BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC

DƯƠNG TRUNG QUỐC

NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM VÀ KHẢ NĂNG SỬ DỤNG XỈ THÉP LÀM CỐT LIỆU CHO BÊ TÔNG TRONG CÔNG TRÌNH BIỂN

Ngành: Địa chất học
Mã số: 9440201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
ĐỊA CHẤT HỌC

HUẾ - 2026

Công trình được hoàn thành tại Khoa Địa lý - Địa chất, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Người hướng dẫn khoa học:
PGS.TS. Trần Thanh Nhàn
PGS.TS. Đỗ Quang Thiên

Phản biện 1: .....
Phản biện 2: .....
Phản biện 3: .....

Luận án sẽ được bảo vệ trước hội đồng cấp: Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế vào lúc……...giờ…..ngày……năm……..

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:……

MỞ ĐẦU

1. LÍ DO CHỌN ĐỀ TÀI

Sự phát triển nhanh của công nghiệp gang thép làm phát sinh khối lượng lớn xỉ luyện thép, hay còn gọi là xỉ thép. Trên thế giới, lượng xỉ thép trung bình khoảng 110-140 kg/tấn thép, trong khi tại các nhà máy gang thép lớn ở Việt Nam như Formosa Hà Tĩnh và Hòa Phát Dung Quất, tỷ lệ này có thể đạt khoảng 150 kg/tấn thép. Với sản lượng thép của Việt Nam năm 2025 vượt 24,7 triệu tấn và đứng thứ 11 thế giới, lượng xỉ thép phát sinh hằng năm là rất lớn, riêng hai nhà máy lớn ở miền Trung có thể vượt 3 triệu tấn/năm.

Khác với xỉ lò cao, xỉ thép có thành phần phức tạp hơn do phụ thuộc vào nguồn nguyên liệu, phế liệu, chất trợ dung và các công đoạn tinh luyện thép. Vì vậy, việc sử dụng xỉ thép trong xây dựng không thể chỉ dựa trên kinh nghiệm hoặc các kết quả thí nghiệm đơn lẻ, mà cần được nghiên cứu đầy đủ về đặc tính cơ lý, hóa học, khoáng vật, môi trường, ổn định thể tích và công năng làm việc trong điều kiện thực tế. Đây cũng là lý do các quốc gia có ngành thép phát triển đã xây dựng hệ thống tiêu chuẩn, chỉ dẫn kỹ thuật và các trung tâm R&D chuyên sâu để phát triển các hướng sử dụng xỉ thép an toàn, hiệu quả và có giá trị kinh tế. Trong khi đó, nguồn vật liệu xây dựng tự nhiên như đá dăm và cát sông ở Việt Nam ngày càng khan hiếm, chi phí khai thác – vận chuyển tăng cao, đặc biệt tại các vùng đồng bằng và ven biển. Đồng thời, nhu cầu về bê tông nặng, bê tông cường độ cao phục vụ công trình biển, khối phá sóng, kết cấu trọng lực và các giải pháp phòng

chống xói lở bờ biển ngày càng cấp thiết. Với khối lượng riêng lớn, độ cứng và khả năng chống mài mòn cao, xỉ thép có tiềm năng trở thành nguồn cốt liệu thay thế phù hợp nếu được xử lý, đánh giá và kiểm soát chất lượng đúng yêu cầu.

Xuất phát từ các vấn đề trên, đề tài "*Nghiên cứu đặc điểm và khả năng sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông trong công trình biển*" được lựa chọn nhằm làm rõ cơ sở khoa học và thực tiễn của việc tái sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông. Kết quả nghiên cứu không chỉ góp phần giảm áp lực bãi thải và hạn chế khai thác vật liệu tự nhiên, mà còn mở ra hướng sử dụng phụ phẩm công nghiệp để chế tạo bê tông nặng, phục vụ công trình bảo vệ bờ biển và phát triển vật liệu xây dựng bền vững theo định hướng kinh tế tuần hoàn.

2. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

2.1. Mục tiêu chung

Làm sáng tỏ thành phần, tính chất và khả năng sử dụng xỉ thép trong lĩnh vực xây dựng, ứng dụng thử nghiệm thành công bê tông có cốt liệu xỉ thép trong công trình biển.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Xác định thành phần và tính chất của các loại xỉ thép Formosa, đánh giá khả năng sử dụng trong lĩnh vực xây dựng, đặc biệt làm cốt liệu cho bê tông.

- Đánh giá tính chất của các hỗn hợp xỉ thép Formosa phối trộn theo tỷ lệ thải từ nhà máy trong định hướng làm cốt liệu lớn cho bê tông.

- Chế tạo và đánh giá tính chất của bê tông sử dụng hỗn hợp xỉ thép Formosa với các kịch bản cỡ cốt liệu lớn khác nhau và theo định hướng đáp ứng yêu cầu bê tông nặng, mác 400.

- Ứng dụng thử nghiệm bảo vệ công trình biển bằng khối Tetrapod chế tạo từ bê tông có cốt liệu xỉ thép Formosa.

3. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Để đạt được mục tiêu đặt ra, đề tài luận án cần hoàn thành các nội dung sau:

- Tổng quan tình hình phát thải, nghiên cứu và sử dụng xỉ thép thế giới, ở Việt Nam và của nhà máy FHS trong lĩnh vực xây dựng, làm cơ sở xác định định hướng nghiên cứu của luận án.

- Thu thập, phân loại, bảo quản và chuẩn bị các loại xỉ thép Formosa và vật liệu khác phục vụ thí nghiệm, bảo đảm tính đại diện và phù hợp với mục tiêu, nội dung nghiên cứu.

- Xác định thành phần và tính chất cơ lý của từng loại xỉ thép Formosa và các hỗn hợp xỉ thép theo định hướng sử dụng trong lĩnh vực xây dựng và làm cốt liệu bê tông.

- Thiết kế cấp phối, chế tạo và thí nghiệm các loại bê tông sử dụng hỗn hợp xỉ thép Formosa làm cốt liệu lớn; so sánh với bê tông truyền thống nhằm đánh giá khả năng đáp ứng yêu cầu bê tông nặng, mác 400 và định hướng ứng dụng trong công trình biển.

- Chế tạo 5 khối Tetrapod bằng bê tông sử dụng cốt liệu xỉ thép Formosa và ứng dụng thử nghiệm trong bảo vệ công trình biển.

4. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

4.1. Đối tượng nghiên cứu

- Các loại xỉ thép Formosa gồm xỉ khử lưu huỳnh (gọi tắt là xỉ DeS), xỉ BOF và xỉ lò đúc (gọi tắt là xỉ CAST). Trong đó, xỉ

BOF và xỉ CAST được chia thành 02 loại cỡ hạt 0-10 mm (đặt tên là BOF010 và CAST010) và 0-40 mm (đặt tên là BOF040 và CAST040). Như vậy, đối tượng nghiên cứu chính của luận án là 5 loại xỉ thép Formosa, cụ thể:

- Xỉ DeS không phân cỡ hạt và có tỷ lệ thải là 11,0 %.
- Xỉ BOF040 và BOF010 có tỷ lệ thải lần lượt là 65,6 % và 16,4 %.
- Xỉ CAST040 và CAST010 có tỷ lệ thải lần lượt là 5,6 % và 1,4 %.

Ba loại đá dăm có cỡ hạt 5-10 mm, 5-20 mm và 10-40 mm và 1 loại cát xây dựng đang được sử dụng làm cốt liệu lớn và nhỏ cho bê tông thương phẩm tại tỉnh Hà Tĩnh được sử dụng làm cốt liệu đối chứng trong nghiên cứu.

4.2. Phạm vi nghiên cứu

- Phạm vi thời gian phát thải và thu thập mẫu các loại xỉ thép Formosa: Các loại xỉ thép Formosa được thu thập phải đảm bảo phát thải theo 3 mẻ sản xuất khác nhau, phải trải qua quá trình xử lý tại nguồn và được lưu thải ít nhất 6 tháng tại bãi lưu của nhà máy. Thời gian thu thập mẫu các loại xỉ thép Formosa được thực hiện từ tháng 12/2023 đến tháng 02/2024, nghĩa là các loại xỉ thép này phát thải và bắt đầu lưu thải theo 3 mẻ khác nhau từ tháng 6/2023 đến tháng 8/2023. Các loại đá dăm và cát xây dựng cũng được thu thập trong khoảng thời gian trên.
- Phạm vi định hướng ứng dụng trong công trình biển là các khối phá sóng biển bằng trọng lực không sử dụng cốt thép, cụ thể là khối Tetrapod.

- Phạm vi thời gian đánh giá tính chất của bê tông và ứng dụng thử nghiệm các khối Tetrapod là 1 năm, từ năm 2025 đến 2026.

- Phạm vi không gian dự kiến ứng dụng thử nghiệm các khối Tetrapod là một vị trí dọc bờ biển của tỉnh Hà Tĩnh hoặc vùng ven biển xung quanh khu vực nhà máy FHS.

5. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Lấy mẫu và bảo quản mẫu: Thực hiện theo TCVN 7572-1:2006, TCVN 11969:2018 và tham khảo JIS A 5015:2013, JIS A 5011-4:2018, BS EN 13242:2002+A1:2007.

Thí nghiệm cơ lý – kỹ thuật: Xác định thành phần hạt, tính chất cơ lý của xỉ thép, hỗn hợp cốt liệu xỉ thép, bê tông xỉ thép, bê tông đối chứng và khối Tetrapod theo TCVN 7570:2006, TCVN 7572-1÷20:2006, TCVN 8228:2009, TCVN 9901:2014 và các tiêu chuẩn tham khảo liên quan.

Phân tích hóa học và môi trường: Xác định thành phần hóa học, thành phần nguy hại và đặc tính môi trường theo các QCVN hiện hành như QCVN 07:2009/BTNMT, QCVN 08-MT:2015/BTNMT, QCVN 09-MT:2015/BTNMT, QCVN 10-MT:2015/BTNMT, QCVN 40:2011/BTNMT và tham khảo JIS A 5015:2013.

Thí nghiệm mô phỏng điều kiện làm việc: Thực hiện các thí nghiệm ngâm chiết, bảo dưỡng, ngâm nước biển, theo dõi cường độ và đánh giá chất lượng bê tông nhằm mô phỏng điều kiện sử dụng xỉ thép trong xây dựng và công trình biển.

6. CÁC LUẬN ĐIỂM BẢO VỆ

Các luận điểm cần bảo vệ của luận án bao gồm:

- Luận điểm 1: Sau quá trình xử lý và thu liệu tại nguồn, 4 trong 5 loại xỉ thép Formosa gồm xỉ BOF040, BOF010, CAST040, CAST010 và hỗn hợp trộn của chúng theo tỷ lệ thải từ nhà máy có thành phần và tính chất đáp ứng yêu cầu cốt liệu lớn cho bê tông nặng, mác 400. Đây là cơ sở khoa học để lựa chọn và ứng dụng xỉ thép Formosa làm cốt liệu cho bê tông.

- Luận điểm 2: Bên cạnh hiệu quả thu mẫu và tái sử dụng cao nhất do có dãi cỡ hạt lớn nhất (5-40 mm), hỗn hợp xỉ thép BC540 thể hiện mức độ lèn chặt và ổn định cấu trúc tốt nhất nên bê tông BC540 sử dụng hỗn hợp này làm cốt liệu có cường độ, khối lượng thể tích cao và ổn định nhất. Đây là cơ sở cho định hướng ứng dụng chế tạo khối Tetrapod bằng bê tông có cốt liệu xỉ thép.

7. ĐIỂM MỚI CỦA LUẬN ÁN

Những điểm mới của đề tài luận án bao gồm:

- Điểm mới 1: Luận án đã xác lập được cơ sở khoa học về thành phần, tính chất và khả năng sử dụng xỉ thép Formosa làm cốt liệu cho bê tông. Kết quả nghiên cứu cho thấy sau quá trình xử lý, thu liệu và lão hóa phù hợp, bốn loại xỉ BOF040, BOF010, CAST040, CAST010 và các hỗn hợp phối trộn của chúng có thể sử dụng làm cốt liệu lớn cho bê tông nặng, mác 400. Cách tiếp cận này góp phần chuyển nhược điểm khối lượng riêng lớn của xỉ thép thành ưu thế kỹ thuật khi ứng dụng trong kết cấu trọng lực của công trình biển.

- Điểm mới 2: Định hướng phối trộn các loại xỉ thép theo tỷ lệ thải góp phần sử dụng tối đa và tái chế thuận lợi các loại xỉ thép trong cùng nhà máy. Hỗn hợp BC540 có tỷ lệ tái sử dụng lớn nhất và ưu điểm nổi bật như khả năng lèn chặt và ổn định

cấu trúc, nhờ đó, cường độ và khối lượng thể tích của bê tông BC540 ổn định ở mức cao cùng lượng sử dụng cốt liệu nhỏ ít nhất. Khả năng ứng dụng của bê tông BC540 bước đầu được chứng minh qua kết quả chế tạo và ứng dụng thử nghiệm 5 khối Tetrapod trong bảo vệ công trình biển.

8. CƠ SỞ TÀI LIỆU THỰC HIỆN LUẬN ÁN

Cơ sở tài liệu và số liệu chính để thực hiện các nội dung của luận án là kết quả nghiên cứu từ đề tài "Nghiên cứu đặc tính lý - hóa, môi trường xỉ thép Formossa và thí điểm sử dụng làm cốt liệu trong công trình bảo vệ bờ biển tại tỉnh Hà Tĩnh".

9. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ THỰC TIỄN

9.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án cung cấp cơ sở dữ liệu về đặc tính lý – hóa, môi trường, cơ lý – kỹ thuật của xỉ thép Formosa, hỗn hợp xỉ thép và bê tông xỉ thép. Kết quả góp phần làm rõ khả năng sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông nặng, bê tông công trình biển và bổ sung luận cứ cho việc hoàn thiện tiêu chuẩn, chỉ dẫn kỹ thuật về sử dụng xỉ thép trong xây dựng.

9.2. Ý nghĩa thực tiễn

Luận án chứng minh khả năng sử dụng xỉ thép Formosa thay thế cốt liệu tự nhiên để chế tạo bê tông nặng mác 400 và khối phá sóng Tetrapod. Kết quả nghiên cứu góp phần giảm khai thác vật liệu tự nhiên, giảm áp lực bãi thải xỉ thép, nâng cao hiệu quả tái chế phụ phẩm công nghiệp và mở ra hướng ứng dụng vật liệu xây dựng tái chế trong công trình bảo vệ bờ biển.

10. CẤU TRÚC LUẬN ÁN

Ngoài phần mở đầu, kết luận, kiến nghị, tài liệu tham khảo và phụ lục, nội dung chính của luận án được trình bày trong 4 chương:

Chương 1: Tổng quan đối tượng và nội dung nghiên cứu

Chương 2: Cơ sở khoa học, phương pháp và khối lượng nghiên cứu.

Chương 3: Thành phần và tính chất của xỉ thép Formosa.

Chương 4: Nghiên cứu tính chất của bê tông xỉ thép và ứng dụng thử nghiệm khối Tetrapod.

CHƯƠNG 1
TỔNG QUAN ĐỐI TƯỢNG VÀ NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1.1. LOẠI XỈ THÉP VÀ QUÁ TRÌNH XỬ LÝ, THU PHẨM

Xỉ thép là phụ phẩm chính trong quá trình luyện thép, có lượng thải trung bình khoảng 11-15% khối lượng thép thành phẩm. Hiện nay, hai công nghệ luyện thép thô phổ biến là lò BOF và lò EAF. Công nghệ BOF phát thải ba loại xỉ thép gồm xỉ DeS, xỉ BOF và xỉ CAST, trong khi công nghệ EAF phát thải xỉ EAF và xỉ CAST. Trên thế giới, tỷ lệ sử dụng công nghệ BOF và EAF thay đổi tùy theo điều kiện nguyên liệu, năng lượng và chính sách của từng quốc gia; trong đó BOF hiện vẫn chiếm hơn 60% sản lượng thép thô toàn cầu. Ở Việt Nam, các nhà máy quy mô lớn như FHS và HPDQ chủ yếu sử dụng công nghệ BOF, tạo ra lượng xỉ thép rất lớn với tổng lượng thải vượt 3 triệu tấn/năm.

Tại nhà máy FHS, quy trình luyện thép bằng công nghệ BOF gồm ba công đoạn chính tương ứng phát thải các loại xỉ DeS, xỉ BOF và xỉ CAST. Sau xử lý, xỉ thép Formosa được thu phẩm thành 5 loại gồm BOF010, BOF040, CAST010, CAST040 và DeS, được lưu trữ riêng biệt trước khi sử dụng hoặc xử lý.

1.2. NGHIÊN CỨU VÀ SỬ DỤNG XỈ THÉP TRONG LĨNH VỰC XÂY DỰNG TRÊN THẾ GIỚI

1.2.1. Nghiên cứu và sử dụng xỉ thép trên thế giới

Trên thế giới, do lượng thải lớn và có nhiều đặc tính cơ lý thuận lợi, xỉ thép đã được nghiên cứu và sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng. Vật liệu này có độ cứng cao, bề mặt thô

nhám, khả năng chống mài mòn, chống va đập và cường độ kháng cắt tốt nên có tiềm năng thay thế cốt liệu tự nhiên trong nền đường, móng đường, bê tông nhựa, vật liệu san lấp, bê tông và một số công trình thủy lợi, ven biển.

1.2.2. Nghiên cứu và sử dụng xỉ thép ở Việt Nam

Ở Việt Nam, nghiên cứu sử dụng xỉ gang thép đã được quan tâm từ khá sớm, nhưng trong thời gian dài chủ yếu tập trung vào xỉ gang, xỉ hạt lò cao làm phụ gia khoáng cho xi măng và bê tông. Nhìn chung, các nghiên cứu trong nước về xỉ thép vẫn còn phân tán, quy mô thí nghiệm hạn chế và chưa cung cấp đầy đủ cơ sở khoa học để ban hành tiêu chuẩn sử dụng xỉ thép.

1.3. LUẬN CHỨNG ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG XỈ THÉP LÀM CỐT LIỆU CHO BÊ TÔNG TRONG CÔNG TRÌNH BIỂN

Sử dụng thành công xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông nặng phục vụ công trình biển mang lại lợi ích kép trong bảo vệ môi trường và tài nguyên trong lĩnh vực xây dựng và công nghiệp gang thép.

CHƯƠNG 2
CƠ SỞ KHOA HỌC, PHƯƠNG PHÁP VÀ KHỐI LƯỢNG NGHIÊN CỨU

2.1. THU THẬP VÀ CHUẨN BỊ MẪU CÁC LOẠI VẬT LIỆU

Đề tài đã tổ chức 3 đợt thu thập 5 loại xỉ thép gồm xỉ DeS, BOF040, BOF010, CAST040 và CAST010. Tổng cộng 15 mẫu xỉ thép tương đương 43 tấn phục vụ nghiên cứu.

2.2. VẬT LIỆU TỰ NHIÊN CÓ NGUỒN GỐC ĐỊA CHẤT NỘI SINH VÀ NGOẠI SINH PHỤC VỤ ĐÁNH GIÁ TÍNH CHẤT CỦA XỈ THÉP

Đồng thời cũng đã thu thập mẫu của 3 loại đá dăm, 1 loại cát xây dựng đang được sử dụng làm cốt liệu cho bê tông thương phẩm tại tỉnh Hà Tĩnh. Tổng cộng đã thu thập 4,5 tấn đá dăm và 3 tấn cát.

2.3. LUẬN CHỨNG CƠ SỞ KHOA HỌC SỬ DỤNG XỈ THÉP TRONG PHÒNG CHỐNG TAI BIẾN ĐỊA CHẤT VÙNG VEN BIỂN

Xói lở bờ biển là tai biến địa chất ngoại sinh phổ biến, ngày càng nghiêm trọng dưới tác động của biến đổi khí hậu, nước biển dâng, bão và áp thấp nhiệt đới, gây đe dọa đến cơ sở hạ tầng, an ninh kinh tế và an sinh xã hội vùng ven biển. Trên cơ sở định hướng sử dụng xỉ thép làm cốt liệu bê tông trong công trình biển, nội dung này làm rõ cơ sở khoa học của khối phá sóng, vai trò của khối lượng thể tích bê tông và luận giải khả năng chuyển đặc điểm khối lượng riêng lớn của xỉ thép thành ưu điểm kỹ thuật trong chế tạo bê tông nặng cho khối phá sóng.

CHƯƠNG 3
THÀNH PHẦN VÀ TÍNH CHẤT CỦA XỈ THÉP FORMOSA

3.1. THÀNH PHẦN VÀ TÍNH CHẤT CỦA XỈ THÉP FORMOSA

Kết quả phân tích cho thấy xỉ BOF và xỉ CAST của FHS có thành phần hóa học điển hình của xỉ thép oxy hóa, với hệ CaO-SiO_2-Fe_2O_3-MgO chiếm khoảng 82-87% khối lượng và hầu như

không phụ thuộc vào cỡ hạt. Hàm lượng fCaO trong xỉ BOF và CAST chỉ khoảng 0,13-0,91%, thấp hơn nhiều so với ngưỡng áp dụng cho vật liệu xây dựng. xỉ BOF và CAST chứa các pha đặc trưng như $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$, $Ca_2Fe_2O_5$, Fe_3O_4, Fe_2O_3, FeO và các silicat canxi, ngược lại, xỉ DeS có thành phần khác biệt, giàu CaO và SO_3, xuất hiện các khoáng sulfate như ettringit, nên không được ưu tiên sử dụng trực tiếp làm cốt liệu bê tông. Nhìn chung hàm lượng các thành phần có hại vô cơ trong xỉ thép Formosa thấp hơn ngưỡng cho phép theo quy định hiện hành.

BOF040 và CAST040 có hàm lượng cốt liệu lớn chiếm ưu thế, khoảng 68,5% và 68,8%, nên phù hợp hơn để sàng tách, phối trộn và sử dụng làm cốt liệu lớn cho bê tông. Ngược lại, BOF010 và CAST010 chủ yếu tập trung ở nhóm cốt liệu nhỏ, đặc biệt cỡ 2,5-5 mm chiếm trên 63%, nên phù hợp hơn cho vai trò cốt liệu nhỏ hoặc vật liệu phối trộn. Xỉ DeS có hàm lượng hạt mịn rất cao, trong đó nhóm <0,14 mm đạt 15,1%, cho thấy cấp phối không thuận lợi và cần xử lý, phối trộn hoặc loại trừ khi định hướng làm cốt liệu bê tông.

Các loại xỉ BOF và CAST có khối lượng riêng cao, khoảng 3,43-3,59 g/cm^3, lớn hơn đáng kể so với cốt liệu tự nhiên, cho thấy tiềm năng làm cốt liệu cho bê tông nặng. Xỉ DeS có khối lượng riêng thấp rõ rệt và độ hút nước rất cao nên không thuận lợi để sử dụng trực tiếp làm cốt liệu bê tông.

Các loại xỉ BOF và CAST có khối lượng thể tích xốp cao, chủ yếu khoảng 1,87-2,06 t/m^3, lớn hơn đáng kể so với nhiều cốt liệu tự nhiên. Độ hổng dao động khoảng 33,6-41,2%, trong đó CAST040 có độ hổng thấp hơn, cho thấy khả năng sắp xếp hạt

và độ chặt tốt hơn. Xỉ DeS có khối lượng thể tích xốp rất thấp, chỉ khoảng 1.05 t/m³, không phù hợp làm cốt liệu cho bê tông.

Kết quả cho thấy xỉ BOF và CAST có độ ẩm trung bình khoảng 2,0-3,8%, trong khi xỉ DeS đạt tới khoảng 28,3% do hàm lượng hạt nhỏ, mịn cao. Các loại xỉ BOF và CAST có hàm lượng hạt mịn nhỏ hơn 0,075 mm dưới 1,5%, đáp ứng yêu cầu làm cốt liệu bê tông. Xỉ DeS có hàm lượng hạt mịn khoảng 8,1%, không phù hợp để sử dụng làm cốt liệu bê tông. Các loại xỉ thép Formosa hầu như không lẫn bùn, sét, vật liệu nhẹ, tạp lai hay tạp chất hữu cơ.

Các loại xỉ BOF và CAST có độ nén dập thấp, đặc biệt ở cỡ hạt 5-10 mm chỉ khoảng 2,92-4,33% ở trạng thái khô, phản ánh khả năng chịu nghiền tốt và phù hợp làm cốt liệu lớn cho bê tông. Độ mài mòn Los Angeles của các loại xỉ thép Formosa dao động khoảng 12,47-20,16%, thấp hơn rất nhiều so với giới hạn 50% quy định cho cốt liệu lớn trong TCVN 7570:2006 và TCVN 11969:2018. Theo TCVN 7570:2006 và TCVN 11969:2018, hàm lượng hạt thoi dẹt cho cốt liệu lớn lần lượt không vượt quá 15% và 35%; do đó, các loại xỉ BOF và CAST đều đáp ứng tốt yêu cầu này.

Kết quả thí nghiệm cho thấy độ biến dạng dài thanh vữa của tất cả các loại xỉ thép nhỏ hơn 0,05% sau 3 tháng và nhỏ hơn 0,1 % sau 6 tháng nên các loại xỉ thép Formosa không có khả năng xảy ra phản ứng kiềm - silic. Kết quả thí nghiệm 196 ngày cho thấy độ trương nở thực tế của các mẫu BOF010, BOF040, CAST040 và CAST010 lần lượt đạt khoảng 5,45%, 5,06%, 3,11% và 1,47%, đều vượt ngưỡng 1%. Tuy nhiên, khi xỉ thép được sử dụng làm cốt liệu bê tông, cần đánh giá thêm cường độ

và độ ổn định của bê tông theo thời gian, vì ảnh hưởng thực tế phụ thuộc không chỉ vào độ trương nở mà còn vào lực trương nở và khả năng kiềm chế của nền xi măng.

3.2. TÍNH CHẤT CỦA HỖN HỢP XỈ THÉP FORMOSA TRONG ĐỊNH HƯỚNG LÀM CỐT LIỆU CHO BÊ TÔNG

Nghiên cứu chỉ phối trộn bốn loại xỉ BOF040, BOF010, CAST040 và CAST010 theo tỷ lệ phát thải đã hiệu chỉnh: 73,7%, 18,4%, 6,3% và 1,6% để thu phẩm 6 hỗn hợp. Các hỗn hợp BC510, BC520 và BC1040 có cấp phối tương đối phù hợp với đường bao cốt liệu lớn, trong khi BC540 mịn hơn, cần phối hợp với lượng cát tự nhiên phù hợp khi thiết kế bê tông.

Các hỗn hợp xỉ thép có khối lượng riêng, khối lượng thể tích và độ hút nước tương đồng nhau, lớn hơn cốt liệu tự nhiên khoảng 1,2-1,3 lần nhưng vẫn đáp ứng yêu cầu cốt liệu lớn tái chế loại I. Trong đó, BC540 có khả năng lèn chặt tốt hơn nhờ dải cỡ hạt rộng 5-40 mm, tạo ưu thế về độ đặc chắc khi sử dụng làm cốt liệu bê tông. Các hỗn hợp xỉ thép đa cỡ hạt có khả năng lèn chặt tốt hơn, nên khối lượng thể tích xốp cao hơn và độ lỗ rỗng thấp hơn so. Khối lượng thể tích xốp của các hỗn hợp xỉ thép cao hơn khoảng 1,3-1,4 lần so với đá dăm Hà Tĩnh.

Các hỗn hợp xỉ thép Formosa không chứa tạp chất hữu cơ, vật liệu nhẹ hay vật liệu tạp lai. Các loại cốt liệu tự nhiên cũng đạt yêu cầu cốt liệu cho bê tông cấp cao hơn B30 và cốt liệu lớn tái chế loại I. Hầu hết hỗn hợp đáp ứng yêu cầu mác đá dăm 140 và yêu cầu làm cốt liệu lớn cho bê tông từ B30/M400 trở lên.

Các hỗn hợp xỉ thép Formosa có độ mài mòn thấp hơn nhiều so với giới hạn 50% quy định cho cốt liệu lớn bê tông trong khi hàm lượng hạt dẹt của các hỗn hợp xỉ thép Formosa rất thấp, chỉ

dao động khoảng 1,3-3,9%, thấp hơn nhiều so với giới hạn quy định cho cốt liệu lớn bê tông.

Các hỗn hợp xỉ thép Formosa được định hướng làm cốt liệu lớn (>5 mm), trong khi thí nghiệm phản ứng kiềm-silic bằng phương pháp thanh vữa yêu cầu thành phần hạt nhỏ hơn 5 mm nên không thực hiện trực tiếp cho các hỗn hợp này.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT CỦA BÊ TÔNG XỈ THÉP VÀ ỨNG DỤNG THỬ NGHIỆM KHỐI TETRAPOD

4.1. THIẾT KẾ THÀNH PHẦN, CHẾ TẠO VÀ BẢO DƯỠNG MẪU CÁC LOẠI BÊ TÔNG

Sáu loại bê tông xỉ thép được thiết kế với cốt liệu lớn là các hỗn hợp BC510, BC520, BC1020, BC1040, BC2040 và BC540, còn cốt liệu nhỏ là cát Hà Tĩnh. Đồng thời, 3 loại bê tông đá dăm sử dụng đá dăm Hà Tĩnh cỡ 510, 520 và 1040 được chế tạo để đối chứng; tên bê tông được đặt theo tên cốt liệu lớn sử dụng.

Do các phương pháp thiết kế thành phần bê tông thường áp dụng cho cốt liệu tự nhiên, nghiên cứu lựa chọn quy định theo Công văn 1784/BXD-VP cho bê tông mác 400, độ sụt 6-8 cm. Cách chọn này phù hợp với bê tông khối lớn không cốt thép, đồng thời tăng lượng cốt liệu lớn xỉ thép, giảm lượng cát và hạn chế phân tầng do xỉ thép có khối lượng riêng cao. Nghiên cứu sử dụng xi măng PCB40 để đạt bê tông mác 400, kết hợp phụ gia Sikacrete PP-1 nhằm tăng bền sunfat và Sikaplast-316 để cải thiện tính công tác, giảm nước.

4.2. TÍNH CHẤT CỦA CÁC LOẠI BÊ TÔNG XỈ THÉP TRONG THỜI GIAN BẢO DƯỠNG

4.2.1. Độ biến dạng phá hủy nén

Kết quả cho thấy d_{phN} của bê tông xỉ thép biến động khá lớn giữa các mẫu và chưa thể hiện quy luật rõ ràng theo tuổi bảo dưỡng. Tuy nhiên, xét theo giá trị trung bình, d_{phN} có xu hướng ổn định hoặc tăng nhẹ, khoảng 3-4 mm ở 28 ngày tuổi.

4.2.2. Cường độ chịu nén

Tại 28 ngày, cường độ trung bình đạt 42,4-46,4 MPa, vượt khoảng 10-21% so với yêu cầu $R_{28} \geq 38,5$ MPa, chứng tỏ các hỗn hợp xỉ thép đáp ứng tốt yêu cầu cường độ. Sự chênh lệch cường độ giữa các loại bê tông không lớn; BC1020 thấp nhất với 42,4 MPa, trong khi BC540 cao nhất với 46,4 MPa.

4.2.3. Khối lượng thể tích

Kết quả cho thấy khối lượng thể tích của các bê tông xỉ thép khá ổn định theo thời gian bảo dưỡng và đều đạt $\rho_C \geq 2,6$ tấn/m³, đáp ứng yêu cầu của bê tông nặng. Các mẫu phân thành hai nhóm: nhóm có mật độ cao hơn gồm BC520, BC1040 và BC540 với $\rho_C \geq 2,7$ tấn/m³; nhóm còn lại gồm BC510, BC1020 và BC2040 có ρ_C thấp hơn nhưng vẫn đạt yêu cầu.

4.3. NGHIÊN CỨU BỔ SUNG MỘT SỐ TÍNH CHẤT CỦA BÊ TÔNG XỈ THÉP

4.3.1. Cường độ chịu kéo khi bửa

Kết quả cho thấy cường độ kéo khi bửa của bê tông BC540 tăng theo thời gian bảo dưỡng, đạt trung bình khoảng 3,7; 5,2 và 6,4 MPa ở 3, 7 và 28 ngày tuổi, trong khi biến dạng phá hủy kéo

ổn định khoảng 1,5-1,6 mm. Hệ số chuyển đổi R_N/R_{KB} dao động 7,22-9,39, thấp hơn giá trị 12,50 của bê tông truyền thống.

4.3.2. Mô đun đàn hồi

Bê tông BC540 có cường độ nén 28 ngày R_{N28} = 46,4 MPa và mô đun đàn hồi tĩnh khoảng 44 GPa, cao hơn rõ rệt so với bê tông truyền thống cùng cấp cường độ (khoảng 30-36 GPa).

4.3.3. Cường độ lăng trụ

Kết quả cho thấy cường độ lăng trụ của bê tông BC540 dao động từ 31,7-42,3 MPa, tương ứng cường độ nén quy đổi R_N = 38,0-50,8 MPa theo hệ số 1,2 của TCVN 3118:2022.

4.3.4. Độ chống thấm nước

Kết quả cho thấy đến cấp áp lực cuối cùng W12, cả 6 mẫu vẫn không xuất hiện thấm qua dưới dạng giọt nước hoặc vết ẩm. Điều này khẳng định bê tông BC540 có khả năng chống thấm rất tốt, phù hợp với định hướng sử dụng trong môi trường biển.

4.4. TÍNH CHẤT CỦA BÊ TÔNG BC540 THEO THỜI GIAN

Cường độ nén của bê tông BC540 tiếp tục tăng sau 28 ngày và duy trì ổn định đến 393 ngày trong cả hai điều kiện dưỡng ẩm tự nhiên và ngâm nước biển. Các giá trị trung bình đều cao hơn rõ rệt so với yêu cầu bê tông mác 400, cho thấy bê tông không bị suy giảm cường độ theo thời gian. Độ biến dạng phá hủy nén của bê tông BC540 dao động khoảng 2,5-4,0 mm. Khối lượng thể tích của bê tông BC540 duy trì khá ổn định khoảng 2,69-2,76 tấn/m³ và luôn lớn hơn 2,6 tấn/m³. Mẫu ngâm nước biển có giá trị trung bình cao hơn nhẹ so với mẫu dưỡng ẩm tự nhiên, có thể do trạng thái bão hòa nước và độ ẩm cao hơn.

4.5 CHẾ TẠO KHỐI TETRAPOD BẰNG BÊ TÔNG XỈ THÉP VÀ ỨNG DỤNG THỬ NGHIỆM TRONG BẢO VỆ CÔNG TRÌNH BIỂN

Các khối Tetrapod bê tông truyền thống khoảng 2,2 tấn, tương đương thể tích 1 m^3 với bê tông BC540 có khối lượng thể tích khoảng 2,7 tấn/m^3, khối Tetrapod chế tạo thử nghiệm chỉ cần thể tích khoảng 0,8 m^3 để đạt khối lượng tương đương. Sau khi chuẩn bị vật liệu, tiến hành đổ bê tông theo từng mẻ trộn, đầm bằng đầm dùi. Các khối Tetrapod tiếp tục được bọc vải bố, tưới nước liên tục trong 7 ngày đầu và duy trì tưới ẩm ít nhất 3 lần/ngày đến 28 ngày tuổi. Ở 28 ngày tuổi, cường độ trung bình đạt 46,6 MPa, xấp xỉ kết quả thí nghiệm bê tông BC540 trong phòng và vượt khoảng 21% yêu cầu bê tông mác 400.

Sau khi hoàn thành bảo dưỡng, tiến hành bốc dỡ và vận chuyển đến khu vực ứng dụng thử nghiệm để theo dõi và đánh giá các khối Tetrapod từ tháng 5/2025. Trong thời gian ứng dụng thử nghiệm khu vực chịu tác động của ba cơn bão lớn và sau 1 năm theo dõi và đánh giá, bao gồm cả giai đoạn chịu tác động của các bão mạnh nêu trên, vị trí và thế nằm của các khối Tetrapod BC540 hầu như không thay đổi so với ban đầu. Kết quả quan sát cho thấy các khối Tetrapod vẫn ổn định, bề mặt không ghi nhận hư hỏng bất thường lớn. Kết quả thí nghiệm cho thấy sau gần 1 năm làm việc trong môi trường nước biển, trị số bật nẩy của bê tông của tất cả 5 khối Tetrapod lớn hơn 40 và do đó đảm bảo cường độ của bê tông mác 400.

KẾT LUẬN

Có thể rút ra một số kết luận như sau:

(1) Xỉ thép Formosa gồm các loại xỉ DeS, BOF010, BOF040, CAST010 và CAST040 có thành phần và tính chất khác nhau theo công đoạn luyện thép và cỡ hạt thu phẩm. Trong đó, xỉ BOF và CAST có hệ oxit chủ đạo CaO-SiO_2-Fe_2O_3-MgO, khối lượng riêng lớn và tính chất cơ học tốt. Ngược lại, xỉ DeS có hàm lượng hạt mịn, độ hút nước và thành phần sulfate cao hơn nên không phù hợp làm cốt liệu bê tông.

(2) Các chỉ tiêu cơ lý - kỹ thuật của xỉ BOF và CAST, như hàm lượng hạt mịn, độ nén dập, độ hao mòn Los Angeles, hàm lượng hạt thoi dẹt và khối lượng thể tích xốp, đáp ứng yêu cầu cốt liệu cho bê tông cấp cao theo TCVN 7570:2006 và cốt liệu lớn tái chế loại I theo TCVN 11969:2018. Các hỗn hợp xỉ thép đạt mác cốt liệu khoảng 120-140, có ưu thế rõ về khối lượng riêng, độ cứng và khả năng chống mài mòn so với đá dăm tự nhiên. Tuy nhiên, nghiên cứu mới thực hiện thí nghiệm độ trương nở cho 1 mẫu của mỗi loại xỉ thép và với vai trò quan trọng của thông số này đến tính chất của xỉ thép và độ bền lâu của bê tông xỉ thép nên cần bổ sung trên các mẫu còn lại để có kết quả đánh giá toàn diện hơn tính chất này đối với xỉ thép Formosa.

(3) Hỗn hợp BC040 được phối trộn từ BOF040, BOF010, CAST040 và CAST010 theo tỷ lệ phát thải có thể thu được khoảng 61,4% cốt liệu lớn 5-40 mm, 36,9% cốt liệu nhỏ 0,14-5 mm và khoảng 1,6% hạt mịn < 0,14 mm và có tiềm năng lớn để làm cốt liệu lớn cho bê tông. Trong các hỗn hợp xỉ thép nghiên cứu, BC540 có ưu thế rõ nhất do là hỗn hợp đa cỡ hạt 5-40 mm,

có tỷ lệ thu hồi cốt liệu lớn cao, khối lượng thể tích lớn, khả năng lèn chặt tốt và phù hợp với định hướng chế tạo bê tông nặng.

(4) Các loại bê tông có cốt liệu lớn là xỉ thép Formosa đều đạt yêu cầu bê tông nặng và mác 400. Cường độ nén 28 ngày đạt khoảng 42,4-46,4 MPa, vượt khoảng 10-21% yêu cầu mác 400; khối lượng thể tích đạt khoảng 2,63-2,72 tấn/m³, cao hơn rõ rệt so với bê tông đá dăm. Bê tông xỉ thép thể hiện ưu thế về khối lượng thể tích, cường độ ổn định và khả năng biến dạng trước phá hủy.

(5) Bê tông BC540 là phương án phù hợp nhất khi xét đồng thời các yếu tố kỹ thuật, hiệu quả và khả năng tái chế xỉ thép. Bê tông này có khối lượng thể tích ổn định khoảng 2,7 tấn/m³, cường độ nén cao, khả năng chống thấm tốt và chưa có dấu hiệu suy giảm chất lượng trong điều kiện ẩm tự nhiên và nước biển. Nghiên cứu cũng đã xác lập được các hàm tương quan cho phép dự báo cường độ bê tông BC540 theo thời gian và theo kết quả thí nghiệm súng bật nẩy, bước đầu sử dụng để đánh giá chất lượng bê tông chế tạo khối Tetrapod khi chưa có phương pháp chuẩn. Tuy vậy, kết quả nghiên cứu của luận án mới chỉ giới hạn $t \leq 400$ ngày và do đó cần được tiếp tục thực hiện trong thời gian lâu hơn và kết hợp với các thông số chuyên sâu về độ bền lâu và độ bền biển của bê tông xỉ thép trong các nghiên cứu tiếp theo.

(6) Kết quả chế tạo và thử nghiệm khối Tetrapod bằng bê tông BC540 bước đầu cho thấy tiềm năng ứng dụng của bê tông BC540 khi các khối thử nghiệm giữ nguyên vị trí sau 1 năm ứng dụng trong điều kiện thực tế, kể cả sóng lớn do bão. Tuy vậy, kết quả này chỉ mới bước đầu với các thông số đánh giá chất lượng đơn

giản, mang tính dự báo cường độ bê tông BC540 và vị trí các khối Tetrapod. Các nghiên cứu chuyên sâu về công năng của khối Tetrapod và ứng dụng tại nhiều vị trí có điều kiện sóng và tự nhiên khác nhau cần được triển khai để cung cấp dữ liệu toàn diện cho định hướng ứng dụng quy mô công nghiệp trong tương lai.

KIẾN NGHỊ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Kết quả đạt được và những hạn chế của luận án cho phép đề xuất một số hướng nghiên cứu cần ưu tiên trong giai đoạn tiếp theo sau:

1. Tiếp tục nghiên cứu tối ưu cấp phối BC540, nâng cao tính công tác, giảm phân tầng, hoàn thiện quy trình trộn, vận chuyển, đổ, đầm và bảo dưỡng bê tông cốt liệu xỉ thép cho điều kiện ứng dụng quy mô công nghiệp.

2. Mở rộng nghiên cứu độ bền lâu của bê tông BC540 trong môi trường biển, bao gồm xâm nhập chloride, kháng sulfate-magnesium, chu kỳ khô - ướt, mài mòn sóng - cát, ổn định thể tích và sự biến đổi vùng chuyển tiếp cốt liệu xỉ thép - xi măng; đồng thời kéo dài thời gian theo dõi các hàm hồi quy và quan trắc khối Tetrapod.

3. Bổ sung quan trắc hiện trường các khối Tetrapod về ổn định thủy lực, dịch chuyển, xoay lật, lún, mài mòn và suy giảm cường độ; kết hợp thí nghiệm mô hình vật lý hoặc tính toán theo Hudson và Van der Meer để hoàn thiện cơ sở thiết kế.

4. Mở rộng nghiên cứu đối với xỉ BOF và EAF từ các nhà máy luyện thép khác, chuẩn hóa quy trình xử lý, lão hóa và kiểm soát chất lượng theo định hướng ứng dụng xỉ thép trong bê tông nặng, công trình biển và các cấu kiện bảo vệ bờ.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC LIÊN QUAN ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Nguyễn Thị Lệ Huyền, Đỗ Quang Thiên (2026). "*Development of Heavyweight Concrete Incorporating Steel Slag as Aggregate for Enhanced Performance of Wave-Dissipating Blocks in Vietnam*". Hue University Journal of Science: Natural Science Vol. 135, No. 1B, 5-25. Vào ngày 24 tháng 5 năm 2026, Link gốc bài báo: https://doi.org/10.26459/hueunijns.v135i1B.8447

2. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Nguyễn Thị Lệ Huyền, Đỗ Quang Thiên, Trần Xuân Thạch, Nguyễn Thanh Hải, Nguyễn Hữu Đồng (2025). "*Recycling steel slag as substitute for natural aggregate in construction: dual benefits for GHG emission reduction and environmental protection in Vietnam"*. Hue University Journal of Science: Natural Science. Vol. 134, No. 1S-1, trang 27-41. Vào ngày 10 tháng 7 năm 2025, Link gốc bài báo: https://doi.org/10.26459/hueunijns.v134i1S-1.7855

3. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Trần Xuân Thạch, Nguyễn Thanh Hải, Đỗ Quang Thiên, Nguyễn Hữu Đồng (2025). "*Tính chất của Bê tông có cốt liệu lớn sử dụng xỉ thép của nhà máy gang thép Formosa Hà Tĩnh*". Tạp chí Khoa học Đại học Huế: Khoa học tự nhiên. Tập 134, số 1C, trang 159-170. Vào ngày 17 tháng 6 năm 2025, Link gốc bài báo: https://doi.org/10.26459/hueunijns.v134i1C

4. **Dương Trung Quốc**, Phan Hữu Lịch Duyệt, Mai Gia Quốc, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh (2026). "*Nghiên cứu cường độ chịu nén của bê tông sử dụng cốt liệu xỉ thép Formosa (Hà Tĩnh) bằng phương pháp súng bật nẩy và nén phá huỷ*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Tập 33, số 2, trang 85-97. Vào tháng 3 năm 2026, Link gốc bài báo: https://doi.org/10.64302/joshusc.v33n2.1362

5. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Nguyễn Thị Lệ Huyền, Đỗ Quang Thiên (2026). *Steel Slag as an Aggregate for Eco-Friendly Concrete: A Preliminary Study on the Enhanced Performance of Wave-Dissipating Concrete Blocks*. Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Development in Civil, Urban and Transport Engineering (CUTE2026) - Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 884 (SCOPUS). Link của Proceedings đăng vào tháng 7 năm 2026: https://link.springer.com/book/9789819219056. Link gốc bản in Proof của bài báo: https://eproofing.springer.com/ePb/downloadChapter/be9ylButfNEr4lo3lJXg9vTelxP4Y1V-ogPoZwn3BXN6UnJXYT2zQkcBMW8NcAlZoz0IDcmrgO0bCvVxx9OTLXegheYvFzfPa25KBEWcPJYt2OOxwoZudzrqoqVV7XQbZCCXM6GDbCr6Slpg8lnNiw==. Link gốc theo số DOI sẽ đăng chính thức vào tháng 2 năm 2027: https://doi.org/10.1007/978-981-92-1906-3_22.

MINISTRY OF EDUCATION AND TRAINING
HUE UNIVERSITY
UNIVERSITY OF SCIENCES

DUONG TRUNG QUOC

STUDY ON THE CHARACTERISTICS AND APPLICABILITY OF STEEL SLAG AS AGGREGATE FOR CONCRETE IN MARINE STRUCTURES

Discipline: Geology
Code: 9440201

SUMMARY OF THE DOCTORAL DISSERTATION IN GEOLOGY

HUE - 2026

The research was conducted at the Faculty of Geography and Geology, University of Sciences, Hue University.

Scientific supervisors:
Assoc. Prof. Dr. Tran Thanh Nhan
Assoc. Prof. Dr. Do Quang Thien

Reviewer 1: .....
Reviewer 2: .....
Reviewer 3: .....

The dissertation will be defended before the Dissertation Examination Committee at the University of Sciences, Hue University, at …… hours on …… / …… / …… .

The dissertation is available for consultation at the library: ……

INTRODUCTION

1. RATIONALE FOR THE STUDY

The rapid development of the iron and steel industry generates substantial quantities of steelmaking slag, commonly referred to as steel slag. Worldwide, slag generation averages approximately 110-140 kg per tonne of steel; at major Vietnamese integrated steelworks, such as Formosa Ha Tinh and Hoa Phat Dung Quat, it may reach around 150 kg per tonne. With Vietnam's steel output exceeding 24.7 million tonnes in 2025, ranking eleventh globally, annual steel slag generation is considerable; the combined output of the two major plants in central Vietnam may exceed 3 million tonnes per year.

Unlike blast-furnace slag, steel slag has a more complex composition because it depends on the raw materials, scrap, fluxes, and steel-refining stages. Its use in construction therefore cannot be based solely on practical experience or isolated test results; comprehensive investigation of its mechanical, chemical, mineralogical, environmental, volumetric stability, and in-service characteristics is required. This explains why countries with advanced steel industries have developed standards, technical guidelines, and specialized R&D centers to promote safe, effective, and economically valuable uses of steel slag. Meanwhile, natural construction materials in Vietnam, particularly crushed stone and river sand, are becoming increasingly scarce and more expensive to extract and transport, especially in lowland and coastal regions. At the same time, the demand for heavyweight and high-strength concrete for marine structures, wave-dissipating units, gravity

structures, and coastal erosion control is growing. Owing to its high particle density, hardness, and abrasion resistance, properly treated and quality-controlled steel slag has considerable potential as an alternative aggregate.

Against this background, the dissertation entitled "*Study on the characteristics and applicability of steel slag as aggregate for concrete in marine structures*" was undertaken to establish the scientific and practical basis for recycling steel slag as concrete aggregate. The findings may help reduce pressure on slag stockpiles and extraction of natural resources while promoting the production of heavyweight concrete from industrial by-products for coastal protection and sustainable construction within a circular economy.

2. RESEARCH OBJECTIVES

2.1. General objective

To elucidate the composition, properties, and suitability of steel slag for construction applications and to successfully demonstrate the use of steel-slag-aggregate concrete in marine structures.

2.2. Specific objectives

- Determine the composition and properties of different types of Formosa steel slag and assess their suitability for construction, particularly as concrete aggregates.

- Evaluate the properties of Formosa steel slag blends proportioned according to the plant's slag generation ratios, with a view to using them as coarse aggregates in concrete.

- Produce and characterize concrete incorporating Formosa steel slag blends with different coarse-aggregate size ranges, targeting M400-grade heavyweight concrete.

- Conduct a trial application of Tetrapod units made from Formosa steel-slag-aggregate concrete for the protection of marine structures.

3. RESEARCH CONTENT

To achieve these objectives, the dissertation addresses the following tasks:

- Review the generation, research, and use of steel slag in construction worldwide, in Vietnam, and at the FHS plant to establish the direction of the study.

- Collect, classify, preserve, and prepare Formosa steel slags and other materials for testing, ensuring representative samples consistent with the study objectives and scope.

- Determine the composition and physicomechanical properties of individual Formosa steel slags and their blends for potential use in construction and as concrete aggregates.

- Design mix proportions, manufacture, and test concretes incorporating Formosa steel slag blends as coarse aggregates; compare them with conventional concrete to assess compliance with M400 heavyweight concrete requirements and suitability for marine structures.

- Produce five Tetrapod units using Formosa steel-slag-aggregate concrete and conduct a trial application for coastal structure protection.

4. RESEARCH OBJECTS AND SCOPE

4.1. Research materials

- The Formosa steel slags studied comprise desulfurization slag (DeS), basic oxygen furnace (BOF) slag, and casting-stage slag (CAST). BOF and CAST slags are each separated into two particle-size ranges: 0–10 mm (BOF010 and CAST010) and 0–40 mm (BOF040 and CAST040). The five principal slag types are therefore as follows:

- DeS slag, without particle-size separation, representing 11.0% of the slag generated.

- BOF040 and BOF010, accounting for 65.6% and 16.4%, respectively.

- CAST040 and CAST010, accounting for 5.6% and 1.4%, respectively.

Three crushed-stone fractions (5–10, 5–20, and 10–40 mm) and one construction sand, currently used as coarse and fine aggregates in ready-mixed concrete in Ha Tinh Province, served as reference aggregates.

4.2. Scope of the research

- Sampling period and production history: Formosa steel slag samples had to originate from three different production batches, undergo treatment at the plant, and remain in the plant's storage area for at least six months. Sampling took place from December 2023 to February 2024; the corresponding three batches had been generated and placed in storage between June and August 2023. Crushed stone and sand samples were also collected during this period.

- Intended marine application: unreinforced gravity-type wave-dissipating units, specifically Tetrapods.

- Duration of concrete property evaluation and Tetrapod field trials: one year, during 2025–2026.

- Proposed field-trial area: a coastal site in Ha Tinh Province or along the coast near the FHS plant.

5. RESEARCH METHODS

Sampling and preservation: conducted according to TCVN 7572-1:2006 and TCVN 11969:2018, with reference to JIS A 5015:2013, JIS A 5011-4:2018, and BS EN 13242:2002+A1:2007.

Physicomechanical and technical testing: particle-size distributions and physicomechanical properties of steel slags, slag aggregate blends, slag concretes, reference concretes, and Tetrapod units were determined according to TCVN 7570:2006, TCVN 7572-1–20:2006, TCVN 8228:2009, TCVN 9901:2014, and relevant reference standards.

Chemical and environmental analyses: chemical composition, hazardous constituents, and environmental characteristics were determined in accordance with applicable Vietnamese technical regulations, including QCVN 07:2009/BTNMT, QCVN 08-MT:2015/BTNMT, QCVN 09-MT:2015/BTNMT, QCVN 10-MT:2015/BTNMT, and QCVN 40:2011/BTNMT, with reference to JIS A 5015:2013.

Simulation of service conditions: leaching, curing, seawater immersion, strength monitoring, and concrete quality assessment were carried out to simulate the use of steel slag in construction and marine structures.

6. THESES TO BE DEFENDED

The dissertation advances the following propositions:

- Proposition 1: After on-site processing and recovery, four of the five Formosa slag types—BOF040, BOF010, CAST040, and CAST010—and blends prepared in accordance with the plant's generation ratios have compositions and properties meeting the requirements for coarse aggregates in M400 heavyweight concrete. These findings provide a scientific basis for selecting and using Formosa steel slag as concrete aggregate.

- Proposition 2: In addition to achieving the highest recovery and reuse efficiency due to its widest particle-size range (5–40 mm), the BC540 slag blend exhibits the best particle packing and structural stability. Consequently, BC540 concrete made with this blend achieves the highest and most stable strength and bulk density. This provides a basis for using steel-slag concrete to manufacture Tetrapod units.

7. NOVEL CONTRIBUTIONS OF THE DISSERTATION

The novel contributions of the dissertation are as follows:

- Contribution 1: The dissertation establishes a scientific basis for the composition, properties, and suitability of Formosa steel slag as concrete aggregate. The results show that, following appropriate treatment, recovery, and aging, BOF040, BOF010, CAST040, and CAST010, together with their blends, can be used as coarse aggregates in M400 heavyweight concrete. This approach turns the high particle density of steel slag, often regarded as a disadvantage, into a technical advantage in gravity-type marine structures.

- Contribution 2: Blending the different slag types in their generation proportions facilitates maximum utilization and recycling within the same steel plant. The BC540 blend offers the highest recovery rate and advantages in packing efficiency and structural stability, resulting in BC540 concrete with consistently high strength and bulk density while requiring the least fine aggregate. Its applicability has been preliminarily demonstrated by manufacturing and trial use of five Tetrapod units for marine structure protection.

8. DATA AND DOCUMENTARY BASIS OF THE DISSERTATION

The principal data and materials were obtained from the research project "Investigation of the physicochemical and environmental characteristics of Formosa steel slag and pilot use as aggregate in coastal protection structures in Ha Tinh province".

9. SCIENTIFIC AND PRACTICAL SIGNIFICANCE

9.1. Scientific significance

The dissertation provides a database on the physicochemical, environmental, physicomechanical, and technical characteristics of Formosa steel slags, slag blends, and steel-slag concrete. The findings clarify the suitability of steel slag as aggregate for heavyweight concrete and marine concrete, and provide supporting evidence for developing standards and technical guidelines on its use in construction.

9.2. Practical significance

The dissertation demonstrates the feasibility of substituting Formosa steel slag for natural aggregates in M400 heavyweight concrete and Tetrapod wave-dissipating units. The findings can

reduce the extraction of natural materials and pressure on slag stockpiles, enhance industrial by-product recycling, and advance recycled construction materials for coastal protection structures.

10. DISSERTATION STRUCTURE

In addition to the introduction, conclusions, recommendations, references, and appendices, the dissertation comprises four main chapters:

Chapter 1: Overview of the research subject and related studies.

Chapter 2: Scientific basis, research methods, and scope of investigations.

Chapter 3: Composition and properties of Formosa steel slag.

Chapter 4: Properties of steel slag concrete and trial application of Tetrapod blocks.

CHAPTER 1
OVERVIEW OF THE RESEARCH SUBJECT AND RELATED STUDIES

1.1. TYPES OF STEEL SLAG AND THEIR PROCESSING AND RECOVERY

Steel slag is a major by-product of steelmaking, typically generated at approximately 11-15% of finished steel mass. The two predominant crude-steel production technologies are the basic oxygen furnace (BOF) and the electric arc furnace (EAF). BOF-based production generates three categories of slag including DeS, BOF, and CAST, whereas EAF-based production generates EAF and CAST slags. The relative shares of BOF and EAF technologies vary worldwide with feedstock availability, energy resources, and national policies; BOF steelmaking still represents over 60% of global crude-steel output. In Vietnam, major steelworks such as FHS and HPDQ predominantly employ BOF technology and collectively generate more than 3 million tonnes of steel slag annually.

At the FHS plant, BOF-based steelmaking comprises three major stages associated with DeS, BOF, and CAST slag generation. Following processing, the slag is recovered as five separately stored products: BOF010, BOF040, CAST010, CAST040, and DeS, prior to use or further treatment.

1.2. RESEARCH AND USE OF STEEL SLAG IN CONSTRUCTION WORLDWIDE

1.2.1. International research and applications

Worldwide, the large quantities generated and favorable physicomechanical properties have led to extensive research and

use of steel slag in construction. Its high hardness, rough surface, abrasion and impact resistance, and shear strength make it a potential substitute for natural aggregates in road subgrades and bases, asphalt concrete, fill, cement concrete, and certain hydraulic and coastal works.

1.2.2. Research and applications in Vietnam

In Vietnam, the use of iron- and steelmaking slags has attracted research interest for some time, but much of the early work focused on ironmaking slag, particularly granulated blast-furnace slag as a mineral additive for cement and concrete. Overall, domestic steel slag studies remain fragmented, with limited experimental scales and insufficient scientific evidence to support comprehensive standards for its use.

1.3. SCIENTIFIC RATIONALE FOR USING STEEL SLAG AS CONCRETE AGGREGATE IN MARINE STRUCTURES

The successful use of steel slag as aggregate in heavyweight concrete for marine structures provides dual benefits by protecting the environment and conserving resources in the construction and iron-and-steel industries.

CHAPTER 2
SCIENTIFIC BASIS, RESEARCH METHODS, AND SCOPE OF INVESTIGATIONS

2.1. COLLECTION AND PREPARATION OF MATERIAL SAMPLES

Three sampling campaigns were conducted for five steel slag types: DeS, BOF040, BOF010, CAST040, and CAST010.

Fifteen slag samples, totaling approximately 43 tonnes, were collected for the research.

2.2. NATURAL MATERIALS OF ENDOGENOUS AND EXOGENOUS GEOLOGICAL ORIGIN USED TO EVALUATE STEEL SLAG PROPERTIES

Samples of three crushed-stone fractions and one construction sand currently used as aggregates in ready-mixed concrete in Ha Tinh Province were also collected. In total, approximately 4.5 tonnes of crushed stone and 3 tonnes of sand were obtained.

2.3. SCIENTIFIC RATIONALE FOR USING STEEL SLAG IN THE PREVENTION OF COASTAL GEOLOGICAL HAZARDS

Coastal erosion is a widespread exogenous geological hazard that is becoming more severe under climate change, sea-level rise, storms, and tropical depressions, threatening coastal infrastructure, economic security, and livelihoods. In the context of using steel slag as concrete aggregate in marine structures, this section clarifies the scientific basis for wave-dissipating units, examines the role of concrete bulk density, and explains how the high particle density of steel slag can become a technical advantage in producing heavyweight concrete for these units.

CHAPTER 3
COMPOSITION AND PROPERTIES OF FORMOSA STEEL SLAG

3.1. COMPOSITION AND PROPERTIES OF FORMOSA STEEL SLAG

The analyses indicate that FHS BOF and CAST slags exhibit the typical chemical composition of oxidizing steel slags, with

the CaO-SiO_2-Fe_2O_3-MgO system accounting for approximately 82-87% by mass and showing little dependence on particle size. The fCaO content of BOF and CAST slags is only about 0.13-0.91%, well below commonly applied thresholds for construction materials. Their characteristic phases include $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$, $Ca_2Fe_2O_5$, Fe_3O_4, Fe_2O_3, FeO, and calcium silicates. By contrast, DeS slag differs in composition, with elevated CaO and SO_3 and sulfate-bearing minerals such as ettringite; it is therefore not preferred for direct use as concrete aggregate. In general, the concentrations of hazardous inorganic constituents in Formosa slags are below the permissible limits of applicable regulations.

BOF040 and CAST040 contain predominantly coarse aggregate fractions, approximately 68.5% and 68.8%, respectively, making them more suitable for screening, blending, and use as coarse concrete aggregates. In contrast, BOF010 and CAST010 consist mainly of fine aggregate, with the 2.5-5 mm fraction accounting for over 63%, and are more suitable as fine aggregates or blending materials. DeS slag has a particularly high fine-particle content, including 15.1% below 0.14 mm, indicating an unfavorable grading that requires processing, blending, or exclusion when considering concrete aggregate applications.

BOF and CAST slags have high particle densities, approximately 3.43-3.59 g/cm^3, substantially exceeding those of natural aggregates and indicating their potential for heavyweight concrete. DeS slag has a markedly lower particle density and very high water absorption, making it unsuitable for direct use as concrete aggregate.

BOF and CAST slags exhibit high loose bulk densities, generally around 1.87-2.06 t/m³, significantly greater than those of many natural aggregates. Their interparticle void contents range from approximately 33.6% to 41.2%, with CAST040 displaying lower void content and therefore more favorable particle packing. DeS slag has a very low loose bulk density of only about 1.05 t/m³ and is unsuitable as concrete aggregate.

Average moisture contents of BOF and CAST slags are approximately 2.0-3.8%, whereas DeS slag reaches about 28.3% owing to its high proportion of small and fine particles. The content of particles smaller than 0.075 mm in BOF and CAST slags is below 1.5%, meeting the requirements for concrete aggregate. DeS slag has approximately 8.1% fine particles and is unsuitable for this use. Formosa steel slags generally contain negligible mud, clay, lightweight material, foreign matter, or organic impurities.

BOF and CAST slags exhibit low aggregate crushing values, particularly for the 5-10 mm fraction, which ranges from about 2.92% to 4.33% in the dry condition, indicating good resistance to crushing and suitability as coarse concrete aggregate. Los Angeles abrasion losses range from approximately 12.47% to 20.16%, far below the 50% limit specified for coarse aggregates by TCVN 7570:2006 and TCVN 11969:2018. These standards specify maximum flaky and elongated particle contents of 15% and 35%, respectively; BOF and CAST slags readily satisfy these requirements.

Mortar-bar tests showed expansions of less than 0.05% after three months and less than 0.1% after six months for all slag types, indicating no significant potential for alkali–silica

reaction under the test conditions. After 196 days of testing, the measured expansions of BOF010, BOF040, CAST040, and CAST010 samples were approximately 5.45%, 5.06%, 3.11%, and 1.47%, respectively, all exceeding the 1% threshold. When steel slag is incorporated into concrete, however, the strength and stability of the concrete must also be monitored over time, because its actual performance depends not only on free expansion but also on expansive pressure and restraint provided by the cementitious matrix.

3.2. PROPERTIES OF FORMOSA STEEL SLAG BLENDS FOR USE AS CONCRETE AGGREGATES

Four slag types including BOF040, BOF010, CAST040, and CAST010 were blended in adjusted generation proportions of 73.7%, 18.4%, 6.3%, and 1.6%, respectively, to produce six blends. BC510, BC520, and BC1040 have grading curves relatively consistent with the coarse-aggregate grading envelope, whereas BC540 is finer and should be combined with an appropriate quantity of natural sand during concrete mix design.

The slag blends have broadly comparable particle densities, bulk densities, and water absorption, with densities about 1.2-1.3 times those of natural aggregate, while meeting the requirements for Type I recycled coarse aggregates. BC540 achieves better packing owing to its broad 5–40 mm particle-size range, providing a density advantage in concrete. Multisized slag blends pack more efficiently, resulting in higher loose bulk density and lower void content. Their loose bulk densities are about 1.3-1.4 times that of Ha Tinh crushed stone.

The Formosa slag blends contain no organic impurities, lightweight materials, or foreign matter. The natural reference aggregates also satisfy requirements for concrete above class B30 and Type I recycled coarse aggregates. Most slag blends meet aggregate strength grades of about 140 and the requirements for coarse aggregates used in concrete of class B30/M400 or higher.

The Formosa slag blends have abrasion losses well below the 50% limit for coarse concrete aggregates. Their flaky-particle contents are also very low, ranging from approximately 1.3% to 3.9%, well below the specified limits.

The Formosa slag blends are intended for use as coarse aggregates (> 5 mm), whereas the mortar-bar method for assessing alkali-silica reactivity requires aggregate particles smaller than 5 mm. Therefore, this test was not performed directly on the blends.

CHAPTER 4. PROPERTIES OF STEEL SLAG CONCRETE AND TRIAL APPLICATION OF TETRAPOD BLOCKS

4.1. MIX DESIGN, PRODUCTION, AND CURING OF CONCRETE SPECIMENS

Six steel-slag concretes were prepared using BC510, BC520, BC1020, BC1040, BC2040, and BC540 blends as coarse aggregates and Ha Tinh sand as fine aggregate. In addition, three reference concretes were produced using Ha Tinh crushed stone of sizes 5-10, 5-20, and 10-40 mm. Each concrete was named after its coarse aggregate.

Because conventional concrete mix design methods are generally intended for natural aggregates, the study adopted the provisions of Official Letter No. 1784/BXD-VP for M400 concrete with a target slump of 6–8 cm. This approach is appropriate for unreinforced mass concrete, while allowing a higher content of coarse steel slag aggregate, reducing sand consumption, and limiting segregation associated with the high particle density of slag. PCB40 cement was used to achieve M400 concrete, together with Sikacrete PP-1 to improve sulfate resistance and Sikaplast-316 to improve workability and reduce water demand.

4.2. PROPERTIES OF STEEL-SLAG CONCRETES DURING CURING

4.2.1. Deformation at compressive failure

The compressive failure deformation (d_{phN}) of steel-slag concrete varied considerably among specimens and did not exhibit a clear relationship with curing age. Nevertheless, mean values generally remained stable or increased slightly, reaching approximately 3-4 mm at 28 days.

4.2.2. Compressive strength

At 28 days, mean compressive strengths ranged from 42.4 to 46.4 MPa, approximately 10-21% above the required $R_{28} \geq 38.5$ MPa, demonstrating that the slag concretes satisfied the strength requirements. Differences among concrete mixtures were relatively small: BC1020 showed the lowest strength (42.4 MPa), whereas BC540 had the highest (46.4 MPa).

4.2.3. Bulk density

The bulk densities of steel-slag concretes remained relatively stable during curing and all reached $\rho_C \geq 2.6$ t/m³, satisfying the

heavyweight-concrete criterion. The mixtures formed two groups: BC520, BC1040, and BC540 had higher densities ($\rho_C \geq$ 2.7 t/m³), whereas BC510, BC1020, and BC2040 had slightly lower densities but still met the requirement.

4.3. ADDITIONAL INVESTIGATION OF SELECTED STEEL-SLAG CONCRETE PROPERTIES

4.3.1. Splitting tensile strength

The splitting tensile strength of BC540 concrete increased with curing age, averaging approximately 3.7, 5.2, and 6.4 MPa at 3, 7, and 28 days, respectively, while tensile failure deformation remained relatively stable at 1.5-1.6 mm. The compressive-to-splitting-tensile strength ratio (R_N/R_{KB}) ranged from 7.22 to 9.39, below the corresponding value of 12.50 for conventional concrete.

4.3.2. Modulus of elasticity

BC540 concrete exhibited a 28-day compressive strength of R_{N28} = 46.4 MPa and a static modulus of elasticity of approximately 44 GPa, substantially higher than that of conventional concrete of a comparable strength class (about 30-36 GPa).

4.3.3. Prismatic compressive strength

The prismatic compressive strength of BC540 concrete ranged from 31.7 to 42.3 MPa, corresponding to an equivalent compressive strength R_N = 38.0-50.8 MPa using the conversion factor of 1.2 specified in TCVN 3118:2022.

4.3.4. Resistance to water penetration

Up to the final pressure grade W12, none of the six specimens showed water penetration in the form of droplets or damp patches. This indicates very good water penetration resistance of BC540 concrete, consistent with its intended marine applications.

4.4. TIME-DEPENDENT PROPERTIES OF BC540 CONCRETE

The compressive strength of BC540 concrete continued to increase beyond 28 days and remained stable up to 393 days under both natural moist curing and seawater immersion. Mean strengths consistently exceeded the M400 requirement, with no evidence of strength deterioration over time. Compressive failure deformation ranged from approximately 2.5 to 4.0 mm. Bulk density remained relatively stable at around 2.69-2.76 t/m³ and always exceeded 2.6 t/m³. Seawater-immersed specimens showed slightly higher mean bulk densities than naturally moist-cured specimens, possibly because of their higher degree of saturation and moisture content.

4.5. MANUFACTURE AND TRIAL APPLICATION OF STEEL-SLAG-CONCRETE TETRAPODS FOR MARINE STRUCTURE PROTECTION

A conventional concrete Tetrapod weighing approximately 2.2 tonnes has a volume of roughly 1 m³. With BC540 concrete having a bulk density of approximately 2.7 t/m³, the trial Tetrapod required only about 0.8 m³ to achieve a comparable mass. Following material preparation, concrete was placed in successive batches and compacted using an internal vibrator. The Tetrapods were wrapped in burlap and continuously wetted during the first seven days, followed by moist curing at least three times daily until 28 days. At 28 days, mean compressive strength reached 46.6 MPa, comparable to laboratory BC540 results and approximately 21% above the M400 requirement.

After curing, the Tetrapods were lifted and transported to the field demonstration site, where monitoring and evaluation began

in May 2025. The area was affected by three major storms during the trial. After one year of monitoring, including these severe storm events, the positions and orientations of the BC540 Tetrapods were virtually unchanged. Visual observations indicated that the units remained stable, without major unusual surface damage. After nearly one year of exposure to seawater, rebound hammer readings for all five Tetrapods exceeded 40, indicating compliance with the M400 concrete strength criterion according to the evaluation adopted in the study.

CONCLUSIONS

The principal conclusions are as follows:

(1) The Formosa steel slags DeS, BOF010, BOF040, CAST010, and CAST040 differ in composition and properties according to the steelmaking stage and the size fraction recovered. BOF and CAST slags are dominated by the CaO-SiO_2-Fe_2O_3-MgO oxide system and have high particle density and good mechanical properties. By contrast, DeS slag has a higher fine-particle content, water absorption, and sulfate content and is unsuitable as concrete aggregate.

(2) The physicomechanical and technical properties of BOF and CAST slags including fine-particle content, aggregate crushing value, Los Angeles abrasion loss, flaky and elongated particle content, and loose bulk density meet the requirements for aggregates in high-grade concrete under TCVN 7570:2006 and for Type I recycled coarse aggregates under TCVN 11969:2018. The slag blends achieve aggregate strength grades of about 120-140 and have clear advantages in particle density, hardness, and abrasion resistance compared with natural crushed stone. However, expansion testing was performed on only one sample of each slag type. Given the importance of expansion to slag properties and the long-term durability of slag concrete, additional tests on the remaining samples are needed for a more comprehensive evaluation of Formosa slags.

(3) The BC040 blend, consisting of BOF040, BOF010, CAST040, and CAST010 in their generation proportions, can yield approximately 61.4% coarse aggregate (5-40 mm), 36.9% fine aggregate (0.14-5 mm), and 1.6% particles smaller than 0.14

mm, demonstrating substantial potential as a source of coarse concrete aggregate. Among the investigated blends, BC540 is the most advantageous because its wide 5-40 mm size distribution supports high coarse-aggregate recovery, high bulk density, favorable packing, and the production of heavyweight concrete.

(4) All concretes incorporating Formosa steel slag as coarse aggregate met the requirements for M400 heavyweight concrete. Their 28-day compressive strengths were approximately 42.4-46.4 MPa, exceeding the M400 requirement by 10-21%; bulk densities were approximately 2.63-2.72 t/m³, substantially above those of crushed-stone concrete. Steel-slag concretes offered advantages in bulk density, stable strength, and deformation capacity before failure.

(5) BC540 concrete is the most suitable option when technical performance, efficiency, and steel slag recycling are considered together. It has a stable bulk density of around 2.7 t/m³, high compressive strength, good resistance to water penetration, and no observed quality deterioration under natural moist curing or seawater immersion. Correlations were developed to predict BC540 compressive strength over time and from rebound hammer test results, providing a preliminary approach for assessing concrete quality in Tetrapod units where a standard evaluation method is unavailable. Nevertheless, the dissertation covers only $t \leq 400$ days. Longer monitoring and more specialized investigations of long-term durability and resistance to marine exposure are necessary.

(6) The fabrication and field trial of BC540 concrete Tetrapods provide preliminary evidence of their application

potential: the units maintained their positions after one year under actual marine conditions, including large storm waves. However, this evaluation remains preliminary and relies on relatively simple indicators, mainly estimates of BC540 concrete strength and the positions of the Tetrapods. More detailed investigations of Tetrapod hydraulic performance and trials at sites with different wave and natural conditions are needed to provide a comprehensive basis for future industrial-scale implementation.

RECOMMENDATIONS FOR FUTURE RESEARCH

The findings and limitations of the dissertation suggest the following priorities for future research:

1. Further optimize the BC540 mix proportions, improve workability, reduce segregation, and refine the procedures for mixing, transporting, placing, compacting, and curing steel-slag-aggregate concrete for industrial-scale applications.

2. Extend research on the marine durability of BC540 concrete, including chloride ingress, sulfate–magnesium resistance, wetting–drying cycles, wave–sand abrasion, volumetric stability, and changes in the steel-slag-aggregate–cement interfacial transition zone; also extend the monitoring period for regression models and Tetrapod field observations.

3. Expand field monitoring of Tetrapods to include hydraulic stability, displacement, rotation and overturning, settlement, abrasion, and strength deterioration; combine this with physical model testing or design calculations based on Hudson and Van der Meer to strengthen the design basis.

4. Extend investigations to BOF and EAF slags from other steelworks and standardize treatment, aging, and quality-control procedures for their application in heavyweight concrete, marine structures, and coastal protection units.

LIST OF RELATED PUBLISHED SCIENTIFIC WORKS

1. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Nguyễn Thị Lệ Huyền, Đỗ Quang Thiên (2026). "*Development of Heavyweight Concrete Incorporating Steel Slag as Aggregate for Enhanced Performance of Wave-Dissipating Blocks in Vietnam*". Hue University Journal of Science: Natural Science, Vol. 135, No. 1B, pp. 5–25. Published May 24, 2026. Article DOI: https://doi.org/10.26459/hueunijns.v135i1B.8447.

2. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Nguyễn Thị Lệ Huyền, Đỗ Quang Thiên, Trần Xuân Thạch, Nguyễn Thanh Hải, Nguyễn Hữu Đồng (2025). "*Recycling steel slag as substitute for natural aggregate in construction: dual benefits for GHG emission reduction and environmental protection in Vietnam*". Hue University Journal of Science: Natural Science, Vol. 134, No. 1S-1, pp. 27–41. Published July 10, 2025. Article DOI: https://doi.org/10.26459/hueunijns.v134i1S-1.7855.

3. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Trần Xuân Thạch, Nguyễn Thanh Hải, Đỗ Quang Thiên, Nguyễn Hữu Đồng (2025). "*Properties of Concrete Containing Coarse Aggregate from Formosa Ha Tinh Steelworks Slag*" [in Vietnamese]. Hue University Journal of Science: Natural Science, Vol. 134, No. 1C, pp. 159–170. Published June 17,

2025. Article DOI as given in the source: https://doi.org/10.26459/hueunijns.v134i1C.

4. **Dương Trung Quốc**, Phan Hữu Lịch Duyệt, Mai Gia Quốc, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh (2026). "*Investigation of the Compressive Strength of Concrete Incorporating Formosa (Ha Tinh) Steel Slag Aggregate Using Rebound Hammer and Destructive Compression Tests*" [in Vietnamese]. Journal of Science and Technology, University of Sciences, Hue University, Vol. 33, No. 2, pp. 85–97. Published March 2026. Article DOI: https://doi.org/10.64302/joshusc.v33n2.1362.

5. **Dương Trung Quốc**, Trần Thanh Nhàn, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Nguyễn Thị Lệ Huyền, Đỗ Quang Thiên (2026). "*Steel Slag as an Aggregate for Eco-Friendly Concrete: A Preliminary Study on the Enhanced Performance of Wave-Dissipating Concrete Blocks*". Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Development in Civil, Urban and Transport Engineering (CUTE2026), Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 884 (Scopus). Proceedings link announced in July 2026: https://link.springer.com/book/9789819219056. Original proof link: https://eproofing.springer.com/ePb/downloadChapter/be9ylButfNEr4lo3lJXg9vTelxP4Y1V-ogPoZwn3BXN6UnJXYT2zQkcBMW8NcAlZoz0IDcmrgO0bCvVxx9OTLXegheYvFzfPa25KBEWcPJYt2OOxwoZudzrqoqVV7XQbZCCXM6GDbCr6Slpg8lnNiw==. DOI link indicated as due for formal publication in February 2027: https://doi.org/10.1007/978-981-92-1906-3_22.