8
8	Thổ Nhĩ Kỳ	35.810,3	40.360,0	35.133,8	33.713,7	36.893,4
9	Brazil	31.414,9	36.071,1	34.089,5	32.030,2	33.880,2
10	Iran	28.990,1	28.320,0	30.593,0	30.698,0	31.357,0
11	Việt Nam	19.900,0	23.019,0	20.003,6	19.214,8	21.974,4
12	Ý	20.379,1	24.412,7	21.598,1	21.055,8	20.007,0

Bảng 2. Thống kê thành phần hóa học của một số loại SSA.

Loại xỉ	Thành phần (%) các oxit										Nghiên cứu
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe, FeO, Fe ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	
AOD	58,4	2,1	2,1	0,2	26,4		0,1		0,2		Adegoloye và cs. [7]
BOF	36,53	8,41	3,64	16,99	10,56		2,52	1,15	1,01		M.H. Lai và cs. [8]
EAF	33,0	5,03	5,51	36,8	13,1		4,18	0,74	0,6	0,14	Elgendy và cs. [9]
EOF	36,96	7,46	2,53	28,93	13,81	0,032	3,00	1,58	0,60		Sabapathy và cs. [10]
GBF	37,79	5,50	17,54	0,70	35,09		0,83	0,37	0,68		Yüksel và cs. [11]
IF	15,94	4,43	26,4	8,35	36,1					1,11	Ali và Khalid [12]
LF	30,86	4,52	2,33	8,69	6,53	0,31		0,02	0,14		Sideris và cs. [13]



Ký hiệu các loại SSA: xỉ lò cao (BF), xỉ lò thổi oxy (BOF), xỉ oxy hóa lò hồ quang điện (EAFO), xỉ hoàn nguyên lò hồ quang điện (EAFR), xỉ lò tinh luyện (LF), xỉ photpho (P) và xỉ khử cacbon oxy argon (AOD).

Hình 1. Sơ đồ tam giác hệ $\text{CaO} + \text{MgO} - \text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ của các loại SSA khác nhau [14].

1.2.2. Tính chất cơ lý

Một số chỉ tiêu cơ lý điển hình của các loại SSA được tổng hợp trong Bảng 3, qua đó thể hiện nhiều đặc trưng khác biệt rõ rệt so với cốt

liệu tự nhiên. Cụ thể, khối lượng riêng của SSA dao động khoảng 2,80–3,44 g/cm³ (BOF: 3,05–3,31 g/cm³ và EAF: 2,91–3,44 g/cm³), cao hơn so với đá dăm thông thường (~2,60–2,70 g/cm³). Độ hút nước của xỉ biến thiên rộng, khoảng 1,5–10,0 % (xỉ GBF tới 10,0 %), trong khi cốt liệu tự nhiên thường chỉ 0,5–2,0 %. Bên cạnh đó, SSA thường có độ hao mòn Los Angeles (LA) thấp, dao động khoảng 10,8–18 % (EAF: 10,8 %, AOD: 16,0 %, BOF: 18 %), trong khi đá tự nhiên thường khoảng 20–30 %. Tuy nhiên, độ trương nở thể tích của một số loại xỉ (BOF: 1,33–6,7 %, LF: ~0,49 %) là đáng kể, trong khi cốt liệu thông thường gần như không thay đổi (< 0,1 %). Các số liệu này cho thấy SSA có lợi thế về khối lượng riêng và khả năng kháng mài mòn, tuy nhiên vẫn tồn tại các hạn chế đáng kể như độ hút nước cao và nguy cơ mất ổn định thể tích.

Ngoài ra các tính chất trên, Alizadeh và cs. [23] xác định độ cứng theo thang Mohs, trong đó xỉ BF có độ cứng từ 5–6, thấp hơn so với xỉ EAF (6–7). José và cs. [24] đã thí nghiệm xác định độ rỗng của xỉ EAF và so sánh với đá dăm, cho thấy hai loại SSA có độ rỗng lần lượt 14,4 % và 7,8 %, cao hơn đáng kể so với đá vôi chỉ 0,7 %. Trong khi đó, Lizarazo-Marriaga và cs. [25] đánh giá thành phần tạp chất thông qua chỉ tiêu độ tổn thất khi cháy (LOI), với giá trị của xỉ BOF là 3,12 %, cao hơn xỉ măng (2,7 %) và vượt xa xỉ GBFS (0,7 %). Bên cạnh thành phần hóa học đã trình bày ở Bảng 2, Maslehuddin và cs. [26] cũng chỉ ra độ bền sun phát của SSA EAF khoảng 0,83 %, thấp hơn đáng kể so với đá vôi (14,1 %).

Bảng 3. Một số tính cơ lý điển hình của các loại SSA.

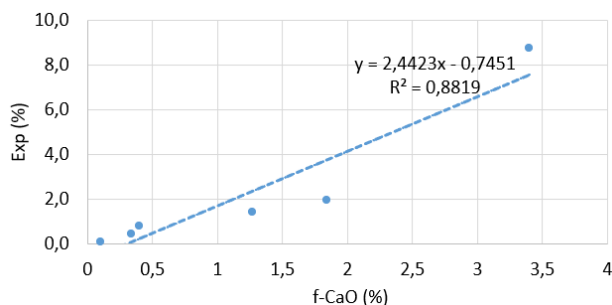
Loại xỉ	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Độ hút nước (%)	Độ hao mòn LA (%)	Độ nở thể tích (%)	Nghiên cứu
AOD	2,80	3,0	16,0	–	Adegoloye và cs. [7]
BOF	3,05–3,31	1,88–3,04	17,1–18,0	1,33–6,7	Teixeira và cs. [18]
EAF	2,91–3,44	1,70–3,20	10,8	–	Rooholamini và cs. [19]
EOF	2,86	3,0	1,16	–	Masilamani và cs. [20]
GBF	2,08	10,0	–	–	Yüksel và cs. [11]
IF	2,75	1,5	–	–	Ahmad và Rahman [21]
LF	2,65	–	–	0,49	Papayianni và Anastasiou [22]

1.2.3. Sự trương nở của SSA

Ảnh hưởng tiêu cực của SSA lên cường độ chịu nén và đặc tính của vật liệu xi măng có thể do các nguyên nhân như độ rỗng và trương nở của SSA khá lớn [15], hàm lượng chất hữu cơ trong SSA [27], tính không đồng đều của SSA [28], độ hút nước cao của SSA [29]. Ren và cs. [16] ghi nhận SSA chứa hàm lượng CaO cao, trong đó BOF dao động khoảng 36,53–50,7 % và EAF khoảng 19,4–55,21 %. Tuy nhiên, chỉ một phần nhỏ tồn tại ở dạng CaO tự do (f-CaO), với BOF khoảng 2–10 % và EAF khoảng 0,5–2 %. Hàm lượng và trạng thái tồn tại của các oxit tự do, đặc biệt là f-CaO và f-MgO, có ảnh hưởng đáng kể đến tính ổn định thể tích của SSA [24], [29]. Trong SSA, Ca và Mg tồn tại không chỉ ở dạng oxit tự do mà còn trong các pha silicat, aluminat, ferrite và pha RO (CaO–FeO–MnO–MgO) [30]. Hàm lượng f-CaO cao có thể gây ra hiện tượng trương nở thể tích, trong khi một số biến đổi pha khoáng

như chuyển hóa từ $\beta\text{-C}_2\text{S}$ sang $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ cũng có thể làm tăng thể tích và ảnh hưởng đến tính ổn định của SSA [30]. Ngoài ra, mức độ trương nở của SSA còn phụ thuộc hình thức xử lý SSA, trạng thái tồn tại của các pha khoáng và cấp phối hạt của SSA [29], [31].

Một số nghiên cứu đã khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng f-CaO đến độ trương nở của SSA xác định theo tiêu chuẩn ASTM D4792 [15], [17]. Kết quả tương quan (Hình 2) cho thấy độ trương nở tỷ lệ với hàm lượng f-CaO theo Công thức (1), với hệ số xác định $R^2 = 0,8819$. Mối quan hệ này được giải thích bởi quá trình thủy hóa của CaO tự do khi tiếp xúc với nước, tạo thành Ca(OH)_2 với thể tích pha rắn tăng khoảng 97,92 % [17], gây giãn nở hạt xi và biến dạng thể tích. Quá trình này diễn ra theo cơ chế phát triển lan ra ngoài của các sản phẩm hydroxide, gây tập trung ứng suất nội tại và có thể dẫn đến hình thành các vết nứt vi mô [15].



Hình 2. Biểu đồ tương quan giữa độ trương nở và hàm lượng vôi tự do, xây dựng từ số liệu các nghiên cứu [15], [17].

$$Exp = 2,4423 \cdot F - 0,7451 \quad (1)$$

Trong đó: *Exp*: Độ trương nở của SSA (%); *F*: Hàm lượng vôi tự do (%).

1.2.4. Xử lý SSA

Việc xử lý SSA trước khi sử dụng nhằm hạn chế các bất lợi vốn có của vật liệu. Các phương pháp xử lý có thể chia thành: (i) xử lý trực tiếp, bao gồm lão hóa tự nhiên, xử lý axit, cacbonat hóa, xử lý nhiệt, nước nóng, hấp áp suất và bọc bề mặt cốt liệu bằng hồ xi măng; và (ii) xử lý gián tiếp sau khi SSA đã được đưa vào vật liệu xi măng như sử dụng phụ gia, sợi hoặc bảo dưỡng trong môi trường CO₂. Trong đó, cacbonat hóa SSA được nghiên cứu rộng rãi nhằm chuyển đổi các oxit dễ trương nở như CaO và MgO tự do (f-CaO, f-MgO) thành các pha ổn định hơn thông qua phản ứng với CO₂, qua đó làm giảm đáng kể nguy cơ giãn nở khi vật liệu tiếp xúc với nước.

Ma và cs. [32] đã áp dụng cacbonat hóa cưỡng bức với CO₂ ở áp suất 0,2 MPa, nhiệt độ 55 °C trong 72 giờ. Sau xử lý, độ trương nở giảm từ khoảng 3,65 % xuống còn 0,23 %, do f-CaO chuyển hóa thành CaCO₃ và lấp kín các mao quản trong cốt liệu. Ngoài ra, phương pháp CO₂ ẩm giúp tăng khả năng thâm nhập của CO₂ vào cấu trúc hạt xi, cho phép khoáng hóa tới 91,73 % lượng f-CaO và giảm hàm lượng của nó còn khoảng 0,61 %, đồng thời tận dụng hiệu quả nguồn nhiệt dư của xỉ nóng, thuận lợi cho triển khai quy mô công nghiệp [33]. Bên cạnh đó, Rodrigues và cs. [34] sử dụng phương pháp ngâm chiết nhiệt, với tỷ lệ giãn nở giảm xuống 0,021 % sau 24 giờ, 0,15 % sau 56 giờ và gần như bằng 0 sau 120 giờ.

Không chỉ cải thiện tính ổn định thể tích, việc sử dụng SSA đã

cacbonat hóa làm cốt liệu trong vữa và bê tông còn góp phần nâng cao hoặc duy trì các tính chất cơ học. Gao và cs. [35] ghi nhận hàm lượng f-CaO giảm xuống còn 0,93 % (giảm 29,34 % so với ban đầu), đồng thời mẫu vữa sử dụng xỉ đã xử lý với tỷ lệ thay thế 60 % có độ giãn nở giảm khoảng 82,8 % so với xỉ chưa xử lý. Bên cạnh đó, cường độ chịu nén của mẫu sử dụng xỉ đã xử lý tăng tương ứng 1,29 % và 6,81 % tại các mức thay thế 60 % và 45 %. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu gần đây, cho thấy khi CaO tự do tồn tại ở dạng pha riêng biệt ở mức ≤ 1 %, ảnh hưởng đến trương nở là không đáng kể, qua đó khẳng định hiệu quả của việc kiểm soát hàm lượng và trạng thái tồn tại của f-CaO trong vật liệu xi măng [36].

1.2.5. Sự rò rỉ kim loại nặng

Theo tổng quan của Piatak và cs. [37], SSA có thể chứa các nguyên tố tiềm ẩn nguy cơ môi trường như Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb và Zn, với hàm lượng tổng (tức hàm lượng toàn phần trong vật liệu rắn) biến thiên trong khoảng rộng, trong đó Cr khoảng 4–32.700 mg/kg và Pb khoảng 2–1.040 mg/kg. So sánh với giá trị quy chuẩn môi trường đất loại 2 theo QCVN 03:2023/BTNMT [38] (Pb: 400 mg/kg; Cr tổng: 200 mg/kg) chỉ ra các nguyên tố này có khả năng vượt ngưỡng cho phép trong một số trường hợp. Tuy nhiên, hàm lượng tổng không phản ánh trực tiếp khả năng phát thải ra môi trường, do lượng kim loại giải phóng không nhất thiết tỷ lệ với thành phần ban đầu mà còn phụ thuộc vào dạng tồn tại khoáng và các điều kiện địa hóa chi phối quá trình hòa tan, như pH, trạng thái oxy hóa-khử và thời gian tiếp xúc [37].

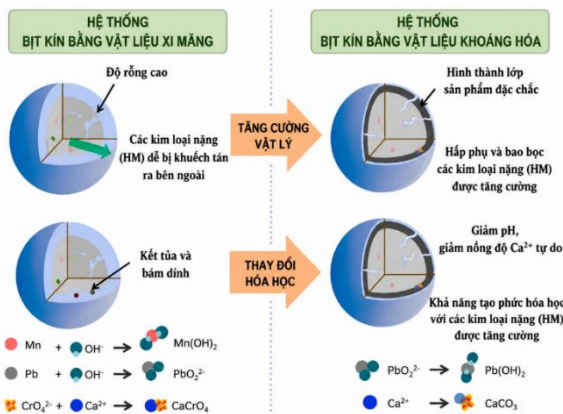
Toffolo và cs. [39] đánh giá nguy cơ môi trường của SSA thông qua thí nghiệm hòa tan và rò rỉ. Kết quả hòa tan (Bảng 4) ghi nhận một số nguyên tố vượt giới hạn theo NBR 10004:2004 (Brazil), điển hình như Al (1,57 mg/L đối với xỉ BOF và 0,978 mg/L đối với xỉ EAF so với giới hạn 0,2 mg/L), Ba (0,742–0,813 mg/L so với 0,7 mg/L) và đặc biệt Se (5,46–7,47 mg/L so với 0,01 mg/L). Ngoài ra, CN⁻ và Fe tổng cũng vượt ngưỡng trong một số trường hợp, trong khi Cu, Cr và Cl⁻ vẫn nằm trong giới hạn cho phép. Ngược lại, trong thí nghiệm rò rỉ, các thông số đều thấp hơn đáng kể so với giới hạn quy định, thể hiện khả năng phát tán chất ô nhiễm ra môi trường là thấp. Điều này chứng tỏ phần lớn kim loại nặng tồn tại ở dạng liên kết bền trong cấu trúc xi và khó bị giải phóng trong điều kiện thực tế.

Bảng 4. Tổng hợp một số kết quả thí nghiệm hòa tan và rửa trôi của SSA [39].

Thí nghiệm hòa tan (mg/L)			
Thông số	Giới hạn	BOF	EAF
Aluminum (Al)	0,2	1,57	0,978
Barium (Ba)	0,7	0,813	0,742
Cyanide (CN ⁻)	0,07	2,00	0,0013
Total iron (Fe)	0,3	0,39	–
Selenium (Se)	0,01	7,47	5,46

Thí nghiệm rửa trôi (mg/L)			
Thông số	Giới hạn	BOF	EAF
Arsenic (As)	1	0,003	0,006
Barium (Ba)	70	0,749	0,538
Chromium (Cr)	5	0,045	0,011
Fluorides (F ⁻)	150	0,5	0,7

Khi SSA được sử dụng trong vật liệu xi măng, các sản phẩm thủy hóa, đặc biệt là gel C-S-H, có khả năng làm giảm tính linh động của kim loại nặng thông qua các cơ chế hấp phụ, kết tủa và cố định trong nền vật liệu [40]. Hình 3 cho thấy cơ chế cố định kim loại nặng trong vật liệu xi măng bao gồm sự kết hợp giữa bao bọc vật lý và phản ứng hóa học. Các sản phẩm thủy hóa và pha khoáng thứ cấp tạo thành cấu trúc đặc chắc, làm giảm độ rỗng và hạn chế sự khuếch tán của các ion kim loại, đồng thời môi trường kiềm thúc đẩy quá trình kết tủa và chuyển hóa kim loại thành các dạng ít tan. Cơ chế này đặc biệt hiệu quả đối với các kim loại như Mn và Pb, trong khi Cr(VI) có thể duy trì tính linh động cao hơn do chủ yếu tồn tại ở dạng anion hòa tan và phụ thuộc vào sự hiện diện của Ca^{2+} để tạo kết tủa ổn định. Do đó, cơ chế cố định kim loại nặng đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát phát thải dài hạn và nâng cao tính ổn định môi trường của vật liệu chứa SSA [41].



Hình 3. Cơ chế ảnh hưởng của phản ứng khoáng hóa CO_2 đến khả năng cố định kim loại nặng (HMs) trong vật liệu xi măng [41].

1.3. Khả năng sử dụng xi thép trong xây dựng

Theo Liu và cs. [4], xi thép được tái sử dụng rộng rãi trong xây dựng nhưng mức độ và hình thức ứng dụng khác nhau đáng kể giữa các khu vực. Hình 4 cho thấy tại các quốc gia có công nghệ luyện thép phát triển và hệ thống tiêu chuẩn nghiêm ngặt như châu Âu, Mỹ và Nhật Bản, tỷ lệ sử dụng xi thép cho xây dựng, đặc biệt trong nền và mặt đường, đạt mức cao, lần lượt khoảng 70 %, 55,7 % và 32,4 %. Ngược lại, Trung Quốc dù chiếm 53,3 % sản lượng xi thép toàn cầu nhưng chỉ sử dụng 2,6 % cho lĩnh vực này, phần lớn được dùng cho san lấp (70,5 %) và sản xuất xi măng (9,3 %). Sự khác biệt này phản ánh vai trò của trình độ công nghệ, kiểm soát chất lượng và khung pháp lý trong định hướng sử dụng xi thép.

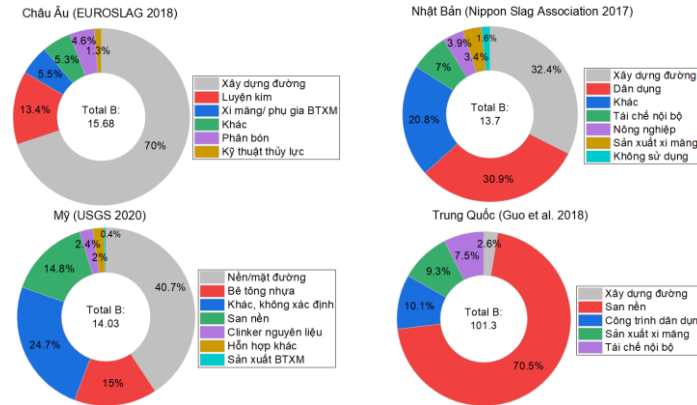
Trong xây dựng, xi thép được nghiên cứu và sử dụng phổ biến, điển hình như làm vật liệu san lấp, làm phụ gia khoáng cho sản xuất xi măng [42] và cho bê tông và vữa [43], làm chất kết dính (CKD) gia cố nền đất, móng [44], làm cốt liệu cho vật liệu gia cố xi măng, vôi [45],

CLSM [5], PCC thông thường [46], PCC mặt đường [47], PCC chịu nhiệt [48], PCC chấn sóng [6], PCC cường độ cao [49], PCC cường độ siêu cao [50], tông nhựa [51]. Tuy nhiên, cách sử dụng khác nhau giữa các quốc gia tùy thuộc đặc tính vật liệu và yêu cầu kỹ thuật – môi trường. Ở các nước phát triển, xi thép thường được xử lý tinh và dùng cho các cấu kiện yêu cầu ổn định cao. Trong khi đó, ở những nơi kiểm soát kỹ thuật còn hạn chế, vật liệu này chủ yếu được dùng ở dạng thô cho san lấp hoặc nền móng, với việc kiểm soát kim loại nặng chưa đầy đủ.

Hiện đã có nhiều nghiên cứu tổng quan về xi thép và ứng dụng trong vật liệu xây dựng [1], [4], [52]–[56]. Trong đó, Yi và cs. [56], Jiang và cs. [55] tập trung về nguồn gốc, đặc tính và các hướng tái sử dụng của xi thép trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Gencel và cs. [54] làm rõ vai trò của xi thép trong công nghệ xi măng và bê tông, đặc biệt là sử dụng như cốt liệu hoặc vật liệu thay thế. Trong khi đó, Rashad [1], Adedokun và cs. [52] tổng quan chi tiết về ứng xử của SSA trong bê tông và vữa, bao gồm ảnh hưởng đến tính công tác, cường độ và độ bền. Ngoài ra, Kambole và cs. [53], và Liu và cs. [4] tập trung vào ứng dụng xi thép trong công trình đường, chủ yếu trong mặt đường, với các phân tích về đặc tính cơ học, khả năng chịu tải và ổn định thể tích. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu xem xét riêng rẽ từng loại vật liệu hoặc kết cấu, trong khi việc tổng hợp một cách hệ thống về sử dụng đồng thời cốt liệu xi thép mịn và thô trong vật liệu xi măng cho cả lớp móng và lớp mặt đường vẫn còn hạn chế.

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về tái sử dụng SSA trong kết cấu mặt đường đã được quan tâm với nhiều hướng ứng dụng khác nhau. Tùng và cs. [57] nghiên cứu sử dụng xi BOF cho lớp móng mặt đường theo tiêu chuẩn Việt Nam và Nhật Bản, cho thấy vật liệu đáp ứng yêu cầu về độ hao mòn LA, CBR và ổn định thể tích, đồng thời có mô đun đàn hồi cao hơn so với cốt liệu tự nhiên. My và cs. [58], [59] nghiên cứu sử dụng cốt liệu xi thép EAF kết hợp tro bay trong RCC, cho thấy vật liệu sau xử lý có khả năng đảm bảo ổn định thể tích và đáp ứng yêu cầu về cường độ cũng như độ bền lâu. Sơn và cs. [60] ghi nhận việc sử dụng SSA kết hợp tro bay và bột xi thép có thể cải thiện vi cấu trúc và giảm tác động môi trường của RCC, trong khi Hằng và cs. [61] và Phương và cs. [62] đánh giá khả năng sử dụng SSA trong CTBA làm lớp móng đường và cho thấy SSA có thể cải thiện cường độ cũng như khả năng làm việc của vật liệu. Nhìn chung, các nghiên cứu trong nước đã bước đầu khẳng định tiềm năng ứng dụng của SSA trong xây dựng mặt đường, đồng thời cho thấy cần tiếp tục nghiên cứu về độ bền, ổn định thể tích dài hạn và cơ sở kỹ thuật cho việc ứng dụng vật liệu trong điều kiện thực tế.

Bài báo này tổng hợp và phân tích các nghiên cứu liên quan đến việc sử dụng SSA trong vật liệu xi măng mặt đường. Nội dung tập trung vào việc phân tích các tính chất cơ học, độ bền, vi cấu trúc của vật liệu CTBA), CLSM, RCC và PCC có sử dụng SSA. Trên cơ sở đó, làm rõ ưu điểm, hạn chế và đề xuất định hướng nâng cao hiệu quả sử dụng SSA theo hướng xanh và bền vững.



Hình 4. Tái sử dụng xỉ thép tại một số quốc gia, vùng lãnh thổ (triệu tấn/năm) [4].

2. Móng đường gia cố xi măng sử dụng SSA

Vật liệu CTBA sử dụng SSA đã được nghiên cứu và ứng dụng ở tầng móng kết cấu mặt đường trên thế giới [45], [63]–[69] cũng như trong nước [61], [62]. Trong các cấp phối gia cố, xi măng thường được sử dụng với hàm lượng khoảng 3–6 % theo khối lượng cốt liệu [63]–[65], [67], trong đó một số nghiên cứu xác định giá trị khoảng 4 % là tối ưu [64], [65]. Về cốt liệu, SSA có thể được sử dụng thay thế cốt liệu thiên nhiên với tỷ lệ 5 %, 10 %, 20 %, 25 %, 30 %, 50 %, 70 %, 75 % và 100 % theo thể tích. Ngoài ra, một số nghiên cứu sử dụng tro bay nhằm cải thiện ổn định thể tích của vật liệu [45], [66].

2.1. Ảnh hưởng của SSA đến các tính chất cơ học

Tổng hợp các nghiên cứu về ảnh hưởng của SSA đến tính chất

CTBA được trình bày trong Bảng 5. Huang và cs. [64] và Liu và cs. [65] ghi nhận rằng việc sử dụng khoảng 50 % SSA giúp cải thiện đáng kể cường độ chịu nén (f_c), với mức tăng lần lượt 45,9 % và 22,7 %; đồng thời cường độ kéo uốn (f_t) tăng tương ứng 71,4 % và 73,44 %. Mô đun đàn hồi (E) cũng tăng đáng kể, đạt 56,9 % và 62,5 %. Ở tỷ lệ thay thế thấp, cường độ kéo uốn tăng mạnh hơn, đạt tới 98,7 % tại mức 10 % SSA [62]. Xu hướng cải thiện này chủ yếu bắt nguồn từ khối lượng riêng lớn, bề mặt nhám và hình dạng góc cạnh của hạt SSA, góp phần tăng ma sát nội và tăng cường liên kết với hồ xi măng [65], [69].

Ngược lại, khi hàm lượng SSA tăng cao đến 70 % và 75 %, cường độ chịu nén, kéo uốn và mô đun đàn hồi giảm nhẹ so với tỷ lệ 50 % [64], [65]. Mặc dù SSA có thể cải thiện cấu trúc và hoạt tính, sự suy giảm này chủ yếu do cấu trúc rỗng nội tại của SSA làm gia tăng độ rỗng tổng thể của vật liệu, lẫn át các tác động tích cực khi hàm lượng thay thế tăng cao [64].

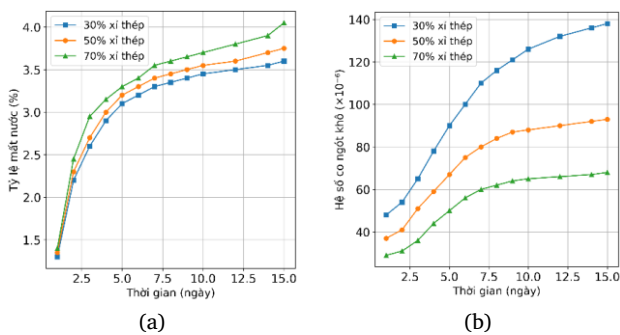
Bảng 5. Ảnh hưởng của SSA đến các tính chất của vật liệu gia cố xi măng.

Nghiên cứu	Thành phần	Cường độ (f_c , f_t , E)	Tính chất khác
Huang và cs. [64]	SSA: 0/30/50/75 %; OPC3–6 %	f_c ↑45,9 %; f_t ↑71,4 %; E ↑56,9 % (SSA50 %/0 %, OPC4 %)	Leach: an toàn
Liu và cs. [65]	SSA: 30/50/70 %; OPC4 %	f_c ↑22,7 %; f_t ↑111 %; f_t ↑73,44 %; E ↑62,5 % (SSA50 %/30 %)	Shr ↓30,5 %; Tshr ↑19,4–28,2 % (SSA50 %/30 %)
Li và cs. (2022) [66]	SSA: 0/25/50/75 %; OPC4/5/6 %	f_c ↑7,1 % (SSA50 %/0 %)	Shr ↓12,9–32,8 %; Tshr ↑16,7–33,7 %
Wang và cs. [69]	SSA: 100 %; OPC4 %; xử lý/ chưa xử lý	f_c ↑4,4 %; f_t ↑19,2 %; E ↑13,2 %	Exp ↓63,3 %
Song và cs. [68]	SSA; OPC4,5/5/5,5 %	f_c ↑9,9 MPa; f_t ↑1,9 MPa (OPC5 %); E ↓50 %	
Li và cs. (2017) [67]	SSA; OPC3/4/5 %		Shr ↓41 % (CTBA /CSM)
Zhou và cs. [45]	SSA; OPC3–6 % + FAsh 30–60 %	f_c ↑155 %, f_t ↑195 %, E ↑13,2 % (FAsh:GSS = 20:80/ 0:100)	FAsh = 30 % : Exp _{min}
Phường và cs. [62]	SSA: 0/5/10/ 20 %; OPC4 %	f_c ↑19,6 %; f_t ↑98,7 % (SSA10 %)	
Hằng và cs. [61]	SSA80 % + FAsh 20 %; OPC4–8 %	f_c = 15,3 MPa; f_t = 1,38 MPa; E = 1860 MPa (OPC8 %)	

Ghi chú: OPC: xi măng, FAsh: tro bay, GSS: xỉ thép nghiền mịn, CSM: đá dăm gia cố xi măng; f_c : Cường độ chịu nén, f_t : kéo uốn, f_t : ép chế; E : mô đun đàn hồi; Shr: co ngót khô; Tshr: co ngót nhiệt; Exp: giãn nở; ↑: tăng, ↓: giảm; Leach: độc tính.

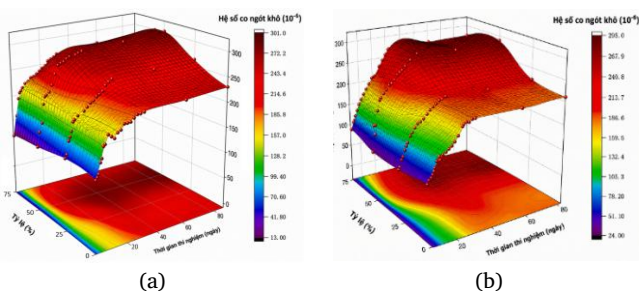
2.2. Ảnh hưởng của SSA đến co ngót và trương nở

Liu và cs. [65] đã nghiên cứu co ngót khô (Shr) của CTBA với các mức thay thế SSA 30 %, 50 % và 70 %. Kết quả tại Hình 5 phản ánh quá trình mất nước và co ngót khô phát triển tương đồng, với tốc độ tăng nhanh ở giai đoạn đầu do bay hơi nước tự do, sau đó chậm dần khi chủ yếu là mất nước liên kết. Lượng nước mất có thể vượt 30 % sau 8–10 ngày, do đó cần duy trì độ ẩm thích hợp nhằm hạn chế co ngót. Sự gia tăng hàm lượng SSA góp phần làm giảm đáng kể co ngót khô; hệ số co ngót tại 15 ngày giảm 30,5 % khi tăng từ 30 % lên 50 % SSA và đạt 49,7 % tại mức 70 % SSA, đồng thời tốc độ phát triển co ngót sau 7 ngày cũng giảm dần.



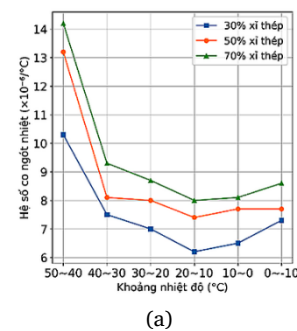
Hình 5. Quá trình mất nước (a) và phát triển co ngót khô (b) của vật liệu CTBA [65].

Tương tự, Li và cs. [66] ghi nhận SSA giúp giảm rõ rệt co ngót khô của CTBA, với mức giảm tăng theo hàm lượng thay thế. Khi sử dụng SSA đã xử lý, co ngót giảm khoảng 12,9–32,8 % đối với CTBA thường và 5,8–33 % đối với CTBA có tro bay (Hình 6). Ngoài ra, Li và cs. [67] chỉ ra biến dạng co ngót của CTBA SSA ($53,4 \times 10^{-6}$ – $115,5 \times 10^{-6}$) thấp hơn so với vật liệu đá dăm gia cố xi măng ($81,4 \times 10^{-6}$ – $164,4 \times 10^{-6}$) trong cùng điều kiện. Xu hướng này chủ yếu liên quan đến sự trương nở của các pha hoạt tính như f-CaO, đồng thời có thể liên quan đến sự hình thành các sản phẩm thủy hóa và sự thay đổi đặc trưng lỗ rỗng của vật liệu. Đồng thời, khả năng hút và giữ nước của SSA giúp điều hòa quá trình mất nước, góp phần cải thiện ổn định thể tích và độ bền của CTBA.



Hình 6. Hệ số co ngót khô CTBA: (a) thường và (b) có tro bay [66].

Liu và cs. [65] quan sát được rằng hệ số co ngót nhiệt (Tshr) của vật liệu chứa SSA biến thiên theo nhiệt độ với xu hướng giảm rồi tăng nhẹ, đồng thời tăng theo hàm lượng SSA với giá trị dao động khoảng $6,2$ – $10,3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (30 % SSA), $7,4$ – $13,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (50 % SSA) và $8,0$ – $14,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (70 % SSA) (Hình 7a). Trong khi đó, Li và cs. [66], khi hệ số co ngót nhiệt cũng được ghi nhận tăng so với mẫu đối chứng theo hàm lượng SSA, với mức tăng khoảng 16,7–33,7 % đối với CTBA thông thường (Hình 7b) và 17,8–38,4 % đối với CTBA thêm 18 % tro bay (Hình 7c) so với mẫu đối chứng. Xu hướng này liên quan đến độ nhạy nhiệt và khả năng biến dạng lớn hơn của SSA, làm tăng co ngót khi nhiệt độ thay đổi. Ngược lại, việc sử dụng tro bay giúp giảm co ngót nhiệt nhờ thay thế một phần chất kết dính và tham gia phản ứng pozzolan, qua đó ổn định cấu trúc vật liệu.



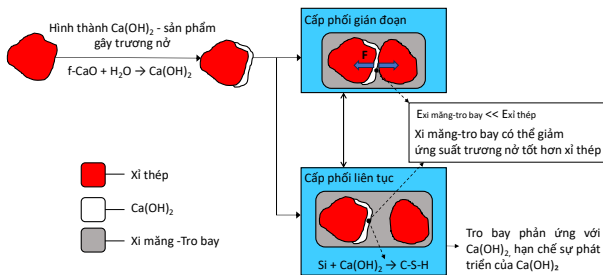
Hình 7. Ảnh hưởng của SSA đến co ngót nhiệt CTBA: (a) [65]; (b), (c) [66].

2.3. Ảnh hưởng của SSA đến trương nở và các giải pháp xử lý

Đối với vật liệu CTBA, Zhou và cs. [45] ghi nhận khi bỏ sung tro bay (20 $^{\circ}\text{C}$, độ ẩm 98 %), độ trương nở (Exp) giảm rõ rệt từ 0,093 % xuống 0,018 % khi hàm lượng tro bay tăng từ 0 % lên 60 %, tương ứng giảm khoảng 80 %. Hiệu quả này liên quan đến sự chuyển đổi của vật liệu sang cấp phối chặt hơn, trong đó SSA được bao bọc bởi chất kết dính có mô đun đàn hồi thấp (Hình 8). Nhờ đó, sự truyền ứng suất trương nở giữa các hạt bị gián đoạn và chất kết dính có thể biến dạng đàn hồi-dẻo để hấp thụ biến dạng thể tích, góp phần hạn chế trương nở.

Ngoài ra, một số nghiên cứu đã đề xuất các giải pháp kiểm soát trương nở của SSA nhằm giảm biến dạng thể tích của CTBA. Huang và cs. [64] ghi nhận tại 10 ngày, xử lý axit (15 % CH_3COOH) giúp giảm độ trương nở từ khoảng 3,2 % xuống còn khoảng 0,08 %, trong khi bổ sung khoảng 4,8 % silica fume giúp giảm xuống khoảng 0,45 %. Hiệu quả này được giải thích là do xử lý axit làm giảm trực tiếp hàm lượng

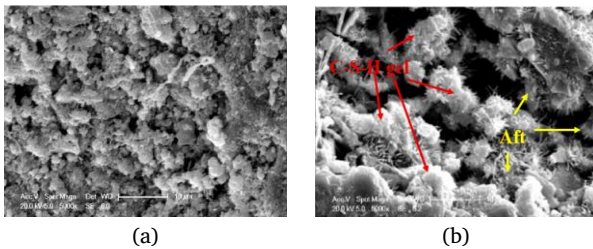
CaO tự do, còn silica fume tham gia phản ứng pozzolan, tiêu thụ Ca(OH)_2 và tạo C-S-H, từ đó vừa làm giảm nguồn gây trương nở vừa cải thiện cấu trúc và hạn chế sự phát triển biến dạng thể tích. Bên cạnh đó, Wang và cs. [69] sử dụng chất biến tính gốc silane để xử lý bề mặt SSA, tạo lớp phủ siloxane kỵ nước, giúp giảm tới 63,3 % độ trương nở của SSA. Lớp phủ này làm giảm đáng kể khả năng thấm nước của hạt SSA thông qua việc tăng tính kỵ nước bề mặt, từ đó hạn chế phản ứng thủy hóa của các pha CaO và MgO tự do giúp giảm giãn nở.



Hình 8. Sơ đồ tro bay ức chế sự giãn nở SSA [45].

2.4. Đặc điểm vi cấu trúc của CTBA sử dụng SSA

Nghiên cứu vi cấu trúc của Liu và cs. [65] ở tuổi 7 ngày thể hiện sự khác biệt rõ giữa CTBA không sử dụng và sử dụng 50 % SSA. Mẫu không có SSA có cấu trúc rời rạc, nhiều lỗ rỗng và sự hiện diện của Ca(OH)_2 dạng tấm (Hình 9a). Trong khi đó, mẫu có SSA xuất hiện rõ gel C-S-H và các tinh thể ettringite (Aft), tạo cấu trúc đặc chắc hơn (Hình 9b). Sự phát triển của các sản phẩm thủy hóa này góp phần cải thiện liên kết và giải thích sự gia tăng cường độ của CTBA sử dụng SSA.



Hình 9. Ảnh vi cấu trúc của CTBA tỷ lệ SSA 0 % (a) và 50 % (b) ở tuổi 7 ngày [65].

Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng hàm lượng SSA, mặc dù lượng C-S-H có xu hướng tăng, sự gia tăng đồng thời của Aft và độ rỗng nội tại của SSA có thể làm cấu trúc kém đồng nhất, hạn chế hiệu quả tăng cường độ. Bên cạnh đó, cấu trúc đặc hơn và sự hiện diện của các pha có xu hướng trương nở (như Aft và f-CaO) góp phần hạn chế mất nước và bù trừ biến dạng, qua đó giải thích xu hướng giảm co ngót của vật liệu sử dụng SSA [65].

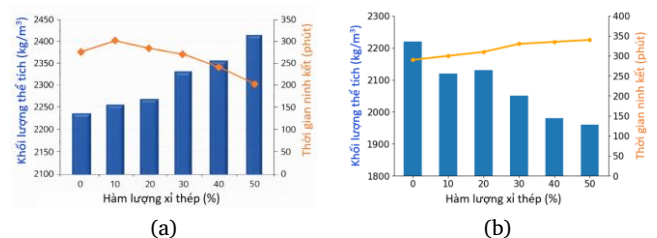
Nhìn chung SSA cho thấy tiềm năng lớn trong ứng dụng cho CTBA nhờ khả năng cải thiện tính chất cơ học và ổn định thể tích của vật liệu. Tuy nhiên, sự khác biệt về nguồn gốc, thành phần và phương pháp xử lý SSA dẫn đến các kết quả chưa hoàn toàn thống nhất giữa

các nghiên cứu. Do đó, các vấn đề về kiểm soát chất lượng nguồn xi, ổn định thể tích dài hạn, độ bền dưới tác động môi trường và khả năng rò rỉ kim loại cần tiếp tục được nghiên cứu, đặc biệt đối với các loại SSA và tỷ lệ thay thế khác nhau, làm cơ sở cho việc tiêu chuẩn hóa và mở rộng ứng dụng SSA trong CTBA.

3. Móng đường vật liệu cường độ thấp (CLSM) có kiểm soát sử dụng SSA

CLSM là vật liệu xi măng có độ linh động cao, có khả năng tự chảy hoặc độ sụt lớn, phù hợp cho các vị trí khó đầm nén trong công trình hạ tầng và giao thông [70], [71]. Theo ACI 229 [72], CLSM gồm chất kết dính (xi măng hoặc pozzolan), cốt liệu mịn hoặc vật liệu độn và nước, có thể bổ sung phụ gia khoáng như tro bay hoặc SSA để cải thiện tính công tác. CLSM thường được thiết kế với cường độ chịu nén thấp, phổ biến 0,7–2,1 MPa và không vượt quá khoảng 8,3 MPa [73], đồng thời yêu cầu độ chảy cao (200–300 mm) hoặc độ sụt khoảng 180 mm để đảm bảo khả năng tự lấp đầy [71]. Nhờ các đặc tính này, CLSM được ứng dụng trong sửa chữa và làm lớp móng đường, có khả năng đạt cường độ sớm và cải thiện độ cứng kết cấu [71]. Việc sử dụng phế thải công nghiệp, đặc biệt là SSA, trong CLSM đang được quan tâm nhằm giảm tiêu thụ tài nguyên và nâng cao tính bền vững.

3.1. Ảnh hưởng của SSA đến các tính công tác của CLSM



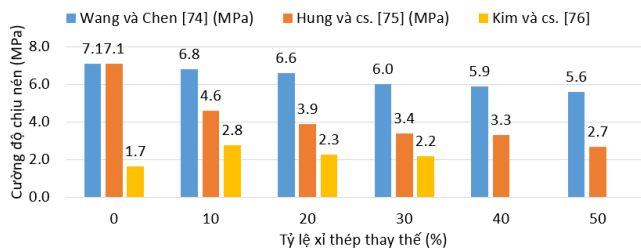
Hình 10. Thời gian ninh kết và KLTT của CLSM: xi BSSF [74] (a) và DS [5] (b).

Việc thay thế cốt liệu mịn bằng SSA ảnh hưởng đáng kể đến tính công tác của CLSM, với xu hướng phụ thuộc vào loại SSA sử dụng. Wang và Chen [74] sử dụng xi Baosteel quy trình ngắn (BSSF) và ghi nhận khi tăng hàm lượng thay thế từ 0 % lên 50 %, độ sụt, độ chảy và độ chảy qua ống lần lượt giảm khoảng 25,9 %, 9,7 % và 10,7 %. Ngược lại, Huang và cs. [5] sử dụng xi DS và quan sát xu hướng tăng tương ứng 11,5 %, 40,0 % và 51,5 %.

Đối với thời gian ninh kết, Wang và Chen [74] ghi nhận xi BSSF làm giảm từ 273 xuống 205 phút (Hình 10a), trong khi Huang và cs. [5] cho thấy thời gian ninh kết tăng từ 273 lên 340 phút khi hàm lượng thay thế đạt 50 % (Hình 10b). Sự khác biệt này chủ yếu liên quan đến khả năng hút và giữ nước của từng loại SSA, ảnh hưởng đến lượng nước tự do và quá trình thủy hóa của hệ chất kết dính. Nhìn chung, thời gian ninh kết của CLSM có xu hướng biến thiên ngược với khối lượng thể tích (KLTT) của hỗn hợp (Hình 10).

3.2. Ảnh hưởng của SSA đến các tính chất cơ học của CLSM

Tổng hợp các nghiên cứu về cường độ chịu nén của CLSM sử dụng SSA thay thế cốt liệu mịn (0–50 %) được thể hiện trên Hình 11. Kết quả ghi nhận khi tăng hàm lượng SSA, cường độ chịu nén nhìn chung giảm, tuy nhiên ở tỷ lệ thay thế thấp có thể tăng so với mẫu đối chứng. Cụ thể, Wang và Chen [74] ghi nhận cường độ giảm từ 6,8 xuống 5,6 MPa (giảm khoảng 4,2–21,1 %), trong khi Hung và cs. [75] ghi nhận mức giảm lớn hơn, từ 4,6 xuống 2,7 MPa (giảm khoảng 35,2–62,0 %) khi tỷ lệ SSA tăng từ 10 % lên 50 %. Hiện tượng này chủ yếu do suy giảm liên kết trong ma trận chất kết dính và biến đổi bất lợi của cấu trúc vi mô.



Hình 11. Cường độ chịu nén của CLSM với các tỷ lệ SSA khác nhau [74]–[76].

Ngược lại, Kim và cs. [76] ghi nhận việc sử dụng SSA ở tỷ lệ thấp có thể cải thiện cường độ CLSM. Cụ thể, thay thế 10 % cát giúp cường độ chịu nén tăng từ 1,7 lên 2,8 MPa (tăng khoảng 64,7 %). Khi tăng tỷ lệ SSA lên 20–30 %, cường độ giảm còn 2,3–2,2 MPa nhưng vẫn cao hơn mẫu đối chứng khoảng 29,4–35,3 %. Sự cải thiện ở hàm lượng thấp chủ yếu do bề mặt nhám và hình dạng góc cạnh của hạt SSA giúp tăng liên kết cơ học. Tuy nhiên, khi hàm lượng SSA tăng, độ rỗng và biến đổi vi cấu trúc làm hiệu quả này suy giảm, dẫn đến giảm cường độ.

Hung và cs. [75] xây dựng mô hình hồi quy thực nghiệm dự báo cường độ chịu nén CLSM theo Công thức (2) và điện trở suất bề mặt theo Công thức (3), dựa trên tỷ lệ SSA lưu huỳnh và tuổi dưỡng hộ. Mô hình được thiết lập từ 36 bộ dữ liệu với hàm lượng SSA 0–50 % và tuổi dưỡng hộ 1–91 ngày. Kết quả đạt độ tương quan cao với dữ liệu thí nghiệm, với hệ số xác định $R^2 = 0,9279$ đối với cường độ chịu nén và $R_{ac}^2 = 0,8880$, $R_{be}^2 = 0,9369$ đối với điện trở suất bề mặt. Các phương trình hồi quy đề xuất có khả năng dự báo tốt các tính chất của CLSM trong phạm vi khảo sát với hàm lượng SSA 0–50 % và tỷ lệ nước/chất kết dính bằng 1,50.

$$f'_{c,28} = 6,8179 - 18,1964.SSA + 21,2500.SSA^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_r = e^{2,303 \cdot \frac{t}{a_e + b_e \cdot t}} \\ a_e = 1,5876 - 1,2852.SSA + 12,3827.SSA^2 \\ b_e = 0,0932 + 0,2311.SSA \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó:

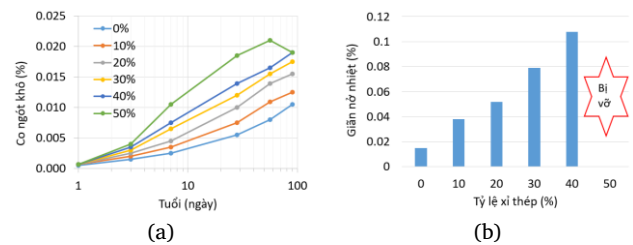
$f'_{c,28}$: Cường độ chịu nén dự báo ở tuổi 28 ngày (MPa);

E_r : Điện trở suất bề mặt ($k\Omega \cdot cm$);

SSA: Hàm lượng SSA lưu huỳnh thay thế cốt liệu (%).

3.3. Ảnh hưởng của SSA đến tính ổn định thể tích của CLSM

Huang và cs. [5] ghi nhận hàm lượng SSA ảnh hưởng rõ rệt đến biến dạng thể tích của CLSM. Hình 12a cho thấy co ngót khô tăng theo thời gian dưỡng hộ và theo hàm lượng SSA; tại 90 ngày, giá trị tăng từ khoảng 0,011 % (0 % SSA) lên 0,020 % (50 % SSA). Xu hướng tương tự được ghi nhận đối với giãn nở nhiệt trong Hình 12b, với giá trị tăng từ 0,016 % (0 % SSA) lên khoảng 0,039 %, 0,051 %, 0,079 % và 0,108 % tương ứng với các mức 10 %, 20 %, 30 % và 40 % SSA. Mẫu 50 % SSA bị phá hủy do giãn nở đột ngột, đạt khoảng 0,45 %. Sự gia tăng co ngót và giãn nở khi tăng hàm lượng SSA chủ yếu liên quan đến cấu trúc xốp và khả năng hút nước cao của hạt SSA, làm gia tăng mất nước trong quá trình dưỡng hộ, đồng thời sự hiện diện của CaO và MgO tự do có thể gây trương nở khi phản ứng với nước.



Hình 12. Co ngót khô (a) và giãn nở nhiệt (b) của CLSM SSA DS [5].

Tổng quan tài liệu ở trên cho thấy các nghiên cứu hiện có về CLSM chủ yếu tập trung vào sử dụng xi thép DS và BOF thay thế cốt liệu mịn ở một số tỷ lệ nhất định, đồng thời đánh giá tính công tác, thời gian ninh kết, cường độ chịu nén và một số chỉ tiêu ổn định thể tích. Trong khi đó, kháng nứt, độ bền, khả năng rò rỉ kim loại và ứng xử dài hạn của CLSM sử dụng SSA vẫn chưa được khảo sát đầy đủ, cần được tiếp tục làm rõ trong các nghiên cứu tiếp theo.

4. Móng và mặt đường bê tông đầm lăn sử dụng SSA

4.1. Bê tông đầm lăn trong xây dựng mặt đường

RCC sử dụng SSA làm cốt liệu đã được nghiên cứu sử dụng trong nhiều nghiên cứu [19], [39], [58], [59], [77]–[80]. Thành phần cấp phối RCC thể hiện trên Bảng 6 thể hiện rõ rằng hàm lượng xi măng được sử dụng từ 12 % tương ứng 274 kg/m³ đến 350 kg/m³ [58], [59], [19]. Các tác giả thường sử dụng các loại SSA phổ biến như EAF, BOF để thay thế cốt liệu thô (CA) hoặc cốt liệu mịn (FA) hoặc tất cả cốt liệu thô và mịn với tỷ lệ thay thế 25 %, 50 %, 75 % và 100 %.

Butle và cs. [80] nghiên cứu RCC SSA với chất kết dính gồm 50 % xi măng và 50 % hỗn hợp đá vôi – đất sét nung, ghi nhận sự thay đổi rõ rệt đặc tính đầm chặt của hỗn hợp. Khi thay thế cốt liệu bằng SSA, độ ẩm tối ưu (W_{opt}) tăng từ 5,90 % lên 6,34–7,07 % (tương ứng mức tăng 7,47–19,86 % cho các tỷ lệ 25–100 %), trong khi khối lượng thể tích khô lớn nhất ($\gamma_{k,max}$) giảm khoảng 5,8 % từ 2453 xuống 2311 kg/m³. Kết quả này chủ yếu do cấu trúc rỗng, không đều và khả năng hút nước cao của SSA so với cốt liệu bazan, làm tăng nhu cầu nước và giảm khả

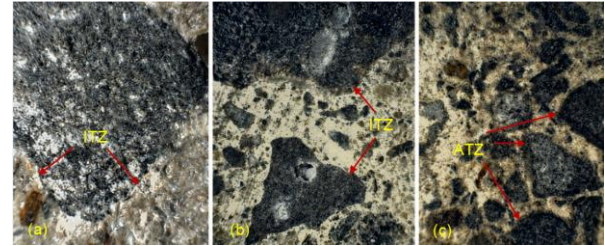
năng sắp xếp hạt, từ đó giảm độ đặc chắc của vật liệu. Thông tin cấp phối và các kết quả thí nghiệm liên quan được trình bày trong Bảng 6.

4.2. Ảnh hưởng của SSA đến các cường độ bê tông đầm lẫn

Bảng 7 thể hiện các kết quả nghiên cứu về cường độ của RCC sử dụng SSA. Nhìn chung, xu hướng thay đổi cường độ không đồng nhất, phụ thuộc vào tỷ lệ thay thế và loại SSA sử dụng. Đối với cường độ chịu nén, kết quả phản ánh rằng cường độ sớm (7 ngày) có thể tăng đến khoảng 23,1 % khi tỷ lệ thay thế 50 % [80]. Ở tuổi 28 ngày, mức tăng cao nhất ghi nhận khoảng 35,5 % [78] hoặc 20,5 % [39]. Trong đó, xỉ EAF thường cho hiệu quả ổn định hơn, với mức tăng cường độ chịu nén đạt khoảng 20,5 % so với 5,7 % của xỉ BOF [39]. Đồng thời, khi sử dụng làm cốt liệu thô, EAF giúp tăng cường độ chịu nén khoảng 5,9 %, trong khi thay thế cốt liệu mịn có thể làm giảm tới 25,2 % [19].

Sự gia tăng cường độ, đặc biệt ở giai đoạn đầu, được lý giải bởi hình dạng góc cạnh, bề mặt nhám và độ cứng cao của SSA, giúp tăng khả năng khóa liên kết và truyền ứng suất trong bê tông [19], [39], [80]. Quan sát vi cấu trúc Hình 13 cho thấy cốt liệu xỉ thép EAF và BOF có hình dạng khối, bề mặt gồ ghề và vùng chuyển tiếp ITZ đặc chắc hơn so với cốt liệu tự nhiên, góp phần tăng khả năng liên kết cơ học giữa cốt liệu và hồ xi măng, từ đó cải thiện cường độ RCC [39]. Ngoài ra,

cấu trúc rỗng và khả năng hút nước của cốt liệu xỉ thép EAF có thể tạo hiệu ứng dưỡng hộ bên trong, giúp duy trì độ ẩm cho quá trình thủy hóa và cải thiện sự phát triển cường độ sớm của RCC sử dụng hàm lượng xỉ măng thấp [80].



Hình 13. Vi cấu trúc RCC sử dụng cốt liệu tự nhiên (a), xỉ BOF (b) và xỉ EAF (c) [39].

Ngược lại, khi thay thế cốt liệu tự nhiên bằng SSA, cường độ chịu nén có thể giảm đến 25,2 % ở mức thay 50 % cốt liệu mịn [19] hoặc 24,4 % khi thay hoàn toàn cốt liệu thô [58]. Sự suy giảm này chủ yếu do độ hút nước cao của SSA làm giảm lượng nước hiệu quả, cùng với ảnh hưởng của hình dạng hạt và cấp phối; ngoài ra, hàm lượng CaO tự do trong xỉ BOF cũng có thể ảnh hưởng đến ổn định thể tích và cấu trúc vi mô nếu không được xử lý phù hợp [39].

Bảng 6. Một số thông tin cấp phối RCC sử dụng SSA.

Nghiên cứu	CKD (kg/m ³)	SSA thay thế	$W_{opt}(\%) / \gamma_{k,max}(\text{kg/m}^3)$
My và cs. (2017, 2018a) [58], [59]	274/(12%) (tro bay: 0–20–40 %)	EAF; CA (0/50/100 %)	6,41–8,37/ 2245–2346
My và cs. (2018b) [77]	278–282 (12 %)	EAF; CA (0/100 %)	6,93–7,99/ 2284–2379
Rooholamini và cs. [19]	350	EAF; FA (0/25/50 %); CA (50/100 %)	
Toffolo và cs. [39]	280 (17,47 %)	EAF, BOF; CA + FA (0/100 %)	7,20/2800 (EAF); 7,94/2580 (BOF)
Goli và cs. [78]	297–242	SSA; CA, CA + FA, FA	
Nasr & Bavafa [79]	300	BOF; CA (0/100 %)	
Butle và cs. [80]	300 (0&50 % bột đá vôi - đất sét)	EAF; CA (0/25/50 /75/100 %)	5,90/2453; 7,07/2311 (SSA100 %)

Bảng 7. Sự thay đổi cường độ của RCC khi thay thế cốt liệu tự nhiên bằng SSA.

Nghiên cứu	SSA (%)	Loại, cỡ hạt	$f_{c,28}^{ref}$ (MPa)	Δf_c^7 (%)	Δf_c^{28} (%)	Δf_t (%)	Δf_r (%)	ΔE (%)
My và cs. (2017, 2018a) [58], [59]	50	EAF, CA	47,04	–	-11,9	-8,6	–	-3,3
My và cs. (2017, 2018a) [58], [59]	100	EAF, CA	47,04	–	-24,4	-9,8	–	-4,5
My và cs. (2018b) (t=0) [77]	100	EAF, CA	51,5	–	-15,5	-20,5	–	-19,7
My và cs. (2018b) (t=60ph) [77]	100	EAF, CA	45,3	–	-5,1	+5,7	–	-21,4
Rooholamini và cs. [19]	25	EAF, FA	32,1	–	-0,3	+11,5	-3,6	–
Rooholamini và cs. [19]	50	EAF, FA	32,1	–	-25,2	-16,6	-28,0	–
Rooholamini và cs. [19]	50	EAF, CA	32,1	–	+5,9	+25,4	+6,1	–
Rooholamini và cs. [19]	100	EAF, CA	32,1	–	+13,7	+30,5	+9,0	–

Nghiên cứu	SSA (%)	Loại, cỡ hạt	$f_{c,28}^{ref}$ (MPa)	Δf_c^7 (%)	Δf_c^{28} (%)	Δf_t (%)	Δf_r (%)	ΔE (%)
Toffolo (BOF) [39]	100	BOF, vừa	35,1	–	+5,7	0	-2,9	+17,7
Toffolo (EAF) [39]	100	EAF, vừa	35,1	–	+20,5	+20,8	+11,4	+22,7
Butle và cs. [80]	25	EAF, CA	39,8	+16,1	+8,0	–	+7,1	-7,6
Butle và cs. [80]	50	EAF, CA	39,8	+23,1	+13,1	–	+10,7	-9,8
Butle và cs. [80]	75	EAF, CA	39,8	+19,8	+8,0	–	+8,9	-18,5
Butle và cs. [80]	100	EAF, CA	39,8	+14,9	+4,3	–	+5,4	-27,9
Nasr và Bavafa [79]	100	BOF, CA	27,6	–	-18,8	-1,5	–	–
Goli và cs. [78]	100	CA	29,9	–	+7,7	–	–	–
Goli và cs. [78]	100	CA + FA	29,9	–	+35,5	–	–	–
Goli và cs. [78]	100	FA	29,9	–	+30,1	–	–	–

Đối với cường độ kéo uốn và ép chèn, kết quả nghiên cứu chỉ ra biến thiên lớn khi thay thế cốt liệu tự nhiên bằng SSA. Cường độ có thể tăng đến 30,5 % khi thay thế 100 % cốt liệu thô [19] hoặc 11,4 % [39], nhưng cũng có thể giảm đến khoảng 28,0 % khi thay thế 50 % cốt liệu mịn [19], phản ánh ảnh hưởng của dạng và tỷ lệ thay thế. Tương tự, mô đun đàn hồi biến động đáng kể, có thể tăng đến 22,7 % [39] hoặc giảm đến 27,9 % [80] khi thay thế hoàn toàn bằng xỉ EAF. Nhìn chung, chưa ghi nhận xu hướng rõ ràng về cường độ của RCC khi sử dụng SSA. Tuy nhiên, xỉ EAF thường cho kết quả ổn định hơn xỉ BOF [39] và thay thế cốt liệu thô hiệu quả hơn so với cốt liệu mịn [19].

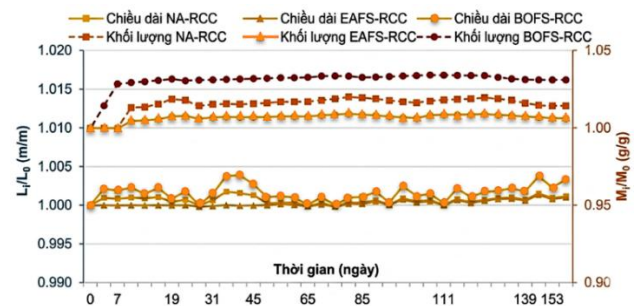
4.3. Ảnh hưởng của SSA đến độ bền của RCC

Các nghiên cứu thực nghiệm đều ghi nhận SSA giúp cải thiện đáng kể khả năng chống mài mòn của RCC. Theo Mỹ và cs. [59], trường hợp không sử dụng tro bay, giá trị rãnh mài giảm từ khoảng 22,7 mm ở mẫu đối chứng xuống còn 22,0 mm khi thay thế 50 % SSA và 21,2 mm khi tỷ lệ thay thế 100 %. Trong khi đó, Goli và cs. [78] định lượng rõ mức cải thiện theo các phương pháp thí nghiệm khác nhau với khoảng 21 % (Wide wheel), 25 % (Cantabro) và 40 % (Böhme). Về cơ chế, khả năng chống mài mòn chủ yếu liên quan đến bề mặt thô cứng của SSA [59]. Đồng thời, hình dạng góc cạnh và bề mặt nhám của SSA giúp tăng liên kết cơ học và cải thiện vùng chuyển tiếp ITZ giữa cốt liệu và hồ xi măng [78]. Bên cạnh đó, cả hai nghiên cứu đều ghi nhận mối tương quan giữa cường độ chịu nén và khả năng chống mài mòn, trong đó cường độ chịu nén cao hơn dẫn đến khả năng kháng mài mòn tốt hơn.

Đánh giá khả năng chống thấm nước của RCC, Mỹ và cs. [59] quan sát được rằng độ hút nước của RCC tăng khi hàm lượng SSA tăng, với giá trị tăng từ khoảng 4,30 % ở mẫu đối chứng lên 4,90 % và 5,40 % khi thay thế lần lượt 50 % và 100 % cốt liệu. Như vậy, ở mức thay thế 100 %, độ hút nước đã vượt ngưỡng giới hạn 5 %. Xu hướng này được giải thích bởi đặc trưng rỗng, không đều và khả năng hút nước cao của SSA, làm gia tăng độ rỗng của hệ vật liệu và lượng nước hấp thụ. Ngược lại, theo Toffolo và cs. [39], ảnh hưởng của SSA phụ thuộc vào loại SSA sử dụng. Độ hút nước của RCC sử dụng xỉ BOF (BOFS-RCC) tăng từ 2,94 % lên 3,23 %, trong khi RCC sử dụng xỉ EAF (EAFS-RCC) giảm

xuống 2,59 % so với mẫu đối chứng (NA-RCC). Sự khác biệt này được lý giải là do xỉ BOF làm tăng đáng kể độ rỗng của bê tông, trong khi xỉ EAF có độ ổn định và khối lượng thể tích cao hơn. Xét về giá trị tuyệt đối, cả BOFS-RCC và EAFS-RCC đều hấp thụ nhiều nước hơn NA-RCC. Tuy nhiên, khối lượng riêng cao hơn của EAFS-RCC dẫn đến khả năng hấp thụ nước tương đối thấp hơn.

Toffolo và cs. [39] đánh giá tính ổn định thể tích của RCC sử dụng SSA thông qua biến thiên chiều dài và khối lượng dưới các chu kỳ ẩm–khô. Kết quả (Hình 14) chỉ ra RCC sử dụng xỉ BOF có độ giãn nở lớn nhất (~0,40 %), cao hơn so với xỉ EAF (~0,19 %) và cốt liệu tự nhiên (~0,13 %); đồng thời biến thiên khối lượng cũng lớn hơn (3,30 % so với 0,99 % và 1,97 %). Hiện tượng này được giải thích bởi quá trình thủy hóa các oxit tự do (CaO, MgO, FeO) gây trương nở thể tích. RCC sử dụng xỉ BOF có biến dạng lớn hơn do hàm lượng hạt mịn (< 75 μ m), hàm lượng CaO và độ rỗng đều cao hơn so với xỉ EAF, với các giá trị tương ứng là 3,62 % so với 1,22 %, 35,8 % so với 27,4 %, và 3,23 % so với 2,59 %.



Hình 14. Sự thay đổi chiều dài và khối lượng RCC SSA dưới chu kỳ ẩm–khô [39].

Từ phân tích tổng hợp ở phần này cho thấy các nghiên cứu về RCC sử dụng SSA đã đánh giá tương đối toàn diện các tính chất cơ học và một số chỉ tiêu độ bền của vật liệu. Kết quả cho thấy SSA có thể cải thiện khả năng chống mài mòn của RCC, tuy nhiên sự gia tăng độ hút nước và độ giãn nở cho thấy sẽ ảnh hưởng đến độ bền và ổn định thể tích của vật liệu. Do đó, các vấn đề liên quan đến khả năng kháng nứt,

độ bền và ứng xử dài hạn của RCC chứa SSA trong điều kiện khai thác thực tế của mặt đường vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu và làm rõ.

5. Mặt đường bê tông xi măng SSA

5.1. Thành phần cấp phối và tính công tác của bê tông xi măng SSA mặt đường

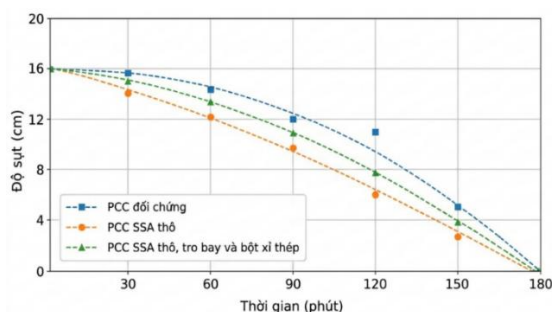
SSA đã được nghiên cứu sử dụng nhiều trong PCC mặt đường [28], [81]–[83], [60], [84]–[91]. Trong đó, một số nghiên cứu thay thế cốt liệu mịn với các tỷ lệ 15 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 100 % ([81], [83], [90]), còn lại chủ yếu thay thế cốt liệu thô với các mức 25 %, 30 %, 40 %, 50 %, 75 %, và 100 %. Bảng 8 tổng hợp thành phần cấp phối của PCC sử dụng SSA. Trong đó, tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) thường sử dụng khoảng 0,36–0,64, phổ biến 0,35–0,45. Hàm lượng chất kết dính chủ yếu dao động trong khoảng 300–400 kg/m³,

với giá trị cao nhất khoảng 586 kg/m³. Về tính công tác, các nghiên cứu chủ yếu sử dụng bê tông có độ sụt trong khoảng 13–160 mm, phù hợp với PCC dùng cho kết cấu mặt đường.

Son và cs. [60] đã đánh giá ảnh hưởng của SSA đến tính công tác của hỗn hợp PCC. Hình 15 chỉ ra các hỗn hợp đều có độ sụt ban đầu khoảng 16 cm và giảm dần theo thời gian, mất hoàn toàn sau 180 phút. Hỗn hợp đối chứng duy trì độ sụt tốt nhất, trong khi hỗn hợp sử dụng 100 % cốt liệu SSA thô giảm gần tuyến tính; tại 60 và 90 phút, độ sụt thấp hơn lần lượt khoảng 10,3 % và 16,7 %. Khi thay thế một phần xi măng 10 % bột xi thép và 20 % tro bay, mức suy giảm được hạn chế, chỉ khoảng 3,4 % và 8,3 %. Hiện tượng này chủ yếu do SSA có bề mặt xấp, góc cạnh nên hút nước và làm tăng độ cứng hỗn hợp, trong khi tro bay và bột xi thép với bề mặt nhẵn, dạng tròn giúp cải thiện tính công tác và khả năng giữ độ sụt.

Bảng 8. Thành phần cấp phối vật liệu PCC mặt đường được nghiên cứu.

Nghiên cứu	Cốt liệu	SSA (%)	N/CKD	CKD (kg/m ³)	Độ sụt (mm)
Zelić [28]	CA + FA	100	0,64	350	–
Qasrawi và cs. [81]	FA	15;30;50	0,38; 0,48; 0,62	330–536	80–120
Phượng và cs. [82]	CA	100	0,38	437,2	20–40
Roy và cs. [83]	FA	30;50;70;100	0,40	314–396	36–58
Ahn và cs. [84], [85]	CA, CA + FA	50;100	0,555	290	≥80
El-Hakim và cs. [86]	CA	25;50;75;100	0,36	500	61–80
Murmu và cs. [87]	CA	30;40;50	0,42	388	45–70
Alonso và cs. [88]	CA + FA	100	0,50	360	–
Sơn và cs. [60]	CA	100	0,55	290	160
Kumar [89]	CA	25;50;75;100	0,40	400	23–30
Nicula và cs. [90]	FA	20;40;60	0,41–0,44	360	13–16
Verian và cs. [91]	CA	100	0,42	586	32–76



Hình 15. Sự thay đổi độ sụt PCC SSA theo thời gian [60].

5.2. Ảnh hưởng của SSA đến cường độ bê tông xi măng SSA mặt đường

Để hiểu rõ ảnh hưởng của SSA đến sự thay đổi cường độ của PCC SSA, tiến hành phân tích thống kê 42 dữ liệu cường độ tổng hợp từ các nghiên cứu [28], [81]–[83], [60], [84]–[91] thể hiện trong Bảng 9 và Bảng 10. Kết quả phân tích thống kê bằng kiểm định nhị thức (Binomial test) thể hiện rằng hiệu quả của SSA đối với các chỉ tiêu cơ học có sự khác

biệt rõ rệt. Đối với cường độ chịu nén, tỷ lệ tăng đạt 52,4 % nhưng không có ý nghĩa thống kê ($p = 0,878 > 0,05$) nên chưa có xu hướng rõ ràng. Ngược lại, các chỉ tiêu chịu kéo uốn và ép chéo có tỷ lệ tăng cao (71,4 % và 83,3 %) và đều có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$), thể hiện xu hướng tăng rõ rệt. Trong khi đó, mô đun đàn hồi có tỷ lệ tăng 66,7 % nhưng không có ý nghĩa thống kê ($p = 0,388 > 0,05$). Nhìn chung, SSA cải thiện rõ rệt các tính chất chịu kéo của PCC, trong khi ảnh hưởng đến cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi chưa thể hiện xu hướng nhất quán.

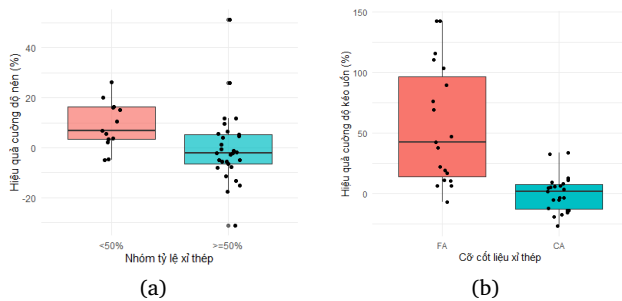
Phân tích thống kê ảnh hưởng của SSA theo tỷ lệ thay thế và cỡ hạt cho thấy: (i) mức tăng cường độ chịu nén của PCC khi hàm lượng thay thế < 50 % cao hơn so với hàm lượng thay thế ≥ 50 %; (ii) việc thay thế SSA cho cốt liệu mịn mang lại hiệu quả tăng cường độ kéo uốn cao hơn so với thay thế cốt liệu thô. Ngoài ra, tỷ lệ SSA không ảnh hưởng đáng kể đến cường độ kéo uốn, trong khi cỡ hạt SSA thay thế không ảnh hưởng rõ rệt đến cường độ chịu nén. Hình 16 minh họa sự khác biệt về hiệu quả tăng cường độ chịu nén giữa hai nhóm tỷ lệ (< 50 % và ≥ 50 %) cũng như hiệu quả tăng cường độ kéo uốn giữa hai dạng thay thế cốt liệu (mịn và thô).

Bảng 9. Phân tích thống kê ảnh hưởng của SSA đến cường độ PCC.

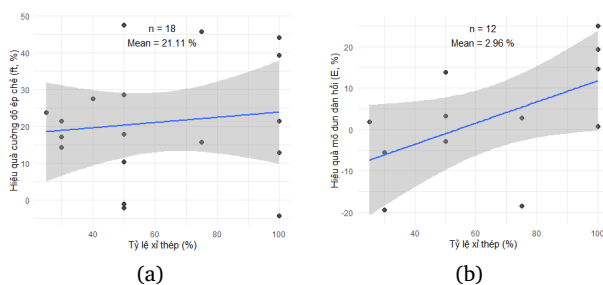
Chỉ tiêu	Phương pháp phân tích thống kê	Tỷ lệ tăng	TB nhóm tăng (%)	TB nhóm giảm (%)	p-value (< 0,05)	Nhận xét
Δf_c	Binomial test	52,4 %	11,950	-7,665	0,8776	Không rõ xu hướng
Δf_t	Binomial test	71,4 %	40,053	-12,025	0,0079	Tăng rõ ràng
Δf_l	Binomial test	83,3 %	25,847	-2,567	0,0075	Tăng rõ ràng
ΔE	Binomial test	66,7 %	10,213	-11,550	0,3877	Không rõ xu hướng

Bảng 10. Phân tích thống kê hiệu quả tăng trưởng cường độ chịu nén (Δf_c) và cường độ kéo uốn (Δf_t) của PCC sử dụng SSA.

Chỉ tiêu	Phương pháp phân tích	Nhóm	Giá trị trung bình	p-value (< 0,05)	Đánh giá
Δf_c	Wilcoxon rank-sum test	SSA < 50%/ SSA $\geq$ 50%	8,938%/-0,228%	0,0071	SSA < 50 % hiệu quả hơn SSA $\geq$ 50 %
Δf_t	Wilcoxon rank-sum test	SSA < 50%/ SSA $\geq$ 50%	38,962%/ 18,993%	0,1084	Không rõ xu hướng
Δf_c	Wilcoxon rank-sum test	Thay thế FA/ Thay thế CA	3,847%/ 1,587%	0,3243	Không rõ xu hướng
Δf_t	Wilcoxon rank-sum test	Thay thế FA/ Thay thế CA	55,863%/-0,178%	7,704e-06	Thay thế FA hiệu quả hơn CA



Hình 16. Biểu đồ phân bố hiệu quả cường độ theo tỷ lệ SSA (a) và theo cỡ cốt liệu (b).

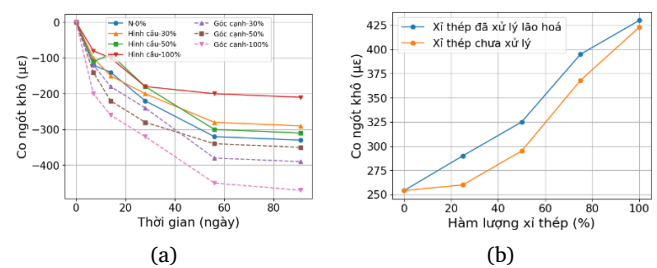


Hình 17. Hiệu quả cường độ ép chế (a) và mô đun đàn hồi (b) theo tỷ lệ SSA.

Với cùng bộ dữ liệu, hiệu quả tăng trưởng cường độ ép chế và mô đun đàn hồi được thể hiện trên Hình 17. Kết quả chỉ ra cường độ ép chế tăng tương đối cao, với giá trị trung bình khoảng 21,11 % và ít phụ thuộc vào tỷ lệ SSA thay thế. Ngược lại, mô đun đàn hồi chỉ tăng nhẹ, trung bình khoảng 2,96 %, nhưng có xu hướng tăng rõ rệt theo hàm lượng SSA thể hiện qua độ dốc lớn hơn của đường xu hướng. Xu

hướng này có thể do cường độ bản thân SSA cao hơn cốt liệu tự nhiên, qua đó góp phần cải thiện mô đun đàn hồi của vật liệu.

5.3. Ảnh hưởng của SSA đến độ bền của bê tông xi măng SSA



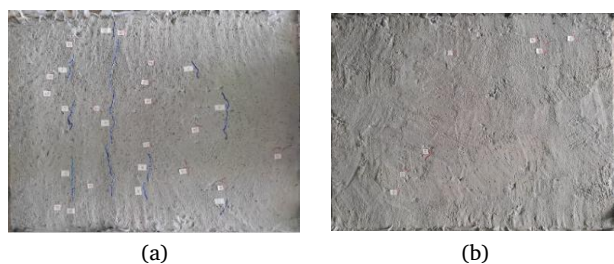
Hình 18. Ảnh hưởng của loại SSA (a) và hàm lượng SSA (b) đến co ngót khô [83][89].

Roy và cs. [83] đánh giá co ngót khô của PCC thường và PCC sử dụng cốt liệu SSA EAF dạng cầu và góc cạnh với các tỷ lệ 30 %, 50 % và 100 % trong 91 ngày. Kết quả (Hình 18a) chỉ ra SSA dạng cầu giúp giảm co ngót theo hàm lượng thay thế, với mức giảm lần lượt 6,5 %, 13,2 % và khoảng 38 % tại các tỷ lệ 30 %, 50 % và 100 %, đồng thời là giá trị thấp nhất trong các cấp phối. Ngược lại, SSA dạng góc cạnh cho co ngót tương đương bê tông thường khi tỷ lệ $\leq$ 50 %, nhưng tăng rõ rệt ở mức 100 %. Ở cùng tỷ lệ thay thế hoàn toàn, co ngót của bê tông SSA dạng cầu chỉ bằng khoảng một nửa so với SSA dạng góc cạnh. Xu hướng này chủ yếu do hàm lượng nước và xi măng thấp hơn trong hỗn hợp SSA dạng cầu, giảm tương ứng khoảng 20 % và 21 %, qua đó làm giảm co ngót khô.

Kumar [89] đánh giá co ngót khô của PCC khi thay thế cốt liệu thô bằng SSA BOF chưa và đã lão hóa ở các tỷ lệ 0–100 %. Kết quả (Hình 18b) cho thấy co ngót tăng theo hàm lượng SSA trong cả hai trường hợp, từ 254 μe ở mẫu đối chứng lên khoảng 423–430 μe khi thay thế hoàn toàn. Đồng thời, PCC sử dụng SSA đã lão hóa có co ngót cao hơn SSA chưa lão hóa, với mức chênh lệch lần lượt 11,5 %, 10,2 %, 7,3 % và 1,7 % tại các tỷ lệ 25 %, 50 %, 75 % và 100 %. Hiện tượng này chủ yếu do cấu trúc kém đặc chắc và bề mặt thô của xỉ BOF làm giảm khả năng kìm hãm co ngót; đồng thời, các sản phẩm lão hóa như $\text{Ca}(\text{OH})_2$ và CaCO_3 làm suy yếu vùng chuyển tiếp cốt liệu – hồ xi măng, từ đó làm tăng biến dạng co ngót. Ngoài ra, SSA chưa xử lý thì có thể làm trương nở hỗn hợp do có hàm lượng CaO và MgO, hạn chế phần nào co ngót.

Phường và cs. [82] đã thí nghiệm co ngót dẻo trên PCC đối chứng và PCC sử dụng 100 % SSA thô. Kết quả trên Hình 19 ghi nhận bê tông đối chứng xuất hiện 26 vết nứt, trong đó có 10 vết nứt xuyên, với chiều sâu vết nứt lớn nhất 35 mm, chiều dài vết nứt lớn nhất 430 mm, tổng chiều dài vết nứt 1122 mm và bề rộng lớn nhất khoảng 1 mm; trong khi đó, bê tông SSA chỉ ghi nhận 7 vết nứt bề mặt, với chiều sâu, chiều dài vết nứt lớn nhất, tổng chiều dài và bề rộng vết nứt lớn nhất lần lượt giảm xuống còn 0,7 mm, 45 mm, 180 mm và 0,7 mm. Kết quả này chứng tỏ rằng SSA có hiệu quả rõ rệt trong việc giảm co ngót dẻo, chủ yếu do làm tăng cường độ kéo uốn của bê tông, từ đó hạn chế sự hình thành và phát triển vết nứt ở giai đoạn sớm.

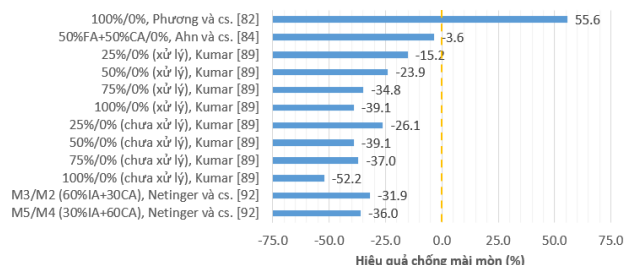
Ngoài ra, Netinger Grubeša và cs. [92] ghi nhận SSA giúp cải thiện khả năng chống mài mòn so với cốt liệu tự nhiên. Cốt liệu thô (8–16 mm) cũng cho hiệu quả tốt hơn cốt liệu vừa (4–8 mm, IA). Cấp phối thay thế 60 % cốt liệu thô và 30 % cốt liệu vừa giúp giảm 36,0 % độ mài mòn (từ 23,9 xuống 15,3 $\text{mm}^3/5000 \text{ mm}^2$), cao hơn so với phương án thay thế ngược lại chỉ đạt 31,9 % (từ 23,2 xuống 15,8 $\text{mm}^3/5000 \text{ mm}^2$). Sự cải thiện này chủ yếu do SSA có độ hao mòn Los Angeles thấp hơn, đồng thời vai trò chi phối của cốt liệu thô khiến việc thay thế cốt liệu thô mang lại hiệu quả rõ rệt hơn so với cốt liệu mịn.



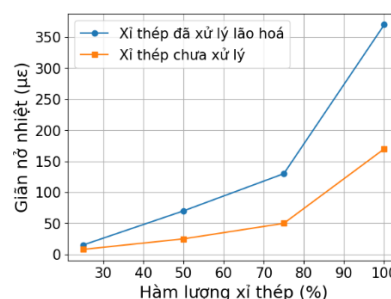
Hình 19. Nứt tuổi sớm do co ngót dẻo của PCC với 0 % (a) và 100 % (b) SSA [82].

Đánh giá khả năng chống mài mòn của PCC mặt đường (Hình 20), các nghiên cứu [82], [84], [89], [92] cho kết quả không đồng nhất. Phường và cs. [82] và Ahn và cs. [84] ghi nhận SSA không hoặc chỉ cải thiện hạn chế khả năng chống mài mòn, trong khi Kumar [89] ghi nhận SSA BOF giúp tăng đáng kể khả năng này. Cụ thể, SSA chưa lão hóa

giúp giảm độ mài mòn từ 0,46 mm xuống 0,22 mm (giảm 52,2 %), hiệu quả hơn so với SSA đã lão hóa (giảm còn 0,28 mm, tương ứng 39,1 %). Sự cải thiện này có thể do SSA chưa lão hóa không hình thành lớp CaCO_3 bề mặt, từ đó tăng cường liên kết ITZ và hạn chế bong bật.



Hình 20. Hiệu quả chống mài mòn của PCC SSA [82], [84], [89], [92].



Hình 21. Độ giãn nở nhiệt của PCC sử dụng cốt liệu SSA BOF [89].

Kumar [89] nhận thấy sự giãn nở nhiệt của PCC sử dụng SSA BOF (đã và chưa xử lý) tăng rõ rệt theo tỷ lệ thay thế (Hình 21). Đối với SSA chưa xử lý, độ giãn nở tăng từ 9 μe (25 %) lên 26 μe , 51 μe và 171 μe tương ứng với các mức 50 %, 75 % và 100 %, tức tăng lần lượt khoảng 189 %, 467 % và 1800 % so với mức 25 %. Tương tự, với SSA đã xử lý (lão hóa), giãn nở tăng từ 19 μe (25 %) lên 73 μe , 129 μe và 369 μe tại các mức 50 %, 75 % và 100 %, tương ứng tăng 284 %, 579 % và 1842 %. So sánh giữa hai loại SSA chứng tỏ rằng tại cùng tỷ lệ thay thế, bê tông sử dụng SSA đã xử lý luôn có độ giãn nở lớn hơn SSA chưa xử lý, cụ thể cao hơn khoảng 111 % (25 %), 181 % (50 %), 153 % (75 %) và 116 % (100 %). Nghiên cứu này còn cho thấy, mặc dù quá trình lão hóa làm giảm hàm lượng CaO tự do từ 6,25 % xuống 4,47 % và độ trương nở của cốt liệu từ 1,97 % xuống 1,53 %, giãn nở nhiệt của PCC không giảm tương ứng. Điều này phản ánh rằng giãn nở nhiệt không phụ thuộc trực tiếp vào tổng hàm lượng CaO tự do. Nguyên nhân là do CaO tự do vẫn tồn tại cục bộ trong hạt SSA; khi tiếp tục thủy hoá, các vị trí này gây giãn nở cục bộ và tích tụ ứng suất. Do đó, mức độ giãn nở phụ thuộc không chỉ vào hàm lượng mà còn vào trạng thái và phân bố của các pha trương nở trong cốt liệu.

Mặc dù SSA đã được nghiên cứu khá toàn diện trong PCC, một số khác biệt giữa các kết quả công bố vẫn tồn tại do sự khác nhau về loại SSA, cỡ hạt, hình thức và tỷ lệ thay thế. Do đó, cần tiếp tục đánh giá ứng xử dài hạn, độ bền, rò rỉ kim loại nặng cũng như thi công thí điểm để đánh giá khả năng làm việc thực tế của PCC sử dụng SSA.

6. Kết luận và các định hướng nghiên cứu để tăng khả năng ứng dụng SSA

6.1. Kết luận

Trên cơ sở tổng hợp và phân tích các kết quả nghiên cứu đã công bố về sử dụng SSA trong vật liệu xi măng mặt đường, có thể rút ra các kết luận chính sau:

(1) SSA là phế thải của ngành luyện thép, có thành phần hóa học chủ yếu gồm CaO , SiO_2 , Al_2O_3 và các oxit sắt. Hàm lượng CaO dao động khoảng 36,53–50,7 % đối với xỉ BOF và 19,4–55,21 % đối với xỉ EAF, trong khi SiO_2 đạt 6,53–36,1 %. Trong đó, hàm lượng f-CaO khoảng 2–10 % đối với xỉ BOF và 0,5–2 % đối với xỉ EAF là yếu tố quyết định đến độ ổn định thể tích do quá trình thủy hóa tạo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ làm tăng thể tích pha rắn khoảng 97,92 %, gây trương nở và phát sinh vi nứt. Vì vậy, cần kiểm soát hàm lượng f-CaO xuống dưới khoảng 1 % trước khi sử dụng trong vật liệu xi măng. Bên cạnh đó, SSA có khối lượng riêng lớn (2,80–3,44 g/cm^3), độ hút nước tương đối cao (1,5–10 %) và độ hao mòn va đập thấp (10,8–18 %), cho thấy tiềm năng sử dụng làm cốt liệu trong các vật liệu xi măng mặt đường.

(2) SSA có thể được sử dụng trong các vật liệu xi măng mặt đường như CTBA, CLSM, RCC và PCC với tỷ lệ thay thế cốt liệu từ 5–100 %, trong đó nhiều nghiên cứu ghi nhận hiệu quả tốt ở mức 30–50 %. Tính chất của vật liệu phụ thuộc đáng kể vào loại SSA, kích thước hạt và tỷ lệ thay thế. Nhìn chung, xỉ EAF cho hiệu quả cải thiện cường độ tốt hơn xỉ BOF (20,5 % so với 5,7 %), trong khi sử dụng SSA làm cốt liệu thô có xu hướng tăng cường độ khoảng 5,9 %, còn thay thế cốt liệu mịn có thể làm giảm tới 25,2 %. Tuy nhiên, khi hàm lượng SSA quá cao, cường độ thường có xu hướng giảm.

(3) Đối với CTBA, sử dụng SSA với tỉ lệ phù hợp giúp cải thiện đáng kể tính chất cơ học và ổn định thể tích, với cường độ chịu nén tăng 22,7–45,9 %, cường độ kéo uốn tăng 71,4–98,7 %, mô đun đàn hồi tăng 56,9–62,5 % và co ngót giảm 12,9–49,7 %. Đối với CLSM, ảnh hưởng của SSA phụ thuộc đáng kể vào loại xỉ và tỷ lệ thay thế. Ở mức thay thế 10 %, cường độ chịu nén có thể tăng tới 64,7 %, trong khi ở mức 50 % thường giảm 21,1–62,0 %. Tính công tác và thời gian ninh kết phụ thuộc mạnh vào khối lượng thể tích của SSA; SSA nặng làm giảm độ sụt 25,9 %, độ chảy xèo 9,7 % và rút ngắn thời gian ninh kết từ 273 xuống 205 phút, trong khi SSA nhẹ làm tăng độ chảy xèo tới 40,0 % và kéo dài thời gian ninh kết từ 273 lên 340 phút.

(4) Đối với RCC, SSA giúp tăng khả năng chống mài mòn 21–40 % nhưng làm tăng độ hút nước từ 4,30 % lên 5,40 % và độ giãn nở từ 0,13 % lên 0,19–0,40 %, cho thấy nguy cơ giảm ổn định thể tích khi hàm lượng SSA lớn. Đối với PCC, tỷ lệ thay thế dưới 50 % cho hiệu quả tốt với mức tăng cường độ trung bình 8,94 %, SSA mịn có xu hướng cải thiện cường độ kéo uốn và khả năng kháng nứt với mức tăng trung bình 55,86 %, trong khi các trường hợp suy giảm là không đáng kể.

(5) Kết quả nghiên cứu trong nước cho thấy SSA có tiềm năng ứng dụng trong vật liệu mặt đường. Đối với CTBA, SSA giúp tăng cường độ chịu nén khoảng 19,6 % và cho mô đun đàn hồi cao hơn cốt liệu tự nhiên. Cường độ chịu nén của RCC sử dụng SSA có thể giảm tới 24,4 %,

nhưng độ mài mòn cải thiện từ 22,7 mm xuống 21,2 mm. Ngoài ra, SSA giúp giảm đáng kể co ngót dẻo của PCC. Nhìn chung, các kết quả này phù hợp với xu hướng nghiên cứu quốc tế đối với CTBA và PCC, trong khi đối với RCC cần có thêm nghiên cứu và hiện chưa có nghiên cứu sử dụng SSA trong CLSM. Do đó, cần mở rộng nghiên cứu về RCC và CLSM, đặc biệt về vi cấu trúc, độ bền và tác động môi trường của vật liệu xi măng mặt đường chứa SSA.

6.2. Các vấn đề liên quan và định hướng nghiên cứu

SSA đã chứng minh có tiềm năng ứng dụng làm vật liệu mặt đường, tuy nhiên vẫn còn nhiều vấn đề liên quan đến kiểm soát chất lượng nguồn SSA, ổn định thể tích dài hạn, tác động môi trường và tiêu chuẩn hóa ứng dụng thực tế. Đồng thời, cơ sở thiết kế cấp phối, đánh giá tính năng kỹ thuật của vật liệu xi măng xi thép và triển khai thực địa vẫn cần được tiếp tục làm rõ. Một số thách thức và định hướng nghiên cứu chính được đề xuất như sau:

(1) Hiện có rất nhiều loại xỉ thép khác nhau đã được nghiên cứu và sử dụng với các hình thức và tỷ lệ thay thế khác biệt, có các ảnh hưởng rất khác nhau đến các tính chất của vật liệu xi măng xi thép. Do đó cần có nghiên cứu phân tích một cách hệ thống nhằm làm rõ ảnh hưởng của SSA, bao gồm loại SSA, cỡ hạt, hình thức và tỷ lệ thay thế, cũng như xây dựng mô hình dự báo mức độ ảnh hưởng của các thông số thiết kế này đến cường độ, đặc biệt là cường độ chịu nén, thông số thiết kế cơ bản của vật liệu xi măng. Kết quả phân tích này giúp định hướng rõ việc thiết kế và sử dụng SSA cho các vật liệu xi măng xi thép khác nhau trong xây dựng mặt đường.

(2) Hàm lượng CaO và MgO tự do (f-CaO, f-MgO) trong SSA là một vấn đề lớn, ảnh hưởng lớn đến tính ổn định thể tích của vật liệu xi măng xi thép. Hiện có rất nhiều nghiên cứu liên quan về việc xử lý xỉ thép, tuy nhiên chưa có một nghiên cứu tổng quan thực sự về quy trình thực hiện, cơ chế lý hóa học, ưu nhược điểm, hiệu quả xử lý, cũng như phát thải CO_2 giữa các hình thức xử lý,... để có sự cân nhắc lựa chọn xử lý phù hợp cho từng loại SSA. Ngoài ra, cần đánh giá mức độ trương nở của từng loại xỉ thép cụ thể và kiểm tra mức độ phù hợp trước khi sử dụng làm cốt liệu cho vật liệu xi măng mặt đường.

(3) SSA đã được nghiên cứu sử dụng trong vật liệu xi măng mặt đường, phổ biến nhất là sử dụng trong lớp móng gia cố xi măng và bê tông mặt đường. Vật liệu cường độ thấp có kiểm soát (CLSM) là vật liệu móng đường không cần lu lèn và thời gian bảo dưỡng lâu, rất thích hợp trong các điều kiện bị tác động của các lu lèn như rung chấn, bụi bẩn, thoát nước, ảnh hưởng đến giao thông khi công trình đang khai thác... Tuy nhiên, việc áp dụng vật liệu này làm tầng móng này còn khá hạn chế ở nước ta, chủ yếu làm vật liệu san lấp. Do đó cần nghiên cứu áp dụng CLSM có sử dụng xỉ thép trong móng đường. Hiện việc sử dụng SSA cho CLSM chủ yếu cho vật liệu san lấp có độ chảy cao, dẫn đến độ co ngót và dẫn nhiệt lớn. Trong khi đó, đối vật liệu khô hơn như CTBA và RCC hoặc thậm chí PCC mặt đường, việc sử dụng SSA cải thiện đáng kể các tính chất này. Do đó cần nghiên cứu sử dụng SSA trong CLSM sử dụng có móng đường có độ sụt phù hợp theo yêu cầu 4–6 cm của bê

tổng xi măng mặt đường để xem xét ảnh hưởng của SSA đến các đặc tính vật liệu này, phù hợp làm tầng móng mặt đường nói chung và mặt đường bê tông nhựa nói riêng.

(4) Khi sử dụng SSA trong vật liệu xi măng mặt đường thì cần đánh giá đầy đủ các tính chất liên quan, thường bao gồm cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi (chỉ tiêu cơ bản quy định trong các tiêu chuẩn thiết kế, thi công và nghiệm thu), và đặc biệt cần mở rộng đánh giá thêm các đặc tính chuyên sâu như co ngót, giãn nở nhiệt, kháng nứt, thấm, mài mòn,..., tùy theo vật liệu tầng móng hay mặt đường để đảm bảo kết cấu mặt đường bền vững. Ngoài ra cần phân tích rõ vi cấu trúc, hóa học để giải thích sự thay đổi các đặc trưng cơ học và độ bền, đồng thời đánh giá vấn đề rò rỉ kim loại nặng, đặc biệt khi vật liệu bị vi nứt dưới tác dụng của nhiệt độ hay tải trọng xe chạy.

(5) Đa số các nghiên cứu chỉ thực hiện đánh giá các tính chất vật liệu xi măng xi thép trong phạm vi phòng thí nghiệm. Do đó, triển khai thi công thí điểm hiện trường là cũng cần được thực hiện để đánh giá ứng xử thực tế của vật liệu xi măng mặt đường có sử dụng xi thép, đặc biệt về co ngót, kháng nứt và ảnh hưởng lên tầng móng trong trường hợp vật liệu xi măng xi thép làm tầng móng (nếu có).

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2023-DN02-18.

Tài liệu tham khảo

- [1]. A. M. Rashad, "Behavior of steel slag aggregate in mortar and concrete - A comprehensive overview," *J Build Eng*, vol. 53, p. 104536, Aug. 2022.
- [2]. World Steel Association, "World Steel in Figures," 2025.
- [3]. International Energy Agency, "Iron & steel," 2025.
- [4]. J. Liu, J. Xu, Q. Liu, S. Wang, and B. Yu, "Steel Slag for Roadway Construction: A Review of Material Characteristics and Application Mechanisms," *J Mater Civ Eng*, vol. 34, no. 6, pp. 1–18, Jun. 2022.
- [5]. L. J. Huang, H. Y. Wang, and C. T. Wei, "Engineering properties of controlled low strength desulfurization slags (CLSLS)," *Constr Build Mater*, vol. 115, pp. 6–12, 2016.
- [6]. A. K. Saha and P. K. Sarker, "Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study," *J Clean Prod*, vol. 162, pp. 438–448, 2017.
- [7]. G. Adegooye, A. L. Beaucoeur, S. Ortola, and A. Noumowé, "Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability," *Construction and Building Materials*, vol. 76, pp. 313–321, 2015.
- [8]. M. H. Lai, J. Zou, B. Yao, J. C. M. Ho, X. Zhuang, and Q. Wang, "Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate," *Constr Build Mater*, vol. 277, pp. 1–11, 2021.
- [9]. G. Elgendy, A. Elagamy, M. Sherif, and S. EL-Badawy, "Laboratory Evaluation of Green Concrete Mixes Containing High Percentages of Steel Slag Coarse Aggregate," *Bull Fac Eng Mansoura Univ*, vol. 40, no. 1, pp. 29–37, 2020.
- [10]. Y. K. Sabapathy, V. B. Balasubramanian, N. Shiva Shankari, A. Yeshwant Kumar, and D. Ravichandar, "Experimental investigation of surface modified EOF steel slag as coarse aggregate in concrete," *J King Saud Univ - Eng Sci*, vol. 29, no. 4, pp. 388–393, 2017.
- [11]. I. Yüksel, T. Bilir, and Ö. Özkan, "Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate," *Building and Environment*, vol. 42, no. 7, pp. 2651–2659, 2007.
- [12]. Z. H. Ali and N. N. Khalid, "Applicability of Induction Furnace Steel Slag in RC Columns Subjected to Axial and Uniaxial Loading," *Civ Environ Eng*, vol. 19, no. 1, pp. 108–118, 2023.
- [13]. K. K. Sideris, C. Tassos, A. Chatzopoulos, and P. Manita, "Mechanical characteristics and durability of self compacting concretes produced with ladle furnace slag," *Constr Build Mater*, vol. 170, pp. 660–667, 2018.
- [14]. S.-Y. Pan, R. Adhikari, Y.-H. Chen, P. Li, and P.-C. Chiang, "Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation," *J Clean Prod*, vol. 137, pp. 617–631, Nov. 2016.
- [15]. A. S. Brand and J. R. Roesler, "Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties," *Cem Concr Compos*, vol. 60, pp. 1–9, 2015.
- [16]. Z. Ren and D. Li, "Application of Steel Slag as an Aggregate in Concrete Production: A Review," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 17, p. 5841, Aug. 2023.
- [17]. G. Wang, Y. Wang, and Z. Gao, "Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria," *J Hazard Mater*, vol. 184, no. 1–3, pp. 555–560, 2010.
- [18]. J. E. S. L. Teixeira, A. G. Schumacher, P. M. Pires, V. T. F. Castelo Branco, and H. B. Martins, "Expansion Level of Steel Slag Aggregate Effects on Both Material Properties and Asphalt Mixture Performance," *Transp Res Rec*, vol. 2673, no. 3, pp. 506–515, 2019.
- [19]. H. Rooholamini, R. Sedghi, B. Ghobadipour, and M. Adresi, "Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete," *Constr Build Mater*, vol. 211, pp. 88–98, 2019.
- [20]. A. Masilamani, M. Ramalingam, P. Kathirvel, G. Murali, and N. I. Vatin, "Mechanical, Physico-Chemical and Morphological Characterization of Energy Optimised Furnace (EOF) Steel Slag as Coarse Aggregate in Concrete," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 9, p. 3079, Apr. 2022.
- [21]. S. I. Ahmad and M. S. Rahman, "Mechanical and Durability Properties of Induction-Furnace-Slag-Incorporated Recycled Aggregate Concrete," *Adv Civ Eng*, vol. 2018, no. 1, pp. 34–44, Jan. 2018.
- [22]. I. Papayianni and E. Anastasiou, "Utilization of Electric Arc Furnace Steel Slags in Concrete Products," *6th Eur Slag Conf*, no. October, pp. 20–22, 2014.
- [23]. R. Alizadeh, M. Chini, P. Ghods, M. Hoseini, S. Montazer, and M. Shekarchi, "Utilization of Electric Arc Furnace Slag as Aggregates in Concrete -- Environmental Issue," in *International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, 2015, no. January 2003.
- [24]. J. T. San-José, I. Vegas, I. Arribas, and I. Marcos, "The performance of steel-making slag concretes in the hardened state," *Mater Des*, vol. 60, pp. 612–619, 2014.
- [25]. J. Lizarazo-Marriaga, P. Claisse, and E. Ganjian, "Effect of Steel Slag and Portland Cement in the Rate of Hydration and Strength of Blast Furnace Slag Pastes," *J Mater Civ Eng*, vol. 23, no. 2, pp. 153–160, 2011.
- [26]. M. Maslehuddin, A. M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, and M. S. Barry, "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes," *Constr Build Mater*, vol. 17, no. 2, pp. 105–112, 2003.
- [27]. R. Manjunath and M. C. Narasimhan, "An experimental investigation on self-compacting alkali activated slag concrete mixes," *J Build Eng*, vol. 17, no. October 2017, pp. 1–12, May 2018.
- [28]. J. Zelić, "Properties of concrete pavements prepared with ferrochromium slag as concrete aggregate," *Cem Concr Res*, vol. 35, no. 12, pp. 2340–2349, 2005.
- [29]. H. Y. Moon, J. H. Yoo, and S. S. Kim, "A fundamental study on the steel slag aggregate for concrete," *Geosystem Eng*, vol. 5, no. 2, pp. 38–45, 2002.

- [30]. C. Shi, "Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production," *Cem Concr Res*, vol. 32, no. 3, pp. 459–462, 2002.
- [31]. I. Yildirim and M. Prezzi, "Use of Steel Slag in Subgrade Applications," *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2011.
- [32]. J. Ma, G. Dai, F. Jiang, N. Wang, Y. Zhao, and X. Wang, "Effect of Carbonation Treatment on the Properties of Steel Slag Aggregate," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 17, p. 5768, Aug. 2023.
- [33]. X. Wang et al., "Steam Efficiently Enhancing CO₂ Direct Mineralization Steel Slag Towards Actual Production: Phase Evolution, Microstructure, and Mechanisms," *Materials (Basel)*, vol. 18, no. 20, p. 4786, Oct. 2025.
- [34]. A. C. Rodrigues Guimarães, K. Ávila Costa, M. de Miranda Reis, C. S. Alves Santana, and C. Dias Castro, "Study of controlled leaching process of steel slag in soxhlet extractor aiming employment in pavements," *Transp Geotech*, vol. 27, no. November 2020, 2021.
- [35]. P. Gao, J. Wang, J. Cui, Y. Yuan, and Y. Song, "Experimental Study on the Effects of Carbonated Steel Slag Fine Aggregate on the Expansion Rate, Mechanical Properties and Carbonation Depth of Mortar," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 13, p. 3279, Jul. 2024.
- [36]. Y. Zhang et al., "Volume expansion of steel slag cement mortar and synergistic effects of f-CaO content, particle size, and curing temperature," *Constr Build Mater*, vol. 522, no. March, p. 146161, May 2026.
- [37]. N. M. Piatak, M. B. Parsons, and R. R. Seal, "Characteristics and environmental aspects of slag: A review," *Appl Geochemistry*, vol. 57, pp. 236–266, Jun. 2015.
- [38]. Bộ Khoa học và Công nghệ, "QCVN 03:2023/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng đất," Hà Nội, Việt Nam, 2023.
- [39]. R. V. M. Toffolo, T. K. Moro, D. H. Santos, L. C. B. Costa, J. C. Mendes, and R. A. F. Peixoto, "Roller-Compacted Concrete Pavements Produced Entirely with Steelmaking Slag Aggregates," *ACI Mater J*, no. 118, 2021.
- [40]. Q. Y. Chen, M. Tyrer, C. D. Hills, X. M. Yang, and P. Carey, "Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review," *Waste Manag*, vol. 29, no. 1, pp. 390–403, 2009.
- [41]. X. Zhu, T. Wang, Z. Yi, Z. Yu, K. Luo, and X. Gao, "Enhanced heavy metal immobilization in cementitious materials through CO₂ mineralization: A kinetic analysis and physicochemical evolution," *Constr Build Mater*, vol. 457, no. October, p. 139363, 2024.
- [42]. C. Shi, "Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties," *J Mater Civ Eng*, vol. 16, no. 3, pp. 230–236, 2004.
- [43]. S. Kourounis, S. Tsivilis, P. E. Tsakiridis, G. D. Papadimitriou, and Z. Tsibouki, "Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag," *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 6, pp. 815–822, 2007.
- [44]. T. Cheng and K. Yan, "Mechanics properties of the lime-steel slag stabilized soil for pavement structures," *Adv Mater Res*, vol. 168–170, pp. 931–935, 2011.
- [45]. M. Zhou, X. Cheng, and X. Chen, "Studies on the volumetric stability and mechanical properties of cement-fly-ash-stabilized steel slag," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 3, pp. 1–16, 2021.
- [46]. J. T. Kolawole, A. J. Babafemi, S. C. Paul, and A. du Plessis, "Performance of concrete containing Nigerian electric arc furnace steel slag aggregate towards sustainable production," *Sustain Mater Technol*, vol. 25, p. e00174, Sep. 2020.
- [47]. İ. Gökalp, V. E. Uz, M. Saltan, and E. Tutumluer, "Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications," *Transp Geotech*, vol. 14, pp. 61–69, 2018.
- [48]. M. Papachristoforou, E. K. Anastasiou, and I. Papayianni, "Durability of steel fiber reinforced concrete with coarse steel slag aggregates including performance at elevated temperatures," *Constr Build Mater*, vol. 262, p. 120569, 2020.
- [49]. F. Faleschini, M. Alejandro Fernández-Ruiz, M. A. Zanini, K. Brunelli, C. Pellegrino, and E. Hernández-Montes, "High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties," *Constr Build Mater*, vol. 101, pp. 113–121, Dec. 2015.
- [50]. X. Zhang, S. Zhao, Z. Liu, and F. Wang, "Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness," *Constr Build Mater*, vol. 214, pp. 28–36, 2019.
- [51]. M. Skaf, J. M. Manso, Á. Aragón, J. A. Fuente-Alonso, and V. Ortega-López, "EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 120, Elsevier B.V., pp. 176–185, 2017.
- [52]. S. I. Adedokun, M. A. Anifowose, and S. O. Odeyemi, "Assessment of Steel Slag as Replacement for Coarse Aggregate in Concrete: A review," *ACTA Tech CORVINIENSIS – Bull Eng*, vol. 11, no. 4, pp. 139–146, 2018.
- [53]. C. Kambole, P. Paige-Green, W. K. Kupolati, J. M. Ndambuki, and A. O. Adeboje, "Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa," *Constr Build Mater*, vol. 148, pp. 618–631, 2017.
- [54]. O. Gencil, O. Karadag, O. H. Oren, and T. Bilir, "Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review," *Constr Build Mater*, vol. 283, p. 122783, 2021.
- [55]. Y. Jiang, T. C. Ling, C. Shi, and S. Y. Pan, "Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review," *Resour Conserv Recycl*, vol. 136, no. April, pp. 187–197, 2018.
- [56]. H. Yi, G. Xu, H. Cheng, J. Wang, Y. Wan, and H. Chen, "An Overview of Utilization of Steel Slag," *Procedia Environ Sci*, vol. 16, pp. 791–801, 2012.
- [57]. D. T. Dang, M. T. Nguyen, T. P. Nguyen, T. Isawa, Y. Ta, and R. Sato, "Mechanical properties of steel slag replaced mineral aggregate for road base/sub-base application based Vietnam and Japan standard," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 29, no. 28, pp. 42067–42073, 2022.
- [58]. M. N. T. Lam, S. Jaritngam, and D. H. Le, "Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties," *Constr Build Mater*, vol. 154, pp. 482–495, 2017.
- [59]. M. N. T. Lam, D. H. Le, and S. Jaritngam, "Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash," *Constr Build Mater*, vol. 191, pp. 912–922, 2018.
- [60]. P. Vu Hong Son, N. Van Nam, N. P. Tran, L. Le-Hoai, and T. D. Ngo, "Steel slag aggregate low-cement concrete: Engineering performance, microstructure and sustainability," *Constr Build Mater*, vol. 436, no. March, p. 136827, 2024.
- [61]. Nguyễn Thị Thúy Hằng; Mai Hồng Hà; Trần Văn Tiểng, "Nghiên cứu sử dụng xỉ thép-cát mịn gia cố xi măng làm lớp móng đường ô tô," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng NUCE*, vol. 13, no. 5V, pp. 93–101, 2019.
- [62]. P. N. Phương, T. T. T. Thảo, and T. T. Tuyền, "Ảnh hưởng của xỉ thép đến các tính chất cơ lý và nhiệt lý của cấp phối đá dăm gia cố xi măng," *Tạp chí khoa học và công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol. 22, no. 1, pp. 1–6, 2024.
- [63]. I. Barišić, S. Dimter, and T. Rukavina, "Elastic properties of cement-stabilised mixes with steel slag," *Int J Pavement Eng*, vol. 17, no. 9, pp. 753–762, 2015.
- [64]. Y. Huang, X. Yang, S. Wang, Z. Liu, L. Liu, and B. Xu, "Evaluating Cement Treated Aggregate Base Containing Steel Slag: Mechanical Properties, Volume Stability and Environmental Impacts," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 23, pp. 1–17, 2022.
- [65]. J. Liu, B. Yu, and Q. Wang, "Application of steel slag in cement treated aggregate base course," *J Clean Prod*, vol. 269, p. 121733, 2020.
- [66]. Q. Li, B. Li, X. Li, Z. He, and P. Zhang, "Microstructure of pretreated steel slag and its influence on mechanical properties of cement stabilized mixture," *Constr Build Mater*, vol. 317, no. June 2021, 2022.
- [67]. W. Li, L. Lang, Z. Lin, Z. Wang, and F. Zhang, "Characteristics of dry

- shrinkage and temperature shrinkage of cement-stabilized steel slag,” *Constr Build Mater*, vol. 134, pp. 540–548, 2017.
- [68]. P. C. Song, G. X. Chen, and Y. J. Chen, “Optimizing the Utilization of Steel Slag in Cement-Stabilized Base Layers: Insights from Freeze–Thaw and Fatigue Testing,” *Materials* (Basel), vol. 17, no. 11, 2024.
- [69]. S. Wang et al., “Study on the macro and micro mechanical properties of cement-stabilized steel slag modified for road base aggregate applications,” *Constr Build Mater*, vol. 491, no. June, p. 142741, 2025.
- [70]. T. C. Ling, S. K. Kaliyavaradhan, and C. S. Poon, “Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling – An overview,” *Constr Build Mater*, vol. 158, pp. 535–548, 2018.
- [71]. D.-F. Lin, H.-L. Luo, H.-Y. Wang, and M.-J. Hung, “Successful Application of CLSM on a Weak Pavement Base/Subgrade for Heavy Truck Traffic,” *J Perform Constr Facil*, vol. 21, no. 1, pp. 70–77, 2007.
- [72]. ACI, “ACI PRC-229R-13(22) Report on Controlled Low-Strength Materials (Reapproved 2022),” 2022.
- [73]. M. Ibrahim, M. K. Rahman, S. K. Najamuddin, Z. S. Alhelal, and C. E. Acero, “A review on utilization of industrial by-products in the production of controlled low strength materials and factors influencing the properties,” *Constr Build Mater*, vol. 325, no. February, p. 126704, 2022.
- [74]. H. Y. Wang and K. W. Chen, “A study of the engineering properties of CLSM with a new type of slag,” *Constr Build Mater*, vol. 102, pp. 422–427, 2016.
- [75]. C. C. Hung, C. C. Wang, and H. Y. Wang, “Establishment of the controlled low-strength desulfurization slag prediction model for compressive strength and surface resistivity,” *Appl Sci*, vol. 10, no. 16, 2020.
- [76]. G. K. Young-sang Kim, Ba Huu Dinh, Tan Manh Do, “Development of thermally enhanced controlled low-strength material incorporating different types of steel-making slag for ground-source heat pump system,” *Renew Energy*, vol. 150, pp. 116–127, 2020.
- [77]. M. N. T. Lam, S. Jaritngam, and D. H. Le, “EAF slag aggregate in roller-compacted concrete pavement: Effects of delay in compaction,” *Sustain*, vol. 10, no. 4, pp. 1–14, 2018.
- [78]. A. Goli, H. Emadi, and P. Sadeghi, “Investigating the effect of using steel slag on abrasion resistance of roller - compacted concrete pavement,” *Innov Infrastruct Solut*, no. June, 2023.
- [79]. D. Nasr and E. Bavafa, “Electrically Conductive Roller-Compacted Concrete (RCC) Containing BOFS, Steel Fiber, and Steel Shaving,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2023, 2023.
- [80]. V. V. Butle, D. S. Reddy, and V. Srinivasan, “Evaluation of EAF steel slag as aggregate replacement in LCC-based roller-compacted concrete pavements,” *Constr Build Mater*, vol. 510, no. December 2025, p. 145244, Feb. 2026.
- [81]. H. Qasrawi, F. Shalabi, and I. Asi, “Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 2, pp. 1118–1125, 2009.
- [82]. P. N. Phương, N. T. Cường, Đ. N. H. Đắc, N. V. P. Hào, and L. Đ. Châu, “Cường độ, khả năng kháng nứt do co ngót dẻo và tính thấm nước của bê tông xi măng mặt đường sử dụng cốt liệu xi thép và cao su,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, vol. 17, 2023.
- [83]. S. Roy, T. Miura, H. Nakamura, and Y. Yamamoto, “Investigation on applicability of spherical shaped EAF slag fine aggregate in pavement concrete – Fundamental and durability properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 555–568, 2018.
- [84]. B. H. Ahn, S. J. Lee, and C. G. Park, “Chloride ion diffusion and durability characteristics of rural-road concrete pavement of south korea using air-cooled slag aggregates,” *Appl Sci*, vol. 11, no. 17, 2021.
- [85]. B. Ahn, S. Lee, and C. Park, “Physical and Mechanical Properties of Rural-Road Pavement Concrete in South Korea Containing Air-Cooled Blast-Furnace Slag Aggregates,” *Appl Sci*, vol. 11, no. 12, p. 5645, Jun. 2021.
- [86]. R. T. Abd El-Hakim, G. M. Elgendy, S. M. El-Badawy, and M. Amin, “Performance evaluation of steel slag high performance concrete for sustainable pavements,” *Int J Pavement Eng*, vol. 23, no. 11, pp. 3819–3837, 2022.
- [87]. M. Murmu, N. Ranjan Mohanta, and N. Bapure, “Study on the fresh and hardened properties of concrete with steel slag as partial replacement for natural aggregates,” *Materials Today: Proceedings*. 2023.
- [88]. J. A. Fuente-Alonso, V. Ortega-López, M. Skaf, Á. Aragón, and J. T. San-José, “Performance of fiber-reinforced EAF slag concrete for use in pavements,” *Constr Build Mater*, vol. 149, pp. 629–638, Sep. 2017.
- [89]. B. Kumar, “Utilisation of aged and unaged basic oxygen furnace steel slag aggregates in pavement quality concrete,” *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 1. 2023.
- [90]. L. M. Nicula, O. Corbu, I. Ardelean, A. V. Sandu, M. Iliescu, and D. Simedru, “Freeze–thaw effect on road concrete containing blast furnace slag: Nmr relaxometry investigations,” *Materials*, vol. 14, no. 12. 2021.
- [91]. K. P. Verian, P. Panchmatia, J. Olek, and T. Nantung, “Pavement concrete with air-cooled blast furnace slag and dolomite as coarse aggregates: Effects of deicers and freeze-thaw cycles,” *Transp Res Rec*, vol. 2508, no. 8, pp. 55–64, 2015.
- [92]. I. Netinger Grubeša, I. Barišić, T. Keser, and M. Vračević, “Wearing characteristics assessment of pervious concrete pavements,” *Road Mater Pavement Des*, vol. 20, no. 3, pp. 727–739, 2019.