BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

TRỊNH HOÀNG SƠN

NGHIÊN CỨU MỘT SỐ TÍNH CHẤT CHỦ YẾU CỦA BÊ TÔNG GEOPOLYMER TRO BAY CỐT LIỆU XỈ THÉP TRONG XÂY DỰNG MẶT ĐƯỜNG Ô TÔ Ở VIỆT NAM

Ngành: Kỹ thuật Xây dựng Công trình Giao thông
Mã số: 9.58.02.05
Chuyên ngành: Xây dựng đường ô tô và đường thành phố

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – 2020

Công trình được hoàn thành tại:

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. Đào Văn Đông

2. PGS.TS. Nguyễn Quang Phúc

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Giao thông vận tải vào hồi giờ ngày tháng năm 20.....

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam

- Trung tâm Thông tin-Thư viện, Đại học GTVT

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Khi ngành công nghiệp xây dựng phát triển đòi hỏi nhu cầu về cốt liệu tăng lên trong khi cốt liệu tự nhiên ngày càng khan hiếm, thì việc sử dụng vật liệu nhân tạo thay thế cốt liệu khoáng tự nhiên là xu hướng tất yếu. Bên cạnh đó, chất thải công nghiệp đang gia tăng đáng kể dẫn đến nhiều chủ đề môi trường trong trường hợp không được xử lý hợp lý. Ví dụ, tại Việt Nam, ước tính có khoảng 1.5 triệu tấn xỉ thép được thải ra mỗi năm và chủ yếu được đem đi chôn lấp. Điều này gây lãng phí đất đai, tài nguyên, năng lượng, gây ô nhiễm môi trường và có hại cho sức khỏe con người do hàm lượng kim loại nặng cao. Với một số tính chất vượt trội như hình khối, góc cạnh nhiều, thô ráp, độ rỗng lớn, bề mặt nhám làm các hạt có thể chèn móc vào nhau, ổn định cao nếu được đầm chặt; hàm lượng tạp chất hữu cơ và hạt thoi dẹt thấp, độ mài mòn Los-Angeles, độ nén dập trong xi lanh đều rất tốt, xỉ thép (thải phẩm của quá trình luyện thép) có thể dùng thay thế cho cốt liệu đá dăm. Trên thế giới, xỉ thép đã được nghiên cứu, sử dụng làm cốt liệu của bê tông nhựa (BTN) trong xây dựng đường ô tô ở nhiều nước như: Mỹ, Nga, Trung Quốc... Tuy nhiên, xỉ thép ít được dùng làm cốt liệu trong bê tông xi măng (BTXM). Bởi nhiều nghiên cứu chỉ ra quá trình thủy hóa gây ra sự trương nở thể tích cho BTXM sử dụng cốt liệu xỉ thép [49].

Bê tông geopolymer (GPC) được coi là vật liệu mới thân thiện với môi trường do trong thành phần đã tận dụng tro bay (chất thải nhà máy nhiệt điện) và không sử dụng xi măng. GPC có tiềm năng ứng dụng xây dựng trong tương lai do có được một số ưu điểm nổi bật, như cường độ cao, chống ăn mòn tốt, độ bền nhiệt cao, co ngót và từ biến thấp … [40, 45, 46]. Theo các kết quả nghiên cứu của Ashadi H.W [68], Nitendra Palanka [83], M.S.H. Khan [77]… đã chỉ ra rằng trong bê tông geopolymer quá trình phát triển cường độ là quá trình polyme hoá các hợp chất vô cơ và ít có phản ứng hóa học giữa CaO và oxít kim loại gây trương nở thể tích. Do đó, xỉ thép có thể dùng để làm cốt liệu thay thế cho cốt liệu đá dăm và cát truyền thống. Điều này nhằm hạn chế các tác động đến môi trường từ quá trình khai thác cát đá tự nhiên (tránh làm sạt lở bờ sông, nổ mìn mỏ đá…), tận dụng hiệu quả chất thải tránh gây ô nhiễm môi trường. GPC và sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho GPC đã được nghiên cứu và đạt được những kết quả ứng dụng nhất định ở trong và ngoài nước [13, 17, 18, 25, 68, 77, 83]. Tuy nhiên, việc sử dụng xỉ thép để thay thế cả cho cốt liệu nhỏ (cát) để chế tạo GPC đến nay vẫn chưa được quan tâm nghiên cứu.

Xuất phát từ thực tế đó, luận án đã đề xuất và thực hiện đề tài với tên gọi: "*Nghiên cứu một số tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trong xây dựng mặt đường ô tô ở Việt Nam*".

2. Mục đích nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là nghiên cứu sử dụng được xỉ thép làm cốt liệu để thay thế cả cốt liệu lớn (đá dăm) và cốt liệu nhỏ (cát) để sản xuất bê tông geopolymer dùng cho các ứng dụng xây dựng nói chung và mặt đường nói riêng, cụ thể như sau:

Xác định được các tính chất cơ lý và thành phần hóa khoáng của cốt liệu xỉ thép lò hồ quang điện từ nhà máy gang thép Thái Nguyên, đánh giá sự phù hợp của cốt liệu xỉ thép trong bê tông geoplymer tro bay;

Xác định được thành phần của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép có thể sử dụng được trong kết cấu mặt đường cứng;

Xác định các tính chất chủ yếu của các hỗn hợp bê tông và bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép có cường độ đặc trưng 25, 30, 35 MPa gồm: Tính công tác, thời gian đông kết, vi cấu trúc, cường độ nén theo thời gian, cường độ chịu kéo uốn, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, độ mài mòn, co ngót và hệ số giãn nở do nhiệt. Các kết quả thí nghiệm được so sánh với bê tông xi măng truyền thống và bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu tự nhiên.

Xác định các kết cấu mặt đường cứng điển hình sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép có thể áp dụng được ở Việt Nam.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu một số tính chất cơ bản của hỗn hợp bê tông và bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trên các mẫu được chế bị và tiến hành thực nghiệm tại phòng thí nghiệm.

4. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp kết hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm trong phòng.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Làm rõ được cơ sở khoa học của sự kết hợp giữa chất kết dính geopolymer tro bay và cốt liệu xỉ thép thông qua cấu trúc vi mô, cơ chế phản ứng.

Phân tích và làm rõ được tính chất và thành phần của xỉ thép từ đó đưa ra được phương pháp thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép.

Làm rõ được các tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép để phục vụ tính toán thiết kế và thi công mặt đường ô tô ở Việt Nam.

Phân tích, tính toán và đề xuất áp dụng một số kết cấu mặt đường cứng điển hình sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép.

Góp phần hiện thực hóa chủ trương tiết kiệm tài nguyên thiên nhiên, bảo vệ môi trường và tận dụng vật liệu tái chế, góp phần phát triển một loại vật liệu xây dựng mới thân thiện với môi trường.

6. Cấu trúc của luận án

Luận án gồm phần mở đầu, 4 chương chính, phần kết luận, kiến nghị và hướng nghiên cứu tiếp theo, tài liệu tham khảo và phụ lục.

Chương 1. TỔNG QUAN VỀ BÊ TÔNG GEOPOLYMER TRO BAY SỬ DỤNG CỐT LIỆU XỈ THÉP VÀ MỘT SỐ TÍNH CHẤT CHỦ YẾU CỦA VẬT LIỆU TRONG XÂY DỰNG MẶT ĐƯỜNG Ô TÔ Ở VIỆT NAM

1.1. Bêtông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

Bêtông geopolymer tro bay (fly ash based-geopolymer concrete) là một loại đá nhân tạo nhận được sau khi nhào trộn, tạo hình, đầm nén và bảo dưỡng từ một hỗn hợp cấp phối được lựa chọn một cách hợp lí bao gồm chất kết dính geopolymer tro bay, cốt liệu (đá dăm, và cát), dung dịch kiềm kích hoạt (bao gồm: Thủy tinh lỏng-Na_2SiO_3; Xút khan-NaOH và nước). Sau khi rắn chắc, bê tông geopolymer tro bay có các tính chất ít nhất tương tự như BTXM truyền thống.

Bêtông geopolymer tro bay có sử dụng cốt liệu xỉ thép thay thế cho đá dăm và cát gọi là bêtông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

1.2. Tính chất chủ yếu của vật liệu trong xây dựng mặt đường cứng ở Việt Nam

Do điều kiện làm việc của đường ô tô, vật liệu bê tông phải chịu trực tiếp tải trọng xe chạy và điều kiện tác động của môi trường (chế độ thủy nhiệt). Do vậy, vật liệu bê tông khi ứng dụng làm mặt đường hay móng đường phải đạt được những yêu cầu nhất định về các tính năng cơ học và vật lý. Để thực hiện tính toán được khả năng chịu tải của mặt đường thì cần xác định các thông số chính sau của vật liệu sử dụng bao gồm: Cường độ nén, cường độ kéo uốn, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, độ co ngót, giãn nở (CTE), độ mài mòn và tính công tác.

1.3. Các kết quả nghiên cứu về tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trong xây dựng mặt đường ô tô ở trong và ngoài nước

Việc sử dụng cốt liệu xỉ thép thay thế cốt liệu đá dăm truyền thống trong bê tông geopolymer là vấn đề tương đối mới. Bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép được bắt đầu nghiên cứu từ năm 2014

đến nay, nhưng mới chỉ dừng lại ở các công trình nghiên cứu bước đầu về một số tính chất cơ học và cấu trúc vi mô của các tác giả như Ashadi H.W [68], Nitendra Palanka [83], M.S.H. Khan [77]… Các công trình nghiên cứu của các tác giả mới dừng lại ở việc sử dụng xỉ thép làm cốt liệu thô thay thế cho cốt liệu tự nhiên (đá dăm, sỏi) trong cấp phối. Cho đến nay, vấn đề này vẫn đang được tiếp tục nghiên cứu và đã có được những thành tựu nhất định.

Ở Việt Nam, có một số nghiên cứu chính về bê tông geopolymer như Đào Văn Đông [13], [14], Trần Việt Hưng [18], Phan Đức Hùng [17], Phạm Đức Thiện [25]… Các tác giả đã tập trung nghiên cứu chế tạo hỗn hợp vữa và bê tông geopolymer (sử dụng cốt liệu tự nhiên đá dăm và cát sông), và một số tính chất cơ học của chúng. Các kết quả nghiên cứu trên đều cho thấy các tính chất cơ học của bê tông geopolymer tro bay tốt tương đương như BTXM nhưng bê tông geopolymer có độ bền tốt vượt trội trong các điều kiện môi trường xâm thực và nhiệt độ cao. Tuy nhiên, việc nghiên cứu sử dụng cốt liệu xỉ thép để thay thế cho đá dăm và cát sông trong việc chế tạo bê tông geopolymer tro bay là lần đầu tiên với Việt Nam và thế giới. Đây là một trong những điểm mới và đóng góp của luận án.

1.4. Tổng hợp phân tích và đề xuất nội dung nghiên cứu

Ở Việt Nam nguồn tro bay và xỉ thép từ các nhà máy nhiệt điện chạy bằng than và nhà máy luyện thép tăng nhanh, số lượng sử dụng tái chế các phụ phẩm này đang còn rất hạn chế; trong khi đó nhu cầu về nguồn cốt liệu và vật liệu bê tông trong xây dựng đường ô tô nói riêng và công trình xây dựng nói chung ngày càng tăng cao. Từ những vấn đề trên, trong phạm vi luận án, đề tài sẽ tập trung vào giải quyết 4 vấn đề chính sau:

Nghiên cứu các tính chất cơ lý hóa của cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên để làm cốt liệu cho bê tông mặt đường;

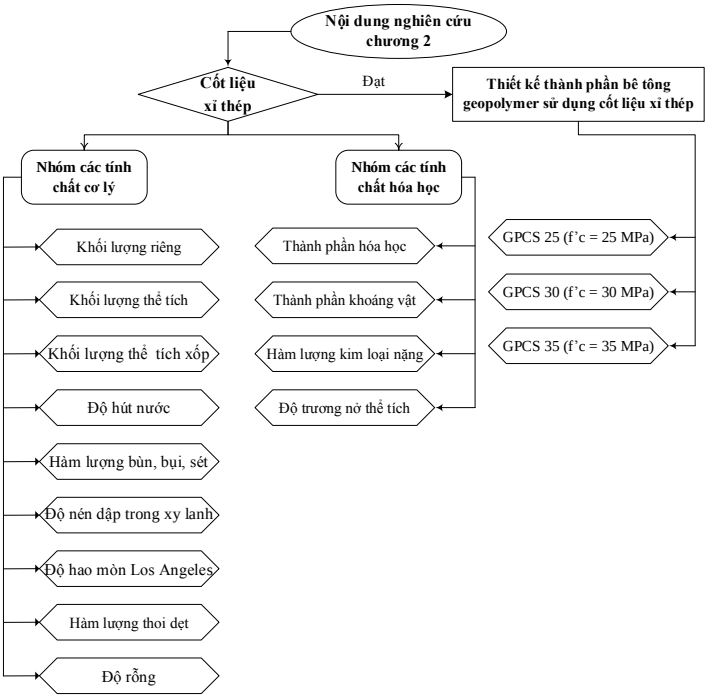
Nghiên cứu thiết kế thành phần và chế tạo bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép trong xây dựng đường ô tô ở Việt Nam;

Nghiên cứu một số tính chất cơ bản của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toán cốt liệu xỉ thép trong tính toán kết cấu mặt đường ở Việt Nam;

Nghiên cứu đề xuất kết cấu mặt đường sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép ở Việt Nam.

Chương 2. XÁC ĐỊNH MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ LÍ HÓA CỦA XỈ THÉP THÁI NGUYÊN VÀ NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ THÀNH PHẦN BÊ TÔNG GEOPOLYMER TRO BAY CỐT LIỆU XỈ THÉP

Kế hoạch nghiên cứu thực nghiệm của Chương 2 được thể hiện qua sơ đồ như Hình 2.1.



Hình 2.1. Sơ đồ khối kế hoạch nghiên cứu

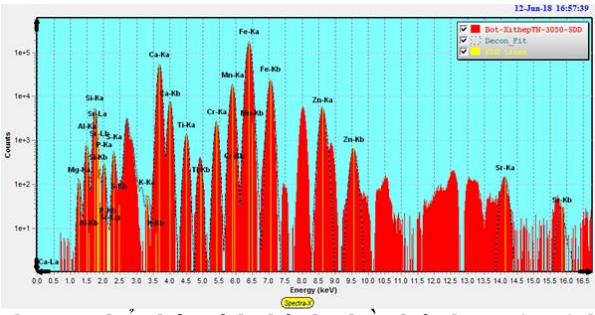
2.1. Nghiên cứu thực nghiệm xác định một số tính chất của cốt liệu xỉ thép

2.1.1. Nghiên cứu các tính chất cơ lý của xỉ thép Thái Nguyên

Các tính chất cơ lí của cốt liệu xỉ thép nghiên cứu tương tự với một số kết quả nghiên cứu trong nước và trên thế giới đã thực hiện, hoàn toàn có thể đáp ứng các yêu cầu để làm vật liệu chế tạo mặt đường cứng theo Quyết định 1951-2012 [3].

2.1.2. Nghiên cứu thành phần hóa học của xỉ thép Thái Nguyên.

Thành phần hóa học của xỉ thép được thí nghiệm tại Viện Hóa học thuộc Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam theo phương pháp XRF. Kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Hình 2.7

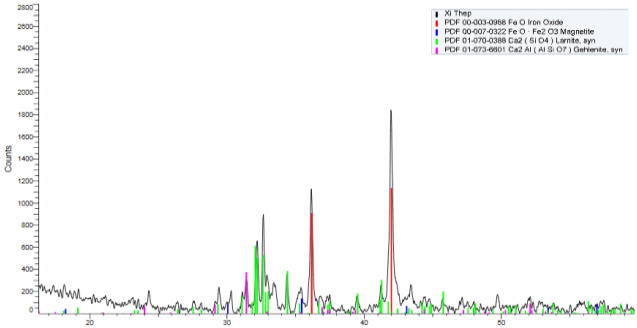


Hình 2.7. Phổ phân tích thành phần hóa học của xỉ thép

Thành phần hóa học chính của các mẫu xỉ thép (EAF) nhà máy gang thép Thái Nguyên, bao gồm: CaO, SiO2, Al_2O_3 và Fe_2O_3 chiếm đến 84.55% trọng lượng của xỉ thép, ngoài ra còn có Fe_2O_3 (33.22%), CaO (25.26%), SiO_2 (19.94%), Al_2O_3 (6.13%).

2.1.3. Nghiên cứu thành phần khoáng vật của xỉ thép Thái Nguyên

Thành phần khoáng vật của xỉ thép được thí nghiệm tại Viện Hóa học thuộc Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam theo phương pháp XRD. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật được thể hiện ở Hình 2.8



Hình 2.8. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật của xỉ thép

Thành phần khoáng vật của các mẫu xỉ thép nghiên cứu chủ yếu gồm hai thành phần chính là Wuestite (FeO), và Larnite (Ca_2SiO_4). Đỉnh cao nhất trong các mô hình nhiễu xạ tia X của mẫu xỉ thép (EAF) đã được quan sát là FeO. Thành phần còn lại là Magnetile ($FeO.Fe_2O_3$), Gehlanite $Ca_2Al(AlSiO_7)$.

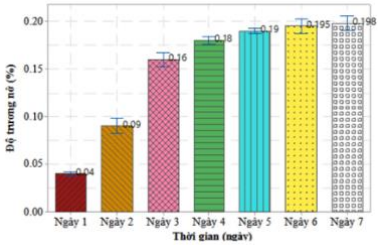
2.1.4. Hàm lượng kim loại nặng trong xỉ thép Thái Nguyên

Kết quả cho thấy, xỉ thép nghiên cứu không chứa các kim loại nặng, hoặc chứa các kim loại nặng với hàm lượng đáp ứng các yêu cầu về

môi trường theo QCVN 07:2009/BTNMT "Quy chuẩn kỹ thuật về ngưỡng chất thải nguy hại" [1].

2.1.5. Nghiên cứu đánh giá khả năng trương nở thể tích của cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên

Kết quả nghiên cứu cho thấy độ trương nở thể tích trên cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên sau 7 ngày đạt giá trị trung bình 0.198% và giá trị đặc trưng là 0.2112%. Các giá trị này nhỏ hơn độ trương nở giới hạn đối với cốt liệu tự nhiên theo ASTMD4792 là 0.5% sau 7 ngày.



Hình 2.10. Độ trương nở với khoảng tin cậy 95% cho giá trị trung bình của cốt liệu xỉ thép

2.2. Nghiên cứu thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

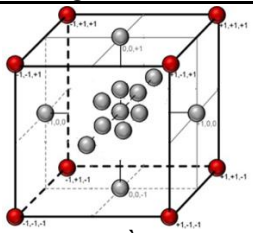
Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép.

$$Y=f(X_1, X_2, X_3) \quad (2.3)$$

Trong đó: Y là cường độ chịu nén của GPCS tuổi 28 ngày; X_1 là nồng độ mol của dung dịch kiềm NaOH; X_2 là tỷ lệ khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt/tro bay (AAS/FA); X_3 là tỉ lệ khối lượng dung dịch Na_2SiO_3 và dung dịch NaOH (SS/SH)

Bảng 2.16. Giá trị và khoảng biến thiên của các yếu tố ảnh hưởng

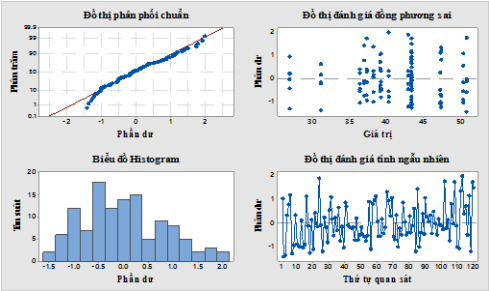
Giá trị	X_1	X_2	X_3
Khoảng biến thiên	$10M \le X_1 \le 14M$	$0.4 \le X_2 \le 0.5$	$2 \le X_3 \le 3$
Bước thí nghiệm	2M	0.05	0.5



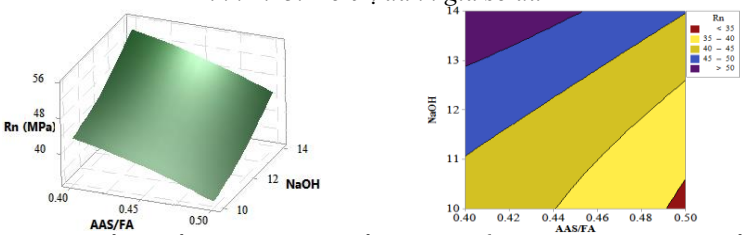
Hình 2.21. Sơ đồ thí nghiệm hỗn hợp tâm xoay-mặt không gian

Hình 2.22. Chế tạo mẫu cho thí nghiệm tâm xoay-mặt

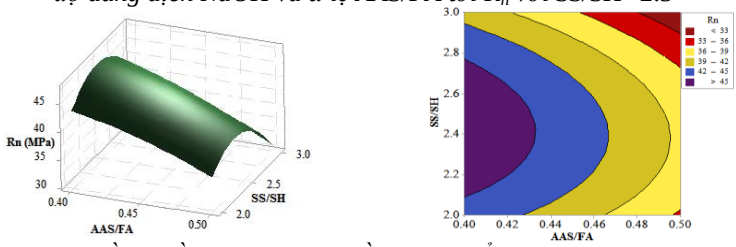
Luận án thực hiện số điểm thí nghiệm $N=2k+2k+n_o=20$ (k là số biến thí nghiệm) với số thí nghiệm ở tâm $n_o = 6$. Mỗi điểm thí nghiệm có giá trị X_1, X_2, X_3 khác nhau và tiến hành với số lần lặp là 6. Tổng số lượng mẫu là 20*6 = 120 mẫu hình trụ tròn kích thước 150*300 mm



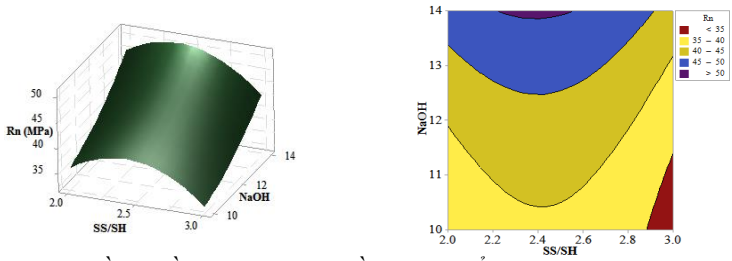
Hình 2.23. Đồ thị đánh giá số dư



Hình 2.24. Đồ thị bề mặt và đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của nồng độ dung dịch NaOH và tỉ lệ AAS/FA tới R_n với SS/SH=2.5



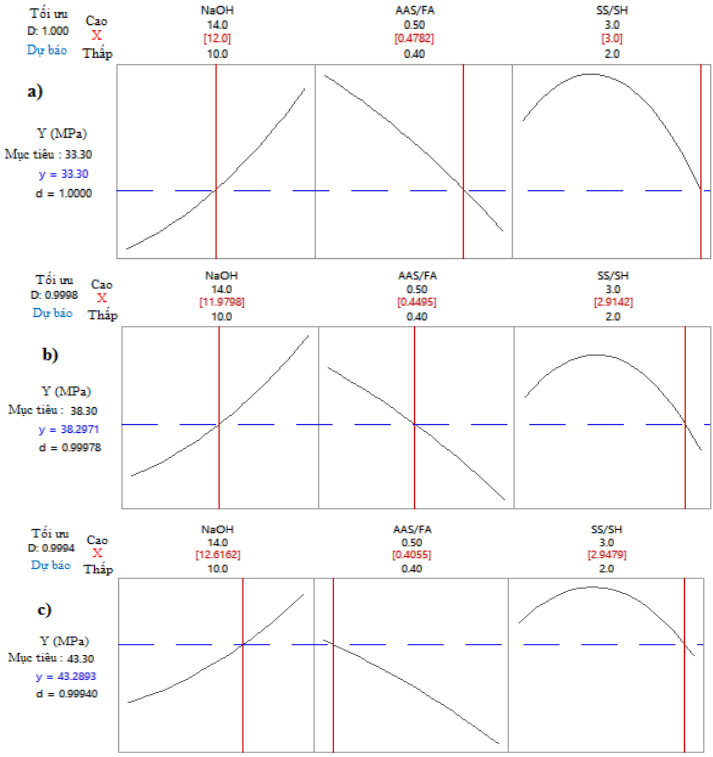
Hình 2.25. Đồ thị bề mặt và đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của biến AAS/FA; SS/SH tới R_n với NaOH = 12M



Hình 2.26. Đồ thị bề mặt và đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của biến SS/SH; nồng độ dung dịch NaOH tới R_n với AAS/FA=0.45

Phương trình hồi quy cường độ nén của bê tông geopolymer đã xác định ở trên:

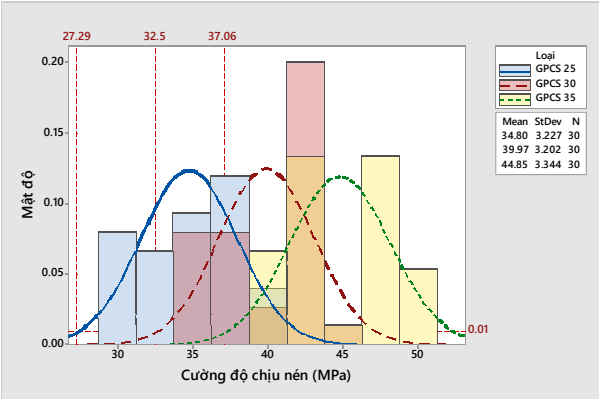
$$R_n = -103.4 - 4.6\text{NaOH} + 198.3\frac{AAS}{FA} + 110.77\frac{SS}{SH} + 0.3402(\text{NaOH})^2 - 261.7(\frac{AAS}{FA})^2 - 20.237(\frac{SS}{SH})^2$$
$$- 0.318\,\text{NaOH}\frac{SS}{SH} - 21.47\frac{AAS}{FA}\frac{SS}{SH}$$



Hình 2.27. Kết quả hồi quy cho các cường độ yêu cầu của GPCS

Bảng 2.26. Thành phần cấp phối của GPCS cấp 25, 30, 35 MPa

Thành phần của hỗn hợp GPC	GPCS 25	GPCS 30	GPCS 35
Tro bay (kg)	482.34	491.89	507.29
Cốt liệu lớn (kg) 4.75-19 mm	1670.90	1670.90	1670.90
Cốt liệu nhỏ (kg) 0.15-4.75 mm	716.10	716.10	716.10
Khối lượng dung dịch NaOH (kg)	57.67	56.50	52.12
Nồng độ dung dịch NaOH	12 M	11.97 M	12.61M
Dung dịch Na_2SiO_3 (kg)	172.99	164.62	153.59
Tỷ lệ Na_2SiO_3/NaOH	3.0	2.91	2.95
Tỷ lệ AAS/FA	0.48	0.45	0.40



Hình 2.30. Hàm mật độ xác suất và giá trị đặc trưng cường độ của các hỗn hợp GPCS thiết kế

Kết quả thí nghiệm xác định khối lượng thể tích của hỗn hợp geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép là 2990 kg/m^3 đến 3133 kg/m^3. Như vậy, có thể khẳng định các cấp phối thiết kế đạt yêu cầu về khối lượng thể tích lựa chọn ban đầu về khối lượng thể tích là 3100 kg/m^3.

2.3. Kết luận Chương 2

Các tính chất cơ lí hóa của cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên tương tự với một số kết quả nghiên cứu trong nước và trên thế giới đã thực hiện, hoàn toàn có thể đáp ứng các yêu cầu để làm vật liệu chế tạo bê tông geopolymer cho mặt đường cứng theo quy định QĐ 1951-2012.

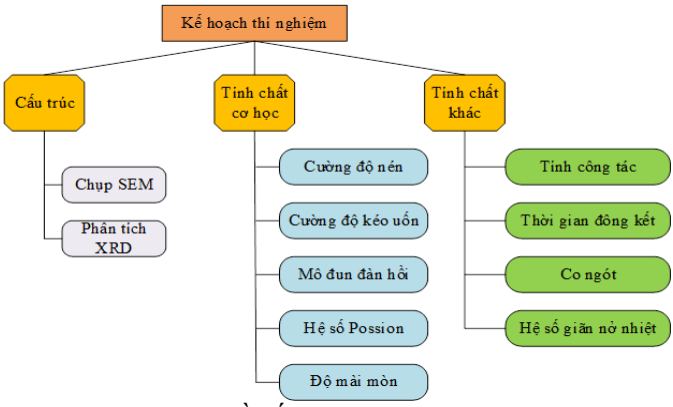
Luận án đã thiết kế được thành phần của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép có cường độ chịu nén đặc trưng 25, 30, 35 MPa bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm.
Giá thành của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép đắt hơn khoảng 3% so với BTXM có cùng cấp cường độ chịu nén.

Công nghệ chế tạo mẫu bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép ở trong phòng thí nghiệm gần tương tự như BTXM truyền thống, sử dụng máy móc thiết bị, trộn, đúc mẫu, đầm nén, khuôn được thực hiện giống như BTXM.

Chương 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM TRONG PHÒNG MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ BẢN CỦA BÊ TÔNG GEOPOLYMER TRO BAY SỬ DỤNG CỐT LIỆU XỈ THÉP TRONG TÍNH TOÁN KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG Ở VIỆT NAM

3.1. Kế hoạch thí nghiệm

Kế hoạch nghiên cứu thực nghiệm của Chương 3 được thể hiện ở Hình 3.1



Hình 3.1. Sơ đồ kế hoạch thực hiện thí nghiệm

3.2. Tỷ lệ thành phần của các loại bê tông sử dụng trong nghiên cứu

Căn cứ vào kết quả nghiên cứu ở Chương 2 bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm luận án đã đề xuất cấp phối thực nghiệm của 3 hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép có cường độ chịu nén đặc trưng 25, 30, 35 MPa được thể hiện ở Bảng 2.26, sử dụng để chế bị mẫu thí nghiệm cho việc xác định các tính chất chủ yếu. Các cấp phối của các mẫu thí nghiệm đối chứng OPCS 30, GPC 30, OPC 30 được thể hiện ở Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Thành phần cấp phối của các mẫu thí nghiệm và đối chứng

Thành phần của hỗn hợp	OPCS 30	GPC 30	OPC 30
Xi măng PC30 (kg)	388	-	361.45
Đá dăm - Hòa Bình (kg)	-	1256.64	1016.62
Cát vàng Sông Hồng (kg)	620.8	591.36	886.43
Nước (kg)	175	26.30	167.92
NaOH (kg)	-	14.51	-
Dung dịch Na_2SiO_3 (kg)	-	122.45	-
Tro bay (kg)	-	388.73	-
Cốt liệu lớn xỉ thép 4.75-19 mm (kg)	1662	-	-
Cốt liệu nhỏ xỉ thép 0.15-4.75 mm (kg)	-	-	-

3.3. Nghiên cứu vi cấu trúc của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép

Vết nứt nhỏ liên tục tại vùng chuyển tiếp giữa đá xi măng và cốt liệu liệu xỉ thép làm cho liên kết giữa cốt liệu xỉ thép-đá xi măng khá xốp và yếu.

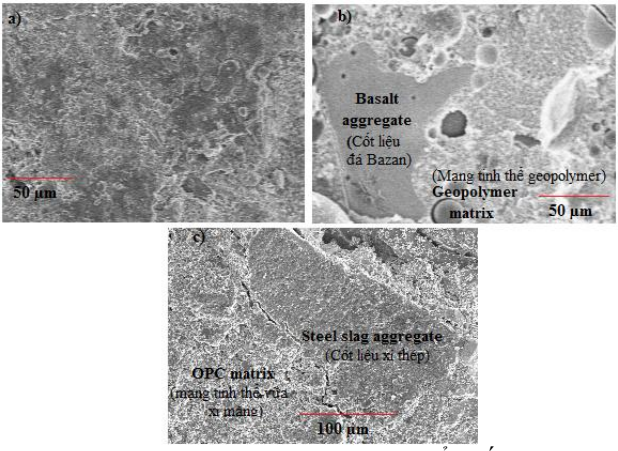
Vùng chuyển tiếp giữa đá gepolymer và cốt liệu đá basalt không thấy xuất hiện vết nứt vi mô, nhưng ranh giới vùng chuyển tiếp khá rõ ràng, điều này có thể thấy trên bề mặt cốt liệu đá basalt gần như

trơ và không có tương tác hóa học xảy ra với các thành phần của chất kết dính geopolymer.

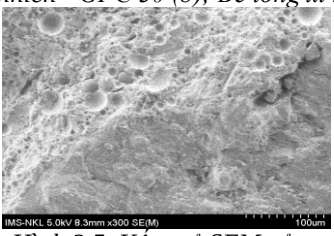
Không thấy xuất hiện vết nứt vi mô và không phân biệt được phạm vi và ranh giới của vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu xỉ thép và ma trận cấu trúc mạng tinh thể đá geopolymer.

Tại cùng một mức độ phân giải và điều kiện bảo dưỡng các hạt tro bay có dạng hình cầu vẫn chưa phản ứng hết trong cấu trúc của mẫu bê tông geopolymer sử dụng cốt liệu tự nhiên (đá dăm, cát tự nhiên), còn đối với các mẫu bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép thì các hạt tro bay đã bị geopolymer hóa gần như hoàn toàn.

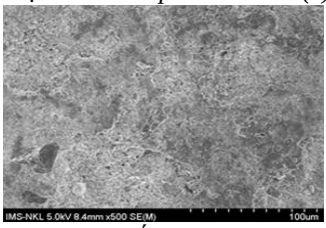
Sản phẩm khoáng hóa được tạo ra đối với các mẫu bê tông geopolymer sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép phần lớn là Quart với đỉnh nhiễu xạ là cao nhất. Điều này cho thấy có tương tác hóa học giữa bề mặt cốt liệu xỉ thép và cấu trúc mạng tinh thể đá geopolymer.



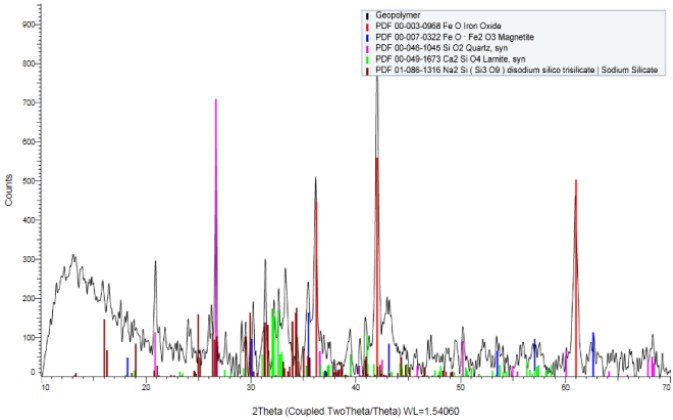
Hình 3.4. SEM micrographs tại vùng chuyển tiếp của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép - GPCS 30 (a); bê tông geopolymer cốt liệu tự nhiên - GPC 30 (b); Bê tông xi măng cốt liệu lớn xỉ thép - OPCS 30 (c)



Hình 3.5. Kết quả SEM của mẫu geopolymer cốt liệu tự nhiên (GPC 30)



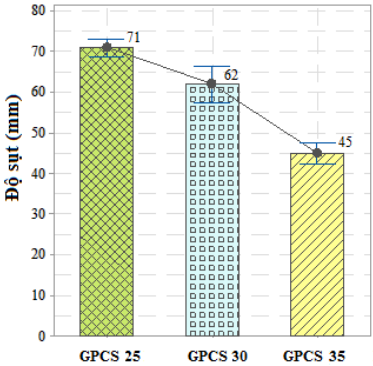
Hình 3.6. Kết quả SEM của mẫu geopolymer sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (GPCS 30)



Hình 3.7. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép theo phương pháp XRD

3.4. Tính công tác

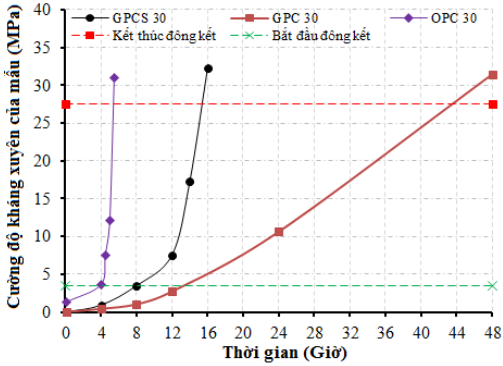
Kết quả cho thấy, độ sụt của hỗn hợp giảm khi cường độ chịu nén đặc trưng của hỗn hợp tăng. Độ sụt của cả 3 hỗn hợp GPCS đều thỏa mãn các yêu cầu đảm bảo tính công tác trong xây dựng mặt đường theo ACI 211.91 [43].



Hình 3.9. Biểu đồ kết quả thí nghiệm độ sụt

3.5. Thời gian đông kết

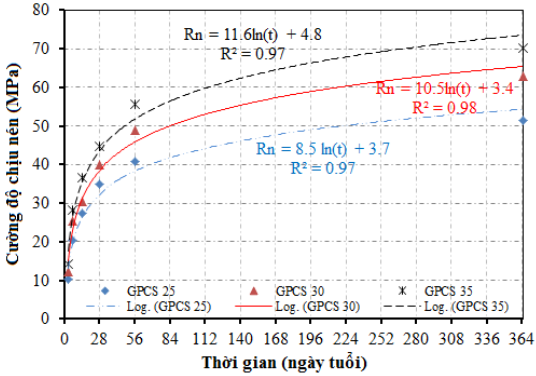
Qua biểu đồ ở Hình 3.12 và Bảng 7 (Phụ lục) cho thấy thời gian (bắt đầu; kết thúc) đông kết của các hỗn hợp geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép (GPCS); bê tông tro bay cốt liệu tự nhiên (GPC) và BTXM truyền thống không sử dụng phụ gia siêu dẻo và làm chậm ninh kết (OPC) lần lượt là (8h;15h), (12h; 43h), (4.5h; 6h) tính từ lúc bắt đầu trộn ướt đến khi cường độ kháng xuyên đạt (3.5 MPa; 27.6 MPa) tương ứng cho (bắt đầu; kết thúc) đông kết



Hình 3.12. Biểu đồ quan hệ giữa cường độ kháng xuyên theo thời gian của các hỗn hợp bê tông tươi

3.6. Các tính chất cơ học của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép

3.6.1. Cường độ nén theo thời gian



Hình 3.13. Mối quan hệ cường độ chịu nén của GPCS theo thời gian

Các phương trình hồi quy cường độ của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép theo thời gian trong phạm vi 365 ngày ứng với các cấp bê tông tương ứng 25, 30, 35 MPa được rút ra như sau:

GPCS 25 (cấp 25): $R_n = 8.5 \ln(t) + 3.7$ (MPa); $R^2 = 0.97$ (3.1)

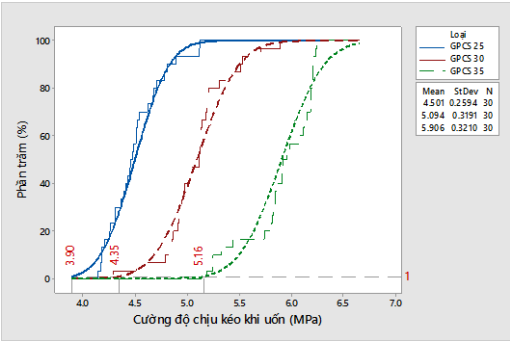
GPCS 30 (cấp 30): $R_n = 10.5 \ln(t) + 3.4$ (MPa); $R^2 = 0.98$ (3.2)

GPCS 35 (cấp 35): $R_n = 11.6 \ln(t) + 4.8$ (MPa); $R^2 = 0.97$ (3.3)

Trong ứng xử nén quan sát thấy các dạng phá hoại của bêtông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép ở tuổi 365 ngày gần giống như các dạng phá hoại tiêu chuẩn đối với bêtông cường độ cao, các vết nứt đi qua không phân biệt vùng vữa và cốt liệu

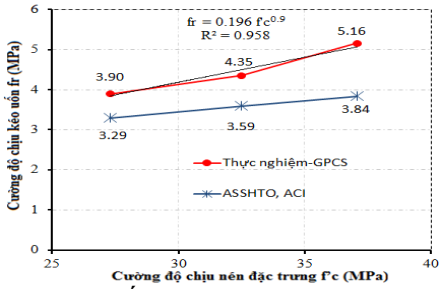
3.6.2. Cường độ kéo uốn

Dựa trên biểu đồ phân phối tích lũy cường độ chịu kéo uốn của GPCS được thể hiện ở Hình 3.20. Từ đó xác định được cường độ chịu kéo uốn đặc trưng của GPCS với xác suất đảm bảo độ tin cậy là 99% ứng với mỗi loại bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 lần lượt là 3.90; 4.35; 5.16 (MPa)



Hình 3.20. Biểu đồ phân phối tích lũy và cường độ chịu kéo uốn đặc trưng của GPCS

Kết quả so sánh trn Hình 3.21 cho thấy cường độ kéo uốn của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 thu được từ thực nghiệm lớn hơn so với cường độ kéo uốn tính toán cho BTXM có cùng cường độ nén được tính toán theo ACI 318-11.



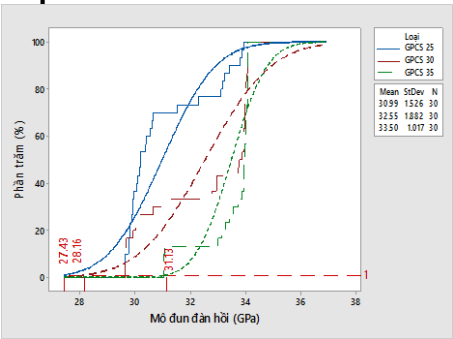
Hình 3.21. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo uốn của GPCS

Đề xuất hàm hồi quy thực nghiệm quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của GPCS:

$$f_r = 0.196 f'^{0.9}_c \text{ với } R^2 = 0.958 \qquad (3.4)$$

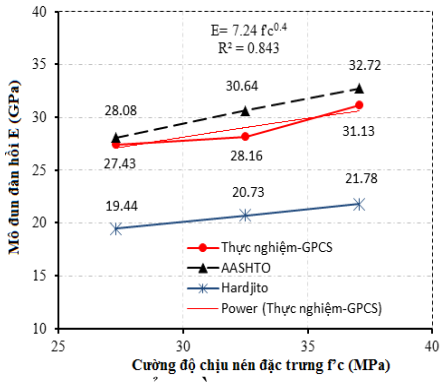
3.6.3. Mô đun đàn hồi và hệ số poisson

Dựa trên biểu đồ phân phối tích lũy mô đun đàn hồi của GPCS được thể hiện ở Hình 3.24, từ đó xác định được mô đun đàn hồi đặc trưng của GPCS với xác suất đảm bảo độ tin cậy là 99% ứng với mỗi loại bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 lần lượt là 27.43; 28.16; 31.13 (GPa)



Hình 3.24. Biểu đồ phân phối tích lũy và mô đun đàn hồi đặc trưng của GPCS

Kết quả so sánh trên Hình 3.25 cho thấy, mô đun đàn hồi của GPCS thu được từ thực nghiệm trong điều kiện khí hậu và nguyên vật liệu tại Việt Nam có giá trị bé hơn so với mô đun đàn hồi của BTXM OPC có cùng cấp, tính toán theo tiêu chuẩn AASHTO 2012 [42].



Hình 3.25. Biểu đồ quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén

Đề xuất hàm hồi quy thực nghiệm quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của GPCS:

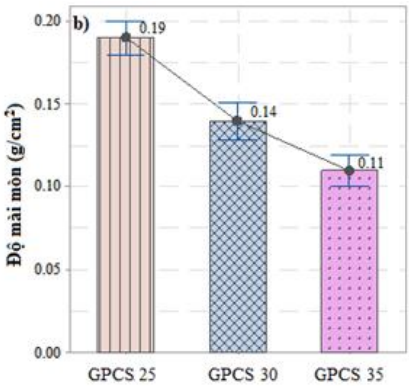
$$E = 7.24\ f'_c{}^{0.4} \text{ với } R^2 = 0.843 \quad (3.9)$$

Hệ số Poisson của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép ứng với các cấp 25, 30, 35 lần lượt là 0.177, 0.165, 0.151.

3.6.4. Độ mài mòn

Bê tông GPCS có mác cao hơn thì khả năng chống mài mòn cao hơn. GPCS35 có độ mài mòn thấp nhất (0.11 g/cm^2) trong khi đó GPCS25 có độ mài mòn cao nhất 0.19 (g/cm^2).

Khi so sánh với OPC và GPC cùng cấp cường độ chịu nén đặc trưng 30MPa, kết quả cho thấy GPCS có khả năng chống mài mòn cao nhất do có độ mài mòn thấp nhất. Điều này cũng phù hợp với một số nghiên cứu đã chứng minh về khả năng chịu mài mòn của vật liệu geopolymer tốt hơn so với BTXM thông thường [51].



Hình 3.27. Biểu đồ kết quả thí nghiệm độ mài mòn của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35

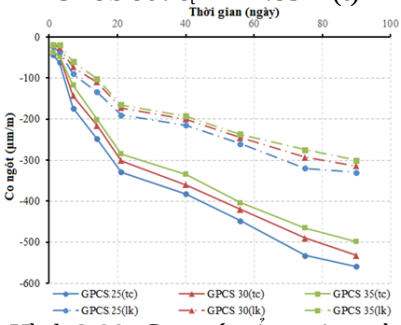
3.7. Co ngót khô của bê tông geopolyme tro bay cốt liệu xỉ thép

Từ kết quả trên Hình 3.29, Hình 3.30 cho thấy sự thay đổi chiều dài mẫu của các mẫu bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35, không có nhiều khác biệt rõ rệt. Tuy nhiên, có thể nhận thấy xu hướng chung là co ngót phát triển mạnh trong khoảng 21 ngày đầu và thời gian sau giảm dần. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy GPCS35 có mức độ co ngót khô thấp hơn so với GPCS25. Từ các kết quả thí nghiệm trên, đề xuất hàm hồi quy (trong phạm vi 90 ngày):

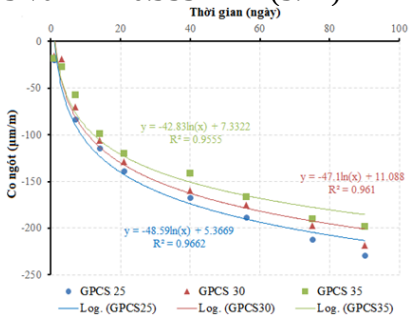
GPCS 25: $\varepsilon_t = -48.59 \ln(t) + 5.37$ với $R^2 = 0.966$ (3.12)

GPCS 30: $\varepsilon_t = -47.1 \ln(t) + 11.09$ với $R^2 = 0.961$ (3.13)

GPCS 35: $\varepsilon_t = -42.83 \ln(t) + 7.33$ với $R^2 = 0.955$ (3.14)



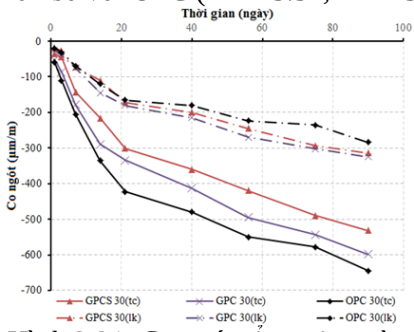
Hình 3.29. Co ngót tổng cộng và co ngót liên kết của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35



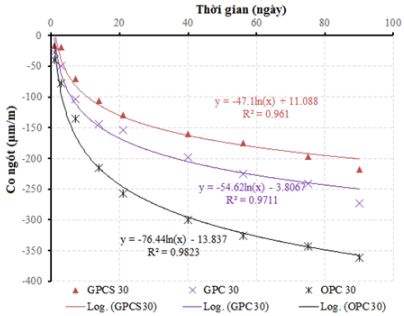
Hình 3.30. Co ngót khô của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35

Chú thích: "tc" là co ngót tổng cộng; "lk" là co ngót liên kết

Kết quả cho thấy sự thay đổi chiều dài mẫu GPC và GPCS thấp hơn so với OPC (Hình 3.31, Hình 3.32).



Hình 3.31. Co ngót tổng cộng và co ngót liên kết của GPCS 30, GPC 30, OPC 30



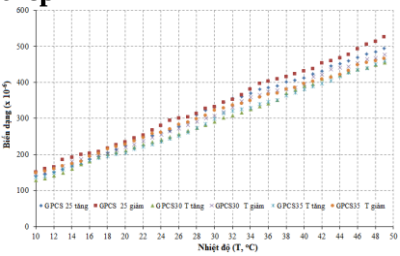
Hình 3.32. Co ngót khô của GPCS 30, GPC 30, OPC 30

Trong cấp phối thí nghiệm trên, co ngót khô ở 90 ngày của GPCS30 là 218μm/m và của GPC 30 là 273μm/m, OPC 30 là 361μm/m và quá trình co ngót vẫn chưa hoàn toàn kết thúc, theo Neville [81], [80], [82] sau ba tháng, mức độ co ngót của mẫu cũng đạt khoảng (40÷ 80)% so với độ co ngót ở 20 năm tuổi. Từ các kết quả thí nghiệm trên, đề xuất hàm hồi quy:

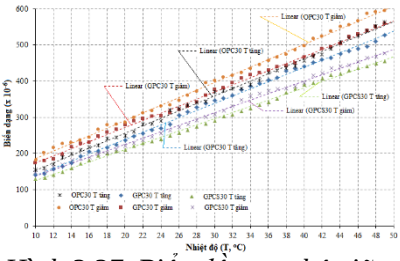
OPC 30: ε_t = -76.44 ln(t) - 13.84 với R^2 = 0.982 (3.15)

GPC 30: ε_t = -54.62 ln(t) - 3.807 với R^2 = 0.971 (3.16)

3.8. Hệ số giãn nở nhiệt của bê tông geopolyme tro bay cốt liệu xỉ thép



Hình 3.35. Biểu đồ quan hệ giữa biến dạng theo nhiệt độ của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35



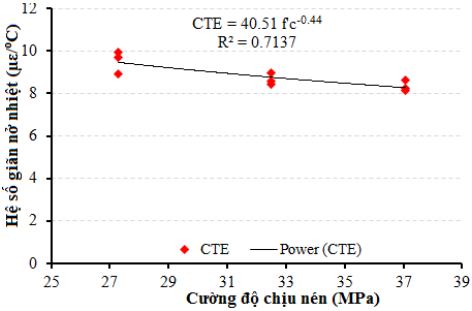
Hình 3.37. Biểu đồ quan hệ giữa biến dạng theo nhiệt độ của GPCS 30, GPC 30, OPC 30

Với 3 hỗn hợp bê tông geopolymer đang xét GPCS25, GPCS30, GPCS35, kết quả CTE thu được trong khoảng 8.34 đến 9.53 με/^{o}C.

Kết quả CTE của (GPCS 30) sử dụng cốt liệu xỉ thép đạt giá trị thấp nhất là 8.65 με/^{o}C. CTE của (OPC 30) và (GPC 30) khi sử dụng cốt liệu thông thường lần lượt là 10.42 và 9.91με/^{o}C. Nguyên nhân có thể do sử dụng cốt liệu xỉ thép đã làm giảm độ giãn nở.

Phương trình hồi quy thực nghiệm giữa hệ số giãn nở nhiệt (CTE) với cường độ chịu nén đặc trưng thực nghiệm GPCS 25; GPCS 30; GPCS 35 của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép được thể hiện như phương trình (3-18) và Hình 3.36.

CTE = $40.51 f'_c^{-0.44}$ với R^2 = 0.7137 (3.18)



Hình 3.36. Biểu đồ quan hệ giữa CTE và cường độ chịu nén của bê tông GPCS

3.6. Kết luận chương 3

- Kết quả phân tích (SEM) cho thấy không tồn tại vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu xỉ thép và đá geopolymer; ngược lại, tồn tại vùng chuyển tiếp rõ ràng và vết nứt vi mô giữa đá xi măng và cốt liệu xỉ thép. Đây có thể được coi là một luận giải cho việc hạn chế sử dụng cốt liệu xỉ thép trong BTXM;
- Tính công tác của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép đáp ứng yêu cầu kỹ thuật để thi công mặt đường cứng theo ACI 211.91 [43];
- Các hàm hồi quy được rút ra bao gồm: Cường độ chịu nén theo thời gian; quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn; giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén; co ngót khô theo thời gian của GPCS được rút ra;
- Hệ số Poisson; Độ mài mòn; hệ số giãn nở do nhiệt (CTE); co ngót khô của GPCS; OPC; GPC được xác định và so sánh với nhau

Chương 4. NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG SỬ DỤNG BÊ TÔNG GEOPOLYMER TRO BAY CỐT LIỆU XỈ THÉP

4.1. Tình hình thiết kế mặt đường cứng bằng BTXM truyền thống

Hiện nay, trên thế giới đang tồn tại nhiều phương pháp thiết kế mặt đường cứng khác nhau. Các phương pháp được sử dụng phù hợp với điều kiện thực tế của từng nước.

4.2. Tình hình thiết kế và thi công, khai thác mặt đường cứng bằng bê tông geopolymer

Hiện nay, trên thế giới đã và đang có nhiều ứng dụng bê tông geopolymer cho kết cấu mặt đường cứng cho đường ô tô, sân bay và bến cảng. Công nghệ thi công chủ yếu bao gồm mặt đường bê tông geopolymer dạng tấm đúc sẵn và mặt đường thi công tại chỗ. Đối với mặt đường bê tông geopolymer thi công tại chỗ, giai đoạn thi công cơ bản cũng tương tự như BTXM truyền thống.

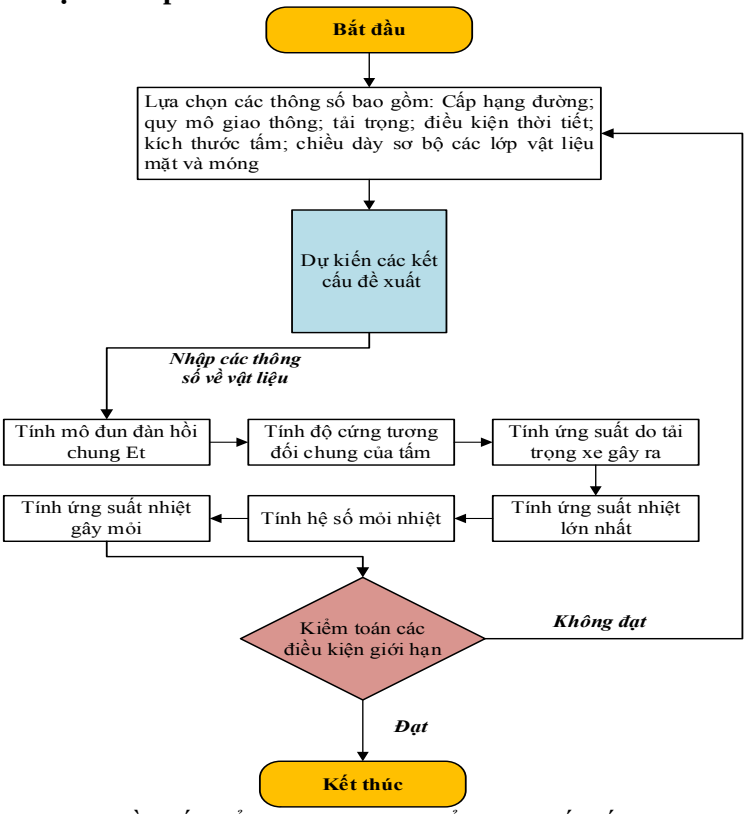
4.3. Lựa chọn các thông số thiết kế mặt đường cứng

Căn cứ trên nội dung theo quy định thiết kế kết cấu mặt đường cứng 3230/QĐ-BGTVT, tính năng cơ học chính của bê tông làm mặt đường cứng bao gồm: cường độ nén, cường độ kéo khi uốn, mô đun đàn hồi, hệ số poát xông (possion), hệ số giãn nở do nhiệt. Dựa trên các kết quả nghiên cứu đã thực ở nội dung chương 2 và chương 3 cho thấy bê tông geopolymer hoàn toàn có thể đáp ứng các yêu cầu để tính toán cho kết cấu mặt đường cứng. Tham khảo từ 3230/QĐ-BGTVT, thực tế thi công mặt đường cứng tại Việt Nam, cũng như

nghiên cứu và ứng dụng mặt đường geopolymer tại Úc, kích thước tấm được lựa chọn: 5x4 (m).

Trong phạm vi nội dung nghiên cứu, luận án sử dụng mô hình tính toán về mặt cơ học là mô hình tấm một lớp trên nền đàn hồi nhiều lớp áp dụng cho trường hợp tấm bê tông geopolymer sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép đặt trên lớp móng trên bằng vật liệu hạt là cấp phối xỉ thép (không dùng chất kết dính để gia cố). Cấp quy mô giao thông để thiết kế là nhẹ và trung bình, áp dụng cho mặt đường ô tô làm mới có cấp thiết kế từ cấp IV trở xuống theo TCVN 4054:2005 hoặc mặt đường giao thông nông thôn theo TCVN 10380:2014.

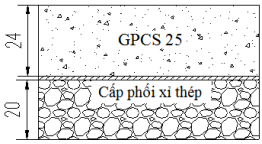
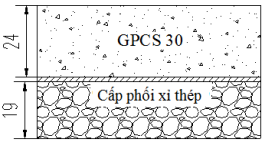
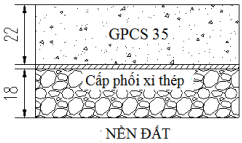
4.4. Đề xuất kết cấu mặt đường sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép



Hình 4.2. Sơ đồ khối thể hiện quá trình kiểm toán kết cấu áo đường đề xuất sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép theo Quyết định 3230/QĐ-BGTVT

Trên cơ sở đã nghiên cứu thực nghiệm trong phòng về các tính chất của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép kết hợp với các điều kiện tải trọng, phần nền móng, điều kiện thời tiết được giả định và các thông số về kích thước tấm, chiều dày các lớp được lựa chọn. Các kết cấu mặt đường điển hình đề xuất ở Bảng 4.5 được kiểm toán theo Quyết định 3230/QĐ-BGTVT với trình tự được thể hiện như sơ đồ khối Hình 4.2. Kết quả kiểm toán cho thấy, các kết cấu đề xuất đều thỏa mãn các yêu cầu của Quyết định 3230/QĐ-BGTVT (Chi tiết kiểm toán được thể hiện tại Phụ lục 2).

Bảng 4.5. Kết cấu mặt đường đề xuất

Kết cấu	**Thông số**			**Cấp quy mô giao thông**
	Lớp vật liệu	**Chiều dày, cm**	**Đặc điểm**	
 KC1	GPCS 25	*24*	R_{ku}= 4.08 (MPa); $E_{đh}$= 28.49 (GPa); μ_c=0.197; α_c=9.53με/^{o}C Tấm kích thước 4x5 m	Nhẹ < 3.10^4 đến 1.10^6 (trục xe/làn)
	Lớp phân cách	*1÷3*	Vải địa kỹ thuật chống thấm	
	Cấp phối xỉ thép	*20*	E = 248.2 (MPa);	
	Nền á sét lẫn sỏi sạn		E_0=40 (MPa)	
 KC2	GPCS 30	*24*	R_{ku}= 4.57 (MPa); $E_{đh}$= 29.46 (GPa); μ_c=0.184; α_c=8.65με/^{o}C Tấm kích thước 4x5 m	Trung bình: 3.10^4 đến 1.10^6 (trục xe/làn)
	Lớp phân cách	*1÷3*	Vải địa kỹ thuật chống thấm	
	Cấp phối xỉ thép	*19*	E = 248.2 (MPa);	
	Nền á sét lẫn sỏi sạn		E_0=40 (MPa)	
 KC3	GPCS 35	*22*	R_{ku}= 5.38 (MPa); $E_{đh}$= 31.83 (GPa); μ_c=0.164; α_c=8.34με/^{o}C Tấm kích thước 4x5 m	Trung bình: 3.10^4 đến 1.10^6 (trục xe/làn)
	Lớp phân cách	*1÷3*	Vải địa kỹ thuật chống thấm	
	Cấp phối xỉ thép	*18*	E = 248.2 (MPa);	
	Nền á sét lẫn sỏi sạn		E_0=40 (MPa)	

4.6. Kết luận chương 4

Luận án đã đề xuất các kết cấu áo đường cứng điển hình (KC1, KC2, KC3) sử dụng bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép làm lớp mặt và cấp phối cốt liệu xỉ thép làm lớp móng, thông qua kết quả kiểm toán của tấm GPCS trên móng và nền cho trước, áp dụng cho đường từ cấp IV trở xuống theo TCVN 4054:2005 hoặc mặt đường giao thông nông thôn theo TCVN 10380:2014, ứng với quy mô giao thông trung bình và nhẹ phù hợp điều kiện ở Việt Nam.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Qua những kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trong phòng về một số tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trong xây dựng mặt đường ô tô ở Việt Nam có thể rút ra một số kết luận sau:

1. Đã xác định các tính chất cơ lí hóa của cốt liệu xỉ thép từ nhà máy gang thép Thái Nguyên. Kết quả cho thấy xỉ thép đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật để làm cốt liệu thay thế cho cốt liệu tự nhiên trong việc chế tạo bê tông geopolymer.
2. Xây dựng được phương pháp thiết kế thành phần cấp phối bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên trong xây dựng đường ô tô.
3. Đề xuất công thức chế tạo bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên có cường độ đặc trưng 25, 30, 35 MPa đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật làm vật liệu mặt đường ô tô.
4. Đã xác định và làm rõ các tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép bao gồm (vi cấu trúc; tính công tác; thời gian đông kết; cường độ nén; cường độ chịu kéo uốn; mô đun đàn hồi; hệ số Poisson; độ mài mòn; co ngót và hệ số giãn nở do nhiệt) phục vụ cho việc tính toán thiết kế, thi công mặt đường cứng ở Việt Nam và đối chứng với các mẫu BTXM và các mẫu bê tông geopolymer tro bay sử dụng đá dăm và cát tự nhiên cho thấy:

4.1. Kết quả phân tích (SEM) cho thấy không tồn tại vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu xỉ thép và đá geopolymer; ngược lại, tồn tại

vùng chuyển tiếp rõ ràng và vết nứt vi mô giữa đá xi măng và cốt liệu liệu xỉ thép. Đây có thể được coi là một luận giải cho việc hạn chế sử dụng cốt liệu xỉ thép trong BTXM.

4.2. Tính công tác của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép đáp ứng yêu cầu kỹ thuật để thi công mặt đường cứng theo ACI 211.91 [43];

4.3. Đã tìm ra một số hàm hồi quy thực nghiệm:

i) Cường độ chịu nén theo thời gian (trong phạm vi 365 ngày)

GPCS 25: $R_n = 8.5 \ln(t) + 3.7$ (MPa); $R^2 = 0.97$

GPCS 30: $R_n = 10.5 \ln(t) + 3.4$ (MPa); $R^2 = 0.98$

GPCS 35: $R_n = 11.6 \ln(t) + 4.8$ (MPa); $R^2 = 0.97$

ii) Quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn

$f_r = 0.196\, f'_c{}^{0.9}$ với $R^2 = 0.958$

iii) Quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén:

$E = 7.24\, f'_c{}^{0.4}$ với $R^2 = 0.843$

4.4. Hệ số Poisson của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép ứng với các cấp 25, 30, 35 lần lượt là 0.177, 0.165, 0.151;

4.5. Độ mài mòn của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép ứng với các cấp 25, 30, 35 lần lượt là 0.19; 0.14; 0.11 (g/cm^2);

4.6. Đề xuất hàm hồi quy quan hệ giữa co ngót khô theo thời gian (trong phạm vi 90 ngày) của các loại bê tông GPCS 25, 30, 35, GPC30 và OPC30.

GPCS 25: $\varepsilon_t = -48.59 \ln(t) + 5.37$ với $R^2 = 0.966$

GPCS 30: $\varepsilon_t = -47.1 \ln(t) + 11.09$ với $R^2 = 0.961$

GPCS 35: $\varepsilon_t = -42.83 \ln(t) + 7.33$ với $R^2 = 0.955$

OPC 30: $\varepsilon_t = -76.44 \ln(t) - 13.84$ với $R^2 = 0.982$

GPC 30: $\varepsilon_t = -54.62 \ln(t) - 3.807$ với $R^2 = 0.971$

4.7. Bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (GPCS) có hệ số giãn nở do nhiệt (CTE) trung bình từ (8.34 $\mu\varepsilon/^oC \div 9.53\ \mu\varepsilon/^oC$) tương tự so với OPC (10.42 $\mu\varepsilon/^oC$) và GPC (9.91 $\mu\varepsilon/^oC$).

5. Bước đầu đề xuất được 03 kết cấu mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép cho đường từ cấp IV trở xuống theo TCVN 4054:2005 hoặc mặt đường giao thông nông

thôn theo TCVN 10380:2014, ứng với quy mô giao thông trung bình và nhẹ phù hợp điều kiện ở Việt Nam.

2. Hướng nghiên cứu tiếp

Căn cứ vào các kết quả của luận án tiếp tục nghiên cứu thử nghiệm trên một đoạn đường thực tế sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép.

Nghiên cứu ứng xử dài hạn như từ biến; đặc tính mỏi và độ bền của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép.

Nghiên cứu chuyển đổi sang công nghệ bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép đầm lăn.

Cần tiếp tục nghiên cứu ứng dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép với các nguồn xỉ thép ở các vùng khác nhau và đặc biệt là với tro bay chưa tuyển và không đạt chuẩn.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. PGS.TS. Đào Văn Đông, NCS. Trịnh Hoàng Sơn: Sáng chế độc quyền về giải pháp hữu ích "Phương pháp chế tạo bê tông geopolyme sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép và bê tông geopolyme thu được bằng phương pháp này". Số đơn 2-2019-00367. (Quyết định công nhận của Cục Sở hữu trí tuệ, Bộ Khoa học Công nghệ, Số 11189w/QĐ-SHTT ngày 31 tháng 07 năm 2020).
2. PGS.TS. Đào Văn Đông, NCS. Trịnh Hoàng Sơn, TS. Lý Hải Bằng: "Nghiên cứu, chế tạo bê tông Geopolymer sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép". Đạt giải Nhì tại Hội thi sáng tạo kỹ thuật tỉnh Vĩnh Phúc lần thứ VII năm 2018-2019.
3. Dong Van Dao; Son Hoang Trinh; Hai-Bang Ly; Binh Thai Pham: Prediction of Compressive Strength of Geopolymer Concrete Using Entirely Steel Slag Aggregates: Novel Hybrid Artificial Intelligence Approaches (3/2019). MDPI Journal of Applied Sciences, Special Issue Soft Computing Techniques in Structural Engineering and Materials, Vol 9. SCIE, IF 2.217. ISI Journal.
4. Dong Van Dao, Hai-Bang Ly, Son Hoang Trinh, Tien-Thinh Le and Binh Thai Pham: Artificial Intelligence Approaches for Prediction of Compressive Strength of Geopolymer Concrete (3/2019). MDPI Journal of Materials, Special Issue New Advances in Self-Compacting Concrete and Geopolymer Concrete, Vol 12. SCIE, IF 2.217. ISI Journal.
5. Dong Van Dao, Son Hoang Trinh: Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete using only steel slag as aggregate (2019). Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020; C. Ha-Minh et al. (eds.), CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering 54. Scopus Index.
6. Dong Van Dao, Son Hoang Trinh: Design method for optimizing geopolymer concrete proportions utilising entirely steel slag aggregates (2019). Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020; C. Ha-Minh et al. (eds.), CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering 54. Scopus Index.

7. Son Hoang Trinh, Dong Van Dao, Quynh Anh Thi Bui: A study on effect of aggregate grading on compressive strength and workability of fly ash based geopolymer concrete totally using steel slag aggregate, 2017, International Journal of Civil Engineering and Technology (Scopus Journal).
8. NCS. Trịnh Hoàng Sơn, PGS.TS. Đào Văn Đông, ThS. Nguyễn Hữu Anh: Nghiên cứu một số tính chất cơ học của vữa geopolymer tro bay sử dụng cát biển và nước biển, 2016, Tạp chí Giao thông vận tải (Hội thảo nhà khoa học trẻ ngành GTVT – 2016).
9. PGS.TS. Đào Văn Đông, NCS. Trịnh Hoàng Sơn: Nghiên cứu vi cấu trúc của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (Số 4/2020). Tạp chí Giao thông vận tải.
10. NCS. Trịnh Hoàng Sơn, PGS.TS. Đào Văn Đông, PGS.TS. Nguyễn Quang Phúc: Nghiên cứu thời gian đông kết và sự phát triển cường độ nén theo thời gian của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (Số 5/2020). Tạp chí Giao thông vận tải.
11. PGS.TS. Đào Văn Đông, NCS. Trịnh Hoàng Sơn: Nghiên cứu hệ số giãn nở do nhiệt của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (Số 6/2020). Tạp chí Giao thông vận tải.
12. PGS.TS. Đào Văn Đông, NCS. Trịnh Hoàng Sơn: Nghiên cứu co ngót của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (Số 7/2020). Tạp chí Giao thông vận tải