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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2020

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. ĐÀO VĂN ĐÔNG
2. PGS.TS. NGUYỄN QUANG PHÚC

HÀ NỘI - 2020

CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Hà Nội, tháng năm 2020

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả Luận án

Trịnh Hoàng Sơn

LỜI CẢM ƠN

Sau 4 năm học tập và nỗ lực nghiên cứu tại Trường Đại học Giao thông Vận tải, được sự chỉ dẫn nhiệt tình của các thầy hướng dẫn, sự ủng hộ của nhà trường, sự giúp đỡ của thầy cô, đồng nghiệp, bạn bè, người thân, Nghiên cứu sinh (NCS) đã hoàn thành luận án "*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*".

Để hoàn thành luận án này, NCS xin được gửi lời tri ân sâu sắc nhất đến hai thầy giáo đã trực tiếp hướng dẫn là PGS.TS Đào Văn Đông, PGS.TS. Nguyễn Quang Phúc. Các thầy đã luôn tận tình góp ý, hỗ trợ NCS ngay từ định hướng nghiên cứu ban đầu và trong suốt quá trình nghiên cứu.

NCS xin dành lời cảm ơn gửi đến Ban Giám hiệu, các thầy cô giáo trong Khoa Công trình; Bộ môn Kết Cấu - Vật liệu; Bộ môn Thí nghiệm công trình; Trung tâm thí nghiệm đường bộ cao tốc của Trường Đại học Công nghệ GTVT đã luôn ủng hộ và tạo điều kiện thuận lợi cho NCS trong quá trình học tập và nghiên cứu

NCS xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Ban Giám hiệu, Phòng Đào tạo sau đại học và các thầy cô trong Khoa Công trình, Bộ môn Đường bộ của Trường Đại học GTVT đã tạo mọi điều kiện giúp đỡ.

Với lòng biết ơn sâu thẳm xin được dành cho những người thân trong gia đình của NCS - những người luôn ở bên, động viên và chia sẻ giúp cho NCS vượt qua được những khó khăn trong suốt chặng đường làm nghiên cứu của mình.

Trân trọng cảm ơn!

Hà Nội - 11/2020

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN I
LỜI CẢM ƠN II
MỞ ĐẦU 1
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. 5
1.1. Bêtông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép 5
1.1.1. Khái niệm 5
1.1.2. Chất kết dính geopolymer tro bay 5
1.1.3. Cốt liệu xỉ thép 11
1.1.4. Đánh giá sự kết hợp giữa chất kết dính geopolymer tro bay và cốt liệu xỉ thép thông qua các phân tích vi cấu trúc 17
1.2. Các yêu cầu về tính chất chủ yếu của vật liệu trong xây dựng mặt đường cứng ở Việt Nam 22
1.2.1. Cường độ chịu nén của bê tông 22
1.2.2. Cường độ kéo khi uốn 23
1.2.3. Mô đun đàn hồi 23
1.2.4. Độ co ngót và giãn nở 24
1.2.5. Độ mài mòn 25
1.2.6. Tính chất công tác 26
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 26
1.3.1. Tính công tác của hỗn hợp bê tông 28
1.3.2. Khối lượng thể tích 29
1.3.3. Cường độ chịu nén 30
1.3.4. Cường độ chịu kéo gián tiếp 31
1.3.5. Mô đun đàn hồi 33

1.3.6. Hệ số poisson 34
1.3.7. Co ngót 34
1.3.8. Giãn nở nhiệt 36
1.3.9. Độ mài mòn 37
1.4. Những vấn đề tồn tại luận án cần giải quyết 37
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 39
2.1. Nghiên cứu thực nghiệm xác định một số tính chất của cốt liệu xỉ thép 40
2.1.1. Nghiên cứu các tính chất cơ lý của xỉ thép Thái Nguyên 40
2.1.2. Nghiên cứu thành phần hóa học của xỉ thép Thái Nguyên 49
2.1.3. Nghiên cứu thành phần khoáng vật của xỉ thép Thái Nguyên 52
2.1.4. Hàm lượng kim loại nặng trong xỉ thép Thái Nguyên 53
2.1.5. Nghiên cứu đánh giá khả năng trương nở thể tích của cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên 54
2.2. Nghiên cứu thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép 56
2.2.1. Cơ sở thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép 56
2.2.2. Vật liệu chế tạo bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép 58
2.2.3. Công nghệ chế tạo mẫu thử bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trong phòng thí nghiệm.....62
2.2.4. Thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm 64
2.2.5. Lập kế hoạch thí nghiệm bề mặt chỉ tiêu 69
2.2.6. Phân tích kết quả thí nghiệm.....72
2.2.7. Xác định thành phần cấp phối cho bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép 76
2.2.8. Thí nghiệm kiểm tra cường độ của các hỗn hợp GPCS thiết kế.....78
2.2.9. Thí nghiệm kiểm tra khối lượng thể tích của các hỗn hợp GPCS thiết kế 80

2.2.10. Sơ bộ tính toán giá thành của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép và so sánh với BTXM cùng cấp 82
2.3. Kết luận Chương 2 83
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 84
3.1. Kế hoạch thí nghiệm 85
3.2. Tỷ lệ thành phần của các loại bê tông sử dụng trong nghiên cứu 85
3.3. Nghiên cứu vi cấu trúc của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép 87
3.4. Tính công tác 91
3.5. Thời gian đông kết 93
3.6. Các tính chất cơ học của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép 97
3.6.1. Cường độ nén theo thời gian 97
3.6.2. Cường độ kéo uốn 100
3.6.3. Mô đun đàn hồi và hệ số poisson 104
3.6.4. Độ mài mòn 108
3.7. Co ngót khô của bê tông geopolyme tro bay cốt liệu xỉ thép 111
3.8. Hệ số giãn nở nhiệt của bê tông geopolyme tro bay cốt liệu xỉ thép .. 117
3.9. Kết luận chương 3 123
Chương 4. NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG SỬ DỤNG BÊ TÔNG GEOPOLYMER TRO BAY CỐT LIỆU XỈ THÉP 125
4.1. Tình hình thiết kế mặt đường cứng bằng BTXM truyền thống 125
4.2. Tình hình thiết kế và thi công, khai thác mặt đường cứng bằng bê tông geopolymer 126
4.3. Lựa chọn các thông số thiết kế mặt đường cứng 128
4.3.1. Các thông số về vật liệu 128
4.3.2. Mô hình tính toán 130

4.3.3. Lựa chọn cấp hạng kỹ thuật của kết cấu mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép 130
4.3.4. Lựa chọn cấu tạo kết cấu mặt đường 132
4.4. Đề xuất kết cấu mặt đường sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép 133
4.5. Kết luận chương 4 136
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ 137
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ.....141
TÀI LIỆU THAM KHẢO 143

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Vật liệu thành phần của bê tông gepolymer tro bay [102], [103] 5
Hình 1.2. Phương trình phản ứng geopolymer hóa [52] 7
Hình 1.3. Mô hình lý thuyết của quá trình geopolymer hóa của Duxson [57] 8
Hình 1.4. Tấm mặt đường Geopolyme đúc sẵn [87].....10
Hình 1.5. Mẫu gạch bêtông Geopolyme chữ I dày 80mm [101] 10
Hình 1.6. Xây dựng đoạn đường GPC tại Ấn Độ và Queensland (Úc) [102] 10
Hình 1.7. Sân bay Wellcamp (Úc) xây dựng bằng GPC [102].....11
Hình 1.8. Cốt liệu xỉ thép [26] 12
Hình 1.9. Thành phần hạt xỉ thép đã được nghiền thành cốt liệu [2] 13
Hình 1.10. Cấu trúc của xỉ thép.....13
Hình 1.11. Hiệu ứng tăng pha rắn trên thể tích lỗ rỗng. 15
Hình 1.12. SEM micrographs tại vùng chuyển tiếp của bê tông [77].....18
Hình 1.13. Phổ tán xạ năng lượng của các nguyên tố tại vùng chuyển tiếp của GPC với cốt liệu xỉ thép [77].....19
Hình 1.14. Phổ tán xạ năng lượng của các nguyên tố tại vùng chuyển tiếp của GPC với cốt liệu đá bazan [77].....19
Hình 1.15. Phổ tán xạ năng lượng của các nguyên tố tại vùng chuyển tiếp của OPC với cốt liệu xỉ thép [77].....20
Hình 1.16. Phân tích quang phổ Raman tại vùng chuyển tiếp của GPC sử dụng cốt liệu xỉ thép [77].....21
Hình 1.17. Quá trình thay đổi ứng suất do co ngót và phát triển cường độ chịu kéo của bê tông xi măng theo thời gian [23] 24
Hình 1.18. Co ngót khô của OPC [77].....35
Hình 1.19. Co ngót khô của GPC [77].....35
Hình 2.1. Sơ đồ khối kế hoạch nghiên cứu 39
Hình 2.2.Thí nghiệm một số tính chất cơ lý của cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên.....41
Hình 2.3. Loại bỏ số liệu ngoại lai khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép thô theo tiêu chuẩn Grubbs - ASTM E178 42

Hình 2.4. Biểu đồ tổng hợp thống kê khối lượng riêng cốt liệu xỉ thép thô 43
Hình 2.5. Biểu đồ kiểm định phân phối chuẩn khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép thô 43
Hình 2.6. Biểu đồ xác định giá trị đặc trưng khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép thô 43
Hình 2.7. Phổ phân tích thành phần hóa học của xỉ thép.....49
Hình 2.8. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật của xỉ thép 52
Hình 2.9. Thí nghiệm xác định độ trương nở của cốt liệu xỉ thép 55
Hình 2.10. Độ trương nở với khoảng tin cậy 95% cho giá trị trung bình của cốt liệu xỉ thép 55
Hình 2.11. Sơ đồ khối tính toán và thiết kế thành phần GPC.....57
Hình 2.12. Vật liệu thành phần của dung dịch kiềm hóa (Gel) 59
Hình 2.13. Cốt liệu xỉ thép được nghiền và thu hồi kim loại dư thưa bằng lò từ 60
Hình 2.14. Các cỡ hạt của cốt liệu xỉ thép 61
Hình 2.15. Biểu đồ cấp phối của xỉ thép cỡ hạt 4.75÷19 mm.....61
Hình 2.16. Biểu đồ cấp phối của xỉ thép cỡ hạt 0.15 ÷ 4.75 mm.....62
Hình 2.17. Máy trộn bê tông cưỡng bức 63
Hình 2.18. Trộn hỗn hợp bê tông GPCS 63
Hình 2.19. Đầm mẫu 63
Hình 2.20. Mẫu thí nghiệm trước khi tháo khuôn.....63
Hình 2.21. Sơ đồ thí nghiệm hỗn hợp tâm xoay-mặt không gian 70
Hình 2.22. Chế tạo mẫu cho thí nghiệm tâm xoay-mặt 70
Hình 2.23. Đồ thị đánh giá số dư 74
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 cường độ chịu nén R_n với SS/SH=2.5 75
Hình 2.25. Đồ thị bề mặt và đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của biến AAS/FA; SS/SH tới hàm mục tiêu R_n với NaOH = 12M.....76

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 hàm mục tiêu R_n với AAS/FA=0.45 76
Hình 2.27. Kết quả hồi quy cho các cường độ yêu cầu của GPCS 77
Hình 2.28. Mẫu hình trụ 15x30cm chế tạo từ GPCS 79
Hình 2.29. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén trên mẫu hình trụ 15x30cm 79
Hình 2.30. Hàm mật độ xác suất và giá trị đặc trưng cường độ của các hỗn hợp GPCS đã thiết kế 79
Hình 2.31. Kết quả kiểm tra cường độ của các hỗn hợp GPCS đã thiết kế 80
Hình 2.32. Thí nghiệm xác định khối lượng thể tích của hỗn hợp GPCS 81
Hình 3.1. Sơ đồ kế hoạch thực hiện thí nghiệm 84
Hình 3.2. Thiết bị phân tích kính hiển vi điện tử quét (SEM) 88
Hình 3.3. Thiết bị phân tích nhiễu xạ tia X (XRD) 88
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) 89
Hình 3.5. Kết quả SEM của mẫu geopolymer cốt liệu tự nhiên (GPC 30) 89
Hình 3.6. Kết quả SEM của mẫu geopolymer sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (GPCS 30) 89
Hình 3.7. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép theo phương pháp XRD 90
Hình 3.8. Thí nghiệm xác định độ sụt của hỗn hợp GPCS 92
Hình 3.9. Biểu đồ kết quả thí nghiệm độ sụt 93
Hình 3.10. Sơ đồ cấu tạo của dụng cụ thử xuyên 95
Hình 3.11. Thí nghiệm xuyên trên mẫu hỗn hợp bê tông geopolymer hoàn toàn cốt liệu xỉ thép 95
Hình 3.12. Biểu đồ quan hệ giữa cường độ kháng xuyên theo thời gian của các hỗn hợp bê tông tươi 96
Hình 3.13. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén của GPCS theo thời gian 98

Hình 3.14. Vết nứt của bêtông cường độ cao [21] 100
Hình 3.15. Các dạng phá hoại mẫu thử chuẩn 100
Hình 3.16. Dạng phá hoại mẫu GPCS 100
Hình 3.17. Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo uốn trên 100
Hình 3.18. Cường độ chịu uốn của các hỗn hợp GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 ... 101
Hình 3.19. Kết quả phân tích Anova Tukey cường độ chịu kéo uốn của các hỗn hợp GPCS đã thiết kế 101
Hình 3.20. Biểu đồ phân phối tích lũy và cường độ chịu kéo khi uốn đặc trưng của GPCS 102
Hình 3.21. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của GPCS 103
Hình 3.22. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi trên mẫu hình trụ 150 x 300 mm 104
Hình 3.23. Biểu đồ thể hiện kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của GPCS 106
Hình 3.24. Biểu đồ phân phối tích lũy và mô đun đàn hồi đặc trưng của GPCS ... 106
Hình 3.25. Biểu đồ quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén 107
Hình 3.26. Mô hình thí nghiệm mài mòn 108
Hình 3.27. Biểu đồ kết quả thí nghiệm độ mài mòn của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 110
Hình 3.28. Trình thự thí nghiệm đo co ngót 113
Hình 3.29. Co ngót tổng cộng và co ngót liên kết của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 . 114
Hình 3.30. Co ngót khô của GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 114
Hình 3.31. Co ngót tổng cộng và co ngót liên kết của GPCS 30, GPC 30, OPC 30 115
Hình 3.32. Co ngót khô của GPCS 30, GPC 30, OPC 30 115
Hình 3.33. Các thiết bị thí nghiệm dùng để xác định CTE 120
Hình 3.34. Dữ liệu biến dạng theo nhiệt độ được ghi lại trên máy tính bằng phần mềm của UCAM60 120
Hình 3.35. Biểu đồ quan hệ giữa biến dạng theo nhiệt độ của các loại bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 121
Hình 3.36. Biểu đồ quan hệ giữa CTE và cường độ chịu nén của bê tông GPCS .. 122

Hình 3.37. Biểu đồ quan hệ giữa biến dạng theo nhiệt độ của các loại bê tông GPCS 30, GPC 30, OPC 30 122
Hình 4.1. Công nghệ thi công mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer [104] 127
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 134

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Các dạng cấu trúc phân tử và ứng dụng của geopolymer [53] 6
Bảng 1.2. Hàm lượng CaO tự do và Ca(OH)2 trong xỉ thép và vữa geopolymer [77].....20
Bảng 1.3. Bảng tính cường độ chịu nén yêu cầu khi không có độ lệch chuẩn [35]..23
Bảng 1.4. Yêu cầu về độ sụt của hỗn hợp bê tông thi công mặt đường cứng [3].....26
Bảng 1.5. Độ sụt, hàm lượng bọt khí và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông tươi [83] 29
Bảng 1.6. Cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của GPC và OPC [77] 31
Bảng 1.7. Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của OPC và GPC sử dụng cốt liệu xỉ thép với các tỉ lệ khác nhau [83].....32
Bảng 1.8. Độ giãn nở nhiệt CTE với các loại cốt liệu khác nhau [80] 36
Bảng 2.1. Kế hoạch thí nghiệm một số tính chất của cốt liệu xỉ thép.....40
Bảng 2.2. Kết quả phân tích thống kê các chỉ tiêu cơ lí của cốt liệu xỉ thép thô.....45
Bảng 2.3. Kết quả phân tích thống kê các chỉ tiêu cơ lí của cốt liệu xỉ thép mịn.....45
Bảng 2.4. Bảng tổng hợp so sánh tính chất cơ lí của cốt liệu xỉ thép bao gồm cả cốt liệu lớn và nhỏ với một số tính chất của cốt liệu được sử dụng làm vật liệu chế tạo cho mặt đường cứng theo QĐ 1951-2012 [3] 46
Bảng 2.5. Bảng tổng hợp so sánh tính chất cơ lí của cốt liệu xỉ thép bao gồm cả cốt liệu lớn và nhỏ với kết quả nghiên cứu trong nước và một số nước trên thế giới.....47
Bảng 2.6. Bảng tổng hợp kết quả thành phần hoá học của xỉ thép nghiên cứu và so sánh với kết quả nghiên cứu trong nước và một số nước trên thế giới 51
Bảng 2.7. Bảng tổng hợp kết quả thành phần khoáng vật của xỉ thép nghiên cứu và so sánh với các kết quả trong và một số nước trên thế giới.....53
Bảng 2.8. Bảng tổng hợp kết quả thành phần kim loại nặng của xỉ thép.....53
Bảng 2.9. Kết quả thí nghiệm độ trương nở của hỗn hợp cốt liệu xỉ thép khi chưa loại bỏ sai số thô 55

Bảng 2.10. Thành phần hoá học của tro bay sử dụng trong nghiên cứu.....58
Bảng 2.11. Thành phần hạt của tro bay sử dụng trong nghiên cứu 59
Bảng 2.12. Thành phần hóa học và một số chỉ tiêu cơ lý của NaOH và Na2SiO3 ..59
Bảng 2.13. Thành phần hạt của xỉ thép cỡ hạt 4.75÷19 mm.....61
Bảng 2.14. Thành phần hạt của xỉ thép cỡ hạt 0.15÷4.75 mm.....62
Bảng 2.15. Kết quả thí nghiệm xác định ảnh hưởng của tỷ lệ AAS/FA.....66
Bảng 2.16. Giá trị và khoảng biến thiên của các yếu tố ảnh hưởng.....66
Bảng 2.17. Bảng tổng hợp khối lượng vật liệu thành phần cho 1m3 GPCS 69
Bảng 2.18. Bảng mã hóa các biến số và các điểm quy hoạch thực nghiệm 70
Bảng 2.19. Kết quả thí nghiệm theo kế hoạch hỗn hợp tâm xoay-mặt.....71
Bảng 2.20. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm nén.....72
Bảng 2.21. Phân tích phương sai ANOVA cho mô hình hồi quy đã xây dựng.....72
Bảng 2.22. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm nén sau khi đã bỏ số hạng không có nghĩa thống kê 73
Bảng 2.23. Phân tích phương sai ANOVA cho mô hình hồi quy sau khi đã bỏ số hạng không có nghĩa thống kê.....73
Bảng 2.24. Quy định về cường độ nén trung bình yêu cầu theo ACI 318-11 [35]...77
Bảng 2.25. Giá trị ba biến ứng với cường độ GPCS yêu cầu 78
Bảng 2.26. Thành phần cấp phối của GPCS cấp 25, 30, 35 MPa.....78
Bảng 2.27. So sánh giá thành sơ bộ của GPCS 30 và OPC 30 82
Bảng 3.1. Các chỉ tiêu và số lượng mẫu thí nghiệm 85
Bảng 3.2. Thành phần cấp phối của các mẫu thí nghiệm và đối chứng.....86
Bảng 3.3. Kết quả thí nghiệm độ sụt của hỗn hợp GPCS 93
Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm nén theo thời gian của GPCS.....98
Bảng 3.5. Tổng hợp kết quả cường độ chịu nén và kéo khi uốn đặc trưng từ thực nghiệm của GPCS.....103
Bảng 3.6. Kết quả cường độ kéo khi uốn đặc trưng của GPCS tính theo hàm hồi quy đề xuất và xác định từ thực nghiệm.....104
Bảng 3.7. Kết quả thí nghiệm độ mài mòn của hỗn hợp GPCS.....109

Bảng 3.8. Kết quả thí nghiệm mài mòn của OPC, GPC, GPCS có cùng cường độ chịu nén đặc trưng 30 MPa 110
Bảng 3.9. Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm CTE của các loại bê tông 121
Bảng 4.1. Các thông số của bê tông geoplymer cốt liệu xỉ thép đã thí nghiệm.....129
Bảng 4.2. Phân cấp quy mô giao thông.....131
Bảng 4.3. Cường độ kéo uốn, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson đặc trưng của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép 131
Bảng 4.4. Chiều dày tấm BTXM thông thường tùy theo cấp hạng đường và quy mô giao thông 133
Bảng 4.5. Kết cấu mặt đường đề xuất 135

DANH MỤC VIẾT TẮT, KÝ HIỆU

AAS	(Alkali activating solution) Dung dịch kiềm kích hoạt
ACI	(American Concrete Institute) Viện bê tông Hoa Kỳ
ASTM	(American Society for Testing and Materials) Viện thử nghiệm vật liệu Hoa Kỳ
BAS	(Basalt aggregate) Đá Bazan
BTXM	Bê tông xi măng
CKD	Chất kết dính
C_v	Hệ số biến động cường độ
CLL	Cốt liệu lớn
CLN	Cốt liệu nhỏ
CTE	(Coefficient of thermal expansion) Hệ số giãn nở do nhiệt
EAF	(Electric arc furnace) Xỉ thép lò hò quang điện
FA	(Fly ash) Tro bay
SS	(Sodium silicate solution) Dung dịch thủy tinh lỏng Na_2SiO_3
SFS	(Steel furnace slag) Cốt liệu xỉ thép
SH	(Sodium hydroxide solution) Dung dịch kiềm NaOH
$M_{đl}$	Mô đun độ lớn
XRF	(X-Ray Fluorescence) Huỳnh quang tia X
XRD	(Powder X-ray diffraction) Nhiễu xạ tia X
KPH	Không phát hiện
LVDT	Đầu đo biến dạng
f'_c	Cường độ nén đặc trưng (MPa)
f'_{cr}	Cường độ chịu nén yêu cầu (MPa)
GGBFS	(Ground granulated blast furnace slag) Xỉ lò cao
GPC	(Low calcium fly ash geopolymer concrete) Bê tông geopolymer
GPC 30	Bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu đá dăm và cát sông có cường độ chịu nén đặc trung 30 (MPa)
GPCS	(Geopolymer Concrete Using Entirely Steel Slag Aggregates) Bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép
GPCS 25	Bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép có cường độ chịu nén đặc trưng 25 (MPa)

GPCS 30	Bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép có cường độ chịu nén đặc trưng 30 (MPa)
GPCS 35	Bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép có cường độ chịu nén đặc trưng 35 (MPa)
OPC	Bê tông xi măng Portland thông thường
OPC 30	Bê tông xi măng thông thường có cường độ nén đặc trưng 30 (MPa)
OPCS 30	Bê tông xi măng sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn có cường độ chịu nén đặc trưng 30 (MPa)
SEM	Scanning electron microscopy (kính hiển vi điện tử quét)
KC1	Kết cấu mặt đường dạng 1
KC2	Kết cấu mặt đường dạng 2
KC3	Kết cấu mặt đường dạng 3

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề nghiên cứu

Hiện nay, BTXM Portland là vật liệu được sử dụng rộng rãi và phổ biến trong các công trình xây dựng. Tuy nhiên, lượng khí thải phát ra trong quá trình sản xuất xi măng có tác động đáng kể đến hiệu ứng nhà kính, một trong những nguyên nhân chính gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu và biến đổi khí hậu. Điều đó đặt ra yêu cầu về một loại vật liệu có thể thay thế BTXM truyền thống trong các công trình xây dựng nhằm đáp ứng nhu cầu phát triển hạ tầng đang tăng nhanh chóng, đồng thời không gây ảnh hưởng xấu đến môi trường. Kết quả là, bê tông geopolymer (GPC) đã xuất hiện như một trong những phát minh quan trọng nhất trong ngành bê tông có thể đáp ứng được cả hai tiêu chí trên. Chất kết dính geopolymer thu được bằng cách kết hợp những vật liệu giàu aluminosilicat (thường là một số chất thải công nghiệp như tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn, tro trấu…) với dung dịch kiềm hoạt tính. Trong đó, geopolymer sử dụng tro bay, thải phẩm từ các nhà máy nhiệt điện đốt than, được sử dụng và nghiên cứu nhiều nhất. Việc sử dụng tro bay trong sản xuất GPC giúp giảm đáng kể lượng khí thải CO_2 so với xi măng, tức là, thấp hơn tới 5 đến 6 lần. Trên thế giới đã có nhiều ứng dụng chất kết dính geopolymer vào thực tế từ kết cấu đường, nhà, cầu, cống, vỏ hầm, tà vẹt... [104]. Tiêu biểu là sân bay Brisbane West Wellcamp Airport, Úc (đi vào hoạt động từ 11/2014) đã sử dụng 40000 m^3 bêtông geopolymer, đã tiết kiệm hơn 6600 tấn khí thải cácbon trong việc xây dựng sân bay so với BTXM…[102].

Ở một khía cạnh khác, ưu điểm tương đối nổi bật của chất kết dính geoplymer là tính dính kết cao và tương thích với hầu hết các loại cốt liệu (tự nhiên và nhân tạo) trong quá trình rắn chắc. 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 có phương pháp 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 và năng lượng và môi trường gây ô nhiễm và có hại cho sức khỏe con người do hàm lượng kim loại nặng cao. Vì vậy, nếu xỉ thép được sử dụng để thay thế cho cốt liệu khoáng tự nhiên trong xây dựng, đó sẽ là một giải pháp hiệu quả. Với một số tính chất vượt trội như hình khối, góc cạnh nhiều, thô ráp, độ rỗng lớn, bề mặt rỗ 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 để sản xuất 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 BTXM. Bởi nhiều nghiên cứu chỉ ra quá trình thủy hóa như trong BTXM (BTXM) thông thường gây ra sự trương nở thể tích cho BTXM sử dụng cốt liệu xỉ thép [49]. Ngược lại, 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.

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*".

Kết quả nghiên cứu đạt được sẽ góp phần tạo ra một lượng vật liệu không nhỏ để giải quyết việc khan hiếm vật liệu trong xây dựng đường ô tô hiện nay, góp phần giảm giá thành xây dựng và ô nhiễm môi trường.

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;

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

3.1. Đối tượng nghiên cứu

- Các tính chất cơ lý và thành phần hóa khoáng của cốt liệu xỉ thép;
- Vật liệu thành phần của chất kết dính geopolymer;
- Phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép;
- 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 phục vụ cho việc phục vụ phân tích, thiết kế, và thi công kết cấu mặt đường;
- Các kết cấu mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép ở Việt Nam.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

Các mẫu thí nghiệm được tiến hành chế bị và thực hiện thí nghiệm ở trong phòng thí nghiệm của các Trường Đại học và Viện nghiên cứu.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

4.1. Ý nghĩa khoa học

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.

4.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu của luận án góp phần hiện thực hóa chủ trương tiết kiệm tài nguyên thiên nhiên, bảo vệ môi trường và tận dụng vật liệu tái chế (xỉ thép luyện kim, tro bay nhiệt điện) trong xây dựng đường ô tô, góp phần phát triển một loại vật liệu xây dựng mới thân thiện với môi trường.

Đề xuất được thành phần cấp phối và phương pháp thiết kế của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép sử dụng cho mặt đường cứng.

Đề xuất được các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép dùng trong tính toán thiết kế và xây dựng mặt đường ô tô.

Đề xuất phạm vi áp dụng và một số kết cấu áo đường cứng trong xây dựng đường ô tô ở Việt Nam.

5. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết, phân tích các cơ sở khoa học về các vấn đề liên quan đến các tính chất chủ yếu của xỉ thép, chất kết dính geopolymer và bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép để phục vụ thiết kế mặt đường cứng.

Nghiên cứu thực nghiệm xác định các tính chất cơ lý, thành phần hóa học và khoáng vật của xỉ thép Thái Nguyên cũng như các tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép để phục vụ thiết kế mặt đường cứng. Các nghiên cứu thực nghiệm thực hiện trong phòng trên các thiết bị đã được kiểm định và chứng nhận về chất lượng đảm bảo độ chính xác cho thí nghiệm.

Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để thiết kế thành phần bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép và phân tích xác suất thống kê trong thiết kế thực nghiệm, để xử lý kết quả thí nghiệm, đảm bảo có ý nghĩa thống kê của kết quả nghiên cứu. Sử dụng phần mềm Minitab để hỗ trợ phân tích thống kê đảm bảo độ tin cậy.

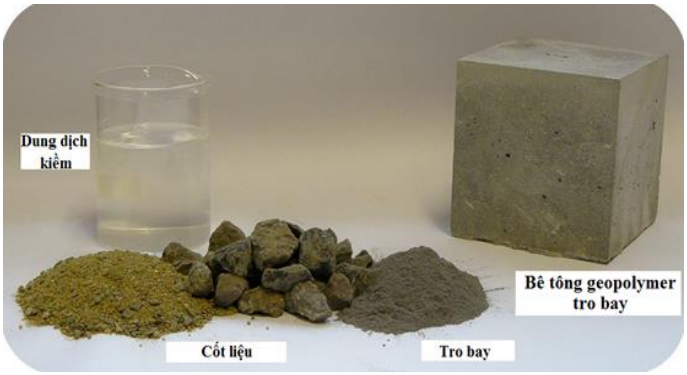
Chương 1.
TỔNG QUAN VỀ BÊ TÔNG GEOPOLYMER TRO BAY SỬ DỤNG CỐT LIỆU XỈ THÉP VÀ MỘT SỐ TÍNH CHẤT CHỦ YẾU CỦA VẬT LIỆU TRONG XÂY DỰNG MẶT ĐƯỜNG Ô TÔ Ở VIỆT NAM

1.1. Bêtông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

1.1.1. Khái niệm

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



Hình 1.1. Vật liệu thành phần của bê tông gepolymer tro bay [102], [103]

1.1.2. Chất kết dính geopolymer tro bay

1.1.2.1. Khái niệm

Chất kết dính geopolymer là loại chất kết dính nhận được khi phối hợp các vật liệu vô cơ giàu khoáng alumosilica (Si-Al) như tro bay hoặc tro trấu hoặc xỉ lò cao với dung dịch kiềm kích hoạt (bao gồm NaOH (hoặc KOH) và Na_2SiO_3 (hoặc K_2SiO_3)). Các chất này khi kết hợp với nhau sẽ xảy ra quá trình polyme hoá vô cơ (hay còn gọi là polyme hoá khoáng vật). Sản phẩm thu được là mạch polyme 3 chiều có cấu trúc chuỗi của bộ khung Si-O-Al-O cứng rắn và bền vững. Sau khi rắn

chắc, sản phẩm đá polyme vô cơ có các tính chất ít nhất tương tự như các loại đá nhân tạo truyền thống khác.

Chất kết dính geopolymer tro bay là chất kết dính tạo thành từ tro bay và dung dịch kiềm kích hoạt. Trong các nghiên cứu về chất kết dính geopolymer, chất kết dính geopolymer tro bay được nghiên cứu và ứng dụng nhiều nhất trong thực tế.

1.1.2.2. Cấu trúc hóa học của chất kết dính geopolymer tro bay

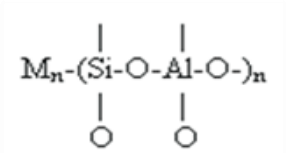
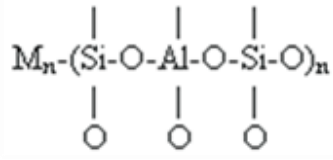
Thành phần hóa học của vật liệu geopolymer tro bay tương tự như các vật liệu zeolite tự nhiên, nhưng vi cấu trúc là vô định hình [84]. Davidovits cho rằng khung cấu trúc của geopolymer này là "poly-sialate". Các mạng polysialate là một khung bao gồm các cấu trúc ba chiều rất cứng chắc của $(SiO_4)^{4-}$ và $(AlO_4)^{5-}$ ở dạng tứ diện liên kết theo mọi hướng bằng cách chia sẻ các nguyên tử oxy với các mức độ khác nhau để thay thế aluminat (nhôm ở dạng oxit) [52]. Các ion dương (cation) có thể là bất kỳ một trong các kim loại kiềm hoặc kiềm thổ có mặt để trung hòa điện tích âm của các đơn vị tứ diện $(AlO_4)^{5-}$ trong mạng polysialate. Các mức độ thay thế aluminat khác nhau sẽ tạo ra các cấu trúc phân tử geopolymer khác nhau. Tỷ lệ nguyên tử Si:Al trong cấu trúc sialate sẽ xác định các tính chất và ứng dụng của geopolymer [53].

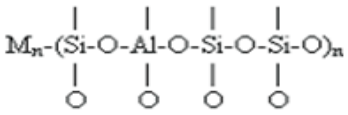
$$Mn\ (-\ (SiO_2)z\text{-}AlO_2)n\ .wH_2O$$

Trong đó: "M" là một cation (ion dương); "n" là số chỉ mức độ trùng ngưng;

"-" chỉ ra là sự hiện diện của 1 liên kết; "z" là mức độ thay thế aluminat

Bảng 1.1. Các dạng cấu trúc phân tử và ứng dụng của geopolymer [53]

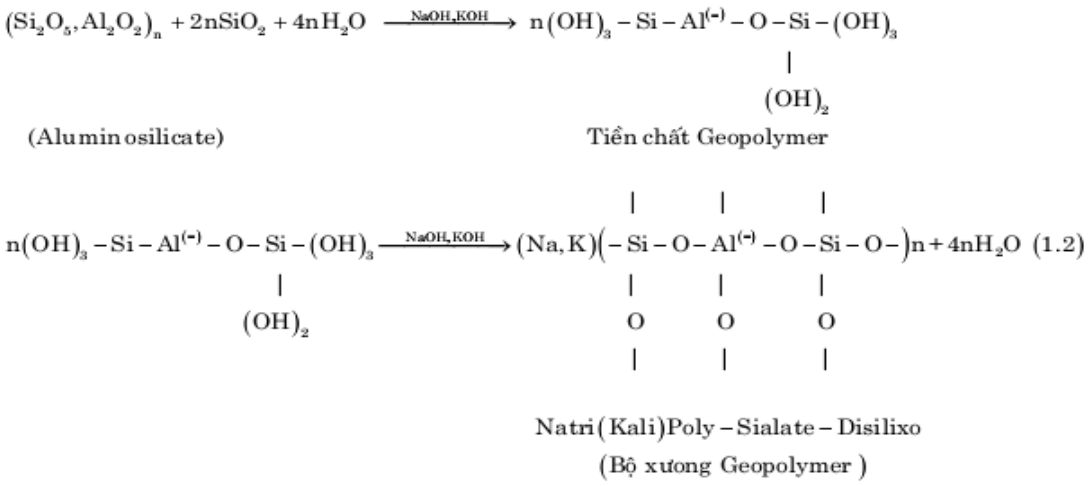
Phân loại	Tỷ lệ Si / Al	Sơ đồ cấu trúc	Ứng dụng
Poly-sialate (PS)	1		Gạch, gốm sứ và vật liệu phòng cháy
Poly-sialate-siloxo (PSS)	2		Chất kết dính cho bêtông, bao bọc chất phóng xạ và độc hại

Phân loại	Tỷ lệ Si / Al	Sơ đồ cấu trúc	Ứng dụng
Poly-sialate-disiloxo (PSDS)	3		Vật liệu tổng hợp chịu nhiệt 200°C-1000°C và các khuôn đúc
Poly-silate multisiloxo (PSMS)	>3	Liên kết các Sialate	Vật liệu gắn kín cho công nghiệp 200°C-600°C. Vật liệu chịu lửa

1.1.2.3. Cơ chế phản ứng geopolymer hóa

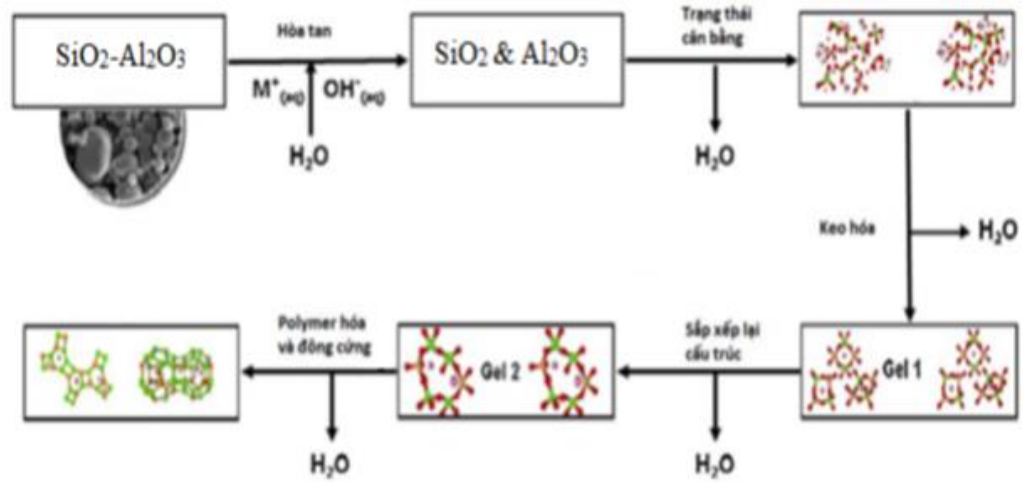
Quá trình geopolymer hóa liên quan đến một phản ứng hóa học xảy ra giữa các oxit aluminosilicat và các silicat khác nhau trong môi trường kiềm. Sự hình thành vật liệu geopolymer có thể được mô tả từ các phương trình phản ứng hóa học ở Hình 1.2.

Các phương trình hóa học cho thấy, nước là một trong những sản phẩm cuối cùng của quá trình geopolymer hóa. Nước bị loại khỏi chất kết dính geopolymer trong suốt quá trình bảo dưỡng và trong suốt thời kỳ hóa rắn và để lại các lỗ rỗng nhỏ kích thước nano không liên tục trong chất kết dính. Hardjito và Rangan [66] còn cho rằng nước trong hỗn hợp geopolymer không có vai trò trong quá trình geopolymer hóa. Do đó, nước không có vai trò trong khi phản ứng hóa học diễn ra, trái ngược với phản ứng hóa học của nước trong hỗn hợp BTXM, trong hỗn hợp bêtông geopolymer, nước chỉ đơn thuần làm tăng tính công tác của hỗn hợp [66].



Hình 1.2. Phương trình phản ứng geopolymer hóa [52]

Duxson đã tổng kết các bước của quá trình geopolymer hóa như Hình 1.3 với các quy trình quan trọng xảy ra trong quá trình chuyển đổi nguyên liệu aluminosilicat ở dạng bột rắn thành dạng tổng hợp kiềm aluminosilicat. Phần lớn các quá trình này xảy ra đồng thời. Hòa tan nguyên liệu aluminosilicat rắn bằng cách kiềm thủy phân (tiêu tốn nước) để tạo ra các dạng aluminat và silicat trong quá trình tổng hợp geopolymer [57].



Hình 1.3. Mô hình lý thuyết của quá trình geopolymer hóa của Duxson [57]

1.1.2.4. Các lợi ích và hạn chế của việc sử dụng chất kết dính geopolymer tro bay

Việc sử dụng chất kết dính geopolymer tro bay nhằm thay thế cho xi măng, loại chất kết dính được sử dụng phổ biến nhất hiện nay trong xây dựng công trình sẽ góp phần giảm hiện tượng nóng lên toàn cầu. Theo Davidoits [52], bê tông geopolymer giảm khả năng gây hiệu ứng nhà kính khoảng 26- 45% so với BTXM thông thường.

Ngoài ra, chất kết dinh geopolymer tro bay được coi là giải pháp kinh tế đáng kể so với xi măng. Giá thành của 1 tấn tro bay/ xỉ chỉ bằng một phần nhỏ so với giá của 1 tấn xi măng. Do đó, giá của bê tông geopolymer tro bay ước tính rẻ hơn BTXM khoảng 10%-30% [90].

Trong phản ứng geopolymer hóa của chất kết dính, nước chỉ đóng vai trò tạo tính công tác, không tham gia tạo cấu trúc geopolymer, không tham gia phản ứng hóa học mà có thể bị loại ra trong quá trình bảo dưỡng và sấy (không giống như xi

măng cần nước để thủy hóa). Phản ứng geopolymer hóa không tỏa nhiệt nhiều như phản ứng thủy hóa xi măng. Nhiều nghiên cứu cho rằng, bê tông geopolymer sử dụng tro bay ít canxi sẽ tạo cường độ cao, co khô ít, từ biến thấp. Đặc biệt, theo một số nghiên cứu chỉ ra rằng bê tông Geopolymer có tính chất chịu hóa học, chịu nhiệt tốt (300-1000°C), có khả năng chịu ăn mòn hóa học cực tốt và tốt nhất là khả năng chịu axit. Khả năng gắn kết với cốt thép của bê tông geopolymer đã được nghiên cứu và so sánh là tương đương hoặc cao hơn BTXM sunphat [51].

Bên cạnh những lợi ích về kinh tế-kỹ thuật-môi trường mà chất kết dính geopolymer đem lại thì vẫn còn một số hạn chế tồn tại như giá thành dung dịch kiềm còn cao; khi sử dụng chất kiềm hoạt hóa là thủy tinh lỏng và xút, môi trường có tính kiềm cao cần đảm an toàn lao động phù hợp; chưa có các tiêu chuẩn thiết kế và thi công được sử dụng phổ biến rộng rãi và chưa tìm ra cách đơn giản hóa quá trình thi công giống như cách trộn xi măng với nước của chất kết dính xi măng poóclăng thông thường.

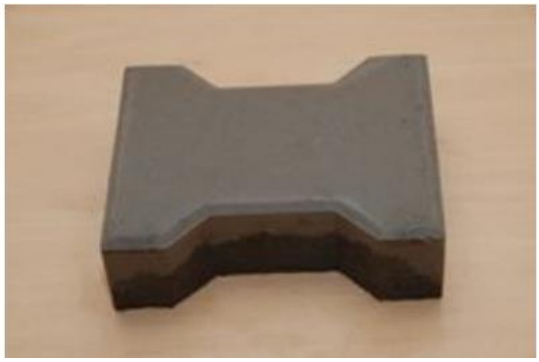
1.1.2.5. Ứng dụng chất kết dính geopolymer tro bay trong xây dựng đường

Trên thế giới đã có nhiều quốc giá ứng dụng chất kết dính geopolymer vào kết cấu thực tế như Pháp, Úc rất phát triển về công nghệ gepolymer đã ban hành các tiêu chuẩn, chỉ dẫn về việc sử dụng vật liệu này như AP-T318-2016 [45]; AP-T329-2017 [46]; ATS 5330-2020 [40] và đặc biệt trong lĩnh vực xây dựng đường ô tô và sân bay.

i) Mặt đường bêtông geopolymer dạng tấm đúc sẵn

Tấm bản GPC đúc sẵn có thể có hoặc không có cốt thép, được chế tạo tại xưởng và vận chuyển đến công trường lắp ghép thành mặt đường. Các tấm này có thể đặt trực tiếp trên nền đất, nền cát hoặc móng đá dăm (Hình 1.4) [87] . Ngoài ra, việc chế tạo ra các viên gạch bằng bêtông geopolymer (Hình 1.5) có cường độ chịu kéo uốn lớn, tính năng chống mài mòn va đập cao với giá thành cạnh tranh đã mở ra khả năng áp dụng loại mặt đường lát gạch geopolymer tự chèn [101].

Hình 1.4. Tấm mặt đường Geopolyme đúc sẵn [87]



Hình 1.5. Mẫu gạch bêtông Geopolyme chữ I dày 80mm [101]

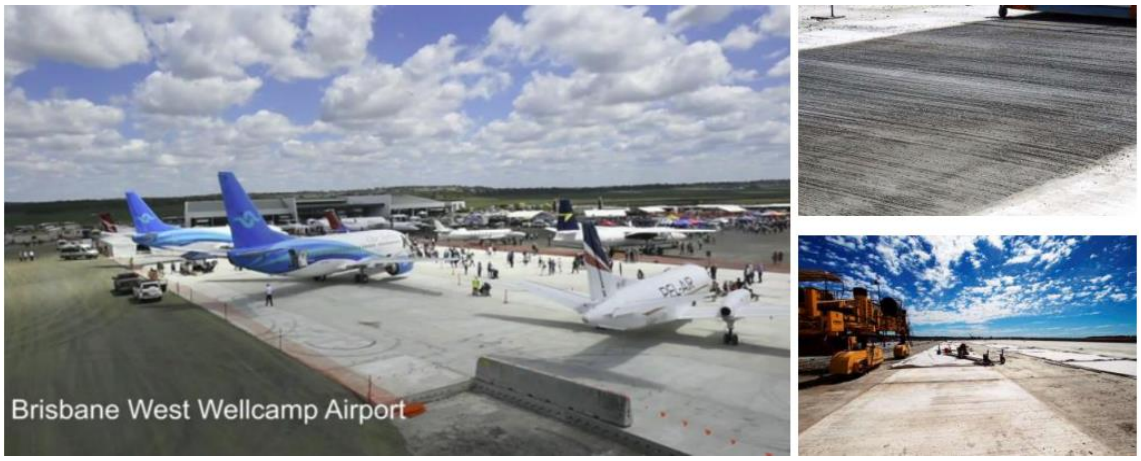
ii) Mặt đường bêtông geopolyme thi công tại chỗ

Tại Ấn Độ, Công ty Sesa Sterlite đã xây dựng một con đường GPC dài 40m. Kết quả cho thấy đường GPC có cường độ và tính chất tương tự như đường BTXM.

Hình 1.6. Xây dựng đoạn đường GPC tại Ấn Độ và Queensland (Úc) [102]

Tại Úc, Công ty Zeobond đã phát triển sản xuất và hiện đang cung cấp sản phẩm bêtông geopolymer, E-Crete(TM) cho các dự án mở rộng đường cao tốc và xây dựng các công trình kết cấu mặt đường thi công tại chỗ và lắp ghép tại tiểu bang. Kết quả cho thấy mặt đường E-Crete ™ có chất lượng tương đương như mặt đường BTXM. Công ty Wagners (Úc) đã cung cấp 40000 m^3 bêtông geopolymer cho dự án sân bay Brisbane West Wellcamp Airport (BWWA). Dự án xây dựng thành công và hiệu quả nhanh chóng như là một minh chứng tuyệt vời rằng GPC có thể thay thế cho bêtông xi măng Portland. Dự án đã tiết kiệm hơn 6.600 tấn khí thải cácbon trong việc xây dựng sân bay so với OPC. Sân bay đã hoàn thành việc xây

dựng và đi vào hoạt động 11/2014 [63]. Dự án mặt đường tại BWWA là ứng dụng thương mại lớn nhất của bêtông Geopolyme hiện đại trên thế giới.



Hình 1.7. Sân bay Wellcamp (Úc) xây dựng bằng GPC [102]

iii) Các ứng dụng khác

Một trong những ứng dụng khác của GPC là trong xây dựng dân dụng. Tòa nhà của Viện nghiên cứu biến đổi toàn cầu (Global Change Institute) Đại học Queensland (Úc) có 3 tầng sử dụng 33 chiếc dầm sử dụng GPC cấp 40 đúc sẵn. Ngoài ra, cấu kiện đúc sẵn từ vật liệu GPC cũng được quan tâm phát triển. Công ty Wagners đã thực hiện việc đúc hai dầm cầu bằng vật liệu GPC 50MPa đầu tiên của Úc. Các dự án thử nghiệm sản xuất thành công vỏ đường hầm đã được tiến hành tại Úc, Malaysia và Đức. Nghiên cứu của trường đại học RMIT cho thấy vỏ đường hầm bằng GPC đáp ứng tốt khi tiếp xúc với điều kiện mặt đất bị nhiễm sulfate nặng. Công ty Rocla (Úc) đã đưa vào sản xuất thương mại thành công các sản phẩm GPC như ống thoát nước, cống hộp, tà vẹt đường sắt….vv

1.1.3. Cốt liệu xỉ thép

Xỉ thép là sản phẩm phụ của quá trình luyện thép. Các loại xỉ thép khác nhau được hình thành tùy thuộc vào vật liệu đầu vào và công nghệ của lò luyện được sử dụng trong quá trình sản xuất thép. Lượng xỉ thải ra trong quá trình này chiếm khoảng 15% khối lượng sản phẩm thép. Ở nước ta, theo ước tính có khoảng 1-1.5 triệu tấn xỉ thép thải ra mỗi năm từ các nhà máy sản xuất thép lớn [27].

Xỉ thép được phân loại thành các loại khác nhau tùy thuộc vào phương pháp làm mát, thực tế tất cả xỉ thép được làm lạnh tự nhiên, bằng không khí trong điều

kiện môi trường xung quanh. Xỉ thép được phân loại theo lò được sử dụng để sản xuất thép. Hiện nay trên thế giới, thép được sản xuất bằng 2 công nghệ: Công nghệ lò cao - lò chuyển thổi ô xy - đúc liên tục (BOF); Công nghệ lò điện hồ quang - đúc liên tục (EAF). Ở Việt nam, phần lớn thép được sản xuất bằng công nghệ lò điện hồ quang - đúc liên tục.

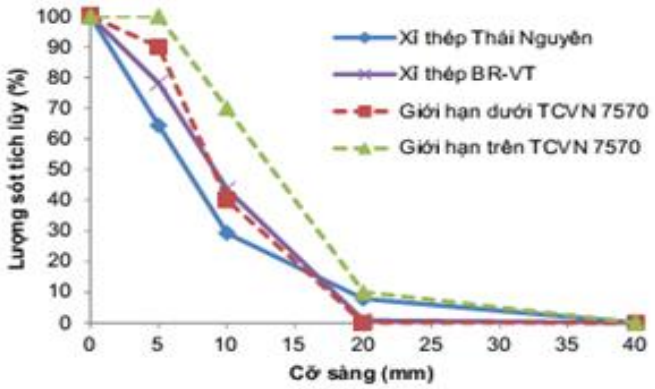
Hiện nay, xỉ thép được ứng dụng làm vật liệu hạt cấp phối cho san lấp nền, làm móng đường và cốt liệu cho bê tông. Tuy nhiên, xỉ thép ở mỗi quốc gia, ở các nhà máy luyện thép khác nhau sẽ có các tính chất cơ lý, thành phần hóa học, khoáng vật khác nhau vì chất lượng của xỉ thép sẽ phụ thuộc vào nguyên vật liệu đầu vào, công nghệ luyện kim, quá trình nghiền phân loại và sàng lọc. Do đó, một số kết quả nghiên cứu còn phân tán, kết quả của các nghiên cứu có sự khác biệt. Vì vậy, với mỗi nguồn cung cấp xỉ thép cần phải nghiên cứu các đặc tính của nó để có cơ sở đánh giá khả năng sử dụng xỉ thép.

Hình 1.8. Cốt liệu xỉ thép [26]

1.1.3.1. Các đặc trưng cơ lý của xỉ thép

Xỉ thép có màu xám đen, khối lượng thể tích lớn hơn so với đá tự nhiên (khoảng 15-25%). Chất lượng của xỉ thép phụ thuộc vào nguyên vật liệu đầu vào và công nghệ của quá trình luyện thép.

Xỉ thép thường được nghiền và sàng thành cỡ hạt có kích thước lớn nhất 40 mm hoặc nhỏ hơn. Hình 1.9 minh họa cấp phối hạt của xỉ thép phục vụ cho xây dựng của một số nguồn xỉ thép tại Việt Nam [2].

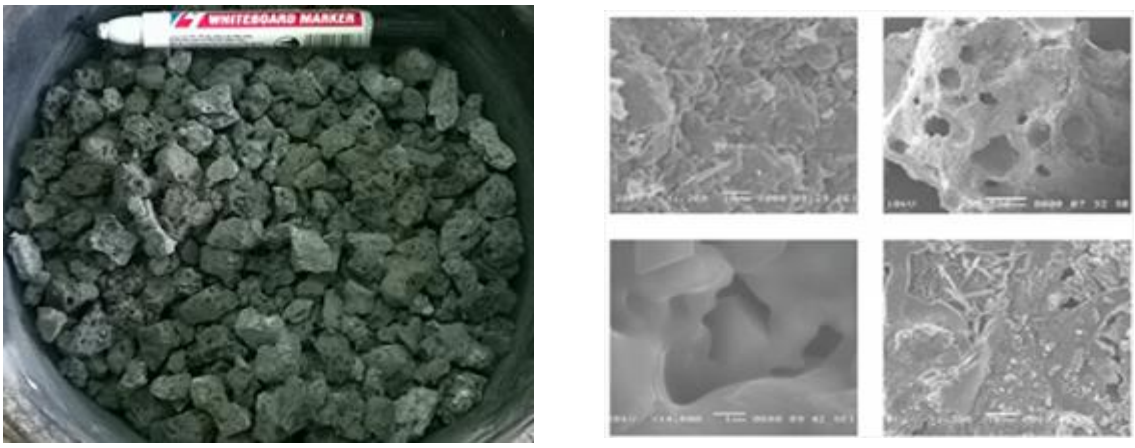


Hình 1.9. Thành phần hạt xỉ thép đã được nghiền thành cốt liệu [2]

Khối lượng riêng của xỉ thép khá cao (3.4-3.8 g/cm^3). Khối lượng thể tích của xỉ thép trong khoảng 3.2-3.6 g/cm^3. Khối lượng thể tích của các hạt xỉ thép nhỏ hơn 5mm thấp hơn so với xỉ thép cỡ hạt thô hơn. Khối lượng thể tích xốp của xỉ thép phụ thuộc vào phân bố cỡ hạt và mức độ đầm chặt, khối lượng thể tích xốp ở trạng thái tự nhiên trong khoảng 1600-1900 kg/m^3. Độ hút nước của xỉ thép khá cao khoảng 5.46-6.92% và cao hơn đá dăm do cấu trúc độ rỗng lớn [2].

Hàm lượng hạt dẹt thấp từ 1.4-10.3%; cường độ, khả năng chịu va đập và đặc biệt độ mài mòn LA từ 13-25%, ma sát cao, độ nén dập trong xi lanh khá tốt, từ 12.1-23%, đáp ứng được yêu cầu của vật liệu làm đường ô tô.

Hạt xỉ thép có bề mặt thô, hình dạng góc cạnh, nên góc nội ma sát của xỉ thép lớn, khoảng 40-45°, lớn hơn của đá tự nhiên nghiền, làm các hạt có thể chèn móc vào với nhau, ổn định cao nếu được đầm chặt [2].



Hình 1.10. Cấu trúc của xỉ thép

1.1.3.2. Thành phần hóa học và khoáng vật của xỉ thép

Thành phần hóa học của xỉ EAF phụ thuộc đáng kể vào các thuộc tính của nguyên liệu đầu vào như gang, quặng sắt hay thép tái chế. Các thành phần hóa học và thành phần khoáng vật của xỉ EAF từ các nguồn khác nhau thường rất khác nhau. Thành phần hóa học chính của xỉ thép cũng bao gồm các ôxít tương tự như cốt liệu đá dăm, chủ yếu là các ôxít: CaO, FexOy, SiO_2, MgO và Al_2O_3…

Thành phần khoáng vật của xỉ thép có sự khác biệt và có nhiều thành phần khoáng vật khác nhau chủ yếu phụ thuộc vào nguyên vật liệu đầu vào và công nghệ của quá trình luyện thép. Thành phần khoáng vật của xỉ thép chủ yếu là Wuestite (FeO), CS: Calcium Silicates ($2CaO.SiO_2$, C2S và $3CaO.SiO_2$, C3S); Brownmillerite ($Ca_2(Al,Fe)_2O_5$, C4AF; Mayenite ($12CaO.7Al_2O_3$, C12A7). Các khoáng CS, B và M là những khoáng chất có trong thành phần khoáng clinker xi măng và trong một số trường hợp thành phần khoáng vật của xỉ thép có tồn tại CaO tự do [27]

1.1.3.3. Tính trương nở của cốt liệu xỉ thép

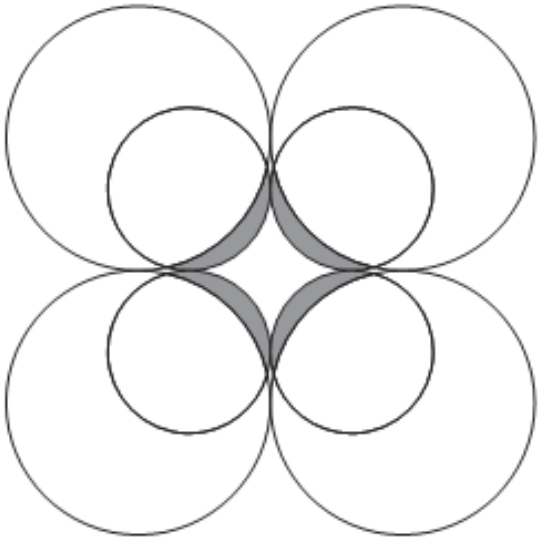
Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng xỉ thép rất dễ bị trương nở thể tích (87). Nguyên nhân chính gây ra vấn đề nay được giải thích do trong thành phần hóa học của xỉ thép có CaO, MgO tự do hay trong thành phần khoáng vật có chứa silicat dicalcium (C_2S).

Nghiên cứu cơ chế hydrat hóa của CaO đã chứng minh rằng khi nó ngậm nước, CaO có thể hydrat gần như hoàn toàn trong một vài ngày. Ứng suất này có thể vượt quá 30000 Psi (200 MPa) [58].

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$$

Vôi tự do (CaO) sẽ phản ứng với nước để tạo ra $Ca(OH)_2$ dẫn đến tăng thể tích của sản phẩm. Đây được coi là nguyên nhân chính dẫn đến việc giãn nở thể tích ở xỉ thép [79]. Cơ chế trương nở của MgO tự do (periclase) có thể được giải thích tương tự bằng cách sử dụng sơ đồ ...



Hình 1.11. Hiệu ứng tăng pha rắn trên thể tích lỗ rỗng

Quả cầu nhỏ: Thể tích ban đầu của pha rắn

Quả cầu lớn: Thể tích sau phản ứng của pha rắn

Khoảng cách giữa các quả cầu nhỏ: Thể tích ban đầu của lỗ rỗng

Phần viền tô đậm: phần tăng thể tích lỗ rỗng

Khoảng cách giữa các quả cầu lớn bao gồm phần viền tô đậm: Thể tích sau phản ứng của lỗ rỗng.

Tuy nhiên, thành phần CaO chìm sâu trong hạt xỉ thép có thể không bị hydrat nếu các các hạt xỉ không bị nứt. Không giống như CaO, MgO hydrat với một tốc độ chậm hơn nhiều, chỉ gây ra những thay đổi khối lượng đáng kể trong nhiều tháng hoặc thậm chí nhiều năm. Nói chung, xỉ được tạo ra từ các công nghệ sản xuất thép hiện đại có hàm lượng MgO thấp.

Ngoài ra, thành phần khoáng vật silicat dicalcium C_2S thường có mặt trong tất cả các loại xỉ thép và tồn tại trong bốn dạng thù hình: α, α ', β và γ. α-C_2S ổn định ở nhiệt độ cao (> 630°C). Ở nhiệt độ dưới 500°C, β-C_2S bắt đầu chuyển đổi thành γ-C_2S. Quá trình chuyển hóa này làm trương nở thể tích lên đến 10%. Nếu quá trình làm mát xỉ thép là chậm, tinh thể bị phá vỡ, kết quả trong xỉ thép chứa một một lượng đáng kể bụi.

1.1.3.4. Ứng dụng của cốt liệu xỉ thép

Xỉ thép được ứng dụng cho kết cấu áo đường ở các dạng chính như: Vật liệu hạt cấp phối cho san lấp nền, làm móng đường và cốt liệu cho bê tông nhựa nóng.

Xỉ thép có thể dùng làm cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ cho bê tông nhựa. Tuy nhiên không nên dùng 100% cả cốt liệu nhỏ và lớn từ xỉ thép vì thường tạo độ rỗng cao, làm tăng hàm lượng dùng bitum và giảm khả năng chống hằn lún vệt bánh xe của bê tông nhựa. Do có cường độ, chống mài mòn, khả năng chống va đập, tính ổn định, bám dính đều ở mức "rất tốt" nên xỉ thép thường được sử dụng làm cốt liệu bê tông nhựa cho các loại mặt đường cấp cao, có lưu lượng giao thông lớn. Thiết kế và thi công bê tông nhựa sử dụng cốt liệu xỉ thép tương tự như với cốt liệu từ đá tự nhiên [2].

Một số tác giả như Anastasiou và Papayianni, Maslehuddin, Manso và Gonzalez [71] , Abdulaziz thực hiện một số nghiên cứu về cường độ và độ bền của BTXM sử dụng cốt liệu xỉ thép. Kết quả đã chỉ ra các ưu điểm vượt trội của chúng về cường độ chịu nén, độ co ngót khi so sánh với BTXM sử dụng cốt liệu thông thường. Nhưng trên thực tế hiện nay ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu cho BTXM trong xây dựng còn rất hạn chế. Điều này có thể là do khi dùng xỉ thép làm cốt liệu có hai vấn dề chính cần chú ý đó là sự trương nở thể tích và tỷ trọng hạt lớn. Sự gia tăng thể tich lớn do sự thay đổi về tỷ trọng của sản phẩm hydrat hóa do Cao và MgO tự do như đã trình bày ở mục 1.1.3.3. Những thay đổi về thể tích có thể xảy ra trong vài tuần sau khi sản xuất xỉ hoặc có thể xảy ra sau nhiều năm sau nếu xỉ được che chắn, bảo vệ khỏi nước. Một phương pháp thường được sử dụng để khắc phục vấn đề là để xỉ thép phong hóa trong bãi từ 4-6 tháng trước khi sử dụng nhằm giảm lượng vôi tự do xuống mức chấp nhận được. Trong quá trình này, xỉ thép phải tiếp xúc với nước để quá trình hydrat hóa giữa vôi và nước diễn ra.

Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng hoàn toàn có thể sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông geopoplymer mà không gây trương nở thể tích như đối với BTXM đồng thời vẫn đảm bảo các tính chất tương tự như với BTXM (mục 1.3). Đánh giá

sự kết hợp giữa chất kết dính geopolymer tro bay và cốt liệu xỉ thép thông qua các phân tích vi cấu trúc sẽ được trình bày trong mục 1.1.4 dưới đây.

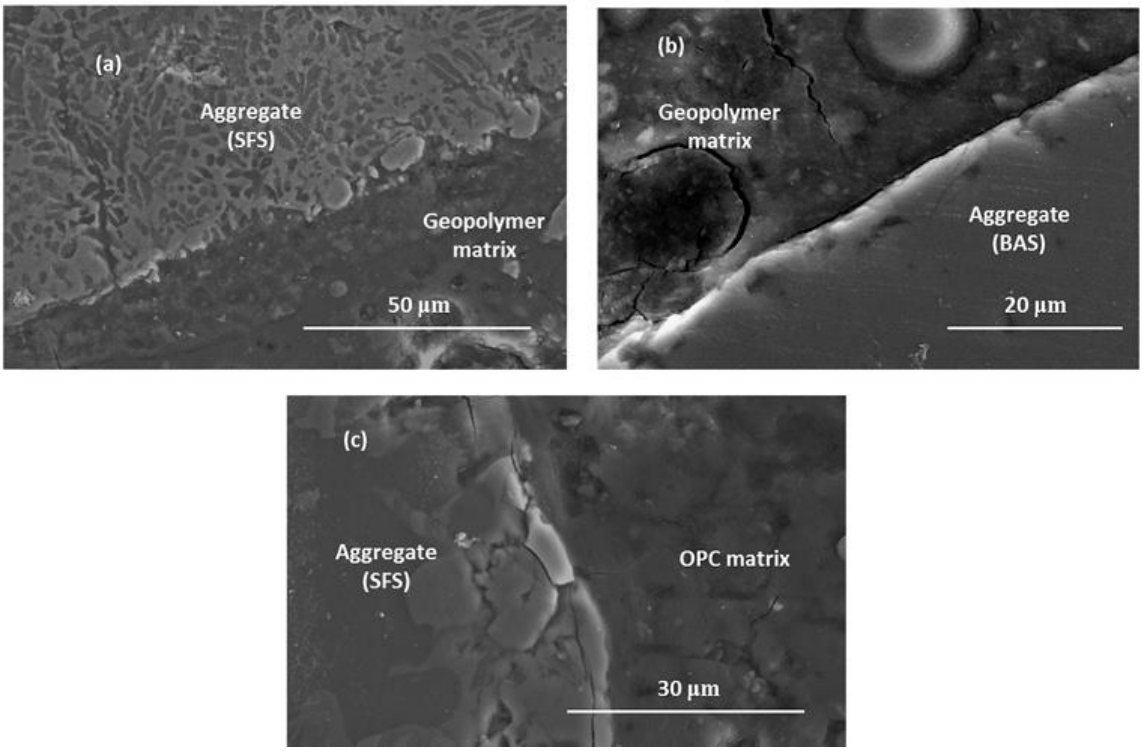
1.1.4. Đánh giá sự kết hợp giữa chất kết dính geopolymer tro bay và cốt liệu xỉ thép thông qua các phân tích vi cấu trúc

Cấu trúc của bê tông có quan hệ chặt chẽ đến độ đặc chắc của bê tông. Những cấu trúc bê tông khác nhau sẽ dẫn đến những biến đổi về cường độ cũng như một số đặc tính khác của bê tông. Trong BTXM, khu vực rất nhỏ nằm ở giữa ranh giới đá xi măng và các hạt cốt liệu được gọi là vùng chuyển tiếp (interfacial transition zone ITZ) và chất lượng của ITZ là một trong những yếu tố chính điều chỉnh cường độ và các tính chất tức thời của bê tông. Vùng chuyển tiếp có cấu trúc và cường độ tốt sẽ tăng cường khả năng liên kết trong cấu trúc và cải thiện các tính năng làm việc của BTXM [21].

Theo nghiên cứu của M.S.H. Khan [77] vùng chuyển tiếp trong bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép so sánh với bê tông geopolymer tro bay cốt liệu lớn là đá tự nhiên và BTXM cốt liệu lớn là xỉ thép. Kết quả cho thấy, bề mặt cốt liệu xỉ thép đã có tương tác hóa học với chất kết dính GPC làm cho cấu trúc vùng chuyển tiếp trong bê tông geopolymer tro bay đã được cải thiện đáng kể so với BTXM. Đặc biệt, bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép gần như không tồn tại vùng chuyển tiếp. Ngược lại, vùng chuyển tiếp của BTXM sử dụng cốt liệu xỉ thép rất rõ ràng và tồn tại các vết nứt lớn. Điều này bước đầu cho thấy sự phù hợp của việc sử dụng cốt liệu xỉ thép trong bê tông geopolymer tro bay.

1.1.4.1. Phân tích SEM micrographs vùng chuyển tiếp

M.S.H. Khan và các cộng sự [77] tiến hành phân tích hình ảnh SEM (Scaning electron microscope) tại ITZ cho các hỗn hợp khác nhau bao gồm GPC cốt liệu xỉ thép (Hình 1.12a), GPC cốt liệu đá bazan (Hình 1.12b), OPC cốt liệu xỉ thép (Hình 1.12c). Kết quả cho thấy một vết nứt nhỏ liên tục tại vùng chuyển tiếp của chất kết dính geopolymer và cốt liệu đá bazan (Hình 1.12b), và vết nứt rất nhỏ liên tục ở vùng chuyển tiếp của xỉ thép và đá xi măng (Hình 1.12c).



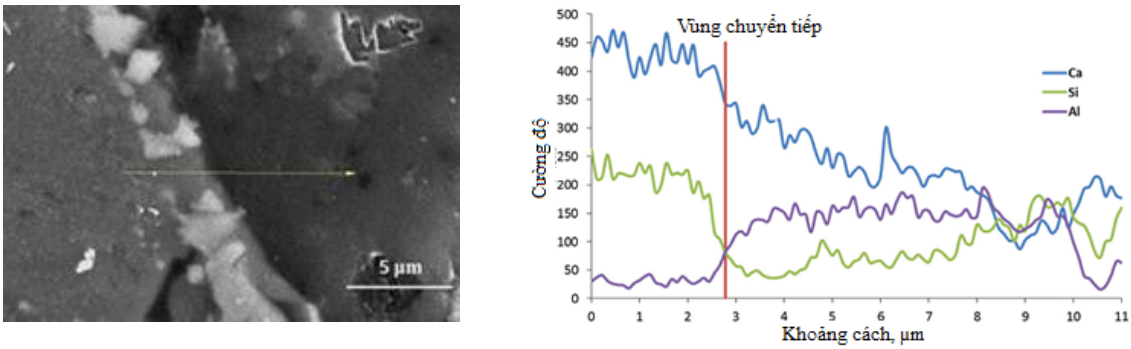
Hình 1.12. SEM micrographs tại vùng chuyển tiếp của bê tông [77]

Chính các vết nứt vi mô này làm cho vùng chuyển tiếp của GPC cốt liệu đá bazan và OPC cốt liệu xỉ thép khá xốp và yếu. Tuy nhiên, ở Hình 1.12a không thấy xuất hiện vết nứt vi mô tại vùng chuyển tiếp của chất kết dính geopolymer và cốt liệu xỉ thép. Bề mặt xù xì góc cạnh cùng với độ rỗng cao của xỉ thép góp phần cải thiện liên kết với cấu trúc của chất kết dính geopolymer. Tuy nhiên, đây không phải là lý do duy nhất tạo liên kết chặt chẽ của vùng ITZ giữa cốt liệu xỉ thép và chất kết dính geopolymer bởi vì ở Hình 1.12c cũng cùng một loại cốt liệu xỉ thép như vậy mà trên bề mặt vùng chuyển tiếp vẫn xuất hiện vết nứt vi mô liên tục giữa cốt liệu xỉ thép và đá xi măng. Như vậy do sự tương tác hóa học giữa cốt liệu xỉ thép và chất kết dính geopolymer khiến cho liên kết giữa xỉ thép và chất kết dính GPC mạnh mẽ. Tác giả đã phân tích các tương tác này bằng cách sử dụng quang phổ tán xạ năng lượng (EDS) và quang phổ Raman.

1.1.4.2. Phân tích quang phổ tán sắc năng lượng (EDS) vùng chuyển tiếp

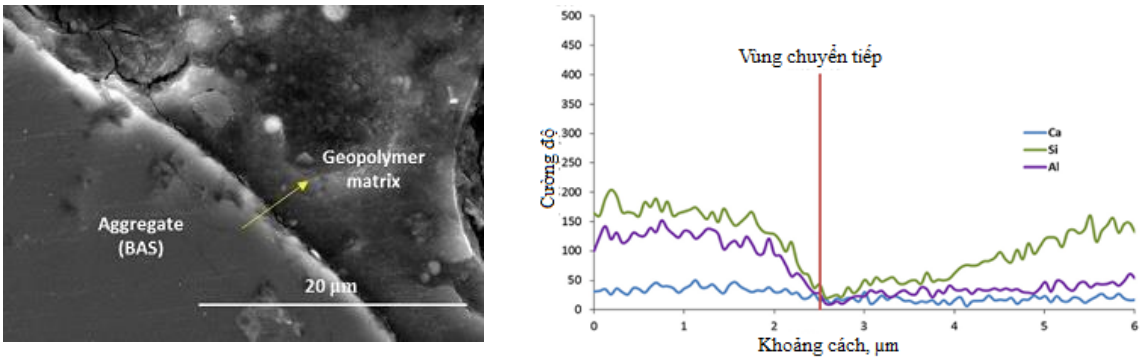
Trong nghiên cứu của M.S.H. Khan [77] thực hiện kỹ thuật EDS để xem xét sự khuếch tán của cốt liệu xỉ thép trong môi trường kiềm cao. Tác giả đã nghiên cứu

các vùng chuyển tiếp của chất kết dính geopolymer với cốt liệu xỉ thép (GPC-SFS) như Hình 1.13; chất kết dính geopolymer với cốt liệu đá bazan (GPC-BAS) như Hình 1.14 và chất kết dính xi măng với xỉ thép (OPC-SFS) như Hình 1.15. Các hình ảnh chỉ hiển thị trắc dọc của phổ năng lượng của các nguyên tố chính là Ca, Si và Al. Đối với GPC-SFS, có một sự thay đổi năng lượng tia X rất mạnh mẽ trên trắc dọc phổ năng lượng của Si và Al. Tuy nhiên, trắc dọc phổ năng lượng của nguyên tố Ca đã không thay đổi đột ngột tại vùng chuyển tiếp, thay vào đó nó từ từ giảm xuống để đạt được sự ổn định. Điều đó cho thấy đã có sự khuếch tán Ca^{2+} từ cốt liệu xỉ thép vào cấu trúc của chất kết dính geopolymer.

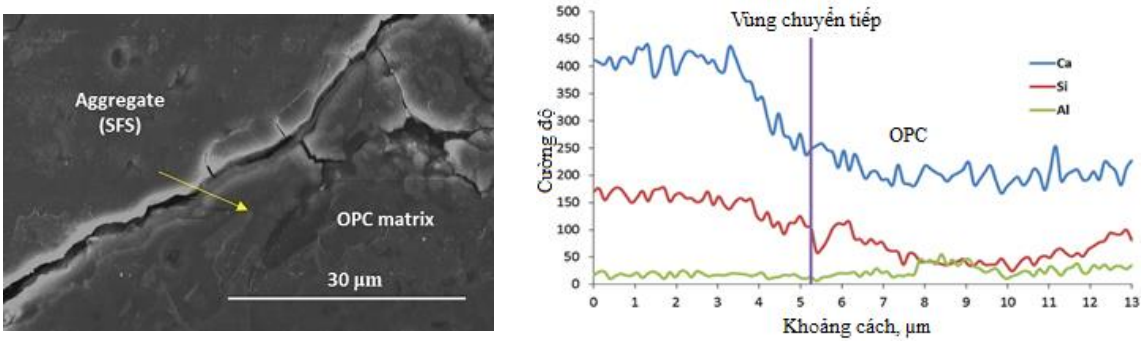


Hình 1.13. Phổ tán xạ năng lượng của các nguyên tố tại vùng chuyển tiếp của GPC với cốt liệu xỉ thép [77]

Ngược lại, không có sự thay đổi đột ngột trắc dọc phổ năng lượng của Ca, Si và Al ở lân cận vùng chuyển tiếp GPC-BAS và OPC-SFS. Điều đó cho thấy không có sự khuếch tán hoặc trao đổi các phần tử diễn ra giữa cốt liệu và chất kết dính.



Hình 1.14. Phổ tán xạ năng lượng của các nguyên tố tại vùng chuyển tiếp của GPC với cốt liệu đá bazan [77].



Hình 1.15. Phổ tán xạ năng lượng của các nguyên tố tại vùng chuyển tiếp của OPC với cốt liệu xỉ thép [77]

1.1.4.3. Sự khuếch tán Ca^{2+} và Mg^{2+} trong cấu trúc của Geopolymer cốt liệu xỉ thép

CaO trong cốt liệu xỉ thép chủ yếu tồn tại ở hai thể, một là ở dạng kết tinh, hai là ở dạng tự do khi chưa phản ứng [49]. CaO tự do có thể tiếp cận dễ dàng và di chuyển về phía chất kết dính geopolymer. Trong nghiên cứu của M.S.Khan [77], đánh giá hàm lượng CaO tự do và $Ca(OH)_2$ trong cốt liệu xỉ thép (lấy ra từ vữa GPC-SFS), và vữa GPC-SFS, GPC-BAS đồng thời so sánh với cốt liệu xỉ thép ban đầu..

Bảng 1.2. Hàm lượng CaO tự do và $Ca(OH)_2$ trong xỉ thép và vữa geopolymer [77]

Vật liệu	Hàm lượng CaO tự do và $Ca(OH)_2$ tính theo khối lượng
Cốt liệu xỉ thép	2.8-4.57
Cốt liệu xỉ thép được lấy từ GPC-SFS	1.3
Vữa GPC-SFS	<0.1
Vữa GPC-BAS	<0.1

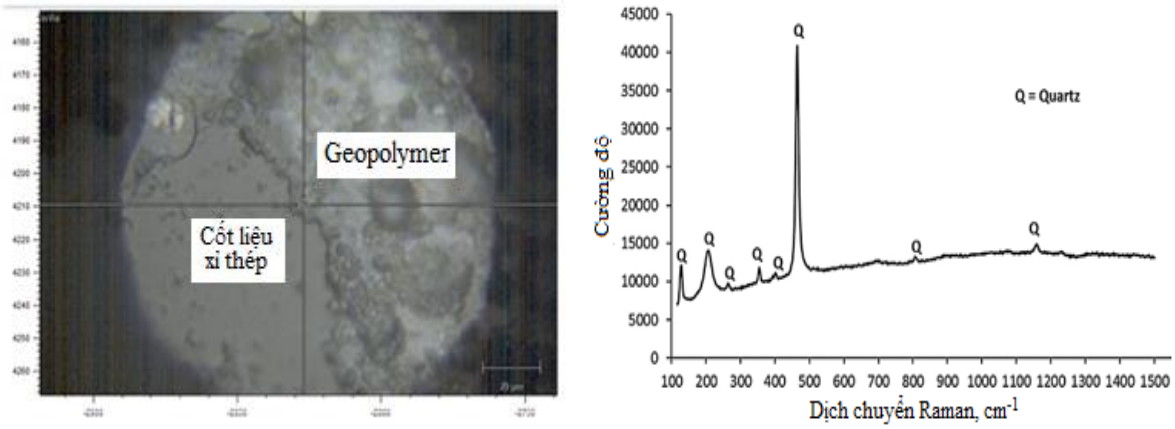
Bảng 1.2 cho thấy trong bê tông GPC_SFS, hàm lượng CaO tự do và $Ca(OH)_2$ trong vữa geopolymer và cốt liệu xỉ thép được lấy ra từ vữa geopolymer nhỏ hơn rất nhiều so với trong cót liệu xỉ thép ban đầu. Điều đó chứng tỏ CaO tự do di chuyển vào trong chất kết dính geopolymer. Kết hợp với các phân tích ở trên cho thấy sự khuếch tán Ca^{2+} và Mg^{2+} có ảnh hưởng lớn đến cấu trúc của vùng chuyển tiếp ITZ [77]. Ba khả năng có thể xảy ra như sau:

(i) Ca^{2+} và Mg^{2+} ưu tiên phản ứng với dung dịch kiềm kích hoạt và trở thành một phần của cấu trúc geopolymer. Nồng độ của dung dịch kiềm cũng ảnh hưởng nhiều đến khả năng khuếch tán của Ca^{2+}. Một số nghiên cứu cho rằng ở nồng độ NaOH cao hơn 10M, Ca^{2+} phản ứng ưu tiên với alkaline aluminosilicate và trở thành một phần liên kết của cấu trúc geopolymer mang lại hiệu suất cơ học cao [70], [59]. Trong nghiên cứu này, dung dịch NaOH 12M đã được sử dụng và điều này đã khiến Ca^{2+} xâm nhập vào bộ xương Si-O-Al-O và làm cho cấu trúc này có độ bền cao hơn.

(ii) Ca^{2+} có sẵn ở vùng lân cận của cốt liệu xỉ thép có thể phản ứng với các khoáng silicat để tạo thành silicat hydrat (C-S-H) gel;

(iii) Mg^{2+} có thể phản ứng để tạo thành brucite trong khi Ca^{2+} có thể phản ứng để tạo thành calcite hoặc portlandite dẫn đến sự giãn nở khối lượng [49].

Quang phổ Raman đã được sử dụng để xác định các thành phần kết tinh tại vùng lân cận của cốt liệu xỉ thép. M.S.Khan phân tích quang phổ Raman của GPC với cốt liệu xỉ thép ở 280 ngày như Hình 1.16. Kết quả cho thấy tinh thể duy nhất là khoáng silic kết tinh (thạch anh). Không tìm thấy sự hiện diện của các khoáng vật C-S-H, canxit, portlandit hoặc brucit ngay cả ở khoảng cách khoảng 5μm từ vùng chuyển tiếp (mặc dù Ca^{2+} khuếch tán vượt quá 8μm). Hơn nữa, những sản phẩm này không thể quan sát được trên các hình ảnh SEM.



Hình 1.16. Phân tích quang phổ Raman tại vùng chuyển tiếp của GPC sử dụng cốt liệu xỉ thép [77]

Dựa trên các phân tích đã nêu, cho thấy chất lượng vùng chuyển tiếp ITZ của GPCS được cải thiện tốt hơn khi so sánh với GPC với cốt liệu tự nhiên (bazan) là do sự kết hợp của Ca^{2+} và Mg^{2+} vào mạng geopolymer làm tăng cường độ GPCS.

1.2. Các yêu cầu về 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. Đồng thời cũng cần đảm bảo các yêu cầu và tính năng trong khai thác. Ngoài ra tấm bê tông còn tiếp xúc trực tiếp với các điều kiện bất lợi của chế độ thủy nhiệt, đặc biệt là khi nhiệt độ thay đổi. 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:

1.2.1. Cường độ chịu nén của bê tông

Cường độ chịu nén của bê tông phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó các yếu tố chính là thành phần và cấu trúc của bê tông, trạng thái ứng suất (làm việc), thời gian tác dụng của tải trọng, chu kỳ tác dụng và sự biến đổi của nó, tốc độ gia tải, trình tự tác dụng của tải trọng, điều kiện sử dụng. Mặt khác cường độ của bê tông cũng như phần lớn các loại vật liệu khác không phải là một đại lượng không đổi, thậm chí phạm vi thay đổi tương đối rộng. Do đó cần phải xác định giá trị cường độ chịu nén đặc trưng ứng với một giá trị xác suất nhất định.

Hiện nay, hầu hết các tiêu chuẩn về thiết kế thành phần BTXM trên thế giới như tiêu chuẩn của Pháp: BAEL, BPEL, của Mỹ: ACI và AASHTO, AASHTO LRFD, của Anh (BS), của Nhật (JIS), Ấn Độ,… đều tính toán thiết kế theo cường độ chịu nén đặc trưng (f'_c) với giá trị xác suất thường từ 90% - 95%. Để đạt được giá trị cường độ đặc trưng với một xác suất nhất định (ví dụ 95%) thì phải tính toán giá trị cường độ yêu cầu (f'_{cr}) là giá trị dùng để tính toán thiết kế thành phần OPC.

- Cường độ yêu cầu được tính theo độ lệch chuẩn (s):

$$f_{cr}' = f_c' + z.s \qquad (1.1)$$

- Cường độ yêu cầu được tính theo hệ số phân tán (V):

$$f_{cr}' = f_c' / (1 - z.V) \quad (1.2)$$

Trong đó: f'_c là cường độ đặc trưng, được lấy từ cấp của bê tông f'_c = B; B là cấp của bê tông; s, V là độ lệch chuẩn và hệ số phân tán được lấy từ tập hợp các số liệu thí nghiệm thông qua các thiết kế tương tự trước đó, z: hệ số điều chỉnh độ lệch chuẩn (theo TCVN 5574-2018 z=1.64; theo ACI 318 z=2.33)

Khi không có dữ liệu thí nghiệm về loại bê tông để tính độ lệch chuẩn và hệ số phân tán thì cường độ chịu nén yêu cầu f'_{cr} được tính như trong Bảng 1.3.

Bảng 1.3. Bảng tính cường độ chịu nén yêu cầu khi không có độ lệch chuẩn [35]

Cường độ chịu nén đặc trưng f'c, (MPa)	Cường độ chịu nén yêu cầu f'cr, (MPa)
< 21	f'c + 7.0
21 ÷ 35	f'c + 8.5
≥ 35	f'c + 10.0

1.2.2. Cường độ kéo khi uốn

Dưới tác dụng của xe chạy, do tấm BTXM có độ cứng lớn hơn nhiều so với móng và nền đất nên tấm sẽ chịu uốn và nếu tấm không đủ dày thì tấm sẽ bị nứt dọc hoặc ngang ở giữa tấm hoặc nứt ở góc, cạnh tấm. Đặc biệt hay nứt ở góc và cạnh ngang tấm vì tại đấy khi bánh xe thông qua, ứng suất kéo uốn do tải trọng bánh xe gây ra lớn hơn khi bánh xe đặt ở giữa tấm. Ngoài ra, nước dễ xâm nhập qua các khe tấm xuống móng và nền đất làm cường độ móng và nền bị giảm yếu dẫn đến dễ phát sinh tích lũy biến dạng dẻo ở lân cận góc và cạnh tấm, tạo ra sự tiếp xúc không tốt giữa tấm và móng tại đó (hiện tượng tấm bị cập kênh, bị "hiệu ứng công son", bị phụt bùn từ khe lên).

1.2.3. Mô đun đàn hồi

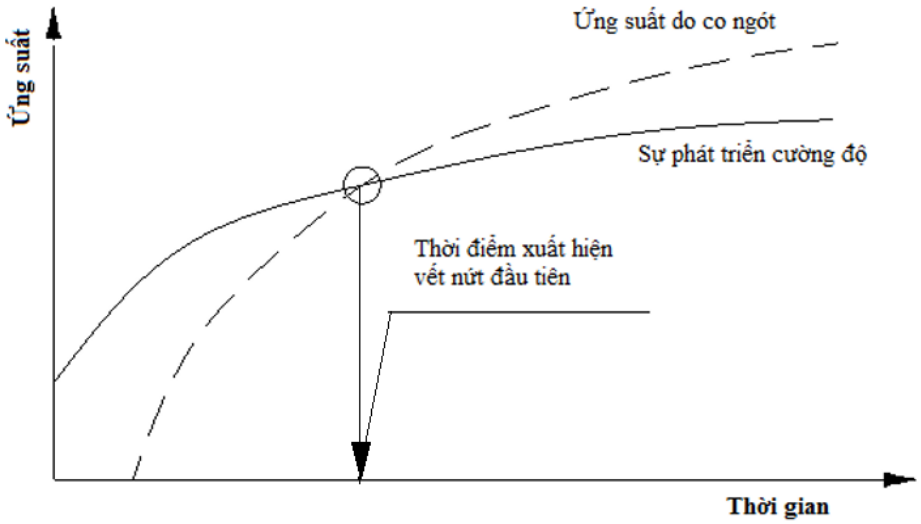
Mô đun đàn hồi của bê tông ($E_{đh}$) đặc trưng cho khả năng biến dạng của bê tông dưới tác dụng của tải trọng. Bê tông là vật liệu đàn hồi dẻo. Tuy nhiên, tấm bê tông mặt đường làm việc chủ yếu trong giai đoạn đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng tức thời, nên sử dụng giá trị mô đun đàn hồi tìm được trong điều kiện kéo uốn để đặc trưng cho tính chất đàn hồi của bê tông.

Mô đun đàn hồi nói chung tương quan với cường độ nén, nên cần thí nghiệm xác định mối quan hệ giữa hai yếu tố này với thành phần bê tông của dự án cụ thể.

1.2.4. Độ co ngót và giãn nở

Sau khi thi công và hoàn thiện, mặt đường BTXM nói chung thường bị nứt trong những ngày đầu do có nguyên nhân từ sự co ngót, do quá trình chuyển trạng thái ẩm - khô liên tục khi bảo dưỡng và do bị hạn chế bởi ma sát đáy tấm với móng đường. Co ngót sẽ gây ra ứng suất trong tấm bê tông trước khi có sự tác động của tải trọng xe. Theo Kamal H.Khayat [74], Neville [81], từ việc nghiên cứu thí nghiệm hiện trường đã giải thích lý do về sự đứt gãy dọc tấm, mà một trong những nguyên nhân đó là do sự giãn nở của bê tông.

Theo Sung [98], khi hệ số CTE tăng sẽ tăng nguy cơ rạn nứt, đứt gãy và giảm độ bằng phẳng cho mặt đường. Tanesi [99] đã chỉ ra sự ảnh hưởng của CTE đến mặt đường. Kết quả cho thấy mức độ đứt gãy sẽ tăng lên mạnh khi CTE tăng, khi giá trị CTE lớn hơn 10.8με/°C sẽ làm tăng nguy cơ đứt gãy và làm giảm tuổi thọ công trình. Khi ứng suất kéo sinh ra do co ngót lớn hơn sự phát triển cường độ kéo của bê tông thì quá trình nứt bắt đầu được diễn ra Hình 1.17. Cho nên, để kiểm soát vết nứt theo ý muốn, người ta thường phải tạo các tiết diện giảm yếu trong tấm bê tông bằng các khe co giãn.



Hình 1.17. Quá trình thay đổi ứng suất do co ngót và phát triển cường độ chịu kéo của bê tông xi măng theo thời gian [23]

Bên cạnh đó, các điều kiện về khí hậu tự nhiên có sự khác biệt rất lớn giữa các vùng, các địa phương, do vậy tác động của chúng đến sự làm việc của mặt đường sân bay và đường ô tô ở từng khu vực là sẽ khác nhau. Sự thay đổi không khí và trên bề mặt trái đất phụ thuộc trạng thái cân bằng nhiệt của từng địa phương trong một ngày đêm và trong một năm, gọi là chu trình nhiệt ngày đêm và chu trình nhiệt năm. Đặc trưng cơ bản của nó là biên độ dao động nhiệt, có nghĩa là hiệu giữa nhiệt độ trung bình giờ nóng nhất và giờ lạnh nhất hoặc tháng nóng nhất và tháng lạnh nhất trong năm. Trong điều kiện khai thác tấm bê tông mặt đường ô tô và sân bay bao giờ cũng tồn tại sự khác biệt giữa nhiệt độ bề mặt và đáy tấm bê tông và giữa các thời điểm khác nhau trong ngày. Sự tăng hoặc giảm nhiệt độ trung bình trong tấm gây ra hiện tượng dãn dài hoặc co ngắn của tấm bê tông, còn khi nhiệt độ bề mặt và đáy tấm khác nhau sẽ gây ra hiện tượng uốn vồng tấm. Sự biến đổi về thể tích gây ra các vết nứt phức tạp trong kết cấu áo đường ô tô.

1.2.5. Độ mài mòn

Độ mài mòn của bê tông khi làm lớp mặt đường là khả năng của vật liệu chịu tác dụng lực ma sát trên một đơn vị diện tích nhất định. Khả năng chịu mài mòn của bê tông phụ thuộc vào hai yếu tố cơ bản là cường độ chịu nén và độ cứng của cốt liệu. Độ cứng của cốt liệu phụ thuộc vào nguồn gốc của vật liệu (đá vôi, đá đolômit, granit...) nếu dùng cốt liệu có độ mài mòn kém sẽ làm tăng lượng hạt mịn trong quá trình trộn do đó có thể làm tăng lượng nước cần thiết làm giảm cường độ của bê tông.

Trong QĐ 3230/BGTVT [4], độ mài mòn xác định theo TCVN 3114:1993 [7] không được lớn hơn 0.3 g/cm^2 đối với mặt đường BTXM đường cao tốc, đường ô tô cấp 1, cấp II, cấp III hoặc các đường có quy mô giao thông cực nặng, rất nặng và nặng và không được lớn hơn 0.6 g/cm^2 đối với mặt đường BTXM đường ô tô cấp IV trở xuống hoặc các đường có quy mô giao thông trung bình và nhẹ.

Theo khuyến nghị của các tiêu chuẩn làm đường ô tô, BTXM làm đường nên dùng bê tông để đạt độ mài mòn có cường độ mẫu trụ đạt Rn ≥ 35MPa. Còn đối với các cấp bê tông thấp hơn thì nên có các giải pháp làm lớp chống mài mòn trên bề mặt.

1.2.6. Tính chất công tác

Tính công tác hay còn gọi là tính dễ thi công, là một tính chất kỹ thuật của hỗn hợp bê tông nó biểu thị khả năng lấp đầy khuôn nhưng vẫn đảm bảo được độ đồng nhất trong một điều kiện đầm nén nhất định.

Một hỗn hợp bê tông có tính công tác tốt nghĩa là dễ đổ khuôn, dễ lèn chặt, cấu tạo đồng nhất và sau khi cứng rắn có độ đặc chắc, cường độ, độ bền cao. Trong thi công mặt đường cứng, nếu tính công tác đạt yêu cầu thì quá trình lu lèn đảm bảo được về độ chặt của hỗn hợp bê tông. Ngược lại, nếu tính công tác không đảm bảo yêu cầu thì mặt đường có thể không đạt yêu cầu về độ bằng phẳng hoặc hỗn hợp bê tông bị phân tầng dẫn đến không đạt cường độ thiết kế và bong tróc trong giai đoạn đầu của quá trình khai thác.

Theo ACI 211.91 [43], độ sụt cho kết cấu mặt đường và tấm bản tối thiểu là 1 in (2.54 cm) và tối đa là 3 in (7.62 cm). Theo quy định 778/1998/QĐ-BXD đối với các kết cấu đường, nền, sàn, đầm bằng máy độ sụt thích hợp được lựa chọn tối đa (9-10) cm tối thiểu (3-4) cm. Theo quy định về kỹ thuật thi công và nghiệm thu mặt đường BTXM trong xây dựng công trình giao thông QĐ 1951-2012 thì độ sụt của hỗn hợp bê tông được thể hiện ở Bảng 1.4.

Bảng 1.4. Yêu cầu về độ sụt của hỗn hợp bê tông thi công mặt đường cứng [3]

Độ sụt, mm (xác định theo TCVN 3106:1993)	Công nghệ ván khuôn trượt (tốc độ rải 0,5-2,0m/min)	Ván khuôn cố định	
		Công nghệ ván khuôn ray và các công nghệ thi công liên hợp khác	Công nghệ thi công đơn giản
	10-20	20-30	30-40

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

Vật liệu geopolymer được phát triển lần đầu tiên từ những năm 1970 bởi Joseph Davidovits. Đến nay, phần lớn các nghiên cứu ứng dụng về vật liệu geopolymer đều tập trung vào việc sử dụng nguyên liệu từ tro bay như Palomo [86], Hardjito [51], Rangan [90]... Các nghiên cứu trên thế giới tập trung nghiên

cứu thiết kế thành phần và xác định các chỉ tiêu cơ lý của bê tông và vữa sử dụng chất kết dính geopolymer tro bay như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi, co ngót, từ biến, bền nhiệt, bền hóa chất...[45], [46], [40]. Kết quả cho thấy GPC có tính năng tương đương với bê tông và vữa xi măng thông thường. Thậm chí còn có một số tính năng ưu việt hơn như bền nhiệt, bền sunfat, co ngót và từ biến thấp…

Tuy nhiên, 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 và khá rộng. 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, nghiên cứu về ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông đã được tiến hành bởi một số tác giả trong nước như Nguyễn Phi Sơn [24], Nguyễn Văn Du [15] (sử dụng làm cốt liệu cho bê tông nhựa). Kết quả nghiên cứu của các tác giả cho thấy hoàn toàn có thể sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cho bê tông nhựa.

Có thể thấy nghiên cứu và ứng dụng về geopolymer đã phát triển mạnh mẽ ở các nước trên thế giới, tuy nhiên geopolymer hiện vẫn là một loại vật liệu mới đang dần thu hút nghiên cứu tại Việt Nam. Có một số nghiên cứu chính trong lĩnh vực này 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. Trong đó, Trần Việt Hưng đã thiết kế được hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay có cường độ chịu nén đặc trưng 30, 40 và 50 MPa với hàm mục tiêu là cường độ chịu nén và 2 biến yếu tố ảnh hưởng là tỉ lệ giữa dung dịch kiềm kích hoạt với tro bay và nồng độ của dung dịch NaOH, đồng thời nghiên cứu một số

tính chất cơ học cơ bản như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo uốn, cường độ chịu kéo tuột, mô đun đàn hồi. Phan Đức Hùng đã nghiên cứu ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa (tỷ lệ khối lượng dung dịch kiềm hoạt hóa/tro bay và tỉ lệ Na_2SiO_3/NaOH) đến cường độ chịu uốn và kéo gián tiếp của bê tông geopolymer. Phạm Đức Thiện đã tiến hành thí nghiệm kéo tuột trên các mẫu bê tông hình trụ tròn kích thước DxL = 150x30 mm để nghiên cứu sự bám dính giữa bê tông geopolymer và cốt thép. Kết quả của đề tài nghiên cứu cấp Bộ GTVT mã số DT174053, tác giả Đào Văn Đông [13] đã nghiên cứu chế tạo ứng dụng thành công bê tông geopolymer tro bay vào kết cấu dầm cốt thép (kích thước 230 x 125 x 2400 mm). Đồng thời đã nghiên cứu các tính chất cơ học, mối quan hệ ứng suất biến dạng và tính thấm nước của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu tự nhiên. Các kết quả nghiên cứu trên đều cho thấy các tính chất cơ học của bê tông geopolymer tro bay tốt tương đương như sử dụng xi măng nhưng bê tông geopolymer có độ bền tốt vượt trội trong các điều kiện môi trường xâm thực và nhiệt độ cao.

1.3.1. Tính công tác của hỗn hợp bê tông

Độ sụt (slump) được sử dụng để đánh giá tính công tác của hỗn hợp bê tông geopolymer. Tốc độ suy giảm độ sụt theo thời gian của hỗn hợp bê tông geopolymer thấp nên khả năng duy trì tính công tác lâu hơn so với OPC. Tính công tác của hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay được đảm bảo khi tỉ lệ nước/chất rắn geopolymer lớn hơn 0.22 và cốt liệu sử dụng có độ hút nước thấp [50].

Tính công tác là tính chất kỹ thuật quan trọng của hỗn hợp bê tông. Nó biểu thị khả năng lấp đầy khuôn nhưng vẫn đảm bảo được độ đồng nhất trong điều kiện đầm nén nhất định. Tính công tác được đánh giá thông qua độ sụt; độ cứng và độ đồng nhất. Cũng tương tự như GPC sử dụng cốt liệu tự nhiên, độ sụt đã được sử dụng để đánh giá tính công tác của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép. Hardjito và Rangan [66] đã chỉ ra rằng tính công tác của hỗn hợp bê tông geopolymer có thể cải thiện khi sử dụng các chất phụ gia siêu dẻo gốc naphthalene FS và tỉ lệ sử dụng khoảng 2% khối lượng so với tro bay.

Theo nghiên cứu của M.S.H. Khan [77] khi thay thế 100% cốt liệu thô (bazan) bằng cốt liệu xỉ thép thì tính công tác của hỗn hợp geopolymer không có sự thay đổi đáng kể nào về độ sụt so với khi GPC sử dụng cốt liệu tự nhiên là đá bazan. Còn đối với OPC thì độ sụt giảm 45 mm khi sử dụng xỉ thép thay thế (Bảng 1.5). Tuy nhiên, theo Nitendra Palankar [83] khi thay thế xỉ thép cho cốt liệu thô (đá granite) theo các tỉ lệ 25, 50, 75, 100 % thì độ sụt lại giảm dần từ 55mm-25mm. Điều này có thể là do hình dạng góc cạnh của xỉ thép có khuynh hướng làm giảm tính linh động của hỗn hợp bê tông.

Bảng 1.5. Độ sụt, hàm lượng bọt khí và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông tươi [83]

Loại bê tông	Độ sụt (mm)	Hàm lượng bọt khí (%)	Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông tươi (T/m^3)
GPC-SFS	200+	3.2	2.61
GPC-BAS	200+	2.8	2.36
OPC-SFS	95	2.1	2.71
OPC-BAS	140	3.8	2.35

1.3.2. Khối lượng thể tích

Khối lượng trên một đơn vị thể tích của bê tông geopolymer tro bay phụ thuộc vào khối lượng của cốt liệu sử dụng trong hỗn hợp thiết kế. Khối lượng thể tích của bê tông gepolymer tro bay tương tự như BTXM, khi sử dụng đá granite làm cốt liệu thô thì tỷ trọng của bê tông geopolymer từ 2330 đến 2430 Kg/m^3 [66].

Khối lượng trên một đơn vị thể tích của hỗn hợp GPC-SFS tăng lên cùng với hàm lượng xỉ thép được thay thế. Tỷ trọng của GPC với cốt liệu là đá bazan tự nhiên là 2.33 đến 2.43 T/m^3 [66] còn khi thay thế 100% đá bazan bằng xỉ thép tỷ trọng của GPC-SFS theo M.S.H. Khan [77] là 2.61T/m^3; theo Nitendra Palankar [83] là 2.61 T/m^3. Tỷ trọng của hỗn hợp GPC-SFS cao hơn vì khối lượng riêng của xỉ thép cao hơn so với cốt liệu tự nhiên.

1.3.3. Cường độ chịu nén

Collins và Sanjayan đã so sánh giữa cường độ nén giữa GPC và OPC. Cơ chế ứng xử và phá hoại nén bê tông geopolymer tro bay ít canxi là tương tự như bê tông OPC thông thường. Rangan đã quan sát thấy rằng biến dạng ứng với ứng suất lớn nhất trong khoảng từ 0.0024 đến 0.0026. Collins và các cộng sự chỉ ra mối quan hệ giữa cường độ nén và đường cong ứng suất - biến dạng dưới đây [66], [50]:

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}} \frac{n}{n-1+\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}}\right)^{nk}} \qquad (1.3)$$

Trong đó:

f_{cm}: ứng suất lớn nhất,

ε_{cm}: biến dạng ứng với ứng suất lớn nhất,

$n = 0.8 + (f_{cm}/17)$ và $k = 0.67 + (f_{cm}/62)$.

Sarkar cũng đề xuất biểu thức tương tự nhưng với một giá trị $n=0.8+ f'_c /12$ [50].

Sự phát triển cường độ nén của bê tông geopolymer chịu ảnh hưởng đáng kể bởi chế độ bảo dưỡng. Thực tế cho thấy nếu được bảo dưỡng ở 80 đến 90°C trong vài giờ, cường độ nén có thể đạt gần 90% cường độ cuối cùng. Tuy nhiên, GPC được bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng cũng đạt được cường độ nén theo thời gian tương tự như OPC. Dù vậy, với chế độ bảo dưỡng khác nhau (nhiệt độ phòng hoặc nhiệt độ cao), kết quả cường độ nén cuối cùng của GPC và OPC là tương tự nhau. Nhiệt độ bảo dưỡng chỉ làm thay đổi thời gian để đạt được kết quả cường độ nén cuối cùng theo mục đích sử dụng [50].

Cũng tương tự như bê tông geopolymer tro bay cốt liệu tự nhiên, điều kiện bảo dưỡng cũng ảnh hưởng nhiều đến cường độ chịu nén của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép. Theo nghiên cứu của M.S.H. Khan [77] ở điều kiện bảo dưỡng nhiệt 60^oC/24h khi sử dụng cốt liệu xỉ thép trong bê tông geopolymer tro bay cho cường độ chịu nén tại 28 ngày tuổi tương tự so với sử dụng cốt liệu đá bazan tự nhiên (xem Bảng 1.6). Kết quả cho thấy GPC sử dụng cốt liệu xỉ thép đạt cường độ chịu nén cao nhất.

Bảng 1.6. Cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của GPC và OPC [77]

Loại bê tông	Cường độ chịu nén (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)
GPC-SFS (GPC + xỉ thép)	53.2	29.5
GPC-BAS (GPC + đá bazan)	51.1	25.65
OPC-SFS (OPC + xỉ thép)	44.7	38.3
OPC-BAS (OPC + đá bazan)	52.3	31.1

H. W. Ashadi đã thí nghiệm cường độ chịu nén của các mẫu bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép và cốt liệu sỏi ở điều kiện bảo dưỡng ở 60°C. Kết quả của thí nghiệm cường độ nén cho thấy bêtông geopolyme cốt liệu xỉ thép có cường độ nén cao hơn bê tông geopolymer cốt liệu sỏi. Cường độ nén của bê tông geopolymer chịu ảnh hưởng bởi thành phần hỗn hợp bê tông và thời gian đóng rắn [81] và các loại cốt liệu khác nhau và thời gian bảo dưỡng. Các kết quả thí nghiệm chứng minh rằng việc sử dụng xỉ thép làm cốt liệu có đặc tính vượt trội so với sỏi. Xỉ thép có thể tăng cường độ nén bê tông geopolymer vì xỉ thép làm giảm phản ứng kiềm-cốt liệu.

1.3.4. Cường độ chịu kéo gián tiếp

Hầu hết các công trình đã công bố đều đồng ý rằng cường độ chịu kéo của GPC cao hơn của OPC với cùng cường độ nén [66], [50].

N. Palankar [83] tiến hành thí nghiệm và so sánh cường độ kéo uốn và cường độ ép chẻ của bê tông geopolymer tro bay có trộn với xỉ lò cao nghiền mịn (tỉ lệ tro bay/xỉ lò cao là 50:50) và dùng cốt liệu xỉ thép thay thế cho đá dăm (đá granite) với các tỉ lệ 0% (GGBFS-FA 0); 25% (GGBFS-FA 25); 50% (GGBFS-FA 50); 75% (GGBFS-FA 75); 100% (GGBFS-FA 100). Các kết quả thí nghiệm được so sánh với BTXM (OPC) sử dụng đá granite thông thường được thực hiện ở độ tuổi 7, 28 và 90 ngày và kết quả thể hiện trong Bảng 1.7. Các kết quả cho thấy rằng cường độ chịu kéo khi uốn và cường độ ép chẻ của bê tông geopolymer đều cao hơn so với OPC ở các tuổi khác nhau. Khi tỉ lệ thay thế cốt liệu thô (đá granite) bằng cốt liệu xỉ thép tăng thì cường độ chịu kéo khi uốn và cường độ ép chẻ của GGBFS-FA giảm. Tuy nhiên, các giá trị này đều cao hơn so với cường độ chịu kéo khi uốn và cường độ ép

chẻ của BTXM đối chứng (OPC) và vẫn lớn hơn cường độ chịu kéo khi uốn yêu cầu là 4,5 MPa theo tiêu chuẩn thiết kế áo đường cứng của Ấn Độ (IRC:58:2011).

Trong rất nhiều nghiên cứu đã công bố các tác giả đều cho rằng bê tông geopolymer có khả năng chịu kéo khi uốn lớn hơn so với BTXM ở cùng một cấp cường độ chịu nén, đây là ưu điểm rất vượt trội của bê tông geopolymer trong việc làm giảm chiều dày mặt đường ở một mức độ nhất định khi tính toán kết cấu áo đường cứng.

Dưới tác dụng trùng phục của xe chạy làm tấm bê tông mặt đường bị mỏi, kéo theo sự suy giảm cường độ chịu kéo uốn, tuổi thọ của bê tông bị giảm đi và tấm cũng sẽ bị phá hoại vì nứt sau khi chịu đựng một số lần xe chạy nhất định. Hiện nay, các nghiên cứu về mỏi của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu thông thường (GPC) vẫn còn tồn tại một số ý kiến trái chiều. Một số nghiên cứu thực nghiệm và phân tích SEM chỉ ra rằng, GPC có khả năng chịu mỏi tốt hơn so với OPC [51, 61, 73, 87...]. Một số nghiên cứu khác cho kết quả tương đương hoặc GPC có khả năng chịu mỏi kém hơn so với OPC [70, 88…]. Sự khác biệt lớn giữa các kết quả nghiên cứu trên chủ yếu do thành phần cấp phối của hỗn hợp bê tông, cũng như nguồn gốc của vật liệu (cốt liệu). Các nghiên cứu về bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép hiện nay cũng chỉ đang là nghiên cứu bước đầu. Tính đến thời điểm hiện tại, trên thế giới chưa có báo cáo về mỏi nào đối với bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép

Bảng 1.7. Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của OPC và GPC sử dụng cốt liệu xỉ thép với các tỉ lệ khác nhau [83]

Loại	Cường độ chịu kéo uốn (MPa)		Cường độ ép chẻ (MPa)		Mô đun đàn hồi (GPa)
	7 ngày	28 ngày	90 ngày	28 ngày	28 ngày
OPC	4.62	6.01	6.39	3.90	34.9
GGBFS-FA 0	5.52	6.52	6.87	4.26	33.1
GGBFS-FA 25	5.39	6.49	6.71	4.18	32.2
GGBFS-FA 50	5.04	6.33	6.52	4.09	30.9
GGBFS-FA 75	4.83	5.75	6.14	3.66	30.4
GGBFS-FA 100	4.63	5.54	5.89	3.60	30.6

1.3.5. Mô đun đàn hồi

Trong bê tông geopolymer, cấu trúc vi mô được quan sát thấy là đậm đặc hơn do đó mô đun đàn hồi của GPC dự kiến sẽ lớn hơn so với bê tông OPC. Tuy nhiên, các kết quả thực nghiệm lại không khẳng định được điều này. Trong hầu hết các công trình đã công bố đều cho thấy ứng với một cường độ nén cụ thể, GPC có một mô đun đàn hồi thấp hơn OPC [50].

Setunge [94] đã đề xuất một mô hình hai pha để tính toán mô đun đàn hồi của GPC thông qua mô đun đàn hồi của vữa geopolymer và cốt liệu thô. Kết quả thú vị nhất của nghiên cứu này là vữa geopolyme có mô đun đàn hồi cũng thấp hơn vữa xi măng của bê tông có cường nén tương tự. Phương trình được đề xuất bởi Setunge [94], [50] như sau:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{0.45}{V_a E_a + (1 - V_a) E_m} + 0.55\left(\frac{V_a}{E_a} + \frac{1 - V_a}{E_m}\right) \qquad (1.4)$$

Trong đó:

V_a: Thể tích thành phần cốt liệu thô

E_a: Mô đun đàn hồi của cốt liệu thô

E_m: Mô đun đàn hồi của vữa geopolymer

Foster [61] đã đề xuất một phương trình cho mô đun đàn hồi của vữa geopolymer (E_m) như sau:

$$E_m = 3710\sqrt{f_{mm}} - 1280 \text{ (MPa)} \qquad (1.5)$$

Trong đó f_{mn}: Ứng suất lớn nhất của vữa geopolymer

Công thức kinh nghiệm của Hardjito và cộng sự đề xuất cho bêtông geopolymer [67]:

$$E_c = 2707\sqrt{f_c'} + 5300 \text{ (MPa)} \qquad (1.6)$$

Trong đó f'_c: Cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông geopolymer

Từ nghiên cứu thực nghiệm, nhiều tác giả đều cho rằng mô đun đàn hồi của bê tông geopolymer tro bay thấp hơn đáng kể so với BTXM [90], [66]. Theo M.S.Khan, khi sử dụng cốt liệu xỉ thép mô đun đàn hồi của bê tông GPC và OPC đều tăng đáng kể so với khi sử dụng cốt liệu bazan thông thường. Tuy nhiên, dù sử

dụng cốt liệu xỉ thép hay đá bazan thì mô đun đàn hồi của GPC vẫn thấp hơn OPC, thể hiện ở Bảng 1.7. Mô đun đàn hồi của bê tông phụ thuộc vào mô đun của các thành phần và mối liên kết giữa cốt liệu và chất kết dính. Sử dụng xỉ thép làm cốt liệu cho GPC tạo ra cường độ nén cao hơn bởi bề mặt góc cạnh của nó tạo ra sự liên kết chặt chẽ hơn với chất kết dính. Điều này có thể dẫn đến kết quả mô đun đàn hồi của GPC cốt liệu xỉ thép cao hơn GPC cốt liệu bazan thông thường.

Cũng tương tự như vậy theo nghiên cứu của N. Palankar [83], mô đun đàn hồi của bê tông geopolymer tro bay có bổ sung thêm xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS-FA) và sử dụng cốt liệu xỉ thép làm cốt liệu thô đều thấp hơn so với mô đun đàn hồi của BTXM (OPC). Tuy nhiên, khi tỉ lệ thay thế cốt liệu thô (đá granite) bằng cốt liệu xỉ thép với các tỉ lệ từ 0, 25, 50, 75, 100% thì mô đun đàn hồi của GGBFS-FA cũng có xu hướng giảm tương tự như đối với cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ ép chẻ và cường độ chịu nén.

1.3.6. Hệ số poisson

Theo AS 3600 hệ số poisson’s có thể được lấy bằng 0.2 hoặc được xác định bằng thí nghiệm. Hệ số poisson’s của bê tông geopolymer tro bay cấp 40 được sử dụng cho công trình Viện nghiên cứu biến đổi khí hậu toàn cầu (Global Change Institute) thuộc khoảng từ 0.21-0.25 [104]. Theo Neville, hệ số Poisson’s của BTXM cùng cấp là 0.15-0.22 [81]. Vì vậy, hệ số Poisson’s của bê tông geopolymer tro bay cao hơn một chút so với BTXM nhưng điều này không ảnh hưởng đáng kể đến tính năng của kết cấu [50].

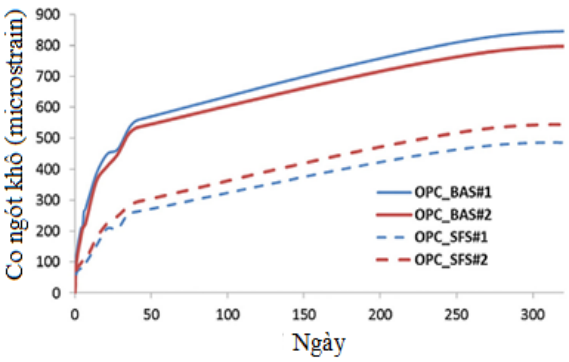
1.3.7. Co ngót

Co ngót và từ biến của bê tông geopolymer sẽ bị ảnh hưởng đáng kể bởi loại chất kết dính geopolymer. Qua quá trình kích hoạt và chế độ bảo dưỡng, Rangan [90] đã quan sát thấy rằng sự co ngót của bêtông geopolymer được bảo dưỡng nhiệt có thể thấp đến 100 με, trong khi bê tông geopolymer được bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng ở tuổi muộn có giá trị co ngót khô lên đến 1200 με khi tiếp tục bảo dưỡng. Theo AS3600, giá trị này được đề xuất cho bê tông OPC là 850 με.

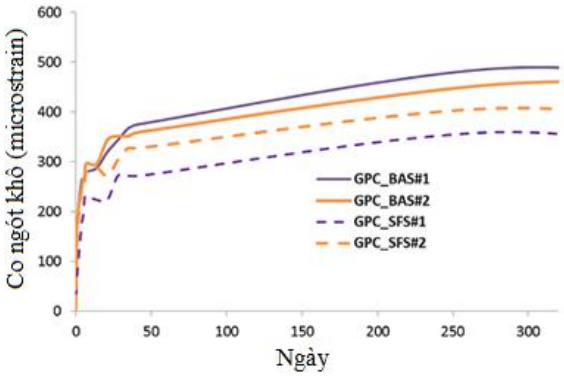
Theo nghiên cứu của M.S.H. Khan [77] co ngót khô của GPC thấp hơn so với OPC và khi sử dụng xỉ thép làm cốt liệu thô trong cả GPC; OPC. Kết quả đều cho

thấy co ngót khô của các mẫu thí nghiệm khi sử dụng xỉ thép thấp hơn so với sử dụng cốt liệu thô là đá bazan. Hình 1.18 và Hình 1.19 cho thấy các kết quả co ngót lên đến 320 ngày đối với OPC và GPC ứng với các loại cốt liệu thô khác nhau gồm đá bazan và xỉ thép. Các mẫu OPC với cốt liệu thô là đá bazan có co ngót khô cao nhất, độ co ngót cực đại là khoảng 800 microstrain sau 320 ngày còn các mẫu OPC sử dụng cốt liệu xỉ thép có co ngót khô chỉ bằng 50% so với OPC sử dụng đá bazan. Điều này có thể được giải thích: (i) Mô đun đàn hồi của OPC sử dụng cốt liệu xỉ thép cao hơn so với OPC sử dụng cốt liệu đá bazan tự nhiên; (ii) Xỉ thép có cấu trúc lỗ rỗng nhiều và bề mặt xù xì, hình dạng hạt không cân đối làm tăng liên kết mạng tinh thể giữa cốt liệu và xi măng; (iii) Xỉ thép có độ hút nước cao do lỗ rỗng nhiều nên nó có thể lấy nước ở trong cấu trúc nên có thể hạn chế được co ngót khô và hơn nữa nó cũng làm chậm quá trình hydrat hóa vôi tự do gây ra sự giảm co ngót khô.

Đối với GPC, co ngót khô thể hiện như Hình 1.19 cho thấy độ co ngót khô của GPC cũng giảm khi sử dụng cốt liệu xỉ thép so với cốt liệu tự nhiên đá bazan nhưng tỷ lệ giảm co ngót lại thấp hơn rất nhiều so với OPC, trung bình khoảng 15%. Điều này hoàn toàn có thể lý giải tương tự như đối với OPC, tuy nhiên có thể khẳng định rằng việc trao đổi nước giữa xỉ thép với chất kết dính geoplymer và khả năng trương nở do hydrat vôi tự do được giảm thiểu tối đa trong GPC-SFS. Sự hấp thụ nước của cốt liệu xỉ thép (SFS) trung bình là 2.33% và gấp đôi so với cốt liệu bazan. Một lần nữa, các kết quả co ngót cho thấy khả năng tương thích tốt hơn giữa xỉ thép và GPC so với chất kết dính OPC.



Hình 1.18. Co ngót khô của OPC [77]



Hình 1.19. Co ngót khô của GPC [77]

1.3.8. Giãn nở nhiệt

Trong thực tế, hệ số giãn nở nhiệt của bê tông (CTE) được xác định theo tiêu chuẩn thí nghiệm AASHTO T336 [41], thường được tính theo công thức sau:

$$CTE = (\Delta L/L_0)/\Delta T \quad (1.7)$$

Trong đó:

ΔL là chiều dài thay đổi mẫu đo; L_0 là chiều dài ban đầu đo được của mẫu đo;

ΔT là sự chênh lệch nhiệt độ.

Các nhà nghiên cứu đã chỉ ra hệ số CTE phụ thuộc vào loại cốt liệu, thời gian xác định, điều kiện môi trường và chu trình thay đổi nhiệt độ. Do cốt liệu chiếm một phần đáng kể, khoảng 65% đến 75% theo thể tích trong thành phần hỗn hợp bê tông, nên mức độ thay đổi hàm lượng, tính chất vật liệu của nó sẽ ảnh hưởng nhiều nhất đến sự biến dạng vì nhiệt của bê tông. Từ các nghiên cứu [80], đã chỉ ra mối quan hệ tuyến tính giữa lượng dùng cốt liệu lớn và hệ số CTE, hàm lượng và loại cốt liệu ảnh hưởng lớn đến CTE (Bảng 1.8).

Bảng 1.8. Độ giãn nở nhiệt CTE với các loại cốt liệu khác nhau [80]

Loại cốt liệu	Giá trị CTE	Loại cốt liệu	Giá trị CTE
Đá vôi	(8 ÷8.11) με/°C	Đá Dolomite	(10.57 ÷ 10.65) με/°C
Cuội, sỏi	10.52με/°C	Xỉ rỗng	(9.2 ÷ 12.1) με/°C
Xỉ	10.27 με/°C	Đá sa thạch	9.5με/°C
Đá Granit	(12.2 ÷ 13.1)με/°C		

Ngoài ra, hệ số CTE còn chịu sự ảnh hưởng của tuổi bê tông. Theo Won (2005) thì giá trị CTE ít thay đổi trong 3 tuần. Tuy nhiên, giá trị CTE lúc bê tông 28 ngày tuổi thường nhỏ hơn rất nhiều so với bê tông lúc 90 ngày và 180 ngày, sự chênh lệch này thường khoảng từ (0.144 ÷ 0.936) με/°C.

Dưới sự thay đổi bình thường của nhiệt độ môi trường, sự giãn nở nhiệt của GPC ít được nghiên cứu hơn so với OPC. Theo nghiên cứu của Jin Dang [73] hệ số giãn nở nhiệt (CTE) của GPC được đánh giá bằng cách sử dụng các dữ liệu về nhiệt độ và biến dạng thu được từ tấm GPC trên một cầu bản tại Toowoomba (Australia).

Hệ số giãn nở nhiệt đo được của GPC là 11 με/^{o}C [73]. Hệ số CTE của GPC cũng tương tự như bê tông OPC.

1.3.9. Độ mài mòn

Rất nhiều nghiên cứu đã được thực hiện trên các chỉ tiêu cơ học của bê tông geopolymer nhưng khả năng chống mài mòn chưa được nghiên cứu chi tiết. Kolli Ramujee đã so sánh khả năng chống mài mòn của bê tông geopolynmer với bê tông OPC thông thường. Kết quả cho thấy độ sâu của sự hao mòn giảm đi cùng với sự gia tăng thời gian. Bê tông Geopolyme có khả năng chống mài mòn tốt hơn so với bê tông thông thường [75]. Shuguang Hu và các cộng sự đã tính toán khả năng chống mài mòn của bê tông geopolyme bằng cách lấy công thức [97]

$$I_a = (R / P)^{½} \qquad (1.8)$$

Trong đó I_a là cấp độ chống mài mòn, R là số vòng quay của máy mài, P là độ sâu của vết mài (mm)

Shalika Sharma, Dr Hemant Sood [95] nghiên cứu về khả năng chống mài mòn của bê tông geopolyme tro bay khi nhiệt độ thay đổi. Các mẫu bê tông geopolymer thiết kế cùng cấp phối được bảo dưỡng ở các nhiệt độ và thời gian khác nhau: 25°C trong 120 giờ, 60°C và 80°C trong 72 giờ. Kết quả cho thấy khả năng chịu mài mòn của bê tông tăng khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng.

1.4. Những vấn đề tồn tại luận án cần giải quyết

Ở Việt Nam nguồn tro bay và xỉ thép từ các nhà máy nhiệt điện chạy bằng than và nhà máy luyện thép ngày càng tăng, số lượng sử dụng tái chế các phụ phẩm này đang còn rất hạn chế. Đây là một bài toán rất khó đối với các nhà quản lí và doanh nghiệp phải cần có những nghiên cứu và hướng đi để sử dụng các loại phụ phẩm này nhằm giảm thiểu tác động đến môi trường, hạ giá thành và đa dạng hóa sản phẩm.

Hiện nay, bê tông geopolymer tro bay đã bắt đầu có nhiều ứng dụng trong ngành xây dựng và đã có nhiều nghiên cứu của bê tông geopolymer cho kết cấu đúc sẵn như dầm, cột, tà vẹt, ống cống…vv. Tuy nhiên, trong lĩnh vực xây dựng đường ô tô các nghiên cứu đang còn rất hạn chế từ thiết kế chế tạo đến công nghệ thi công và nghiệm thu.

Các nghiên cứu trên thế giới về bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép mới chỉ dừng lại ở việc thay thế cốt liệu lớn (đá dăm) bằng xỉ thép, chưa có

nghiên cứu nào về thay thế hoàn toàn cốt liệu lớn và nhỏ (đá dăm và cát) bằng xỉ thép. Các nghiên cứu này cũng chỉ mới đưa ra và phân tích đánh giá các tính chất cơ học của bê tông gepolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép, tuy nhiên chưa có nghiên cứu áp dụng các thông số cơ học trong việc tính toán kết cấu áo đường sử dụng loại vật liệu này, từ đó đề xuất và định hướng các loại kết cấu áo đường bê tông geopolymer sử dụng hoàn tốt cốt liệu xỉ thép.

Xỉ thép được sử dụng nhiều làm cốt liệu cho bê tông asphalt và đã có tiêu chuẩn ASTM D5106. Tuy nhiên, đối với BTXM thì việc sử dụng xỉ thép đang còn rất hạn chế vì trong thành phần hóa học của xỉ thép có thể chứa hàm lượng lớn CaO, MgO ở trạng thái tự do. Quá trình hydrat hóa các ô xít CaO, MgO tự do là nguyên nhân tiềm ẩn gây ra những thay đổi lớn về thể tích, làm xuất hiện vết nứt và đứt gãy tại các vùng chuyển tiếp giữa đá xi măng và cốt liệu đây là nhược điểm chủ yếu của xỉ thép. Đối với bê tông geopolymer tro bay lại hoàn toàn trái ngược. Vùng chuyển tiếp giữa cốt liệu xỉ thép và đá geopolymer có sự tương tác hóa hóa học, một lượng lớn MgO và CaO tự do từ cốt liệu xỉ thép khuếch tán đến mạng tính thể của cấu trúc geopolymer dẫn đến sự suy giảm đáng kể MgO và CaO tự do trong cốt liệu xỉ thép, làm giảm tối đa sự trương nở thể tích và co ngót cho bê tông geopolymer tro bay.

Từ những vấn đề còn tồn tại trên luận án đã lựa chọn đề tài có nội dung "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". 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;

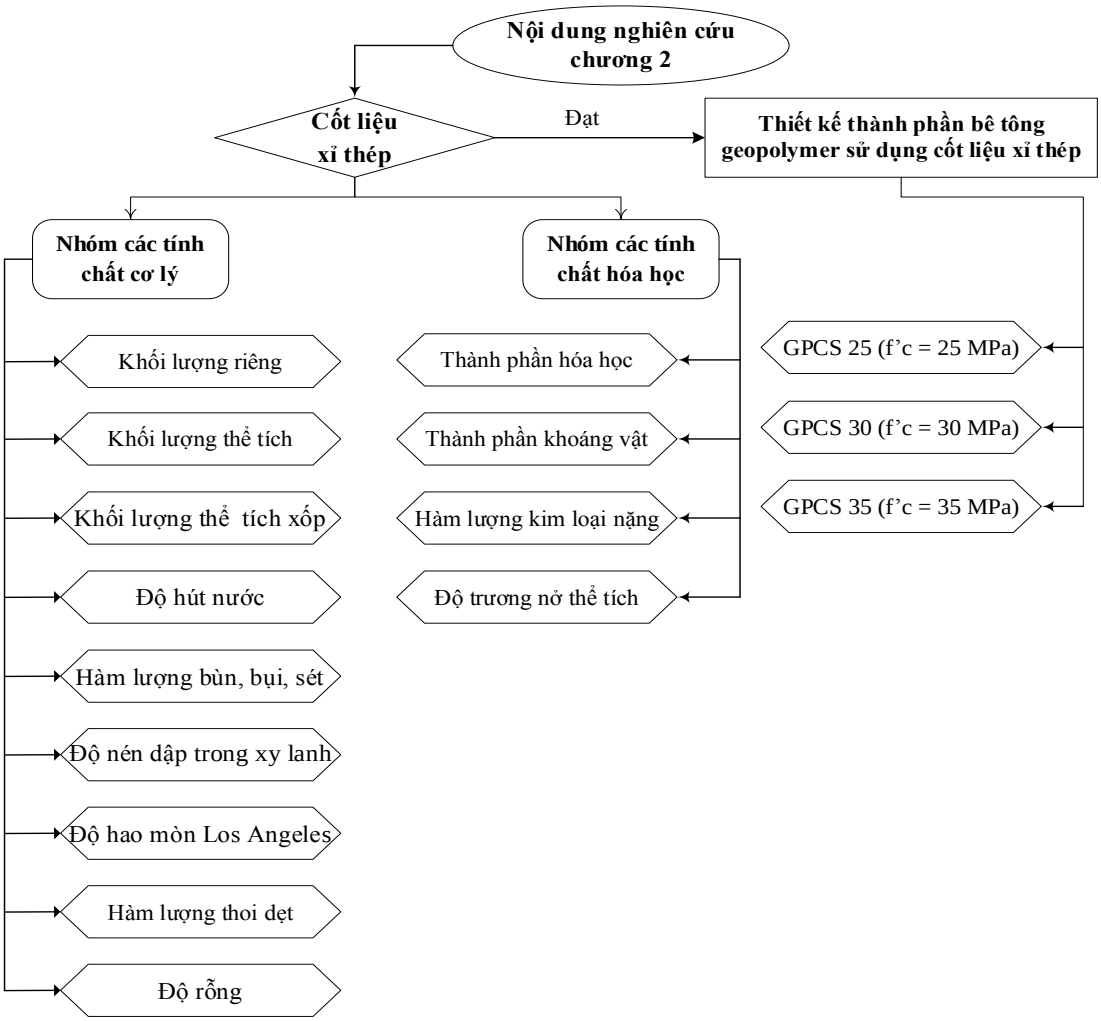
Nghiên cứu thiết kế thành phần và chế tạo bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép trong xây dựng đường ô tô ở Việt Nam;

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

Xỉ thép sử dụng trong nghiên cứu được lấy về có nguồn gốc từ nhà máy gang thép Thái Nguyên. Đây là xỉ thép theo công nghệ lò hồ quang điện (EAF) ở giai đoạn 2 từ gang ra thép và lẫn cả xỉ từ tái chế thép thải thành thép. Xỉ thép của nhà máy gang thép Thái Nguyên ở dạng đổ đống hỗn hợp hoặc các tảng xỉ thép lớn. Một số công ty thu mua xỉ thép về, sau đó tiến hành nghiền và thu lại kim loại dư thừa trong xỉ thép bằng lò từ. Hỗn hợp xỉ thép còn lại được đổ đống và phân loại sơ bộ ra với các mục đích sử dụng khác nhau.



Hình 2.1. Sơ đồ khối kế hoạch nghiên cứu

Hỗn hợp xỉ thép được sàng trên các mắt sàng phân loại thành cốt liệu loại thô và mịn, sau đó mới phối trộn lại để được cấp phối như mong muốn. Kế hoạch nghiên cứu thực nghiệm của chương 2 được thể hiện qua sơ đồ như Hình 2.1.

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

Kế hoạch thí nghiệm để nghiên cứu các tính chất cơ lý của cốt liệu xỉ thép bao gồm số lượng mẫu và tiêu chuẩn thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Kế hoạch thí nghiệm một số tính chất của cốt liệu xỉ thép

Nội dung thí nghiệm	Số lượng mẫu		Tiêu chuẩn thí nghiệm
	Cốt liệu lớn	Cốt liệu nhỏ	
Xác định khối lượng riêng	12	12	TCVN 7572-2006
Xác định khối lượng thể tích	12	12	TCVN 7572-2006
Xác định khối lượng thể tích xốp	12	12	TCVN 7572-2006
Xác định độ hút nước	12	12	TCVN 7572-2006
Xác định hàm lượng bùn, bụi, sét;	12	12	TCVN 7572-2006
Xác định độ nén dập của cốt liệu xỉ thép trong xi lanh	12	-	TCVN 7572-2006
Xác định độ hao mòn Los Angeles;	12	-	TCVN 7572-2006
Xác định hàm lượng hạt thoi dẹt;	12	-	TCVN 7572-2006
Xác định độ rỗng	-	12	

Một số hình ảnh và kết quả thí nghiệm về các tính chất cơ lí của cốt liệu xỉ thép được thể hiện ở Hình 2.2 và Bảng 1; Bảng 2 ở Phụ lục.

Xác định khối lượng riêng

Xác định khối lượng thể tích xốp

Xác định độ hao mòn LA

Xác định hàm lượng bụi bùn sét

Xác định hàm lượng hạt thoi dẹt

Hình 2.2.Thí nghiệm một số tính chất cơ lý của cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên

Sau khi có kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý, đánh giá loại bỏ số liệu ngoại lai (outlier) theo ASTM E178-2015 [33] thể hiện ở Hình 2.3. Các kết quả thí nghiệm đều đảm bảo không có ngoại lai (sai số thô) để phân tích thống kê. Sử dụng phần mềm Minitab phân tích kết quả thí nghiệm theo trình tự:

- Xác định sự phù hợp dạng phân bố chuẩn
- Xác định mức ý nghĩa 95%CI
- Xác định giá trị đặc trưng bằng công thức $X_{đt} = X_{tb} \pm K.S$

Với $X_{đt}$ là giá trị đặc trưng, X_{tb} là giá trị trung bình; S là độ lệch chuẩn; và K là hệ số bằng 1.645 với độ tin cậy 95%. Tùy từng trường hợp cụ thể mà lấy dấu "+" hoặc dấu "-" để đảm bảo an toàn.

Tiến hành phân tích với các kết quả thí nghiệm khối lượng riêng của cốt liệu thô và cốt liệu mịn, kết quả thu được như sau:

- Đối với cốt liệu xỉ thép thô

Hình 2.4 là biểu đồ tổng hợp kết quả phân tích thống kê khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép thô, từ đó xác định được các giá trị:

P-value = 0.358>0.05 chuỗi kết quả tuân theo luật phân bố chuẩn. Hình 2.5 cũng thể hiện các kết quả thí nghiệm tuân theo luật phân bố chuẩn qua hệ số P-value và đều nằm trong giới hạn 95%.

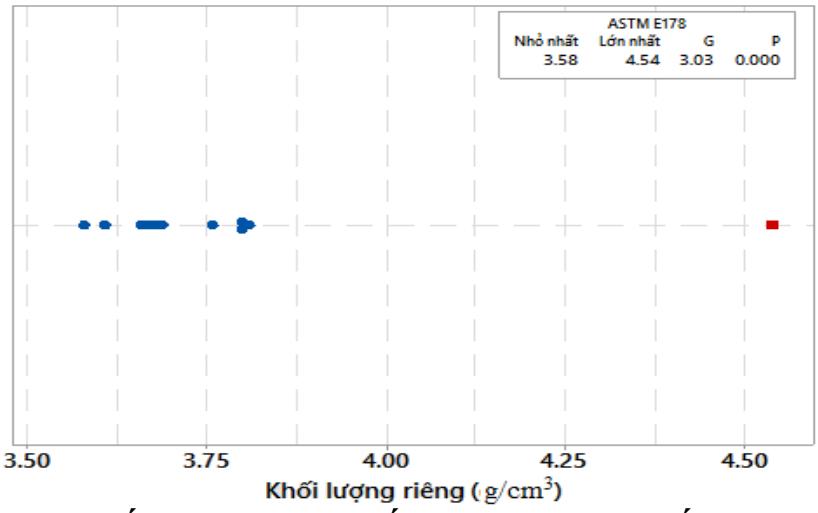
Giá trị trung bình 3.7109 g/cm^3

Độ lệch chuẩn 0.0797 g/cm^3, hệ số biến sai C_v=0.0797/3.7109=2.1472%

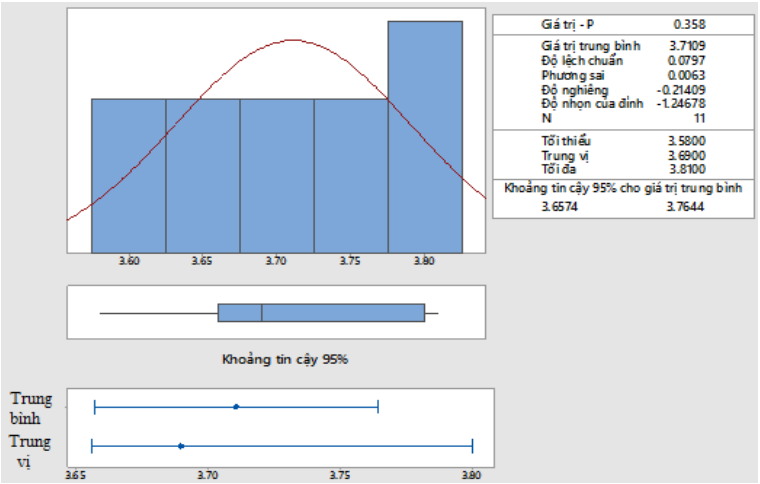
Giá trị min 3.58 g/cm^3; Giá trị max 3.81 g/cm^3

Khoảng tin cậy 95% so với giá trị trung bình từ 3.6574 g/cm^3 đến 3.7644 g/cm^3

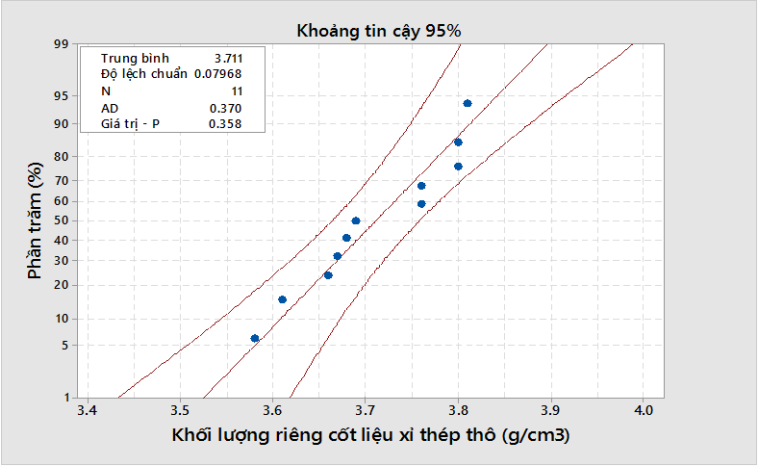
Khi khối lượng riêng dùng để phân tích các đặc trưng thể tích của hỗn hợp, xác định độ đầm chặt, độ rỗng thì dùng giá trị trung bình hoặc khoảng giá trị 95%CI. Khi tính khối lượng vận chuyển cốt liệu xỉ thép thô thì dùng giá trị đặc trưng với dấu "+" có được X_{dt}=X_{tb} + K.S = 3.7109 + 1.645*0.0797=3.842 g/cm^3 như thể hiện Hình 2.6.



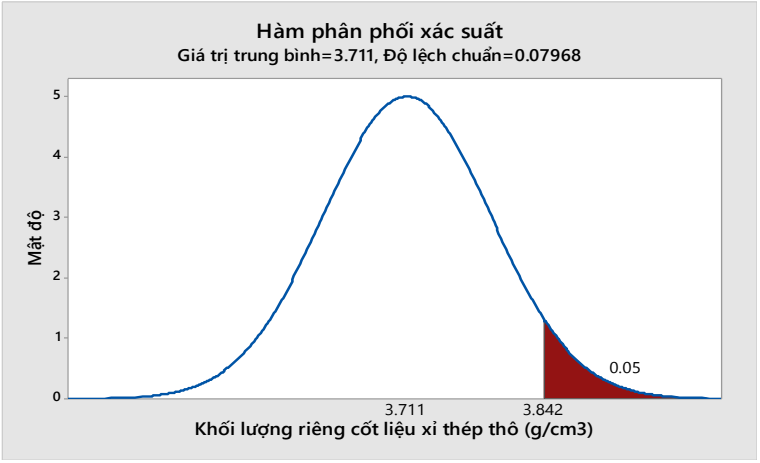
Hình 2.3. Loại bỏ số liệu ngoại lai khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép thô theo tiêu chuẩn Grubbs - ASTM E178



Hình 2.4. Biểu đồ tổng hợp thống kê khối lượng riêng cốt liệu xỉ thép thô



Hình 2.5. Biểu đồ kiểm định phân phối chuẩn khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép thô



Hình 2.6. Biểu đồ xác định giá trị đặc trưng khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép thô

- Đối với cốt liệu xỉ thép mịn

Các tham số thống kê khối lượng riêng của cốt liệu xỉ thép mịn được xác định tương tự như cốt liệu thô bao gồm:

P-value = 0.217>0.05 chuỗi kết quả tuân theo luật phân bố chuẩn, các kết quả thí nghiệm tuân theo luật phân bố chuẩn qua hệ số P-value và đều nằm trong giới hạn 95%. Giá trị trung bình 3.5264 g/cm^3. Độ lệch chuẩn 0.0888 g/cm^3, hệ số biến sai C_v=0.0888/3.5264=2.5182%. Giá trị min 3.43 g/cm^3; Giá trị max 3.69 g/cm^3

Khoảng tin cậy 95% so với giá trị trung bình từ 3.4667 g/cm^3 đến 3.586 g/cm^3. Khi khối lượng riêng dùng để phân tích các đặc trưng thể tích của hỗn hợp, xác định độ đầm chặt, độ rỗng thì dùng giá trị trung bình hoặc khoảng giá trị 95%CI. Khi tính khối lượng vận chuyển cốt liệu xỉ thép mịn thì dùng giá trị đặc trưng với dấu "+" có được $X_{dt}=X_{tb}$ + K.S = 3.5264+1.645*0.0888=3.672 g/cm^3.

Các chỉ tiêu còn lại bao gồm khối lượng thể tích; khối lượng thể tích xốp; độ hút nước; hàm lượng bùn, bụi, sét; độ nén dập của cốt liệu xỉ thép trong xi lanh; độ hao mòn Los Angeles; hàm lượng hạt thoi dẹt; độ rỗng của cốt liệu xỉ thép các tham số thống kê được xác định tương tự như chỉ tiêu khối lượng riêng của cả cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ được tổng hợp ở Bảng 2.2; Bảng 2.3.

Bảng 2.2. Kết quả phân tích thống kê các chỉ tiêu cơ lí của cốt liệu xỉ thép thô

STT	Chỉ tiêu	P-value	S	C_V (%)	Giá trị min	Giá trị max	Giá trị TB	Khoảng tin cậy 95% so với giá trị trung bình (95% CI)	Giá trị đặc trưng với xác suất độ tin cậy 95% $X_{dt}=X_{tb}+K.S$ (K=1.645)
1	Khối lượng riêng (g/cm^3)	0.358	0.0797	2.1472	3.58	3.81	3.71	3.657-3.764	3.842
2	Khối lượng thể tích (g/cm^3)	0.883	0.0941	2.1472	3.30	3.59	3.45	3.391-3.517	3.608
3	Khối lượng thể tích xốp (g/cm^3)	0.656	0.0599	2.7232	1.81	1.99	1.89	1.849-1.926	1.987
4	Độ hút nước (%)	0.707	0.1026	3.1718	2.00	2.39	2.19	2.121-2.258	2.359
5	Hàm lượng bụi, Bùn, sét (%)	0.521	0.0196	4.6834	0.26	0.32	0.29	0.275-0.299	0.319
6	Hàm lượng hạt thoi dẹt (%)	0.452	0.2070	6.8168	2.88	3.47	3.17	3.027-3.305	3.506
7	Độ hao mòn LA (%)	0.344	0.4590	6.5387	12.56	14.01	13.27	12.962-13.579	14.030
8	Độ nén dập khô (%)	0.358	0.4185	3.4594	8.23	9.44	8.94	8.662-9.224	9.631
9	Độ nén dập bão hòa (%)	0.117	0.589	4.6796	9.02	10.89	9.74	9.365-10.114	10.710

Bảng 2.3. Kết quả phân tích thống kê các chỉ tiêu cơ lí của cốt liệu xỉ thép mịn

STT	Chỉ tiêu	P-value	S	C_V (%)	Giá trị min	Giá trị max	Giá trị TB	Khoảng tin cậy 95% so với giá trị trung bình (95% CI)	Giá trị đặc trưng với xác suất độ tin cậy 95% $X_{dt}=X_{tb}+K.S$ (K=1.645)
1	Khối lượng riêng (g/cm^3)	0.217	0.0888	2.5182	3.43	3.69	3.53	3.466 - 3.586	3.672
2	Khối lượng thể tích (g/cm^3)	0.810	0.0740	2.3675	2.99	3.24	3.13	3.077-3.177	3.249
3	Khối lượng thể tích xốp (g/cm^3)	0.653	0.0640	3.3981	1.80	1.99	1.88	1.843-1.924	1.989
4	Độ hút nước (%)	0.515	0.0561	4.5963	1.14	1.35	1.22	1.183-1.258	1.312
5	Hàm lượng bụi bùn sét (%)	0.482	0.0264	4.5257	0.53	0.62	0.58	0.566-0.600	0.626
6	Độ rỗng %	0.186	2.713	6.7992	35.59	43.43	39.90	38.080-41.725	44.36

Bảng 2.4. Bảng tổng hợp so sánh tính chất cơ lí của cốt liệu xỉ thép bao gồm cả cốt liệu lớn và nhỏ với một số tính chất của cốt liệu được sử dụng làm vật liệu chế tạo cho mặt đường cứng theo QĐ 1951-2012 [3]

TT	Chỉ tiêu	Giá trị trung bình		QĐ 1951-2012 (Quy định nghiệm thu mặt đường BTXM) [3]	
		Cốt liệu nhỏ	Cốt liệu lớn	Cốt liệu nhỏ	Cốt liệu lớn
1	Khối lượng riêng (g/cm^3)	3.53	3.71	>2.5	>2.5
2	Khối lượng thể tích (g/cm^3)	3.13	3.45	-	>1.350
3	Khối lượng thể tích xốp (g/cm^3)	1.88	1.89	>1.350	-
4	Độ hút nước (%)	1.22	2.19	-	<2.5%
5	Độ rỗng (%)	39.90	-	<47%	-
6	Hàm lượng bụi bùn sét (%)	0.58	0.29	<2% Dùng cho tầng mặt cao tốc, cấp I, II, III	<0.3%
				<3% Dùng cho đường cấp IV trở xuống	
7	Hàm lượng hạt thoi dẹt (%)	-	3.17	-	<25% VL cho tầng móng
				-	<15% VL cho tầng mặt cao tốc, cấp I, II, III
				-	<20% VL cho cấp IV trở xuống
8	Độ hao mòn LA (%)	-	13.27	-	<30% VL cho đường cao tốc, cấp I, II, III
				-	<35% cho đường cấp IV trở xuống
9	Độ nén dập khô (%)	-	8.94	-	-
10	Độ nén dập bão hòa (%)	-	9.74	-	-

Bảng 2.5. Bảng tổng hợp so sánh tính chất cơ lí của cốt liệu xỉ thép bao gồm cả cốt liệu lớn và nhỏ với kết quả nghiên cứu trong nước và một số nước trên thế giới

Một số tính chất	Đơn vị	Nghiên cứu		Trong nước			Thế giới			
		Cốt liệu nhỏ xỉ thép	Cốt liệu lớn xỉ thép	Xỉ thép Bà rịa VT [24]	Vật liệu Xanh [27]	Xỉ thép miền nam [15]	Mỹ [76]	Trung Quốc [96]	Malayxia [93]	Croatia [78]
Loại xỉ thép		EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF
Khối lượng riêng	g/cm^3	3.53	3.71	3.51	3.6	3.5	3.63	3.3	-	3.69-3.88
Khối lượng thể tích	g/cm^3	3.13	3.45	-	-	3.24	-	-	-	-
Khối lượng thể tích xốp	g/cm^3	1.88	1.89	-	-	-	-	1.9	-	-
Độ hút nước	%	1.22	2.19	1.68	0.96	2.24	1.35	1.29	5.46-6.92	1.5-2.2
Độ rỗng		39.90	-	-	-	-	-	-	-	-
Hàm lượng bụi bùn sét	%	0.58	0.29	-	-	0.54	-	-	-	-
Hàm lượng thoi dẹt	%	-	3.17	-	-	4.5	-	9	2-3	2-4
Độ hao mòn LA	%	-	13.27	20.3	17.31-19.53	22.64	24.2	13.2	24	13
Nén dập trong xi lanh (khô)	%	-	8.94	-	8.1-8.5	13.21	-	12.1	-	-
Nén dập trong xi lanh (bão hòa)	%	-	9.74	-	-	-	-	-	23	-

Các giá trị trung bình của các kết quả thí nghiệm sau khi phân tích thống kê được tổng hợp so sánh với cốt liệu tự nhiên được sử dụng cho kết cấu mặt đường cứng quy định trong QĐ 1951-2012. Đồng thời các kết quả này cũng được so sánh với một số kết quả nghiên cứu của các tác giả trong nước và trên thế giới thể hiện ở Bảng 2.4; Bảng 2.5. Kết quả cho thấy:

(i) Khối lượng riêng, khối lượng thể tích, khối lượng thể tích xốp trung bình của xỉ thép bao gồm cả cốt liệu lớn và nhỏ đều cao hơn hẳn so với giá trị tối thiểu 2.5g/cm^3, 1.35g/cm^3 đối với cốt liệu tự nhiên (đá, cát) theo quy định nghiệm thu mặt đường BTXM (QĐ1951-2012) [3]. Thông thường đối với cốt liệu tự nhiên thì khối lượng riêng của đá granít (đá dăm) từ 2.7-2.8 g/cm^3 của cát là 2.65 g/cm^3, khối lượng thể tích của đá dăm từ 1.45-1.65 g/cm^3, của cát từ 1.4-1.65 g/cm^3 [20]. Như vậy, khối lượng riêng của cốt liệu lớn xỉ thép nặng hơn so với đá dăm granit khoảng 25-27%, cốt liệu nhỏ xỉ thép nặng hơn so với cát thông thường khoảng 25%. Mặt khác, khối lượng riêng của xỉ thép ở các nghiên cứu trên thế giới từ 2.82 - 3.88g/cm^3, ở Việt Nam từ 3.5-3.6 g/cm^3.

(ii) Độ hút nước, độ rỗng của cốt liệu xỉ thép bao gồm cả cốt liệu lớn và nhỏ đều nhỏ hơn mức giá trị tối đa 2.5%, 47% theo yêu cầu trong quy định QĐ 1951-2012 [3]. So sánh với cốt liệu tự nhiên thông thường thì độ hút nước và độ rỗng của cốt liệu xỉ thép lớn hơn do ảnh hưởng bởi cấu trúc có nhiều lỗ rỗng của xỉ thép. Độ hút nước của xỉ thép trong các nghiên cứu trên thế giới từ 0.4 - 6.92%, tại Việt Nam từ 0.96-2.24%.

(iii) Hàm lượng bụi bùn sét và hàm lượng hạt thoi dẹt của cốt liệu xỉ thép gồm cả cốt liệu lớn và nhỏ đều hơn giá trị tối đa theo QĐ 1951-2012 [3]. Xét về chỉ tiêu này, cốt liệu xỉ thép hoàn toàn có thể đáp ứng làm vật liệu cho tầng mặt đường cao tốc, đường cấp I, II, III.

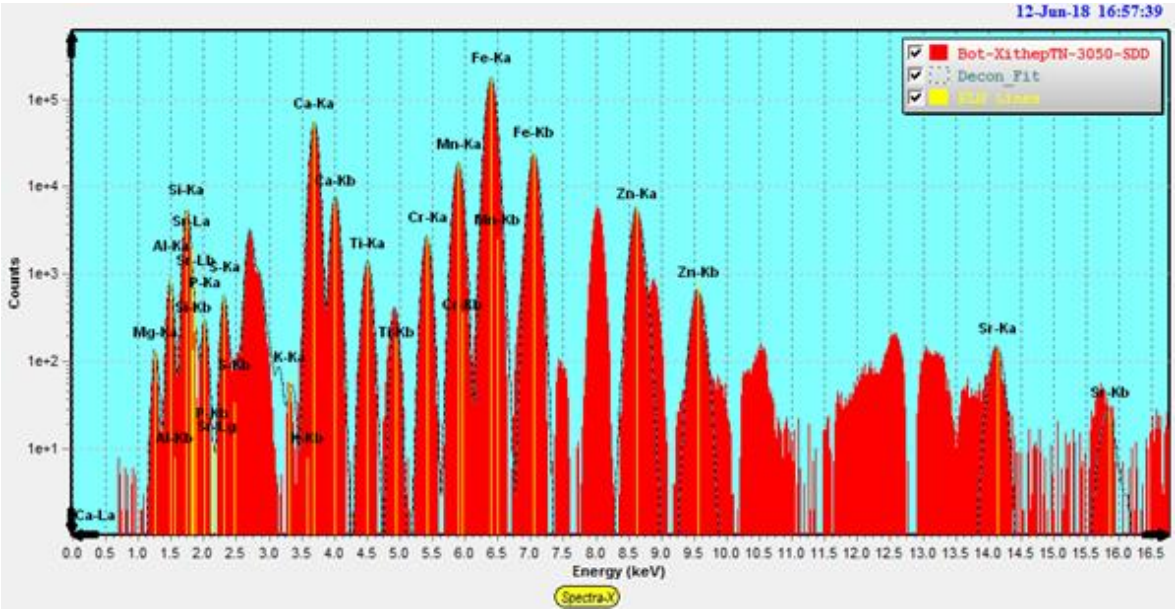
(iv) Độ hao mòn Los Angeles của cốt liệu lớn xỉ thép là 13.27%, nhỏ hơn giá trị hao mòn tối đa là 30% để sử dụng vật liệu làm đường cao tốc, cấp I, II, III theo quy định QĐ 1951-2012 [3]. Độ hao mòn LA của xỉ thép ở các nghiên cứu trên thế giới từ 13-24.2%; ở Việt Nam từ 17.31-22,64%.

(v) Độ nén dập trong xi lanh của xỉ thép ở trạng thái bão hòa và khô để đánh giá cường độ của cốt liệu xỉ thép, độ nén dập càng nhỏ thì cường độ càng cao. Độ nén dập ở trạng thái khô và bão hòa cốt liệu xỉ thép lần lượt là 8.94%, 9.74% nếu quy đổi tương đối theo TCVN 7570-2006 [8] thì cường độ của xỉ thép ứng với đá phún xuất phun trào có cường độ đá gốc lên đến 120 MPa. Độ nén dập của cốt liệu xỉ thép trên thế giới từ 6-23% (bão hòa) và ở Việt Nam lần lượt từ 8.1-13.21% (khô).

Như vậy, 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 quy định QĐ 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 và Bảng 2.6.



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

Thành phần hóa học chính của các mẫu xỉ thép (EAF) lấy tại nhà máy gang thép Thái Nguyên, bao gồm: CaO, SiO_2, Al_2O_3 và Fe_2O_3 chiếm đến 84.55% trọng lượng của xỉ thép, hàm lượng trung bình: Fe_2O_3 chiếm: 33.22%, CaO chiếm 25.26%, SiO_2 chiếm 19.94%, Al_2O_3 chiếm 6.13%.

So sánh thành phần hóa học xỉ thép của nhà máy gang thép Thái Nguyên với các kết quả nghiên cứu khác ở trong nước và thế giới thì thành phần hóa học của xỉ thép chứa các oxít tương tự nhau, nhưng hàm lượng các oxít trong xỉ thép có sự khác nhau. Các kết quả nghiên cứu thành phần hóa học của xỉ thép Thái Nguyên do Viện Vật liệu Xây dựng thí nghiệm và trong nghiên cứu này cũng có sự khác nhau về hàm lượng các oxit. Tuy nhiên, sự khác biệt không nhiều. Đặc biệt, trong cả hai nghiên cứu đều cho thấy xỉ thép Thái Nguyên không chứa Cao và MgO tự do.

Bảng 2.6. Bảng tổng hợp kết quả thành phần hoá học của xỉ thép nghiên cứu và so sánh với kết quả nghiên cứu trong nước và một số nước trên thế giới

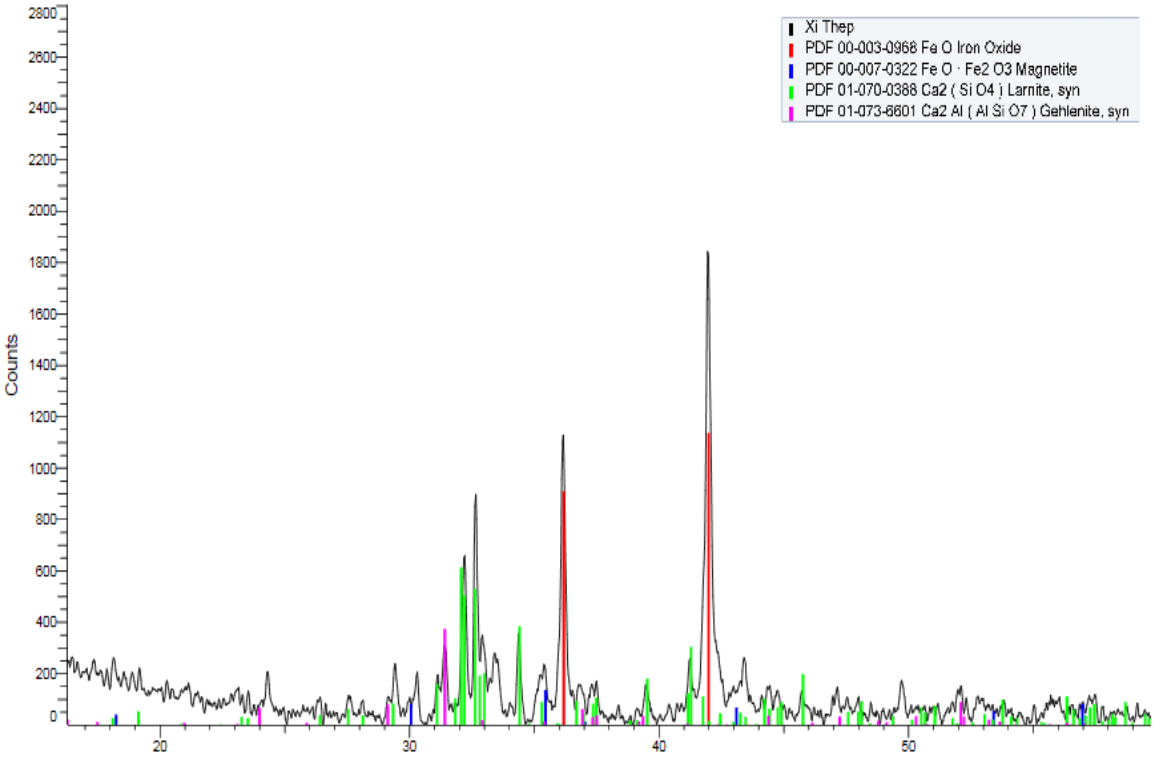
TT	Tên nghiêncứu	Loại xỉ	Thành phần ô xít																
			CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	Fe_2O_3	Fe total	SO_3(S)	MnO	TiO_2	P_2O_5	Caotự do	Na_2O	Cr_2O_3	K2O	Cl (Zn)	LOI
1	Xỉ thép nghiên cứu	EAF	25.26	19.94	6.13	5.89	-	33.22	-	6.21	3.29	0.68	0.32	0.00	-	1.06	0.015	-	-
2	Xỉ thép (Viện VLXD) [2]	EAF	25.00	19.20	5.61	9.51	-	32.90	-	9.51	4.31	0.56	0.86	0.00	0.00	-	0.03	-	-
3	Xỉ thép 1 [24]	EAF_1	42.56	34.2	13.71	5.33	-	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Xỉ thép 2 [24]	EAF_2	49.14	38	2.73	1.81	-	0.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	C.ty Vật Liệu Xanh [27]	EAF_1	28.4	13.7	6.6	6.7	40.1	-	-	-	4.1	-	-	-	-	-	-	-	-
6	C.ty Vật Liệu Xanh [27]	EAF_2	25.49	14.6	7.25	6.62	-	40.36	-	-	3.7	-	0.4	-	0.3	-	0,1	-	-
7	Xỉ thép miền nam [15]	EAF_1	17.49	13.01	9.03	0.23	-	36.84	-	-	3.37	0.96	-	-	-	1.36	-	-	-
8	Xỉ thép Việt [15]	EAF_2	19.16	13.71	9.59	0.87	-	36.07	-	-	3.07	0.97	-	-	-	1.23	-	-	-
9	Đức [103]	EAF	28.5	12.1	4.7	4.1	-	-	26.5	-	4.2	-	0.57	-	-	-	-	-	-
10	Italia [103]	EAF	29.6	13.02	9.3	3.65	32.8	-	-	-	-	0.35	-	-	-	4.03	-	-	-
11	Nam Phi [103]	EAF	49.7	11.4	1.3	6.5	-	-	18.5	0.1	3.1	0.5	0.3	-	-	-	-	-	-
12	Ấn Độ [103]	EAF	34	15	4	2	-	-	18	-	4	-	5	-	-	-	-	-	-
13	Croatia [103]	EAF	33.22	10.86	1.66	13.1	-	29.64	-	-	6.18	-	-	-	0.02	0.06			
14	Trung Quốc [103]	EAF	43.38	17.03	5.64	5.98	-	22.69	-	-	1.7	-	-	-	0.3	-	0.15	-	1.86
15	Nga [103]	EAF	32-45	32-42	7-16	5-15	-	1-1.5	-	1-2	0.2-1	-	-	-	-	-	-	-	-

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 và Bảng 2.7. Kết quả thí nghiệm cho thấy, cũng tương tự như thành phần hóa học, thành phần khoáng vật của xỉ thép tại mỗi nguồn nhà máy lại có thành phần khác nhau. Thành phần khoáng vật này cũng phụ thuộc vào quá trình luyện thép và vật liệu đầu vào.

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 $Ca_2Al(AlSiO_7)$. Đặc biệt, qua phân tích thành phần khoáng vật của xỉ thép cũng không nhận thấy sự có mặt của (CaO tự do).

So sánh với một số kết quả nghiên cứu về thành phần khoáng vật của xỉ thép trong nước và các nước trên thế giới cho thấy, thành phần khoáng vật của xỉ thép có sự khác biệt và có nhiều thành phần khoáng vật khác nhau.



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

Bảng 2.7. Bảng tổng hợp kết quả thành phần khoáng vật của xỉ thép nghiên cứu và so sánh với các kết quả trong và một số nước trên thế giới

TT	Nghiên cứu	Loại	Thành phần khoáng vật chính
1	Xỉ thép nghiên cứu	EAF	FeO, Ca_2SiO_4, $FeO.Fe_2O_3$, $Ca_2Al(AlSiO_7)$
2	C.Ty Vật liệu Xanh [27]	EAF	FeO, $2CaOSiO_2$, $12CaO7Al_2O_3$, $Ca_{14}Mg_2(SiO_4)_8$
3	Xỉ thép miền Nam [15]	EAF	FeO, Fe_3O_4, $Ca_2Al(AlSiO_7)$
4	Xỉ thép Việt [15]	EAF	FeO, Fe_3O_4, $Ca_2Al(AlSiO_7)$
5	Barra [69]	EAF	$CaCO_3$, FeO, MgO,Fe_2O_3,$Ca_2Al(AlSiO_7)$, Ca_2SiO_4
6	Luax'n [69]	EAF	Ca_2SiO_5, $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Fe_2O_3, $Ca_{14}Mg_2(SiO_4)_8$, $MgFe_2O_4$, Mn_3O_4 MnO_2
7	Nicolae [69]	EAF	MnO_2, MnO, Fe_2SiO_4, Fe_7SiO_{10}
8	Tossavainen [69]	EAF	$Ca_3Mg(SiO_4)_2$, β- Ca_2SiO_4, $Ca_2(Al,Fe)_2O_5$
9	Tsakiridis [69]	EAF	Ca_2SiO_4, $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Ca_3SiO_5, $2CaO.Al_2O_3.SiO_2$, FeO, Fe_3O_4, MgO, SiO_2
10	Geiseler [69]	EAF	$2CaOSiO_2$, $3CaOSiO_2$, $2CaOFe_2O_3$, FeO, MgO, CaO tự do

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

Dưới tác dụng của nước mặt rửa trôi trên bề mặt của xỉ thép gây ra các nguy cơ kim loại nặng đi vào môi trường nước và đất xung quanh. Những kim loại này với hàm lượng lớn có thể gây nguy hiểm cho sức khỏe của con người và môi trường. Hàm kim loại nặng của xỉ thép nghiên cứu được thể hiện ở Bảng 2.8.

Bảng 2.8. Bảng tổng hợp kết quả thành phần kim loại nặng của xỉ thép

Nguyên tố	As	Se	Ba	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn	V	Tl	Be	Sb	Mo	Ag	Hg	Co
Kết quả	KPH	KPH	3.89	-	KPH	-	-	5.4	-	-	KPH	KPH	-	-	KPH	-
QCVN 07:2009 (mg/l) [1]	2	1	100	0.5	5	15	70	250	25	7	0.1	1	350	5	0.2	80

Kết quả cho thấy, xỉ thép nghiên cứu không chứa các kim loại nặng (KPH - không phát hiện) hoặc chứa các kim loại nặng nhưng đáp ứng các yêu cầu về môi trường theo QCVN 07:2009/BTNMT "Quy chuẩn kỹ thuật về ngưỡng chất thải nguy hại" [1]. Theo quyết định số 430/QĐ-BXD ngày 16/5/2017 của Bộ Xây dựng [2], khẳng định: Hàm lượng các hạt nhân phóng xạ có trong xỉ thép nhỏ hơn giới

hạn cho phép. Vì vậy, sử dụng xỉ thép là an toàn và không gây ra ô nhiễm và nguy hại đến môi trường.

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

Khả năng trương nở thể tích của xỉ thép được đánh giá thông qua thể tích lỗ rỗng có thể hấp thụ nước trong các mẫu xỉ thép. Phương pháp thí nghiệm theo tiêu chuẩn của ASTM D4792 [39] đã được áp dụng để kiểm tra khả năng trương nở thể tích của xỉ thép. Khuôn thí nghiệm có kích thước là 15.24x17.7 cm, và chiều cao của phần chứa vật liệu là 11.64 cm. Tiến hành thí nghiệm đối với các mẫu với kích thước hạt danh định D_{max} 19 mm.

Lấy tấm đo trương nở đặt lên trên mẫu và đặt các quả gia tải lên trên. Miếng gia tải có khối lượng là 4.54 kg.

Đặt giá 3 chân có gắn đồng hồ thiên phân kế lên miệng khuôn. Điều chỉnh đồng hồ đo trương nở tiếp xúc ổn định với trục tấm đo trương nở. Ghi lại số đọc trên đồng hồ, ký hiệu là số đọc đầu.

Cho mẫu vào bể ngâm mẫu (phải duy trì mực nước trong bể luôn cao hơn mặt mẫu 25 mm). Các mẫu xỉ được ngâm trong bể nước ở 74 ± 3°C trong suốt thời gian thí nghiệm. Thường xuyên kiểm tra nhiệt độ và mực nước trong bể ngâm. Trong trường hợp nước bốc hơi nhiều (>25mm/ ngày) cần có biện pháp che phủ bể ngâm mẫu.

Hàng ngày ghi lại số đọc trên đồng hồ đo biến dạng, ký hiệu là số đọc cuối. Giá trị thay đổi chiều cao mẫu sau khi ngâm nước được xác định trên cơ sở số đọc cuối và số đọc đầu trên đồng hồ đo trương nở.

Lấy mẫu ra khỏi bể nước, nghiêng cối để tháo nước trên mặt mẫu và để nước thoát trong vòng 15 phút. Sau đó, bỏ các tấm gia tải và tấm đo trương nở ra ngoài.

Độ trương nở được tính như sau:

$$H_{tn} = \frac{S_c - S_d}{H_0} 100 \qquad (2.1)$$

Trong đó:

S_c : Số đọc cuối trên đồng hồ đo biến dạng (mm)

S_d : Số đọc đầu trên đồng hồ đo biến dạng (mm)

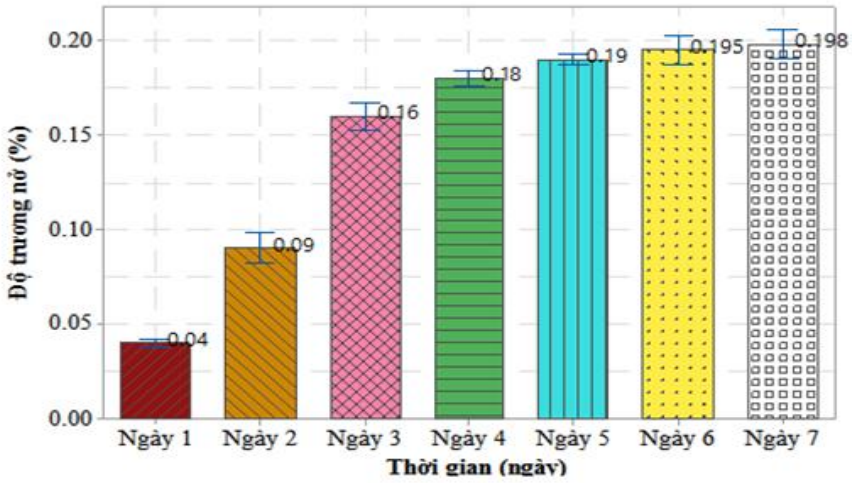
H_o : Chiều cao ban đầu của mẫu (mm)

Hình 2.9. Thí nghiệm xác định độ trương nở của cốt liệu xỉ thép

Kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 2.9. Các kết quả thí nghiệm đo ở từng ngày được đánh giá loại bỏ số liệu ngoại lai (outlier) theo ASTM E178-2015.

Bảng 2.9. Kết quả thí nghiệm độ trương nở của hỗn hợp cốt liệu xỉ thép khi chưa loại bỏ sai số thô

Thời gian bảo dưỡng	Độ trương nở thể tích của hỗn hợp cấp phối xỉ thép (%)					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Ngày 1	0.038	0.041	0.037	0.04	0.042	0.042
Ngày 2	0.086	0.092	0.095	0.085	0.081	0.101
Ngày 3	0.167	0.163	0.161	0.153	0.151	0.165
Ngày 4	0.182	0.178	0.181	0.185	0.174	2.040
Ngày 5	0.185	0.187	0.192	0.191	0.195	2.531
Ngày 6	0.188	0.189	0.196	0.194	0.208	2.865
Ngày 7	0.191	0.193	0.200	0.195	0.211	3.511



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

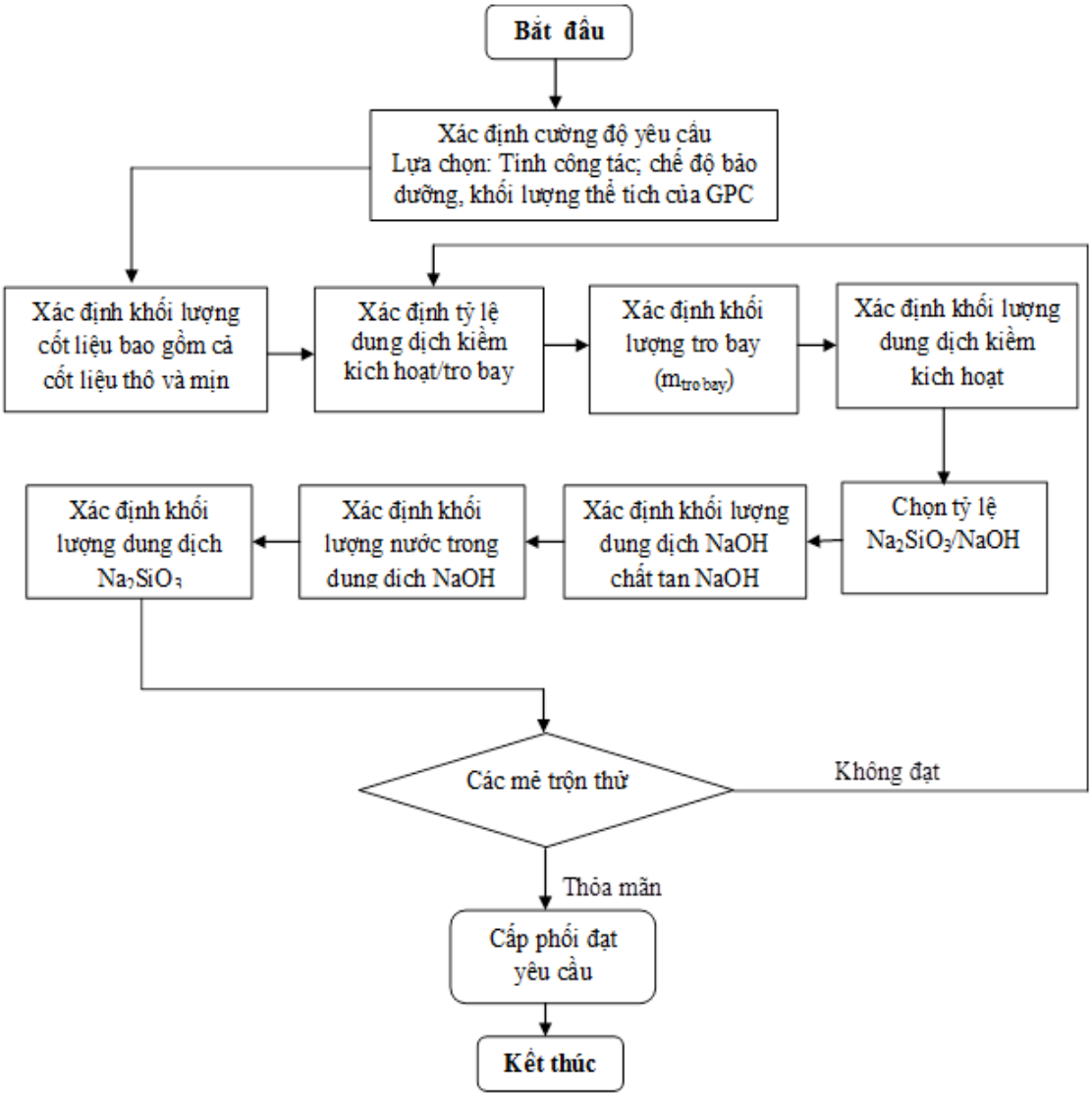
Hình 2.10 thể hiện độ trương nở trung bình của hỗn hợp cấp phối xỉ thép theo thời gian thí nghiệm từ ngày 1 đến ngày 7 bảo dưỡng trong môi trường nước ở nhiệt độ 74 ± 3°C. Độ trương nở thể tích của hỗn hợp cấp phối xỉ thép tăng dần khá đều đặn trong những ngày đầu tiên thí nghiệm từ ngày 1 đến ngày 3 và xu thế ổn định sau ngày 4.

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. Hơn nữa, Manso và cộng sự [71] cũng nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian phong hóa đến độ trương nở thể tích của xỉ thép thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM D4792 [39]. Mẫu xỉ thép nghiền ban đầu có chứa 23.9% CaO, 5.1% MgO, 0.45% CaO tự do và MgO tự do nhỏ hơn 1%. Xỉ thép trước khi phong hóa có độ trương nở thể tích từ 0.5% đến 2.5%. Xỉ thép sau khi trải qua quá trình phong hóa ngoài trời, độ trương nở thể tích có thể giảm xuống còn 0.15% đến 0.40% [71]. Như vậy, kết quả nghiên cứu của luận án cũng tương đồng với nghiên cứu của Manso và cộng sự [71]. Thực tế, cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên trong nghiên cứu đã qua quá trình phong hóa ngoài trời tại bãi chứa một thời gian dài (khoảng 1-2 tháng). Đồng thời, qua các nghiên cứu thành phần khoáng vật và hóa học trong các mẫu xỉ thép nghiên cứu đã chứng minh xỉ thép Thái Nguyên không chứa CaO tự do. Sự trương nở của cốt liệu xỉ thép có thể là do các khoáng khác phản ứng thủy hóa với nước và độ trương nở thể tích này không đáng kể, nhỏ hơn 0.5% sau 7 ngày đáp ứng yêu cầu theo ASTMD4792 cho cốt liệu tự nhiên. Vì vậy, cốt liệu xỉ thép hoàn toàn có thể làm cốt liệu thay thế cho cốt liệu tự nhiên.

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

2.2.1. Cơ sở thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

Dựa trên cơ sở tính toán và phương pháp thiết kế theo kinh nghiệm mà Rangan đưa ra, quá trình thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép được thể hiện ở sơ đồ khối theo Hình 2.11.



Hình 2.11. Sơ đồ khối tính toán và thiết kế thành phần GPC

Chi tiết các bước tính toán như sau:

Giả sử: $m_{GPCS}=m_{xi\ thép}+m_{tro\ bay}+m_{\ dung\ dịch\ kiềm\ kích\ hoạt}$ (tính cho $1m^3$ bêtông GPCS ở trạng thái tự nhiên)

Bước 1: Xác định cường độ yêu cầu với xác suất đảm bảo độ tin cậy nhất định

Bước 2: Lựa chọn tính công tác và khối lượng thể tích của GPCS

Bước 3: Xác định khối lượng cốt liệu.

Bước 4: Xác định tỷ lệ khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt/tro bay

Bước 5: Xác định khối lượng tro bay

Bước 6: Xác định khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt

Bước 7: Xác định tỷ lệ Na_2SiO_3/NaOH theo khối lượng

Bước 8: Xác định khối lượng dung dịch NaOH và khối lượng chất tan NaOH

Bước 9: Xác định khối lượng nước trong dung dịch NaOH

Bước 10: Xác định khối lượng dung dịch Na_2SiO_3 và kết thúc quá trình thiết kế tính toán cho 1 m^3 bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép.

2.2.2. Vật liệu chế tạo bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép

2.2.2.1. Tro bay

Nghiên cứu này sử dụng tro bay của nhà máy nhiệt điện Phả Lại, tỉnh Hải Dương đã qua xử lý bằng công nghệ thổi gió phân ly của nhà máy chuyên sản xuất tro bay Vina F&C. Tro bay thành phẩm được đóng bao, bọc lớp ni lông để tránh hút ẩm. Mang về bảo quản cho tới ngày được sử dụng. Thành phần và độ mịn của tro bay được thể hiện ở Bảng 2.10 và Bảng 2.11. Đây là loại tro tương đương với tro bay nhóm F theo tiêu chuẩn ASTM C618-03 [37].

Theo tiêu chuẩn TCVN 10302:2014 "phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng" thì hàm lượng mất khi nung MKN, % khối lượng, không lớn hơn 12 % và 15% lần lượt trong hai trường hợp sau:

i. Dùng cho chế tạo sản phẩm và cấu kiện bê tông cốt thép từ bê tông nặng và bê tông nhẹ;

ii. Dùng cho chế tạo sản phẩm và cấu kiện bê tông không cốt thép từ bê tông nặng, bê tông nhẹ và vữa xây.

Theo tiêu chuẩn ASTM C618 thì tro bay được chia làm ba loại N, F, C. Dựa vào Bảng 1 ở trang 2 của tiêu chuẩn có quy định thành phần hóa học của các loại tro bay thì hàm lượng mất khi nung quy định không được lớn hơn 10% đối loại N; 12% đối với loại F; 6% đối với loại C.

Vì vậy, loại tro bay này hoàn toàn có thể sử dụng trong việc chế tạo bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép.

Bảng 2.10. Thành phần hoá học của tro bay sử dụng trong nghiên cứu

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	SO_3	MKN*
51.74	24.53	5.59	0.81	1.95	4.42	0.11	0.76	0.31	8.98

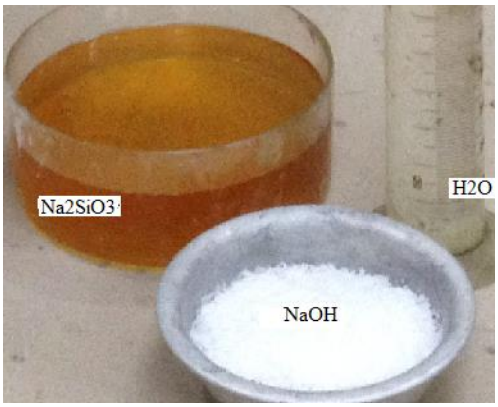
% theo khối lượng, (*) Lượng mất khi nung

Bảng 2.11. Thành phần hạt của tro bay sử dụng trong nghiên cứu

Cỡ hạt (μm)	30	20	10	5
Lượng lọt sàng (%)	95	51.67	33.06	16.77

2.2.2.2. Dung dịch kiềm kích hoạt

Dung dịch kiềm sử dụng trong nghiên cứu này là hỗn hợp dung dịch NaOH kết hợp với Na_2SiO_3 để tăng tốc độ polyme hóa, từ đó tăng nhanh thời gian hình thành cường độ của mẫu thử. Trong nghiên cứu này sử dụng NaOH khan dạng vảy và dung dịch thủy tinh lỏng Na_2SiO_3 được lấy từ nguồn nhà máy hóa chất Việt Trì (Việt Trì, Phú Thọ).



Hình 2.12. Vật liệu thành phần của dung dịch kiềm hóa (Gel)

Thành phần hóa học và một số chỉ tiêu cơ lý của NaOH và Na_2SiO_3 (nhà máy hóa chất Việt Trì) được thể hiện ở Bảng 2.12.

Bảng 2.12. Thành phần hóa học và một số chỉ tiêu cơ lý của NaOH và Na_2SiO_3

NaOH	
Đặc điểm	Vảy trắng
Độ tinh khiết	98.5%
%NaOH	98.7%
%NaCl	0.03%
%Na_2CO_3	0.5%
%Fe_2O_3	0.004
Khối lượng riêng	2.1

Na_2SiO_3	
Đặc điểm	Lỏng, nhớt
Tỷ trọng ở 30°C	1.42-1.43 g/ml
%Na_2SiO_3	39-40.03%
Mô đun	2.85

Dung dịch kiềm kích hoạt phải được chuẩn bị bằng cách hòa tan NaOH dạng vảy khô vào nước theo nồng độ yêu cầu, sau đó trộn dung dịch NaOH và dung dịch Na_2SiO_3 theo tỷ lệ đã định trước. Cả hai quá trình hòa tan và trộn này đều là các phản ứng tỏa nhiệt. Nhiệt độ hỗn hợp vào khoảng 70^oC. Do vậy, nên pha chế dung dịch kiềm kích hoạt ít nhất một ngày trước khi trộn vào bê tông để kích hoạt tro bay [66], [67].

2.2.2.3. Cốt liệu

Xỉ thép đóng vai trò là cốt liệu, xỉ thép sử dụng trong nghiên cứu được lấy từ khu công nghiệp gang thép Thái nguyên (Thành phố Thái Nguyên). Hỗn hợp cốt liệu xỉ thép sử dụng có D_{max} 19 mm. Xỉ thép được nghiền nhỏ thành các cỡ hạt khác nhau và thu hồi lượng kim loại dư thừa còn trong xỉ thép (mạt kim loại) bằng thiết bị lò từ, sau đó xỉ thép được sấy khô bề mặt để sử dụng thí nghiệm.

Hình 2.13. Cốt liệu xỉ thép được nghiền và thu hồi kim loại dư thưa bằng lò từ

Hỗn hợp cốt liệu xỉ thép có D_{max} =19mm được sàng phân loại theo các cỡ hạt khác nhau theo ASTMC136 [31] và được phối trộn với nhau thỏa mãn theo tiêu chuẩn ASTMC33 [28]. Sau khi phối trộn cốt liệu xỉ thép được chia làm hai loại bao gồm:

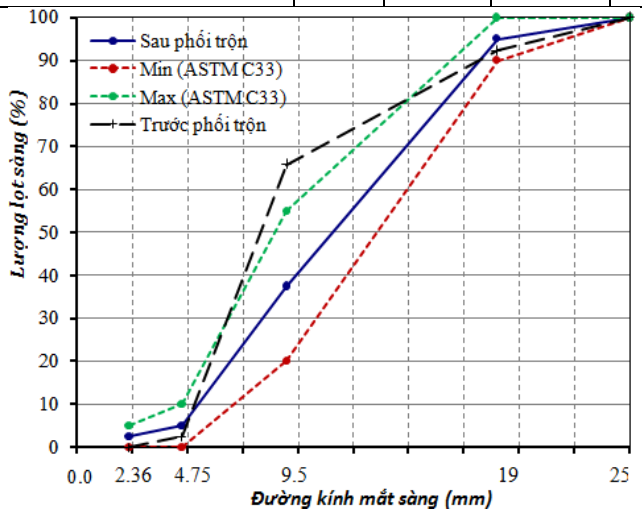
+ Loại 1: là loại có kích cỡ hạt từ 4.75÷19 mm đóng vai trò là cốt liệu lớn

+ Loại 2: là loại có kích cỡ hạt từ 0.15÷4.75 mm đóng vai trò là cốt liệu nhỏ

Hình 2.14. Các cỡ hạt của cốt liệu xỉ thép

Bảng 2.13. Thành phần hạt của xỉ thép cỡ hạt 4.75÷19 mm

Đường kính mắt sàng d (mm)	25	19	9.5	4.75	2.36
Lượng lọt sàng tiêu chuẩn (%)	100	90.00	20.00	0.00	0.00
	100	100	55.00	10.00	5.00
Lượng lọt sàng thí nghiệm (%)	100	92.26	65.83	2.50	0.00
Lọt sàng sau khi phối trộn (%)	100	95.00	37.5	5.00	0.00



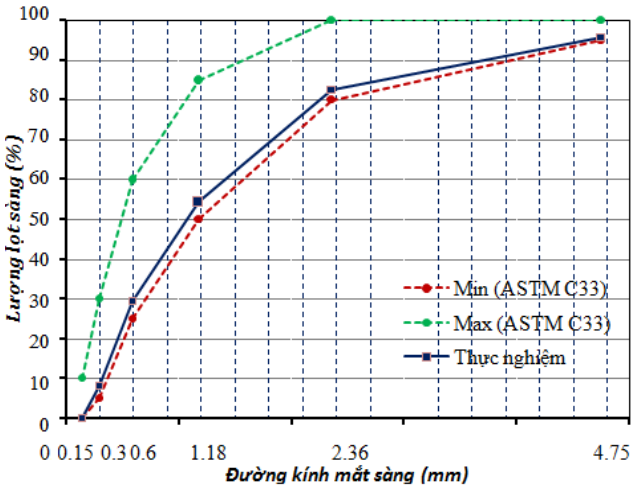
Hình 2.15. Biểu đồ cấp phối của xỉ thép cỡ hạt 4.75÷19 mm.

Qua biểu đồ cấp phối hạt của cốt liệu thô xỉ thép thực tế thí nghiệm ta thấy cốt liệu xỉ thép không đảm bảo thành phần hạt theo ASTMC33. Hàm lượng lọt sàng tại cỡ sàng 9.5mm của cốt liệu lớn là 65.83%, nằm ngoài phạm vi cho phép (20-55%) theo tiêu chuẩn ASTMC33. Vì vậy, cốt liệu lớn xỉ thép cần phải tiến hành sàng lọc

ra trên từng mắt sàng sau đó tiến hành phối trộn lại trên từng mắt sàng để cấp phối cốt liệu thô thỏa mãn tiêu chuẩn ASTMC33 [28].

Bảng 2.14. Thành phần hạt của xỉ thép cỡ hạt 0.15÷4.75 mm

Đường kính mắt sàng d (mm)	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
Lượng lọt sàng yêu cầu	100	95.00	80.00	50.00	25.00	5.00	0.00
	100	100	100	85.00	60.00	30.00	10.00
Lượng lọt sàng thí nghiệm	100	95.63	82.50	54.38	29.38	8.13	0.00
Mô đun độ lớn $M_{đl}$	3.26						



Hình 2.16. Biểu đồ cấp phối của xỉ thép cỡ hạt 0.15 ÷ 4.75 mm

Qua biểu đồ cấp phối hạt của cốt liệu mịn xỉ thép thí nghiệm đảm bảo thành phần hạt theo ASTMC33 [28] và hàm lượng các hạt lọt qua các sàng đều gần với mức cận dưới của tiêu chuẩn. Điều này có nghĩa cấp phối hạt của cốt liệu xỉ thép khá thô. Mô đun độ lớn của cốt liệu mịn khá lớn ($M_{đl}$= 3.26), hoàn toàn có thể đáp ứng vai trò là cốt liệu mịn để chế tạo bê tông geopolyme tro bay cốt liệu xỉ thép.

2.2.3. Công nghệ chế tạo mẫu thử bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trong phòng thí nghiệm

2.2.3.1. Nhào trộn hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

Quá trình nhào trộn được thực hiện bằng máy trộn cưỡng bức với thể tích thùng trộn 60 lít do Daiwa Kenko Co, LTD cung cấp. Hỗn hợp được nhào trộn theo ASTM C192 [34] với thời gian trộn khô 3 phút và trộn ướt 5 phút.

Hình 2.17. Máy trộn bê tông cưỡng bức **Hình 2.18. Trộn hỗn hợp bê tông GPCS**

2.2.3.2. Chế tạo mẫu và bảo dưỡng

Hỗn hợp bê tông tươi sau khi được nhào trộn tiến hành đo độ sụt của bêtông tươi, và đúc các tổ mẫu thí nghiệm. Hỗn hợp được cho vào khuôn và được đầm chặt, đối với các mẫu hình trụ được đầm chặt trên bàn rung khoảng 1.5 phút, dài hơn khoảng 2 lần so với việc chế tạo BTXM truyền thống [11]. Sau khi các tổ mẫu thí nghiệm được đúc xong, hoàn thiện bề mặt và tiến hành phủ kín giấy bóng trên bề mặt của các mẫu thí nghiệm để tránh sự thoát hơi nước nhanh.

Hình 2.19. Đầm mẫu **Hình 2.20. Mẫu thí nghiệm trước khi tháo khuôn**

Sau 48 giờ, tiến hành tháo khuôn và lưu mẫu ở điều kiện phòng thí nghiệm (PTN) cho đến ngày thí nghiệm. Điều kiện phòng thí nghiệm trong quá trình tiến hành nghiên cứu thực nghiệm có nhiệt độ t = 22±4°C và độ ẩm w = 60±20% [14].

2.2.4. Thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm

Do chưa có tiêu chuẩn thiết kế thành phần bê tông geopolymer và hệ thống bảng tra vật liệu thành phần dùng cho 1m^3 GPC, nên trong nghiên cứu này chọn phương pháp thiết kế thành phần của Rangan [91], [92] kết hợp với phương pháp quy hoạch thực nghiệm để thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép.

2.2.4.1. Lựa chọn hàm mục tiêu

Cường độ là đặc tính quan trọng nhất của bê tông sử dụng cho mặt đường và thường được đánh giá bằng hai chỉ tiêu gồm cường độ chịu kéo khi uốn và cường độ nén. Tương tự như BTXM truyền thống bê tông GPCS có thể làm việc ở những trạng thái khác nhau: nén, kéo, uốn, trượt, v.v... Bê tông GPCS làm việc ở trạng thái chịu nén là tốt nhất. Việc lựa chọn thành phần hỗn hợp các loại bê tông xi măng đều căn cứ vào chỉ tiêu cường độ chịu nén. GPC nói chung và GPCS nói riêng cũng có đặc tính chịu nén tốt giống BTXM. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, lựa chọn cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép là hàm mục tiêu để thiết kế thành phần của hỗn hợp. Tuy nhiên khác với bê tông thông thường, bê tông sử dụng trong tầng mặt của kết cấu áo đường cứng làm việc ở trạng thái chịu kéo khi uốn. Vì vậy, cường độ chịu kéo uốn cũng được lựa chọn là một trong các thông số để đánh giá chất lượng của bê tông gepolymer tro bay cốt liệu xỉ thép và được xác định thông qua tương quan giữa cường độ nén và kéo uốn.

2.2.4.2. Xác định yếu tố ảnh hưởng đến cường độ GPC

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến cường độ của bê tông geopolymer tro bay gồm loại và nồng độ của dung dịch kiềm, tỷ lệ khối lượng dung dịch silicat/dung dịch kiềm, tỷ lệ khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt/ tro bay, lượng nước hoặc siêu dẻo thêm vào và nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng [18], [91], [66], [55], [56], [12]... Trong đó, các yếu tố ảnh hưởng chính đến cường độ nén là nồng độ mol của dung dịch kiềm NaOH; tỷ lệ khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt/tro bay (AAS/FA) và tỉ lệ khối lượng dung dịch Na_2SiO_3 và dung dịch NaOH (SS/SH), nhiệt độ bảo dưỡng được nghiên cứu nhiều nhất. Mặc dù, các nghiên cứu chỉ ra kết cấu geopolymer cho cường độ nén cao hơn khi được bảo dưỡng ở nhiệt độ cao (thường là 60-90°C). Mặt khác, ở điều kiện không bảo dưỡng nhiệt, bê tông geopolymer tro bay cũng phát

triển cường độ theo thời gian tương tự như BTXM [45]. Hơn nữa, phạm vi nghiên cứu luận án chỉ tập trung nghiên cứu ứng dụng bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép vào kết cấu mặt đường tại Việt Nam với công nghệ thi công tại chỗ không cần bảo dưỡng nhiệt, nên không xét tới điều kiện nhiệt độ bảo dưỡng. Từ đó, trong nghiên cứu, lựa chọn ba yếu tố ảnh hưởng chính đến cường độ nén là nồng độ mol của dung dịch kiềm NaOH (biến X_1); tỷ lệ khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt/tro bay (AAS/FA) (biến X_2) và tỉ lệ khối lượng dung dịch Na_2SiO_3 và dung dịch NaOH (SS/SH) (biến X_3).

Bất kỳ dung dịch kiềm mạnh nào cũng có thể được sử dụng để làm chất kích hoạt cho việc tạo ra geopolymer. Trong đó, các dung dịch kiềm kích hoạt thường được sử dụng phổ biến nhất là NaOH hoặc KOH kết hợp với Na_2SiO_3 hoặc K_2SiO_3. Trong nghiên cứu, lựa chọn sử dụng dung dịch NaOH kết hợp với Na_2SiO_3 do được nghiên cứu phổ biến hơn và giá thành rẻ hơn. Các nghiên cứu trên GPC cốt liệu tự nhiên đều cho thấy tăng nồng độ mol của dung dịch kiềm sẽ tạo ra sự hòa tan lớn hơn của nguyên liệu [50]. Kết quả là cường độ nén của geopolymer sẽ tăng lên cùng với việc tăng nồng độ mol của dung dịch kiềm. Fernández-Jimenez kết luận rằng sử dụng NaOH 12.5M mang lại cường độ nén cao hơn khi sử dụng NaOH 8M [60]. Tuy nhiên, nồng độ kiềm cao quá cũng được gợi ý là làm giảm cường độ của geopolymer. Palomo đã kết luận rằng hồ geopolymer được tạo ra bởi KOH 12M có kết quả kích hoạt nhanh hơn và cường độ nén cao hơn so với hồ geopolymer được tạo ra bởi KOH 18M [85]. Lý do cho ứng xử này vẫn chưa được làm rõ. Do cường độ chịu nén thiết kế là 25, 30, 35 MPa, và cốt liệu xỉ thép có cường độ nén cao hơn cốt liệu thông thường nên các nồng độ mol của dung dịch NaOH 10M, 12M, 14M được lựa chọn.

Mặt khác, tỉ lệ khối lượng dung dịch Na_2SiO_3 và dung dịch NaOH (SS/SH) cũng quyết định các tính chất của dung dịch kiềm kích hoạt. Nghiên cứu của Rangan trên cốt liệu thông thường cho thấy tỷ lệ này tốt nhất là 2.5. Khi tỷ lệ này tăng lên thì cũng không tăng đáng kể cường độ nén [65]. Do đó, tỷ lệ này thường được sử dụng trong khá nhiều nghiên cứu. Tuy nhiên, do có những sự khác biệt về thành phần hóa học, tính chất cơ học giữa xỉ thép và cốt liệu tự nhiên, nên các tỉ lệ 2, 2.5 và 3 được lựa chọn trong phạm vi nghiên cứu của luận án.

Bên cạnh đó, tỷ lệ khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt/tro bay (AAS/FA) cũng ảnh hưởng đáng kể đến cường độ của geopolymer. Xie và Xi đã nghiên cứu các thuộc tính của kiềm kích hoạt tro bay, cho rằng cường độ cao hơn có thể đạt được bằng cách tăng tỉ lệ của tổng lượng dung dịch kích hoạt với tro bay [105]. Theo đó, khi tỷ lệ AAS/FA tăng thì cường độ chịu nén giảm. Rangan đề xuất nên lựa chọn tỷ lệ khối lượng AAS/FA nằm trong khoảng 0.30-0.45 như Bảng 2.15.

Bảng 2.15. Kết quả thí nghiệm xác định ảnh hưởng của tỷ lệ AAS/FA

Tỷ lệ khối lượng AAS/FA	Tính công tác	Cường độ thiết kế (MPa)
0.30	Cứng	58
0.35	Vừa phải	45
0.40	Vừa phải	37
0.45	Cao	32

Vì nghiên cứu sử dụng xỉ thép làm cốt liệu có cường độ chịu nén, và khả năng hấp thụ nước nhiều hơn cốt liệu thông thường (do có nhiều lỗ rỗng) nên trong nghiên cứu sử dụng tỉ lệ (AAS/FA) là 0.4, 0.45 và 0.5.

Dựa vào cấp phối bê tông geopolymer đã được nghiên cứu trong và ngoài nước, tác giả chọn giá trị biến thiên của 3 yếu tố ảnh hưởng, như Bảng 2.16.

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

Để xác định X_1; X_2; X_3 thì theo phương pháp của B. V. Rangan năm 2008 [91] và tiêu chuẩn AP-T318-16 [45] thì cần phải sử dụng hệ thống các bảng tra và toán đồ với độ tin cậy cao, xây dựng căn cứ trên cơ sở dữ liệu số lượng mẫu đủ lớn. Trong phạm vi của Luận án chưa thể xây dựng được hệ thống các bảng tra và toán đồ đó nên đã sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm dạng tâm xoay mặt không gian để tìm tương quan mối quan hệ giữa cường độ chịu nén (hàm mục tiêu) với các biến yếu tố ảnh hưởng. Trên cơ sở đó tối ưu hóa và tìm được giá trị X_1; X_2; X_3. Việc áp dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để tìm phương trình hồi quy tương quan giữa hàm mục tiêu và các yếu tố ảnh hưởng trong thiết kế thành phần bê tông geopolymer tro bay sử dụng 100% cốt liệu xỉ thép là một trong những điểm mới và đóng góp của luận án.

2.2.4.3. Xác định lượng cốt liệu thô và cốt liệu mịn

Áp dụng công thức kinh nghiệm theo phương pháp tính toán và thiết kế thành phần bê tông geopolymer (GPC) của Rangan năm 2008 [91] để tính hàm lượng cốt liệu lớn và nhỏ có trong cốt liệu xỉ thép, như sau:

$m_{GPC}=m_{cốt\ liệu}+m_{tro\ bay}+m_{dung\ dịch\ Gel}$ (tính cho 1m^3 bêtông GPC ở trạng thái tự nhiên)

Khối lượng cho một đơn vị thể tích của GPC sử dụng cốt liệu tự nhiên cũng tương tự như bêtông xi măng từ 2200 - 2500 kg/m^3 [91], [88]. Theo kết quả nghiên cứu ở mục 2.1 cốt liệu xỉ thép có tỷ trọng nặng hơn so với đá dăm khoảng 25 ÷ 27% nên khối lượng trên một vị thể tích ở trạng thái tự nhiên của bêtông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép được chọn là 3100 kg/m^3. Kết quả xác định khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép đã được kiểm chứng và trình bày trong mục 2.2.9.

Mặt khác, theo các nghiên cứu về thiết kế thành phần của các tác giả trên thế giới, cốt liệu thô và cốt liệu mịn chiếm khoảng 75÷80% khối lượng của bêtông geopolymer ở trạng thái tự nhiên [81], [66], [89]. Vì vậy, khối lượng cốt liệu thô và mịn được chọn là 77% khối lượng của bê tông GPCS.

Khối lượng cốt liệu thô và cốt liệu mịn trong 1m^3 bê tông là: 0.77×3100 = 2387 (kg).

Theo Hardjito và Rangan [90], cốt liệu mịn chiếm 30% tổng khối lượng của cốt liệu. Như vậy, khối lượng cốt liệu nhỏ dùng cho 1m^3 GPCS là: 0.3 × 2387 = 716.10 (kg). Khối lượng cốt liệu lớn dùng cho 1m^3 GPCS là: 2387 - 716.10 = 1670.90 (kg).

2.2.4.4. Xác định khối lượng của tro bay (FA) và dung dịch kiềm kích hoạt (AAS)

Tổng khối lượng $m_{tro\ bay} + m_{AAS}$ = 3100 - 2387 = 713 (kg).

Ta có:

$$\frac{m_{AAS}}{m_{Trobay}} = X_2 \rightarrow m_{AAS} = X_2 * m_{Trobay}$$

$$m_{Trobay} * (1 + X_2) = 713 \rightarrow m_{Trobay} = \frac{713}{(1 + X_2)} \rightarrow m_{AAS} = 713 - \frac{713}{(1 + X_2)}$$

2.2.4.5. Xác định khối lượng chất rắn NaOH, nước và dung dịch thủy tinh lỏng Na_2SiO_3

NaOH thương mại ở dạng vảy khô có độ tinh khiết 98.5%. Chất rắn này sẽ được hòa tan vào nước để được dung dịch với nồng độ cần thiết. Khối lượng NaOH ở dạng rắn cần để pha V ml dung dịch có nồng độ X_1 là:

$$m_{NaOH} = \frac{X_1.M.V.100}{1000.p} \quad (2.2)$$

Trong đó:

m_{NaOH}: Khối lượng chất rắn;

X_1: là nồng độ dung dịch cần pha mol/l (C_M);

M: Khối lượng phân tử của NaOH;

V: Thể tích dung dịch cần pha (ml);

p: Độ tinh khiết của hóa chất.

Giả sử khối lượng riêng của NaOH là ρ_a^{NaOH} thì thể tích chất rắn NaOH là: $V_{NaOH}^a = \frac{m_{NaOH}}{\rho_{NaOH}^a}$

Xét cho pha V= 1000 ml (1 lít) dung dịch NaOH, thì thể tích nước cần pha

$V_{H_2O} = 1000 - V_{NaOH}^a = m_{H_2O}$

Nồng độ % của dung dịch NaOH $C_{NaOH}^{\%} = \frac{m_{NaOH} * 100}{m_{NaOH} + m_{H_2O}}$

Với tỉ lệ dung dịch thủy tinh lỏng Na_2SiO_3 và dung dịch kiềm NaOH (SS/SH) là X_3 và tổng khối lượng dung dịch kiềm kích hoạt AAS cần sử dụng là m_{AAS}

$$\frac{m_{dd}Na_2SiO_3}{m_{dd}NaOH} = X_3$$

Khối lượng chất rắn NaOH và nước thực tế cần pha là:

$$m_{AAS} = m_{dd}Na_2SiO_3 + m_{dd}NaOH = X_3 * m_{dd}NaOH + m_{dd}NaOH = (X_3 + 1) * m_{dd}NaOH$$

$$m_{dd}NaOH = \frac{m_{AAS}}{(X_3 + 1)}$$

$$m_{NaOH} = C_{NaOH}^{\%} * m_{dd}NaOH = C_{NaOH}^{\%} \frac{m_{AAS}}{(X_3 + 1)}$$

$$m_{H_2O} = m_{dd}NaOH - m_{NaOH} = \frac{m_{AAS}}{(X_3 + 1)} - C_{NaOH}^{\%} \frac{m_{AAS}}{(X_3 + 1)} = \frac{m_{AAS}}{(X_3 + 1)}(1 - C_{NaOH}^{\%})$$

Khối lượng dung dịch Na_2SiO_3 thực tế là:

$$m_{dd}Na_2SiO_3 = \frac{m_{AAS}}{(X_3 + 1)} * X_3$$

Bảng 2.17. Bảng tổng hợp khối lượng vật liệu thành phần cho 1m^3 GPCS

X_2	$m_{tro\ bay}$ (kg)	m_{AAS} (kg)	X_3	$m_{dd}Na_2SiO_3$ (kg)	$m_{dd}NaOH$ (kg)	X_1	$C^{\%}_{NaOH}$	m_{NaOH} (kg)	m_{H_2O} (kg)
0.4	509.29	203.71	2	135.81	67.90	10	33.63	22.83	45.07
0.45	491.72	221.28	2.5	158.05	63.22	12	38.98	24.64	38.58
0.5	475.33	237.67	3	178.25	59.42	14	43.98	26.13	33.29
Khối lượng cốt liệu lớn m_{CLL} = 1670.90 (kg) Khối lượng cốt liệu nhỏ m_{CLN} = 716.10 (kg)									

2.2.5. Lập kế hoạch thí nghiệm bề mặt chỉ tiêu

Khi cần mô tả chính xác quan hệ giữa hàm mục tiêu và các thông số thí nghiệm (các biến) thì cần tiến hành lập kế hoạch thí nghiệm bề mặt chỉ tiêu (Response Surface Design) với hàm mục tiêu là cường độ chịu nén của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép.

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

Trong đó:

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)

Xây dựng kế hoạch thí nghiệm bề mặt chỉ tiêu (Response Surface Design) nhằm mục đích xây dựng hàm mô tả quan hệ giữa hàm mục tiêu và các thông số thí nghiệm. Sử dụng dạng thiết kế quy hoạch thực nghiệm bậc II hỗn hợp tâm xoay - mặt không gian, 3 biến (Face-centered Design) với khoảng cách trong thí nghiệm chọn là α =1, dạng của phương trình hồi quy.

$$y = a_1 + a_2X_1 + a_3X_2 + a_4X_3 + a_5X_1X_2 + a_6X_1X_3 + a_7X_2X_3 + a_8X_1^2 + a_9X_2^2 + a_9X_3^2 \quad (2.4)$$

Trình tự thực hiện như sau:

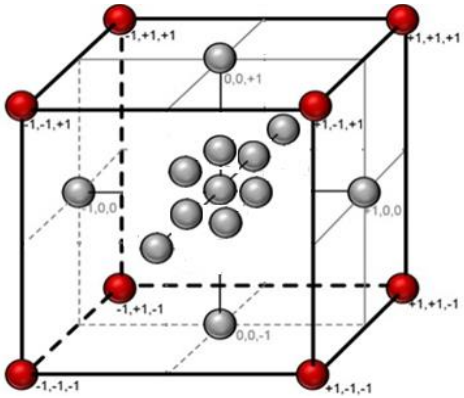
Tìm các hệ số a_i với i= (1 đến 10) của phương trình hồi quy.

Đánh giá sự có nghĩa của các hệ số của phương trình hồi quy theo tiêu chuẩn Student.

Kiểm tra tính tương hợp của mô hình theo tiêu chuẩn Fisher. Để đánh giá sự phù hợp của mô hình hồi quy có phù hợp với thực nghiệm và sự phù hợp đó có ý nghĩa thống kê hay không, dùng phân phối Fisher với mức ý nghĩa là 0.05.

Trong luận án, để thuận lợi và nhanh chóng cho việc kiểm định phân phối chuẩn và phương sai tất cả các kết quả thí nghiệm tác giả tiến hành tiến lập kế hoạch thực nghiệm bằng phần mềm Minitab.

Kế hoạch và sơ đồ thí nghiệm thể hiện trên Hình 2.21 và Bảng 2.18



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

Bảng 2.18. Bảng mã hóa các biến số và các điểm quy hoạch thực nghiệm

Các yếu tố ảnh hưởng	Biến mã hóa	Các điểm quy hoạch bậc hai			Mức quy hoạch (σ)
		-1	0	1	
Nồng độ mol (M) của dung dịch NaOH	X_1	10	12	14	2.0
Tỷ lệ AAS/FA	X_2	0.4	0.45	0.5	0.05
Tỉ lệ SH/SS	X_3	2	2.5	3	0.5

Luận án thực hiện số điểm thí nghiệm $N=2^k+2k+n_o=20$ (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 2.22. Chế tạo mẫu cho thí nghiệm tâm xoay-mặt

Bảng 2.19. Kết quả thí nghiệm theo kế hoạch hỗn hợp tâm xoay-mặt

STT	Biến số thực			Kết quả thí nghiệm nén													Trung bình
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	$T_{(6)}$	$\overline{Y}$
1	10	0.40	2.0	40.17	39.55	39.84	38.57	38.71	38.84	1.341	0.407	0.844	1.070	0.859	0.663	1.8225	39.28
2	14	0.40	2.0	49.43	50.82	56.48	50.28	50.74	52.63	0.901	0.357	1.861	0.568	0.388	0.353		50.78
3	10	0.50	2.0	29.73	30.95	18.92	31.28	31.74	30.9	0.164	0.411	2.023	0.477	0.570	0.400		30.92
4	14	0.50	2.0	43.17	44.74	42.62	42.39	41.62	42.98	0.240	1.745	0.288	0.508	1.246	0.058		42.92
5	10	0.40	3.0	37.73	36.84	36.76	36.75	38.39	36.19	0.776	0.338	0.438	0.450	1.601	1.151		37.11
6	14	0.40	3.0	48.59	46.17	46.66	48.73	46.37	48.2	0.966	1.090	0.674	1.084	0.920	0.634		47.45
7	10	0.50	3.0	25.48	27.02	26.97	27.73	26.37	26.75	1.647	0.399	0.332	1.342	0.465	0.040		26.72
8	14	0.50	3.0	36.28	37.06	36.51	37.53	37.63	38.97	1.087	0.279	0.849	0.207	0.311	1.697		37.33
9	10	0.45	2.5	39.53	38.39	38.69	40.28	38.74	39.09	0.595	1.059	0.624	1.682	0.551	0.044		39.12
10	14	0.45	2.5	49.39	50.84	74.12	49.74	51.37	49.26	0.481	0.334	2.034	0.445	0.280	0.494		50.12
11	12	0.40	2.5	46.28	48.39	46.79	46.58	47.53	46.19	0.802	1.686	0.200	0.448	0.672	0.908		46.96
12	12	0.50	2.5	37.17	38.37	37.62	38.52	38.26	39.56	1.316	0.146	0.768	0.329	0.012	1.596		38.25
13	12	0.45	2.0	40.37	39.73	39.51	39.27	40.6	42.26	0.073	0.514	0.715	0.935	0.284	1.807		40.29
14	12	0.45	3.0	35.33	36.62	35.84	36.15	35.93	36.79	1.455	0.951	0.504	0.075	0.336	1.268		36.11
15	12	0.45	2.5	42.47	43.06	44.28	42.88	43.89	44.11	1.318	0.523	1.120	0.766	0.595	0.891		43.45
16	12	0.45	2.5	44.52	44.03	42.28	44.25	43.36	42.88	1.115	0.550	1.469	0.803	0.223	0.777		43.55
17	12	0.45	2.5	43.28	42.62	44.21	43.42	42.87	44.56	0.282	1.156	0.949	0.097	0.825	1.412		43.49
18	12	0.45	2.5	42.12	43.22	44.35	42.89	43.55	42.19	1.100	0.196	1.528	0.193	0.585	1.018		43.05
19	12	0.45	2.5	43.52	42.35	44.51	42.97	43.31	45.12	0.108	1.257	0.864	0.648	0.314	1.463		43.63
20	12	0.45	2.5	42.26	44.26	43.47	43.67	43.28	44.88	1.542	0.698	0.187	0.037	0.399	1.393		43.64

2.2.6. Phân tích kết quả thí nghiệm

2.2.6.1. Trình tự phân tích

Để phân tích các kết quả thí nghiệm theo trình tự các bước như sau:

Bước 1: Loại bỏ sai số thô (giá trị ngoại lai) theo ASTM E178

Bước 2: Phân tích hồi quy

Bước 3: Đánh giá sự phù hợp của phương trình hồi quy

Bước 4: Tối ưu hóa đơn mục tiêu

2.2.6.2. Phân tích hồi quy và đánh giá sự phù hợp của mô hình

Các kết quả được loại bỏ sai số theo ASTM E178 [33] được thể hiện ở Bảng 2.19. Sau đó các kết quả thí nghiệm nén được phân tích cho thiết kế hỗn hợp tâm xoay-mặt không gian được tiến hành thông qua việc sử dụng phần mềm thống kê Minitab-17, thu được Bảng 2.20 và Bảng 2.21 thông tin mô hình hồi quy như sau:

Bảng 2.20. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm nén

Số hạng	Ảnh hưởng	Hệ số	Hệ số SE	T-Value	P-Value	VIF
Hằng số		43.385	0.119	365.84	0.000	
X1	11.091	5.545	0.109	50.83	0.000	1.00
X2	-9.089	-4.544	0.109	-41.66	0.000	1.00
X3	-3.893	-1.947	0.109	-17.84	0.000	1.00
X1*X1	2.722	1.361	0.208	6.54	0.000	1.82
X2*X2	-1.308	-0.654	0.208	-3.14	0.002	1.82
X3*X3	-10.118	-5.059	0.208	-24.32	0.000	1.82
X1*X2	0.192	0.096	0.122	0.79	0.434	1.00
X1*X3	-0.637	-0.318	0.122	-2.61	0.010	1.00
X2*X3	-1.073	-0.537	0.122	-4.40	0.000	1.00

Bảng 2.21. Phân tích phương sai ANOVA cho mô hình hồi quy đã xây dựng

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	9	4006.10	445.12	623.40	0.000
Tuyến tính	3	3311.47	1103.82	1545.93	0.000
X1	1	1845.04	1845.04	2584.02	0.000
X2	1	1239.06	1239.06	1735.32	0.000
X3	1	227.37	227.37	318.44	0.000
Bình phương	3	675.50	225.17	315.35	0.000
X1*X1	1	30.56	30.56	42.79	0.000
X2*X2	1	7.06	7.06	9.89	0.002
X3*X3	1	422.32	422.32	591.47	0.000
Tương tác 2 chiều	3	19.13	6.38	8.93	0.000
X1*X2	1	0.44	0.44	0.62	0.434
X1*X3	1	4.86	4.86	6.81	0.010
X2*X3	1	13.82	13.82	19.36	0.000

Từ kết quả phân tích bằng Minitab thể hiện ở Bảng 2.20 thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm nén và Bảng 2.21 kết quả phân tích Anova cho mô hình đã xây dựng cho thấy cả hai bảng đều cho thấy hệ số của số hạng X_1*X_2 có giá trị xác suất $P=0.434>\alpha = 0.05$. Điều này có nghĩa là giả thuyết H_1 là đúng và số hạng

X_1*X_2 không có ý nghĩa trong phương trình hồi quy. Sau khi loại bỏ số hạng đó và sử dụng Mintab 18 phân tích lại kết quả thí nghiệm nén được thể hiện ở Bảng 2.22 và Bảng 2.23.

Bảng 2.22. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm nén sau khi đã bỏ số hạng không có nghĩa thống kê

Số hạng	Ảnh hưởng	Hệ số	Hệ số SE	T-Value	P-Value	VIF
Hằng số		43.385	0.118	366.47	0.000	
X1	11.091	5.545	0.109	50.92	0.000	1.00
X2	-9.089	-4.544	0.109	-41.73	0.000	1.00
X3	-3.893	-1.947	0.109	-17.88	0.000	1.00
X1*X1	2.722	1.361	0.208	6.55	0.000	1.82
X2*X2	-1.308	-0.654	0.208	-3.15	0.002	1.82
X3*X3	-10.118	-5.059	0.208	-24.36	0.000	1.82
X1*X3	-0.637	-0.318	0.122	-2.61	0.010	1.00
X2*X3	-1.073	-0.537	0.122	-4.41	0.000	1.00

Tổng quan mô hình:

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.843540	98.07%	97.93%	97.73%

Phương trình hồi quy mã hóa:

$$Rn = -103.4 - 4.60\ X1 + 198.3\ X2 + 110.77\ X3 + 0.3402\ X1*X1 - 261.7\ X2*X2 - 20.237\ X3*X3 - 0.318\ X1*X3 - 21.47\ X2*X3 \quad (2.5)$$

Bảng 2.22 cho thấy tất cả các hệ số trong phương trình hồi quy sau khi loại bỏ số hạng không có ý nghĩa các hệ số còn lại đều có giá trị xác suất P nhỏ hơn với mức ý nghĩa $\alpha = 0.05$. Do đó, các hệ số của mô hình hồi quy bậc hai hoàn toàn có ý nghĩa thống kê. Đánh giá ý nghĩa của phương trình hồi quy bằng phân tích phương sai ANOVA như trong Bảng 2.23.

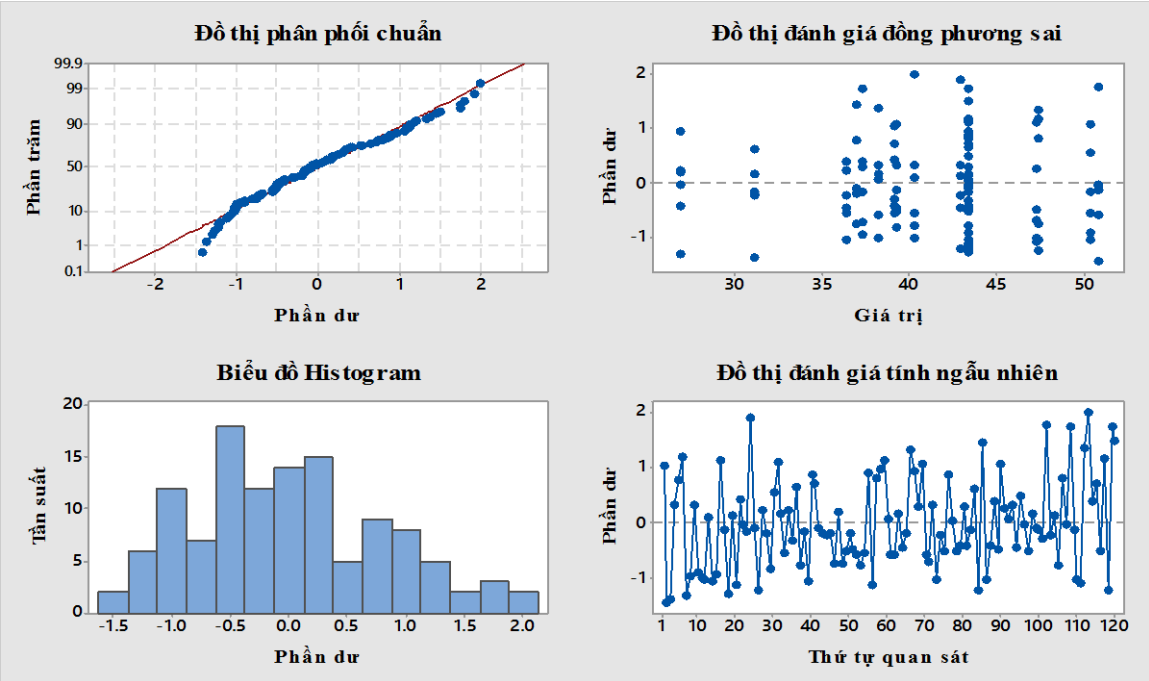
Bảng 2.23. Phân tích phương sai ANOVA cho mô hình hồi quy sau khi đã bỏ số hạng không có nghĩa thống kê

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	8	4005.66	500.71	703.68	0.000
Tuyến tính	3	3311.47	1103.82	1551.27	0.000
X1	1	1845.04	1845.04	2592.96	0.000
X2	1	1239.06	1239.06	1741.33	0.000
X3	1	227.37	227.37	319.54	0.000
Bình phương	3	675.50	225.17	316.44	0.000
X1*X1	1	30.56	30.56	42.94	0.000
X2*X2	1	7.06	7.06	9.92	0.002
X3*X3	1	422.32	422.32	593.51	0.000
Tương tác 2 chiều	2	18.69	9.34	13.13	0.000
X1*X3	1	4.86	4.86	6.84	0.010
X2*X3	1	13.82	13.82	19.43	0.000
Sai số	111	78.98	0.71		
Lack-of-Fit	6	2.23	0.37	0.51	0.800
Sai số thuần	105	76.75	0.73		
Tổng	119	4084.64			

Bảng 2.23 đánh giá mức độ phù hợp của mô hình hồi quy sau khi đã loại bỏ hệ số không có ý nghĩa, thấy rằng độ vênh (Lack of fit) có giá trị P = 0.800 lớn hơn nhiều so với mức ý nghĩa α = 0,05. Điều này có nghĩa là dạng mô hình phù hợp và khớp với dữ liệu thực nghiệm thu được. Xem xét các thành phần riêng rẽ của mô hình hồi quy (tuyến tính, bình phương và tương tác), ta thấy giá trị P của các thành phần này đều nhỏ hơn mức ý nghĩa, điều đó cho thấy rằng sự có mặt của các số hạng còn lại là có ý nghĩa trong mô hình hồi quy.

Phương trình hồi quy với các biến thực như sau:

$$R_n = -103.4 - 4.6\text{NaOH} + 198.3\frac{\text{AAS}}{FA} + 110.77\frac{SS}{SH} + 0.3402(\text{NaOH})^2 - 261.7(\frac{\text{AAS}}{FA})^2 - 20.237(\frac{SS}{SH})^2 - 0.318\,\text{NaOH}\frac{SS}{SH} - 21.47\frac{\text{AAS}}{FA}\frac{SS}{SH} \quad (2.6)$$



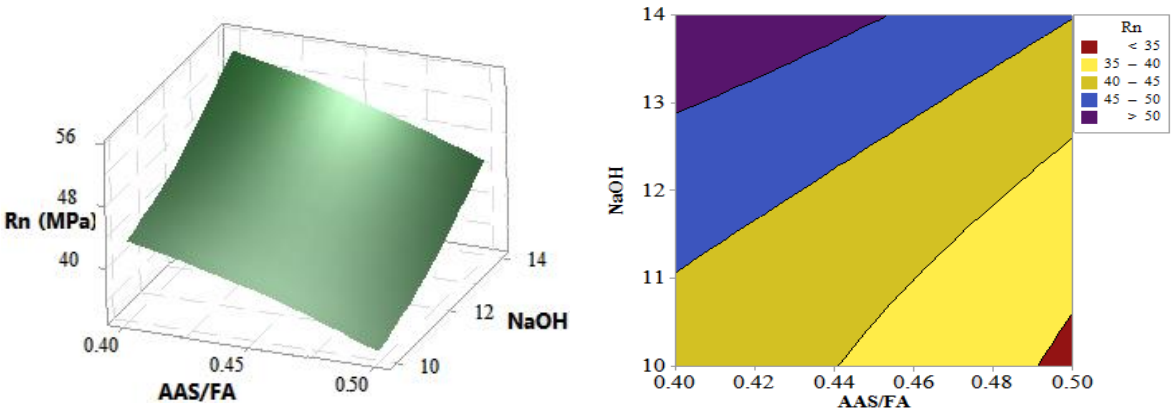
Hình 2.23. Đồ thị đánh giá số dư

Đồ thị Phân phối chuẩn so sánh xác suất phân bố các số dư (hiển thị bằng các điểm) so với phân phối chuẩn (hiển thị bằng đường thẳng nét liền). Đồ thị cho thấy các số dư phân bố rất gần so với phân phối chuẩn. Đồ thị biểu thị quan hệ giữa các số dư và giá trị tương ứng của mô hình hồi quy. Các điểm phân bố ngẫu nhiên không có quy luật nào chứng tỏ dữ liệu Y không bị ảnh hưởng của các yếu tố nào khác ngoài biến X_1, X_2, X_3.

Đồ thị đánh giá tính ngẫu nhiên biểu diễn quan hệ giữa các số dư và thứ tự các điểm dữ liệu. Hai đồ thị đánh giá đồng phương sai và đánh giá ngẫu nhiên cho thấy dữ liệu phân bố ngẫu nhiên quanh đường 0.0 và không theo quy luật nào. Từ phương trình hồi quy bằng phần mềm Minitab trong vùng biến số khảo sát xác định được mối quan hệ các biến được thể hiện trên các từ Hình 2.24 đến Hình 2.26.

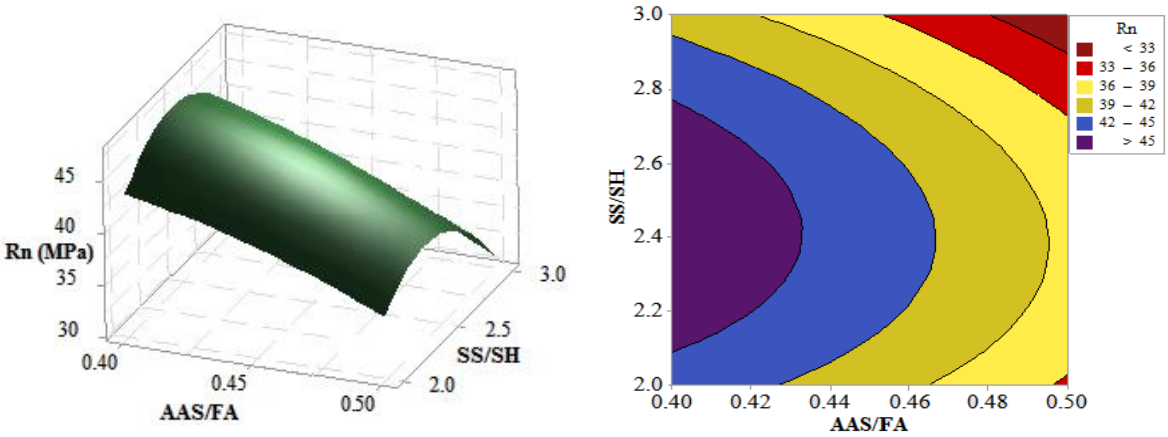
2.2.6.3. Đồ thị bề mặt chỉ tiêu

Đồ thị bề mặt chỉ tiêu và đường mức được thể hiện ở Hình 2.24 cho thấy sự ảnh hưởng khá rõ rệt của hai biến số nồng độ của dung dịch NaOH; tỷ lệ giữa dung dịch kiềm kích hoạt và tro bay (AAS/FA) đến hàm mục tiêu là cường độ chịu nén R_n. Nồng độ của dung dịch NaOH tăng thì cường độ chịu nén tăng còn tỉ lệ AAS/FA tăng thì cường độ chịu nén giảm.



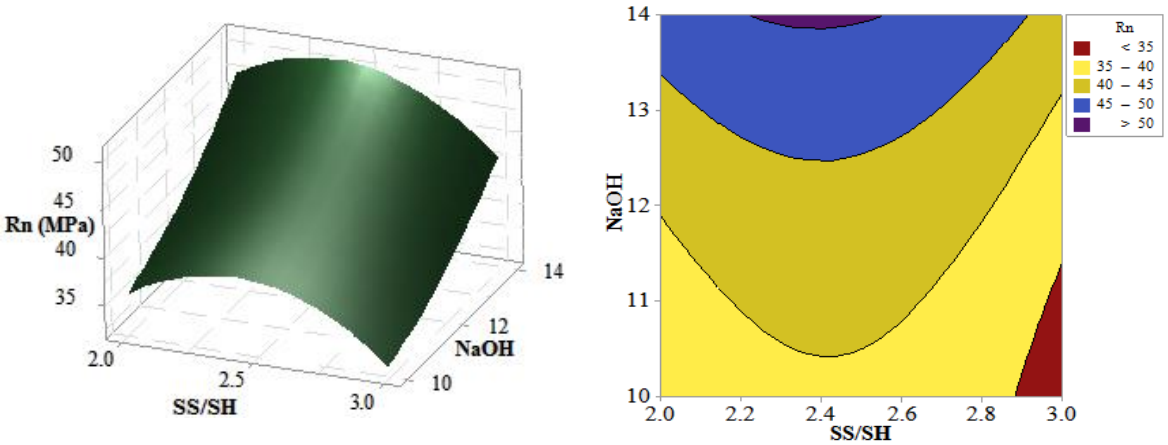
Hình 2.24. Đồ thị bề mặt và đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của nồng độ dung dịch NaOH và tỉ lệ AAS/FA tới cường độ chịu nén R_n với SS/SH=2.5

Đồ thị bề mặt chỉ tiêu và đường mức được thể hiện ở Hình 2.25 cho thấy sự ảnh hưởng của hai biến số tỷ lệ giữa dung dịch kiềm kích hoạt và tro bay (AAS/FA); tỉ lệ theo khối lượng giữa dung dịch thủy tinh lỏng Na_2SiO_3 và dung dịch kiềm NaOH (SS/SH) đến hàm mục tiêu là cường độ chịu nén R_n. Qua đồ thị cho thấy cường độ nén của GPCS phụ thuộc bậc 2 vào tỉ lệ SS/SH và với tỷ lệ SS/SH = 2.5 thì hàm mục tiêu R_n đạt cực trị. Khi tỷ lệ SS/SH tăng lên thì cường độ chịu nén giảm đi đáng kể. Vì trong các vật liệu chế tạo bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép khi tính cùng một đơn vị khối lượng thì NaOH là vật liệu đắt nhất nên tỉ lệ SS/SH là thông số rất quan trọng vì nó quyết định cho kết quả tối ưu nhất cả về cường độ nén và giá thành của sản phẩm.



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

Đồ thị bề mặt chỉ tiêu và đường mức được thể hiện ở Hình 2.26 cho thấy sự ảnh hưởng của hai biến nồng độ dung dịch kiềm NaOH và tỉ lệ theo khối lượng giữa dung dịch thủy tinh lỏng Na_2SiO_3 và dung dịch kiềm NaOH (SS/SH) đến hàm mục tiêu là cường độ chịu nén R_n. Qua biểu đồ ta thấy khi cùng một tỉ lệ AAS/FA=0.45 thì nồng độ dung dịch NaOH tăng thì cường độ nén tăng, đường đồng mức thay đổi khá rõ rệt và hàm mục tiêu đạt cực trị tại SS/SH=2.5.



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 hàm mục tiêu R_n với AAS/FA=0.45

2.2.7. Xác định thành phần cấp phối cho bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

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

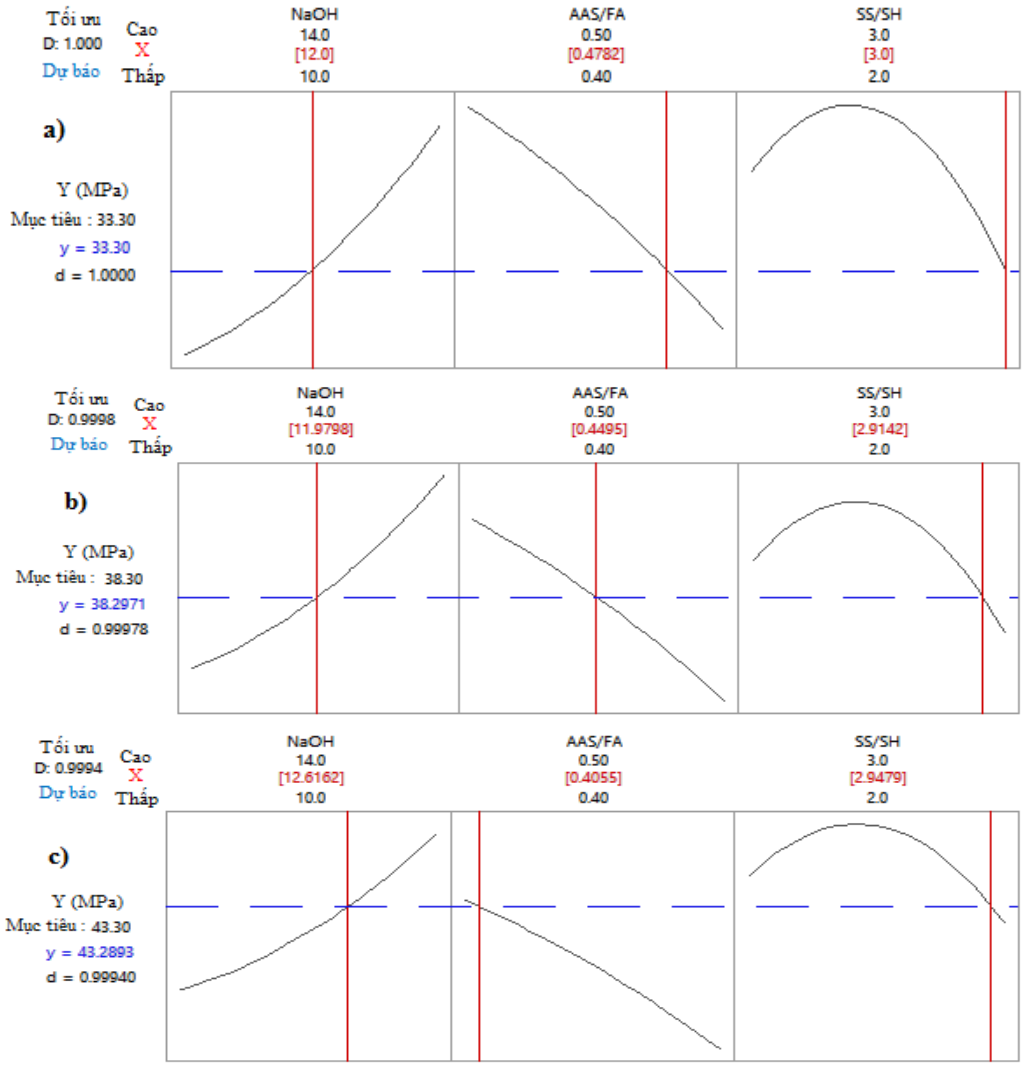
$$R_n = -103.4 - 4.6\text{NaOH} + 198.3\frac{AAS}{FA} + 110.77\frac{SS}{SH} + 0.3402(\text{NaOH})^2 - 261.7(\frac{AAS}{FA})^2 - 20.237(\frac{SS}{SH})^2 - 0.318\,\text{NaOH}\frac{SS}{SH} - 21.47\frac{AAS}{FA}\frac{SS}{SH} \quad (2.7)$$

Do chưa có dữ liệu về độ lệch chuẩn tương ứng, cho nên để xây dựng bảng thành phần cấp phối cho bê tông geopolymer tro bay có các cường độ đặc trưng mong muốn $f_c^{'} = 25, 30, 35\,MPa$, ta xác định thành phần GPCS sao cho đạt được giá trị cường độ yêu cầu $f_{cr}^{'}$ theo quy định trong tiêu chuẩn ACI 318-11[35] như sau:

Bảng 2.24. Quy định về cường độ nén trung bình yêu cầu theo ACI 318-11 [35]

Cường độ nén đặc trưng của mẫu thử (MPa)	Cường độ trung bình yêu cầu (MPa)
$f_c^{'} < 21$	$f_{cr}^{'} = f_c^{'} + 7$
$21 \le f_c^{'} \le 35$	$f_{cr}^{'} = f_c^{'} + 8.3$
$f_c^{'} > 35$	$f_{cr}^{'} = 1.10 f_c^{'} + 5.0$

Kết quả hồi quy xác định giá trị của hai biến X_1; X_2 và X_3 cho các cường độ nén yêu cầu tương ứng $f_{cr}^{'} = 33.3MPa$; $f_{cr}^{'} = 38.3\,MPa$; $f_{cr}^{'} = 43.3MPa$ như sau:



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

Từ kết quả hồi quy như trên ta đưa ra lựa chọn ba biến X_1, X_2 và X_3 cho các cấp cường độ GPCS như sau:

Bảng 2.25. Giá trị ba biến ứng với cường độ GPCS yêu cầu

Hỗn hợp	Cường độ nén đặc trưng $f_c^{'}$(MPa)	Cường độ trung bình yêu cầu $f_{cr}^{'}$ (MPa)	Giá trị của biến thực		
			NaOH	AAS/FA	SS/SH
GPCS 25	25	33.3	12	0.48	3.00
GPCS 30	30	38.3	11.97	0.45	2.91
GPCS 35	35	43.3	12.61	0.40	2.95

Thành phần cấp phối tương ứng của các cấp bê tông gepolymer tro bay cốt liệu xỉ thép được trình bày trong Bảng 2.26 như sau:

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
NaOH khan dạng vảy (kg)	22.48	21.98	21.13
Nước (kg)	35.19	34.52	30.99
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

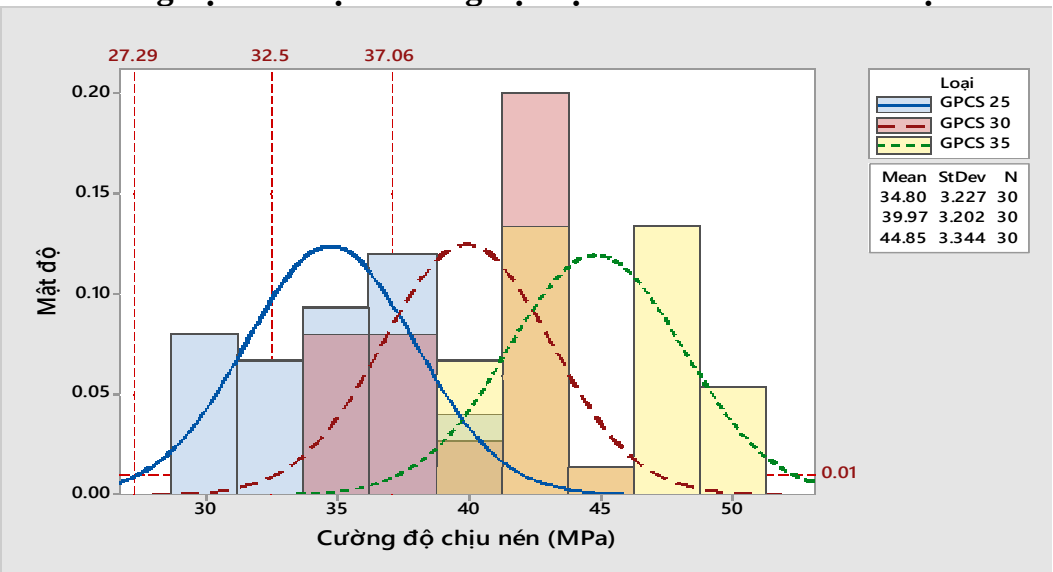
2.2.8. Thí nghiệm kiểm tra cường độ của các hỗn hợp GPCS thiết kế

Căn cứ vào kết quả thiết kế cấp phối bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trên tác giả tiến hành đúc mỗi một cấp phối 30 mẫu hình trụ 15x30 cm cho GPCS 25, GPCS 30 và GPCS 35. Cường độ chịu nén của bê tông GPCS được xác định khi nén vỡ các mẫu hình trụ được dưỡng hộ với các ngày tuổi khác nhau, ở điều kiện tiêu chuẩn (nhiệt độ phòng thí nghiệm t = 22±4°C, độ ẩm w = 60±20%, không ngâm trong nước như BTXM truyền thống), bằng các máy nén thuỷ lực theo ASTM C39 [29] được thể hiện ở Hình 2.28 và Hình 2.29.

Các kết quả thí nghiệm được phân tích để loại bỏ giá trị ngoại lai theo ASTM E178 sau đó phân tích thống kê và đánh giá kết quả đã được tiến hành theo chỉ dẫn của các tài liệu ACI 214.R-02 [44], ACI 318-11 [35] với độ tin cậy 99%. Kết quả xử lý thống kê cường độ nén được tổng hợp trong Bảng 3, Bảng 4, Bảng 5 ở Phụ lục và Hình 2.30.

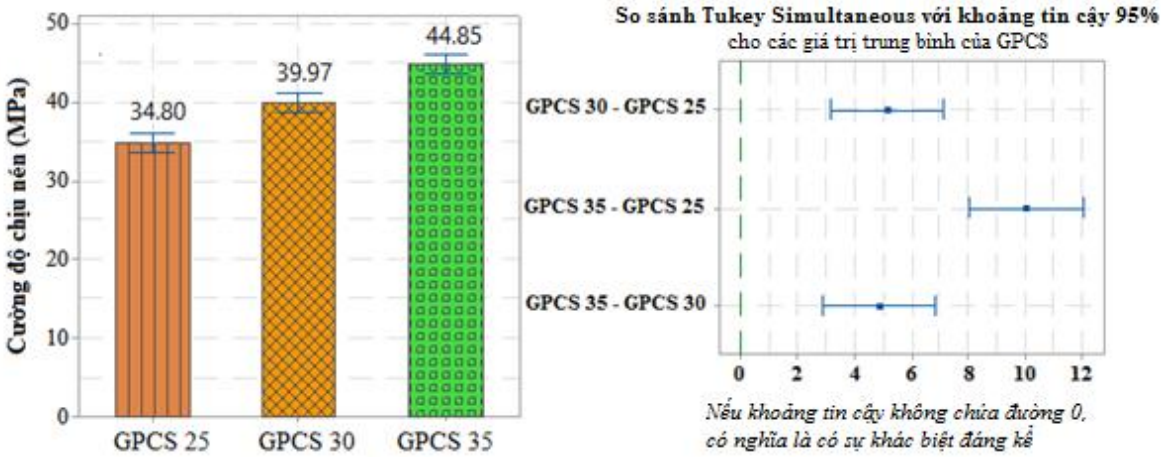
Hình 2.28. Mẫu hình trụ 15x30cm chế tạo từ GPCS

Hình 2.29. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén trên mẫu hình trụ 15x30cm



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

Kết quả cho thấy cường độ đặc trưng của các mẫu thí nghiệm đều lớn hơn giá trị cường độ quy định thiết kế. Độ lệch chuẩn của các thí nghiệm xác định cường độ là nhỏ. Qua biểu đồ phân tích Anova Tukey được thể hiện ở Hình 2.31 cho thấy sự khác biệt đáng kể về cường độ độ chịu nén trung bình của 3 loại bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 hoàn toàn có ý nghĩa về mặt thống kê. Do vậy, có thể khẳng định các cấp phối thiết kế đạt yêu cầu về cường độ đã đề ra.



Hình 2.31. Kết quả kiểm tra cường độ của các hỗn hợp GPCS đã thiết kế

2.2.9. Thí nghiệm kiểm tra khối lượng thể tích của các hỗn hợp GPCS thiết kế

Khối lượng thể tích (γ_0) của hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép là khối lượng của một đơn vị thể tích vật liệu ở trạng thái tự nhiên. Đây là thông số quan trọng để tính độ đặc, độ rỗng cũng như kiểm tra lại khối lượng của hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép đã thiết kế.

Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép được xác định theo TCVN 3108-1993 [6]. Mẫu hỗn hợp bê tông tươi được lấy và chuẩn bị mẫu hỗn hợp theo TCVN 3105-1993. Thể tích hỗn hợp cần lấy khoảng 8 lít khi cỡ hạt lớn nhất của cốt liệu bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép là 19 mm. Dùng thùng dung tích 5 lít để thử hỗn hợp bê tông geopolymer. Xác định khối lượng thùng, đổ và đầm hỗn hợp trong thùng theo TCVN 3105-1993. Sau khi đầm xong, dùng thước lá bằng thép cắt bỏ phần hỗn hợp thừa, gạt mặt hỗn hợp cho bằng với miệng thùng. Lấy giẻ lau sạch hỗn hợp dính bên ngoài rồi xác định khối lượng

của thùng. Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép được tính theo công thức:

$$\gamma_0 = \frac{m_{BT}}{V} = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (2.8)$$

Trong đó:

m_1: Khối lượng thùng chứa hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép (kg);

m_0: Khối lượng của thùng (kg);

V: Thể tích của thùng hoặc khuôn (m^3)

Hình 2.32. Thí nghiệm xác định khối lượng thể tích của hỗn hợp GPCS

Kết quả thí nghiệm xác định khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép được thể hiện ở Bảng 6 ở Phụ lục. Theo Bảng 6 (Phụ lục 1) 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 γ_0 =3100 kg/m^3. Như vậy, từ kết quả thí nghiệm cũng cho thấy khối lượng thể tích của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép nặng hơn 20% so với BTXM truyền thống (γ_0 =2500 kg/m^3). Do vậy, sẽ làm tăng chi phí vận chuyển bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép so với BTXM thông thường. Đây cũng được coi là một nhược điểm của việc sử dụng xỉ thép nói chung và bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép nói riêng. Bởi vậy, khi sử dụng loại bê tông này cần chú ý tính đến cự ly vận chuyển nhằm đảm bảo hiệu quả kinh tế.

2.2.10. Sơ bộ tính toán giá thành của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép và so sánh với BTXM cùng cấp

Để phát triển bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép có ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực vật liệu xây dựng ngoài yếu tố về kỹ thuật, môi trường còn phải xét đến tính kinh tế. Giá thành của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép phụ thuộc vào nhiều yếu tố bao gồm: Giá thành vật liệu đầu vào; chi phí vận chuyển; chi phí bảo dưỡng; chi phí nhân công và máy móc…vv. Trên cơ sở của thành phần vật liệu của các cấp phối bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép đã thiết kế. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, dựa trên đơn giá thực tế của nguồn cung ứng vật liệu đầu vào luận án đã tính toán sơ bộ giá thành của 1 m^3 bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép và có so sánh với giá thành của BTXM có cùng cấp cường độ chịu nén fc'=30 MPa. Chi tiết được thể hiện ở Bảng 2.27.

Bảng 2.27. So sánh giá thành sơ bộ của GPCS 30 và OPC 30

Vật liệu thành phần	Đơn vị	Khối lượng		Đơn giá (VNĐ)	Thành tiền (VNĐ)	
		GPCS 30	OPC 30 [18]		GPCS 30	OPC 30
Xỉ thép (4.75-19) mm	m^3	0.88	-	20,000	17,600	-
Xỉ thép (0.14-4.75) mm	m^3	0.38	-	20,000	7,600	-
Tro bay	kg	491.89	-	150	73,784	-
Thủy tinh lỏng	kg	164.62	-	2,850	469,167	-
Xút vảy	kg	21.98	-	9,300	204,414	-
Nước	lít	34.52	166	5.97	206	991
Cát vàng	m^3	-	0.575	240,000	-	138,000
Đá dăm 1x2	m^3	-	0.724	250,000	-	181,000
Xi măng PC40	kg	-	378.0	1,140	-	430,920
Tổng					**772,771**	**750,911**

Dựa trên kết quả tính toán sơ bộ giá thành 1 m^3 bê tông ở Bảng 2.27, nhận thấy 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. Tuy nhiên, nếu được sự hỗ trợ của nhà nước về các chính sách về thuế áp dụng cho các dự án bảo vệ môi trường, tái sử dụng các vật liệu thải (tro bay, xỉ thép), tận dụng nguồn vật liệu địa phương thì có khả năng giảm được giá thành của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép về ngang bằng hoặc rẻ hơn so với giá thành của BTXM.

2.3. Kết luận Chương 2

Từ các kết quả nghiên cứu trong chương này, một số kết luận sau được rút ra:

Các tính chất cơ lí 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 [3].

So sánh xỉ thép của nhà máy gang thép Thái Nguyên với các kết quả nghiên cứu khác ở trong nước và thế giới thì thành phần hóa học và thành phần khoáng vật có sự khác biệt về thành phần và hàm lượng. Đặc biệt, trong xỉ thép nghiên cứu không chứa Cao và MgO tự do.

Kết quả nghiên cứu hàm lượng kim loại nặng cho thấy, xỉ thép nghiên cứu không chứa các kim loại nặng hoặc chứa các kim loại nặng nhưng đáp ứng tất cả các yêu cầu về môi trường theo QCVN 07:2009/BTNMT [1].

Kết quả nghiên cứu cho thấy độ trương nở thể tích trên cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên sau 7 ngày là rất thấp (0.198%).

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.

Các loại xỉ thép khác nhau có tính chất cơ lý hóa phụ thuộc nhiều vào công nghệ luyện kim cũng như nguyên vật liệu đầu vào. Việc tính toán cấp phối trong Luận án sử dụng cho một loại xỉ thép từ Nhà máy Gang thép Thái Nguyên, nhưng cũng có thể áp dụng cho các nguồn xỉ thép khác khi có cùng loại công nghệ luyện thép và nguyên liệu đầu vào tương tự. Những nghiên cứu tiếp theo có thể sử dụng các thông số của xỉ thép như khối lượng riêng, khối lượng thể tích, độ hoạt tính, v.v. để thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép.

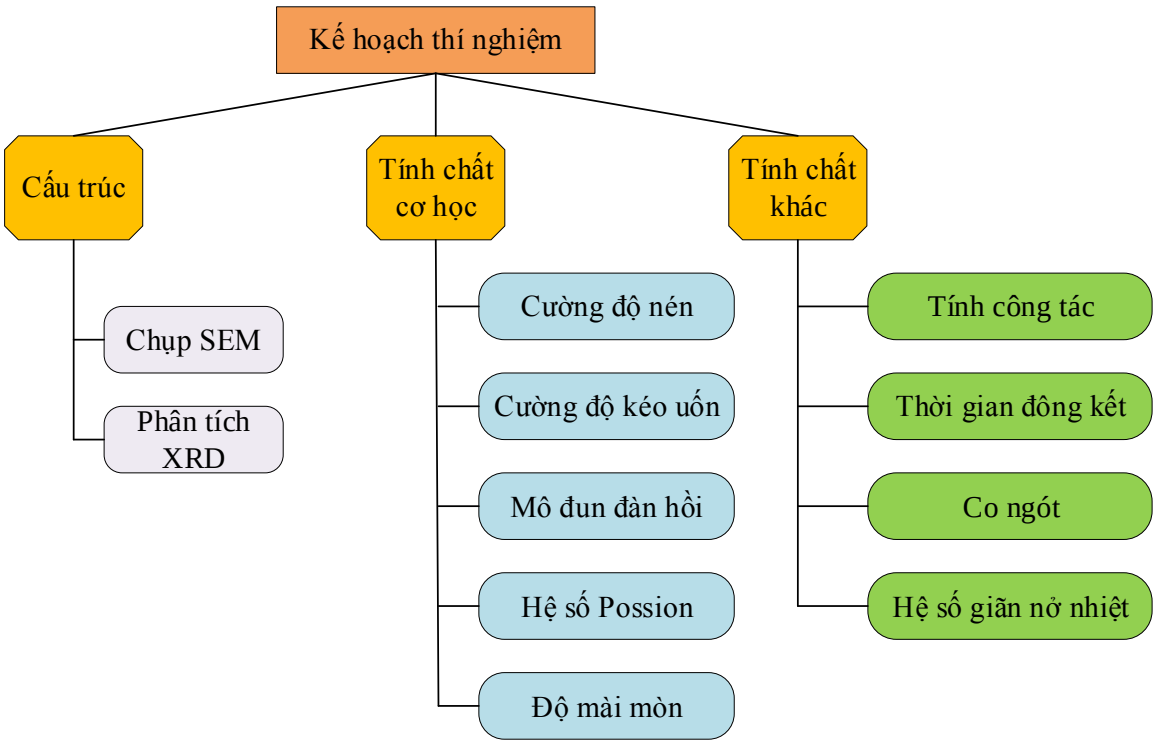
Giá thành của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép đắt hơn khoảng 3% so với BTXM có cùng cấp cường độ chịu nén.

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

Dựa trên các tính chất cơ bản của bê tông sử dụng cho kết cấu mặt đường cứng đã phân tích ở phần Chương 1. Trong Chương này, trình bày nghiên cứu thực nghiệm để làm rõ các tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép bao 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 được so sánh với BTXM truyền thống và bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu tự nhiên (đá dăm và cát sông), từ đó đưa ra nhận định về việc ứng dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trong tính toán thiết kế và thi công kết cấu mặt đường cứng tại Việt Nam.

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

3.1. Kế hoạch thí nghiệm

Các chỉ tiêu và số lượng mẫu thí nghiệm để nghiên cứu một số tính chất cơ bản của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép trong tính toán kết cấu mặt đường cứng được thể hiện ở Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Các chỉ tiêu và số lượng mẫu thí nghiệm

TT	Nội dung thí nghiệm	Số lượng mẫu					
		GPCS25	GPCS30	GPCS35	GPC30	OPC30	OPCS30
1	Chụp SEM vi cấu trúc	-	03	-	03	-	03
2	Phân tích nhiễu xạ tia X (XRD)	-	01	-	-	-	-
3	Cường độ chịu nén	45	45	45	03	03	03
4	Cường độ chịu kéo uốn	30	30	30	-	-	-
5	Mô đun đàn hồi	30	30	30	-	-	-
6	Hệ số Possion	30	30	30	-	-	-
7	Độ mài mòn	06	06	06	06	06	-
8	Tính công tác	06	06	06	-	-	-
9	Thời gian đông kết	-	03	-	03	03	-
10	Co ngót	06	06	06	06	06	-
11	Hệ số giãn nở do nhiệt	03	03	03	03	03	-

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 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*[77]	GPC 30*[18]	OPC 30* [77]
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)	-	-	-
Điều kiện bảo dưỡng	(1)	(2)	(1)

(*): Tỉ lệ phối trộn được tham khảo có điều chỉnh cho phù hợp với vật liệu đầu vào sử dụng trong nghiên cứu và có kiểm tra lại cường độ chịu nén thể hiện ở Bảng 14 (Phụ lục 1);
(1): Sau khi tháo khuôn, tiến hành ngâm trong nước ở điều kiện phòng đến 28 ngày tuổi;
(2): Khi đúc mẫu xong, sau 1 ngày tiến hành dưỡng hộ nhiệt ở 60°C/24h, sau đó tháo khuôn và lưu ở điều kiện phòng thí nghiệm đến 28 ngày tuổi;

Cấp phối của OPCS 30 (bê tông xi măng sử dụng cốt liệu lớn là xỉ thép) và GPC 30 (bê tông geopolymer tro bay sử dụng đá dăm và cát) được sử dụng để xác định vi cấu trúc. Các kết quả được đối chứng so sánh với GPCS 30 (bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép) có cùng cường độ chịu nén đặc trưng là 30 MPa, số lượng mẫu thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 3.1.

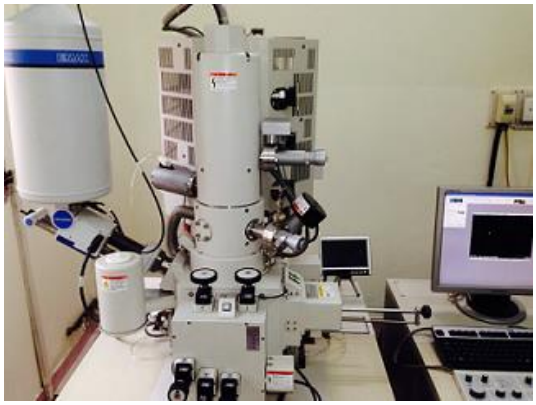
Cấp phối OPC 30 (bê tông xi măng truyền thống sử dụng đá dăm và cát sông) và GPC 30 (bê tông geopolymer tro bay sử dụng đá dăm và cát) được sử dụng để xác định độ mài mòn; thời gian đông kết; co ngót và hệ số giãn nở do nhiệt (CTE). Các kết quả được đối chứng so sánh với GPCS 30 (bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép) có cùng cường độ chịu nén đặc trưng là 30 MPa, số lượng mẫu thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 3.1.

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

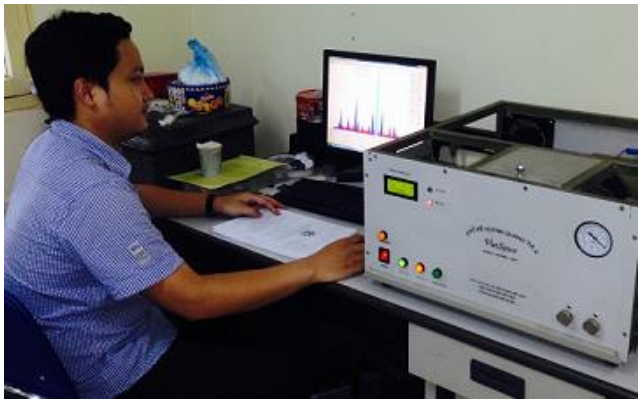
Bê tông geopolymer tro bay cũng có thành phần, các đặc tính cơ bản và cấu trúc vĩ mô quan sát bằng mắt thường tương tự như BTXM. Tuy nhiên, qua nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng bê tông geopolymer có một số đặc tính khác nổi bật hơn như cường độ chịu kéo uốn, co ngót và từ biến thấp hơn… Hơn nữa, một trong các ưu điểm của bê tông geopolymer là có thể dính kết với nhiều loại cốt liệu khác nhau [55]. Qua một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng có thể sử dụng xỉ thép làm cốt liệu trong bê tông geopolymer tro bay mà không gây trương nở thể tích như khi sử dụng làm cốt liệu trong BTXM thông thường. Như vậy, nghiên cứu cấu trúc vi mô và thành phần khoáng hóa của bê tông geopolymer là cần thiết để làm sáng tỏ hơn các nhận định trên.

Mặt khác, như đã biết, trong BTXM, khu vực rất nhỏ nằm ở giữa ranh giới đá xi măng và các hạt cốt liệu được gọi là vùng chuyển tiếp (interfacial transition zone, ITZ) và chất lượng của ITZ là một trong những yếu tố chính điều chỉnh cường độ và các tính chất của bê tông. Vùng chuyển tiếp có cấu trúc và cường độ tốt sẽ tăng cường khả năng liên kết trong cấu trúc và cải thiện các tính năng làm việc của BTXM. Vùng chuyển tiếp của BTXM phụ thuộc vào tính chất của hồ xi măng (tỉ lệ N/X, loại xi măng,…) và cấu trúc cốt liệu (bề mặt, hình dạng hạt, thành phần khoáng vật, cấp phối…) [21]. Do đó, việc sử dụng chất kết dính có thành phần khác hay loại cốt liệu khác nhau sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến cấu trúc vi mô của bê tông và cấu trúc tại vùng chuyển tiếp này.

Các mẫu thí nghiệm GPCS 30 và đối chứng GPC 30; OPCS 30 được chế bị theo tỉ lệ thành phần như Bảng 2.26 và Bảng 3.2. Sau thời gian bảo dưỡng 6 tháng các mẫu được sử dụng để phân tích chụp vi cấu trúc bằng kính hiển điện tử quét (SEM) và phân tích nhiễu xạ tia X (Powder X-ray diffraction) để phân tích các khoáng trong cấu trúc tinh thể. Thiết bị SEM và XRD được thể hiện ở Hình 3.2 và Hình 3.3.

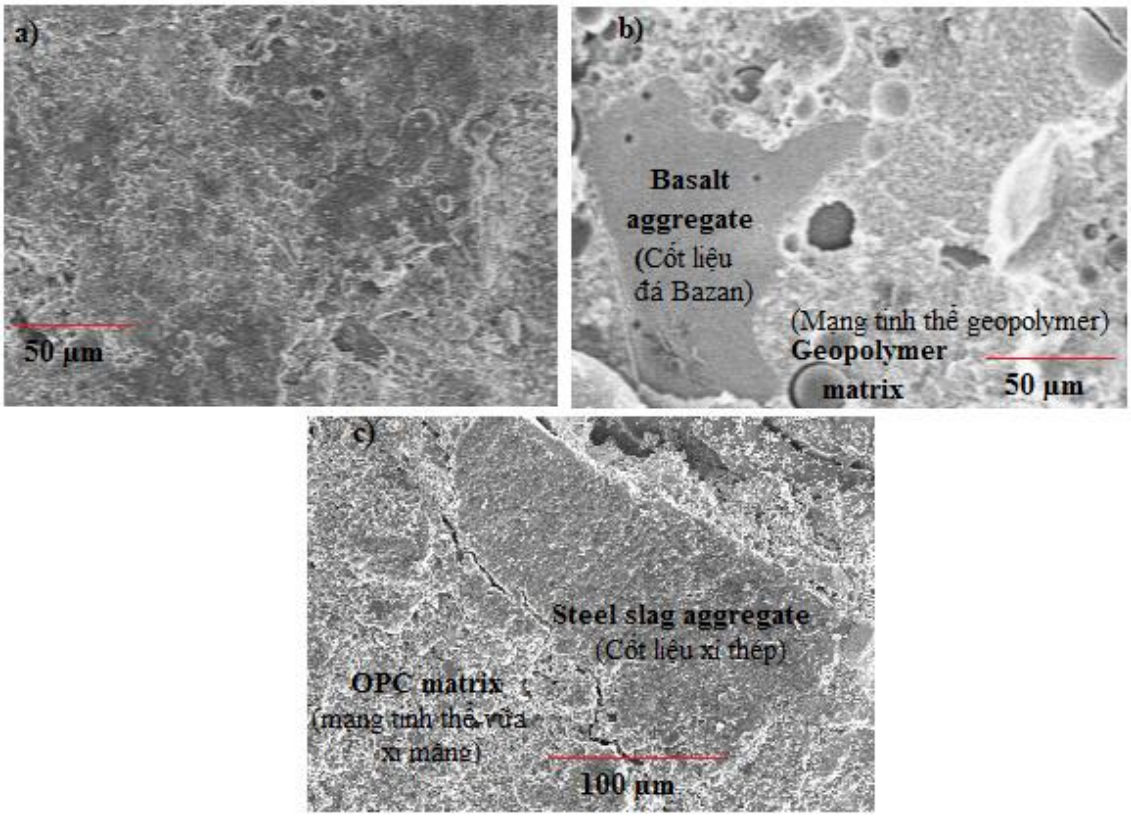


Hình 3.2. Thiết bị phân tích kính hiển vi điện tử quét (SEM)

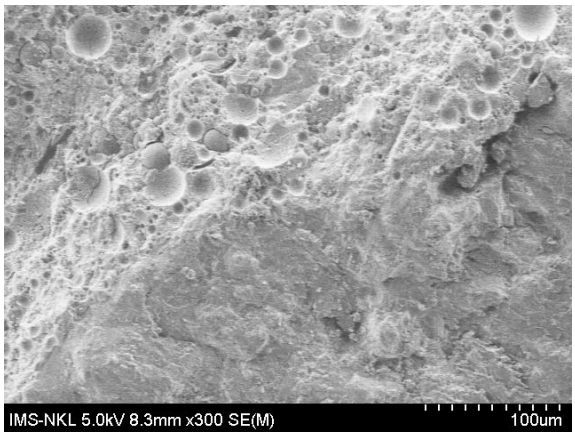


Hình 3.3. Thiết bị phân tích nhiễu xạ tia X (XRD)

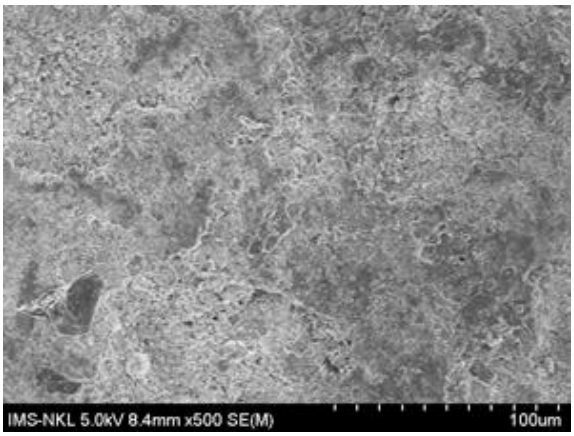
Kết quả cho thấy một vết nứt nhỏ liên tục tại vùng chuyển tiếp giữa đá xi măng và cốt liệu liệu xỉ thép (Hình 3.4c), chính vết nứt vi mô này làm cho vùng chuyển tiếp của đá xi măng và cốt liệu xỉ thép khá xốp và yếu. Vùng chuyển tiếp giữa đá gepolymer và cốt liệu đá basalt không thấy xuất hiện vết nứt vi mô nhưng ranh giới vùng chuyển tiếp khá rõ ràng thể hiện ở (Hình 3.4b) 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. Ngược lại, ở (Hình 3.4a) thể hiện cấu trúc vùng chuyển tiếp của cốt liệu xỉ thép và đá geopolymer không thấy xuất hiện vết nứt vi mô và không phân biệt được phạm vi và ranh giới của vùng chuyển tiếp. Bề mặt xù xì góc cạnh cùng với độ rỗng cao của xỉ thép góp phần cải thiện liên kết với cấu trúc của chất kết dính geopolymer. Hơn nữa, điều này chứng tỏ đã có sự tương tác hóa học trên bề mặt giữa cốt liệu xỉ thép và thành phần của chất kết dính geopolymer khiến cho liên kết giữa xỉ thép và đá geopolymer trở nên mạnh mẽ và không phân biệt rõ ràng. Điều này có thể giải thích cho bê tông geopolymer tro bay sử dụng toàn bộ cốt liệu xỉ thép có thể đạt cường độ thiết kế ở điều kiện bảo dưỡng phòng thí nghiệm mà không cần tiêu tốn năng lượng để bảo dưỡng nhiệt ở 60°C trong 24h.



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)

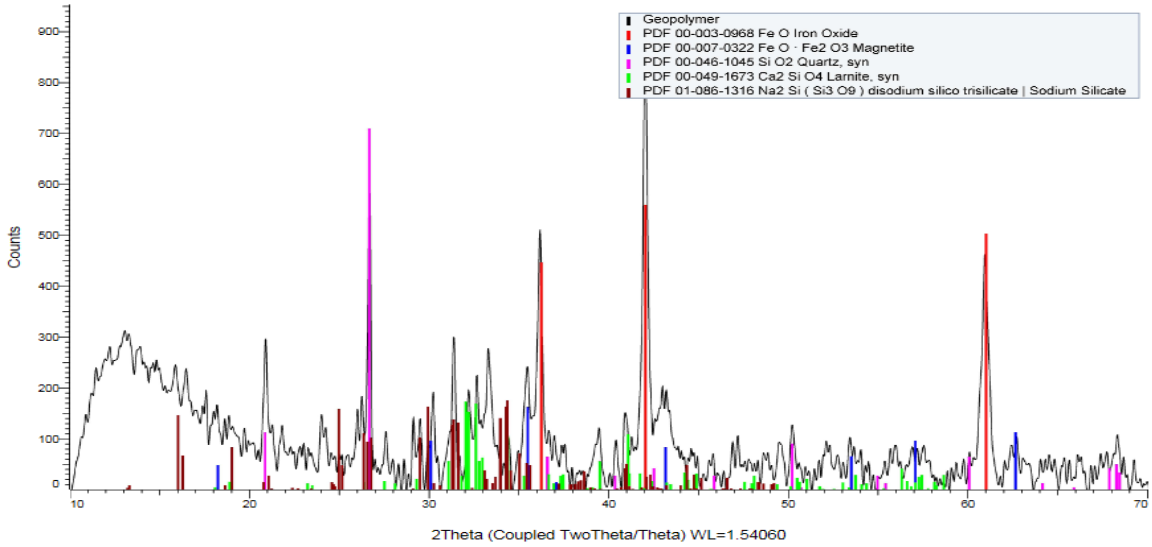


Hình 3.6. Kết quả SEM của mẫu geopolymer sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (GPCS 30)

Kết quả phân tích SEM tại cùng một mức độ phân giải 100µm được thể hiện ở Hình 3.5; Hình 3.6 cho thấy ở cùng một cấp cường độ chịu nén đặc trưng 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) mặc dù đã bảo dưỡng nhiệt ở 60°C/24h, còn đối với các mẫu bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép thì gần như các hạt tro bay đã bị geopolymer hóa gần như hoàn toàn. Điều này cho thấy khi sử dụng cốt liệu xỉ thép thay thế cốt liệu lớn và nhỏ (đá dăm, cát), do có thành phần khoáng và hóa học khác biệt, đã làm cho phản ứng geopolymer hóa diễn ra nhanh hơn và thậm chí kích hoạt được cả các hạt tro bay khá trơ.

Kết quả phân tích thành phần khoáng hóa theo phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) được thể hiện ở Hình 3.7. Theo kết quả ở Chương 2 (Hình 2.8) cho thấy 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 EAF đã được quan sát là FeO. Thành phần còn lại là Magnetile ($FeO.Fe_2O_3$), Gehlanite $Ca_2Al(AlSiO_7)$. 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. Kết quả này hoàn toàn tương tự với các công bố của tác giả Duxson [57]. Điều này bước đầu cho thấy khi thay thế đá dăm, cát bằng cốt liệu xỉ thép, bản thân bề mặt cốt liệu xỉ thép đã có tương tác hóa học với chất kết dính geopolymer.



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

Từ các kết quả thực nghiệm trên, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

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.

3.4. Tính công tác

Tính công tác hay còn gọi là tính dễ thi công là tính chất kỹ thuật của hỗn hợp bê tông, nó biểu thị khả năng lấp đầy khuôn nhưng vẫn đảm bảo được độ đồng nhất trong một điều kiện đầm nén nhất định. Để đánh giá tính công tác, sử dụng hai chỉ tiêu gồm: độ sụt hoặc độ cứng và thời gian giữ được độ sụt.

Bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép là một hỗn hợp vật liệu bao gồm hỗn hợp cốt liệu xỉ thép hạt có dải phân bố dài, tro bay, dung dịch kiềm kích hoạt (bao gồm dung dịch NaOH và thủy tinh lỏng). Khi không có dung dịch kiềm kích hoạt, hỗn hợp bê tông GPCS là một hệ thống hai pha (rắn và khí). Sự di chuyển của hỗn hợp bê tông GPCS phụ thuộc vào lực ma

sát của các hạt. Khi thêm một lượng nhỏ dung dịch kiềm kích hoạt sẽ làm thay đổi cấp phối của hỗn hợp. Các hạt nhỏ do tác dụng của lực căng bề mặt và màng dung dịch kiềm kích hoạt ở bề mặt hay có xu hướng kết tụ tạo ra các hạt mới có kích thước lớn hơn làm các hạt có sự dịch chuyển và bố trí lại pha phân phối của các hạt và tạo ra độ sụt của hỗn hợp bê tông GPCS, tạo ra khoảng cách lớn hơn của các hạt cốt liệu lớn, sự trơn trượt của các vùng khác nhau của hỗn hợp dễ dàng hơn và bê tông dễ đổ hơn.

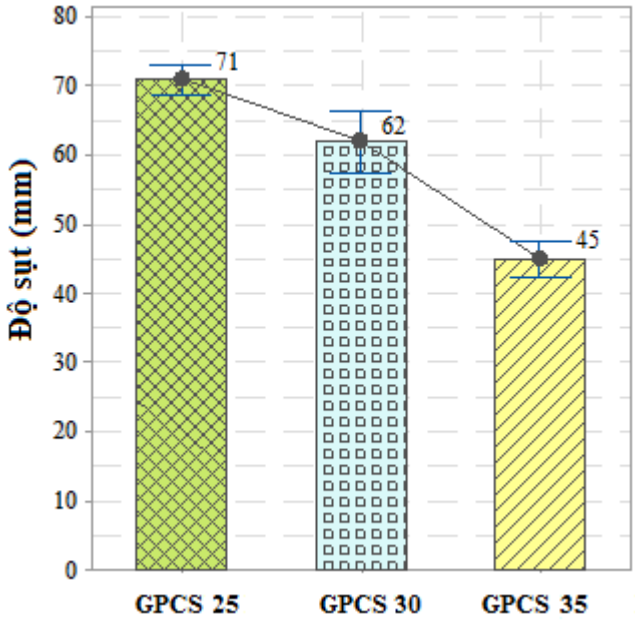
Để đánh giá tính công tác của hỗn hợp GPCS tươi có f'c= 25, 30, 35 MPa chỉ tiêu độ sụt được lựa chọn. Độ sụt được xác theo ASTM C143-90A [32], ký hiệu S (cm) thể hiện ở Hình 3.8.

Hình 3.8. Thí nghiệm xác định độ sụt của hỗn hợp GPCS

Dụng cụ đo độ sụt là hình nón cụt tiêu chuẩn (côn Abrams) có kích thước 203 x 102 x 305 mm, đáy và miệng hở. Que đầm bằng thép hình tròn có đường kính bằng 16 mm dài 600 mm. Đổ bê tông GPCS đầy khuôn nón cụt thành ba lớp, đầm mỗi lớp 25 lần, sau đó rút khuôn lên và đo độ sụt trung bình sau 1 phút. Độ sụt bằng chiều cao của côn trừ đi chiều cao của bê tông tươi sau khi đã rút khuôn ra khỏi hỗn hợp bê tông. Kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 3.3 và Hình 3.9.

Bảng 3.3. Kết quả thí nghiệm độ sụt của hỗn hợp GPCS

Số mẫu	Độ sụt (mm)		
	GPCS 25 (f'c= 25 MPa)	GPCS 30 (f'c= 30 MPa)	GPCS 35 (f'c= 35 MPa)
1	69	63	49
2	73	64	43
3	68	66	42
4	72	59	45
5	71	65	47
6	73	55	44
Giá trị (min; max)	69-73	55-66	42-49
Giá trị trung bình	71	62	45



Hình 3.9. Biểu đồ kết quả thí nghiệm độ sụt

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 211.1-91 [43].

3.5. Thời gian đông kết

Thời gian đông kết của bê tông là một trong những yếu tố rất quan trọng trong việc lựa chọn giải pháp thi công và khai thác của công trình. Trong nội dung này

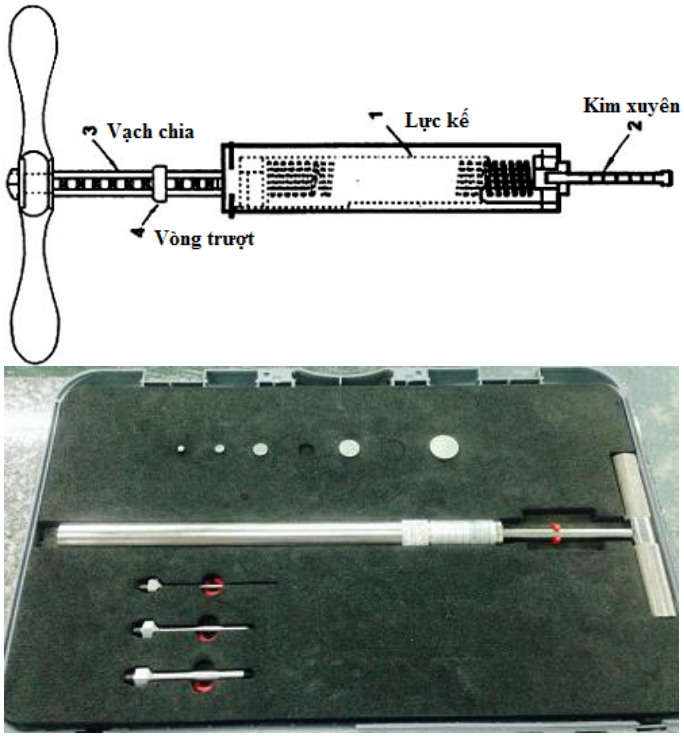
trình bày về nghiên cứu xác định thời gian đông kết của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép (GPCS) có so sánh đánh giá với bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu đá tự nhiên (GPC) và BTXM truyền thống (OPC) có cùng cấp cường độ nén là 30 MPa.

Mẫu thử được lấy đại diện từ các hỗn hợp bê tông theo quy định trong tiêu chuẩn TCVN 3105:1993. Trong quá trình trộn, ghi lại thời điểm khi bắt đầu trộn ướt, sau đó hỗn hợp bê tông geopolymer được sàng qua sàng tiêu chuẩn mắt tròn có đường kính 5 mm để tách phần vữa lên mặt khay không hút nước. Trộn kỹ lại bằng tay phần vữa thu được trên mặt khay. Xác định nhiệt độ của vữa bằng cách cắm nhiệt kế sâu vào vữa từ 5 cm tới 7 cm và ghi lại nhiệt độ của vữa khi nhiệt độ đạt giá trị tối đa. Xúc vữa vào 3 khuôn chứa, mỗi khuôn một lần làm thành một lớp. Đầm chặt mẫu vữa trong khuôn chứa và làm phẳng bề mặt. Khuôn chứa phải chắc chắn, kín nước, không hấp thụ nước, không dính dầu mỡ và có tiết diện tròn, vuông hoặc chữ nhật song đường kính hoặc cạnh của tiết diện phải không nhỏ hơn 150 mm và chiều cao khuôn ít nhất là 150 mm. Diện tích bề mặt vữa phải đủ cho 10 lần thử xuyên ngẫu nhiên với khoảng cách giữa các vị trí cắm kim xuyên vào vữa. Đầm chặt mẫu cho đến khi hồ nổi đều lên bề mặt mẫu.

Để xác định thời gian ninh kết của các hỗn hợp bê tông tươi được thực hiện theo TCVN 9338-2012 dựa trên nguyên tắc đo lực cản của vữa geopolymer chống lại sự xuyên của các kim tiêu chuẩn sau những thời gian nhất định. Thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết được xác định cơ sở khi cường độ kháng xuyên đạt tương ứng 3.5 MPa và 27.6 MPa tính từ lúc nhào trộn ướt.

Thiết bị chính bao gồm lực kế và các kim xuyên tiêu chuẩn được thể hiện ở Hình 3.10. Lực kế có khả năng đo lực xuyên tối đa không nhỏ hơn 600 N, với độ chính xác ± 10 N. Kim xuyên được lắp vào lực kế. Kim xuyên gồm 6 loại với đầu kim hình tròn và có tiết diện như sau: 645, 323, 161, 65, 32 và 16 mm^2. Mỗi kim đều được khắc một vạch xung quanh thân cách đều mũi 25 mm. Kim với tiết diện đầu mũi 16 mm^2 phải có chiều dài không quá 90 mm. Tính cường độ kháng xuyên bằng cách chia trị số lực xuyên ghi nhận được cho diện tích đầu mũi kim. Thực hiện

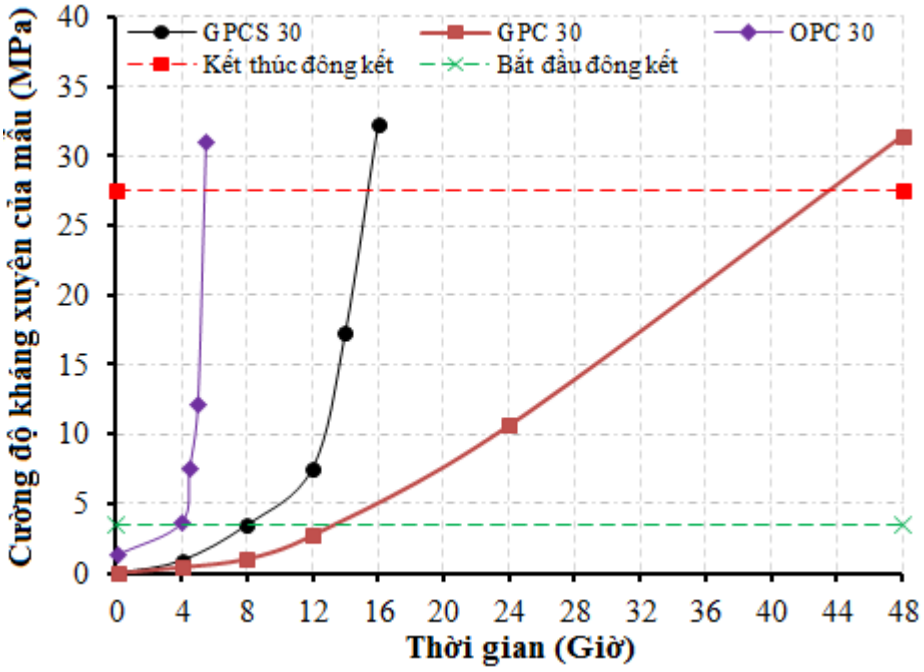
ít nhất 6 lần thử xuyên kim cho mỗi mẫu thử xác định thời gian đông kết, với các khoảng thời gian có trị số sao cho có thể xây dựng được một đường cong hợp lý thể hiện quan hệ giữa cường độ kháng xuyên và thời gian thử nghiệm.



Hình 3.10. Sơ đồ cấu tạo của dụng cụ thử xuyên

Hình 3.11. Thí nghiệm xuyên trên mẫu hỗn hợp bê tông geopolymer hoàn toàn cốt liệu xỉ thép

Kết quả thí nghiệm được thể hiện Bảng 7 (Phụ lục) và Hình 3.12.



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

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.

Như vậy, khi sử dụng cốt liệu xỉ thép thay thế đá dăm và cát vàng trong bê tông geopolymer thời gian đông kết của hỗn hợp bê tông tươi đã giảm và cải thiện đi rõ rệt mà không phải dưỡng hộ nhiệt ở 60°C trong 24h như bê tông geopolymer tro bay cốt liệu tự nhiên giúp giảm thiểu được chi phí và tiến độ thi công. Tuy nhiên, thời gian ninh kết của hỗn bê tông tươi geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép lại lớn hơn đáng kể so với thời gian ninh kết của hỗn hợp BTXM không sử dụng phụ gia siêu dẻo làm chậm ninh kết nhưng GPCS vẫn đạt được cường độ thiết kế ở tuổi 28 ngày. Đây có thể là nhược điểm đối với những công trình đòi hỏi tiến độ thi công nhưng cũng có thể là ưu điểm đối với những công trình ở xa trạm trộn

phải mất thời gian để di chuyển mà không phải thêm phụ gia chậm ninh kết để duy trì tính công tác phụ cho việc thi công và đầm lèn. Đối với BTXM thông thường khi sử dụng phụ gia siêu dẻo chậm ninh kết thì theo thời gian ninh kết có thể kéo dài đến hơn 12h [9].

Đặc biệt trái ngược với BTXM, bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép khi chế tạo xong thì không cần bảo dưỡng ẩm như BTXM, một số nghiên cứu chỉ ra rằng nhiệt độ càng cao thì phản ứng geopolymer hóa diễn ra càng nhanh. Thời gian đông kết càng nhanh phù hợp thi công cho các công trình ở các vùng có khí hậu nắng nóng như thi công vào mùa hè.

Điều này có thể được giải thích thông qua cơ chế của chất kết dính, cốt liệu và cấu trúc của bê tông. Theo nghiên cứu ở Mục 3.3 về vi cấu trúc của GPCS, các thành phần khoáng vật trên bề mặt của cốt liệu xỉ thép đã tương tác hóa học với chất kết dính geopolymer tro bay tạo nên đã thúc đẩy tốc độ phản ứng nhanh và tạo liên kết mạnh mẽ hơn so với bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu tự nhiên.

Hoạt tính bề mặt của các hạt tro bay tương đối trơ hơn so với các hạt clinke xi măng rất nhạy và háo nước nên ở nhiệt độ thông thường phải mất một thời gian lâu hơn thì dung dịch kiềm mới kích hoạt được tro bay phản ứng. Cũng hoàn toàn tương đồng với khuyến cáo của ACI 2114R-02 [44] như đối với BTXM sử dụng tro bay làm phụ gia khoáng thì ngày tuổi chuẩn để đánh giá và nghiệm thu chất lượng của bê tông là 56 ngày.

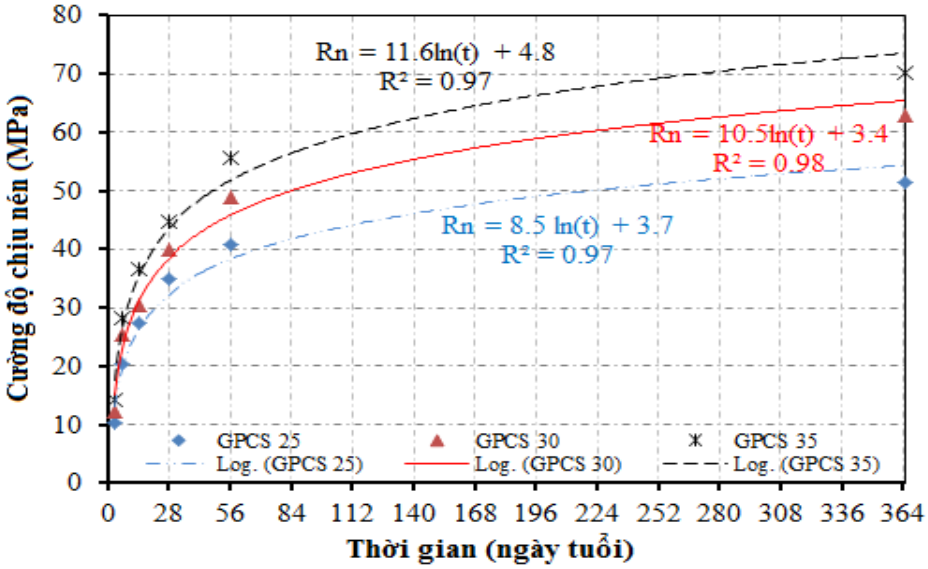
3.6. Các tính chất cơ học của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép

3.6.1. Cường độ nén theo thời gian

Để nghiên cứu quy luật phát triển cường độ của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép theo thời gian, tiến hành chế bị mẫu bê tông GPCS hình trụ 15x30 cm cho các cấp phối đã thiết kế cho GPCS 25, GPCS 30 và GPCS 35. Các mẫu được dưỡng hộ ở điều kiện nhiệt độ phòng thí nghiệm t = 22±4°C, độ ẩm w = 60±20%. Cường độ chịu nén của các mẫu GPCS được xác định theo ASTM C39 ở các ngày tuổi 3, 7, 14, 28 (trình bày ở Mục 2.2.9), 56, 365 ngày tuổi. Số lượng mẫu thử và kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 3.4 và Hình 3.13.

Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm nén theo thời gian của GPCS

Loại bê tông	Ngày tuổi	Số mẫu	Cường độ nén trung bình (MPa)	% R_n^{28}	Độ lệch chuẩn S (MPa)	Hệ số phân tán Cv (%)
GPCS 25	3	3	10.23	29.40	0.34	3.29
	7	3	20.46	58.79	0.57	2.76
	14	3	27.32	78.51	0.69	2.52
	28	30	34.80	100	3.23	9.27
	56	3	40.67	116.87	0.95	2.34
	365	3	51.39	147.67	1.06	2.06
GPCS 30	3	3	12.19	30.51	0.28	2.31
	7	3	25.45	63.70	0.85	3.34
	14	3	30.48	76.30	0.96	3.16
	28	30	39.95	100	3.19	7.98
	56	3	48.82	122.20	1.02	2.09
	365	3	62.81	157.22	1.89	3.01
GPCS 35	3	3	14.13	31.51	0.52	3.66
	7	3	28.23	62.94	0.95	3.37
	14	3	36.52	81.43	0.77	2.11
	28	30	44.85	100	3.29	7.33
	56	3	55.72	124.24	1.83	3.29
	365	3	70.11	156.32	1.82	2.59



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

Qua biểu đồ ở Hình 3.13 cho thấy cường độ của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép ứng với các cấp phối GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 có xu hướng tăng đều đặn theo thời gian và hoàn toàn tương tự như OPC. Tỷ lệ phát triển cường độ nén khá đều đặn và liên tục. Tuy nhiên, xu hướng tăng cường độ nén của GPCS sau 28 ngày tuổi còn khá mạnh. Điều này cho phép dự kiến GPCS đạt được cường độ cao ở tuổi muộn. Theo Bảng 3.4 cho thấy tại 365 ngày tuổi cường độ nén của GPCS 25 tăng 47.67%; GPCS 30 tăng 57.22%; GPCS 30 tăng 56.32% so với cường độ nén tại 28 ngày tuổi.

Từ mối quan hệ đó rút ra các phương trình hồi quy cường độ của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép theo thời gian 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)

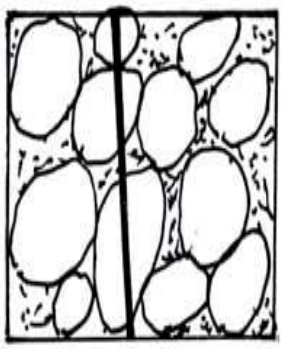
Trong đó:

R_n: Cường độ chịu nén của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

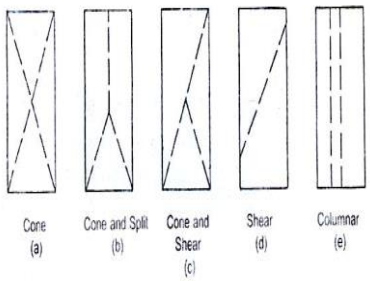
t: Thời gian thí nghiệm (trong phạm vi là 365 ngày)

Trong ứng xử nén quan sát thấy các dạng phá hoại của GPCS 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 (Hình 3.16).

Điều này có thể được lí giải, do đã có tương tác hóa học trên bề mặt cốt liệu xỉ thép với chất kết dính gepolymer tro bay giúp cho liên kết trở nên mạnh mẽ hơn và vùng chuyển tiếp gần như không phân biệt được, nội dung này đã được nghiên cứu và trình bày chi tiết ở mục 3.3. Hoàn toàn trái ngược, đối với BTXM thông thường thì vùng chuyển tiếp giữa hồ xi măng và cốt liệu có cấu trúc kết tinh, rỗng nhiều hơn, các mặt nứt, vết nứt và cường độ nhỏ hơn vùng vữa xi măng, chiều dày của lớp chuyển tiếp này là từ 20÷100 μm [21].



Hình 3.14. Vết nứt của bêtông cường độ cao [21]



Hình 3.15. Các dạng phá hoại mẫu thử chuẩn

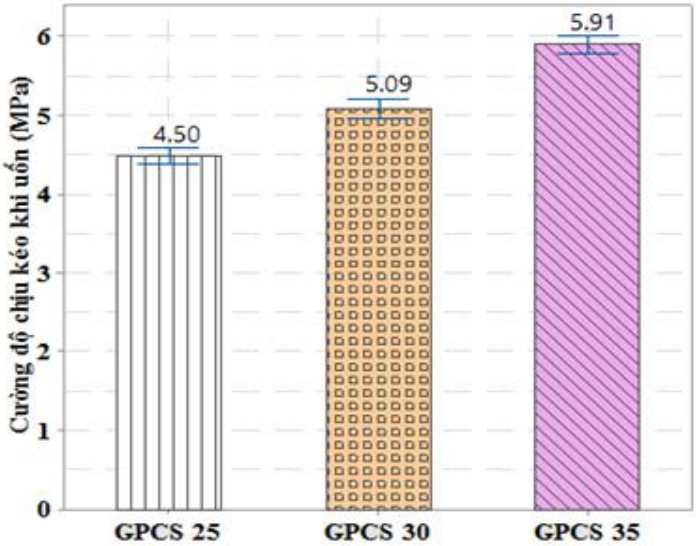
Hình 3.16. Dạng phá hoại mẫu GPCS

3.6.2. Cường độ kéo uốn

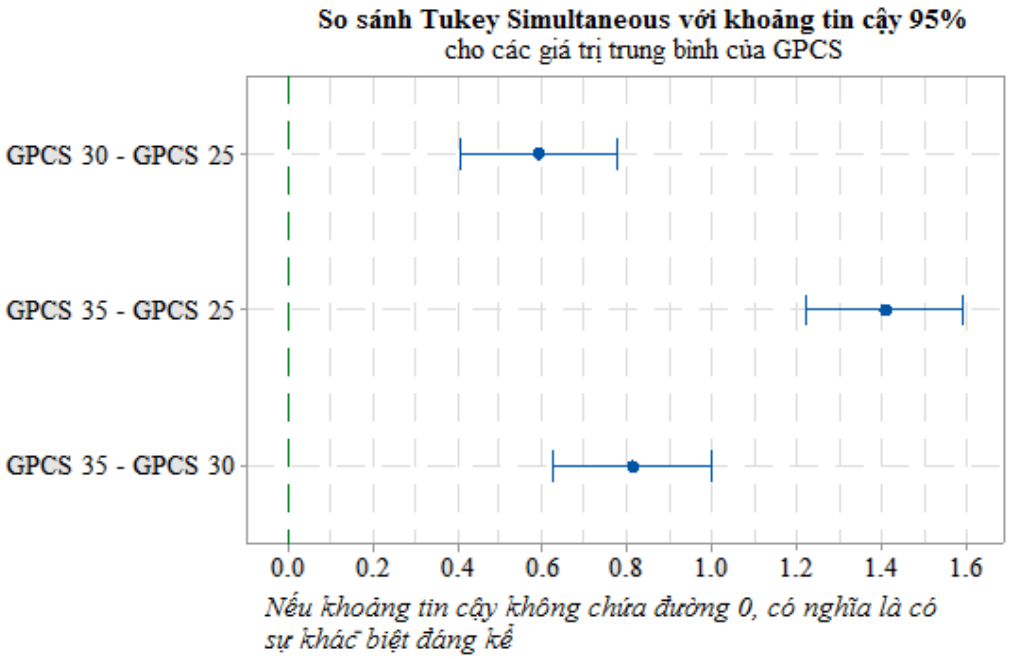
Dựa vào kết quả thiết kế cấp phối bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trên tiến hành đúc mỗi một cấp phối 30 mẫu dầm 150x150x600 mm cho GPCS 25, GPCS 30 và GPCS 35. Các mẫu thí nghiệm bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng thí nghiệm t = 22±4°C, độ ẩm w = 60±20% (không ngâm trong nước) và được thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo uốn theo ASTMC78 [30] ở tuổi 28 ngày như Hình 3.17.

Hình 3.17. Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo uốn trên mẫu dầm 150 x 150 x 600 mm

Các kết quả thí nghiệm kéo uốn được phân tích để loại bỏ giá trị ngoại lai theo ASTM E178 [33] sau đó phân tích thống kê và đánh giá kết quả đã được tiến hành theo chỉ dẫn của các tài liệu ACI 318-11 [35] với độ tin cậy 99%. Kết quả xử lý thống kê cường độ chịu kéo khi uốn của các hỗn hợp được tổng hợp trong Bảng 8, Bảng 9, Bảng 10 ở Phụ lục 1.

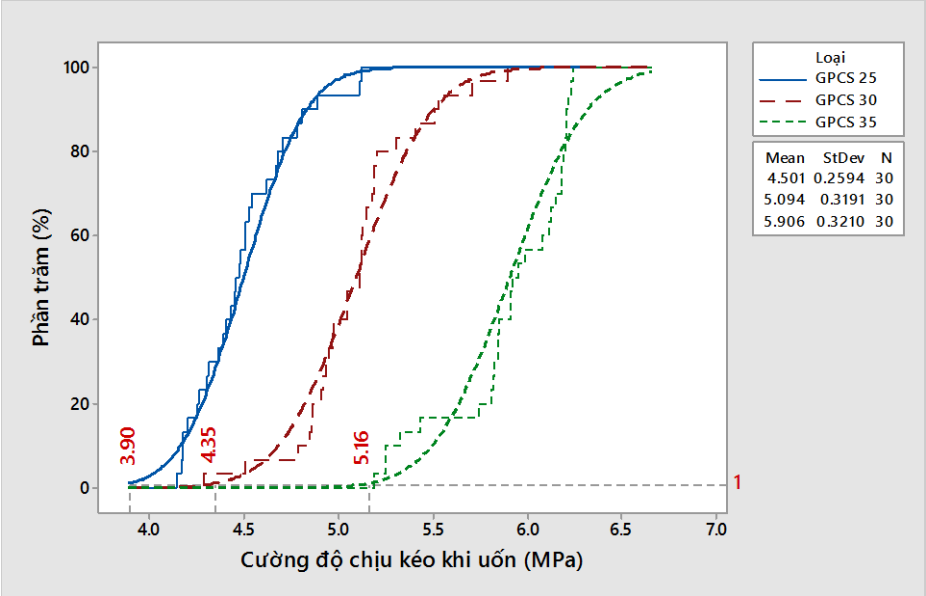


Hình 3.18. Cường độ chịu uốn của các hỗn hợp GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35



Hình 3.19. Kết quả phân tích Anova Tukey cường độ chịu kéo uốn của các hỗn hợp GPCS đã thiết kế

Qua biểu đồ được thể hiện ở Hình 3.18 cường độ chịu kéo khi uốn của GPCS tăng khi cường độ chịu nén tăng. Kết quả phân tích Anova Tukey được thể hiện ở Hình 3.19 cho thấy sự khác biệt đáng kể về cường độ chịu kéo khi uốn của 3 loại bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35 hoàn toàn có ý nghĩa về mặt thống kê. Do vậy, có thể khẳng định các cấp phối thiết kế đạt yêu cầu không những phân cấp theo cường độ chịu nén mà còn có thể phân cấp theo cường độ chịu kéo khi uốn.



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

Tương tự như BTXM truyền thống cường độ chịu kéo của GPCS thấp hơn nhiều so với cường độ chịu nén. Cường độ chịu kéo dọc trục thường khó xác định nên cường độ chịu kéo được xác định thông qua các cường độ chịu kéo gián tiếp, gồm: Cường độ chịu kéo bửa và cường độ chịu kéo khi uốn. Cường độ chịu kéo khi uốn thông thường có quan hệ tỉ lệ với cường độ chịu nén. Dựa trên biểu đồ phân phối tích lũy cường độ chịu kéo khi 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 có cường độ chịu nén đặc trưng thí nghiệm lần lượt là 27.29; 32.05; 37.06 MPa.

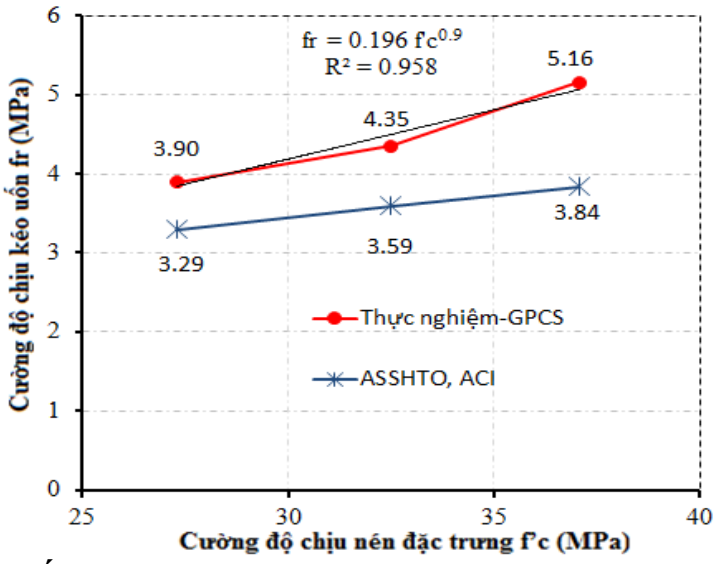
Vì vậy, thông qua các kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn GPCS tìm được phương trình quan hệ với cường độ chịu nén và so sánh với cường độ kéo uốn của BTXM cùng cấp theo quy định trong tiêu chuẩn của ACI 318-11 [35], ASSHTO-

2012 [42]. Công thức xác định cường độ kéo uốn của bê tông OPC theo ACI 318-11, ASSHTO-2012: $f_r = 0.63\sqrt{f_c^{'}}$ (MPa). Kết quả so sánh và phương trình hồi quy được thể hiện ở Bảng 3.5 và Hình 3.21.

Bảng 3.5. Tổng hợp kết quả cường độ chịu nén và kéo khi uốn đặc trưng từ thực nghiệm của GPCS

Loại	Cường độ chịu nén đặc trưng f'c (MPa)		Cường độ chịu kéo uốn đặc trưng fr (MPa)	
	Giá trị nhỏ nhất	Thực nghiệm	Thực nghiệm	ACI, ASSHTO
GPCS 25	25	27.29	3.90	3.29
GPCS 30	30	32.05	4.35	3.59
GPCS 35	35	37.06	5.16	3.84

Kết quả so sánh trên 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. Kết quả này cho thấy đây là ưu điểm của GPCS so với OPC. Điều này có thể được giải thích do cấu trúc geopolymer là cấu trúc mạng 3D đặc chắc và vùng chuyển tiếp ITZ của GPCS được tăng cường hơn so với của OPC (chi tiết trong mục 3.3). Cường độ kéo uốn là một chỉ tiêu quan trọng trong thiết kế và kiểm toán kết cấu mặt đường cứng. Do đó, cường độ kéo uốn lớn hơn sẽ làm giảm vết nứt trên bê tông, giảm lượng cốt thép vùng chịu kéo của cấu kiện.



Hình 3.21. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi 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: $f_r = 0.196\ f'_c{}^{0.9}$ với $R^2 = 0.958$ (3.4)

Mặt khác, dựa trên tương quan hồi quy ở phương trình (3.4) tiến hành đánh giá chất lượng GPCS theo cường độ kéo uốn. Kết quả được thể hiện ở Bảng 3.6.

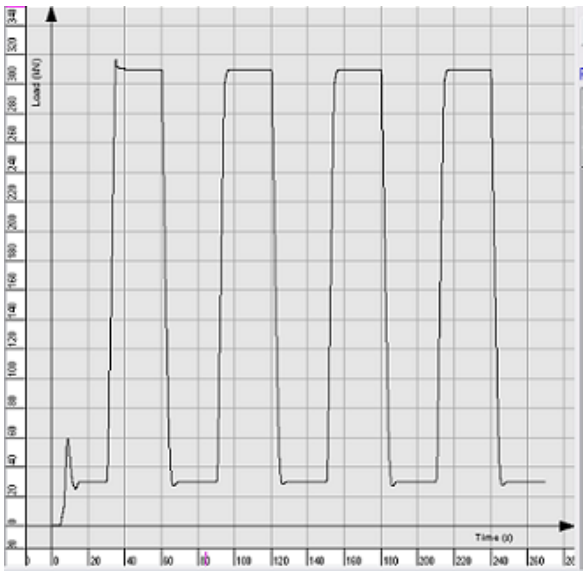
Bảng 3.6. Kết quả cường độ kéo khi uốn đặc trưng của GPCS tính theo hàm hồi quy đề xuất và xác định từ thực nghiệm

Loại	Cường độ chịu nén đặc trưng f'c (MPa)	Cường độ chịu kéo uốn đặc trưng fr (MPa)	
		Giá trị nhỏ nhất tính theo (3.4)	Thực nghiệm
GPCS 25	25	3.55	3.90
GPCS 30	30	4.18	4.35
GPCS 35	35	4.81	5.16

Từ kết quả ở Bảng 3.6 cho thấy cường độ kéo uốn đặc trưng được xác định từ thực nghiệm đều lớn hơn cường độ kéo uốn tối thiểu. Như vậy, việc thiết kế thành phần GPCS không những đảm bảo về cường độ nén mà còn đạt yêu cầu về cường độ chịu kéo uốn.

3.6.3. Mô đun đàn hồi và hệ số poisson

Các mẫu GPCS trước khi nén phá hoại, thì mô đun đàn hồi và hệ số Possion được xác định trước do thí nghiệm mô đun đàn hồi và hệ số possion không phá hoại mẫu. Các mẫu thí nghiệm được chế tạo và bảo dưỡng cùng điều kiện với các mẫu thí nghiệm nén đã được trình bày ở trên. Mô đun đàn hồi khi nén tĩnh và hệ số Possion được xác định theo ASTMC469 [36] thể hiện ở Hình 3.22.



Hình 3.22. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi trên mẫu hình trụ 150 x 300 mm

Ở mỗi một điều kiện bảo dưỡng, 3 mẫu được nén để dự đoán R_n, 3 mẫu được thí nghiệm mô đun đàn hồi.

Lắp dụng cụ đo mô đun đàn hồi và đồng hồ đo biến dạng phải đặt vị trí sao cho dụng cụ cách mặt trên và mặt đáy của mẫu trụ 1 khoảng cách bằng nhau.

Thí nghiệm đo mô đun đàn hồi với tốc độ tăng tải là 241±34 kPa/s (3.62± 0.6 kN/s) đến 40% lực nén phá hoại mẫu, với lực này mẫu vẫn ở trong giới hạn đàn hồi.

Lần đầu gia tải máy lén đến lực nén 40% $R_{nén}$ sau đó giảm tải trọng gần về 0. Lần tiếp theo khi gia tải quan sát khi đồng hồ đo biến dạng đạt 15×10^{-3} mm ứng với biến dạng tương đối ban đầu $\varepsilon_0=5\times10^{-5}$ thì ta ghi lại chỉ số lực nén trên máy được lực. Cho máy chạy tiếp đến 40% $R_{nén}$ giữ lực trong khoảng 15-30 giây ta đọc trị số trên đồng hồ đo biến dạng theo 2 phương dọc và ngang được $\varepsilon_{d1,}$. Đo tương tự thêm 2 lần.

Khi đo nếu kết quả thí nghiệm quá chênh lệch thì mẫu được tháo ra và xoay thiết bị cùng đồng hồ 1/4 mẫu trụ để đo kiểm chứng.

Mô đun đàn hồi: $E = \dfrac{S_1 - S_2}{\varepsilon_2 - 0.000050}$ (MPa) (3.5)

Trong đó:

E: là mô đun đàn hồi của mẫu (MPa)

S_2: Ứng suất ứng với tải trọng $P_2=40\%P_{max}$

S_1: Ứng suất ứng với tải trọng mà biến dạng dọc ε_1 đạt tới 0.00005

ε_2: là biến dạng dọc tương đối với ứng suất S_2

Hệ số Poisson:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (3.6)$$

Trong đó:

μ: Hệ số Poisson

ε_{t2}: Biến dạng ngang tại tâm mẫu với ứng suất S_2

ε_{t1}: Biến dạng ngang tại tâm mẫu với ứng suất S_1

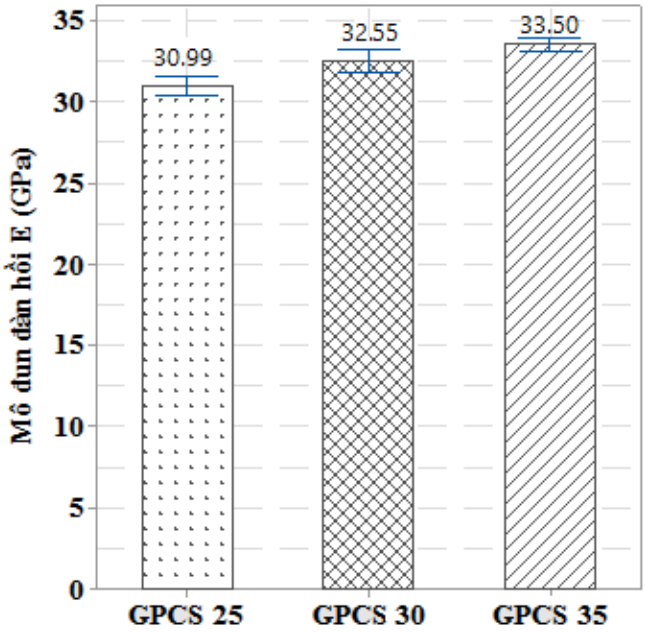
Kết quả thí nghiệm đo mô đun đàn hồi và hệ số Poisson được thể hiện ở Bảng 11, Bảng 12, Bảng 13 theo Phụ lục 1. Kết quả này được sử dụng để xây dựng biểu đồ quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén đặc trưng. Kết quả thí nghiệm của GPC được so sánh với quan hệ mô đun đàn hồi - cường độ nén của

BTXM OPC tính toán theo tiêu chuẩn AASHTO 2012 [42], và công thức thực nghiệm của Hardjito và cộng sự cho bê tông geopolymer tro bay [64].

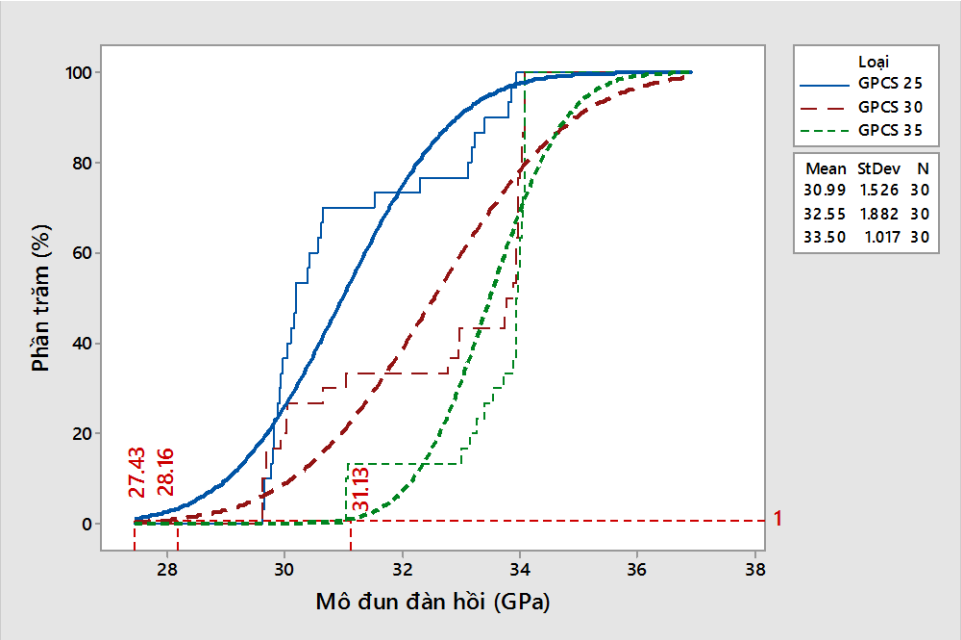
Công thức theo tiêu chuẩn AASHTO 2012 [42]: $E_c = 0.043\rho^{1.5}\sqrt{f_c^{'}}$ (MPa) (3.7)

Công thức thực nghiệm của Hardjito và cộng sự cho bê tông geopolymer [64]:

$$E_c = 2707\sqrt{f_c^{'}} + 5300 \text{ (MPa)} \quad (3.8).$$



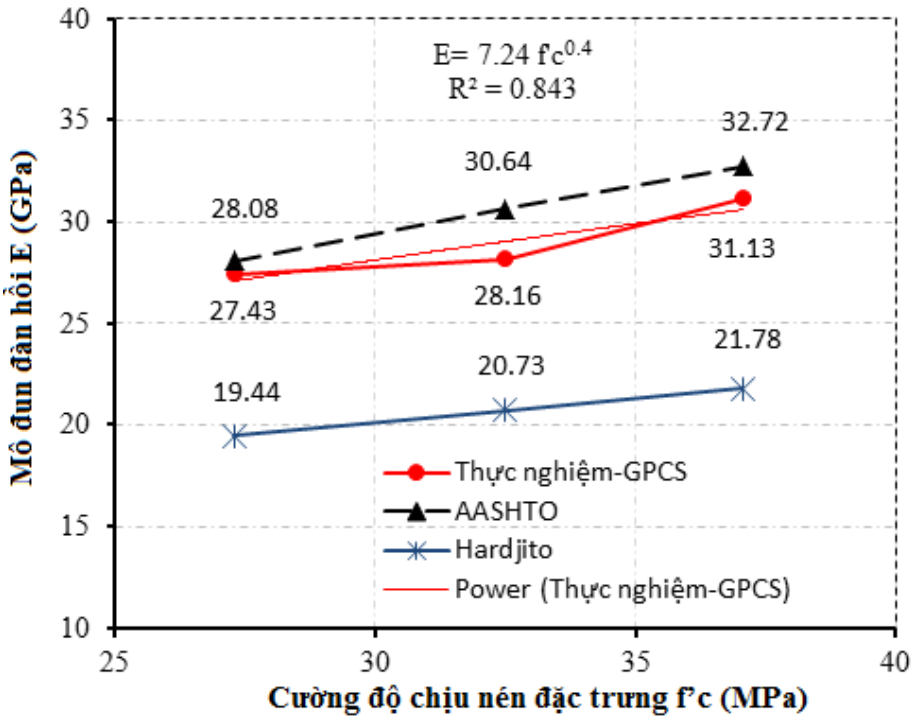
Hình 3.23. Biểu đồ thể hiện kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của GPCS



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

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 có cường độ chịu nén đặc trưng thí nghiệm lần lượt là 27.29; 32.05; 37.06 MPa.

Vì vậy, thông qua các kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của GPCS tìm được phương trình quan hệ với cường độ chịu nén và được so sánh với mô đun đàn hồi của BTXM và bê tông geopolymer sử dụng cốt liệu tự nhiên cùng cấp theo quy định trong tiêu chuẩn của ACI 318-11 [35], ASSHTO-2012 [42] và nghiên cứu của Hardjito [66].



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

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]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng mô đun đàn hồi của vật liệu geopolymer thấp hơn so với mô đun đàn hồi của OPC. Nguyên nhân có thể do đặc tính cấu trúc polymer của vật liệu geopolymer. Tuy nhiên, giá trị mô đun đàn hồi của GPCS thu được lại cao hơn so với mô đun đàn hồi của GPC chế tạo ở Australia

theo kết quả của Hardjito [64]. Kết quả này có thể do thành phần các chất trong chất kết dính tro bay, mô đun đàn hồi của cốt liệu khác nhau. Trên cơ sở kết quả bước đầu của mô đun đàn hồi của GPCS từ đó đánh giá sơ bộ được mức độ áp dụng GPCS cho cấp đường phù hợp.

Đề xuất hàm hồi quy thực nghiệm quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của GPCS: $E = 7.24\ f'_c{}^{0.4}$ với $R^2 = 0.843$ (3.9).

3.6.4. Độ mài mòn

Khả năng chống mài mòn của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép khi làm lớp mặt đường là khả năng của vật liệu chịu tác dụng của lực ma sát của bánh xe khi xe chạy trên đường.

Khả năng chịu mài mòn của GPCS phụ thuộc vào hai yếu tố cơ bản là cường độ nén và độ cứng của cốt liệu. Độ mài mòn là tổn thất khối lượng của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép khi bị mài mòn trên diện tích mặt mẫu bị mài, được xác định theo TCVN 3114 - 93 [7].

Thiết bị thí nghiệm bao gồm: máy mài; cân kỹ thuật chính xác tới 0,1g; thước kẹp; cát mài.

Lấy 06 viên mẫu hình lập phương có kích thước cạnh 70.7 mm cho mỗi loại cường độ nén của GPCS tương ứng, tổng số mẫu thử cần chuẩn bị là 18 mẫu.

Hình 3.26. Mô hình thí nghiệm mài mòn

Cân mẫu chính xác đến 0.1g, trên các mặt mẫu tiến hành đo các cặp cạnh song song từng đôi một của mẫu lập phương.

Rải 20g cát mài khô, rồi đặt mẫu vào khuôn. Tiếp đó đè gối tựa của đòn bẩy lên tâm viên mẫu và dùng quả cân gia tải mẫu đủ áp lực 0.6 daN/cm^2.

Bật cho đĩa quay, sau 30m đường mài (ứng với 30 vòng quay máy) máy sẽ tự động dừng lại. Quét bỏ phần cát cũ, trải đều 20g cát mài mới và bật cho máy quay tiếp. Làm như vậy 5 lần thì đủ 1 chu kì với tổng số 150m đường mài.

Sau một chu kì, nhấc mẫu ra, xoay mẫu 900 quanh trục thẳng đứng, rồi lại mài với chu kì 150m đường mài mới.

Tiến hành như vậy đến khi đủ 4 chu kì (600m đường mài) thì dừng lại, lau sạch rồi đem cân chính xác đến 0.1g.

Độ mài mòn của từng viên mẫu được tính theo công thức

$$M_n = \frac{m_1 - m_2}{F} \qquad (3.10)$$

Trong đó:

m_i là khối lượng viên mẫu trước khi thử, g;

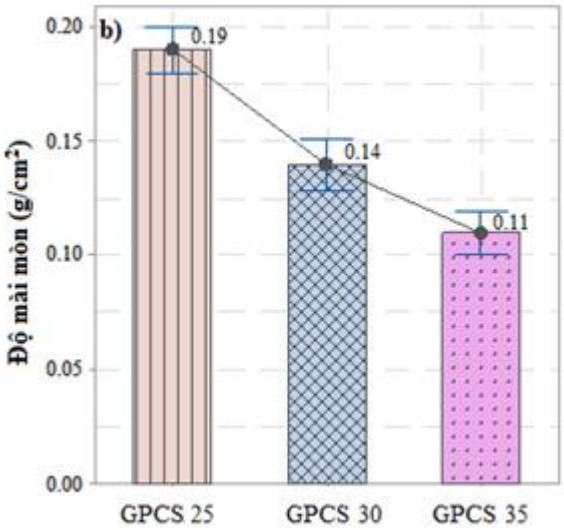
m_2 là khối lượng viên mẫu sau 4 chu kỳ mài, g;

F là diện tích mặt mẫu bị mài, cm^2.

Tiến hành thí nghiệm độ mài mòn của GPCS có cường độ nén thiết kế là 25 MPa, 30MPa, 35MPa. Kết quả thí nghiệm trong Bảng 3.7 và được thể hiện trên biểu đồ quan hệ Hình 3.27.

Bảng 3.7. Kết quả thí nghiệm độ mài mòn của hỗn hợp GPCS

Số mẫu	**Độ mài mòn (g/cm^2)**		
	GPCS 25 (f'c= 25 MPa)	**GPCS 30 (f'c= 30 MPa)**	**GPCS 35 (f'c= 35 MPa)**
1	0.198	0.153	0.115
2	0.186	0.136	0.113
3	0.192	0.142	0.112
4	0.175	0.148	0.094
5	0.202	0.139	0.121
6	0.187	0.122	0.105
Giá trị trung bình	0.19	0.14	0.11
Độ lệch chuẩn (S)	0.010	0.011	0.009
Hệ số phân tán C_v (%)	5.06	7.68	8.53



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

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).

Tiến hành thí nghiệm so sánh độ mài mòn của GPC, GPCS, OPC có cường độ chịu nén đặc trưng là 30MPa. Kết quả thí nghiệm trong Bảng 3.8.

Bảng 3.8. Kết quả thí nghiệm mài mòn của OPC, GPC, GPCS có cùng cường độ chịu nén đặc trưng 30 MPa

Số mẫu	Độ mài mòn (g/cm^2)		
	OPC 30 (f'c= 30 MPa)	GPC 30 (f'c= 30 MPa)	GPCS 30 (f'c= 30 MPa)
1	0.285	0.214	0.153
2	0.278	0.232	0.136
3	0.318	0.252	0.142
4	0.321	0.258	0.148
5	0.293	0.262	0.139
6	0.305	0.222	0.122
Giá trị trung bình	0.30	0.24	0.14
Độ lệch chuẩn (S)	0.018	0.020	0.011
Hệ số phân tán C_v (%)	5.865	8.367	7.680

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].

Dựa vào các kết quả độ mài mòn trên cho thấy thì việc ứng dụng vật liệu GPCS cho mặt đường là hoàn toàn đáp ứng về độ mài mòn theo quy định về kỹ thuật thi công và nghiệm thu mặt đường BTXM trong xây dựng công trình giao thông [3], [4].

Có thể thấy, bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép có độ chống mài mòn rất tốt. Tuy nhiên, trong trường hợp đối với đường cấp cao, thì đây cũng có thể trở thành một hạn chế. Do đó, cần xem xét đến vấn đề tạo nhám mặt đường để cải thiện ma sát của bề mặt lớp GPCS.

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

Co ngót là sự thay đổi thể tích của bê tông theo thời gian. Không giống như từ biến, co ngót không phụ thuộc vào ngoại lực tác dụng lên bê tông. Có nhiều tác giả đã phân loại các dạng co ngót. Theo Neville A.M [82] đã chỉ ra có 3 loại co ngót gồm: co ngót dẻo, co ngót do cacbonat hóa và co ngót khô. Co ngót dẻo xảy ra khi bê tông bị mất nước hay bốc hơi nước do bị hút bởi lớp đất hay bê tông phía dưới. Co ngót do cacbonat hóa xảy ra khi cacbon đioxit phản ứng thủy hóa với xi măng. Co ngót khô xảy ra khi mất nước trong các lỗ rỗng của gel xi măng trong suốt quá trình khô. Co ngót khô đóng vai trò quan trọng trong co ngót tổng cộng của bê tông. Gilbert [62] lại chia co ngót thành 4 loại co ngót gồm: Co ngót dẻo, co ngót hóa học, co ngót nhiệt và co ngót khô. Co ngót dẻo cũng được định nghĩa như Neville, xảy ra trong bê tông ướt hoặc khi bê tông vẫn ở trạng thái dẻo do mất nước do bay hơi hoặc do sự hút nước của lớp bên dưới. Co ngót hóa học được gây ra bởi các phản ứng hóa học khác nhau trong xi măng, bao gồm cả co ngót do hydrat hóa. Trong khi co ngót nhiệt có liên quan trực tiếp đến việc giải phóng nhiệt của phản ứng thủy hóa khi xi măng. Co ngót khô là sự giảm thể tích chủ yếu do mất nước trong quá trình khô. Co ngót khô thường chiếm tỷ lệ lớn nhất trong tổng độ co ngót dài hạn. Hiện nay, ngoại trừ cách xác định co ngót tổng cộng và co ngót khô tính

theo sự thay đổi chiều dài mẫu thì cơ chế và cách xác định từng loại co ngót còn lại của BTXM vẫn chưa được làm rõ.

Bê tông geopolymer có cơ chế co ngót cũng hoàn toàn tương tự như các loại vật liệu sử dụng các chất kết dính vô cơ. Co ngót của bê tông geopolymer bao gồm: Co ngót khô và co ngót nội sinh (co ngót liên kết). Tuy nhiên, chi tiết về các cơ chế này đến nay vẫn chưa thực sự được làm rõ.

Co ngót khô là sự giảm thể tích của bê tông do mất nước vì nước bị thoát ra ngoài bề mặt do rỉ hoặc có thể bị hấp thụ do môi trường xung quanh. Mức độ co ngót khô phụ thuộc vào độ rỗng bên trong của hỗn hợp. Mối liên kết giữa độ rỗng và nước bên trong bị ảnh hưởng bởi sự dịch chuyển của độ ẩm như sự rò rỉ nước gây nên co ngót khô. Độ lớn co ngót khô phụ thuộc nhiều vào lượng nước mất và tỷ lệ bay hơi. Trong điều kiện thực tế, sự mất nước không bao giờ kết thúc, đầu tiên vì độ ẩm tương đối thường khá cao, sau đó là do độ lớn của các hạt và sự mất nước xảy ra rất chậm.

Co ngót nội sinh (co ngót liên kết) là sự co ngót do sự thay đổi bên trong khi không có sự mất mát độ ẩm với môi trường xung quanh. Yếu tố chính ảnh hưởng đến co ngót nội sinh là co ngót hóa học do phản ứng geopolymer hóa. Khi thay đổi vật liệu thành phần chế tạo bê tông thường sẽ dẫn đến sự thay đổi tương tác hóa lý và tạo nên cơ chế, kết quả co ngót mới.

Để xác định co ngót khô của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép bằng cách tìm hiệu giữa co ngót tổng cộng và co ngót liên kết theo tiêu chuẩn UNI11307:2008 [100].

Thiết bị thí nghiệm bao gồm: Khuôn thép có kích thước lòng khuôn 100x100x500 mm; Đồng hồ đo giới hạn đo là 5mm, độ chia nhỏ nhất 0.001 mm; Thanh hiệu chuẩn bằng kim loại dài 544 mm; Các đầu đo kim loại gắn vào bê tông chi tiết được thể hiện ở Hình 3.28.

Mẫu thí nghiệm được đúc trong khuôn tiêu chuẩn có gắn đầu đo kim loại cố định vào 2 đầu bê tông. Mẫu đã rắn chắc đảm bảo yêu cầu thì tháo khuôn và dùng keo cố định chắc lại đầu đo kim loại trong khối bê tông. Mỗi loại bê tông GPCS, GPC, OPC được bảo dưỡng ở điều kiện nhiệt độ phòng thí nghiệm với độ ẩm phù

hợp. Hai loại co ngót được đo trực tiếp: độ co ngót tổng cộng (khi mẫu bê tông có sự trao đổi độ ẩm với môi trường) và độ co ngót liên kết (khi các mẫu được bọc kín bằng giấy dán nhôm-Aluminum để đảm bảo mẫu không bị tác động bởi môi trường xung quanh). Sau những khoảng thời gian nhất định đem ra đọc chỉ số chênh lệch chiều dài của mẫu với thanh chuẩn.

Hình 3.28. Trình thự thí nghiệm đo co ngót

Độ co xác định theo công thức: $\varepsilon = \dfrac{\Delta l_1 - \Delta l_0}{l_0}$ (3.11)

Trong đó:

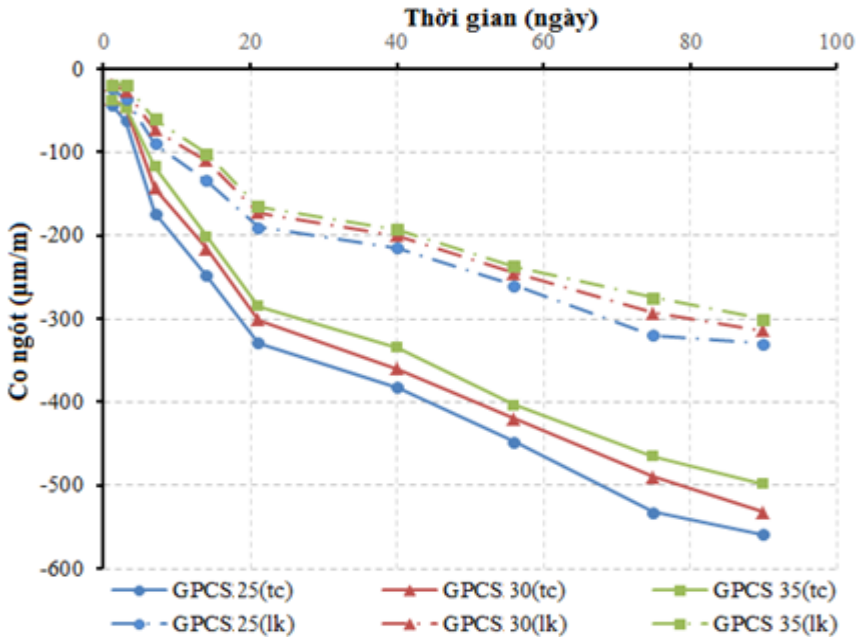
ε : Độ co ngót của mẫu ở ngày tuổi thứ i, mm/mm hoặc mm/m;

Δl_0 : Chênh lệch chiều dài ban đầu của mẫu so với thanh chuẩn (mm);

Δl_i : Chênh lệch chiều dài mẫu sau khi co ngót so với thanh chuẩn ở thời điểm i (mm);

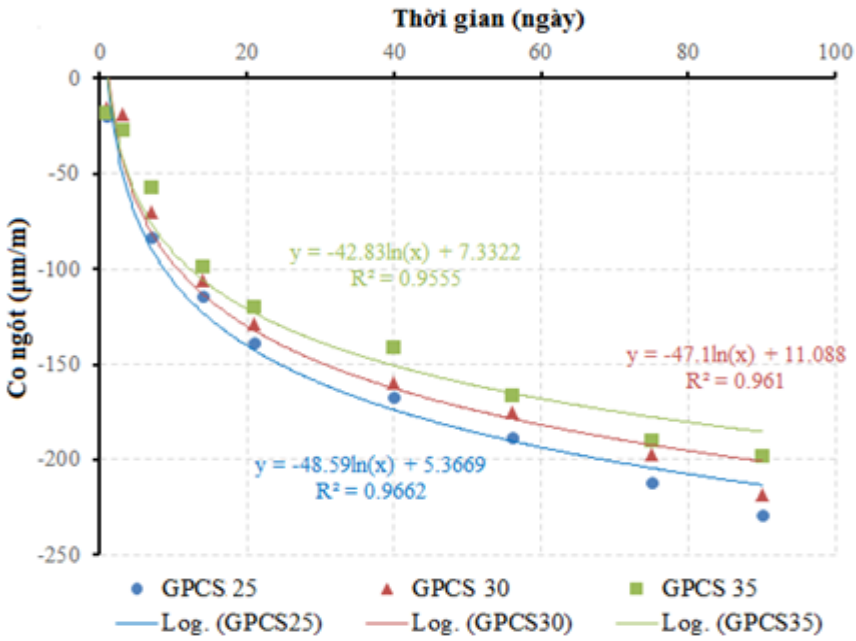
l_0 = 500 mm: Chiều dài mẫu chuẩn ban đầu bằng chiều dài lòng khuôn.

Để xác định co ngót khô của bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép bằng cách tìm hiệu giữa co ngót tổng cộng và co ngót liên kết.



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

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



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

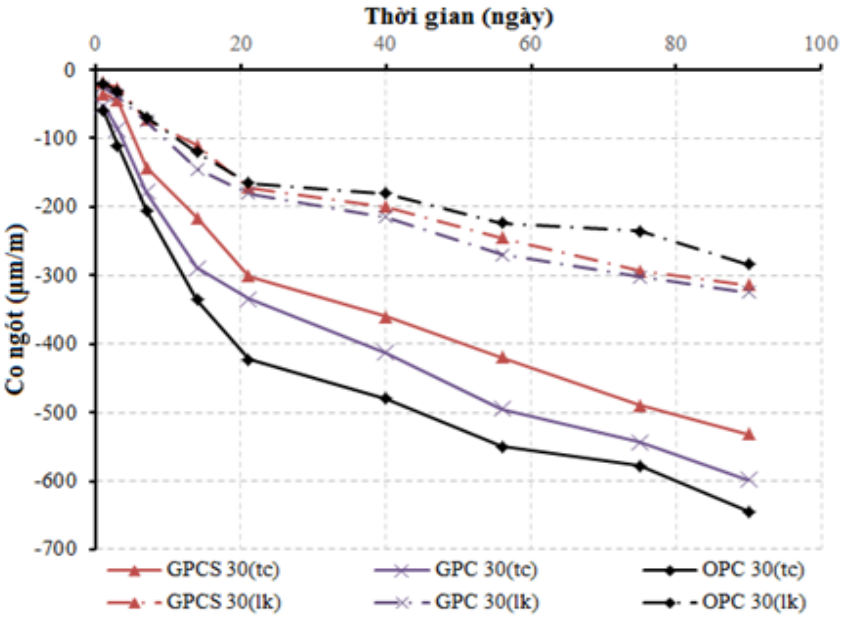
Từ kết quả trên Hình 3.29, Hình 3.30 cho thấy sự thay đổi chiều dài mẫu của các mẫu bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35, không có nhiều khác biệt rõ rệt. Tuy nhiên, có thể nhận thấy xu hướng chung là co ngót phát triển mạnh trong

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):

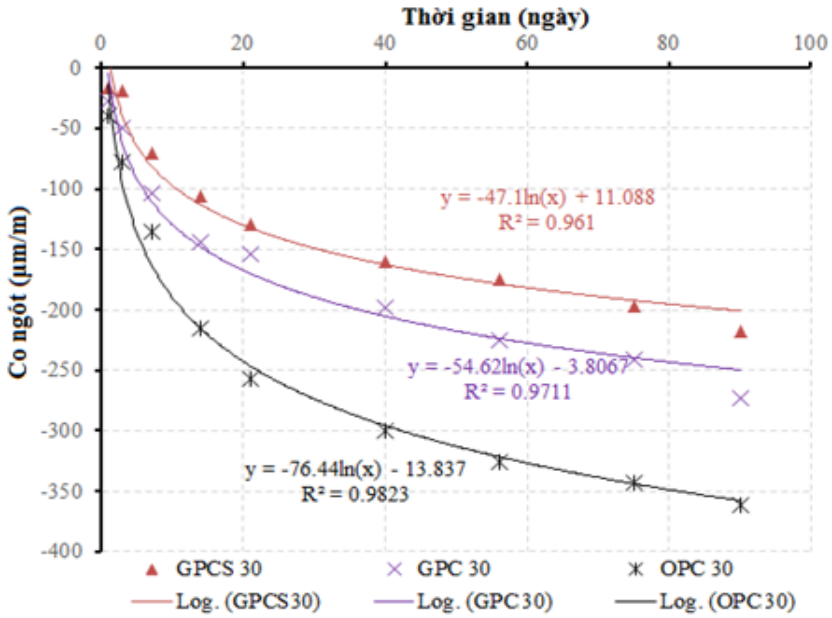
GPCS 25: $\varepsilon_t = -48.59 \ln(t) + 5.37$ với $R^2 = 0.966$ (3.12)

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 3.31. 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

Mặt khác, cũng theo dõi diễn biến độ co ngót theo thời gian, kết quả cho thấy sự thay đổi chiều dài mẫu GPC và GPCS thường thấp hơn so với OPC (Hình 3.31, Hình 3.32). Davidovits [55], [54] cũng đưa ra một giả thuyết có thể giải thích cho vấn đề này. Sự khác biệt này liên quan đến quá trình "polymer hóa". Theo khái niệm này, các nguyên tử silic và nhôm trong tro bay không bị hòa tan hoàn toàn bởi dung dịch kiềm kích hoạt. "Polyme hóa" chỉ diễn ra trên bề mặt của các nguyên tử là đủ để tạo ra các khối gel cần thiết để tạo ra chất kết dính geopolymer. Do đó, phần bên trong của các nguyên tử không bị phá hủy và vẫn ổn định. Từ đó, chúng có thể hoạt động như một hạt cốt liệu vi mô trong hỗn hợp và điều này có thể làm tăng hàm lượng cốt liệu trong bê tông. Đối với bê tông OPC, hàm lượng cốt liệu sẽ ảnh hưởng đến độ co ngót. Co ngót của bê tông sẽ giảm khi tăng hàm lượng cốt liệu. Tỷ lệ cốt liệu trong hỗn hợp bê tông geopolyme tro bay tương tự như trong bê tông OPC [90], [91]. Tuy nhiên, sự hiện diện của cốt liệu vi mô do khối gel polymer tạo ra cho hiệu quả làm tăng hàm lượng cốt liệu trong bê tông. Nói cách khác, sự hiện diện của cốt liệu vi mô làm tăng hiệu ứng hạn chế của cốt liệu đối với sự co ngót khô.

Mặt khác, qua so sánh kết quả cho thấy co ngót GPCS 30 thấp hơn so với GPC 30. Điều này cũng có thể được giải thích thông qua ảnh hưởng của cốt liệu. Hàm lượng cốt liệu cao hơn dẫn đến co ngót của bê tông nhỏ hơn và cốt liệu có mô đun độ lớn cao hơn hoặc bề mặt cứng hơn có khả năng chống co ngót của bê tông cao hơn (Neville, 2000 [82]). Do đó, cốt liệu xỉ thép với các đặc tính tốt hơn về độ cứng, mô đun dẫn đến co ngót của bê tông geopolymer sử dụng cốt liệu xỉ thép cao hơn bê tông geopolymer cốt liệu thông thường.

Khi đối chiếu kết quả ở Hình 3.31 có thể nhận thấy co ngót nội sinh là nguyên nhân chính tạo ra sự khác biệt của co ngót tổng cộng và co ngót khô giữa hai loại bê tông. Co ngót tổng cộng của OPC cao hơn so với GPC và GPCS. Tuy nhiên, co ngót nội sinh của OPC thấp hơn so với GPCS và GPC. Do đó, kết quả co ngót khô của OPC lại cao hơn so với GPC và GPCS.

Ở thời điểm đầu, mức độ co ngót phát triển mạnh nhưng cũng chỉ sau một thời gian thì quá trình này giảm. 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: $\varepsilon_t = -76.44 \ln(t) - 13.84$ với $R^2 = 0.982$ (3.15)

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

Như vậy, với thời gian 20 năm tuổi co ngót khô tối đa của GPCS30 đạt được 408μm/m, GPC 30 đạt được 490 μm/m, OPC 30 đạt được 694 μm/m.

Từ các kết quả thực nghiệm đạt được về co ngót của bê tông geopolymer sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép khi so sánh với các loại bê tông đối chứng khác trong nghiên cứu này theo UNI11307:2008 [100]. Các kết luận và kiến nghị sau có thể được rút ra.

Xu hướng chung là co ngót phát triển mạnh trong khoảng 21 ngày đầu và thời gian sau giảm dần. Quy luật phát triển co ngót khô của mỗi loại bê tông được rút ra. Co ngót khô GPCS 35 thấp nhất, cường độ chịu nén càng tăng thì co ngót khô càng thấp. Co ngót của GPCS thấp hơn so với GPC và OPC khi có cùng một cấp cường độ chịu nén. Để có thể ứng dụng GPCS một cách phù hợp ở Việt Nam cần phải tiến hành thí nghiệm, xác định sự co ngót của GPCS theo điều kiện khí hậu cụ thể của từng khu vực.

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

Các loại vật liệu xây dựng thường thay đổi kích thước, dẫn đến thay đổi thể tích khi chịu tác động của nhiệt độ trong khi áp suất được giữ không đổi. BTXM cũng điển hình cho sự co, nở thể tích khi nhiệt độ môi trường giảm hoặc tăng. Hệ số giãn nở nhiệt của bê tông được định nghĩa là một đại lượng vật lý đặc trưng cho sự thay đổi kích thước khi có quá trình trao đổi nhiệt. Sự thay đổi kích thước không đồng đều do nhiệt sẽ tạo ra ứng suất kéo trong khối bê tông. Khi ứng suất này vượt quá giới hạn thì bê tông sẽ bị nứt. Hệ số giãn nở do nhiệt thể hiện độ dốc của mối quan hệ giữa biến dạng theo và nhiệt độ tác động lên bê tông.

Sự hình thành và phân bố trường nhiệt độ, ứng suất trong lòng khối bê tông trên kết cấu rất phức tạp. Quá trình này phụ thuộc vào các yếu tố nội tại, cấu trúc của bê tông cũng như các yếu tố bên ngoài liên quan đến môi trường và công nghệ thi công [22]. Các yếu tố nội tại của bê tông có thể kể đến, gồm: thông số về nhiệt của vật

liệu; loại và hàm lượng chất kết dính; các loại cốt liệu; tỉ lệ thành phần cấp phối; nhiệt độ bê tông khi đổ; nhiệt dung riêng của bê tông; tốc độ tỏa nhiệt; hình dạng; kích thước kết cấu. Các yếu tố bên ngoài bao gồm như: Các thông số về môi trường (nhiệt độ, độ ẩm, tốc độ gió); phương pháp bảo dưỡng bê tông; điều kiện các bề mặt tiếp xúc (ván khuôn, nền đất); nhiệt độ tại mặt thoáng của khối bê tông; hệ số trao đổi nhiệt. Hệ số giãn nở do nhiệt của bê tông thường rất nhỏ và khó xác định.

Cấu trúc của bê tông có 3 pha, gồm cốt liệu, chất kết dính đóng rắn và lỗ rỗng. Đối với BTXM, cốt liệu thường là đá dăm và cát, những vật liệu có hệ số giãn nở nhiệt thấp. Ngược lại, đá xi măng là sản phẩm thủy hóa của xi măng với nước, tạo nên các sản phẩm chủ yếu của C-S-H, cùng với cấu trúc lỗ rỗng được cho là khá nhạy cảm về thể tích dưới tác động của sự thay đổi của nhiệt độ [19]. Bê tông geopolymer sử dụng là xỉ thép một mặt có quan hệ thể tích - nhiệt khác với đá dăm và cát. Đồng thời chất kết dính geopolymer, do có cấu trúc mạch polymer bền vững nên có nhiều khác biệt so với cấu trúc tinh thể C-S-H trong đá xi măng, dẫn tới sẽ có ứng xử thể tích do nhiệt khác biệt.

Luận án trình bày về hệ số giãn nở do nhiệt của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép với các cấp cường độ chịu nén khác nhau. Kết quả thí nghiệm được so sánh với hệ số giãn nở do nhiệt của bê tông gepolymer tro bay sử dụng cốt liệu tự nhiên (đá dăm, cát sông) và BTXM truyền thống.

Hệ số giãn nở nhiệt của bê tông (CTE) được xác định theo tiêu chuẩn thí nghiệm AASHTO T336 [41]. Thiết bị chính (Hình 3.33) được sử dụng bao gồm: Bể nước ổn định nhiệt (nước trong bể có thể được thay đổi nhiệt độ trong khoảng từ 10°C đến 50°C, với độ chính xác 0.1^{o}C); LVDT để đo biến dạng, đầu đo nhiệt độ với độ chính xác đạt chuẩn do KYOWA ElECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD cung cấp; Thiết bị thu tín hiệu đa kênh UCAM 60B cùng các cáp kết nối chuyên dụng; Máy tính; Khung giữ mẫu (Bản mặt, bản đáy và thanh đỡ dọc làm bằng thép).

Mẫu thí nghiệm có kích thước hình trụ tròn đường kính 100 mm và chiều cao 200mm, được chế bị cho 3 loại bê tông bao gồm: Bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép có cường độ chịu nén đặc trưng thiết kế lần lượt là 25; 30; 35 MPa (GPCS 25; GPCS 30; GPCS 35); Bê tông geopolymer (GPC 30) sử

dụng cốt liệu tự nhiên (đá dăm, cát sông) và BTXM truyền thống (OPC 30) có cùng cường độ chịu nén f'c = 30 MPa.

Thành phần cấp phối thí nghiệm của các loại bê tông bao gồm GPCS 25; GPCS 30; GPCS 35 và GPC 30; OPC 30 được sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện ở Bảng 2.26 và Bảng 3.2.

Mẫu trước khi thí nghiệm, được đem đi mài phẳng sao cho các mặt cắt song song với nhau. Mẫu được ngâm trong một bể chứa nước ở 23 ± 2°C ít nhất 48 giờ. Tiến hành vớt mẫu, lau khô bề mặt mẫu, để khô ráo bên ngoài. Sau đó, đặt mẫu vào trong bể ổn định nhiệt độ.

Đặt nhiệt độ bể chứa là 10°C, duy trì nhiệt độ này trong 1 giờ để đạt được cân bằng nhiệt trong mẫu. Cân bằng nhiệt trong mẫu được giả định là khi thu được giá trị LVDT không đổi sau khi ghi liên tục cứ 10 phút một lần trong khoảng thời gian 1.5h. Ghi lại số đọc nhiệt độ từ (các) cảm biến chính xác đến 0.1°C. Ghi lại LVDT đọc chính xác đến 0.00025 mm.

Sau đó tăng nhiệt bể đến 50°C, quá trình tăng nhiệt độ tối thiểu khoảng 2 giờ, sau đó duy trì nhiệt độ trong bể khoảng 1 giờ cho đến khi đạt trạng thái cân bằng trong mẫu và ghi lại kết quả tương tự như quá trình trên.

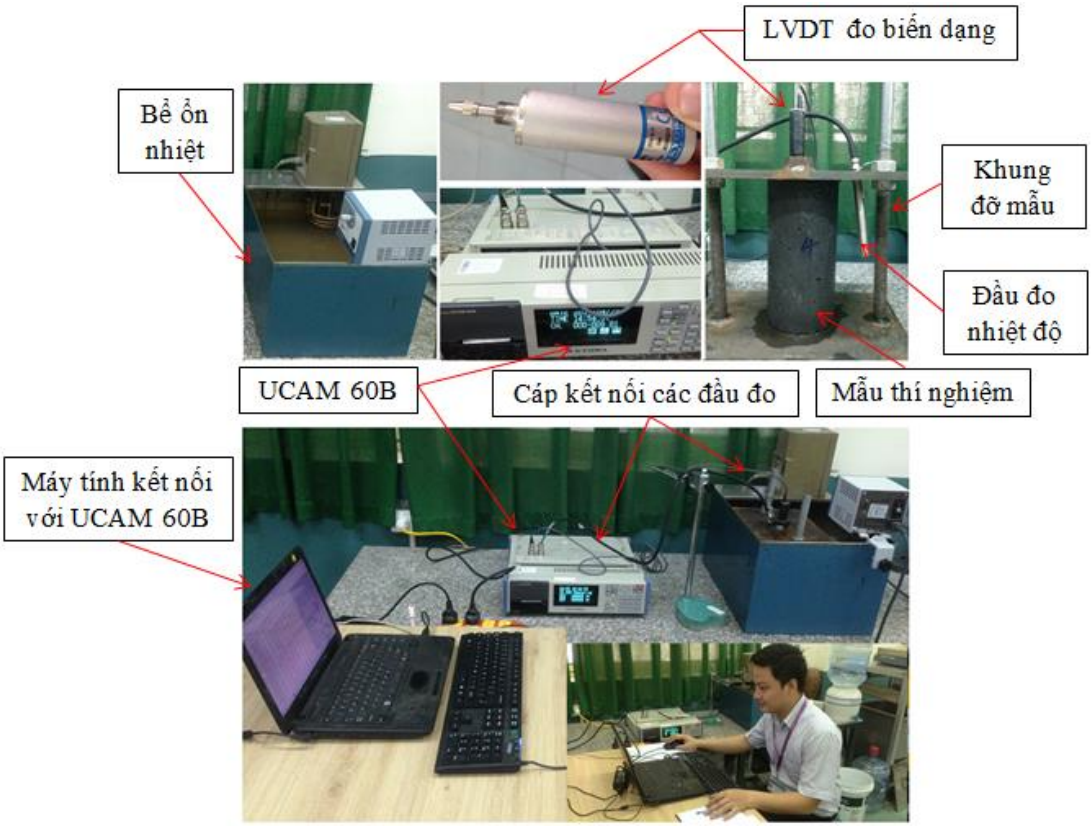
Lại hạ nhiệt độ trong bể xuống 10°C để mẫu đạt cân bằng nhiệt và ghi lại các giá trị LVDT tương tự như trên.

Các giá trị CTE_1 thu được khi nhiệt độ tăng từ 10^oC đến 50^oC trong khi các CTE_2 thu được khi nhiệt độ giảm từ 50^oC đến 10^oC. Sau đó, kiểm tra sự khác biệt giữa các giá trị CTE_1 và CTE_2 trong hai quá trình tăng và giảm nhiệt độ trên. Nếu chênh lệch giữa hai giá trị CTE này nhỏ hơn 0.3 $\mu m/^oC$, thì giá trị CTE của mẫu thử là giá trị trung bình của hai giá trị CTE_1 và CTE_2. Nếu chênh lệch giữa các CTE_1 và CTE_2 lớn hơn 0.3 $\mu m/^oC$ phép thử được lặp lại cho đến khi chênh lệch nằm trong phạm vi sai số.

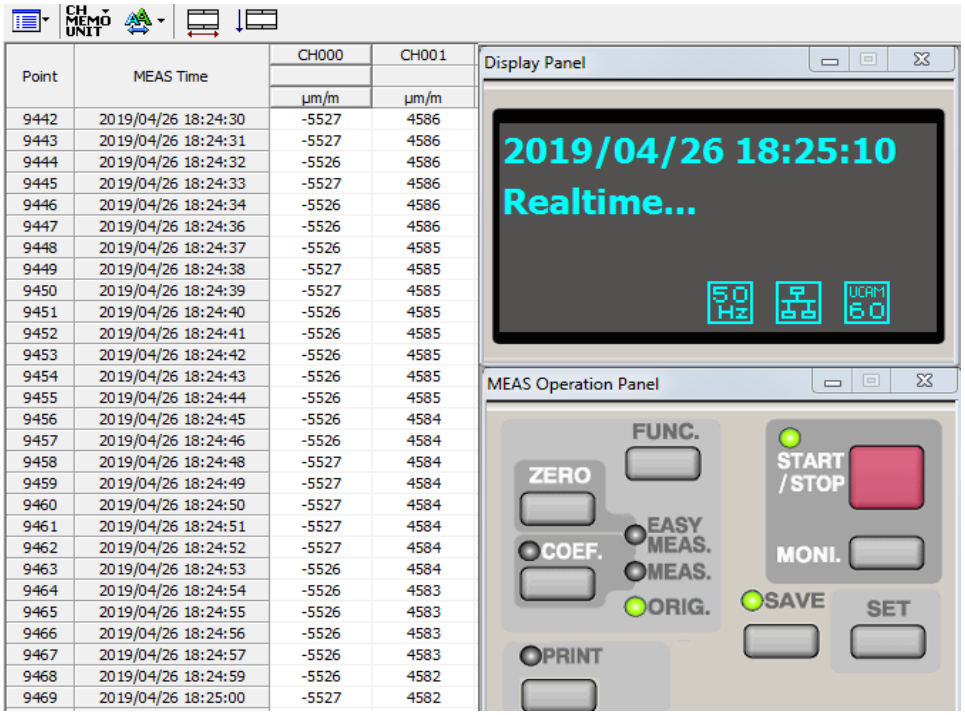
Hệ số giãn nở nhiệt của bê tông (CTE) được xác định theo công thức sau:

$$CTE = (\Delta L / L_0) / \Delta T \qquad (3.17)$$

Trong đó: ΔL là chiều dài thay đổi mẫu đo; L_o là chiều dài ban đầu đo được của mẫu đo; ΔT là sự chênh lệch nhiệt độ.



Hình 3.33. Các thiết bị thí nghiệm dùng để xác định CTE



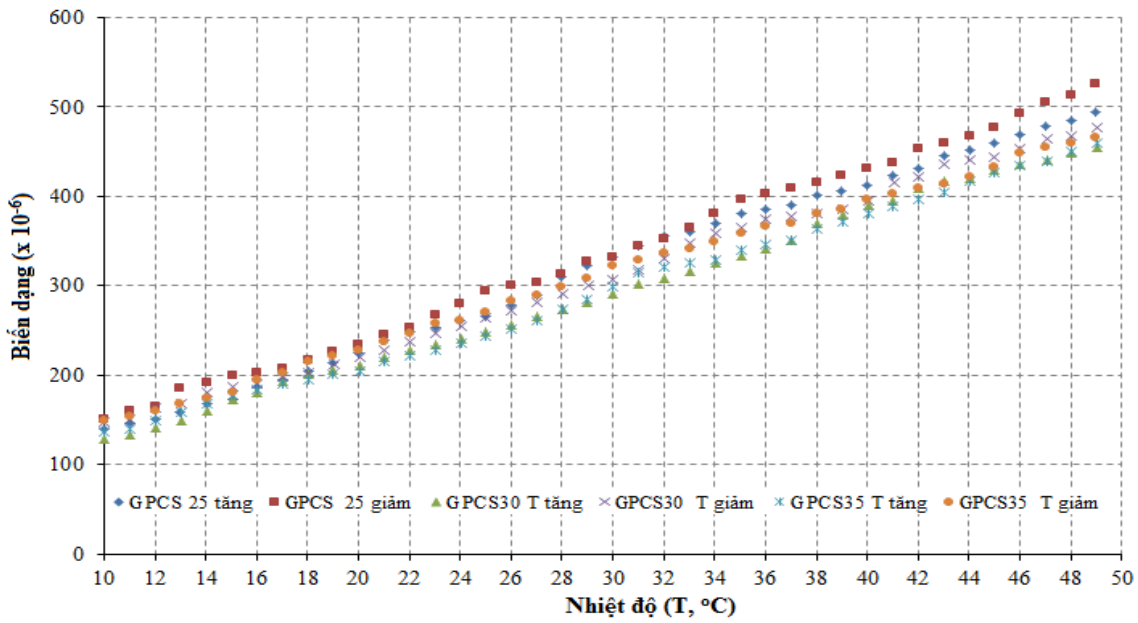
Point	MEAS Time	CH000	CH001
		μm/m	μm/m
9442	2019/04/26 18:24:30	-5527	4586
9443	2019/04/26 18:24:31	-5527	4586
9444	2019/04/26 18:24:32	-5526	4586
9445	2019/04/26 18:24:33	-5527	4586
9446	2019/04/26 18:24:34	-5526	4586
9447	2019/04/26 18:24:36	-5526	4586
9448	2019/04/26 18:24:37	-5526	4585
9449	2019/04/26 18:24:38	-5527	4585
9450	2019/04/26 18:24:39	-5527	4585
9451	2019/04/26 18:24:40	-5526	4585
9452	2019/04/26 18:24:41	-5526	4585
9453	2019/04/26 18:24:42	-5526	4585
9454	2019/04/26 18:24:43	-5526	4585
9455	2019/04/26 18:24:44	-5526	4585
9456	2019/04/26 18:24:45	-5526	4584
9457	2019/04/26 18:24:46	-5526	4584
9458	2019/04/26 18:24:48	-5527	4584
9459	2019/04/26 18:24:49	-5527	4584
9460	2019/04/26 18:24:50	-5527	4584
9461	2019/04/26 18:24:51	-5527	4584
9462	2019/04/26 18:24:52	-5527	4584
9463	2019/04/26 18:24:53	-5526	4584
9464	2019/04/26 18:24:54	-5526	4583
9465	2019/04/26 18:24:55	-5526	4583
9466	2019/04/26 18:24:56	-5526	4583
9467	2019/04/26 18:24:57	-5526	4583
9468	2019/04/26 18:24:59	-5526	4582
9469	2019/04/26 18:25:00	-5527	4582

Hình 3.34. Dữ liệu biến dạng theo nhiệt độ được ghi lại trên máy tính bằng phần mềm của UCAM60

Kết quả thí nghiệm thu được hiệu chuẩn với các đầu đo biến dạng, đầu đo nhiệt độ và tiến hành loại bỏ sai số thô theo ASTM E178 [33]. Chi tiết các kết quả được tổng hợp ở Bảng 3.9 và Hình 3.35; Hình 3.37.

Bảng 3.9. Bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm CTE của các loại bê tông

Loại	Giá trị trung bình με/°C	M1 με/°C	M2 με/°C	M3 με/°C	Độ lệch chuẩn με/°C	Độ phân tán, %
OPC 30	10.42	10.26	10.92	10.08	0.44	4.24
GPC 30	9.91	9.72	9.65	10.36	0.39	3.95
GPCS 30	8.65	8.42	8.58	8.95	0.27	3.14
GPCS 25	9.53	9.68	9.97	8.94	0.53	5.57
GPCS 35	8.34	8.16	8.23	8.63	0.25	3.04

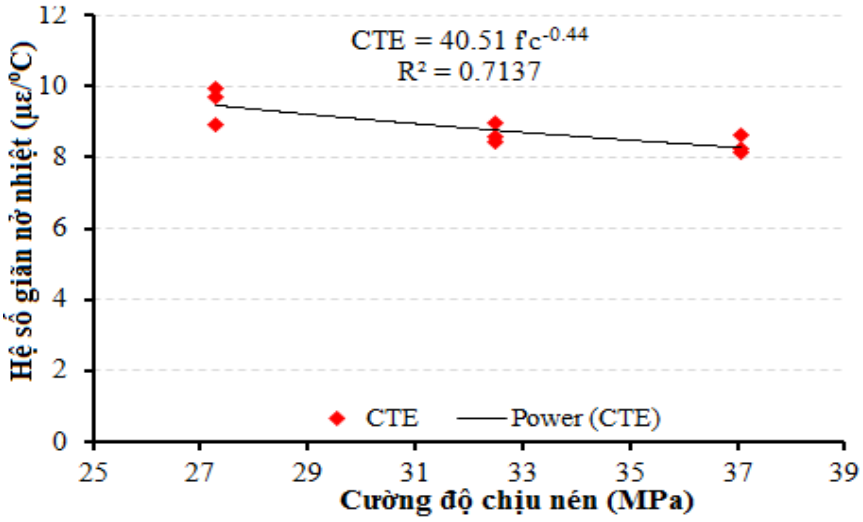


Hình 3.35. Biểu đồ quan hệ giữa biến dạng theo nhiệt độ của các loại bê tông GPCS 25, GPCS 30, GPCS 35

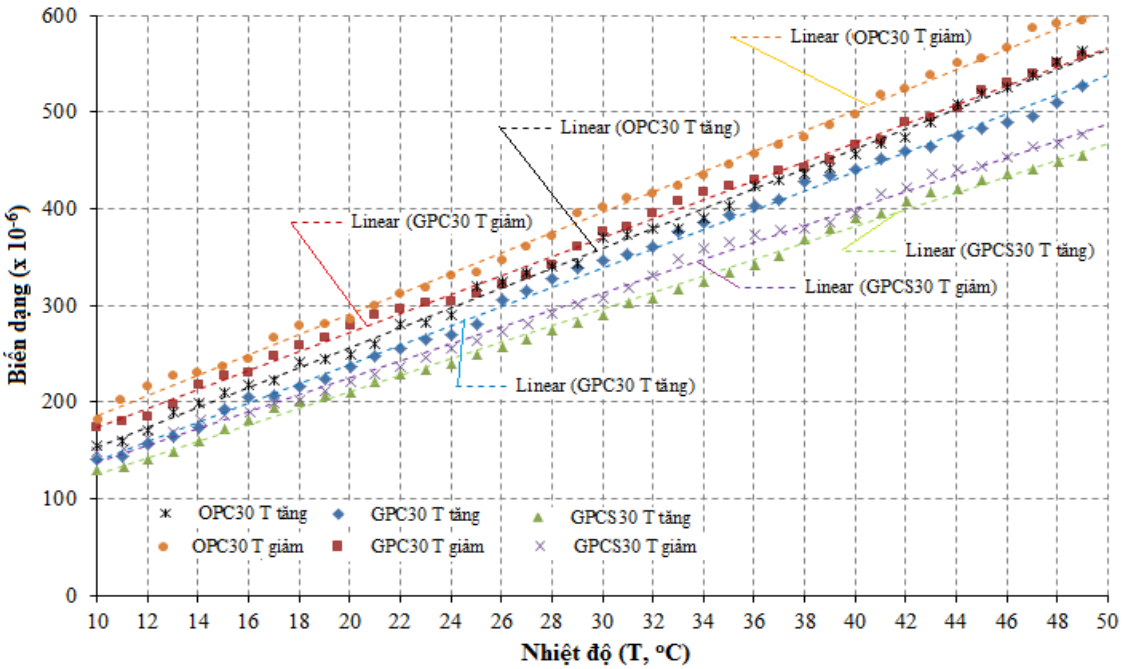
Với 3 hỗn hợp bê tông geopolymer đang xét GPCS25, GPCS30, GPCS35, kết quả CTE thu được dao động trong khoảng 8.34 đến 9.53 με/°C. Cường độ bê tông GPCS càng cao thì xu hướng của hệ số giãn nở nhiệt CTE càng nhỏ nhưng chưa rõ rệt vì cường độ chịu nén đặc trưng GPCS chênh nhau không nhiều. Tuy nhiên, để nghiên cứu rõ hơn nữa về vấn đề này thì cần khảo sát với phạm vi nghiên cứu rộng hơn và khoảng chênh giữa các cấp bê tông cần lớn hơn để nhận thấy rõ sự khác biệt.

Phương trình hồi quy thực nghiệm giữa hệ số giãn nở nhiệt (CTE) với cường độ chịu nén đặc trưng thực nghiệm GPCS 25 (f'c= 27.29 MPa); GPCS 30 (f'c= 32.50 MPa); GPCS 35 (f'c= 37.06 MPa) 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.

$$CTE = 40.51\ f'c^{-0.44} \text{ với } R^2 = 0.7137 \quad (3.18)$$



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



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

Hình 3.37 cũng thể hiện quan hệ biến dạng theo nhiệt độ của bê tông gepolymer tro bay cốt liệu tự nhiên (GPC 30) và BTXM truyền thống (OPC 30) cùng cấp. Kết quả cho thấy CTE của GPC 30 cũng gần tương tự với OPC30. Kết quả này cũng tương đồng với các kết luận của các tác giả Hajito, Davidoit, Rangan...[55], [51]. Kết quả CTE của (GPCS 30) sử dụng cốt liệu xỉ thép đạt giá trị thấp nhất là 8.65 $\mu\varepsilon/^{o}C$. CTE của (OPC 30) và (GPC 30) khi sử dụng cốt liệu thông thường lần lượt là 10.42 và 9.91$\mu\varepsilon/^{o}C$. Nguyên nhân có thể do sử dụng cốt liệu xỉ thép đã làm giảm độ giãn nở. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu của tác giả như Neville và Brooks [82]. Nghiên cứu đã chỉ ra hệ số CTE phụ thuộc vào loại cốt liệu, thời gian xác định, điều kiện môi trường và chu trình thay đổi nhiệt độ. Do cốt liệu chiếm một phần đáng kể theo thể tích trong thành phần hỗn hợp bê tông, nên mức độ thay đổi hàm lượng, tính chất vật liệu của cốt liệu sẽ ảnh hưởng nhiều đến sự biến dạng do nhiệt của bê tông. Từ các nghiên cứu [81], đã chỉ ra mối quan hệ tuyến tính giữa lượng dùng cốt liệu lớn và hệ số CTE, hàm lượng và loại cốt liệu ảnh hưởng lớn đến CTE. Do sự biến thiên của CTE phụ thuộc vào nhiều vào loại vật liệu sử dụng mà chủ yếu là do cốt liệu.

Vì vậy, các kết quả thí nghiệm được trình bày ở trên đã cho thấy ảnh hưởng của loại cốt liệu, loại chất kết dính, cường độ chịu nén đến hệ số giãn nở nhiệt của bê tông. Điều này sẽ góp phần hiệu quả cho việc tính toán kích thước hình học của cấu kiện, giảm được vết nứt do nhiệt và tăng tuổi thọ công trình.

3.9. Kết luận chương 3

Nội dung Chương này đã thí nghiệm và làm rõ các tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép phục vụ cho việc tính toán thiết kế, thi công mặt đường cứng ở Việt Nam và có đối chứng với các mẫu BTXM truyền thống (OPC) và các mẫu bê tông geopolymer tro bay sử dụng đá dăm và cát tự nhiên. Từ các kết quả thực nghiệm thu được có thể rút ra một số kết luận sau:

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.

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 211.1-91 [43].

Hàm hồi quy thực nghiệm cường độ chịu nén theo thời gian (trong phạm vi là 365 ngày) của bê tông gepolymer tro bay cốt liệu xỉ thép ứng với các cấp bê tông 25, 30, 35 MPa

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

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

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

Hàm hồi quy thực nghiệm quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của GPCS: $f_r = 0.196\ f'_c{}^{0.9}$ với $R^2 = 0.958$

Hàm hồi quy thực nghiệm quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của GPCS: $E = 7.24\ f'_c{}^{0.4}$ với $R^2 = 0.843$

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.

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).

Đề xuất hàm hồi quy quan hệ giữa co ngót khô theo thời gian (trong phạm vi 90 ngày) của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép (GPCS) với các cường độ đặc trưng 25, 30, 35 MPa và cho BTXM truyền thống (OPC), bê tông geopolymer sử dụng cốt liệu tự nhiên (GPC) có cấp cường độ chịu nén đặc trưng là 30 MPa.

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 $R^2 = 0.971$

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 $\mu\varepsilon/^oC \div 9.53\ \mu\varepsilon/^oC$) thấp hơn so với OPC (10.42 $\mu\varepsilon/^oC$) và GPC (9.91 $\mu\varepsilon/^oC$).

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

Từ những kết quả nghiên cứu thực nghiệm hiện trường ở Chương 2, Chương 3 đã cho thấy có thể sử dụng xỉ thép hoàn toàn có thể thay thế cốt lớn và nhỏ (đá dăm và cát sông) trong việc chế tạo bê tông geopolymer, các tính chất của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép trong xây dựng mặt đường đạt được tương tự như BTXM truyền thống thậm chí còn tốt hơn. Phần này tiếp tục nghiên cứu cơ sở khoa học và thực tiễn để đề xuất các dạng kết cấu mặt đường điển hình sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật nhằm giảm thiểu tác động môi trường và tiết kiệm tài nguyên. Căn cứ trên cơ sở đó, phạm vi nghiên cứu của luận án với mục tiêu của đề tài là đưa ra được kết cấu mặt đường cứng có cả lớp mặt, móng đều hoàn toàn sử dụng các loại chất thải rắn và không sử dụng chất kết dính gia cố xi măng Portland góp phần bảo vệ môi trường và tiết kiệm tài nguyên.

Kết cấu mặt đường hợp lý được đề xuất phải đảm bảo một số các yêu cầu cơ bản như cường độ, độ bằng phẳng, độ nhám và khả năng chịu mài mòn, ngoài ra còn có việc lựa chọn loại vật liệu sử dụng và bố trí đúng vị trí và chức năng của nó để phát huy tối đa ưu điểm từng loại vật liệu, đồng thời việc sử dụng và lựa chọn vật liệu còn phải xét đến tổng hợp các điều kiện khác có liên quan: về công nghệ thi công, về kết cấu truyền thống, về tận dụng vật liệu địa phương, về điều kiện khai thác duy tu bảo dưỡng,…

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. Thậm chí có nước đang sử dụng đồng thời nhiều phương pháp thiết kế khác nhau. Những năm gần đây cùng với sự xuất hiện nhiều loại kết cấu mặt cứng mới như mặt đường bê tông cốt thép liên tục, mặt đường bê tông lèn chặt bằng lu, mặt đường hỗn hợp dưới là tấm BTXM trên được phủ bằng lớp bê tông nhựa, lớp móng cấp phối gia cố xi măng. Do vậy, ngoài phương pháp thiết

kế kết cấu mặt đường cứng quen thuộc lại có thêm các phương pháp tính toán các loại kết cấu mặt đường mới.

Có thể chia ra thành các nhóm phương pháp đại diện như sau [10]:

i) Các phương pháp thực nghiệm

Phương pháp của AAASHTO dựa trên kết quả thí nghiệm đường được tiến hành ở Mỹ trong các năm 1959-1960, sử dụng hệ số nền k (mô đun phản ứng nền);

Phương pháp thực nghiệm thuần túy của Vương quốc Anh theo Road Note 29 sử dụng chỉ tiêu CBR để xác định năng lực chịu tải của nền đường.

ii) Các phương pháp lý thuyết dựa trên lời giải của bài toán "Tấm trên nền đàn hồi"

Phương pháp của Liên Xô cũ, sử dụng mô đun đàn hồi để đặc trưng cho cường độ của nền đường;

Phương pháp Westergaard, - Shekter, Mednicov.

iii) Phương pháp thiết kế mặt đường bê tông của Pháp, sử dụng lời giải của bài toán "bán không gian nhiều lớp đàn hồi" của Burmister để xác định ứng suất và chuyển vị ở khu vực của giữa tấm bê tông mặt đường dưới tác dụng của tải trọng và nhiệt độ.

Hiện tại nước ta đang sử dụng tiêu chuẩn 22TCN223-95 (theo phương pháp của Nga) để tính toán thiết kế mặt đường BTXM, tiêu chuẩn này đã ban hành từ năm 1995 đến nay đã gần được 20 năm. Do với với sự phát triển của công nghệ xây dựng mặt đường BTXM như hiện nay thì việc sử dụng tiêu chuẩn 22TCN223-95 đã có nhiều điểm không phù hợp. Trước thực trạng đó tháng 12 năm 2012, Bộ GTVT đã ban hành QĐ số 3230-BGTVT "Quy định về thiết kế mặt đường BTXM thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông". Văn bản này quy định các yêu cầu và cung cấp các chỉ dẫn cần thiết để thiết kế kết cấu mặt đường BTXM (BTXM) thông thường có khe nối: trên các đường ô tô làm mới có cấp hạng khác nhau (bao gồm cả đường cao tốc); thiết kế mặt đường BTXM thông thường có khe nối trên các kết cấu mặt đường mềm.

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 sử dụng bê tông geopolymer thi công tại chỗ. Tấm bản bê tông geopolymer đúc sẵn hoặc viên gạch geopolymer được chế tạo tại xưởng và vận chuyển đến công trường lắp ghép thành mặt đường. Các sản phẩm này có thể đặt trực tiếp trên nền đất, nền cát hoặc móng đá dăm phục vụ cho các công trình đường tô, đường băng và bến cảng đòi hỏi tiến độ thi công nhanh trong quá trình khai thác. Đối với mặt đường bê tông geopolymer thi công tại chỗ, giai đoạn thi công cơ bản cũng tương tự như BTXM truyền thống bao gồm: Sản xuất hỗn hợp bê tông geopolymer tại trạm trộn hoặc trộn tại chỗ; kiểm tra hỗn hợp bê tông geopolymer chế tạo ra trước khi thi công đại trà; kiểm tra việc chế tạo hỗn hợp bê tông trong quá trình thi công; vận chuyển hỗn hợp bê tông geopolymer; đặt ván khuôn; thi công lớp ngăn cách; bố trí các phụ kiện của khe nối; đổ bê tông; tạo nhám; cắt khe; bảo dưỡng; tháo ván khuôn; chèn khe; kiểm tra và nghiệm thu. Công nghệ khai thác duy trì kết cấu mặt đường này không có khác biệt so với các kết cấu truyền thống đang sử dụng.

Hình 4.1. Công nghệ thi công mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer [104]

Úc là một trong những quốc gia đi đầu về phát triển và thương mại hóa vật liệu này. Viện bê tông của Úc đã ban hành các tiêu chuẩn đầu tiên về bê tông geopolymer đầu tiên trên thế giới như: ATS5330 [40]; AP-T329-17 [46]; AP-R531-16; AP-T318-16 [45]. Về cơ bản các ứng xử cơ học của vật liệu của bê tông geopolymer hoàn toàn tương tự như BTXM truyền thống. Theo các tiêu chuẩn trên thì vẫn có thể cho phép sử dụng các tiêu chuẩn tính toán kết cấu công trình hiện hành (vật liệu BTXM) như AS 3600-2009, Kết cấu bê tông (Concrete structures) [47]; AS 5100.5: 2004, Thiết kế cầu: Phần 5: Bê tông (Bridge design: part 5: concrete) [48]; AS 1379-2007 (Specification and supply of concrete) [38] để áp dụng tính toán cho các kết cấu sử dụng vật liệu bê tông geopolymer. Vì vậy, căn cứ trên cơ sở đó luận án đã sử dụng quy trình về thiết kế mặt đường BTXM thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông (3230/QĐ-BGTVT) để tính toán và đề xuất kết cấu mặt đường cứng sử dụng bê tông gepolymer tro bay cốt liệu xỉ thép. Công nghệ thi công, khai thác mặt đường cứng GPCS cũng áp dụng hoàn toàn tương tự như mặt đường cứng sử dụng bê tông GPC.

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

4.3.1. Các thông số về vật liệu

4.3.1.1. Tính năng của vật liệu lớp mặt

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.

Các tính năng của bê tông gepolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép được tổng hợp ở Bảng 4.1.

Bảng 4.1. Các thông số của bê tông geoplymer cốt liệu xỉ thép đã thí nghiệm

Các thông số	Giá trị trung bình		
	GPCS 25	GPCS 30	GPCS 35
Cường độ chịu nén đặc trưng (MPa)	25	30	35
Độ sụt (mm)	71	62	45
Cường độ kéo uốn (MPa)	4.501	5.094	5.906
Mô đun đàn hồi (GPa)	30.990	32.548	33.501
Hệ số Possion	0.177	0.165	0.151
Hệ số giãn nở nhiệt ($\mu\varepsilon/^{o}C$)	9.53	8.65	8.34
Độ mài mòn (g/cm^2)	0.19	0.14	0.11

4.3.1.2. Móng mặt đường

Móng mặt đường là một yếu tố quan trọng trong quá trình thiết kế, cả lớp móng trên và lớp móng dưới phải có khả năng chống xói, có mô đun độ cứng đàn hồi và sức chịu tải thích hợp. Theo quy định 3230/QĐ-BGTVT thì móng mặt đường bao gồm: vật liệu có sử dụng chất kết dính và vật liệu hạt rời rạc như bê tông nghèo; bê tông đầm lăn; cấp phối đá dăm gia cố xi măng; bê tông nhựa hoặc hỗn hợp đá dăm trộn nhựa; cấp phối đá dăm.

Theo quy định của Chính phủ tại Nghị định 59/2007/NĐ-CP ngày 09/4/2007 về quản lý chất thải rắn và Quyết định số 2149/QĐ-TTg ngày 17/12/2009 của Thủ tướng Chính phủ về phê duyệt chiến lược quốc gia về quản lý tổng hợp chất thải rắn đến năm 2025, tầm nhìn đến năm 2050 cũng đã khẳng định "Nhà nước ưu tiên, khuyến khích tái chế, tái sử dụng chất thải rắn thông thường, hạn chế chôn lấp"; Quyết định số 567/QĐ-TTg ngày 28/4/2010 của Thủ tướng Chính phủ về việc phê duyệt chương trình phát triển vật liệu xây dựng không nung đến năm 2020 khẳng định quan điểm "tận dụng tối đa phế thải của các ngành công nghiệp khác" để sản xuất vật liệu xây dựng không nung; Quyết định số 798/QĐ-TTg ngày 25/5/2011 của Thủ tướng Chính phủ về phê duyệt chương trình đầu tư xử lý chất thải rắn giai đoạn 2011-2020. Trong đó cụ thể hóa mục tiêu tái chế chất thải rắn thông thường từ 2011-2015 là 70%. Với mục tiêu của đề tài là đưa ra được kết cấu "xanh" có nghĩa là mặt đường cứng có một phần hoặc toàn bộ kết cấu sử dụng các loại chất thải rắn.

Vì vậy trong phạm vi nghiên cứu của đề tài, ngoài việc nghiên cứu xỉ thép thay thế cốt liệu tự nhiên đá dăm và cát sông để làm vật liệu chế tạo bê tông gepolymer phục vụ cho lớp mặt đường thì luận án cũng muốn định hướng sử dụng cấp phối xỉ thép cho lớp móng đường của kết cấu mặt đường cứng. Với các tính chất kỹ thuật của cốt liệu xỉ thép đã đạt được ta có thể sử dụng cấp phối xỉ thép từ các nhà máy sản xuất thép để thay thế cấp phối đá dăm làm lớp móng dưới trong kết cấu áo đường ô tô [16]. Xỉ thép ở các vùng miền khác nhau tuy có các thành phần khoáng hóa khác nhau nhưng cơ bản các tính chất cơ lí là tương tự nhau. Thông số kỹ thuật của cấp phối xỉ thép được sử dụng như là lớp móng để tính toán kết cấu mặt đường có thể được tham khảo là mô đun đàn hồi $E_{đh}$= 248.2 MPa [16].

4.3.2. Mô hình tính toán

Theo quy định 3230/QĐ-BGTVT, mô hình tính toán về mặt cơ học của kết cấu mặt đường cứng phụ thuộc loại vật liệu của tầng mặt và tầng móng. Quy định sử dụng các mô hình tính toán về mặt cơ học như sau:

Mô hình tấm một lớp trên nên đàn hồi nhiều lớp áp dụng cho trường hợp tấm mặt đường bê tông đặt trên lớp móng trên bằng vật liệu hạt (không có chất liên kết).

Mô hình tấm hai lớp tách rời trên nền đàn hồi nhiều lớp áp dụng cho trường hợp tấm mặt đường đặt trên lớp móng trên bằng bê tông nghèo, bê tông đầm lăn và bằng vật liệu hạt có gia cố chất liên kết vô cơ (xi măng) hoặc hữu cơ (bitum).

Trong phạm vi nội dung nghiên cứu sẽ 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 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).

4.3.3. Lựa chọn cấp hạng kỹ thuật của kết cấu mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép

Theo quy định 3230/QĐ-BGTVT [4], quy mô giao thông được chia thành 5 cấp tùy theo số lần tác dụng tích lũy N_e của trục xe 100kN lên vị trí giữa cạnh dọc tấm, dự báo cho một làn xe phải chịu đựng trong suốt thời hạn phục vụ thiết kế như ở Bảng 4.2.

Bảng 4.2. Phân cấp quy mô giao thông

Cấp quy mô giao thông	Số lần trục xe quy đổi về 100kN tác dụng lên vị trí giữa cạnh dọc tấm trên 1 làn xe trong suốt thời hạn phục vụ thiết kế (N_e)
Nhẹ	< 3.10^4 lần
Trung bình	$3.10^4 \div 1.10^6$ lần
Nặng	$1.10^6 \div 20.10^6$ lần
Rất nặng	$20.10^6 \div 1.10^{10}$ lần
Cực nặng	> 1.10^{10} lần

Cường độ kéo uốn thiết kế yêu cầu (fr) đối với vật liệu làm tầng mặt, quy định trị số fr như sau:

fr ≥ 5.0 MPa đối với BTXM mặt đường cao tốc, đường cấp I, cấp II và các đường có cấp quy mô giao thông nặng, rất nặng, cực nặng.

fr = 4.5 MPa đối với đường các cấp khác, các đường có quy mô giao thông cấp trung bình và các đường có quy mô giao thông cấp nhẹ nhưng có xe nặng với trục đơn >100kN thông qua.

fr = 4.0 MPa với đường khác có quy mô giao thông cấp nhẹ không có xe nặng với trục đơn >100kN thông qua.

Bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép được thiết kế ở 3 cấp cường độ chịu nén đặc trưng 25; 30; 35 MPa (GPCS 25; GPCS 30; GPCS 35) có các chỉ tiêu cơ học đặc trưng được tính toán với với độ tin cậy 95% theo Quyết định số 3230/QĐ-BGTVT ngày 14/12/2012 được thể hiện ở Bảng 4.3.

Bảng 4.3. Cường độ kéo uốn, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson đặc trưng của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép

Loại	Cường độ kéo uốn (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson
GPCS 25	4.08	28.49	0.197
GPCS 30	4.57	29.46	0.184
GPCS 35	5.38	31.83	0.164

Trong phạm vi nghiên cứu của Luận án, với mục tiêu của Luận án là đưa ra được kết cấu mặt đường cứng có lớp mặt sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép, lớp móng cấp phối không sử dụng chất kết dính gia cố xi măng Portland.

Vì vậy, căn cứ theo Quyết định số 3230/QĐ-BGTVT và mục tiêu về mặt môi trường, Luận án đã lựa chọn 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.

4.3.4. Lựa chọn cấu tạo kết cấu mặt đường

4.3.4.1. Kích thước tấm

Căn cứ vào một số dự án thực tế đã sử dụng bê tông geopolymer làm mặt đường cứng cho đường ô tô và sân bay [63], [72] cho thấy việc thi công mặt đường bê tông geopolymer cũng tương tự như mặt đường BTXM truyền thống; đồng thời việc lựa chọn kích thước tấm bê tông geopolymer cũng tương tự như kích thước tấm BTXM (chiều rộng 3 - 5.5 m, chiều dài thường được chọn là 5 m).

Căn cứ quyết định QĐ 3230/BGTVT, hình dạng kích thước và bố trí tấm bê tông tầng mặt trên mặt đường cứng nên sử dụng các tấm hình chữ nhật có chiều rộng (tức là khoảng cách giữa các khe dọc) trong phạm vi 3 ÷ 4.5m và chiều dài (tức là khoảng cách giữa các khe ngang) trong khoảng 4 ÷ 5 m nhưng tỷ số giữa chiều dài và chiều rộng của tấm không nên vượt quá 1.35 lần. Ở khu vực phía Nam nước ta chiều dài tấm không nên > 4.80m và nên là 4.50m.

Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tham khảo các dự án vê mặt đường bê tông geopolymer tại Úc và Quyết định 3230/BGTVT về thi công mặt đường cứng tại Việt Nam, luận án lựa chọn chiều dài tấm bê tông geopolymer cốt liệu xỉ thép cho lớp mặt là 5 m và chiều rộng tấm là 4 m để thiết kế cấu tạo và kiểm toán cho các kết cấu mặt đường đề xuất.

4.3.4.2. Chiều dày các lớp

Chiều dày tấm của lớp mặt phải được xác định thông qua kiểm toán với 2 trạng thái giới hạn đã đề cập ở 4.2.2 và theo chỉ dẫn ở mục 8 trong QĐ 3230/BGTVT. Để thuận lợi cho việc kiểm toán, bước đầu có thể tham khảo các trị số chiều dày tấm tùy thuộc vào cấp hạng đường và quy mô giao thông như ở Bảng 4.4.

Bảng 4.4. Chiều dày tấm BTXM thông thường tùy theo cấp hạng đường và quy mô giao thông

Cấp thông thường	Chiều dày tấm BTXM (cm)				
	Cực nặng	Rất nặng	Nặng	Trung bình	Nhẹ
- Đường cao tốc	≥ 32	28 ÷ 32	25 ÷ 28		
- Đường cấp I, II, III	≥ 30	26 ÷ 30	24 ÷ 27	22 ÷ 25	
- Đường cấp IV, V, VI				20 ÷ 24	18 ÷ 20

Theo quyết định QĐ 3230/BGTVT, cả lớp móng trên và lớp móng dưới phải có khả năng chống xói, có độ cứng thích hợp. Chiều dày lớp móng trên tùy thuộc loại vật liệu có thể sơ bộ chọn chiều dày lớp móng trên trong phạm vi dưới đây:

- Móng trên bằng bê tông nghèo, bê tông đầm lăn: 120 ÷ 200mm;
- Móng trên bằng cấp phối đá gia cố xi măng: 150 ÷ 250mm;
- Móng trên bằng bê tông nhựa hoặc hỗn hợp đá dăm trộn nhựa: 70 ÷ 100mm;
- Móng trên bằng cấp phối đá dăm: 180 ÷ 200mm;

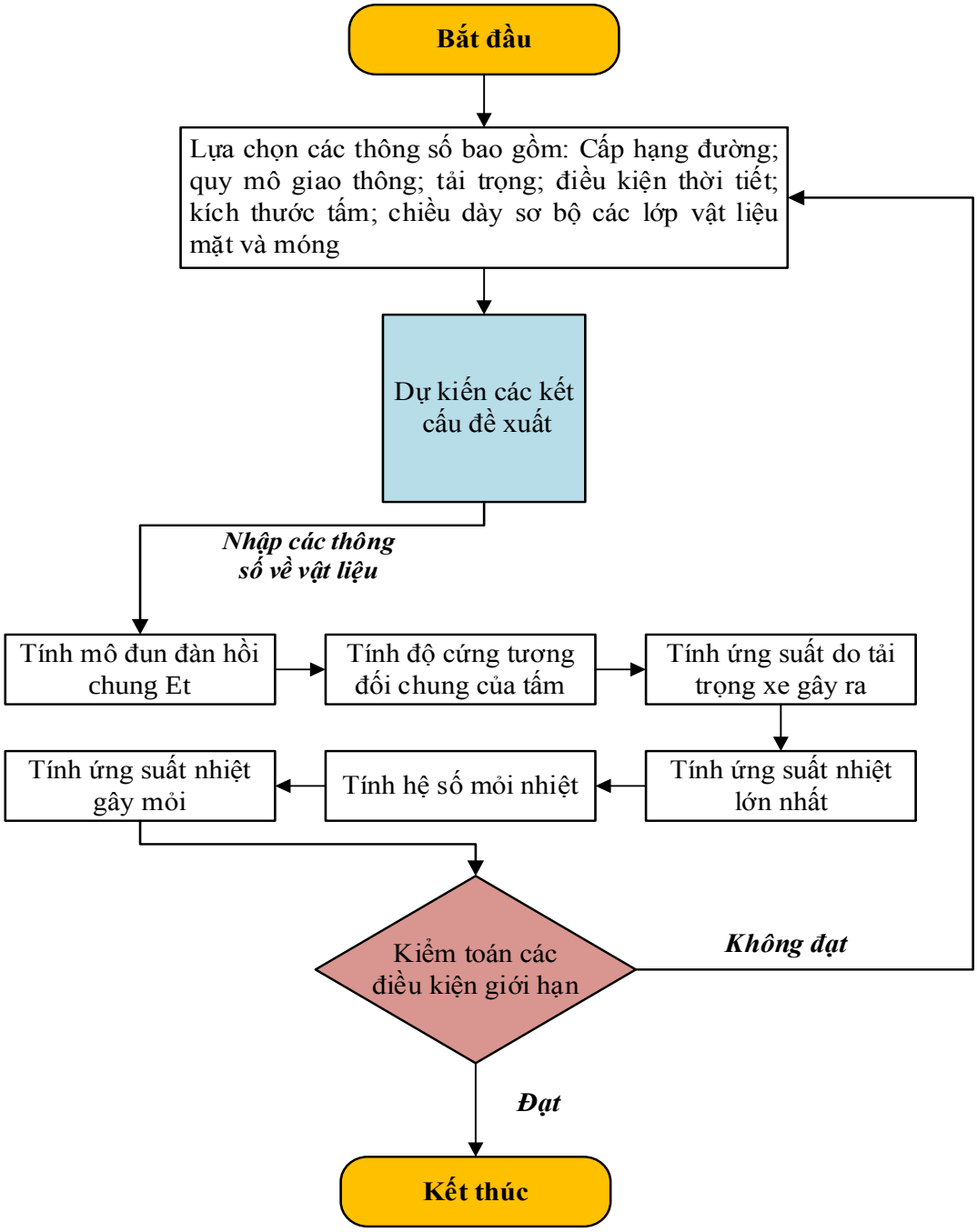
Nên chọn chiều dày lớp móng bằng chiều dày có thể lu chặt một lần. Phải bố trí lớp móng dưới khi quy mô giao thông thiết kế từ cấp nặng trở lên (nặng, rất nặng, cực nặng). Với quy mô giao thông thiết kế thuộc cấp trung bình và nhẹ thì có thể không bố trí lớp móng dưới.

Dựa trên cơ sở trên và cấp quy mô giao thông luận án đã lựa chọn 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. Vì vậy, các kết cấu đường đề xuất sử dụng một lớp móng cấp phối xỉ thép và không cần gia cố chất kết dính. Móng cấp phối xỉ thép có thể lựa chọn sơ bộ ban đầu có chiều dày từ 180 ÷ 200mm để thiết kế cấu tạo và kiểm toán các kết cấu áo đường cứng đề xuất.

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

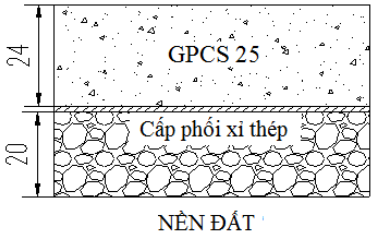
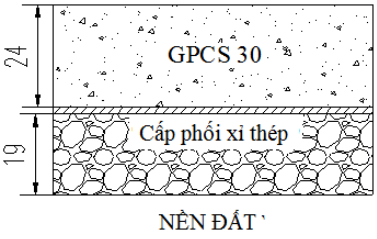
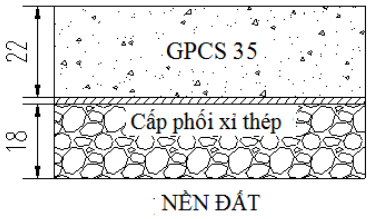
Trên cơ sở đã nghiên cứu thực nghiệm trong phòng về các tính chất của bê tông geopolymer tro bay sử dụng cốt liệu xỉ thép kết hợp với các điều kiện tải trọng, phần nền móng, điều kiện thời tiết được giả định và các thông số về kích thước tấm, chiều dày các lớp được lựa chọn. Các kết cấu mặt đường điển 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).



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

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)	

4.5. Kết luận chương 4

Căn cứ vào kết quả thí nghiệm và mối tương quan giữa các tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép đã được phân tích làm rõ ở Chương 2 và Chương 3. 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

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:

I. Các kết quả đã đạt được

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. Chế tạo thành công các mẫu thử geopolymer tro bay sử dụng hoàn toàn cốt liệu xỉ thép Thái Nguyên để nghiên cứu làm vật liệu cho xây dựng đường ô tô.

3. 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.

4. 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.

5. 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:

5.1. 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.

5.2. 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];

5.3. 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 $R^2 = 0.843$

5.4. 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;

5.5. 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);

5.6. 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 $R^2 = 0.971$

5.7. 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 $\mu\varepsilon/^oC$).

6. 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.

II. Những đóng góp mới của luận án

1. Nghiên cứu sử dụng cốt liệu xỉ thép thay thế hoàn toàn cốt liệu lớn (đá dăm) và cốt liệu nhỏ (cát vàng) trong việc chế tạo bê tông geopolymer tro bay, đây là một đóng góp có tính mới không những trong nước mà còn trên thế giới.

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 trong xây dựng mặt đường ở Việt Nam.

3. Nghiên cứu thí nghiệm trong phòng và đề xuất một số hàm hồi quy liên quan đến các tính chất chủ yếu của các hỗn hợp bê tông geopolymer tro bay có cường độ đặc trưng 25, 30, 35 MPa gồm: Vi cấu trúc, tính công tác, thời gian đông kết, 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.

4. Đề xuất được một số kết cấu mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép trong điều kiện Việt Nam.

III. Kiến nghị

Cần nghiên cứu thực nghiệm ngoài hiện trường, để có kết luận và đánh giá về việc sử dụng vật liệu này;

Cần có tiêu chuẩn hướng dẫn cụ thể trong việc sử dụng cốt liệu xỉ thép và bê tông gepolymer;

Khối lượng thể tích của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép nặng hơn 20% so với BTXM truyền thống nên kiến nghị sử dụng loại bê tông này cho địa phương có nguồn xỉ thép để đảm bảo hiệu quả về kinh tế.

IV. Những tồn tại, hạn chế

Luận án mới chỉ tập trung nghiên cứu phương pháp thiết kế thành phần, đánh giá tính chất của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép với một nguồn vật liệu, cần đa dạng hóa nguồn xỉ thép và loại tro bay kể cả tro bay chưa tuyển.

Trong phạm vi đề tài với điều kiện thực nghiệm còn hạn chế, luận án chưa có đánh về hệ số truyền nhiệt và ứng xử dài hạn như từ biến; đặc tính mỏi và độ bền của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xỉ thép.

Các nghiên cứu thực nghiệm trong Luận án mới chỉ tiến hành trong phòng thí nghiệm, nên chưa đánh giá được quá trình thi công trong điều kiện thực tế tại hiện trường.

V. Hướng nghiên cứu tiếp theo

1. 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.

2. 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.

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

4. 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

TÀI LIỆU THAM KHẢO

TIẾNG VIỆT:

1. Bộ Tài nguyên và Môi trường (2009), "QCVN 07:2009/BTNMT-Quy chuẩn kỹ thuật về ngưỡng chất thải nguy hại".
2. Bộ xây dựng (QĐ430/2017), "Chỉ dẫn kỹ thuật: Xỉ gang và xỉ thép sử dụng làm vật liệu xây dựng".
3. Bộ giao thông vận tải (QĐ1951/2012), "Quy định tạm thời về kỹ thuật thi công và nghiệm thu mặt đường bê tông xi măng trong xây dựng công trình giao thông".
4. Bộ giao thông vận tải (QĐ3230/2012), "Quy định tạm thời về thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông".
5. Bộ giao thông vận tải (1995), "22TCN223:1995 - Áo đường cứng đường ô tô tiêu chuẩn thiết kế".
6. Bộ khoa học công nghệ (1993), "TCVN 3108:1993 - Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp xác định khối lượng thể tích".
7. Bộ khoa học công nghệ (1993) "TCVN 3114:1993 - Bê tông nặng - Phương pháp xác định độ mài mòn".
8. Bộ khoa học công nghệ (2006), "TCVN 7570:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa yêu cầu kỹ thuật".
9. Bộ khoa học công nghệ (2012), "TCVN 9338:2012 - Hỗn hợp bê tông nặng - phương pháp xác định thời gian đông kết".
10. Nguyễn Quang Chiêu (1999), *Mặt đường bê tông xi măng Đường ô tô và sân bay*, Nhà Xuất bản Giao thông vận tải.
11. Đào Văn Đông (2010), "Nghiên cứu một số tính chất cơ học của bê tông polymer vô cơ", *Tạp chí Giao thông Vận tải*.
12. Đào Văn Đông (2010), "Nghiên cứu ứng xử nén và kéo khi uốn của vữa polymer vô cơ", *Tạp chí Giao thông Vận tải*, tr. 28-34.
13. Đào Văn Đông (2017), *Nghiên cứu thành phần, các đặc trưng cơ học chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay và áp dụng cho kết cấu dầm đúc sẵn*, Đề tài cấp bộ GTVT.

14. Đào Văn Đông (2009), "Vật liệu “xanh” và bền vững - xu hướng để phát triển xây dựng", *Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng*.
15. Nguyễn Văn Du (2016), *Nghiên cứu khả năng sử dụng cốt liệu xỉ thép để sản xuất bê tông nhựa nóng ở khu vực phía nam việt nam*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội.
16. Mai Hồng Hà (2019), *Nghiên cứu sử dụng xỉ thép khu vực Bà Rịa - Vũng Tàu trong xây dựng đường ô tô*, Đại học Giao thông vận tải.
17. Phan Đức Hùng và Lê Anh Tuấn (2015), "Ảnh hưởng của thành phần hoạt hóa đến cường độ chịu uốn và kéo gián tiếp của bê tông Geopolymer", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng* (3), tr. 34-38.
18. Trần Việt Hưng (2017), *Nghiên cứu thành phần, đặc tính cơlý của bê tông geopolymer tro bay và ứng dụng cho kết cấu cầu hầm*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật Trường Đại học GTVT, Hà Nội
19. Phạm Duy Hữu và Đào Văn Đông (2009), "Vật liệu xây dựng mới", *Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội*.
20. Phạm Duy Hữu, Ngô Xuân Quảng và Mai Đình Lộc (2011), "Vật liệu xây dựng", *Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội*.
21. Phạm Duy Hữu và các cộng sự (2008), "Bê tông cường độ cao và bê tông chất lượng cao", *Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội*.
22. Hồ Ngọc Khoa và Vũ Chí Công (2012), "Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*(14/12), tr. 17-27.
23. Nguyễn Thị Thu Ngà (2016), "Luận văn Tiến sĩ : Nghiên cứu các thông số chủ yếu của bê tông đầm lăn trong tính toán kết cấu mặt đường ô tô và sân bay".
24. Nguyễn Phi Sơn (2011), *Nghiên cứu sử dụng phế thải xỉ sắt trong công nghệ sản xuất thép làm cốt liệu cho bê tông Asphalt*, Luận văn thạc sỹ khoa học, Trường Đại học Bách khoa, Tp. Hồ Chí Minh.
25. Phạm Đức Thiện, Tạ Tuấn Anh và Phan Đức Hùng (2017), "Nghiên cứu sự bám dính giữa bê tông Geopolymer và cốt thép", *Tạp chí Xây dựng*(8), tr. 102-108.
26. www.vatlieuxanh.net
27. Công ty Vật liệu Xanh (2013), "Xỉ thép - Vật liệu xanh cho tương lai".

TIẾNG ANH:

28. ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials.
29. ASTM C39 Standard test method compressive strength of cylindrical concrete specimens, American Society for Testing and Materials.
30. ASTM C78, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete ".
31. ASTM C136 (2001), Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, American Society for Testing and Materials.
32. ASTM C143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, American Society for Testing and Materials.
33. ASTM E178 (2016), Standard Practice for Dealing With Outlying Observations, American Society for Testing and Materials.
34. ASTM C192, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".
35. ACI 318 (2011), "Building code requirements for structural concrete ".
36. ASTM C469 (02), "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".
37. ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials.
38. AS 1379 (2007), "Specification and supply of concrete".
39. ASTM D4792 (2006), Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions, American Society for Testing and Materials.
40. ATS 5330 (2020), "Supply of Geopolymer Concrete".
41. AASHTO, "T336 Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete".
42. AASHTO (LRFD 2012), "Bridge Design Specifications 6th Ed (US)".
43. ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, American Concrete Institute.

44. ACI 214R-02 Standard evaluation of Strength Test Results of Concrete, American Concrete Institute.
45. AP-T318 (2016), Specification and Use of Geopolymer Concrete in the Manufacture of Structural and Non-structural Components: Review of Literature.
46. AP-T329 (2017), "Specification and Use of Geopolymer Concrete in the Manufacture of Structural and Non-Structural Components: Experimental Work".
47. AS 3600 (2009), Concrete structures.
48. AS 5100 (2004), "Bridge design: part 5: concrete".
49. Brand and Roesler, "Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties," *Cem. Concr. Compos. 60 (2015) 1-9*.
50. Concrete Institute of Australia (2011), Recommended practice Geopolymer concrete.
51. D. Hardjito, D.M.J. Sumajouw and B.V. Rangan (2014), "Development of Fly ash based Geopolymer Concrete", *Conference of Construction materials, India*.
52. J. Davidovits (1991), "Geopolymers - Inorganic polymeric new materials", *Journal of Thermal Analysis*. 37, pp. 1633-1656.
53. J. Davidovits (1999), "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology", *Geopolymer '99 International Conference, France*.
54. J. Davidovits (2005), "Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions", *Proceedings of World Congress Geopolymer 2005, Saint-Quentin, France.*
55. J. Davidovits (2008), "Geopolymer Chemistry and Applications", *Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France*.
56. J. S. Deventer, P. Duxs J. L. Provis and G. C. Lukey (2007), "Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products", *Journal of Hazardous Materials Letters*. 139 (No3), pp. 506-513.
57. P. Duxson and et al (2007), "Geopolymer technology: The current state of the art", *Journal of Materials Science.* 42(9), pp. 2917-2933.
58. B. Erlin and D. Jana (2003), "Forces of Hydration that Can Cause Havoc in Concrete", *Concrete International*. 25(11), pp. 51-57.

59. F. Allali and et al, "The influence of calcium content on the performance of metakaolin-based geomaterials applied in mortars restoration", *Mater. Des. 103 (2016) 1-9.*
60. A. M. Fernández-Jiménez, A. Palomo and C. López-Hombrados (2006), "Engineering Properties of Alkali-Activated Fly Ash Concrete", *ACI Materials Journal*. 103(No. 2), pp. 106-112.
61. S.J. Foster (December 2008), *Development of high performance geopolymer concrete*, Futures in mechanics of structures and materials, Proceedings of the 20th ACMSM, Toowoomba.
62. Gilbert (2002), "Creep and shrinkage models for high strength concrete - proposal for inclusion in AS3600", *Australian Journal of Structural Engineering*. 4(2), pp. 95-106.
63. T. Glasby and et al (2015), "EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport", *Concrete Conference, Melbourne Australia 2015*.
64. Hardjito D., Wallah S. E. and Sumajouw M. J. (2005), *The stress-strain behaviour of fly ash-based geopolymer concrete. In: Developments in mechanics of structures and materials*, A A Balkema Publishers, The Netherlands, pp.831-834.
65. D. Hardjito and B. V. Rangan (2005), *Development and Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete, Research Report GC1*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Australia.
66. D. Hardjito and B. V. Rangan (2005), *Research Report GC. Development and Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Australia.
67. D. Hardjito and et al (2004), "On the development of fly ash-based geopolymer concrete", *ACI Materials Journal*. 101, pp. 467-472.
68. Henki Wibowo Ashadi, Boy Ahmad Aprilando and Sotya Astutiningsih (2015), "Effects of steel slag substitution in geopolymer concrete on compressive strength and crrosion rate of steel reinforcement in seawater and acid rain environment. ", *International Journal of Technology*. 2, pp. 227-235.

69. Monica Prezzi Irem Zeynep Yildirim (2010), "Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag".
70. J. Davidovits (2011), "Geopolymer chemistry and applications, Institut Géopolymère Galilée, 16 rue, F-02100 Saint-Quentin, France, 3rd edition".
71. J. M. Manso, J. A Polanco and M.Losanez (2006), "Durability of Concrete made with EAF Slag as Aggregates", *Cement and Concrete Composite 2006*.
72. James Aldred and John Day (2012) "is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete?", *37th Conference on Our World in Concrete & Structures 29-31 August 2012, Singapore.*
73. Dang Jin (January 2017), *Investigation on Serviceability and Durability of Geopolymer Concrete Using Embedded Sensors*, University of New South Wales, the Faculty of Engineering
74. Kamal H.Khayat and Nicolas Ali Libre (2014), "Roller Compacted Concrete Field Evaluation and Mixture Optimization," *Missouri University of Scienc and Technology*.
75. Kolli Ramujee and V.Potha Kumar, "Abrasion Resistance of Geopolymer and its Composites", *3rd International Conference on Materials*
76. P.E.Research Coordinator Liz Hunt, Glenn E. BoyleBituminous Mix Design Supervisor, Retired (2010), *Steel slag in hot mix asphalt concrete, State Research Project #511*.
77. M.S.H. Khana (September 2016), "Utilisation of steel furnace slag coarse aggregate in a low calcium flyash geopolymer concrete", *Cement and Concrete Research*.
78. Mladen Fistric, Andrea Strineka and Ružica Roskovic (2010), "Properties of steel slag aggregate and steel slag asphalt concrete".
79. Montgomery and D. Wang (1993), "Engineering uses of steel slag - A by-product material", *Proc. Intl. Conference on Environmental Management - Geo-Water and Engineering Aspects, NSW, Australia.*
80. Nevill A.M. (1987), *Properties of concrete* Fourth and Final Edition, ed.
81. A. M Neville (1995), *Properties of Concrete 4th edn, Longman*.
82. A. M. Neville (2000), "Properties of Concrete (Fourth and Final ed.)".

83. Nitendra Palankar and A.U. Ravi Shankar & B.M. Mithun (2015), "Investigations on Alkali-Activated Slag/Fly Ash Concrete with steel slag coarse aggregate for pavement structures", *International Journal of Pavement Engineering*.
84. A. Palomo, M. W. Grutzeck and M. T. Blanco (1999), "Alkali-activated fly ashes - A cement for the future", *Cement and Concrete Research*. 29, pp. 1323-1329.
85. A. Palomo, M. W. Grutzeck và M. T. Blanco (1999), "Alkali-activated fly ashes - A cement for the future.", *Cement and Concrete Research*. 29, pp. 1323-1329.
86. A. Palomo and et al (2004), "Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products", *Journal of the American Ceramic Society*. 87, pp. 1141-1145.
87. J.L. Provis and J.S.J. Van Deventer (2009), "Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications", *Woodhead Publishing, Cambridge, UK.*
88. Ramujee K and Dr.M.Potharaju (2013), "Development of mix design for low calcium based geopolymer concrete in low, medium and higher grades.", *Indian Journal of civil engineering and technology*. 1(1), pp. 15-25.
89. Kolli. Ramujee and Dr.M.Potharaju (2013), "Development of mix design for low calcium based geopolymer concrete in low, medium and higher grades - indian", *Journal of civil engineering and technology*. 1(1).
90. B. V. Rangan (2008), "Fly Ash Based Geopolymer Concrete", *Research Report GC4, Curtin University of Technology, Perth, Australia.*
91. B. V. Rangan (2008), "Mix design and production of fly ash based geopolymer concrete", *Indian Concrete Journal*. 82(5).
92. B. V. Rangan (2014), "Geopolymer concrete for environmental protectio", *The Indian Concrete Journal*. 88(4), pp 41-59.
93. Mohd Rosli (2012), "Steel Slag as an Aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt.".
94. Setunge (1993), "Structural properties of very high strength concrete", *Ph.D thesis, Department of Civil Eng, Monash University, Melbourne*.
95. Shalika Sharma and Dr Hemant Sood (Jan-Feb. 2016), "Abrasion Resistance of Geopolymer Concrete at Varying Temperature", *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 13(1), pp. 22-25.

96. Shaopeng Wu, Yongjie Xue and Wenfeng Yang (2006), "Experimental Evaluation of Stone Matrix Asphalt Mixtures Performance Using Blast Oxygen Furnace Steel Slag as Aggregate".
97. Shuguang Hu and et al (2008), "Bonding and Abrasion of geopolymeric repair material waste with steel slag", *Cement and Concrete Composites*, pp. 239-244.
98. Sung and Hee Kim (2012), " Determination of coefficient of thermal expansion for Portland cement concrete pavement for MEPDG implementation ".
99. Tanesi J, Kutay M. E and Meininger R Abbas A (2007), "Effect of coefficient of thermal expansion test variability on concrete pavement performance as predicted by mechanistic-empirical pavement design guide", *Transportation Research Record*, pp. 40-44.
100. UNI 11307 (2008), Testing for hardened concrete shrinkage determination.
101. A. D. Vaz and D. N. Donal Nixon (2012), "Geopolymer Paver Blocks", *International Conference on Advances in Civil Engineering 2012*, tr. 176.
102. www.geopolymer.org.
103. www.nationalslag.org
104. www.wagner.com.au
105. Z. Xie and Y. Xi (2001), "Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash", *Cement and Concrete Research*. 31(No.9), pp. 1245-1249.