

Thiết kế cấp phối bê tông cường độ cao sử dụng cốt liệu xỉ thép

Design of high-strength concrete mix using steel slag as coarse aggregate

> TS NGUYỄN THỊ THÚY HẰNG¹; TS MAI HỒNG HÀ²

¹ GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM
Email: hangntt@hcmute.edu.vn; Điện thoại: 0989036730

² GV Viện Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải TP.HCM

TÓM TẮT

Bê tông cường độ cao có cường độ chịu nén từ 60-80MPa, vượt trội so với bê tông thường. Bài báo này trình bày một số kết quả cho thấy khả năng ứng dụng của xỉ thép làm cốt liệu lớn trong bê tông cường độ cao (BTCDCXT). Các chỉ tiêu cơ lý của BTCDCXT được khảo sát trong nghiên cứu bao gồm: cường độ chịu nén ở các ngày tuổi khác nhau (từ 3-365 ngày), mô-đun đàn hồi và hệ số Poisson và độ mài mòn của bê tông. Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng silica fume từ 6-12% thì cường độ chịu nén tăng, khi hàm lượng silica fume lớn hơn 12% thì cường độ chịu nén giảm. BTCDCXT cũng có mô-đun đàn hồi và độ mài mòn được cải thiện đáng kể.

Từ khóa: Bê tông cường độ cao, xỉ thép, độ mài mòn, cường độ nén, mô-đun đàn hồi, hệ số Poisson.

ABSTRACT

High-strength concrete has compressive strength between 60 and 80 MPa higher than normal concrete. This study presents some results that show us steel slag can use as coarse aggregate in high-strength concrete (BTCDCXT). The physical and mechanical properties of BTCDCXT investigated in the study include compressive strength at different ages (from 3-365 days), elastic modulus and Poisson coefficient, and abrasion of concrete. The results show that when increasing the silica fume content from 6-12%, the compressive strength increases, when the silica fume content is greater than 12%, the compressive strength decreases. BTCDCXT also has significantly improved elasticity and wear modulus.

Keywords: High strength concrete, steel slag, abrasion resistance, compressive strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio.

1. GIỚI THIỆU

Xỉ thép là sản phẩm sau khi tái chế từ nguồn xỉ thải của các nhà máy luyện thép bằng công nghệ lò điện hồ quang điện. Đã có nhiều nghiên cứu ở nước ngoài ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho bê tông [1-6]. M. Maslehuddin và các cộng sự [7] đã cho thấy cường độ nén của bê tông cốt liệu xỉ thép lớn hơn bê tông đối chứng có tỷ lệ cốt liệu lớn tương đương. Ioanna Papayianni và cộng sự [8] cũng đã có nghiên cứu công bố rằng các tính chất cơ lý và hóa học của xỉ thép phù hợp để làm cốt liệu cho bê tông. Jigar P. Patel [9] cho rằng các tính chất cơ học của bê tông xỉ thép gần như tương tự với bê tông truyền thống khi xỉ thép thay thế khoảng 50%-75%. Bên cạnh việc ứng dụng cho bê tông thường, xỉ thép còn được nghiên cứu ứng dụng cho bê tông cường độ cao [10-12]. Các nghiên cứu trong nước cũng khẳng định xỉ thép hoàn toàn có thể dùng làm cốt liệu lớn trong bê tông xi măng [13-16]. Để cải thiện các tính chất của cơ lý của bê tông, nghiên cứu này đã lựa chọn lại thành phần vật liệu để tạo ra BTCDCXT. Theo hướng dẫn của TCVN 10306:2014 [17], ngoài các thành phần chính của bê tông như cốt liệu lớn (xỉ thép), cốt liệu nhỏ (cát), chất kết dính (xi măng) và nước thì silica fume (SF) và phụ gia siêu dẻo (PG) là hai thành phần được bổ sung vào cấp phối. Các nội dung nghiên cứu được đề cập trong bài báo bao gồm:

- (a) Cường độ chịu nén; mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và thời gian, ảnh hưởng của hàm lượng SF đến cường độ chịu nén;
- (b) Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng ngang, biến dạng dọc trục, mô-đun đàn hồi và hệ số Poisson;
- (c) Độ mài mòn, quan hệ giữa độ mài mòn và cường độ chịu nén.

2. VẬT LIỆU VÀ THIẾT KẾ THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu thí nghiệm

2.1.1. Cốt liệu nhỏ

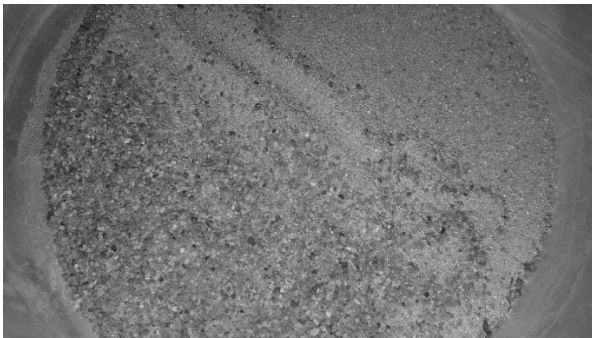
Cốt liệu nhỏ (cát) giữ vai trò quan trọng trong việc chế tạo bê tông cường độ cao. Cấp phối hạt và hình dạng của cốt liệu nhỏ ảnh hưởng đáng kể đến lượng nước yêu cầu nhào trộn và cường độ chịu nén của bê tông. Cốt liệu nhỏ dùng trong nghiên cứu này được lấy từ nhiều nguồn cát trên thị trường, sau khi sàng rửa được phối trộn để đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của cát dùng chế tạo bê tông cường độ cao theo tiêu chuẩn TCVN 10306:2014 (Hình 1). Các chỉ tiêu kỹ thuật của cát được thể hiện ở Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Các chỉ tiêu cơ lý của cát

Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thí nghiệm [18]	Đơn vị	Kết quả
Mô-đun độ lớn	TCVN 7572-2:2006		2.90
Khối lượng riêng	TCVN 7572-4:2006	g/cm ³	2.65
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	TCVN 7572-4:2006	g/cm ³	2.53
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa	TCVN 7572-4:2006	g/cm ³	2.59
Độ hút nước	TCVN 7572-4:2006	%	2.3
Khối lượng thể tích xốp	TCVN 7572-6:2006	kg/m ³	1691
Độ rỗng giữa các hạt	TCVN 7572-6:2006	%	33.2

Bảng 2. Thành phần hạt của cát

Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng sót tích lũy (%)
5	0.0
2.36	13.4
1.18	32.4
0.63	63.0
0.315	84.2
0.14	97.6
<0.14	100.0



Hình 1. Mẫu cát

2.1.2. Cốt liệu thô

Cốt liệu thô là thành phần chiếm thể tích lớn nhất trong bê tông, tính chất của cốt liệu thô ảnh hưởng rất lớn đến cường độ và các tính chất khác của bê tông cường độ cao. Trong nghiên cứu này, cốt liệu thô truyền thống là đá dăm được thay thế bằng xỉ thép (Hình 2), là sản phẩm sau khi được nghiền, khử từ tính từ nhà máy tái chế xỉ thép của công ty Trách nhiệm hữu hạn Vật Liệu Xanh. Các chỉ tiêu cơ lý của đá đã được trình bày trong Bảng 3 và Bảng 4.



Hình 2. Mẫu xỉ thép

Bảng 3: Các chỉ tiêu cơ lý của xỉ thép

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
Dmin-Dmax	mm	5-10
Khối lượng riêng	g/cm ³	3.56
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	g/cm ³	3.32
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa	g/cm ³	3.40
Độ hút nước	%	2.2
Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1858
Độ rỗng giữa các hạt	%	44.0
Độ nén đập trong xi lanh	%	13.91
Mác xỉ thép xác định theo giá trị độ nén đập trong xi lanh	MPa	80
Hệ số hóa mềm		0.94
Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	0.953
Độ hao mòn Los Angeles	%	21.36
Hàm lượng thoi dẹt	%	1.00
Tạp chất hữu cơ		Ngang màu chuẩn

Bảng 4. Thành phần hạt của xỉ thép

Kích thước mắt sàng (mm)	Lượng sót tích lũy (%)
100	0.0
70	0.0
40	0
20	1.2
10	8.4
5	100.0
<5	0.0

2.1.3. Chất kết dính**a. Xi măng**

Trong phạm vi nghiên cứu của đề tài, sử dụng xi măng PCB40 INSEE, các chỉ tiêu cơ lý của xi măng được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Các chỉ tiêu cơ lý của xi măng

Chỉ tiêu thí nghiệm	Phương pháp thí nghiệm	Kết quả
Cường độ chịu nén 28 ngày (MPa)	TCVN 6016:2011 [19]	45.5
Khối lượng riêng (g/cm ³)	TCVN 4030:2003 [20]	3.09
Độ mịn Blaine (cm ² /g)	TCVN 4030:2003 [20]	3900
Lượng nước tiêu chuẩn (%)	TCVN 6017:2015 [21]	32.5
Thời gian đông kết (phút)	TCVN 6017:2015 [21]	
+ Bắt đầu		115
+ Kết thúc		200

b. Silica fume

Silica fume (SF) là vật liệu pozzulan rất mịn (Hình 3), đường kính cỡ hạt trung bình $<1.5\mu\text{m}$, nhỏ hơn kích thước của hạt xi măng khoảng 100 lần. Thành phần chính của silica fume chủ yếu là SiO_2 vô định hình. Các tính chất cơ lý của silica fume được trình bày trong Bảng 6.



Hình 3. Mẫu silica fume

Bảng 6. Chỉ tiêu cơ lý của silica fume

Chỉ tiêu thí nghiệm	Kết quả	Yêu cầu theo tiêu chuẩn ASTM C1240-12
Hàm lượng SiO_2 (%)	92.4	Không nhỏ hơn 85
Độ ẩm (%)	0.5	Không lớn hơn 3
Lượng mất khi nung (%)	3.2	Không lớn hơn 6
Lượng lọt sàng 45 m (%)		Không lớn hơn
- lớn nhất	7.4	10
- sai khác so với giá trị trung bình	3.1	5
Bề mặt riêng, m^2/g	11.6	Không nhỏ hơn 15

2.1.4. Phụ gia siêu dẻo

Phụ gia siêu dẻo được sử dụng nhằm mục đích giảm lượng nước sử dụng để tạo ra cường độ nén cao hơn. Trong nghiên cứu này sử dụng phụ gia ADVA® Cast 5388V, một loại phụ gia giảm nước tẩm cao gốc Polymer.

2.2. Thiết kế thí nghiệm

2.2.1. Thiết kế cấp phối bê tông cường độ cao

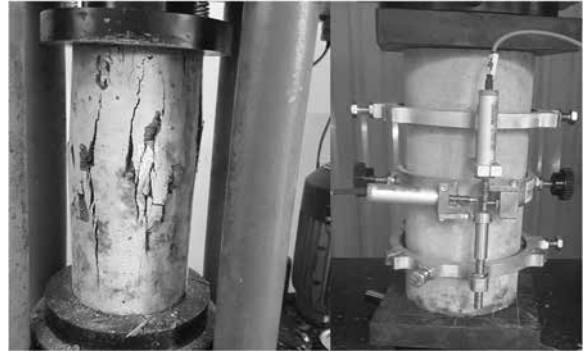
Thành phần cấp phối của BTCDCXT được lựa chọn theo tiêu chuẩn TCVN 10306:2014. Bảy loại cấp phối được đề cập trong nghiên cứu này đều sử dụng phụ gia siêu dẻo với tỷ lệ pha trộn là 1000ml/100kg xi măng; Tỷ lệ phần trăm về khối lượng của silica fume trong các cấp phối M0, M1, M2, M3, M4, M5, M6 so với khối lượng xi măng lần lượt là 0%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%. Tỷ lệ nước trên chất kết dính (tổng khối lượng của xi măng và silica fume) trong các cấp phối đều bằng 0.30. Vật liệu chế tạo BTCDCXT được trình bày ở Bảng 7.

Bảng 7. Thành phần vật liệu chế tạo bê tông

Ký hiệu	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Xi thép (kg)	Nước (lít)	SF (kg)	PG (ml)
M0	506	781.0	1205.0	150.0	0	5.1
M1	475.6	781.0	1205.0	150.0	30.4	5.1
M2	465.5	781.0	1205.0	150.0	40.5	5.1
M3	455.4	781.0	1205.0	150.0	50.6	5.1
M4	445.3	781.0	1205.0	150.0	60.7	5.1
M5	435.2	781.0	1205.0	150.0	70.8	5.1
M6	425.0	781.0	1205.0	150.0	81.0	5.1

2.2.2. Phương pháp thí nghiệm

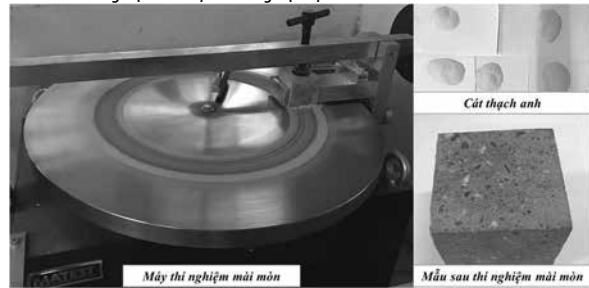
Tất cả các mẫu bê tông được chế tạo và bảo dưỡng theo TCVN 3105-1993 [22]. Các mẫu trụ có kích thước 150x300mm được dùng để xác định cường độ chịu nén theo TCVN 3118-1993 [23] ở các tuổi ngày khác nhau (Hình 4a). Mẫu M4 có kích thước 150x300mm được dùng để khảo sát mô-đun đàn hồi và hệ số Poisson theo tiêu chuẩn ASTM C469-14 [24] (Hình 4b). Mẫu M4 có kích thước 70.7x70.7x70.7mm cũng được dùng để xác định độ mài mòn theo TCVN 3114 :1993 [25] (Hình 5).



a. Cường độ chịu nén

b. Mô-đun đàn hồi

Hình 4. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén và mô-đun đàn hồi



Hình 5. Thí nghiệm xác định độ mài mòn

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cường độ chịu nén

Cường độ chịu nén (f'_c) ở tuổi 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270, 365 ngày được khảo sát với các mẫu M0, M1, M2, M3, M4, M5, M6 có thành phần cấp phối trong Bảng 7. Kết quả được tổng hợp ở Hình 10 và Bảng 8 cho thấy cường độ chịu nén (f'_c) của BTCDCXT bị ảnh hưởng đáng kể bởi lượng dùng SF và tuổi thí nghiệm.

Bảng 8. Cường độ chịu nén của ở các tuổi thí nghiệm khác nhau

Tuổi (ng)	Cường độ chịu nén (f'_c) (MPa)						
	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
3	34.6	47.6	50.9	54.1	55.7	51.6	48.3
7	36.0	51.1	55.9	63.7	65.4	56.2	54.3
28	49.4	61.8	68.6	73.3	77.2	71.5	69.1
56	60.7	79.2	85.9	88.9	94.8	87.1	83.1
90	64.9	85.2	92.3	94.5	101.4	93.4	89.9
180	68.2	89.5	96.9	99.3	106.5	98.1	94.4
270	70.9	93.1	100.8	103.2	110.7	102.0	98.2
365	73.0	95.9	103.8	106.3	114.1	105.1	101.1

3.1.1. Quan hệ giữa cường độ chịu nén và tuổi thí nghiệm của BTCDC

Hình 6 cho thấy BTCDCXT có f'_c phát triển theo thời gian. Ở tuổi 7 ngày tuổi, cường độ đạt khoảng 80% so với cường độ ở tuổi 28

ngày, sau 28 ngày cường độ vẫn tiếp tục phát triển, tốc độ phát triển ở tuổi 28-56 ngày tương tự ở tuổi 7-28 ngày. Cường độ ở tuổi 56 và 365 ngày tăng khoảng 19% và 33% so với tuổi 28 ngày.

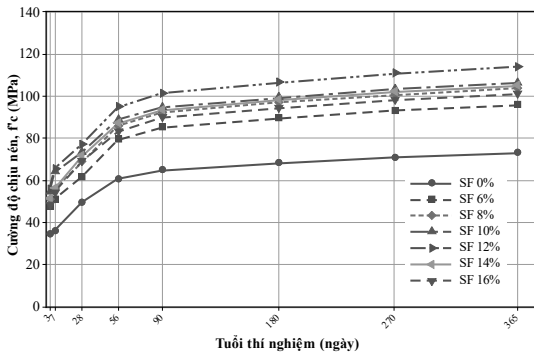
3.1.2. Ảnh hưởng của hàm lượng silica fume đến cường độ chịu nén

Hình 7 minh họa sự ảnh hưởng của các yếu tố hàm lượng SF và thời gian đến cường độ chịu nén f'_c . f'_c có sự thay đổi khi tăng lượng dùng SF tăng từ 0%-16%.

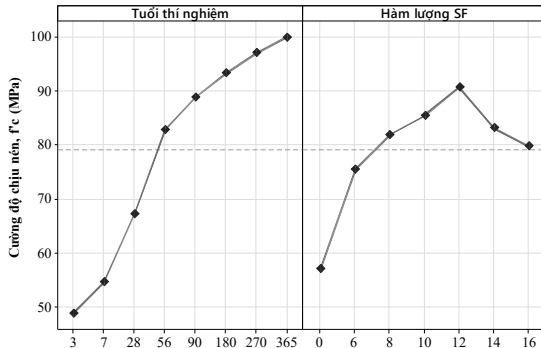
Với mẫu M0 không sử dụng SF, tăng lượng dùng xi măng, kết hợp với phụ gia siêu dẻo làm giảm tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) xuống còn 0.3 so với bê tông thường dùng cốt liệu xi thép (N/CKD=0.57) và f'_c tăng khoảng 38.7% [26]. Tuy nhiên mẫu M0 có cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày $f'_{c,28ng}=49.4\text{MPa}<55\text{MPa}$ nên đáp ứng yêu cầu về cường độ của bê tông cường độ cao theo TCVN 10306:2014.

Khi sử dụng thêm SF=6%, mẫu M1 có cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày ($f'_{c,28ng}$) được cải thiện đáng kể so với mẫu M0 (Mẫu M1 có $f'_{c,28ng}=61.8\text{MPa}>55\text{MPa}$ lớn khoảng 24.9% so với mẫu M0). Khi hàm lượng SF trong các mẫu thí nghiệm (M1, M2, M3, M4) tăng từ 6-12% thì $f'_{c,28ng}$ cũng tăng khoảng 25%. Điều này chứng tỏ SF khi được thêm vào thành phần của bê tông đã lấp đầy các lỗ rỗng mà xi măng không lọt vào được, đồng thời với kích thước nhỏ hơn nhiều so với hạt xi măng, SF bao xung quanh các hạt xi măng, làm các hạt xi măng không thể vón tụ với nhau, nên đã cải thiện được f'_c .

Khi lượng dùng SF lớn hơn 12%, $f'_{c,28ng}$ của mẫu M5 (SF=14%) giảm khoảng 7% và $f'_{c,28ng}$ của mẫu M6 (SF=16%) giảm khoảng 10% so với mẫu M4 (SF=12%). Như vậy lượng dùng SF tối ưu là 12%.



Hình 6. Quan hệ giữa cường độ chịu nén và tuổi thí nghiệm



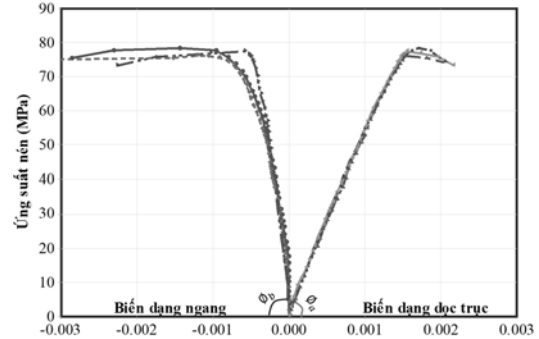
Hình 7. Các yếu tố ảnh hưởng đến cường độ chịu nén

3.2. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

Các giá trị trong Bảng 10 là kết quả thu được khi thí nghiệm mô-đun đàn hồi và hệ số Poisson ở tuổi 28 ngày của mẫu M4. Trong đó, ứng suất phá hoại f'_c , biến dạng ngang cực hạn ε_{lat} và biến dạng dọc trục cực hạn ε_{axi} được xác định tại thời điểm mẫu bị phá hoại. Hệ số Poisson (ν_c), mô-đun đàn hồi (E_c) tính toán theo hướng dẫn của chuẩn ASTM C469-14 [24]. Độ bền nén T_c được xác định là phần diện tích bên dưới đường cong biến dạng dọc trục.

Nhận thấy độ dốc (biểu thị độ cứng của vật liệu) của đường cong biến dạng dọc trục thấp hơn so với đường cong biến dạng ngang ($\phi_a < \phi_b$) (Hình 8), nghĩa là giá trị tuyệt đối của biến dạng ngang (có giá trị âm) nhỏ hơn biến dạng dọc trục (có giá trị dương), và mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng dọc trục quan sát được là tuyến tính cho đến khi mẫu gần bị phá hoại, trong khi đó, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng ngang tuyến tính khi ứng suất nhỏ hơn một phần hai ứng suất đỉnh. Gần thời điểm mẫu bị phá hoại, biến dạng ngang tăng nhanh và xấp xỉ bằng biến dạng dọc trục tại thời điểm mẫu bị phá hoại. Sau khi mẫu bị phá hoại, đường cong biến dạng dọc trục dốc hơn nhiều so với bê tông thường dùng cốt liệu xi thép, nghĩa là BTCDCXT bị phá hoại đột ngột so với bê tông thường dùng cốt liệu xi thép [26]. Điều này cũng cho thấy BTCDCXT có độ giòn lớn hơn BTXT.

Kết quả ở Bảng 10 và Hình 8 cũng cho thấy mô-đun hồi E_c và độ bền T_c phụ thuộc vào cường độ chịu nén f'_c nên có giá trị lớn hơn bê tông thường dùng cốt liệu truyền thống khoảng 40% [26]



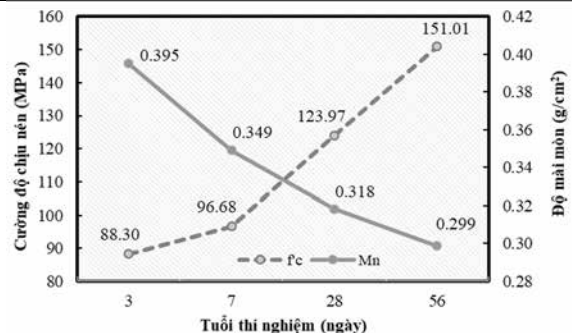
Hình 8. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

3.3. Độ mài mòn

Bảng 9 và Hình 9 trình bày kết quả độ mài mòn của bê tông ở các tuổi 3, 7, 28, 56 ngày. Độ mài mòn M_n của mẫu M4 bị ảnh hưởng bởi tuổi ngày thí nghiệm và cường độ chịu nén. Khi tuổi ngày thí nghiệm tăng từ 3 ngày đến 56 ngày thì cường độ chịu nén tăng khoảng 70% và độ mài mòn giảm khoảng 24%. So với nghiên cứu [27], mẫu M4 có khả năng chống mài mòn tương tự với loại bê tông xi măng sử dụng cốt liệu nhỏ là đá mịn và cát mịn.

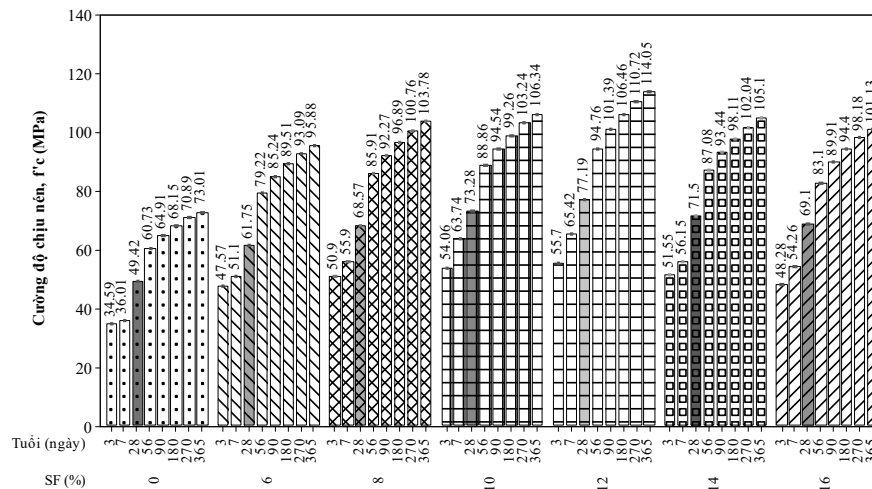
Bảng 9. Kết quả thí nghiệm độ mài mòn

Tuổi thí nghiệm (ngày)	Cường độ chịu nén f'_c (MPa)	Độ mài mòn M_n (g/cm ²)
3	88.30	0.395
7	96.68	0.349
28	123.97	0.318
56	151.01	0.299



Ghi chú: Kết quả cường độ chịu nén thu được từ việc nén mẫu có kích thước 7.07x7.07x7.07cm

Hình 9. Độ mài mòn ở tuổi thí nghiệm khác nhau



Hình 10. Cường độ chịu nén của các mẫu ở các tuổi ngày thí nghiệm khác nhau

Bảng 10. Kết quả thí nghiệm mô-đun đàn hồi và hệ số Poisson của BTCDCXT

Ký hiệu mẫu	Tải trọng phá hoại, kN P_{max}	Ứng suất phá hoại, MPa f'_c	Biến dạng ngang, ‰ ϵ_{lat}	Biến dạng dọc, ‰ ϵ_{axi}	Hệ số poisson ν_c	Mô-đun đàn hồi, GPa E_c	Độ bền, MPa.‰ T_c
M4_1	1380.76	78.13	-1.437	1.705	0.232	55.53	98.19
M4_2	1344.51	76.08	-1.208	1.515	0.229	53.72	101.28
M4_3	1366.82	77.35	-0.581	1.549	0.286	54.92	112.60
Giá trị trung bình	1364.03	77.19	-1.075	1.590	0.249	54.72	104.02
Độ lệch chuẩn	18.28	1.03	0.443	0.101	0.032	0.92	7.59

4. KẾT LUẬN

Dựa vào các kết quả thực nghiệm được phân tích ở trên có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Để thiết kế bê tông cường độ cao sử dụng cốt liệu xỉ thép cần bổ sung thêm silica fume và phụ gia siêu dẻo vào thành phần vật liệu chế tạo.
- BTCDCXT có cường độ phát triển theo thời gian, cường độ ở tuổi 28 ngày và 365 ngày tăng khoảng 19% và 33% so với tuổi 28 ngày.
- Hàm lượng SF sử dụng có ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của BTCDCXT. Hàm lượng SF=12% là tối ưu.
- Độ mài mòn của BTCDCXT giảm khi cường độ chịu nén tăng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này thuộc đề tài mã số T2021-116TĐ được tài trợ bởi Trường Đại học Sư Phạm Kỹ thuật TP. HCM năm 2021.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hisham Qasrawi. "The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment," *Construction Building Materials*, vol. 54, p. 298-304, 2014.
- [2] M Maslehuddin, Alfarabi M Sharif *et al.* "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes," *Construction building materials*, vol. 17, p. 105-112, 2003.
- [3] Hisham Qasrawi, Faisal Shalabi *et al.* "Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate," *Construction Building Materials*, vol. 23, p. 1118-1125, 2009.
- [4] Mahmoud Ameri, Hossein Shahabishahmiri *et al.* "Evaluation of the use of steel slag in concrete", in *Proceedings of the ARRB Conference, 25th, 2012, Perth, Western Australia, Australia*, 2012, p.
- [5] George Wang. "Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate," *Construction Building Materials*, vol. 24, p. 1961-1966, 2010.
- [6] Qiang Wang, Peiyu Yan *et al.* "Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete," *Construction Building Materials*, vol. 47, p. 1414-1420, 2013.
- [7] M Maslehuddin, M Shameem *et al.*, "Performance of steel slag aggregate concretes," in *Exploiting Wastes in Concrete*: Thomas Telford Publishing, 1999, pp. 109-119.
- [8] Ioanna Papayianni, Eleftherios Anastasiou, "Utilization of Electric Arc Furnace Steel Slags in Concrete Products". *The 6th European Slag Conference*, Madrid, 2010, p.
- [9] Jigar P Patel, "Broader use of steel slag aggregates in concrete". Masters of science in civil engineering. Cleveland State University 2008.

[10] Verapathran Maruthachalam, Murthi Palanisamy. "High performance concrete with steel slag aggregate," *GRADEVINAR*, vol. 66, p. 605-612, 2014.

[11] Jin Liu, Runhua Guo. "Applications of steel slag powder and steel slag aggregate in ultra-high performance concrete," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, p. 2018.

[12] Xiuzhen Zhang, Sixue Zhao *et al.* "Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness," *Construction Building Materials*, vol. 214, p. 28-36, 2019.

[13] Trần Văn Miên, Tôn Nữ Phương Nhi. "Nghiên cứu các tính chất của bê tông sử dụng cốt liệu xỉ thép," *Tạp chí Xây dựng*, p. 125-128, 2014.

[14] Nguyễn Thị Thuý Hằng, Phan Đức Hùng *et al.* "Hiệu chỉnh thành phần cấp phối bê tông cốt liệu xỉ thép," *Người Xây Dựng*, p. 2016.

[15] Nguyễn Thị Thuý Hằng, Phan Đức Hùng *et al.* "Xác định các đặc trưng cơ học của bê tông sử dụng xỉ thép như cốt liệu lớn," *Tạp chí Xây Dựng*, vol. 02, p. 2016.

[16] Nguyễn Thị Thuý Hằng, Nguyễn Hoàng Vũ *et al.* "Ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép cốt liệu xỉ thép," *Tạp chí Người Xây Dựng*, p. 2015.

[17] Bê tông cường độ cao - Thiết kế thành phần mẫu hình trụ, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 2014.

[18] Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 2006.

[19] Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ, TCVN 6016:2011, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 2011.

[20] Xi măng - Phương pháp xác định độ mịn, TCVN 4030:2003, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 2003.

[21] Xi măng - Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích, TCVN 6017:2015, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 2015.

[22] Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử, TCVN 3105 : 1993, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 1993.

[23] Bê tông nặng-Phương pháp xác định cường độ nén, TCVN 3118 : 1993, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 1993.

[24] Standard test method for static modulus of elasticity Poisson's ratio of concrete in compression, ASTM C469-14, Astm International, West Conshohocken, PA, USA, 2014.

[25] Bê tông nặng - Phương pháp xác định độ mài mòn, Bộ Khoa Học Và Công Nghệ, 1993.

[26] Nguyễn Thị Thuý Hằng, Mai Hồng Ha *et al.* "Investigation on Compressive Characteristics of Steel-Slag Concrete," *Materials*, vol. 13, p. 1928, 2020.

[27] Hoàng Minh Đức, Ngô Văn Toàn. "Nâng cao khả năng chống mài mòn của bê tông sử dụng cát mịn làm mặt đường bê tông xi măng," *Tạp chí KHCN Xây dựng* vol. 3, p. 2018.