

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI

VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ GTVT

LƯU NGỌC LÂM

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ
ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG NÚT CỦA BÊ TÔNG NHỰA
SUPERPAVE THIẾT KẾ THEO NGUYÊN LÝ CÂN BẰNG
TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

(BẢN BẢO VỆ CẤP VIỆN)

HÀ NỘI, 2023

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI

VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ GTVT

LƯU NGỌC LÂM

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ
ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG NÚT CỦA BÊ TÔNG NHỰA
SUPERPAVE THIẾT KẾ THEO NGUYÊN LÝ CÂN BẰNG
TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM**

Chuyên ngành : Kỹ thuật Xây dựng Công trình Giao thông

Mã số : 9580205

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

(BẢN BẢO VỆ CẤP VIỆN)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

PGS. TS. Vũ Đức Chính

PGS. TS. Nguyễn Quang Phúc

HÀ NỘI, 2023

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS. TS. Vũ Đức Chính và PGS. TS. Nguyễn Quang Phúc. Các số liệu và kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa được ai công bố trong bất kỳ các công trình nào khác.

Tác giả luận án

Lưu Ngọc Lâm

LỜI CẢM ƠN

Được sự hướng dẫn nhiệt tình của các thầy hướng dẫn, sự ủng hộ của Viện Khoa học và Công nghệ GTVT, sự giúp đỡ của thầy cô, đồng nghiệp, bạn bè, người thân, với sự nỗ lực của bản thân, luận án “Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave thiết kế theo nguyên lý cân bằng trong điều kiện Việt Nam” của tôi – Nghiên cứu sinh Lưu Ngọc Lâm đã hoàn thành.

Để hoàn thành luận án, tác giả trân trọng cảm ơn Lãnh đạo Viện Khoa học và Công nghệ GTVT, các đơn vị trực thuộc Viện Khoa học và Công nghệ GTVT: Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Đường bộ I, Phòng Tổ chức – Hành chính, Phòng Khoa học Công nghệ, Tiêu chuẩn và Hợp tác quốc tế đã tạo mọi điều kiện giúp đỡ.

Bằng những tình cảm chân thành nhất, tác giả vô cùng cảm ơn, PGS.TS. Vũ Đức Chính, PGS. TS. Nguyễn Quang Phúc, hai người Thầy đã định hướng, tận tình hướng dẫn, giúp đỡ, đồng viên tôi trong quá trình thực hiện luận án. Cảm ơn TS. Nguyễn Văn Thành, TS. Bùi Ngọc Hưng đã cung cấp thêm nhiều thông tin, tài liệu thiết thực và cung cấp cho tôi nhiều kiến thức chuyên môn liên quan.

Chân thành cảm ơn các thầy, cô và đồng nghiệp tại Bộ môn Đường bộ, Bộ môn Vật liệu Xây dựng - Trường Đại học Giao thông Vận tải đã giúp đỡ, chỉ bảo cho tôi các kiến thức chuyên môn, góp phần không nhỏ để tôi hoàn thành luận án.

Cảm ơn gia đình và bạn bè, những người thân luôn ở bên tôi, ủng hộ và khích lệ tôi hoàn thành luận án tiến sĩ này.

Trân trọng.

Nghiên cứu sinh Lưu Ngọc Lâm

- v -
MỤC LỤC

DANH MỤC BẢNG BIỂU	xi
DANH MỤC HÌNH ẢNH.....	xiii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT.....	xvi
MỞ ĐẦU	1
1. Đặt vấn đề, lí do lựa chọn đề tài	1
2. Mục đích nghiên cứu	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	2
4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài	3
5. Nội dung nghiên cứu.....	3
6. Cấu trúc của luận án.....	3
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE VÀ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG NÚT CỦA BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE	4
1.1. Tổng quan về bê tông nhựa Superpave và phương pháp thiết kế hỗn hợp.....	4
1.1.1. Phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo Marshall.....	4
1.1.2. Phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave	5
1.1.3. Phân tích đánh giá những đặc thù của phương pháp thiết kế bê tông nhựa theo Superpave so với phương pháp Marshall.....	6
1.1.3.1. Phương pháp thiết kế Superpave kế thừa và phát triển một số nội dung của phương pháp thiết kế Marshall	6
1.1.3.2. Những đặc thù của phương pháp Superpave.....	6
1.2. Phân tích thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng	11
1.2.1. Cách A: Thiết kế theo thể tích và kiểm tra, xác nhận các đặc tính làm việc (Volumetric Design with Performance Verification)	11
1.2.2. Cách B: Thiết kế theo thể tích và tối ưu hóa đặc tính làm việc (Volumetric Design with Performance Optimization)	13
1.2.3. Cách C: Thiết kế theo đặc tính làm việc - hiệu chỉnh thể tích (Performance-Modified Volumetric Mix Design).....	14
1.2.4. Cách D: Thiết kế theo đặc tính làm việc (Performance Design).	15
1.3. Các dạng hư hỏng chính của mặt đường BTN	17
1.3.1. Lún vệt bánh xe	17

1.2.2. Nứt do nhiệt độ thấp	18
1.3.3. Nứt mỏi (nứt ở nhiệt độ trung gian)	18
1.3.4. Phá hoại do ẩm	19
1.4. Các dạng nứt mỏi và phương pháp thí nghiệm đánh giá	19
1.4.1. Nứt mỏi từ dưới lên (Bottom-up fatigue cracking)	19
1.4.2. Nứt mỏi từ trên xuống (Top-down fatigue cracking)	20
1.4.3. Các mô hình và phương pháp thí nghiệm đánh giá nứt mỏi	21
1.5. Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave trên thế giới	21
1.5.1. Ảnh hưởng của các yếu tố liên quan đến BTN	21
1.5.1.1. Ảnh hưởng của nhựa đường	22
1.5.1.2. Ảnh hưởng của cốt liệu	23
1.5.1.3. Ảnh hưởng của các đặc tính thể tích của hỗn hợp BTN	24
1.5.2. Ảnh hưởng của lưu lượng xe, tải trọng xe, tốc độ dòng xe, nhiệt độ môi trường	25
1.5.2.1. Ảnh hưởng của lưu lượng xe	25
1.5.2.2. Ảnh hưởng của tốc độ dòng xe	25
1.5.2.3. Ảnh hưởng của nhiệt độ	25
1.6. Các nghiên cứu trong và ngoài nước về bê tông nhựa Superpave và phương pháp đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa	25
1.6.1. Các nghiên cứu trên thế giới	25
1.6.2. Các nghiên cứu ở Việt Nam	28
1.7. Xác định vấn đề nghiên cứu của luận án	31
1.8. Mục tiêu, nội dung và phương pháp nghiên cứu	32
1.8.1. Mục tiêu nghiên cứu	32
1.8.2. Nội dung nghiên cứu	32
1.8.3. Phương pháp nghiên cứu	32
1.8.3.1. Nghiên cứu lý thuyết:	32
1.8.3.2. Nghiên cứu thực nghiệm:	32
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU LỰA CHỌN PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỐNG NỨT CỦA BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE ...	33

2.1. Nghiên cứu lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng BMD ở Việt Nam.....	33
2.1.1. Phân tích việc nghiên cứu áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng BMD ở Hoa Kỳ.....	33
2.1.2. Phân tích việc nghiên cứu thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo nguyên lý cân bằng ở một số nước.....	37
2.1.3. Phân tích, lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng BMD phù hợp với điều kiện Việt Nam.....	39
2.1.3.1. Phân tích lựa chọn cách thiết kế hỗn hợp theo nguyên lý cân bằng.....	39
2.1.3.2. Trình tự thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng.....	41
2.2. Nghiên cứu lựa chọn các phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave ở Việt Nam.....	43
2.2.1. Phương pháp thí nghiệm uốn dầm 4 điểm.....	43
2.2.2. Phương pháp thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo AASHTO.....	44
2.2.3. Phương pháp thí nghiệm IDEAL CTindex.....	45
2.2.4. Phương pháp thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo ASTM.....	46
2.2.5. Phương pháp thí nghiệm Texas overlay test.....	47
2.2.6. Phân tích lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave ở Việt Nam.....	48
2.3. Phân tích, lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống lún vết bánh xe phù hợp với điều kiện Việt Nam.....	50
2.3.1. Phương pháp thí nghiệm APA (Asphalt Pavement Analyzer).....	50
2.3.2. Phương pháp thí nghiệm chỉ số chảy (Flow Number Test).....	51
2.3.3. Phương pháp thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking.....	52
2.3.4. Phương pháp thí nghiệm cắt Superpave (Superpave Shear Tester).....	53
2.3.5. Phân tích lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX của bê tông nhựa Superpave ở Việt Nam.....	54
2.4. Phân tích, lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm phù hợp với điều kiện Việt Nam.....	55
2.5. Kết luận chương 2.....	59
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG NỨT CỦA BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE THEO NGUYÊN LÝ CÂN BẰNG.....	60

3.1. Mục tiêu, nội dung nghiên cứu thực nghiệm, thiết kế thí nghiệm và trình tự phân tích thống kê xử lý số liệu	60
3.1.1. Mục tiêu	60
3.1.2. Thiết kế thí nghiệm và trình tự phân tích thống kê xử lý số liệu.....	61
3.1.2.1. Thiết kế thí nghiệm.....	61
3.1.2.2. Đánh giá số mẫu trong tổ mẫu.....	61
3.1.2.3. Loại bỏ số liệu ngoại lai và đánh giá độ chụm.....	61
3.1.2.4. Trình tự thiết kế thí nghiệm và xử lý kết quả thí nghiệm	62
3.1.3. Lựa chọn vật liệu đầu vào	62
3.1.4. Thiết kế thực nghiệm xác định số lượng mẫu thí nghiệm	62
3.1.4.1. Hàm mục tiêu	62
3.1.4.2. Biến phụ thuộc.....	63
3.1.4.3. Biến độc lập.....	63
3.2. Thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của vật liệu	64
3.3. Thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo đặc tính thể tích để lựa chọn cấp phối thô - mịn	66
3.4. Thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt mỏi và chống LVBX của bê tông nhựa Superpave.....	69
3.4.1. Thí nghiệm HWTT đánh giá khả năng chống lún vệt bánh xe.....	69
3.4.2. Thí nghiệm SCB đánh giá khả năng chống nứt	70
3.4.3. Thí nghiệm IDEAL CT _{INDEX} đánh giá khả năng chống nứt	71
3.5. Phân tích thống kê, đánh giá kết quả thí nghiệm	72
3.5.1. Phân tích độ chụm của các kết quả thí nghiệm.....	73
3.5.2. Phân tích, đánh giá kết quả thí nghiệm chỉ số mềm FI	73
3.5.3. Phân tích, đánh giá kết quả thí nghiệm chỉ số CTindex	77
3.5.4. Phân tích, đánh giá kết quả thí nghiệm chiều sâu LVBX.....	80
3.5.5. Phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đến khả năng chống nứt mỏi và LVBX	83
3.6. Mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy	85
3.6.1. Kiểm tra phân phối chuẩn của kết quả thí nghiệm.....	85
3.6.2. Khảo sát hệ số tương quan Pearson.....	86
3.6.3. Phương trình hồi quy giữa chỉ số CTindex và chỉ số mềm FI.....	87

3.6.4. Phương trình hồi quy giữa chỉ số mềm FI và chiều sâu LVBX.....	88
3.6.5. Phương trình hồi quy giữa chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX	88
3.6.6. Phương trình hồi quy giữa chỉ số CTindex và hàm lượng nhựa	89
3.6.7. Phương trình hồi quy giữa chỉ số mềm FI và hàm lượng nhựa	90
3.6.8. Phương trình hồi quy giữa chiều sâu LVBX và hàm lượng nhựa	90
3.7. Kết luận chương 3	91
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ĐẶC TRƯNG KHAI THÁC CỦA KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP CƠ HỌC THỰC NGHIỆM.....	93
4.1. Phân tích phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo cơ học - thực nghiệm và khả năng áp dụng ở Việt Nam.....	93
4.1.1. Phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo phương pháp cơ học - thực nghiệm	93
4.1.2. Nghiên cứu ứng dụng phương pháp thiết kế mặt đường theo phương pháp cơ học thực nghiệm tại Việt Nam.....	95
4.1.3. Giới thiệu về phần mềm Darwin-ME	96
4.1.4. Các bước phân tích kết cấu mặt đường	97
4.2. Phân tích kết cấu mặt đường bê tông nhựa Superpave bằng phương pháp cơ học thực nghiệm ở các vùng khí hậu Việt Nam	99
4.2.1. Kết cấu áo đường nghiên cứu	99
4.2.2. Tính toán kết cấu theo AASHTO-1993, TCCS 37:2022/TCĐBVN.....	100
4.2.3. Nghiên cứu xác định các thông số đầu vào	100
4.2.3.1. Các thông số về giao thông	100
4.2.3.2. Các tiêu chuẩn giới hạn.....	101
4.2.3.3. Các thông số khí hậu.....	102
4.2.3.4. Thông số các lớp vật liệu và nền đất	103
4.2.4. Phân tích kết cấu mặt đường.....	103
4.3. Đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của kết cấu mặt đường BTN Superpave.....	108
4.3.1. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến nứt môi từ dưới lên của BTN.....	108
4.3.2. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến nứt môi từ trên xuống của BTN.....	111
4.3.3. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu	114
4.3.4. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến chiều sâu LVBX của BTN.....	117

4.3.5. Tổng hợp phân tích đánh giá.....	121
4.4. Kết luận chương 4.....	122
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	123
A. Kết luận, những đóng góp mới của luận án.....	123
B. Những tồn tại, hạn chế	125
C. Kiến nghị và dự kiến hướng nghiên cứu tiếp theo.....	125
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ.....	126
1. Bài báo khoa học	126
2. Đề tài khoa học.....	126
TÀI LIỆU THAM KHẢO	127

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1-1. Cỡ sàng không chế, lượng lọt sàng không chế [29]	7
Bảng 1-2. Điều chỉnh mác nhựa PG theo đặc tính dòng xe [29]	9
Bảng 1-3. Tóm tắt, so sánh phương pháp Marshall và Superpave	10
Bảng 1-4. Các yếu tố ảnh hưởng đến LVBX, nứt môi và phá hoại do ẩm của BTN [57]	21
Bảng 1-5. Danh mục 03 thí nghiệm phổ biến nhất đánh giá nứt của BTN [61].....	26
Bảng 2-1. Cách thiết kế cân bằng của các Bang đang áp dụng BMD tại Hoa Kỳ.....	34
Bảng 2-2. Định hướng nghiên cứu BMD ở các bang của Hoa Kỳ	35
Bảng 2-3. Phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN và các thí nghiệm đặc tính làm việc...	38
Bảng 2-4. So sánh các thông số chủ yếu của các phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của BTN	48
Bảng 2-5. Ngưỡng giới hạn giá trị TSR của một số bang tại Hoa Kỳ	56
Bảng 3-1. Số mẫu thí nghiệm chiều sâu LVBX.....	63
Bảng 3-2. Số mẫu thí nghiệm chỉ số mềm FI	63
Bảng 3-3. Số mẫu thí nghiệm chỉ số CTindex	64
Bảng 3-4. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu.....	64
Bảng 3-5. Các chỉ tiêu cơ lý của bột khoáng	64
Bảng 3-6. Các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường theo chuẩn PG	65
Bảng 3-7. Thành phần hạt của cấp phối thí nghiệm.....	66
Bảng 3-8. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN sử dụng nhựa PG64-22	68
Bảng 3-9. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN sử dụng nhựa PG64-16.....	68
Bảng 3-10. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN sử dụng nhựa PG82-22.....	68
Bảng 3-11. Đánh giá độ chụm chỉ số mềm FI	73
Bảng 3-12. Đánh giá độ chụm chỉ số CTindex	73
Bảng 3-13. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu Chỉ số mềm FI	74
Bảng 3-14. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu chỉ số CTindex.....	77
Bảng 3-15. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu chiều sâu LVBX	80
Bảng 4-1. Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế.....	102
Bảng 4-2. Các thông số đầu vào, mức biến thiên.....	103
Bảng 4-3. Kết quả phân tích kết cấu theo MEPDG	104

Bảng 4-4. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu nút mồi từ dưới lên của BTN	108
Bảng 4-5. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu nút mồi từ trên xuống của BTN 111	
Bảng 4-6. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu	114
Bảng 4-7. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu chiều sâu LVBX của BTN	117

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1-1. Minh họa 3 cấp phối BTN 19 mm sử dụng để thiết kế [10]	8
Hình 1-2. Sơ đồ thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng ..	11
Hình 1-3. Cách A thiết kế theo thể tích và kiểm tra đặc tính làm việc	12
Hình 1-4. Cách B thiết kế theo thể tích và tối ưu đặc tính làm việc	13
Hình 1-5. Cách C thiết kế theo đặc tính làm việc - hiệu chỉnh thể tích	15
Hình 1-6. Cách D thiết kế theo đặc tính làm việc	16
Hình 1-7. Các dạng LVBX [57]	17
Hình 1-8. Nứt do nhiệt độ thấp [52]	18
Hình 1-9. Hư hỏng nứt mỗi mặt đường BTN	19
Hình 1-10. Mô hình nứt từ dưới lên [57]	20
Hình 1-11. Mô hình nứt từ trên xuống [57]	20
Hình 2-1. Tình hình nghiên cứu áp dụng BMD ở Hoa Kỳ	34
Hình 2-2. Sơ đồ khối các bước thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng tại Việt Nam	42
Hình 2-3. Thiết bị thí nghiệm uốn dầm 4 điểm	43
Hình 2-4. Thiết bị thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo AASHTO	44
Hình 2-5. Thiết bị thí nghiệm IDEAL CTindex	45
Hình 2-6. Thiết bị thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo ASTM	47
Hình 2-7. Thiết bị thí nghiệm Texas overlay test	47
Hình 2-8. Thiết bị thí nghiệm APA	50
Hình 2-9. Thiết bị thí nghiệm chỉ số chảy	51
Hình 2-10. Thiết bị thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking	52
Hình 2-11. Thiết bị thí nghiệm cắt Superpave (Superpave Shear Tester)	53
Hình 2-12. Bản đồ các Bang lựa chọn thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX ...	54
Hình 2-13. Bản đồ các Bang lựa chọn thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm [61] .	56
Hình 3-1. Sơ đồ nghiên cứu thí nghiệm trong phòng	60
Hình 3-2. Kiểm tra số mẫu khi phân tích thống kê	61
Hình 3-3. Thành phần hạt của 03 cấp phối thí nghiệm BTN12,5	67
Hình 3-4. Thành phần hạt của 03 cấp phối thí nghiệm BTN19	67
Hình 3-5. Biểu đồ chiều sâu LVBX sau 15000 lượt của BTN12,5 và BTN19	69

Hình 3-6. Biểu đồ chiều sâu LVBX sau 40000 lượt của BTN12,5 và BTN19	70
Hình 3-7. Biểu đồ Chỉ số mềm FI của BTN12,5 và BTN19	71
Hình 3-8. Một số hình ảnh thí nghiệm SCB	71
Hình 3-9. Biểu đồ Chỉ số CTindex của BTN12,5 và BTN19	72
Hình 3-10. Một số hình ảnh thí nghiệm CTindex	72
Hình 3-11. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chỉ số mềm FI	75
Hình 3-12. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ số mềm FI	75
Hình 3-13. Phân tích hậu định Turkey ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ số mềm FI .	75
Hình 3-14. Các biến ảnh hưởng chính tới chỉ số mềm FI	76
Hình 3-15. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chỉ số mềm FI	76
Hình 3-16. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chỉ số CTindex	78
Hình 3-17. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ số CTindex	78
Hình 3-18. Phân tích hậu định Turkey ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ số CTindex	79
Hình 3-19. Các biến ảnh hưởng chính tới chỉ số CTindex	79
Hình 3-20. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chỉ số CTindex	79
Hình 3-21. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chiều sâu LVBX	81
Hình 3-22. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến chiều sâu LVBX	81
Hình 3-23. Phân tích hậu định Turkey ảnh hưởng của các yếu tố đến chiều sâu LVBX	82
Hình 3-24. Các biến ảnh hưởng chính tới chiều sâu LVBX	82
Hình 3-25. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chiều sâu LVBX	82
Hình 3-26. Biểu đồ quan hệ giữa chỉ số mềm FI với chiều sâu LVBX	83
Hình 3-27. Biểu đồ quan hệ giữa chỉ số CTindex với chiều sâu LVBX	84
Hình 3-28. Kiểm tra phân phối chuẩn của chỉ số mềm FI	86
Hình 3-29. Kiểm tra phân phối chuẩn của chỉ số CTindex	86
Hình 3-30. Kiểm tra phân phối chuẩn của chiều sâu LVBX	86
Hình 3-31. Biểu đồ tương quan giữa các biến của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22	87
Hình 3-32. Biểu đồ tương quan giữa các biến của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16	87
Hình 3-33. Quan hệ giữa chỉ số CTindex và chỉ số mềm FI	88
Hình 3-34. Quan hệ giữa chỉ số chỉ số mềm FI và chiều sâu LVBX	88

Hình 3-35. Quan hệ giữa chỉ số chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX	89
Hình 3-36. Quan hệ giữa chỉ số chỉ số CTindex và hàm lượng nhựa	90
Hình 3-37. Quan hệ giữa chỉ số chỉ số mềm FI và hàm lượng nhựa	90
Hình 3-38. Quan hệ giữa chiều sâu LVBX và hàm lượng nhựa	91
Hình 4-1. Trình tự phân tích kết cấu mặt đường theo cơ học thực nghiệm [23]	94
Hình 4-2. Cửa sổ chính phần mềm DARWin-ME	97
Hình 4-3. Kết cấu mặt đường nghiên cứu	100
Hình 4-4. Nhập số liệu giao thông	101
Hình 4-5. Nhập số liệu khí hậu	103
Hình 4-6. Biểu đồ nút mỗi từ dưới lên của BTN	109
Hình 4-7. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu nút mỗi từ dưới lên của BTN	109
Hình 4-8. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến nút mỗi từ dưới lên của BTN... ..	110
Hình 4-9. Các biến ảnh hưởng chính tới nút mỗi từ dưới lên của BTN.....	110
Hình 4-10. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới nút mỗi từ dưới lên của BTN	110
Hình 4-11. Biểu đồ nút mỗi từ trên xuống của BTN.....	112
Hình 4-12. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu nút mỗi từ dưới lên của BTN	112
Hình 4-13. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến nút mỗi từ dưới lên của BTN. ..	113
Hình 4-14. Các biến ảnh hưởng chính tới nút mỗi từ dưới lên của BTN.....	113
Hình 4-15. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới nút mỗi từ dưới lên của BTN	114
Hình 4-16. Biểu đồ tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu	115
Hình 4-17. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu.. ..	115
Hình 4-18. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu	116
Hình 4-19. Các biến ảnh hưởng chính tới tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu	116
Hình 4-20. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu	117
Hình 4-21. Biểu đồ chiều sâu LVBX của BTN	118
Hình 4-22. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chiều sâu LVBX của BTN	119
Hình 4-23. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX của BTN	119
Hình 4-24. Các biến ảnh hưởng chính tới chiều sâu LVBX của BTN.....	120
Hình 4-25. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chiều sâu LVBX của BTN	120

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

AASHTO	American Association of State Highways and Transportation Officials (Hiệp hội những người làm đường và vận tải toàn nước Mỹ)
AMPT	Asphalt Mixture Performance Tester (Thiết bị thí nghiệm đặc tính làm việc của hỗn hợp Asphalt)
APA	Asphalt Pavement Analyzer (Thiết bị phân tích mặt đường Asphalt)
ASTM	American Society of Testing Materials (Hiệp hội thí nghiệm vật liệu Mỹ)
BBF	Bending Beam Fatigue (Thí nghiệm mỏi uốn dầm)
BMD	Balanced Mix Design (Thiết kế hỗn hợp cân bằng)
BTN	Bê tông nhựa
BTNC	Bê tông nhựa chặt
CBR	California Bearing Ratio (Chỉ số sức chịu tải California)
CPĐĐ	Cấp phối đá dăm
CTindex	Cracking Tolerance Index (Chỉ số chống nứt)
D/B	Tỷ lệ bột/Hàm lượng nhựa có hiệu
DCT	Disc-Shaped Compact Tension (Thí nghiệm kéo nén mẫu hình đĩa)
DSR	Dynamic Shear Rheometer (Cắt động lưu biến)
EN	Tiêu chuẩn châu Âu
ESAL	Equivalent Single Axle Load (Tải trọng trục đơn tương đương)
FN	Flow Number (Chỉ số chảy)
FI	Flexibility Index (Chỉ số mềm)
G*	Complex shear modulus (Mô đun phức của nhựa đường)
HLN	Hàm lượng nhựa
HWTT	Hamburg Wheel Tracking Test (Thí nghiệm vết bánh xe Hamburg)
HT-IDT	High Temperature - Indirect Tensile (Kéo gián tiếp ở nhiệt độ cao)
ITS	Indirect Tensile Strength (Cường độ kéo gián tiếp)
IRI	International Roughness Index (Độ gồ ghề quốc tế)
LVBX	Lún vết bánh xe
LVDT	Linear variable differential transformer (Cảm biến vi sai tuyến tính)

ME	Mechanical - Empirical (Cơ học - thực nghiệm)
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Hướng dẫn thiết kế mặt đường theo Cơ học thực nghiệm)
NAPA	National Asphalt Pavement Association (Hiệp hội mặt đường asphalt quốc gia)
NCAT	The National Center for Asphalt Technology (Trung tâm công nghệ Asphalt)
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program (Chương trình hợp tác nghiên cứu đường)
OT	Overlay Test (Thí nghiệm lớp phủ)
PAV	Pressure Aging Vessel (Lão hóa nhanh bằng bình áp lực)
PG	Performance Grade (Cấp đặc tính làm việc)
RTFO	Rolling Thin Film Oven (Lò xoay màng mỏng)
SGC	Superpave Gyrotorry Compacter (Thiết bị đầm xoay Superpave)
SHRP	Strategic Highway Research Program (Chương trình nghiên cứu Chiến lược đường bộ)
Superpave	Superior Performing Asphalt Pavement System
SCB	Semi-Circular Bend (Thí nghiệm uốn mẫu bán nguyệt)
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
TSR	Tensile Strength Ratio (Tỉ số cường độ chịu kéo gián tiếp)
Va	Volume of Air Voids (Độ rỗng dư)
VFA	Voids Filled with Asphalt (Độ rỗng lấp đầy nhựa)
VMA	Voids in the Mineral Aggregate (Độ rỗng cốt liệu)
δ	Phase angle of bitumen (Góc pha của nhựa đường)

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề, lí do lựa chọn đề tài

Mặt đường BTN do có nhiều ưu điểm nổi bật nên được sử dụng phổ biến cho đường ô tô trên thế giới. Để chịu được tác động của tải trọng xe và các yếu tố môi trường trong quá trình khai thác, mặt đường BTN phải được thiết kế, thi công sao cho có đủ cường độ, độ ổn định trong suốt thời gian phục vụ. Các dạng hư hỏng mặt đường BTN điển hình phát sinh trong quá trình khai thác dưới tác động của tải trọng xe và nhiệt độ môi trường làm ảnh hưởng đến công năng của mặt đường tại Việt Nam bao gồm: LVBX ở nhiệt độ cao; nứt môi ở nhiệt độ trung gian và phá hoại do ẩm.

Hiện nay, thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall tại Việt Nam mặc dù đã xem xét giải quyết vấn đề chống LVBX, tuy nhiên chưa xem xét giải quyết triệt để nứt, mà đây là một trong hai nguyên nhân chính gây hư hỏng mặt đường. Trong khi đó, phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave hiện được áp dụng phổ biến tại Hoa Kỳ, Canada và được thế giới đánh giá là có cơ sở khoa học. Thiết kế theo Superpave đã giải quyết vấn đề liên quan đến lựa chọn vật liệu BTN (nhựa đường PG, cát, đá, bột khoáng) phù hợp với đặc tính dòng xe (lưu lượng xe, tốc độ xe lưu thông), nhằm giảm thiểu các hư hỏng mặt đường như LVBX, nứt môi trong quá trình khai thác. Xu hướng thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave hiện nay tại Hoa Kỳ là thiết kế hỗn hợp BTN theo nguyên lý cân bằng giữa các đặc trưng thể tích-độ nhạy ẩm, LVBX, và nứt. Vì vậy cần phải nghiên cứu lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN phù hợp với điều kiện Việt Nam để đảm bảo đồng thời khả năng chống LVBX và chống nứt.

Về đánh giá khả năng chống nứt: bao gồm nứt do nhiệt (nhiệt độ thấp) và nứt ở nhiệt độ trung gian.

- Nứt do nhiệt độ thấp thường xuất hiện vào mùa lạnh, nhiệt độ rất thấp (âm). Do đặc thù điều kiện khí hậu Việt Nam không xuất hiện nhiệt độ quá thấp (âm) nên đề xuất không nghiên cứu về nứt do nhiệt độ thấp trong luận án.

- Nứt ở nhiệt độ trung gian (trong đề tài này sử dụng thuật ngữ “nứt môi” để thay thế cho thuật ngữ “nứt ở nhiệt độ trung gian” cho ngắn gọn và dễ hiểu) xảy ra vào mùa có nhiệt độ môi trường trung gian (nhiệt độ trung bình giữa nhiệt độ cao nhất và thấp nhất xảy ra trong năm). Tại nhiệt độ trung gian, BTN có xu hướng cứng hơn và giòn hơn so với khi nhiệt độ cao nên dưới tác động của tải trọng lặp, BTN có xu hướng bị nứt. Trên thế giới có nhiều mô hình, nhiều phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt môi của BTN, mỗi phương pháp đều có ưu, nhược điểm và phạm vi áp dụng riêng. Ở Việt Nam cho đến nay chưa có thí nghiệm đủ đơn giản, nhanh chóng và kinh tế để đánh giá khả năng chống nứt môi của BTN.

Trên thế giới, thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB (Semi-Circular Bending) và thí nghiệm IDEAL CTindex (theo ASTM D8225) đang được sử dụng rộng rãi khi thiết kế

BTN để đánh giá khả năng chống nứt mỏi do: thời gian chuẩn bị mẫu nhanh, thí nghiệm nhanh, kết quả thí nghiệm có độ chụm cao, giá thành thiết bị thí nghiệm không cao, có chuẩn để đánh giá “đạt”, có tương quan chặt với hư hỏng nứt thực tế của mặt đường tại hiện trường.

Một số yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt mỏi của BTN bao gồm: cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN, nguồn gốc cốt liệu, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa... vì vậy cần nghiên cứu thực nghiệm trong phòng để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố này đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam. Hiện nay, ở Việt Nam mới chỉ có một số luận án tiến sĩ nghiên cứu về khả năng chống nứt mỏi, nhưng các luận án đều chưa nghiên cứu và thử nghiệm khả năng chống nứt mỏi bằng thí nghiệm uốn mẫu đầm bán nguyệt SCB và thí nghiệm IDEAL CTindex.

Trên cơ sở các phân tích nêu trên đề tài **“Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave thiết kế theo nguyên lý cân bằng trong điều kiện Việt Nam”** thực sự cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, có tính thời sự.

2. Mục đích nghiên cứu

- Đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt có xem xét đến khả năng chống LVBX của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam thông qua nghiên cứu lý thuyết kết hợp thực nghiệm trong phòng thí nghiệm và mô phỏng phân tích kết cấu mặt đường bằng phương pháp cơ học thực nghiệm.
- Lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave phù hợp với điều kiện Việt Nam.
- Lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng phù hợp với điều kiện Việt Nam.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là bê tông nhựa Superpave (không bao gồm vật liệu tái chế).

Phạm vi nghiên cứu của luận án bao gồm nghiên cứu phân tích, đánh giá các đặc trưng cơ bản của phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng. Đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố (cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN, nguồn gốc cốt liệu, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa) đến khả năng chống nứt mỏi, có xem xét đến khả năng chống LVBX của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam bằng thí nghiệm uốn mẫu đầm bán nguyệt SCB, thí nghiệm IDEAL CTindex và thí nghiệm Hamburg Wheel Tracking.

Luận án chỉ nghiên cứu trong phòng thí nghiệm và mô phỏng phân tích kết cấu mặt đường bằng phương pháp cơ học thực nghiệm mà không triển khai nghiên cứu hiện trường. Luận án nghiên cứu với các loại vật liệu điển hình ở Việt Nam để chế tạo hỗn hợp bê tông nhựa Superpave.

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

- Đã đề xuất lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam bằng 01 trong 02 thí nghiệm theo thứ tự ưu tiên như sau: (1). Thí nghiệm IDEAL CTindex theo ASTM D8225 với ngưỡng chỉ số chịu nứt tối thiểu (CTindex) là 70. (2). Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo TCVN 11347:2021 với ngưỡng chỉ số mềm tối thiểu (FI) là 8.0.
- Đã đề xuất lựa chọn phương pháp, nguyên tắc và trình tự thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng ở Việt Nam theo cách A - Thiết kế theo thể tích Superpave và kiểm tra, xác nhận các đặc tính làm việc.
- Đã đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố (cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN, nguồn gốc cốt liệu, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa) đến khả năng chống nứt mỏi và chống lún vệt bánh xe của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam.
- Đã xây dựng 12 phương trình hồi quy giữa: chỉ số CTindex với chỉ số mềm FI; chỉ số CTindex với chiều sâu LVBX; chỉ số mềm FI với chiều sâu LVBX; chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex, chiều sâu LVBX với hàm lượng nhựa của BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa đường PG64-22 và nhựa đường PG64-16, chi tiết tại các công thức từ (3.1) đến (3.12).
- Đã đánh giá ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến các trạng thái giới hạn khai thác của kết cấu mặt đường sử dụng bê tông nhựa Superpave theo phương pháp cơ học thực nghiệm.

5. Nội dung nghiên cứu

- Tổng quan về bê tông nhựa Superpave và các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave.
- Nghiên cứu lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave.
- Nghiên cứu thực nghiệm các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng.
- Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến đặc trưng khai thác của kết cấu mặt đường bằng phương pháp cơ học thực nghiệm.

6. Cấu trúc của luận án

Cấu trúc của luận án gồm có 4 chương, mục lục, phần mở đầu, phần kết luận, kiến nghị và tài liệu tham khảo.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE VÀ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG NÚT CỦA BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE

1.1. Tổng quan về bê tông nhựa Superpave và phương pháp thiết kế hỗn hợp

Mặt đường mềm (điển hình là mặt đường BTN) được áp dụng rộng rãi trên thế giới hiện nay. Chất lượng BTN phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó có thể kể đến thiết kế hỗn hợp BTN. Trên thế giới có rất nhiều phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN đã và đang được áp dụng như: Phương pháp thiết kế của Barber Asphalt Paving Company năm 1890, Phương pháp thiết kế của Clifford Richardson năm 1905, Phương pháp thiết kế Hubbard Field năm 1920, Phương pháp thiết kế Hveem năm 1927, Phương pháp thiết kế Marshall năm 1943 và Phương pháp thiết kế Superpave năm 1993 [42]. Trong đó 02 phương pháp được áp dụng phổ biến nhất hiện nay là: Phương pháp thiết kế Marshall và Phương pháp thiết kế Superpave.

Thuật ngữ “bê tông nhựa Superpave” được sử dụng trong đề tài này là tên rút gọn của “bê tông nhựa thiết kế theo phương pháp Superpave”.

1.1.1. Phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo Marshall

Trước khi phương pháp Superpave ra đời, phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall được áp dụng rộng rãi ở Hoa Kỳ, nhiều nước trên thế giới (châu Âu, châu Á và ở Việt Nam). Phương pháp thiết kế Marshall phải thoả mãn 2 yếu tố cơ bản sau:

- Yếu tố về đặc tính thể tích: bao gồm các chỉ tiêu độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ rỗng lấp đầy nhựa của hỗn hợp BTN. Các giá trị này phải nằm trong giới hạn quy định đảm bảo lớp BTN có khả năng chống biến dạng, chống chảy nhựa dưới tác động của tải trọng xe và yếu tố nhiệt độ môi trường, hạn chế sự xâm nhập của nước vào hỗn hợp trong quá trình khai thác.

- Yếu tố về đặc tính cơ học: bao gồm các chỉ tiêu liên quan đến chất lượng cốt liệu và các chỉ tiêu liên quan đến cường độ của hỗn hợp BTN sau khi đầm nén (độ ổn định, độ dẻo) nhằm đảm bảo cho lớp BTN có đủ cường độ sau khi xây dựng.

Việc lựa chọn loại nhựa đường được dựa trên tiêu chuẩn phân loại nhựa đường theo độ kim lún-AASHTO M20 [27] hoặc theo độ nhớt-AASHTO M226 [28]. Việc lựa chọn loại nhựa đường cho BTN phù hợp với điều kiện nhiệt độ môi trường dựa trên kinh nghiệm của từng nước theo khuyến nghị tại tài liệu MS-2 của Asphalt Institute “Phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN” [56].

Cấp phối hỗn hợp cốt liệu BTN: sử dụng cấp phối hỗn hợp cốt liệu liên tục, theo công thức Fuller với hệ số mũ $n=0,45$. Đường bao hỗn hợp cốt liệu được khuyến nghị theo ASTM D3515 [44] và tùy từng địa phương, quốc gia có thể hiệu chỉnh cho phù hợp. Thiết kế Marshall nguyên bản không đưa ra quy định cấp phối thô - mịn và cách lựa chọn cấp phối thô - mịn khi thiết kế hỗn hợp BTN.

Về phương pháp đầm tạo mẫu BTN: sử dụng chày đầm và khuôn đầm Marshall với số chày đầm là 75x2 chày. Phương pháp Marshall sử dụng các mẫu thí nghiệm hình trụ tròn có chiều cao 63,5mm, đường kính 101,6 mm; Phương pháp Marshall cải tiến sử dụng các mẫu thí nghiệm hình trụ tròn có chiều cao 95,2 mm, đường kính 152,4 mm.

Trình tự thiết kế theo Marshall được chi tiết tại tài liệu Asphalt Institute MS-2 [56].

Tồn tại chủ yếu của phương pháp Marshall là: việc đầm đầm nén mẫu theo phương pháp Marshall được đánh giá là chưa mô phỏng hết được quá trình lu lèn thực tế ngoài hiện trường; chưa xem xét để khắc phục các hư hỏng chủ yếu của bê tông nhựa như: LVBX, nứt mỏi và nứt ở nhiệt độ thấp.

Mặc dù có những hạn chế, tuy nhiên phương pháp Marshall vẫn được áp dụng khá phổ biến trên thế giới do những lý do sau:

- Thiết kế theo Marshall đơn giản, giá thành hệ thiết bị thí nghiệm không cao.
- Nhiều nước đã có những kinh nghiệm thu nhận được qua quá trình nhiều năm áp dụng phương pháp Marshall và có những điều chỉnh phù hợp trên cơ sở những nghiên cứu dài hạn mặt đường BTN.

1.1.2. Phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave

Phương pháp thiết kế Superpave là một trong những sản phẩm nổi bật của chương trình nghiên cứu chiến lược đường bộ (SHRP). Phương pháp thiết kế Superpave đã giải quyết vấn đề liên quan đến lựa chọn vật liệu (nhựa đường PG, cát, đá, bột khoáng) phục vụ cho thiết kế hỗn hợp BTN phù hợp với đặc tính dòng xe (lưu lượng xe, tốc độ xe lưu thông), nhằm giảm thiểu các hư hỏng mặt đường như nứt mỏi, nứt do nhiệt độ thấp, LVBX trong quá trình khai thác. Phương pháp thiết kế Superpave hiện đang được áp dụng phổ biến tại Hoa Kỳ, Canada và nhiều quốc gia phát triển khác.

Nguyên tắc thiết kế: Phương pháp thiết kế BTN theo Superpave tuân thủ theo nguyên tắc sau: sử dụng các vật liệu hợp lý để chế tạo ra một hỗn hợp BTN đạt được một mức độ nào đó về các khả năng làm việc của mặt đường BTN phù hợp với các yêu cầu về mức giao thông, môi trường, kết cấu mặt đường, và độ tin cậy. Hỗn hợp BTN được thiết kế (và đưa ra hàm lượng nhựa đường tối ưu) phải thoả mãn 2 yếu tố cơ bản sau:

- Yếu tố về đặc tính thể tích: bao gồm độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ rỗng lấp đầy nhựa của hỗn hợp BTN. Các giá trị này phải nằm trong giới hạn quy định.
- Yếu tố về đặc tính cơ học: bao gồm các chỉ tiêu liên quan đến chất lượng cốt liệu, các chỉ tiêu cường độ (khả năng làm việc) của hỗn hợp BTN và dự báo khả năng làm việc thực tế của mặt đường BTN trên cơ sở các thí nghiệm về đặc tính làm việc (Performance Test) của mẫu BTN.

Phương pháp đầm tạo mẫu BTN: sử dụng thiết bị đầm xoay Superpave (SGC), với mẫu đầm có đường kính 150 mm, mô phỏng sự đầm nén BTN của lu trên mặt đường. Quy định về thiết bị đầm xoay, trình tự tạo mẫu theo hướng dẫn tại AASHTO T 312 [36].

Việc lựa chọn cấp nhựa đường: theo phân cấp nhựa đường PG, theo tiêu chuẩn phân loại nhựa đường theo cấp đặc tính theo Superpave (AASHTO M320) [30].

Trình tự thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave theo đặc tính thể tích được hướng dẫn chi tiết tại các tiêu chuẩn hiện hành sau: Superpave Volumetric Mix Design- AASHTO M323 [29]; Practice for Superpave Volumetric Mix Design for Asphalt Mixture- AASHTO R35 [34]; TCVN 12818:2019 - Hỗn hợp BTN nóng - Thiết kế theo đặc tính thể tích Superpave [10].

1.1.3. Phân tích đánh giá những đặc thù của phương pháp thiết kế bê tông nhựa theo Superpave so với phương pháp Marshall

1.1.3.1. Phương pháp thiết kế Superpave kế thừa và phát triển một số nội dung của phương pháp thiết kế Marshall

Những nội dung kế thừa và phát triển được tóm tắt như sau:

1). Các chỉ tiêu, phép thử kiểm tra đặc tính kỹ thuật của vật liệu: Các chỉ tiêu kỹ thuật cho đá dăm, cát, bột khoáng theo Superpave nhìn chung như quy định với Marshall. Tuy nhiên, Superpave có đưa ra các mức chất lượng yêu cầu tương ứng với mức lưu lượng xe (ESAL) thiết kế, chi tiết xem [29].

2). Cấp phối hỗn hợp cốt liệu:

Nhìn chung cấp phối hỗn hợp cốt liệu theo Marshall và theo Superpave cơ bản giống nhau, đều dựa trên cơ sở cấp phối liên tục, theo công thức Fuller với hệ số mũ $n=0,45$ ($p = 100.(d/D)^{0,45}$).

Marshall sử dụng đường bao cấp phối theo ASTM D3515 tương ứng với cỡ hạt lớn nhất danh định 37,5; 25; 19; 12,5; 9,5. Mỗi đường bao cấp phối đưa ra lượng lọt sàng giới hạn qua 7 cỡ sàng: 4 cỡ sàng bắt buộc (cỡ sàng lớn nhất, cỡ sàng lớn nhất danh định, cỡ sàng 2,36 mm và cỡ sàng 0,075 mm) và 3 cỡ sàng trung gian.

Superpave sử dụng đường bao cấp phối theo Superpave tương ứng với cỡ hạt lớn nhất danh định như với ASTM D3515. Tuy nhiên, mỗi đường bao cấp phối chỉ đưa ra lượng lọt sàng giới hạn ứng với 4 cỡ sàng bắt buộc (cỡ sàng lớn nhất, cỡ sàng lớn nhất danh định, cỡ sàng 2,36 mm và cỡ sàng 0,075 mm). Các giới hạn lọt sàng tại 4 cỡ sàng này theo Superpave có cùng giá trị lượng lọt sàng so với quy định tại ASTM D3515 (áp dụng cho Marshall), chi tiết xem [29].

3). Các chỉ tiêu thí nghiệm, tính toán liên quan đến đặc tính thể tích: Các chỉ tiêu thí nghiệm, tính toán xác định các đặc tính thể tích của mẫu BTN như độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ rỗng lấp đầy nhựa theo Superpave và Marshall là giống nhau, đều dựa trên hướng dẫn của Asphalt Institute MS-2 [56].

1.1.3.2. Những đặc thù của phương pháp Superpave

So với phương pháp thiết kế Marshall, phương pháp thiết kế Superpave có đặc thù (ưu điểm) nổi bật sau:

1). Đầm mẫu BTN bằng đầm xoay

Thiết bị đầm xoay (SGC) là sản phẩm của SHRP nhằm mô phỏng được quá trình đầm nén BTN như ngoài hiện trường và các điều kiện ảnh hưởng của tải trọng xe chạy. Do bộ phận gia tải tiếp xúc với mẫu, mẫu vừa bị tác dụng của lực thẳng đứng, vừa bị tác động của mô men xoắn nên bị nén chặt lại. Cách đầm này mô phỏng như cách lu lèn BTN tại hiện trường. Cách đầm này có ưu điểm hơn hẳn cách đầm mẫu Marshall, mẫu đầm chặt do tác động của xung lực, do quả búa rơi ở độ cao quy định (50 cm), dẫn tới dễ bị vỡ hạt cốt liệu.

Tùy thuộc vào lưu lượng xe thiết kế (ESAL), Superpave quy định số lần (vòng) đầm xoay khác nhau, chi tiết xem [34].

2). Quy định về độ chặt lớn nhất cho phép (tỷ trọng khối yêu cầu) ứng với các số vòng đầm mẫu (công đầm nén) quy định: ban đầu (Nini), thiết kế (Ndes); lớn nhất (Nmax):

Khác với phương pháp Marshall chỉ quy định đầm nén mẫu với chày đầm lớn nhất (ví dụ 75 chày x 2) và xác định độ chặt (tỷ trọng khối) của mẫu, Superpave quy định phải đầm nén mẫu với 3 mức vòng đầm xoay gọi là: số vòng xoay ban đầu ban đầu (Nini), thiết kế (Ndes); lớn nhất (Nmax) và độ chặt tương ứng của các mức đầm đó phải thỏa mãn yêu cầu quy định, chi tiết xem [29]. Việc quy định đó có ưu điểm là đã xem xét đến đặc tính góc cạnh của cốt liệu cũng như của cấp phối cốt liệu trong hỗn hợp BTN.

Nếu hỗn hợp BTN ứng với số vòng xoay đầm Nini mà đã quá chặt (lớn hơn 89%) thì hỗn hợp cốt liệu đó được coi là “yếu”, các hạt cốt liệu có xu thế bị tròn cạnh, chèn móc giữa các hạt cốt liệu kém, hỗn hợp dễ đầm chặt và do đó sau này dễ phát sinh LVBX trong quá trình khai thác.

Tương tự, để hỗn hợp cốt liệu đủ “khỏe”, chèn móc giữa các hạt cốt liệu tốt, thì khi đầm mẫu tại số vòng xoay lớn nhất Nmax (ứng với quá trình mặt đường BTN đang trong thời gian khai thác) cũng không được quá chặt (không lớn hơn 98%). Việc BTN quá chặt cũng là cơ sở để gây LVBX mặt đường.

3). Cấp phối thô, mịn

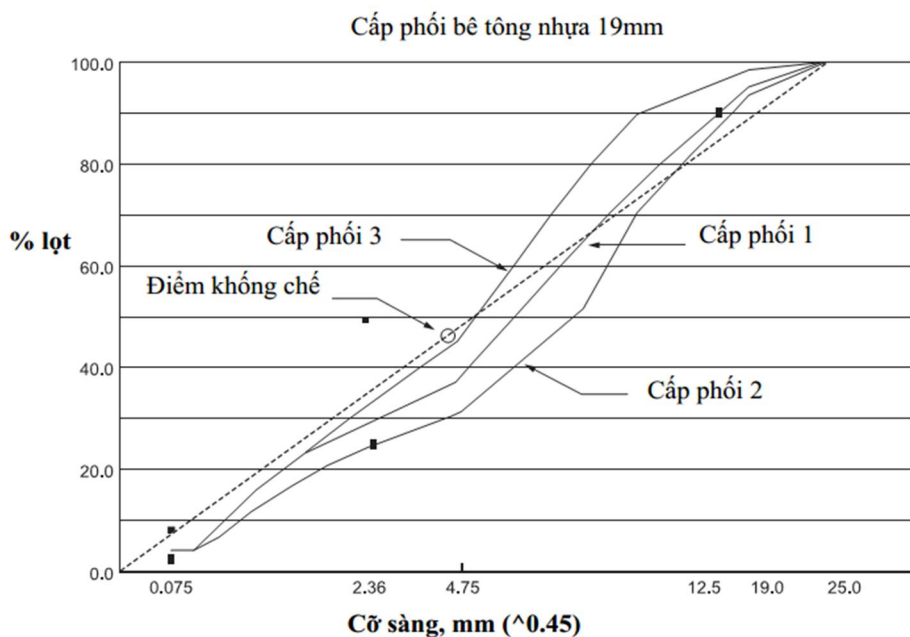
Superpave có điểm khác biệt so với Marshall là đã xem xét đến tính “thô” (coarse graded) và tính “mịn” (fine graded) của hỗn hợp cốt liệu sử dụng để chế tạo BTN. Những quy định về cấp phối thô, cấp phối mịn được hướng dẫn chi tiết tại Bảng 1-1.

Bảng 1-1. Cỡ sàng không chế, lượng lọt sàng không chế [29]

Cỡ hạt lớn nhất danh định	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	15,5 mm	9,5 mm
Sàng không chế	9,5 mm	4,75mm	4,75 mm	2,36 mm	2,36 mm
% lọt sàng không chế	47	40	47	39	47

Có những nghiên cứu trên thế giới chỉ ra rằng, cấp phối thô thường tạo ra hỗn hợp BTN có khả năng kháng LVBX cao hơn so với cấp phối mịn, và cấp phối mịn có khả năng tạo ra hỗn hợp BTN có khả năng kháng nứt mỏi cao hơn so với cấp phối thô.

Thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave (AASHTO M323 [29], AASHTO R35 [34], TCVN 12818:2019 [10]) qui định cần lựa chọn ít nhất 3 cấp phối cốt liệu có tính thô, mịn khác nhau ứng với kích cỡ hạt lớn nhất danh định để thiết kế (ví dụ minh họa tại Hình 1-1) để tạo mẫu BTN, thí nghiệm xác định các đặc tính thể tích của mẫu BTN, nếu cấp phối nào thỏa mãn yêu cầu quy định thì lựa chọn cấp phối đó để tiến hành các bước tiếp theo.



Hình 1-1. Minh họa 3 cấp phối BTN 19 mm sử dụng để thiết kế [10]

Ý tưởng về cấp phối thô, mịn của Superpave cũng đã được tham khảo và đưa vào TCVN 13567:2022 - Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu [15], tuy nhiên chưa có hướng dẫn khi thiết kế hỗn hợp BTN cần lựa chọn ít nhất 3 cấp phối cốt liệu có tính thô, mịn khác nhau để tạo mẫu BTN, thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý của mẫu BTN, từ đó lựa chọn được cấp phối cốt liệu tối ưu.

4). Lựa chọn nhựa đường PG phù hợp với nhiệt độ môi trường và đặc tính dòng xe

Đây là điểm khác biệt giữa thiết kế Superpave so với thiết kế Marshall. Superpave sử dụng nhựa đường PG theo quy định tại AASHTO M 320 [30]. Nhựa đường PG bao gồm cả nhựa đường thường và nhựa đường polime.

Phân cấp nhựa đường PG theo cả nhiệt độ mặt đường cao nhất và thấp nhất, ký hiệu là PG xx-yy, trong đó xx là nhiệt độ cao nhất trung bình của 7 ngày, yy là nhiệt độ của 1 ngày thấp nhất trong năm, với số năm quan trắc lớn hơn hoặc bằng 20 năm.

Tiêu chuẩn phân cấp nhựa đường PG không phân loại riêng cho nhựa đường thường, nhựa đường cải thiện polime mà quy định chung là việc sử dụng nhựa đường thường hay nhựa đường polime tùy thuộc vào cấp nhựa đường PG. Để thỏa mãn yêu cầu với cấp nhựa PG, nhìn chung với nhựa đường có cấp PG theo nhiệt độ cao khá lớn, hoặc cấp theo nhiệt độ thấp khá nhỏ thì phải là loại nhựa đường cải thiện polime.

Theo Superpave, việc lựa chọn nhựa đường PG cho tuyến đường cần phải tiến hành theo trình tự sau:

- Lựa chọn cấp nhựa đường PG phù hợp với điều kiện nhiệt độ vùng khí hậu.
- Lựa chọn (điều chỉnh) cấp nhựa đường PG phù hợp với điều kiện dòng xe (tải trọng xe, lưu lượng xe, tốc độ dòng xe lưu thông): trên cơ sở đã chọn cấp nhựa đường PG phù hợp với điều kiện nhiệt độ vùng khí hậu, tiếp tục chọn mức nhựa đường PG phù hợp với điều kiện dòng xe.

Theo quy định của AASHTO M323 [29], sau khi chọn cấp nhựa PG theo điều kiện nhiệt độ vùng, cần điều chỉnh cấp nhựa đường PG theo đặc tính dòng xe (theo cấp lưu lượng xe ESAL và tốc độ dòng xe lưu thông: Tiêu chuẩn; Chậm và Đứng yên) như chỉ ra tại Bảng 1-2.

Bảng 1-2. Điều chỉnh mức nhựa PG theo đặc tính dòng xe [29]

Tổng số trục xe thiết kế trong 20 năm, triệu ESAL/làn xe	Điều chỉnh mức nhựa PG theo mức lưu lượng xe và tốc độ dòng xe ^a		
	Tiêu chuẩn (Tốc độ dòng xe trung bình > 70 km/h)	Chậm (Tốc độ dòng xe trung bình từ 20 km/h đến 70 km/h)	Đứng yên (Tốc độ dòng xe trung bình < 20 km/h)
< 0,3	—	—	— ^b
0,3 đến <3	—	1	2
3 đến <10	—	1	2
10 đến <30	— ^b	1	2
≥ 30	1	1	2

Chú thích Bảng 1-2:

- ^a : Tăng cấp nhựa theo nhiệt độ cao bằng số cấp tương đương như chỉ ra tại Bảng 1-2 (một cấp tương đương với 6⁰C). Giữ nguyên cấp nhựa theo nhiệt độ thấp.
- ^b : Xem xét có thể tăng cấp nhựa PG lên một cấp (cấp nhiệt độ cao) (với dòng giao thông đứng yên khi lưu lượng xe thiết kế <0,3 triệu ESAL, với dòng giao thông tiêu chuẩn khi lưu lượng xe thiết kế từ 10-30 triệu ESAL).

Ý tưởng về lựa chọn nhựa đường PG phù hợp với nhiệt độ môi trường và đặc tính dòng xe của Superpave cũng đã được tham khảo và đưa vào Phụ lục B và Phụ lục C của TCVN 13567-1:2022 - Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu - Phần 1: Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường thông thường [15].

5) Tỷ lệ D/B

Superpave khuyến nghị tỷ lệ giữa lượng lọt qua sàng 0,075 mm và hàm lượng nhựa có hiệu (D/B) cho hỗn hợp cốt liệu mịn là từ 0,6-1,2 và cho hỗn hợp cốt liệu thô là từ 0,8-1,6 khi thiết kế hỗn hợp BTN.

Theo kết quả nghiên cứu của một số tổ chức trên thế giới, tỷ lệ D/B hợp lý là cơ sở để tạo nên hỗn hợp vữa nhựa (hỗn hợp hạt mịn và nhựa đường) phù hợp, tạo điều kiện để

hỗn hợp BTN vừa có khả năng kháng môi, kháng LVBX. Nếu ít hạt mịn, dẫn tới thừa nhựa và BTN có xu thế bị LVBX, và ngược lại dẫn đến dễ bị môi.

Ý tưởng về tỷ lệ giữa lượng lọt qua sàng 0,075 mm và hàm lượng nhựa có hiệu (D/B) của Superpave cũng đã được tham khảo và đưa vào TCVN 13567:2022 - Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu [15].

6) Đánh giá khả năng kháng ẩm của mẫu BTN qua chỉ tiêu tỷ số cường độ chịu kéo gián tiếp TSR

Thí nghiệm cường độ chịu kéo gián tiếp (có thể gọi tắt là ép chẻ) theo AASHTO T283 [35] nhằm đánh giá khả năng kháng ẩm của hỗn hợp BTN khi chịu tác động của nước trong quá trình khai thác mặt đường. Dưới tác động của nước, mẫu BTN bão hòa nước sẽ suy giảm cường độ, nếu hệ số cường độ chịu kéo gián tiếp- TSR (tỷ số cường độ giữa mẫu ướt và mẫu khô) nhỏ hơn quy định (thường là 0,8) thì mẫu BTN thiết kế có khả năng nhạy ẩm lớn, cần phải xem xét cải thiện, hoặc bổ sung phụ gia tăng dính bám, hoặc phải thay nguồn cốt liệu.

Trên cơ sở những nội dung chủ yếu của hai phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall và Superpave đã nêu tại mục 1.1.1 và 1.1.2, tiến hành tóm tắt, so sánh các chỉ tiêu chính của phương pháp Marshall và Superpave. Kết quả thể hiện tại bảng 1-3.

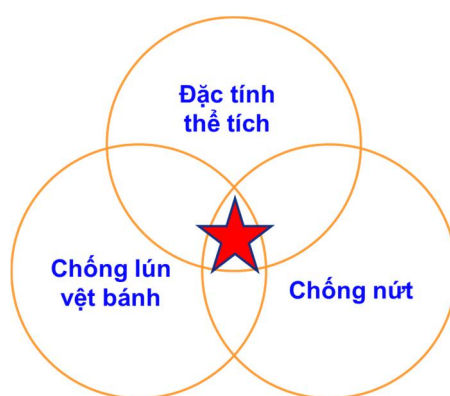
Bảng 1-3. Tóm tắt, so sánh phương pháp Marshall và Superpave

Chỉ tiêu so sánh	Marshall	Superpave
Phương pháp đầm mẫu	Sử dụng chày đầm và khuôn đầm Marshall, mẫu đầm chặt do tác động của xung lực, do quả búa rơi ở độ cao quy định (50 cm), dẫn tới dễ bị vỡ hạt cốt liệu	Sử dụng đầm xoay SGC mô phỏng như cách lu lèn BTN tại hiện trường, bộ phận gia tải tiếp xúc với mẫu, mẫu vừa bị tác dụng của lực thẳng đứng, vừa bị tác động của mô men xoắn nên bị nén chặt lại
Năng lượng đầm mẫu	75 chày x 2 mặt	Đầm nén mẫu với 3 mức vòng đầm xoay Nini, Ndes, Nmax và qui định độ chặt tương ứng của các mức đầm đó để đánh giá mức độ khô - yếu của cấp phối cốt liệu
Chất lượng vật liệu	Quy định chung về các chỉ tiêu kỹ thuật cho đá dăm, cát, bột khoáng	Qui định các mức chất lượng yêu cầu tương ứng với mức lưu lượng xe (ESAL) thiết kế
Lựa chọn loại nhựa đường sử dụng	Sử dụng nhựa đường phân cấp theo độ kim lún, chưa có hướng dẫn khi nào sử dụng nhựa đường thông thường và khi nào sử dụng nhựa đường polime	Sử dụng cấp nhựa đường PG phù hợp với điều kiện nhiệt độ vùng khí hậu và điều chỉnh cấp nhựa đường PG theo đặc tính dòng xe (tải trọng xe, lưu lượng xe, tốc độ dòng xe lưu thông)

Chỉ tiêu so sánh	Marshall	Superpave
Số lượng cấp phối phải dùng khi thiết kế	Không đưa ra qui định, thông thường chỉ sử dụng 01 cấp phối	Qui định cần lựa chọn ít nhất 03 cấp phối cốt liệu có tính thô - mịn khác nhau
Kết quả thiết kế	Không đưa ra qui định cấp phối thô - mịn và cách lựa chọn cấp phối thô - mịn khi thiết kế hỗn hợp BTN	Lựa chọn được cấp phối thô - mịn có tính định lượng

1.2. Phân tích thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng

Xu hướng thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave hiện nay tại Hoa Kỳ là thiết kế hỗn hợp BTN theo nguyên lý cân bằng BMD (Balanced Mix Design) giữa các đặc trưng thể tích-độ nhạy ẩm, khả năng chống LVBX, và khả năng chống nứt (Hình 1-2).



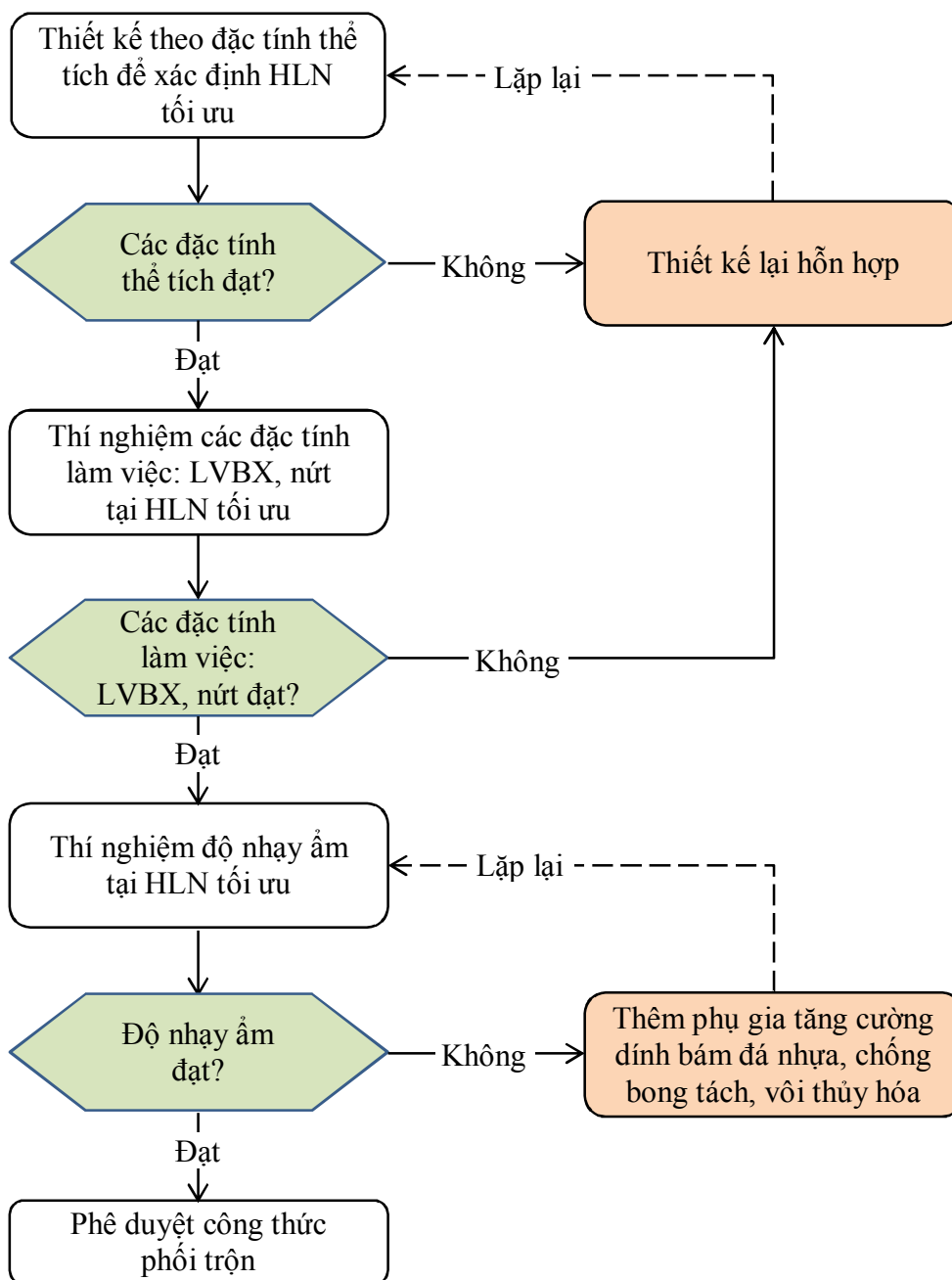
Hình 1-2. Sơ đồ thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng

Vào tháng 9 năm 2015, Cơ quan quản lý đường bộ liên bang (FHWA) đã thành lập một nhóm chuyên gia để nghiên cứu về “Thiết kế hỗn hợp BTN cân bằng (BMD)”. Thiết kế cân bằng kết hợp hai hoặc nhiều thử nghiệm đặc tính làm việc của hỗn hợp BTN như thử nghiệm LVBX, thử nghiệm nứt và thử nghiệm độ nhạy ẩm để đánh giá mức độ hỗn hợp chống lại các dạng hư hỏng phổ biến.

Thiết kế cân bằng hỗn hợp BTN có nghĩa là hỗn hợp BTN được thiết kế để đạt được sự cân bằng tối ưu giữa khả năng chống LVBX và khả năng chống nứt bằng cách sử dụng các thử nghiệm về đặc tính làm việc hỗn hợp BTN được lựa chọn thay vì chỉ dựa vào các chỉ tiêu về đặc tính thể tích của hỗn hợp BTN. Hiện nay, nhiều bang ở Hoa Kỳ đã áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo nguyên lý cân bằng và AASHTO đã phát hành 2 tiêu chuẩn AASHTO PP 105-20 [32] và AASHTO MP 46-20 [31] thiết kế hỗn hợp BTN theo nguyên lý cân bằng với 04 cách bao gồm:

1.2.1. Cách A: Thiết kế theo thể tích và kiểm tra, xác nhận các đặc tính làm việc (Volumetric Design with Performance Verification)

Trình tự thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng theo cách A như mô tả tại Hình 1-3, bao gồm các bước sau:



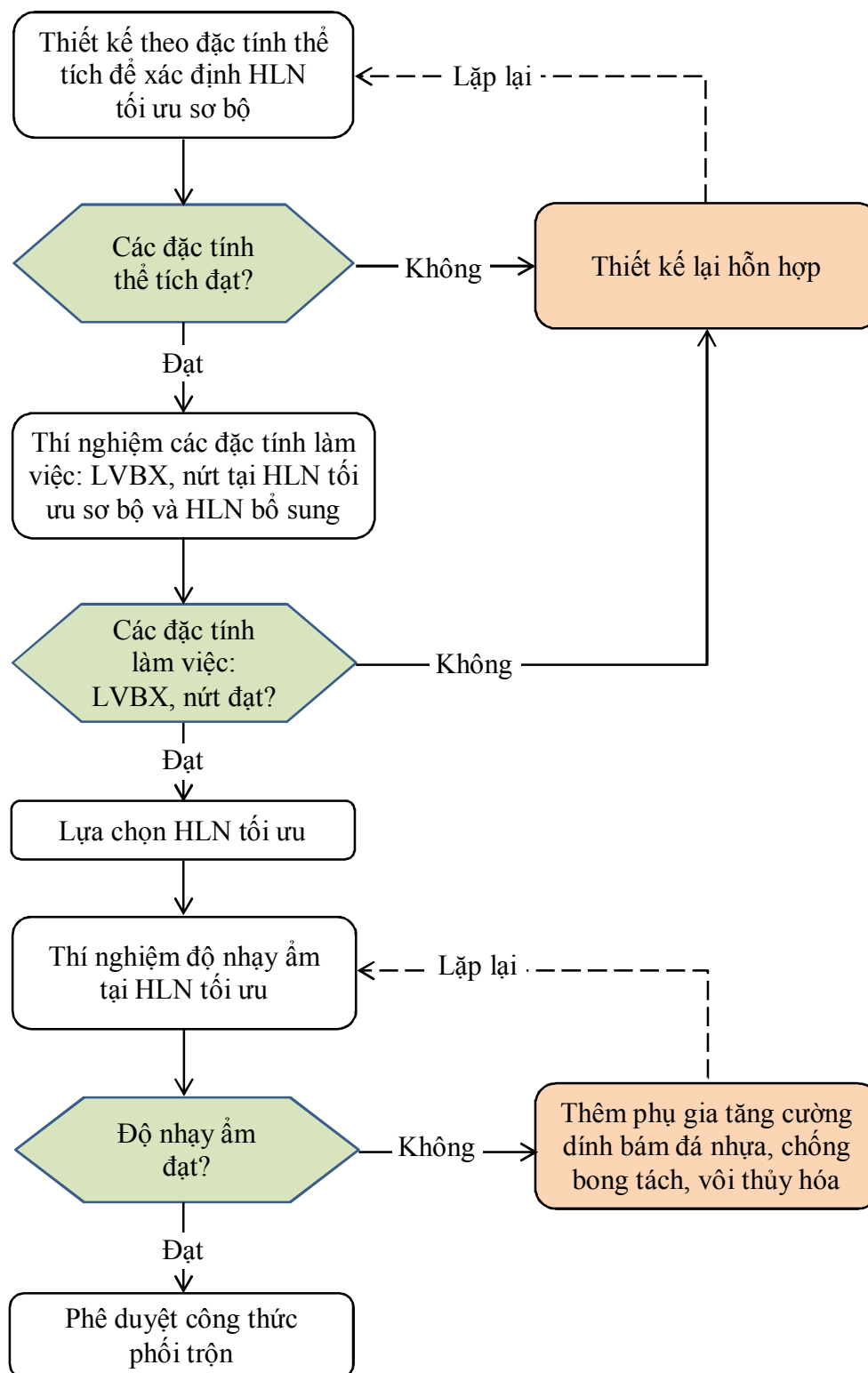
Hình 1-3. Cách A thiết kế theo thể tích và kiểm tra đặc tính làm việc

- Bước 1: Thiết kế hỗn hợp BTN theo đặc tính thể tích Superpave để xác định HLN tối ưu thỏa mãn các yêu cầu về thể tích quy định.
- Bước 2: Chế bị mẫu BTN tại HLN tối ưu đã xác định tại bước 1 để thí nghiệm LVBX và nứt. Nếu không đạt thì lặp lại bước 1 cho đến khi tất cả các chỉ tiêu về thể tích, LVBX và nứt đều thỏa mãn.
- Bước 3: Chế bị mẫu BTN tại HLN tối ưu để thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm, nếu đạt thì chấp nhận công thức cho sản xuất. Nếu không đạt thì cần phải thêm các phụ gia tăng cường dính bám đá nhựa, chống bong tách hoặc vôi thủy hóa và lặp lại bước 3 cho đến khi đạt yêu cầu.

Cách A là cách thận trọng nhất và có tiềm năng đổi mới thấp nhất.

1.2.2. Cách B: Thiết kế theo thể tích và tối ưu hóa đặc tính làm việc (Volumetric Design with Performance Optimization)

Cách B là phiên bản mở rộng của cách A. Cách B yêu cầu tuân thủ đầy đủ các yêu cầu về thể tích tại HLN tối ưu sơ bộ nhưng cho phép thay đổi vừa phải HLN để tối ưu hóa đặc tính làm việc dựa trên kết quả thử nghiệm. Trình tự thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng theo cách B như mô tả tại Hình 1-4:



Hình 1-4. Cách B thiết kế theo thể tích và tối ưu đặc tính làm việc

- Bước 1: Thiết kế hỗn hợp BTN theo đặc tính thể tích Superpave để xác định HLN sơ bộ thỏa mãn các yêu cầu về thể tích quy định.

- Bước 2: Chế bị mẫu BTN tại HLN sơ bộ và ít nhất hai HLN trong khoảng $\pm 0,3\%$ đến $\pm 0,5\%$ giá trị HLN sơ bộ đã xác định tại bước 1 để thí nghiệm LVBX và nứt. Sau đó, HLN đáp ứng cả hai tiêu chí kiểm tra LVBX và nứt được chọn làm HLN tối ưu. Nếu không đạt thì lặp lại bước 1 cho đến khi tất cả các chỉ tiêu về thể tích, LVBX và nứt đều thỏa mãn.

- Bước 3: Chế bị mẫu BTN tại HLN tối ưu để thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm, nếu đạt thì chấp nhận công thức cho sản xuất. Nếu không đạt thì cần phải thêm các phụ gia tăng cường dính bám đá nhựa, chống bong tách hoặc vôi thủy hóa và lặp lại bước 3 cho đến khi đạt yêu cầu.

Mặc dù cách B linh hoạt hơn một chút so với cách A, nhưng nó vẫn được coi là một cách thận trọng với tiềm năng đổi mới hạn chế.

1.2.3. Cách C: Thiết kế theo đặc tính làm việc - hiệu chỉnh thể tích (Performance-Modified Volumetric Mix Design).

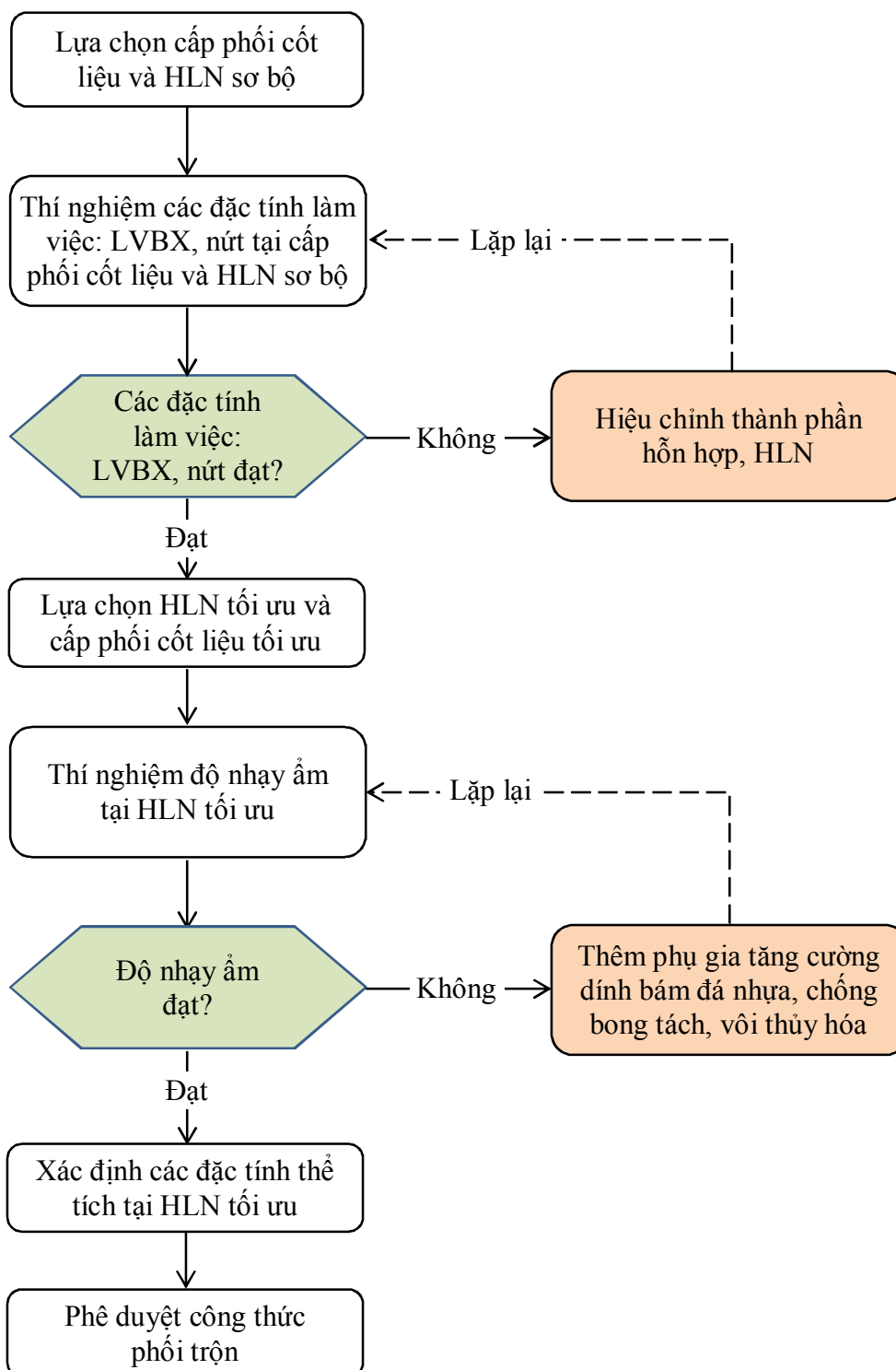
Trình tự thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng theo cách C như mô tả tại Hình 1-5, bao gồm các bước sau:

- Bước 1: Thiết kế hỗn hợp BTN theo đặc tính thể tích Superpave để xác định cấp phối cốt liệu và HLN sơ bộ.

- Bước 2: Chế bị mẫu BTN tại cấp phối cốt liệu và HLN sơ bộ đã xác định tại bước 1 để thí nghiệm LVBX và nứt. Nếu không đạt thì lặp lại bước 1 cho đến khi tất cả các chỉ tiêu về thể tích, LVBX và nứt đều thỏa mãn, từ đó lựa chọn được HLN tối ưu và cấp phối cốt liệu tối ưu.

- Bước 3: Chế bị mẫu BTN tại HLN tối ưu để thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm, nếu đạt thì thí nghiệm xác định các đặc tính thể tích tại HLN tối ưu và chấp nhận công thức cho sản xuất. Nếu không đạt thì cần phải thêm các phụ gia tăng cường dính bám đá nhựa, chống bong tách hoặc vôi thủy hóa và lặp lại bước 3 cho đến khi đạt yêu cầu.

Cách C cho phép một số yêu cầu về thể tích được nới lỏng hoặc loại bỏ miễn là các tiêu chí đặc tính làm việc được thỏa mãn. Do đó, nó ít bảo thủ hơn cách A và cách B, nó cung cấp tiềm năng đổi mới ở mức độ trung bình.



Hình 1-5. Cách C thiết kế theo đặc tính làm việc - hiệu chỉnh thể tích

1.2.4. Cách D: Thiết kế theo đặc tính làm việc (Performance Design).

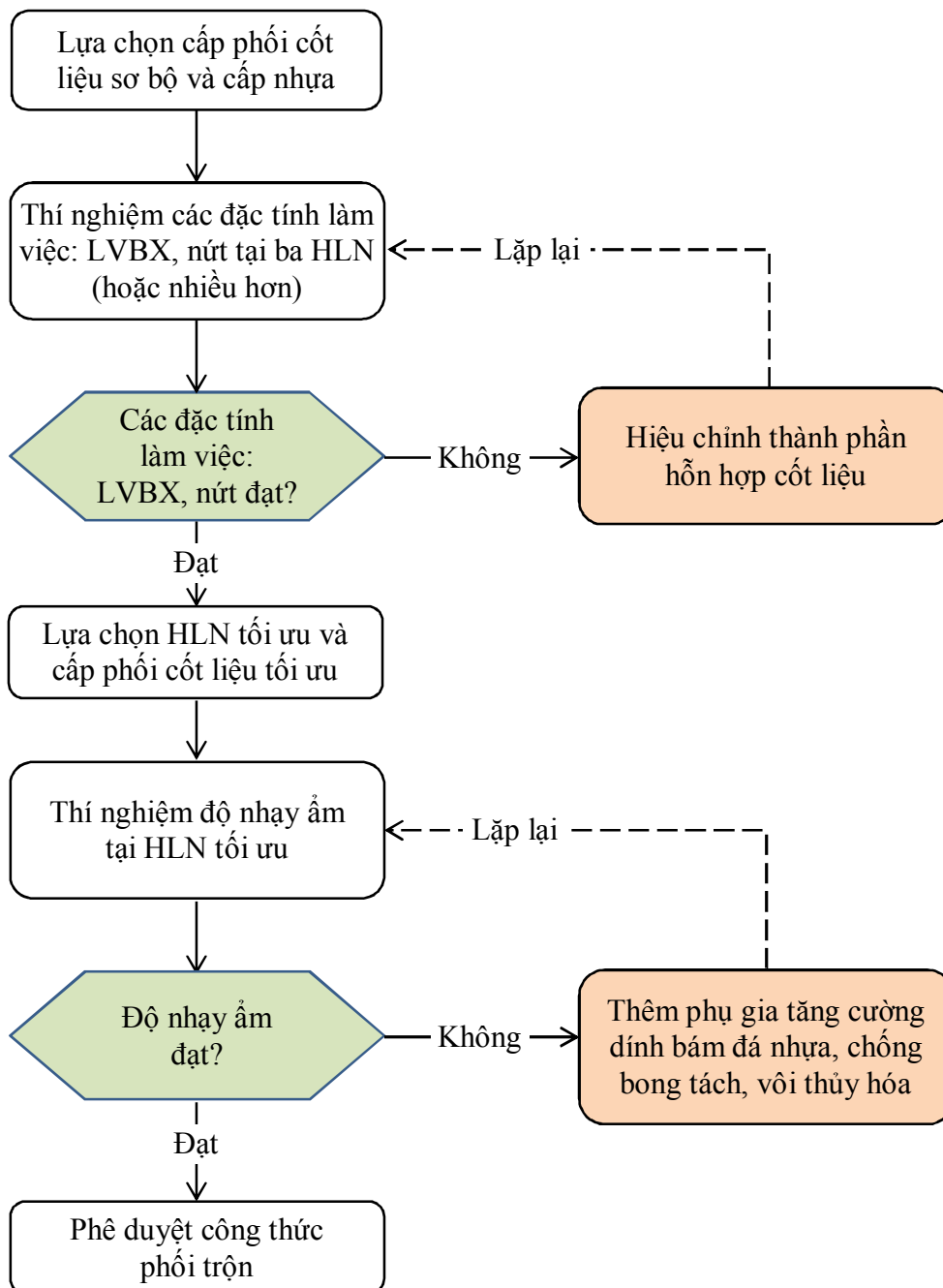
Trình tự thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng theo cách D như mô tả tại Hình 1-6, bao gồm các bước sau:

- Bước 1: Lựa chọn cấp phối cốt liệu và HLN sơ bộ.
- Bước 2: Chế bị mẫu BTN tại tối thiểu ba HLN trong khoảng thay đổi từ 0,3% đến 0,5% so với HLN sơ bộ đã xác định tại bước 1 để thí nghiệm LVBX và nứt. Sau đó,

HLN đáp ứng cả hai tiêu chí kiểm tra LVBX và nút được chọn làm HLN tối ưu. Nếu không đạt thì lặp lại bước 1 cho đến khi các chỉ tiêu về LVBX và nút đều thỏa mãn.

- Bước 3: Chế bị mẫu BTN tại HLN tối ưu để thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm, nếu đạt thì chấp nhận công thức cho sản xuất. Nếu không đạt thì cần phải thêm các phụ gia tăng cường dính bám đá nhựa, chống bong tách hoặc vôi thủy hóa và lặp lại bước 3 cho đến khi đạt yêu cầu.

Cách D không có yêu cầu về thể tích và chỉ dựa vào kết quả thử nghiệm đặc tính làm việc để tối ưu hóa hỗn hợp thiết kế, và do đó, nó được coi là cách ít thận trọng nhất với mức độ tiềm năng đổi mới cao nhất.



Hình 1-6. Cách D thiết kế theo đặc tính làm việc

Việc phân tích, lựa chọn cách thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng phù hợp với điều kiện Việt Nam sẽ được thực hiện trong Chương 2 của Luận án.

1.3. Các dạng hư hỏng chính của mặt đường BTN

Các dạng hư hỏng mặt đường BTN điển hình phát sinh trong quá trình khai thác dưới tác động của tải trọng xe và nhiệt độ môi được thể giới tổng kết bao gồm: LVBX; nứt mỏi; nứt do nhiệt và phá hoại do ẩm.

1.3.1. Lún vệt bánh xe

(1) *Khái niệm về lún vệt bánh xe*

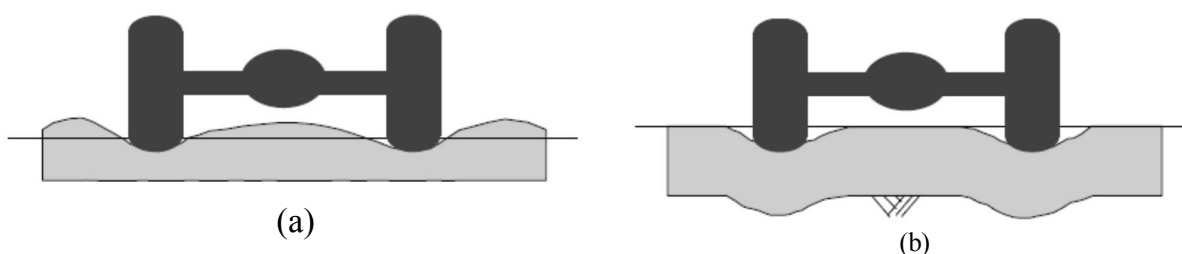
LVBX là hiện tượng bề mặt của mặt cắt ngang mặt đường BTN không còn giữ nguyên được hình dạng như thiết kế ban đầu, mặt đường bị lún xuống tại vị trí vệt bánh xe, và hình thành các vệt lún theo chiều dọc của đường.

LVBX là hiện tượng tích lũy biến dạng không hồi phục của các lớp BTN mặt đường do ảnh hưởng của phương tiện xe lưu thông và nhiệt độ môi trường gây ra trong quá trình khai thác. LVBX là dạng hư hỏng điển hình của biến dạng vĩnh cửu.

(2) *Các dạng lún vệt bánh xe*

Có 2 dạng LVBX phổ biến đó là:

- LVBX do lớp BTN “yếu”, không đủ cường độ kháng cắt để chống lại ứng suất cắt do tải trọng bánh xe gây ra trong lớp BTN (Hình 1-7a);
- LVBX do các lớp nền, móng “yếu” (Hình 1-7b).



Hình 1-7. Các dạng LVBX [57]

LVBX là do tổ hợp của các nguyên nhân: Do dòng xe lưu thông (lưu lượng xe, tải trọng xe); chất lượng các lớp kết cấu áo đường (BTN mặt đường, móng đường, nền đường); điều kiện khí hậu (nhiệt độ, độ ẩm).

(3) *Các phương pháp thí nghiệm lún vệt bánh xe*

Hiện nay có rất nhiều phương pháp thí nghiệm LVBX cho BTN trong phòng thí nghiệm được nghiên cứu áp dụng trên thế giới, mỗi phương pháp đều có các ưu, nhược điểm và phạm vi áp dụng riêng, tùy điều kiện cụ thể của các nước mà lựa chọn phương pháp thí nghiệm phù hợp:

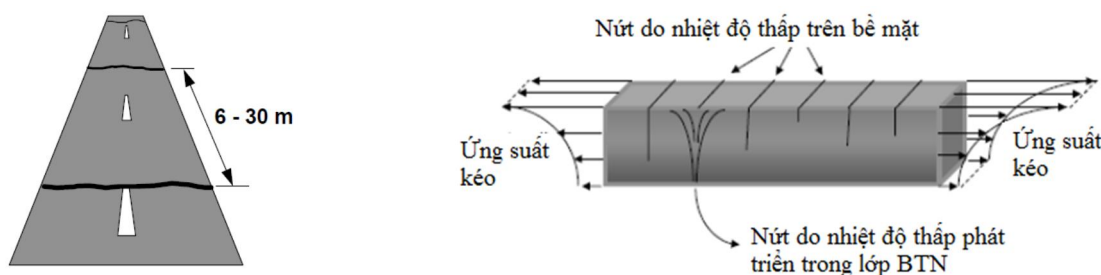
1. Thí nghiệm APA (Asphalt Pavement Analyzer) theo AASHTO T340 [39].
2. Thí nghiệm chỉ số chảy (Flow Number Test) theo AASHTO T378 [40].
3. Thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking theo AASHTO T324 [38].
4. Thí nghiệm cắt Superpave (Superpave Shear Tester) theo AASHTO T320 [37].

Việc phân tích, đề xuất phương pháp thí nghiệm LVBX phù hợp với điều kiện Việt Nam sẽ được thực hiện trong Chương 2 của Luận án.

1.2.2. Nứt do nhiệt độ thấp

Nứt do nhiệt độ thấp là các vết nứt ngang xuất hiện trên mặt đường không liên tục và thường cách nhau một khoảng cách từ 6m đến 30m (xem Hình 1-8) [52].

Nứt do nhiệt độ thấp xảy ra khi lớp BTN bị co lại trong thời tiết lạnh. Bởi vì lớp BTN này có độ dính bám với các lớp bên dưới, nên sự co lại của lớp BTN sẽ bị hạn chế, sức kháng này gây ra các ứng suất kéo để tích tụ trong lớp BTN. Nếu những ứng suất kéo này tiếp tục gia tăng và vượt quá cường độ chịu kéo của lớp BTN thì sẽ gây ra các vết nứt do nhiệt độ thấp (xem Hình 1-8). Vết nứt này thường bắt đầu xuất hiện ở trên mặt của lớp BTN, ở đó ứng suất kéo là lớn nhất, sau đó vết nứt sẽ lan truyền xuống dưới cho đến khi lớp BTN bị nứt hoàn toàn.



Hình 1-8. Nứt do nhiệt độ thấp [52]

Hầu hết các thí nghiệm đánh giá nứt do nhiệt độ thấp đều được thực hiện tại nhiệt độ khá thấp (nhiệt độ âm), trên hệ thống thiết bị đồng bộ, phức tạp và đắt tiền, do vậy hiện nay ít được sử dụng khi thiết kế hỗn hợp BTN. Mặt khác, do đặc thù điều kiện khí hậu Việt Nam không xuất hiện nhiệt độ quá thấp (âm) nên đề xuất không lựa chọn chỉ tiêu thử nghiệm đánh giá khả năng chống nứt do nhiệt độ thấp khi thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam.

1.3.3. Nứt mỏi (nứt ở nhiệt độ trung gian)

Nứt mỏi của BTN xảy ra là do tác động của tải trọng trùng phục gây ra trong quá trình khai thác. Khi ứng suất kéo uốn do tải trọng trùng phục gây ra trong lớp vật liệu BTN lớn hơn cường độ kéo uốn của vật liệu BTN, mặt đường BTN xuất hiện nứt mỏi.

Nứt mỏi thường xảy ra vào mùa có nhiệt độ môi trường trung gian (nhiệt độ trung bình giữa nhiệt độ cao nhất và thấp nhất xảy ra trong năm). Tại nhiệt độ trung gian, BTN có xu hướng cứng hơn và giòn hơn so với khi nhiệt độ cao nên dưới tác động của tải trọng lặp, BTN có xu hướng bị nứt mỏi. Vết nứt đầu tiên hình thành trong BTN thường rất nhỏ, khó nhận biết. Dưới tác động của tải trọng trùng phục, những vết nứt nhỏ sẽ dần phát triển về kích thước và số lượng cho đến khi thành các vết nứt lớn hơn nhiều, và cuối cùng hình thành hệ vết nứt (Hình 1-9).



Hình 1-9. Hư hỏng nứt mỏi mặt đường BTN

Nứt mỏi có thể xảy ra sớm và từ nhiều nguyên nhân khác nhau trong đó có nguyên nhân do chất lượng của hỗn hợp BTN kém, không đủ khả năng chống nứt mỏi.

Theo báo cáo NCHRP 20-07/Task 406 (2018) [61] cho thấy nứt mỏi là dạng hư hỏng của BTN được quan tâm nhất hiện nay tại Hoa Kỳ, có tới 40/50 bang của Hoa Kỳ quan tâm đến các thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN.

1.3.4. Phá hoại do ẩm

Hư hỏng của mặt đường BTN do ẩm là sự suy giảm khả năng bám dính giữa bề mặt cốt liệu với nhựa đường do tác động của nước. Hiện tượng hư hỏng do suy giảm khả năng bám dính giữa bề mặt cốt liệu với nhựa đường được gọi là hiện tượng bong tách. Bong tách có liên quan đến cốt liệu, nhựa đường, và tương tác giữa cốt liệu với nhựa đường. Dưới tác động của độ ẩm, của nhiệt độ môi trường thay đổi, hiện tượng bong tách sẽ phát triển dẫn tới mặt đường BTN bị suy giảm cường độ. Trường hợp điển hình của sự suy giảm cường độ BTN do bong tách là sau khoảng một vài năm, hiện tượng LVBX, nứt mỏi BTN xuất hiện và thường xảy ra tại vị trí vệt bánh xe. Hiện tượng hư hỏng này sẽ tăng nhanh khi mặt đường BTN có lưu lượng xe lớn, nhiều xe tải nặng.

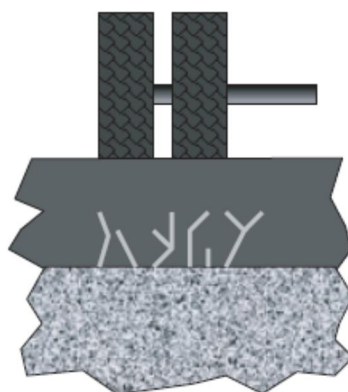
Mặt đường BTN thường chịu tác động của ẩm khi trời mưa, khi độ ẩm không khí cao, khi có các nguồn ẩm gây ra tại các lớp móng đường. Nếu mặt đường BTN được thiết kế, thi công theo đúng quy định thì nước không dễ dàng thấm vào lớp BTN, tuy nhiên nước vẫn có thể thấm vào lớp BTN ngay cả khi lớp BTN đã được đầm nén tốt. Nước tác động vào vùng tiếp xúc giữa bề mặt cốt liệu và nhựa đường trong hỗn hợp BTN gây ra suy giảm liên kết đá-nhựa đường, thậm chí có thể làm phá hủy hoàn toàn mối liên kết này. Mặt đường BTN bị hư hỏng do ẩm rất khó sửa chữa. Giải pháp phổ biến là phải cào bóc lớp BTN nhựa cũ đã hư hỏng do ẩm và rải lớp BTN thay thế, dẫn tới chi phí tăng cao.

1.4. Các dạng nứt mỏi và phương pháp thí nghiệm đánh giá

1.4.1. Nứt mỏi từ dưới lên (Bottom-up fatigue cracking)

Loại nứt mỏi đầu tiên xuất hiện là các vết nứt dọc, ngắn trong phần mặt đường xe chạy. Vết nứt này nhanh chóng lan rộng và kết nối với nhau để tạo thành một chuỗi

các vết nứt. Những vết nứt này bắt đầu từ dưới cùng của lớp BTN, sau đó mở rộng dần và lan truyền lên bề mặt [24]. Cơ chế này được minh họa tại Hình 1-10.



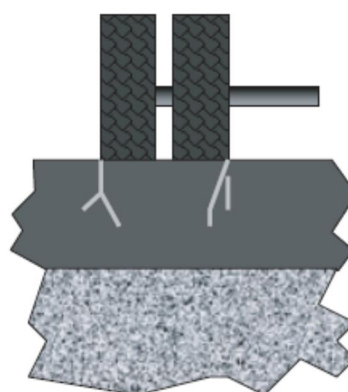
Hình 1-10. Mô hình nứt từ dưới lên [57]

Một số nguyên nhân gây ra dạng nứt này:

- Lớp mặt BTN mỏng hoặc yếu;
- Tải trọng bánh xe lớn và áp suất lốp xe cao;
- Nền, móng yếu;
- Lớp móng không đảm bảo độ chặt, độ ẩm cao hoặc mực nước ngầm cao.

1.4.2. Nứt mỏi từ trên xuống (Top-down fatigue cracking)

Hầu hết các vết nứt mỏi là truyền từ dưới lên. Tuy nhiên, có nhiều bằng chứng liên quan đến tải trọng cho thấy các vết nứt mỏi bắt đầu xuất hiện ở bề mặt và truyền xuống dưới [24], cơ chế này được minh họa ở Hình 1-11.



Hình 1-11. Mô hình nứt từ trên xuống [57]

Một số nguyên nhân gây ra dạng nứt này:

- Tải trọng bánh xe gây ra ứng suất biến dạng tại các vết nứt có sẵn ở bề mặt.
- Lão hóa lớp BTN bề mặt sẽ làm tăng tốc độ lan truyền vết nứt.
- Khi xe chạy, tải trọng bánh xe tạo ra ứng suất tiếp tác dụng lên bề mặt, đặc biệt với tải trọng nặng sẽ gây nứt bề mặt lớp BTN.

- Lão hóa phần BTN gần bề mặt, kết quả là độ cứng cao, kết hợp với áp lực bánh xe sẽ gây nứt.

1.4.3. Các mô hình và phương pháp thí nghiệm đánh giá nứt mỏi

Trên thế giới có nhiều mô hình thí nghiệm nứt mỏi của BTN như:

- Mô hình uốn dầm, bao gồm phương pháp: thí nghiệm uốn dầm 2 điểm, uốn dầm 3 điểm, uốn dầm 4 điểm, uốn dầm 5 điểm và uốn dầm trên nền đàn hồi, uốn dầm bán nguyệt SCB.

- Mô hình kéo (nén), bao gồm các phương pháp: kéo (nén) mẫu đúng tâm dọc trục, ép chẻ (kéo gián tiếp), kéo (nén) lệch tâm, cắt xoay.

Hiện nay, trên thế giới có rất nhiều phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN được nghiên cứu, phát triển và xây dựng thành các tiêu chuẩn như:

1. Thí nghiệm uốn dầm 4 điểm.
2. Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo AASHTO.
3. Thí nghiệm IDEAL CTindex.
4. Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo ASTM.
5. Thí nghiệm Texas overlay test.

Việc phân tích, đề xuất phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN phù hợp với điều kiện Việt Nam sẽ được thực hiện trong Chương 2 của Luận án.

1.5. Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave trên thế giới

Các yếu tố ảnh hưởng đến các đặc tính của bê tông nhựa Superpave (LVBX, nứt mỏi, phá hoại do ẩm) được thế giới tổng kết phân thành hai nhóm:

- Nhóm liên quan đến BTN bao gồm: cốt liệu; nhựa đường; thiết kế thành phần BTN; thi công lớp BTN.
- Nhóm liên quan đến lưu lượng xe, tải trọng xe, nhiệt độ môi trường.

1.5.1. Ảnh hưởng của các yếu tố liên quan đến BTN

Theo nghiên cứu [57] của Hoa Kỳ: Các yếu tố liên quan đến BTN có ảnh hưởng đến LVBX, nứt mỏi và phá hoại do ẩm của BTN được tóm tắt tại Bảng 1-4.

Bảng 1-4. Các yếu tố ảnh hưởng đến LVBX, nứt mỏi và phá hoại do ẩm của BTN [57]

Nhân tố ảnh hưởng	Chỉ tiêu	Khả năng chống LVBX	Khả năng chống nứt mỏi	Độ bền/ khả năng kháng ẩm
Nhựa đường	Tăng cấp nhiệt độ cao của nhựa đường PG	↑↑↑		

Nhân tố ảnh hưởng	Chỉ tiêu	Khả năng chống LVBX	Khả năng chống nứt mới	Độ bền/ khả năng kháng ẩm
(nhựa đường PG)	Tăng độ cứng (Stiffness) của nhựa đường PG tại nhiệt độ trung bình (*)		↑↓	
Cốt liệu	Tăng độ góc cạnh của cốt liệu	↑↑		
	Tăng kích cỡ hạt lớn nhất danh định		↓	↓
	Tăng hàm lượng bột khoáng và/hoặc tăng tỷ lệ bột khoáng/nhựa đường	↑↑		↑
Hỗn hợp BTN (đặc tính thể tích của BTN)	Tăng mức đầm nén khi thiết kế hỗn hợp	↑↑		
	Tăng độ rỗng BTN khi thiết kế	↑↑		
	Tăng độ rỗng cốt liệu/hoặc tăng hàm lượng nhựa thiết kế	↓↓	↑	

1.5.1.1. Ảnh hưởng của nhựa đường

Tiêu chuẩn nhựa đường theo cấp đặc tính PG của Superpave (AASHTO M320 [30], TCVN 10349:2020 [12]) có ưu điểm hơn hẳn so với tiêu chuẩn phân loại nhựa đường theo độ kim lún hoặc theo độ nhớt là đã xem xét ảnh hưởng LVBX và nứt mới của BTN. Thí nghiệm cắt động lưu biến DSR để xác định mô đun phức G^* và góc pha δ của nhựa đường; qua đó xác định được $G^*/\sin\delta$ biểu thị khả năng chống LVBX và $G^*.\sin\delta$ biểu thị khả năng chống nứt mới.

Dưới đây, dựa vào tiêu chuẩn phân loại nhựa đường PG để phân tích các nhân tố ảnh hưởng đáng kể đến LVBX và nứt của BTN trong Bảng 1-4.

(1) Ảnh hưởng của cấp nhiệt độ cao nhựa đường PG

Cấp nhiệt độ cao của nhựa đường PG là một trong một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng chống LVBX của BTN. BTN sử dụng nhựa đường PG có cấp nhiệt độ cao lớn hơn sẽ có khả năng chống LVBX cao hơn. Ngoài ra, nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng với cùng cấp nhiệt độ cao của nhựa đường PG, BTN sử dụng nhựa đường được cải thiện polyme có khả năng chống LVBX tốt hơn nhiều so với BTN sử dụng nhựa đường thông thường.

(2) Ảnh hưởng của độ cứng của nhựa đường PG tại nhiệt độ trung gian

Độ cứng (stiffness) hay chính xác hơn là mô đun độ cứng (stiffness modulus) của nhựa đường ảnh hưởng đáng kể nứt mới của BTN. BTN sử dụng nhựa đường có độ cứng

lớn hơn sẽ có khả năng chống nứt mỗi thấp hơn so với BTN sử dụng nhựa đường có độ cứng nhỏ hơn.

Độ cứng của nhựa đường tại nhiệt độ trung gian biểu thị qua giá trị $G^*. \sin \delta$. Mối quan hệ giữa $G^*. \sin \delta$ và khả năng kháng mỏi phụ thuộc vào chiều dày kết cấu áo đường. Với kết cấu mỏng, gia tăng độ cứng nhựa đường sẽ làm giảm khả năng chống nứt. Tuy nhiên với kết cấu dày thì ngược lại. Đó là lý do tại sao có hai mũi tên đi theo 2 hướng khác nhau tại mục có ký hiệu (*) của Bảng 1-4.

1.5.1.2. Ảnh hưởng của cốt liệu

(1) Ảnh hưởng của độ góc cạnh của cốt liệu

Cốt liệu sử dụng cho BTN bao gồm cốt liệu thô (đá dăm) và cốt liệu mịn (cát). Thuộc tính bề mặt cốt liệu, hình dạng hạt cốt liệu ảnh hưởng đáng kể đến góc nội ma sát φ của BTN.

Đá dăm, cát xay có độ nhám bề mặt cao (xù xì) sẽ làm tăng khả năng dính bám với nhựa; đá dăm hình khối lập phương, có độ góc cạnh lớn sẽ tạo nên liên kết tiếp xúc đá chèn đá tốt, tăng góc nội ma sát φ , giảm khả năng biến dạng dẻo của BTN nên tăng khả năng chống LVBX.

Cốt liệu có độ nhám bề mặt cao, độ góc cạnh lớn sẽ tạo nên BTN có cường độ cao, dẫn tới tăng khả năng chống nứt tốt.

Khi tải trọng xe tác dụng lên lớp BTN, các hạt cốt liệu sẽ cài móc chặt chẽ với nhau thành một khối thống nhất, nhựa đường và cốt liệu khi đó có vai trò như màng cao su và lò xo để đưa hỗn hợp BTN trở về trạng thái ban đầu mà không xuất hiện LVBX.

Cốt liệu tròn cạnh, bề mặt nhẵn, cát tự nhiên sẽ làm giảm góc nội ma sát φ của BTN, dẫn đến làm giảm khả năng kháng LVBX và chống nứt.

(2) Ảnh hưởng của kích cỡ hạt lớn nhất danh định

Có những nghiên cứu trước đây trên thế giới đưa ra kết quả khi tăng kích cỡ hạt lớn nhất danh định thì giảm LVBX, tuy nhiên, công bố gần đây trên thế giới cho thấy không có quan hệ rõ ràng giữa kích cỡ hạt lớn nhất danh định với LVBX.

Việc tăng kích cỡ hạt lớn nhất danh định sẽ làm giảm khả năng chống nứt cũng như làm giảm độ bền của BTN, nước thấm vào lớp BTN nhiều hơn dẫn tới tăng nhanh quá trình suy giảm cường độ BTN.

(3) Ảnh hưởng của hàm lượng bột khoáng và tỷ lệ bột khoáng/ nhựa đường

Bột khoáng có vai trò làm tăng liên kết đá nhựa, do đó làm tăng khả năng chống cắt của BTN, cải thiện độ ổn định của BTN khi nhiệt độ cao và ảnh hưởng tới khả năng chống LVBX trong hỗn hợp BTN. Bột khoáng và nhựa đường tạo nên hỗn hợp vữa nhựa. Cùng với cốt liệu, vữa nhựa đóng vai trò quan trọng trong khả năng chống LVBX.

Khi tăng hàm lượng bột khoáng hoặc tăng tỷ lệ bột khoáng/ nhựa đường thì khả năng chống LVBX của BTN sẽ cao hơn. Tuy nhiên, nếu tỷ lệ bột khoáng/nhựa đường quá lớn, dẫn tới hoặc nhựa đường không đủ để bao bọc các hạt bột khoáng, hoặc vữa nhựa sẽ quá cứng làm cho BTN có tính cứng lớn, khó đầm nén và dễ gây ra nứt mỏi. Nếu tỷ lệ bột khoáng/nhựa đường quá nhỏ, dẫn tới hoặc thừa nhựa đường, hoặc vữa nhựa sẽ quá mềm làm cho BTN có tính mềm và dễ gây ra LVBX.

Superpave quy định tỷ số giữa lượng lọt qua sàng 0,075 mm và hàm lượng nhựa có hiệu cho hỗn hợp cốt liệu mịn từ 0,6-1,2 và cho hỗn hợp cốt liệu thô từ 0,8-1,6 [29].

1.5.1.3. Ảnh hưởng của các đặc tính thể tích của hỗn hợp BTN

(1) Ảnh hưởng của mức đầm nén khi thiết kế hỗn hợp BTN

Thiết kế BTN theo Superpave quy định sử dụng đầm xoay SGC để đầm nén mẫu với số vòng đầm xoay phải tăng lên theo mức lưu lượng giao thông [29].

Mặc dù tăng mức đầm nén nhưng mẫu BTN vẫn phải thỏa mãn độ rỗng BTN quy định, vì vậy để thỏa mãn yêu cầu khi thiết kế hỗn hợp BTN, cốt liệu phải có chất lượng cao hơn, sử dụng nhựa đường polime cho đường có mức lưu lượng giao thông lớn, dẫn đến lớp mặt đường BTN có độ ổn định cao hơn, cường độ lớn hơn, do đó tăng khả năng chống LVBX và chống nứt mỏi.

(2) Ảnh hưởng của độ rỗng dư BTN khi thiết kế

Với bê tông nhựa chặt, độ rỗng dư thiết kế thường trong khoảng 3% - 6%, hợp lý nhất vào khoảng 4% khi thiết kế hỗn hợp BTN.

Khi thiết kế BTN với độ rỗng dư không phù hợp, mặt đường sẽ dễ phát sinh LVBX và nứt mỏi (nếu độ rỗng hiện trường lớn hơn 7% và nhỏ hơn 3%).

(3) Ảnh hưởng của độ rỗng cốt liệu (VMA)/hoặc hàm lượng nhựa thiết kế

Khi VMA quá lớn, thì hoặc độ rỗng dư BTN quá nhỏ, hoặc hàm lượng nhựa thiết kế quá nhiều dẫn tới BTN dễ bị LVBX.

Khi VMA quá nhỏ, thì hoặc độ rỗng dư BTN quá lớn, hoặc hàm lượng nhựa thiết kế quá ít dẫn tới hỗn hợp BTN sẽ có độ bền kém, dễ bị nứt.

Vì vậy cần kiểm soát cả VMA và độ rỗng dư BTN trong quá trình thiết kế.

Hàm lượng nhựa là một trong những chỉ tiêu quan trọng trong thiết kế hỗn hợp BTN. Việc lựa chọn được hàm lượng nhựa thiết kế hợp lý (hàm lượng nhựa tối ưu) là vấn đề thiết yếu để mặt đường BTN có đặc tính cao.

Hàm lượng nhựa quá ít thì hỗn hợp BTN quá khô, cứng dẫn đến khó rải và đầm nén khi thi công BTN và dẫn đến giảm khả năng chống nứt, giảm cường độ lớp BTN. Ngược lại, hàm lượng nhựa quá nhiều thì hỗn hợp BTN quá dẻo, dẫn đến xô dón BTN và giảm khả năng kháng LVBX. Tương tự, độ rỗng cốt liệu VMA quá nhỏ thì hàm lượng nhựa quá lớn và ngược lại.

Vì vậy việc lựa chọn hàm lượng nhựa hợp lý (phù hợp với cấp phối cốt liệu, thỏa mãn các quy định về độ rỗng dư BTN, độ rỗng cốt liệu, độ rỗng lấp đầy nhựa) cần phải được thực hiện qua thiết kế hỗn hợp BTN.

1.5.2. Ảnh hưởng của lưu lượng xe, tải trọng xe, tốc độ dòng xe, nhiệt độ môi trường

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu của thế giới [57], dưới đây phân tích những ảnh hưởng lưu lượng xe, tốc độ dòng xe, nhiệt độ đến LVBX và nứt.

1.5.2.1. Ảnh hưởng của lưu lượng xe

Dưới tác động của tải trọng trùng phục trong quá trình khai thác, BTN sẽ dần suy giảm cường độ kháng cắt, dẫn tới LVBX xuất hiện và phát triển.

Khi ứng suất kéo uốn do tải trọng trùng phục gây ra trong lớp vật liệu BTN lớn hơn cường độ kéo uốn của vật liệu BTN, mặt đường BTN xuất hiện nứt. Dưới tác động của tải trọng trùng phục, những vết nứt nhỏ sẽ dần phát triển về kích thước và số lượng cho đến khi thành các vết nứt lớn hơn nhiều, và cuối cùng hình thành hệ vết nứt.

1.5.2.2. Ảnh hưởng của tốc độ dòng xe

Ảnh hưởng của tốc độ dòng xe đến LVBX là đáng kể. Xe chạy càng chậm thì thời gian tải trọng xe tác động trên mặt đường càng lâu, dẫn tới tốc độ suy giảm khả năng kháng cắt của BTN càng nhanh.

1.5.2.3. Ảnh hưởng của nhiệt độ

Vào mùa nóng, nhiệt độ môi trường cao, BTN sẽ suy giảm sức kháng cắt và dưới tác động của tải trọng xe (nhất là xe quá tải), mặt đường dễ phát sinh LVBX.

Vào mùa mát, nhiệt độ môi trường thấp hơn, BTN có xu hướng cứng, dưới tác động của tải trọng trùng phục của xe (nhất là xe quá tải), mặt đường dễ phát sinh nứt.

Thiết kế BTN theo Superpave [29] đã xem xét ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ môi trường qua việc lựa chọn mác nhựa PG phù hợp với nhiệt độ của vùng mà tuyến đi qua và điều chỉnh cấp nhựa PG phù hợp với lưu lượng xe và tốc độ dòng xe (Bảng 1-4).

1.6. Các nghiên cứu trong và ngoài nước về bê tông nhựa Superpave và phương pháp đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa

1.6.1. Các nghiên cứu trên thế giới

Dưới đây phân tích một số nghiên cứu trên thế giới về bê tông nhựa Superpave và phương pháp đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa:

(1) Nghiên cứu NCHRP Report 673 – 2011) [57]

Nghiên cứu [57] đã tổng kết các phương pháp thí nghiệm để đánh giá các khả năng chống nứt mỏi của BTN và đưa ra 01 phương pháp thí nghiệm uốn dầm 4 điểm theo tiêu chuẩn AASHTO T 321, đồng thời cũng chỉ ra các yếu tố chủ yếu ảnh hưởng đến

khả năng chống nứt mỏi bao gồm: cốt liệu (độ góc cạnh, cỡ hạt lớn nhất danh định, tỉ lệ D/B), loại nhựa đường sử dụng, hàm lượng nhựa thiết kế.

(2) *Nghiên cứu NCHRP Synthesis 492 – 2016 [59]*

Nghiên cứu [59] đã tổng kết những chỉ tiêu cơ học cần đánh giá liên quan đến chất lượng khai thác của mặt đường BTN. Khi thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave, ngoài đánh giá độ nhảy âm thì cần đánh giá khả năng chống LVBX và nứt mỏi.

- Nhóm chống LVBX chủ yếu có 2 loại thí nghiệm là Hamburg Wheel tracking và APA. Thí nghiệm Hamburg Wheel tracking được sử dụng rộng rãi hơn ở Hoa Kỳ, Canada và nhiều nước trên thế giới.

- Nhóm thí nghiệm chống nứt mỏi phổ biến sử dụng là: Thí nghiệm uốn dầm 4 điểm; Thí nghiệm Overlay test (OT); Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB và thí nghiệm kéo nén (DCT).

(3) *Nghiên cứu NCHRP 9-57 (2016) [58]*

Nghiên cứu [58] đã phân tích các phương pháp thí nghiệm đánh giá nứt mỏi dựa trên kết quả thí nghiệm trong phòng và hiện trường, từ đó đưa ra đánh giá về độ phức tạp, độ phân tán của kết quả thí nghiệm, độ nhạy với các loại BTN khác nhau, tương quan với hư hỏng nứt thực tế tại hiện trường, giá thành thiết bị...

Trên cơ sở Nghiên cứu [58], nhận thấy:

- Thí nghiệm uốn dầm 4 điểm chủ yếu được dùng để nghiên cứu và chưa được sử dụng rộng rãi ở các bang/nước khi thiết kế hỗn hợp BTN vì thời gian chuẩn bị mẫu lâu, thí nghiệm lâu, kết quả thí nghiệm phân tán, không lấy mẫu hiện trường được như khoan mẫu hình trụ, chưa có chuẩn đánh giá khi nào được coi là “đạt” để thiết kế thành phần hỗn hợp BTN.

- Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB giúp kiểm tra, đánh giá nhanh và chính xác khả năng chịu kéo uốn, khả năng chống nứt mỏi của mẫu BTN, kết quả thí nghiệm có độ chụm cao, nhạy với các loại BTN (sử dụng các loại cốt liệu, các nhựa đường khác nhau), phản ánh được điều kiện nứt hiện trường và được dùng làm tiêu chuẩn đánh giá chất lượng của BTN chịu kéo-uốn, nứt mỏi.

(4) *Nghiên cứu NCHRP 20-07/Task 406 (2018) [61]*

Nghiên cứu [61] đã tập hợp được các thí nghiệm khi thiết kế thiết kế cân bằng hỗn hợp BTN của các bang Hoa Kỳ. Bảng 1-5 thể hiện 3 thí nghiệm được lựa chọn phổ biến nhất đánh giá khả năng chống nứt của BTN trên cơ sở các kết quả khảo sát từ 50 bang của Hoa Kỳ.

Bảng 1-5. Danh mục 03 thí nghiệm phổ biến nhất đánh giá nứt của BTN [61]

Dạng hư hỏng BTN	Thứ tự 3 thí nghiệm phổ biến nhất
Nứt mỏi từ dưới lên (Bottom-up fatigue cracking)	1. Thí nghiệm uốn dầm 4 điểm theo AASHTO T 321 2. Thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt SCB ở nhiệt độ

Dạng hư hỏng BTN	Thứ tự 3 thí nghiệm phổ biến nhất
	trung bình theo AASHTO TP124 3. Thí nghiệm uốn mẫu đầm bán nguyệt SCB ở nhiệt độ trung bình theo ASTM D8044
Nứt mỏi từ trên xuống (Top-down fatigue cracking)	1. Thí nghiệm uốn mẫu đầm bán nguyệt SCB ở nhiệt độ trung bình theo AASHTO TP124 2. Thí nghiệm mỏi kéo trực tiếp theo AASHTO TP 107 3. Thí nghiệm tỷ số năng lượng kéo gián tiếp: Indirect Tensile Energy Ratio Test

Nghiên cứu [61] đã đánh giá độ nhạy của các phương pháp thí nghiệm chống nứt nêu trên với các loại BTN (sử dụng các loại cốt liệu, loại nhựa đường và hàm lượng nhựa khác nhau), đánh giá tương quan với hư hỏng nứt thực tế tại hiện trường. Nghiên cứu chưa cập nhật phương pháp thí nghiệm IDEAL CTindex theo ASTM D8225-19.

(5) Nghiên cứu của NCAT giai đoạn 2015-2018 [60].

Nghiên cứu [60] là chương trình nghiên cứu thực nghiệm mặt đường từ 2015-2018. Đây là chương trình lớn, được tài trợ bởi Cục Đường bộ liên bang, 17 Sở GTVT của 17 bang, 1 Sở quản lý môi trường, 1 hiệp hội cốt liệu, 1 hiệp hội duy trì mặt đường. Các thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN mặt đường bao gồm: Thí nghiệm uốn đầm bán nguyệt SCB theo ASTM D8044; Thí nghiệm uốn đầm bán nguyệt SCB theo AASHTO TP124; Thí nghiệm nứt IDEAL Cracking theo Texas A&M. Các thí nghiệm được đối chứng với thực tế diễn biến nứt ở các đoạn đường thử nghiệm sau 2 năm, chịu tác dụng 10 triệu ESAL tích lũy.

Thông qua kết quả của nghiên cứu [60], nhận thấy:

- Cả 3 thí nghiệm đều có mức độ biến động COV < 20%.
- Thí nghiệm SCB theo ASTM D8044 chưa phản ánh được điều kiện nứt thực tế của mặt đường, chưa phân loại được các hỗn hợp BTN về khả năng chống nứt mỏi.
- Thí nghiệm SCB theo AASHTO TP124 cơ bản đánh giá đúng điều kiện khai thác thực tế, giá trị FI càng nhỏ thì càng có nguy cơ nứt cao. Kết quả thí nghiệm SCB theo AASHTO TP124, IDEAL-CT có tương quan chặt với nhau, nhạy với các loại BTN, các loại nhựa đường khác nhau. Thí nghiệm SCB theo AASHTO và IDEAL-CT có chi phí thiết bị thấp và thời gian thử nghiệm nhanh, thí nghiệm SCB theo AASHTO đã có chuẩn đánh giá “đạt” khi thiết kế hỗn hợp BTN theo khuyến nghị của Sở giao thông vận tải Bang Illinois. Đây là những định hướng nghiên cứu, phân tích lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN ở Việt Nam.

(6) Nghiên cứu NCHRP IDEAL Project 195 -2019 [49]

Nghiên cứu [49] đã phát triển thí nghiệm IDEAL Cracking Test đánh giá khả năng chống nứt trong thiết kế hỗn hợp, đảm bảo và kiểm soát chất lượng thi công của BTN. Thông qua kết quả của nghiên cứu [49], nhận thấy:

- Thí nghiệm IDEAL-CTindex có các ưu điểm là đơn giản, có thể tận dụng được các thiết bị có sẵn, thời gian thí nghiệm nhanh, hệ số biến thiên COV nhỏ, nhạy với các loại BTN (sử dụng các loại cốt liệu, loại nhựa và hàm lượng nhựa khác nhau).

- Thí nghiệm IDEAL-CTindex có tương quan chặt với thí nghiệm SCB theo AASHTO. Thí nghiệm đã được kiểm chứng với rất nhiều hiện trường đánh giá nứt mỗi thực tế của Cục đường bộ Hoa Kỳ, chương trình theo dõi dài hạn LTPP...

- Kết quả thí nghiệm tính toán được chỉ số CTindex, chỉ số này càng lớn thì BTN có khả năng chống nứt càng cao. Hiện nay, ASTM D8225-19 cũng đã đưa ra khoảng giá trị CTindex từ 31 đến 255, bang Virginia đưa ra yêu cầu giá trị CTindex lớn hơn 70.

(7) Nghiên cứu thí nghiệm SCB ở bang Illinois [47, 48, 51, 53, 54, 55]

Bang Illinois đi đầu trong nghiên cứu sử dụng thí nghiệm SCB đánh giá khả năng chống nứt của BTN có sử dụng hỗn hợp tái chế RAP, RAS [51, 54]. Đã nghiên cứu đánh giá tương quan giữa thí nghiệm SCB trong phòng và sự hình thành phát triển vết nứt ở hiện trường [47, 48]. Đã sử dụng thí nghiệm trong phòng để dự báo nứt của lớp BTN hiện trường [55]. Đã đề xuất tiêu chuẩn thí nghiệm [53] và giới hạn chỉ số mềm FI lớn hơn 8. Từ các kết quả nghiên cứu đã biên soạn AASHTO TP124-18 [41].

(8) Nghiên cứu của NCAT giai đoạn 2018-2021 [62]

Nghiên cứu [62] là chương trình nghiên cứu thực nghiệm về thiết kế hỗn hợp BTN theo nguyên lý cân bằng đối với các loại BTN khác nhau, sử dụng các loại nhựa đường khác nhau. Kết quả đã chỉ ra phương pháp thí nghiệm IDEAL-CTindex vừa đơn giản vừa phản ánh đúng khả năng chống nứt của BTN đoạn thử nghiệm. Hiện nay, nhiều bang đã sử dụng thí nghiệm IDEAL-CTindex để đánh giá khả năng chống nứt BTN trong phương pháp thiết kế BMD của mình như Oklahoma, Texas,....

1.6.2. Các nghiên cứu ở Việt Nam

Việt Nam vẫn đang sử dụng phương pháp thiết kế Marshall là phương pháp chính thống để thiết kế thành phần BTN. Việc thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall sử dụng nhựa đường thường (nhựa đường 60/70 hoặc 40/50) theo hướng dẫn tại TCVN 8819:2011 [1] (hiện nay đã được chuyển đổi sang TCVN 13567-1:2022 [15]) và TCVN 8820:2011 [2]. Nhìn chung những tiêu chuẩn này đều dựa trên những tài liệu của Asphalt Institute, ASTM, AASHTO để biên soạn. Để nâng cao chất lượng của BTN mặt đường, việc thiết kế hỗn hợp BTN còn được áp dụng theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT của Bộ GTVT [4] (hiện nay một số nội dung trong quy định này đã được biên soạn bổ sung vào TCVN 13567-1:2022 [15]).

Việc thiết kế hỗn hợp BTN sử dụng nhựa đường polime được áp dụng theo 22 TCN 356-06, hiện nay tiêu chuẩn này đã được chuyển đổi sang TCVN 13567-2:2022 [15].

Về tiêu chuẩn cho nhựa đường thường: đang áp dụng tiêu chuẩn phân cấp nhựa đường theo độ kim lún là TCVN7493:2005, tuy nhiên sau một thời gian đưa vào áp dụng cho thấy cần phải bổ sung thêm một số chỉ tiêu mới để kiểm soát tốt hơn chất lượng nhựa đường, Bộ GTVT đã ban hành Thông tư số 27/2014/TT-BGTVT [5].

Về tiêu chuẩn cho nhựa đường polime (gốc phụ gia SBS): được áp dụng theo 22 TCN 319-04, hiện nay tiêu chuẩn này đã được chuyển đổi sang TCVN 11193:2021 [13].

Phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave chưa được áp dụng tại nước ta. Tuy nhiên đã có những nghiên cứu liên quan đến phương pháp thiết kế BTN theo Superpave và khả năng chống nứt của BTN, có thể kể đến như:

1). Đề tài “Nghiên cứu phân cấp nhựa đường theo Superpave (nhựa đường PG) và đề xuất áp dụng trong xây dựng đường bộ Việt Nam) [17]. Kết quả đã đưa ra: dự thảo “Bản đồ phân vùng mác nhựa đường PG theo điều kiện nhiệt độ môi trường các tỉnh Việt Nam”; dự thảo “Tiêu chuẩn phân cấp nhựa đường PG” phù hợp với điều kiện nhiệt độ Việt Nam. Trên cơ sở kết quả của đề tài, đã xây dựng và trình Bộ GTVT thẩm định, Bộ KH&CN công bố TCVN 13049:2020 “Nhựa đường phân cấp theo đặc tính làm việc - Yêu cầu kỹ thuật” [12], trong đó có đưa ra cấp nhựa đường PG theo điều kiện nhiệt độ không khí các tỉnh, thành của Việt Nam là PG64-16 đối với tất cả các công trình đường bộ, ngoài ra đã hướng dẫn cách điều chỉnh cấp nhựa đường PG theo đặc tính dòng xe.

2). Đề tài “Nghiên cứu đánh giá các chỉ tiêu của nhựa đường 40/50, 60/70 và các loại nhựa đường Polime đang áp dụng tại Việt Nam theo tiêu chuẩn phân cấp nhựa đường PG” [25]. Đề tài đã triển khai các thí nghiệm với nhựa đường 40/50; 60/70; PMBI; PMBII; PMBIII đang có tại Việt Nam theo chuẩn PG.

3). Đề tài “Nghiên cứu ứng dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave phù hợp với điều kiện Việt Nam” [19]. Kết quả đã đưa ra: Thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave theo hướng dẫn tại các tiêu chuẩn liên quan là AASHTO M323, AASHTO R35 là thiết kế BTN theo đặc tính thể tích; Đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm trong phòng phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave với BTN19 và BTN12,5. Một số kết quả nghiên cứu của đề tài này sẽ được đưa vào Luận án, tuy nhiên đề tài này chưa tiến hành nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave bằng thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt SCB và thí nghiệm kéo gián tiếp IDEAL CTindex. Vấn đề này sẽ được nghiên cứu, giải quyết trong Luận án.

4). Đề tài “Nghiên cứu ứng dụng mô hình thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt SCB (Semi-Circular Bending) để xác định đặc trưng kháng nứt mỏi của bê tông nhựa chặt ở Việt Nam và đề xuất các giải pháp cải thiện” [20]. Một số kết quả nghiên cứu của đề tài này sẽ được đưa vào Luận án, tuy nhiên đề tài này chưa tiến hành nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave bằng thí nghiệm kéo gián tiếp IDEAL CTindex. Vấn đề này sẽ được nghiên cứu, giải quyết trong Luận án.

5). Đã có một số luận án tiến sỹ liên quan đến LVBX và nứt mỏi như: Bùi Ngọc Hưng (2016) “Nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng đến biến dạng lún vệt bánh xe có xét đến đặc tính mỏi của BTN chặt làm lớp mặt đường Việt Nam” [18]; Trần Thiện Lưu (2015) “Nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng đến độ bền mỏi bê tông asphalt làm lớp mặt đường tại Việt Nam” [24]; Vũ Phương Thảo (2015) “Nghiên cứu ảnh hưởng cốt

sợi thủy tinh phân tán đến khả năng chống mỏi và chống lún vệt bánh xe của bê tông asphalt trong điều kiện Việt Nam” [26]. Nhìn chung các Luận án này đều nghiên cứu thử nghiệm với BTN thiết kế theo phương pháp Marshall và đều sử dụng thí nghiệm uốn dầm 4 điểm để đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN chặt tại Việt Nam. Chưa có luận án nào nghiên cứu thử nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi bằng thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt SCB và thí nghiệm kéo gián tiếp IDEAL CTindex.

6). Đã có một số nghiên cứu bước đầu về thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB để đánh giá khả năng chống nứt của BTN ở Việt Nam như: Nguyễn Ngọc Lân (2018) [21, 22] đã nghiên cứu sử dụng thí nghiệm SCB theo AASHTO để đánh giá khả năng chống nứt của các mẫu được khoan BTNC12,5; BTNC19 và các mẫu BTN ám chế tạo trong phòng theo phương pháp Marshall; Lã Văn Chăm (2019) [16] đã nghiên cứu thí nghiệm uốn mẫu bán nguyệt SCB theo ASTM D8044 để đánh giá khả năng chống nứt của BTNC12,5 sử dụng xi măng thay thế bột khoáng, được chế tạo trong phòng theo phương pháp Marshall. Các nghiên cứu này chưa thử nghiệm với các mẫu BTN thiết kế theo Superpave và chưa thí nghiệm kéo gián tiếp IDEAL CTindex. Luận án này sẽ nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của BTN Superpave với cả hai thí nghiệm uốn mẫu bán nguyệt SCB theo AASHTO và thí nghiệm IDEAL CTindex.

7). Đã ban hành TCVN 12818:2019 “Hỗn hợp bê tông nhựa nóng - Thiết kế theo đặc tính thể tích Superpave” [15], TCVN này được xây dựng dựa trên AASHTO M323 [29] và AASHTO R35 [34], chỉ bao gồm thiết kế hỗn hợp BTN theo các đặc tính thể tích và đánh giá độ nhạy ẩm của hỗn hợp BTN mà chưa có các chỉ tiêu đánh giá khả năng chống LVBX và chống nứt mỏi. Do vậy, cần thiết nghiên cứu bổ sung “Phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng BMD” phù hợp với điều kiện Việt Nam là thiết kế đảm bảo cân bằng giữa các đặc trưng thể tích-độ nhạy ẩm, LVBX, và nứt mỏi.

8). Đã ban hành một số TCVN về đánh giá các đặc tính cơ học của BTN như:

- Về thí nghiệm đánh giá độ nhạy ẩm: Đã có TCVN 12914:2020 “Bê tông nhựa - Xác định khả năng kháng ẩm của mẫu đã đầm chặt” [11] trên cơ sở tham khảo AASHTO T283.

- Về thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX: Hiện nay, Việt Nam sử dụng phương pháp Hamburg Wheel Tracking để đánh giá LVBX cho BTN theo Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT [3], hiện đang biên soạn, chuyển đổi sang TCVN.

- Về thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi: Đã có TCVN12579-2019 về thí nghiệm đánh giá nứt mỏi bằng phương pháp uốn dầm 4 điểm [9] trên cơ sở tham khảo AASHTO T321. Và TCVN 13347:2021 “Bê tông nhựa – Phương pháp xác định khả năng chống nứt bằng mô hình uốn mẫu bán nguyệt SCB” [14] trên cơ sở tham khảo AASHTO TP124.

1.7. Xác định vấn đề nghiên cứu của luận án

Hiện nay, thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall tại Việt Nam mặc dù đã xem xét giải quyết vấn đề chống LVBX, tuy nhiên chưa xem xét giải quyết triệt để nứt mỏi, mà đây là một trong hai nguyên nhân chính gây hư hỏng mặt đường. Trong khi đó, phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave hiện được áp dụng phổ biến tại Hoa Kỳ, Canada và được thế giới đánh giá là có cơ sở khoa học. Thiết kế theo Superpave đã giải quyết vấn đề liên quan đến lựa chọn vật liệu BTN (nhựa đường PG, cát, đá, bột khoáng) phù hợp với đặc tính dòng xe (lưu lượng xe, tốc độ xe lưu thông), nhằm giảm thiểu các hư hỏng mặt đường như LVBX, nứt mỏi trong quá trình khai thác. Xu hướng thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave hiện nay tại Hoa Kỳ là thiết kế hỗn hợp BTN theo nguyên lý cân bằng BMD giữa các đặc trưng thể tích-độ nhạy ẩm, LVBX, và nứt mỏi. Vì vậy cần phải nghiên cứu lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN phù hợp với điều kiện Việt Nam để đảm bảo đồng thời khả năng chống LVBX và nứt mỏi.

Về phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi: Trên thế giới có nhiều mô hình thí nghiệm, nhiều phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN, tuy nhiên mỗi phương pháp đều có ưu, nhược điểm và phạm vi áp dụng riêng. Vì vậy việc nghiên cứu, lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN phù hợp với điều kiện Việt Nam là vấn đề rất cần thiết.

Một số yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt mỏi của BTN bao gồm: cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN, nguồn gốc cốt liệu, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa... vì vậy cần nghiên cứu thực nghiệm trong phòng để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố này đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave thiết kế theo nguyên lý cân bằng trong điều kiện Việt Nam. Hiện nay, ở Việt Nam mới chỉ có một số luận án tiến sĩ nghiên cứu về khả năng chống nứt mỏi, nhưng các luận án đều chưa nghiên cứu và thử nghiệm khả năng chống nứt mỏi bằng thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt SCB và thí nghiệm IDEAL CTindex.

Qua phân tích trên, đề tài nghiên cứu tập trung vào các vấn đề chủ yếu sau đây:

- Nghiên cứu, phân tích những đặc thù của phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave so với phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall.
- Nghiên cứu, phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave.
- Nghiên cứu, phân tích và lựa chọn phương pháp thí nghiệm và chuẩn đánh giá khả năng chống nứt mỏi của BTN chặt phù hợp với điều kiện Việt Nam.
- Nghiên cứu, phân tích và lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng phù hợp với điều kiện Việt Nam.
- Nghiên cứu thực nghiệm trong phòng để đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố (cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN, nguồn gốc cốt liệu, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa) đến khả năng chống nứt mỏi có xem xét đến khả năng chống LVBX của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam để đưa ra các khuyến nghị liên quan.

- Nghiên cứu, phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố đến đặc trưng khai thác của kết cấu mặt đường bằng phương pháp cơ học thực nghiệm.

1.8. Mục tiêu, nội dung và phương pháp nghiên cứu

1.8.1. Mục tiêu nghiên cứu

Các mục tiêu nghiên cứu của luận án bao gồm:

- Đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt có xem xét đến khả năng chống LVBX của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam thông qua nghiên cứu lý thuyết kết hợp thực nghiệm trong phòng thí nghiệm và mô phỏng phân tích kết cấu mặt đường bằng phương pháp cơ học thực nghiệm.

- Lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave phù hợp với điều kiện Việt Nam.

- Lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng phù hợp với điều kiện Việt Nam.

1.8.2. Nội dung nghiên cứu

Chương 1: Tổng quan về bê tông nhựa Superpave và các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave.

Chương 2: Nghiên cứu lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave.

Chương 3: Nghiên cứu thực nghiệm các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng.

Chương 4: Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến đặc trưng khai thác của kết cấu mặt đường bằng phương pháp cơ học thực nghiệm.

1.8.3. Phương pháp nghiên cứu

1.8.3.1. Nghiên cứu lý thuyết:

Trên cơ sở nghiên cứu về phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave và các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave ở các nước tiên tiến, phân tích đánh giá, lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave, phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng phù hợp với điều kiện Việt Nam và phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố đến đặc trưng khai thác của kết cấu mặt đường bê tông nhựa Superpave.

1.8.3.2. Nghiên cứu thực nghiệm:

Nghiên cứu thực nghiệm trong phòng để đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố (cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN, nguồn gốc cốt liệu, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa) đến khả năng chống nứt mới, có xem xét đến khả năng chống LVBX của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam để đưa ra các khuyến nghị liên quan.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU LỰA CHỌN PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỐNG NỨT CỦA BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE

Từ mục tiêu nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu và nội dung nghiên cứu đã kết luận ở Chương 1, Chương 2 tập trung nghiên cứu, phân tích, lựa chọn phương pháp thí nghiệm và chuẩn đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave, đồng thời phân tích, lựa chọn phương pháp thiết kế cân bằng hỗn hợp bê tông nhựa Superpave phù hợp với điều kiện Việt Nam.

2.1. Nghiên cứu lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng BMD ở Việt Nam

Thiết kế cân bằng hỗn hợp BTN có nghĩa là hỗn hợp BTN được thiết kế để đạt được sự cân bằng tối ưu giữa khả năng chống LVBX và khả năng chống nứt bằng cách sử dụng các thử nghiệm về đặc tính làm việc hỗn hợp BTN được lựa chọn thay vì chỉ dựa vào các chỉ tiêu về đặc tính thể tích của hỗn hợp BTN. Hiện nay, nhiều bang ở Hoa Kỳ đã áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo nguyên lý cân bằng với 04 cách bao gồm:

- Cách A: Thiết kế theo thể tích và kiểm tra, xác nhận các đặc tính làm việc (chi tiết xem Hình 1-3). Cách A là cách thận trọng nhất và có tiềm năng đổi mới thấp nhất. Trong điều kiện Việt Nam cũng đã áp dụng cách này với kiểm tra khả năng chống LVBX của BTN sau khi thiết kế theo thể tích.
- Cách B: Thiết kế theo thể tích và tối ưu hóa đặc tính làm việc (chi tiết xem Hình 1-4). Cách B là phiên bản mở rộng của cách A. Cách B yêu cầu tuân thủ đầy đủ các yêu cầu về thể tích tại HLN tối ưu sơ bộ nhưng cho phép thay đổi vừa phải HLN để tối ưu hóa đặc tính làm việc dựa trên kết quả thử nghiệm.
- Cách C: Thiết kế theo đặc tính làm việc - hiệu chỉnh thể tích (chi tiết xem Hình 1-5). Cách C cho phép một số yêu cầu về thể tích được nới lỏng hoặc loại bỏ miễn là các tiêu chí đặc tính làm việc được thỏa mãn. Do đó, nó ít bảo thủ hơn cách A và cách B, nó cung cấp tiềm năng đổi mới ở mức độ trung bình.
- Cách D: Thiết kế theo đặc tính làm việc (chi tiết xem Hình 1-6). Cách D không có yêu cầu về thể tích và chỉ dựa vào kết quả thử nghiệm đặc tính làm việc để tối ưu hóa hỗn hợp thiết kế, và do đó, nó được coi là cách ít thận trọng nhất với mức độ tiềm năng đổi mới cao nhất.

2.1.1. Phân tích việc nghiên cứu áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng BMD ở Hoa Kỳ

Thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng mới được Hoa Kỳ nghiên cứu trong vòng hơn 5 năm trở lại đây. Trước đây đa số các bang cũng đã áp dụng cách A tuy nhiên các thí nghiệm chưa đầy đủ. Không phải bang nào cũng sử

Cách thiết kế cân bằng	Bang	Phương pháp thí nghiệm chống nứt	Phương pháp thí nghiệm chống LVBX
	Missouri	SCB-AASHTO, IDEAL-CTindex	HWTT
D	Alabama	IDEAL-CT	HT-IDT
	Tennessee	IDEAL-CT	HWTT
A & D	Virginia	Cantabro, IDEAL-CT	APA

Có 13 bang đang nghiên cứu thực hiện thiết kế hỗn hợp BTN theo BMD. Bảng 2-2 thể hiện cách thiết kế cân bằng của từng bang. Các bang đều thiết kế hỗn hợp BTN theo đặc tính thể tích sau đó thí nghiệm đánh giá các đặc tính làm việc. Các bang đều đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT hoặc APA. Đánh giá khả năng chống ẩm bằng thí nghiệm HWTT hoặc TSR. Một số bang đã đánh giá khả năng chống nứt. Các bang này đều định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.

Bảng 2-2. Định hướng nghiên cứu BMD ở các bang của Hoa Kỳ

TT	Bang	Định hướng nghiên cứu BMD
1	Georgia	Đến 7/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm TSR; Có yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt bằng thí nghiệm IDEAL-CTindex theo ASTM D8225; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A
2	South Carolina	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm APA; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm TSR; Đã yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt bằng thí nghiệm IDEAL-CTindex theo ASTM D 8225; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
3	North Carolina	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm APA; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm TSR; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
4	Ohio	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm APA;

TT	Bang	Định hướng nghiên cứu BMD
		Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm TSR; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
5	Massachusetts	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT; Chưa yêu cầu thí nghiệm chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
6	Maine	Đến 7/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm HWTT; Chưa yêu cầu thí nghiệm chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
7	Arkansas	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm APA; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng độ ổn định còn lại; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
8	Iowa	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm HWTT; Đánh giá khả năng chống nứt bằng thí nghiệm uốn dầm 4 điểm theo AASHTO T321 và kéo DCT theo ASTM D7313-07a; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
9	South Dakota	Đến 7/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm APA; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm TSR; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
10	Montana	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm TSR; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.

TT	Bang	Định hướng nghiên cứu BMD
11	Utah	Đến 7/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm HWTT; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
12	Oregon	Đến 8/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm APA; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng thí nghiệm TSR; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.
13	Washington	Đến 7/2021, thiết kế BTN Superpave theo đặc tính thể tích; Đánh giá khả năng chống LVBX bằng thí nghiệm HWTT; Đánh giá khả năng kháng ẩm bằng ASTM D 6931 điều chỉnh; Chưa yêu cầu đánh giá khả năng chống nứt; Định hướng áp dụng thiết kế cân bằng theo cách A.

Nhận xét về thiết kế cân bằng BMD ở Hoa Kỳ:

- Tính đến thời điểm hiện nay, mới chỉ có Hoa Kỳ có những nghiên cứu quy mô về thiết kế hỗn hợp BTN theo nguyên lý cân bằng. Tuy nhiên mới chỉ có hơn nửa số bang đã và đang định hướng áp dụng BMD. Đa số các bang đều chỉ tiếp cận theo cách A với thiết kế theo các đặc trưng thể tích và kiểm tra xác nhận các đặc tính làm việc.

- Hoa Kỳ là nước rộng lớn, trải rộng và dài qua nhiều vĩ độ, kinh độ, điều kiện khí hậu khác nhau, từ rất lạnh ở phía bắc cho đến nóng ở phía nam nên cần có nhiều thí nghiệm để các bang lựa chọn khi thiết kế hỗn hợp BTN.

- Xu hướng lựa chọn các thí nghiệm đơn giản, dễ sử dụng, độ phân tán của kết quả thấp, tận dụng các máy móc thí nghiệm có sẵn, đánh giá được độ nhạy của các thông số đầu vào, phù hợp với điều kiện khai thác. Các thí nghiệm được sử dụng phổ biến là HWTT đánh giá khả năng chống LVBX, SCB và IDEAL-CT đánh giá khả năng chống nứt, TSR đánh giá khả năng kháng ẩm.

2.1.2. Phân tích việc nghiên cứu thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo nguyên lý cân bằng ở một số nước

Cho đến nay Úc vẫn sử dụng phương pháp thiết kế theo đặc tính thể tích có kiểm tra các đặc tính làm việc của BTN, đây chính là cách A nhưng chưa được xếp vào định nghĩa rõ ràng. Dự án APT1953 ở Úc được thiết lập từ năm 2018 để xác định các khoảng trống trong phương pháp tiếp cận của Úc hiện tại đối với việc thiết kế và mô tả các đặc tính làm việc của hỗn hợp bê tông nhựa [50]. Mục đích cuối cùng là phát triển

một khung đặc điểm kỹ thuật dựa trên tính năng nhằm tận dụng tối đa các đặc tính làm việc nâng cao của các công nghệ BTN hiện tại và mới nổi.

Bảng 2-3 tập hợp phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN và các thí nghiệm đặc tính làm việc của một số nước/ bang/ tỉnh trên thế giới [50].

Bảng 2-3. Phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN và các thí nghiệm đặc tính làm việc

TT	Quốc gia/ Bang/Tỉnh	Phương pháp thiết kế hỗn hợp	Thí nghiệm đặc tính làm việc
1	Ontario- Canada	Superpave	Đánh giá độ nhạy ẩm.
2	Quebec- Canada	Superpave sửa đổi	Đánh giá khả năng chống LVBX; Đánh giá độ nhạy ẩm.
3	Alberta-Canada	Marshall	Đánh giá khả năng chống LVBX.
4	France	French	Đánh giá độ nhạy ẩm; LVBX; Nứt mỏi.
5	Germany/ Central Europe	Marshall	Đánh giá khả năng chống LVBX; độ nhạy ẩm.
6	United Kingdom	Marshall	Đánh giá độ nhạy ẩm; Mô đun; LVBX; Nứt mỏi.
7	South Africa	Marshall và Superpave	Đánh giá độ nhạy ẩm; Mô đun phức động; LVBX; Nứt mỏi.
8	Australia và New Zealand	Marshall và Superpave	Đánh giá độ nhạy ẩm; Mô đun đàn hồi động; LVBX; Nứt mỏi.
9	Trung Quốc	Marshall	Đánh giá khả năng chống LVBX; Thí nghiệm uốn mẫu dầm ở nhiệt độ thấp; Thí nghiệm đánh giá độ nhạy ẩm; Thí nghiệm thấm nước.
10	Nhật Bản	Marshall	Đánh giá khả năng chống LVBX; Thí nghiệm uốn mẫu dầm ở nhiệt độ thấp; Thí nghiệm đánh giá độ nhạy ẩm.
11	Hàn Quốc	Marshall	Đánh giá khả năng chống LVBX; độ nhạy ẩm.
12	Ấn Độ	Marshall	Đánh giá độ nhạy ẩm.

Nhận xét về thiết kế cân bằng BMD ở các nước:

Thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo nguyên lý cân bằng mới được phát triển gần đây ở Hoa Kỳ với 4 cách A, B, C, D. Các nước khác cũng bắt đầu nghiên cứu áp dụng BMD ở các mức độ và cách tiếp cận phù hợp. Tuy nhiên lịch sử thiết kế hỗn hợp BTN các

nước cũng đã bổ sung các thí nghiệm đặc tính làm việc ngoài các đặc tính thể tích. Cách tiếp cận này giống với cách A với các thí nghiệm đặc tính làm việc đặc thù của từng nước.

2.1.3. Phân tích, lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng BMD phù hợp với điều kiện Việt Nam

2.1.3.1. Phân tích lựa chọn cách thiết kế hỗn hợp theo nguyên lý cân bằng

Mặt đường bê tông nhựa do có nhiều ưu điểm nổi bật nên được sử dụng phổ biến cho đường ô tô trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Hiện nay hầu như các tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn Việt Nam sử dụng kết cấu mặt đường bê tông nhựa.

Việt Nam vẫn đang sử dụng phương pháp thiết kế Marshall là phương pháp chính thống để thiết kế thành phần BTN. Việc thiết kế hỗn hợp BTN theo Marshall sử dụng nhựa đường thường (nhựa đường 60/70 hoặc 40/50) theo hướng dẫn tại TCVN 8819:2011 [1] (hiện nay đã được chuyển đổi sang TCVN 13567-1:2022 [15]) và TCVN 8820:2011 [2]. Để nâng cao chất lượng của BTN mặt đường, việc thiết kế hỗn hợp BTN còn được áp dụng theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT của Bộ GTVT [4] (hiện nay một số nội dung trong quy định này đã được bổ sung vào TCVN 13567-1:2022 [15]). Việc thiết kế hỗn hợp BTN sử dụng nhựa đường polime được áp dụng theo 22 TCN 356-06, hiện nay này đã được chuyển đổi sang TCVN 13567-2:2022 [15]. Thiết kế hỗn hợp BTN theo phương pháp Marshall ở Việt Nam mặc dù đã xem xét giải quyết vấn đề LVBX, tuy nhiên chưa xem xét giải quyết triệt để vấn đề nứt môi, mà đây là một trong hai nguyên nhân chính gây ra hư hỏng mặt đường.

Phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave chưa được áp dụng tại nước ta. Tuy nhiên đã có những nghiên cứu liên quan đến phân cấp nhựa đường theo PG, phương pháp thiết kế BTN theo Superpave. Hiện nay, Việt Nam đã xây dựng TCVN 12818:2019 “Phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave theo đặc tính thể tích” [10], tuy nhiên TCVN này được xây dựng trên cơ sở tham khảo tiêu chuẩn AASHTO M323 “Superpave Volumetric Mix Design” và AASHTO R35 “Practice for Superpave Volumetric Mix Design for Asphalt Mixture”, là các tiêu chuẩn thiết kế hỗn hợp BTN theo đặc tính thể tích mà chưa có các chỉ tiêu về đặc tính làm việc như chống LVBX và chống nứt môi.

Điều kiện khí hậu Việt Nam với nhiệt độ cao, mùa nóng kéo dài, mưa nhiều, độ ẩm cao nên cần tập trung nghiên cứu phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN phù hợp. Phá hoại phổ biến nhất cho các lớp mặt đường BTN ở Việt Nam vẫn là LVBX do khả năng chống cắt trượt của BTN không đảm bảo. Nhiều dự án trong thời gian qua đã khắc phục được hiện tượng LVBX nhưng tại một số dự án lại bắt đầu xuất hiện hiện tượng nứt, vỡ lớp bê tông nhựa bề mặt làm cho nước mưa thấm xuống các lớp vật liệu phía dưới làm phá hoại kết cấu mặt đường. Do mưa nhiều, độ ẩm cao, dính bám đá nhựa kém nên một số dự án cũng bị phá hoại do độ ẩm, mất mát vật liệu, bong tách màng nhựa,... Việc khắc phục hiện tượng hư hỏng này rất khó khăn, nhiều trường hợp phải đào bỏ cả kết cấu làm tăng kinh phí, gây nhiều bức xúc trong xã hội.

Như đã phân tích ở trên, thiết kế hỗn hợp BTN theo nguyên lý cân bằng là phương pháp mới, ngay cả một số bang của Hoa Kỳ cũng đang nghiên cứu áp dụng. Đa số các bang cũng đều áp dụng cách A. Cách A là cách tiếp cận thận trọng nhất và có tiềm năng đổi mới thấp nhất. Việt Nam cũng đã quen với thiết kế hỗn hợp để xác định hàm lượng nhựa tối ưu theo các đặc tính thể tích và kiểm tra khả năng chống LVBX. Thiết kế hỗn hợp BTN hiện nay ở Việt Nam cũng đang xu hướng theo cách A giống như đối với các nước khác. Cách này tuy có tiềm năng đổi mới thấp nhất nhưng không làm xáo trộn quy trình thiết kế, thi công và nghiệm thu đã được biên soạn chi tiết, cập nhật kinh nghiệm qua nhiều năm và được thực tế sử dụng hiệu quả, đảm bảo kinh tế, kỹ thuật.

Trong điều kiện Việt Nam, **đề xuất lựa chọn cách A** khi thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng: “Thiết kế theo thể tích và kiểm tra, xác nhận các đặc tính làm việc (Volumetric Design with Performance Verification)”.

Về phạm vi áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng trong điều kiện Việt Nam:

Theo tiêu chuẩn AASHTO MP46 [31], thiết kế cân bằng chỉ áp dụng cho các mặt đường có lưu lượng xe thiết kế lớn hơn 3 triệu ESAL hoặc các tuyến đường bộ chịu tải trọng xe nặng.

Tại Việt Nam hiện nay, để nâng cao chất lượng của BTN mặt đường, việc thiết kế hỗn hợp BTN được áp dụng theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT của Bộ GTVT [4], trong đó quy định:

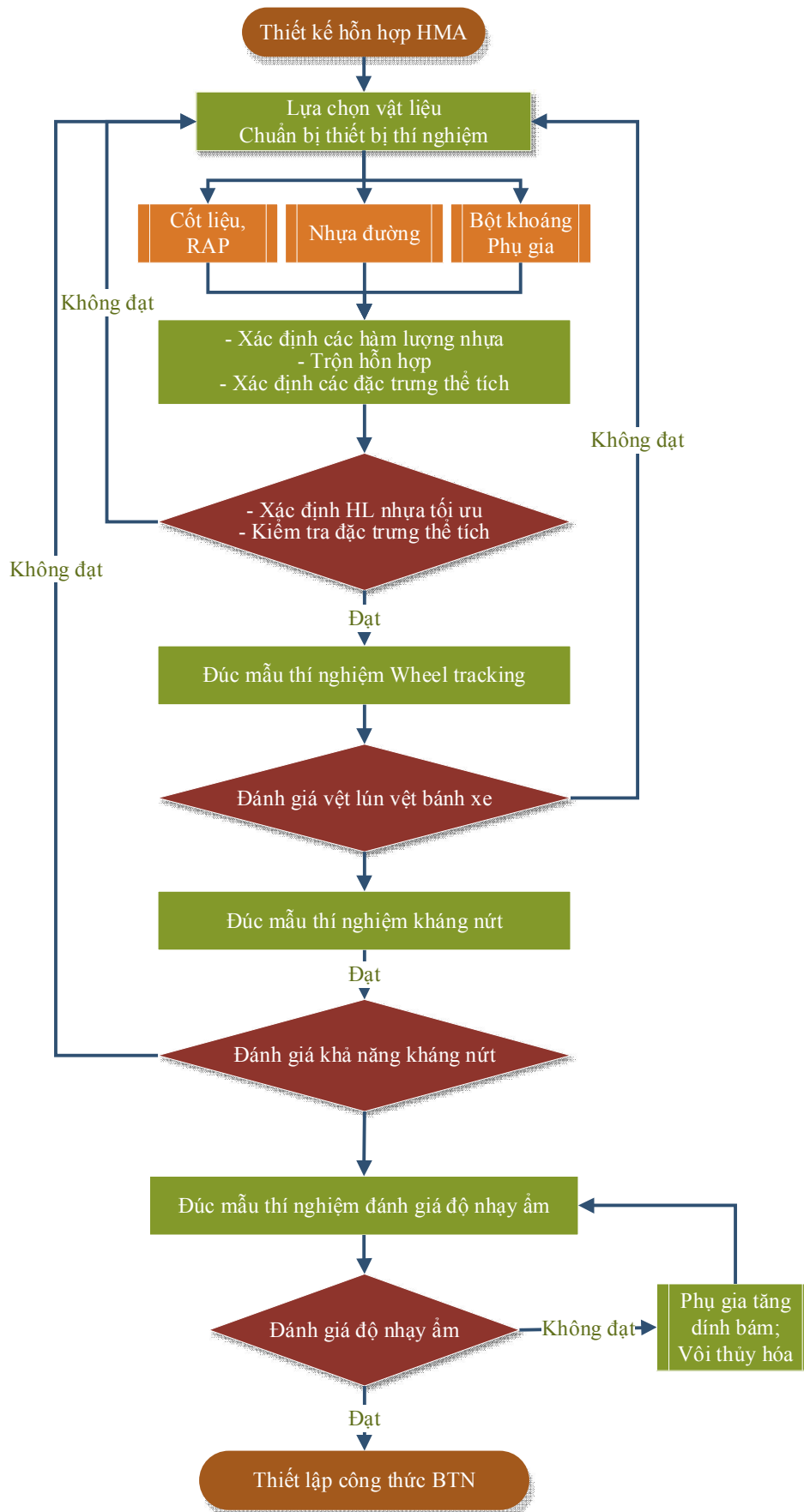
- Áp dụng cho các dự án đầu tư xây dựng các tuyến đường ô tô từ cấp III trở lên, các đoạn đường dốc dài với độ dốc dọc $\geq 4\%$ và các tuyến đường ô tô các cấp khác có quy mô giao thông lớn.
- Đường cấp III trở lên được hiểu là các tuyến đường ô tô cao tốc (theo TCVN 5729 [8]) và các đường cấp I, cấp II, cấp III (theo TCVN 4054 [7]).
- Tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn được hiểu là các tuyến đường có lưu lượng xe lớn và/hoặc có nhiều xe khách lớn, xe tải lớn lưu thông, cụ thể là các tuyến đường có tổng số trục xe tiêu chuẩn tích lũy trong thời hạn thiết kế (xác định tại mục A.2 của tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN) $N_e \geq 5 \times 10^6$ trục hoặc các tuyến đường có số xe tải hạng trung trở lên và xe khách lớn trung bình ngày đêm lưu thông trên một làn xe $N \geq 1500$ xe/ngày đêm/làn xe. Trong đó, xe khách lớn và xe tải hạng trung là các xe khách và xe tải có ít nhất một trục bánh đôi.

Theo các phân tích nêu trên, đề xuất lựa chọn phạm vi áp dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN Superpave theo nguyên lý cân bằng trong điều kiện Việt Nam là áp dụng cho các tuyến đường ô tô cao tốc (theo TCVN 5729 [8]) và tuyến đường ô tô từ cấp III trở lên (theo TCVN 4054 [7]), các đoạn đường dốc dài với độ dốc dọc $\geq 4\%$ và các tuyến đường ô tô các cấp khác có quy mô giao thông lớn.

2.1.3.2. Trình tự thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng

Trình tự thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng như sau (xem sơ đồ khối tại Hình 2-2):

- Bước 1: Thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo đặc tính thể tích để xác định hàm lượng nhựa tối ưu đáp ứng tất cả các yêu cầu về thể tích quy định.
- Bước 2: Đánh giá khả năng chống LVBX, nếu hỗn hợp thiết kế không đạt thì lại thiết kế lại bằng cách sử dụng các vật liệu khác (cốt liệu, chất kết dính nhựa đường, vật liệu tái chế và phụ gia) hoặc trộn theo tỷ lệ khác cho đến khi tất cả các chỉ tiêu về thể tích, và khả năng chống LVBX;
- Bước 3: Đánh giá khả năng chống nứt, nếu hỗn hợp thiết kế không đạt thì lại thiết kế lại bằng cách sử dụng các vật liệu khác (cốt liệu, chất kết dính nhựa đường, vật liệu tái chế và phụ gia) hoặc trộn theo tỷ lệ khác cho đến khi tất cả các chỉ tiêu về thể tích, khả năng chống LVBX, và khả năng chống nứt đảm bảo;
- Bước 4: Đánh giá khả năng kháng ẩm: Sau khi vượt qua các thử nghiệm LVBX và nứt, hỗn hợp thiết kế sau đó được đánh giá với thử nghiệm hư hỏng do ẩm. Nếu thiết kế đảm bảo tiêu chí khả năng kháng ẩm thì chấp nhận công thức cho sản xuất. Nếu không, cần phải thêm các phụ gia tăng cường dính bám đá nhựa, chống bong tách hoặc vôi thủy hóa và hỗn hợp được đánh giá lại cho đến khi đạt yêu cầu. Nếu phụ gia được sử dụng, cũng có thể cần lặp lại thử nghiệm LVBX do lo ngại việc sử dụng phụ gia có thể làm mềm chất kết dính nhựa đường và tăng nguy cơ hằn lún của hỗn hợp bê tông nhựa. Ngoài việc bổ sung các chất chống bong tách, việc thay đổi nguồn chất kết dính nhựa đường hoặc loại cốt liệu cũng có thể cải thiện kết quả thử nghiệm kháng ẩm. Tuy nhiên, nếu thay đổi nguồn vật liệu sẽ phải thiết kế lại hỗn hợp để đảm bảo tất cả các tiêu chí về đặc tính thể tích và các đặc tính làm việc.



Hình 2-2. Sơ đồ khối các bước thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng tại Việt Nam

2.2. Nghiên cứu lựa chọn các phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave ở Việt Nam

Hiện nay có rất nhiều phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt cho BTN trong phòng thí nghiệm được nghiên cứu áp dụng trên thế giới, mỗi phương pháp đều có các ưu, nhược điểm và phạm vi áp dụng riêng. Một số phương pháp thí nghiệm phổ biến có thể kể đến như:

- Thí nghiệm uốn dầm 4 điểm.
- Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo AASHTO.
- Thí nghiệm IDEAL CTindex.
- Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo ASTM.
- Thí nghiệm Texas overlay test.

2.2.1. Phương pháp thí nghiệm uốn dầm 4 điểm

Tiêu chuẩn thí nghiệm: AASHTO T321, ASTM D7460, EN 12697-26D, TCVN12579-2019.

Thiết bị: Sử dụng thiết bị uốn dầm 4 điểm có thể gia tải với tải trọng lặp hình sin hoặc haversin và tải khí hậu (Hình 2-3). Giá thiết bị cao, khoảng trên 100000 USD. Ngoài ra cần phải có thiết bị đầm mẫu chuyên dụng để chế tạo mẫu hình chữ nhật.



Hình 2-3. Thiết bị thí nghiệm uốn dầm 4 điểm

Mẫu thí nghiệm: Thông thường phải thí nghiệm từ 8-10 mẫu hình dầm (kích thước 380 x 63 x 50mm) mới có thể đánh giá được khả năng kháng mỏi của BTN.

Điều kiện thí nghiệm: Thí nghiệm ở 20°C. Thời gian thực hiện thí nghiệm rất dài, phụ thuộc vào mức biến dạng khống chế. Ở mức biến dạng cao (400-800 μ strain) thời gian thí nghiệm có thể vài giờ. Ở mức biến dạng trung bình (200-400 μ strain) thời gian thí nghiệm có thể vài ngày. Thậm chí ở mức biến dạng thấp (50-100 μ strain) thời gian thí nghiệm có thể đến cả tháng.

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Số chu kỳ phá hoại mỏi; Chưa có ngưỡng giới hạn được chấp nhận rộng rãi ở các bang/nước khi thiết kế hỗn hợp BTN.

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm rất khó khăn, vì thời gian chuẩn bị mẫu dài, thời gian thí nghiệm dài, không lấy mẫu hiện trường được, giá thành thiết bị cao.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm rất phân tán $COV > 50\%$ [58].

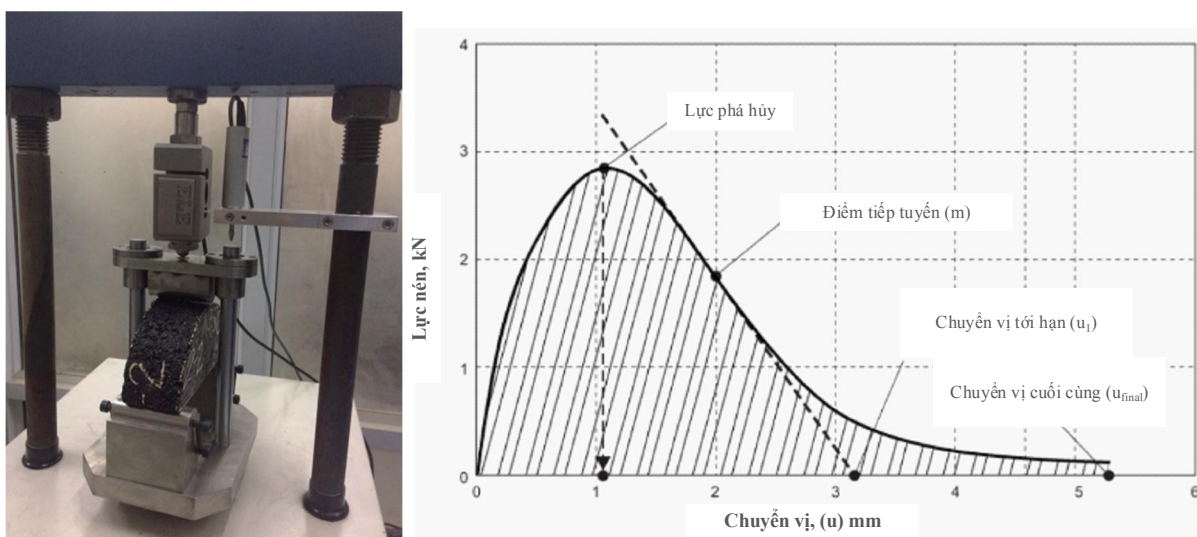
Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với nứt mở từ dưới lên tại hiện trường.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Kém, chỉ dùng để nghiên cứu, không thích hợp với thiết kế hỗn hợp, không thích hợp với các phòng thí nghiệm hiện trường.

2.2.2. Phương pháp thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo AASHTO

Tiêu chuẩn thí nghiệm: AASHTO TP124-18, AASHTO T393, TCVN 13347:2021.

Thiết bị: Sử dụng thiết bị Marshall có gắn bộ LVDT tự động ghi và vẽ biểu đồ lực và chuyển vị (Hình 2-4). Giá thiết bị khoảng 10000-15000 USD. Giá bộ dụng cụ cắt và xẻ khía mẫu khoảng 7000 USD.



Hình 2-4. Thiết bị thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo AASHTO

Mẫu thí nghiệm: Mẫu được chế bị trong phòng bằng dầm xoay theo AASHTO T312, đường kính (150 ± 1) mm, chiều cao tối thiểu 160mm, độ rỗng dư $(7 \pm 1)\%$. Từ giữa mẫu SGC cắt 2 mẫu dày (50 ± 1) mm. Tiếp tục cắt mỗi mẫu tròn thành 2 mẫu bán nguyệt SCB. Kết quả được 4 mẫu SCB. Xẻ rãnh theo trục đối xứng của mỗi mẫu SCB với chiều cao (15 ± 1) mm và chiều rộng $\leq 2,25$ mm.

Điều kiện thí nghiệm: Mẫu được ủ ở điều kiện nhiệt độ 25°C trong 2 giờ. Thí nghiệm ở 25°C . Thời gian thực hiện thí nghiệm khoảng 10 phút/mẫu. Tốc độ gia tải không đổi bằng 50 mm/ phút được khống chế trong suốt thời gian thử nghiệm.

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Từ kết quả thí nghiệm lực và chuyển vị của mỗi mẫu thử (xem Hình 2-4), chỉ số mềm FI (Flexibility Index) được tính toán theo công thức (2.1).

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad (2.1)$$

Trong đó: G_f là năng lượng phá hủy nứt;

|m| giá trị tuyệt đối của độ dốc sau phá hủy;

A là hệ số chuyển đổi đơn vị, bằng 0,01.

Chỉ số mềm FI (Flexibility Index) càng lớn thì BTN có khả năng chống nứt càng cao; bang Illinois qui định ngưỡng giới hạn $FI \geq 8$.

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm tương đối dễ dàng, không đòi hỏi thí nghiệm viên có tay nghề cao.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm tương đối chụm $COV < 20\%$ [60].

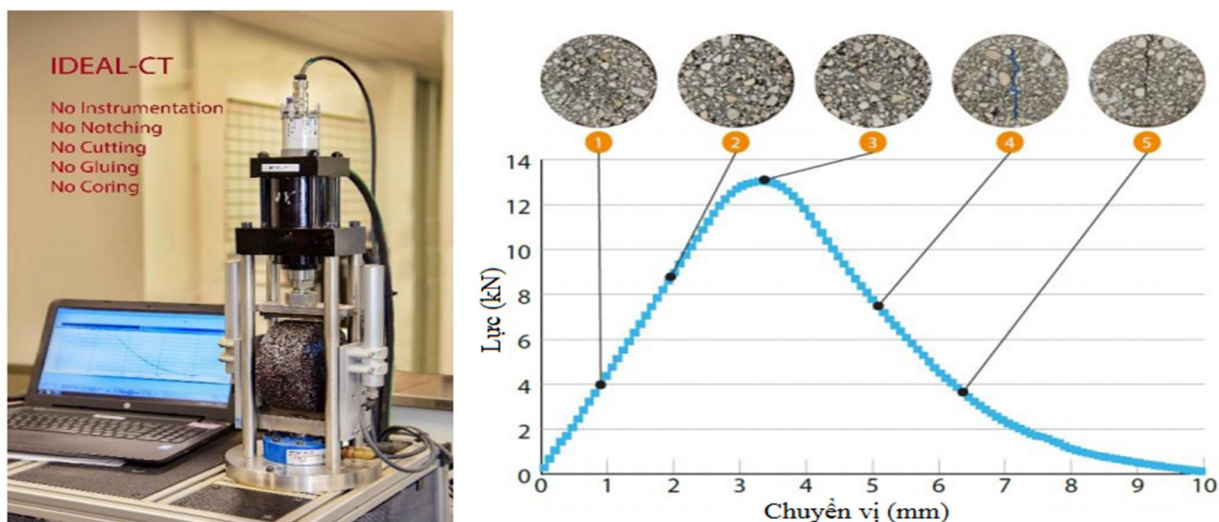
Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với nứt thực tế ở bang Illinois, FHWA, ALF.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Tốt, dễ sử dụng ở Việt Nam để thiết kế hỗn hợp, đảm bảo và kiểm soát chất lượng BTN.

2.2.3. Phương pháp thí nghiệm IDEAL CTindex

Tiêu chuẩn thí nghiệm: ASTM D8225-19.

Thiết bị: Sử dụng thiết bị Marshall có gắn bộ LVDT tự động ghi và vẽ biểu đồ lực và chuyển vị (Hình 2-5). Giá thành thiết bị không cao (<10000 USD).



Hình 2-5. Thiết bị thí nghiệm IDEAL CTindex

Mẫu thí nghiệm: Mẫu chế bị trong phòng bằng đầm xoay, đầm Marshall cải tiến hoặc khoan hiện trường, với đường kính (150 ± 2) mm, chiều cao (62 ± 1) mm, độ rỗng dư ($7 \pm 0,5$)%.

Điều kiện thí nghiệm: Mẫu được ủ ở điều kiện nhiệt độ 25°C trong 2 giờ. Thí nghiệm ở 25°C . Thời gian thực hiện thí nghiệm khoảng 1 phút/mẫu. Tốc độ gia tải không đổi bằng 50 mm/ phút được khống chế trong suốt thời gian thử nghiệm.

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Từ kết quả thí nghiệm lực và chuyển vị của mỗi mẫu thử (xem Hình 2-5), chỉ số CTindex được tính toán theo công thức (2.2).

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times 10^6 \quad (2.2)$$

Trong đó: G_f là năng lượng phá hủy nứt;

$|m_{75}|$ là giá trị tuyệt đối của độ dốc sau phá hủy;

l_{75} là chuyển vị tương ứng với 75% lực phá hủy tại phần đường cong sau phá hủy;

D là đường kính mẫu;

t là chiều dày mẫu.

Chỉ số CTIndex càng lớn thì BTN có khả năng chống nứt càng cao, bang Virginia đưa ra yêu cầu CTIndex lớn hơn 70.

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm tương đối dễ dàng, không đòi hỏi thí nghiệm viên có tay nghề cao. Không cần phải cắt, khoan, dán, hoặc xẻ khía.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm tương đối chụm $COV < 20\%$ [60].

Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với rất nhiều hiện trường đánh giá nứt thực tế của Cục đường bộ liên bang Hoa Kỳ, chương trình theo dõi dài hạn LTPP.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Tốt, dễ sử dụng ở Việt Nam để thiết kế hỗn hợp, đảm bảo và kiểm soát chất lượng BTN.

2.2.4. Phương pháp thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo ASTM

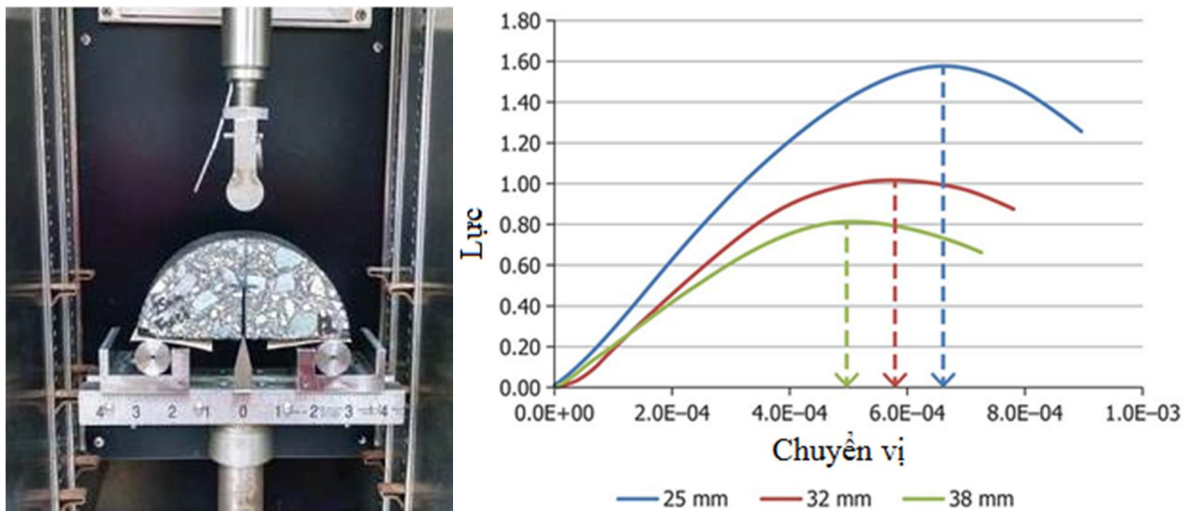
Tiêu chuẩn thí nghiệm: ASTM D8044-16.

Thiết bị: Sử dụng thiết bị nén có thể gia tải với tốc độ không đổi 0,5mm/phút. Thiết bị có gắn bộ LVDT tự động ghi và vẽ biểu đồ lực và chuyển vị (Hình 2-6). Giá thiết bị khoảng 20000-26000 USD. Giá bộ dụng cụ cắt và xẻ khía mẫu khoảng 7000 USD.

Mẫu thí nghiệm: Tối thiểu 4 mẫu bán nguyệt với 3 chiều sâu xẻ khe (25,4 mm, 31,8 mm và 38,0 mm) cắt đôi từ mẫu D150mm. Mẫu chế bị trong phòng bằng đầm xoay, đầm Marshall cải tiến hoặc khoan hiện trường.

Điều kiện thí nghiệm: Mẫu được ủ ở điều kiện nhiệt độ 25°C trong tối thiểu 0,5 giờ. Thí nghiệm ở 25°C. Thời gian thực hiện thí nghiệm khoảng 1 giờ.

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Tốc độ giải phóng năng lượng J_c ; Tiêu chuẩn ASTM D8044 – 16 theo bang Louisiana J_c có ngưỡng giới hạn 0,5-0,6kJ/m².



Hình 2-6. Thiết bị thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo ASTM

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm khá khó khăn, cần thiết bị có thể gia tải được với tốc độ 0,5mm/phút. Khó khăn cho tính toán, xử lý số liệu từ biểu đồ. Cần có phần mềm Excel hoặc phần mềm chuyên dụng.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm tương đối chụm $COV < 20\%$ [60].

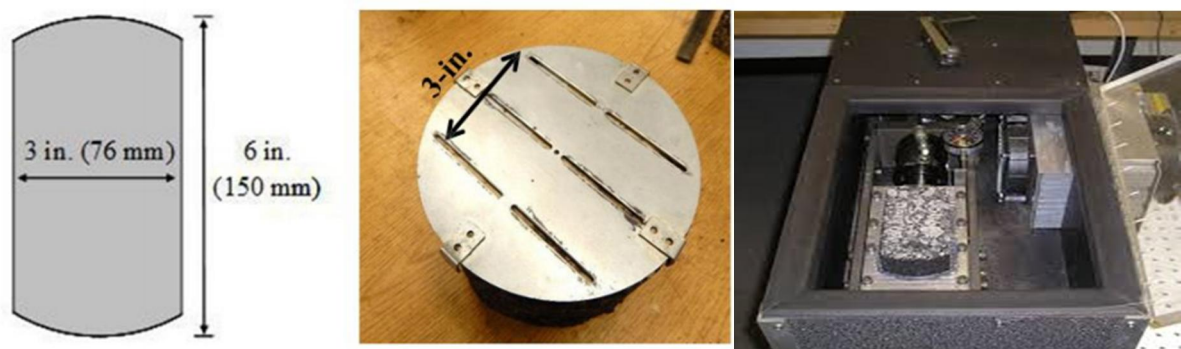
Phù hợp hiện trường: Không phản ánh đúng diễn biến nứt thực tế tại hiện trường thử nghiệm.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Khá, có thể sử dụng ở Việt Nam để thiết kế hỗn hợp, đảm bảo và kiểm soát chất lượng BTN.

2.2.5. Phương pháp thí nghiệm Texas overlay test

Tiêu chuẩn thí nghiệm: Tiêu chuẩn bang Texas 2017: Tex-248-F; ASTM WK26816.

Thiết bị: Sử dụng thiết bị chuyên dụng AMPT. Công tác cắt mẫu và dính mẫu vào khuôn cũng khó khăn (Hình 2-7). Giá thiết bị cao, khoảng 46000 USD. Giá bộ dụng cụ cắt mẫu khoảng 7000 USD.



Hình 2-7. Thiết bị thí nghiệm Texas overlay test

Mẫu thí nghiệm: Tối thiểu 4 mẫu được cắt từ mẫu D150mm. Mẫu chế bị trong phòng bằng đầm xoay, đầm Marshall cải tiến hoặc khoan hiện trường.

Điều kiện thí nghiệm: Thí nghiệm ở 25°C, thời gian thí nghiệm khoảng 3 giờ.

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Số chu kỳ hoặc thông số phá hủy: A và n (có thể đánh giá thời điểm xuất hiện vết nứt và quá trình phát triển vết nứt đến phá hoại mẫu); bang Texas qui định: Số lần tác dụng tối thiểu 200.

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm khá khó khăn, cần thiết bị có thể gia tải tuần hoàn AMPT với tần số thí nghiệm 0,1Hz. Cần có phần mềm chuyên dụng để xử lý số liệu.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm tương đối phân tán COV từ 30% đến 50% [58].

Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với nứt tại hiện trường bang Texas, California và New Jersey, FHWA-ALF và NCAT Test track.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Kém, chỉ dùng để nghiên cứu, không thích hợp với thiết kế hỗn hợp, không thích hợp với các phòng thí nghiệm hiện trường.

2.2.6. Phân tích lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave ở Việt Nam

Trên cơ sở những nội dung chủ yếu của các phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa đã nêu tại mục 2.2.1 đến 2.2.5, tiến hành tóm tắt, so sánh về độ phân tán của kết quả thí nghiệm, giá thành thiết bị, độ phức tạp, tương quan với hư hỏng nứt thực tế tại hiện trường... của các phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của BTN. Kết quả thể hiện tại bảng 2-4 [58, 60].

Bảng 2-4. So sánh các thông số chủ yếu của các phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt của BTN

Phương pháp thí nghiệm	Độ phân tán của kết quả thí nghiệm	Giá thành thiết bị	Mức độ phức tạp	Có chuẩn đánh giá “đạt”	Tương quan với hư hỏng nứt hiện trường
Uốn dầm 4 điểm	COV > 50%	>100000 USD	Rất phức tạp, thời gian thí nghiệm dài	Chưa có	Tốt
Uốn dầm bán nguyệt SCB theo AASHTO	COV < 20%	~22000 USD	Đơn giản, thời gian thí nghiệm nhanh	FI ≥ 8	Tốt
IDEAL CTindex	COV < 20%	<10000 USD	Đơn giản, thời gian thí nghiệm nhanh, không phải cắt xẻ mẫu	CTindex ≥ 70	Tốt
Uốn dầm bán nguyệt SCB theo ASTM	COV < 20%	~33000 USD	Khá phức tạp do phải cắt xẻ mẫu với 3 chiều sâu khác nhau	Jc ≥ (0,5-0,6) kJ/m ²	Kém

Phương pháp thí nghiệm	Độ phân tán của kết quả thí nghiệm	Giá thành thiết bị	Mức độ phức tạp	Có chuẩn đánh giá “đạt”	Tương quan với hư hỏng nứt hiện trường
Texas overlay test	COV từ 30% ~ 50%	~53000 USD	Rất phức tạp	Có	Tốt

Như đã phân tích ở trên nhận thấy:

- Thí nghiệm uốn dầm 4 điểm chủ yếu được dùng để nghiên cứu và chưa được sử dụng rộng rãi ở các bang/nước khi thiết kế hỗn hợp BTN vì thời gian chuẩn bị mẫu lâu, thí nghiệm lâu, kết quả thí nghiệm phân tán (COV > 50%), không lấy mẫu hiện trường được như khoan mẫu hình trụ, thiết bị đắt tiền, chưa có chuẩn đánh giá khi nào được coi là “đạt” để thiết kế thành phần hỗn hợp BTN.

- Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB (theo AASHTO T393, TCVN 13347:2021 [14]) là thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt 3 điểm, thời gian chuẩn bị mẫu nhanh, thí nghiệm nhanh, kết quả thí nghiệm có độ chụm cao, đánh giá được độ nhạy của các thông số đầu vào, thiết bị có giá thành thấp, có thể tận dụng máy Marshall tự động hiện có tại các phòng thí nghiệm của Việt Nam, có chuẩn để đánh giá “đạt”, có tương quan chặt với hư hỏng nứt thực tế của mặt đường tại hiện trường, do vậy nên được sử dụng rộng rãi khi thiết kế BTN để đánh giá khả năng chống nứt mỏi của mẫu BTN. Kết quả thí nghiệm sẽ đưa ra chỉ số mềm FI, chỉ số này càng cao thì hỗn hợp BTN có khả năng chống nứt mỏi càng tốt. Bang Illinois của Hoa Kỳ đã đưa ra tiêu chuẩn giới hạn cho chỉ số mềm FI lớn hơn 8 để đảm bảo khả năng chống nứt mỏi của BTN hỗn hợp bê tông nhựa nóng.

- Thí nghiệm IDEAL CTindex (theo ASTM D8225 [45]) là thí nghiệm mới, được phát triển bởi bang Texas trên mô hình kéo gián tiếp với tốc độ gia tải 50mm/ phút, sử dụng mẫu BTN hình trụ tương tự như mẫu thí nghiệm cường độ chịu kéo của BTN. Ưu điểm của thí nghiệm này là thực hiện rất đơn giản, thời gian chuẩn bị mẫu nhanh do không phải khoan, cắt, xẻ rãnh... như thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB, thời gian thí nghiệm rất nhanh, kết quả thí nghiệm có độ chụm cao, đánh giá được độ nhạy của các thông số đầu vào, thiết bị có giá thành thấp, có thể tận dụng máy Marshall tự động hiện có tại các phòng thí nghiệm, có tương quan chặt với hư hỏng nứt thực tế của mặt đường tại hiện trường. Kết quả thí nghiệm đưa ra Chỉ số CTindex (Cracking Tolerance index), chỉ số này càng cao thì hỗn hợp BTN có khả năng chống nứt mỏi càng tốt. Hiện nay Bang Virginia của Hoa Kỳ đã đưa ra tiêu chuẩn giới hạn cho Chỉ số CTindex lớn hơn 70 để đảm bảo khả năng chống nứt mỏi của hỗn hợp BTN nóng.

Định hướng tại Việt Nam là lựa chọn phương pháp thí nghiệm có độ chụm cao, mức độ phân tán của kết quả thí nghiệm thấp, giá thành thiết bị thấp, có chuẩn để đánh giá “đạt”, đơn giản, dễ sử dụng, đánh giá được độ nhạy của các thông số đầu vào, phù hợp

với điều kiện khai thác. Vì vậy đề xuất lựa chọn 02 thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt khi thiết kế cân bằng hỗn hợp bê tông nhựa trong điều kiện Việt Nam theo thứ tự ưu tiên như sau:

- (1). Thí nghiệm IDEAL CTindex (theo ASTM D8225) với ngưỡng chỉ số chịu nứt tối thiểu (CT_{index}) là 70 để chấp nhận các hỗn hợp BTN (theo quy định của bang Virginia).
- (2). Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB (theo AASHTO T393, TCVN 13347:2021) với ngưỡng chỉ số mềm tối thiểu (FI) là 8.0 để chấp nhận hỗn hợp BTN (theo quy định của bang Illinois).

2.3. Phân tích, lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống lún vết bánh xe phù hợp với điều kiện Việt Nam

Hiện nay có rất nhiều phương pháp thí nghiệm LVBX cho BTN trong phòng thí nghiệm được nghiên cứu áp dụng trên thế giới, mỗi phương pháp đều có các ưu, nhược điểm và phạm vi áp dụng riêng. Một số phương pháp thí nghiệm có thể kể đến như:

- Thí nghiệm APA (Asphalt Pavement Analyzer).
- Thí nghiệm chỉ số chảy (Flow Number Test).
- Thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking.
- Thí nghiệm cắt Superpave (Superpave Shear Tester).

2.3.1. Phương pháp thí nghiệm APA (Asphalt Pavement Analyzer)

Tiêu chuẩn thí nghiệm: AASHTO T 340.

Thiết bị: Sử dụng thiết bị Asphalt Pavement Analyzer. Giá thiết bị khoảng 60000-125000 USD.



Hình 2-8. Thiết bị thí nghiệm APA

Mẫu thí nghiệm: Sử dụng mẫu BTN hình số 8, được gia công từ 2 mẫu trụ đầm bằng đầm xoay có đường kính 150 mm, dày 75 mm. Hoặc sử dụng mẫu dạng tấm.

Điều kiện thí nghiệm: Mẫu được hóa già trong 4 giờ tại 135°C trước khi đầm. Mẫu được bảo quản trong 6-24 giờ tại nhiệt độ thí nghiệm (là nhiệt độ cao của cấp nhựa đường PG sử dụng trong BTN).

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Giá trị chiều sâu LVBX dưới tác dụng của 8000 chu kỳ gia tải. Giá trị giới hạn tùy theo quy định của từng bang, phụ thuộc vào lưu lượng ESAL thiết kế.

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm tương đối dễ dàng, không đòi hỏi thí nghiệm viên có tay nghề cao. Thời gian thí nghiệm khoảng 2,25 giờ.

Mức độ phân tán: kết quả thí nghiệm tương đối chụm $COV < 20\%$ [61].

Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với điều kiện hiện trường FHWA ALF, WesTrack, NCAT Test Track, MnROAD, bang Georgia và Nevada).

Các bang đang áp dụng: Alaska, Alabama, Arkansas, North Carolina, New Jersey, South Carolina, South Dakota, Virginia. Ít được sử dụng ở các nước châu Âu, châu Á.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Khá, có thể áp dụng ở Việt Nam để thiết kế hỗn hợp BTN, tuy nhiên hiện nay chưa có thiết bị APA.

2.3.2. Phương pháp thí nghiệm chỉ số chảy (Flow Number Test)

Tiêu chuẩn thí nghiệm: AASHTO T 378.

Thiết bị: Thiết bị Asphalt Mixture Performance Tester có giá khoảng 100000 USD. Ngoài ra còn sử dụng máy khoan lõi có giá khoảng 3000 USD, Tủ môi trường có giá khoảng 3000 USD và máy cắt mẫu có giá khoảng 6000 USD.



Hình 2-9. Thiết bị thí nghiệm chỉ số chảy

Mẫu thí nghiệm: Sử dụng mẫu BTN hình trụ được đầm nén bằng đầm xoay SGC với đường kính 100 mm, chiều cao 150 mm.

Điều kiện thí nghiệm: Mẫu được hóa già trong 4 giờ tại $135^{\circ}C$ trước khi đầm nén. Nhiệt độ thí nghiệm là nhiệt độ mặt đường trung bình 7 ngày lớn nhất được xác định từ phần mềm LTPPBind 3.1 với độ tin cậy 98%.

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Chỉ số chảy (Flow Number). Giá trị giới hạn tùy theo quy định của từng bang, phụ thuộc vào lưu lượng ESAL thiết kế.

Mức độ phức tạp: Tương đối phức tạp, thí nghiệm được thực hiện trên thiết bị đồng bộ, hiện đại, tự động, thời gian thí nghiệm từ 30 phút đến 4 giờ.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm tương đối phân tán $COV > 30\%$ [61].

Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với điều kiện hiện trường FHWA ALF, WesTrack, NCAT Test Track, MnROAD.

Các bang đang áp dụng: Delaware, California. Ít được sử dụng ở các nước châu Âu, châu Á.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Kém, chỉ thích hợp với nghiên cứu, không phù hợp với công tác thiết kế hỗn hợp BTN.

2.3.3. Phương pháp thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking

Tiêu chuẩn thí nghiệm: AASHTO T 324-19; Quyết định 1617/QĐ-BGTVT.

Thiết bị: Sử dụng thiết bị Hamburg Wheel-Tracking Device. Giá thiết bị khoảng 40000-75000 USD.



Hình 2-10. Thiết bị thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking

Mẫu thí nghiệm: Mẫu thí nghiệm hình trụ tròn có $D \geq 150\text{mm}$ (tạo mẫu bằng phương pháp đầm xoay hoặc mẫu Marshall cải tiến) hoặc mẫu dạng tấm $320 \times 260 \times (38 \div 100)$, tùy theo cỡ hạt lớn nhất) mm. Mẫu chế bị trong phòng hoặc khoan/cắt tại hiện trường.

Điều kiện thí nghiệm: Mẫu được hóa già trong 4 giờ tại 135°C trước khi đầm. Mẫu được ngâm nước trong 45 phút tại nhiệt độ thí nghiệm. Thí nghiệm trong môi trường ngâm nước ở nhiệt độ $40-56^\circ\text{C}$.

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Xác định được chiều sâu hằn lún tuyệt đối, điểm bong tróc màng nhựa. Tại Hoa Kỳ, tùy từng Bang sẽ đưa ra tiêu chuẩn LVBX cho BTN ứng với cấp nhựa đường PG. Nhìn chung đa số các bang đều quy định giá trị chiều sâu LVBX tối đa là 12,5mm sau từ 10000-20000 lượt tác dụng của tải trọng tùy thuộc cấp nhựa đường PG. Tại Việt Nam, tiêu chuẩn giới hạn chiều sâu LVBX theo phương pháp A Quyết định 1617/QĐ-BGTVT quy định tối đa 12,5mm sau 15000 lần tác dụng tải với

BTN sử dụng nhựa đường thông thường và sau 40000 lần tác dụng tải với BTN sử dụng nhựa đường polime.

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm tương đối dễ dàng, không đòi hỏi thí nghiệm viên có tay nghề cao. Thời gian thí nghiệm từ 6 giờ đến 18 giờ tùy thuộc vào loại BTN.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm tương đối chụm COV khoảng 10-30% [61].

Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với điều kiện hiện trường bang Colorado, Texas.

Các bang đang áp dụng: California, Georgia, Idaho, Iowa, Illinois, Kentucky, Louisiana, Massachusetts, Maine, Missouri, Montana, Oklahoma, Oregon, Tennessee, Texas, Utah, Vermont, Washington. Được sử dụng tại nhiều nước châu Âu, châu Á, Việt Nam.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Tốt. Phương pháp thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking có giá thành thiết bị không cao, thao tác thí nghiệm không phức tạp, có chuẩn đánh giá “đạt” nên đã được nhiều bang của Hoa Kỳ, nhiều nước châu Âu sử dụng để đánh giá khả năng chống LVBX khi thiết kế BTN. Hiện nay, Việt Nam cũng sử dụng phương pháp này để đánh giá LVBX cho BTN tại Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT.

2.3.4. Phương pháp thí nghiệm cắt Superpave (Superpave Shear Tester)

Tiêu chuẩn thí nghiệm: AASHTO T 320.

Thiết bị: sử dụng thiết bị Superpave Shear Tester. Giá thiết bị khoảng >300000 USD.



Hình 2-11. Thiết bị thí nghiệm cắt Superpave (Superpave Shear Tester)

Mẫu thí nghiệm: sử dụng mẫu BTN mẫu hình trụ có đường kính 150mm, chiều cao 38÷50mm phụ thuộc vào cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN.

Điều kiện thí nghiệm: Mẫu được hóa già trong 4 giờ tại 135°C trước khi đầm.

Nhiệt độ thí nghiệm: Thí nghiệm cắt giản đơn ở chiều cao không đổi được thực hiện ở các nhiệt độ 4°C, 20°C và 40°C; Thí nghiệm cắt tải trọng lặp với chiều cao không đổi

được thực hiện ở nhiệt độ cao của cấp nhựa đường PG sử dụng trong BTN (nhiệt độ mặt đường trung bình 7 ngày lớn nhất được xác định từ phần mềm LTPPBIND 3.1).

Kết quả, ngưỡng giới hạn: Ứng suất dọc trục, ứng suất cắt và biến dạng cắt. Giá trị giới hạn tùy theo quy định của từng bang, phụ thuộc vào lưu lượng ESAL thiết kế.

Mức độ phức tạp: Thí nghiệm tương đối phức tạp, trên hệ thống thiết bị đồng bộ, đắt tiền, thời gian thí nghiệm kéo dài.

Mức độ phân tán: Kết quả thí nghiệm tương đối chụm COV khoảng 20% [61].

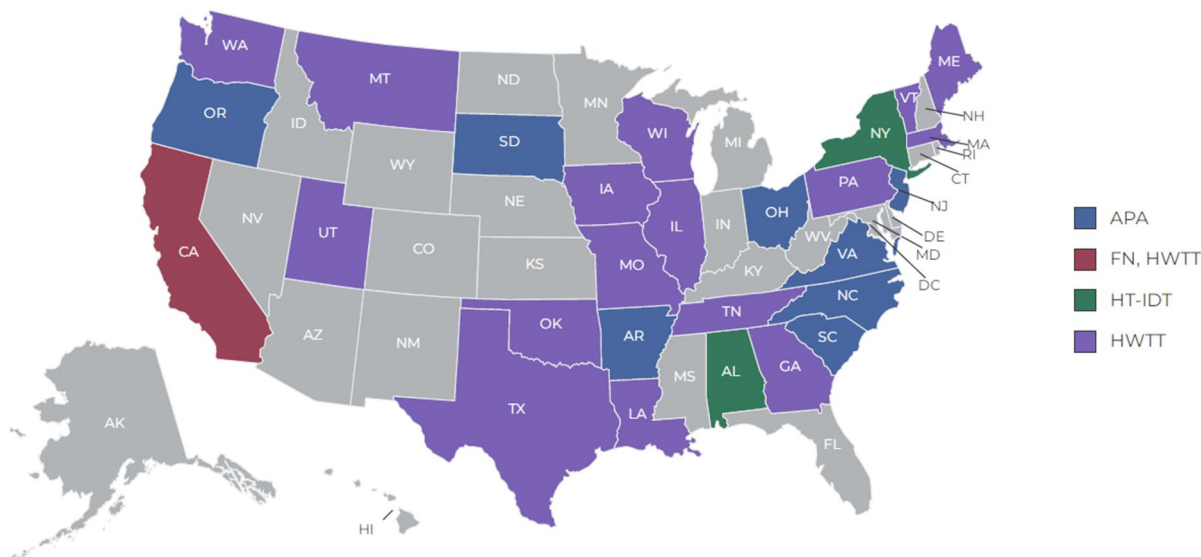
Phù hợp hiện trường: Xác nhận phù hợp tốt với điều kiện hiện trường FHWA ALF, WesTrack, NCAT Test Track, MnROAD, bang Georgia và Nevada).

Các bang đang áp dụng: Delaware.

Đánh giá về khả năng áp dụng ở Việt Nam: Kém. Phương pháp thí nghiệm cắt SST để đánh giá khả năng chống LVBX của BTN mặc dù được đề xuất trong chương trình nghiên cứu Superpave, tuy nhiên do thiết bị cắt SST đắt tiền, thí nghiệm phức tạp, thời gian thí nghiệm kéo dài, nên hiện nay rất ít nước sử dụng phương pháp này, chỉ có bang Delaware của Hoa Kỳ sử dụng chỉ tiêu này để đánh giá khả năng chống LVBX.

2.3.5. Phân tích lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX của bê tông nhựa Superpave ở Việt Nam

Hình 2-12 thể hiện bản đồ lựa chọn thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX ở các bang của Hoa Kỳ theo hiệp hội mặt đường nhựa quốc gia Hoa Kỳ, NAPA (National Asphalt Pavement Association) tại địa chỉ <https://www.asphaltpavement.org/>.



Hình 2-12. Bản đồ các Bang lựa chọn thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX. Tính đến thời điểm năm 2022, đa số các bang của Hoa Kỳ đều lựa chọn thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX theo phương pháp Hamburg Wheel Tracking.

Định hướng tại Việt Nam là lựa chọn phương pháp thí nghiệm đơn giản, dễ sử dụng, độ phân tán của kết quả thấp, tận dụng các máy móc thí nghiệm có sẵn, đánh giá được độ nhạy của các thông số đầu vào, phù hợp với điều kiện khai thác.

Như đã phân tích ở trên nhận thấy mặc dù trên thế giới có rất nhiều phương pháp thí nghiệm để đánh giá khả năng chống LVBX cho BTN, mỗi phương pháp đều có các ưu, nhược điểm và phạm vi áp dụng riêng. Tuy nhiên phương pháp Hamburg Wheel Tracking có giá thành thiết bị không cao, thao tác thí nghiệm không phức tạp, có chuẩn đánh giá “đạt” nên đã được nhiều bang của Hoa Kỳ, nhiều nước châu Âu sử dụng để đánh giá khả năng chống LVBX khi thiết kế BTN. Hiện nay, Việt Nam cũng sử dụng phương pháp này để đánh giá LVBX cho BTN theo Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT [3], do vậy đề xuất:

- Sử dụng phương pháp Hamburg Wheel Tracking theo Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT để đánh giá khả năng chống LVBX khi thiết kế cân bằng hỗn hợp bê tông nhựa Superpave tại Việt Nam.

2.4. Phân tích, lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm phù hợp với điều kiện Việt Nam

Để có thể đánh giá được một cách tổng thể tác động của ẩm đến suy giảm cường độ bê tông nhựa trong thời gian khai thác, việc thí nghiệm đánh giá độ nhạy ẩm của bê tông nhựa rất cần thiết. Có nhiều thí nghiệm đánh giá độ nhạy ẩm của BTN được ban hành trên thế giới như:

1. Thí nghiệm Hamburg Wheel-Tracking theo AASHTO T324.
2. Thí nghiệm cường độ kéo gián tiếp (TSR) theo AASHTO T283.
3. Thí nghiệm ứng suất do độ ẩm (Moisture Induced Stress Tester) theo ASTM D7870/D7870M.

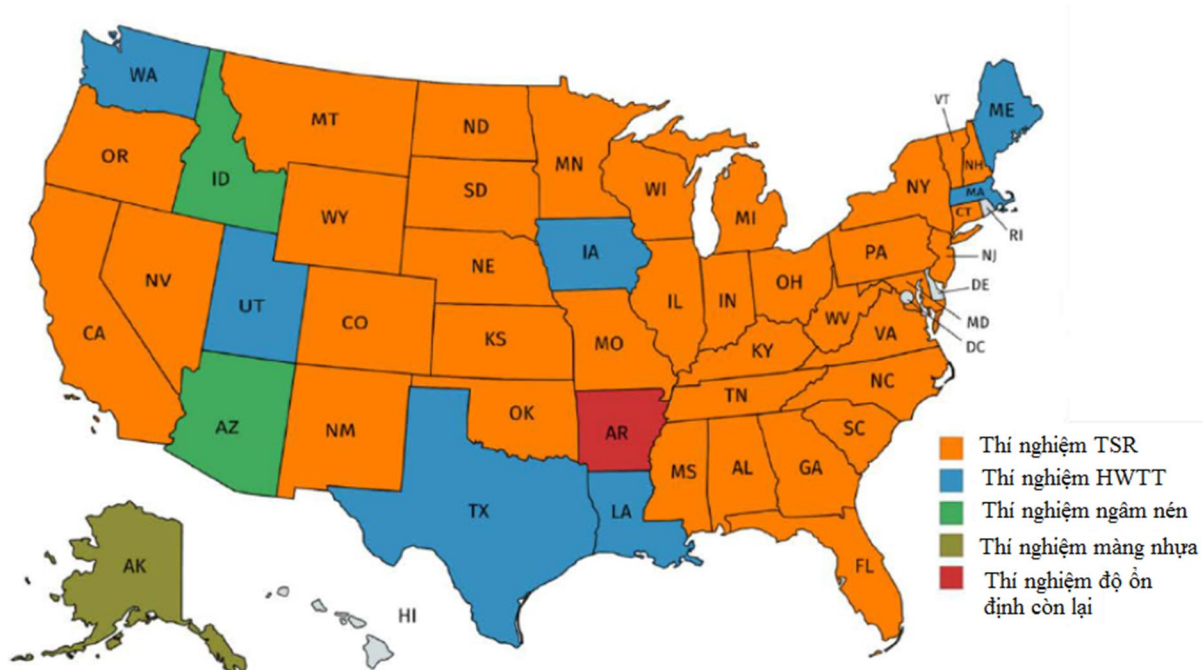
Phương pháp thí nghiệm lún vệt bánh xe bằng thiết bị Hamburg Wheel Tracking theo AASHTO T324 (Phương pháp A của Quyết định 1617/QĐ-BGTVT), kết quả thí nghiệm xác định được điểm bong màng nhựa. Tuy nhiên phương pháp này lại gặp một số vấn đề sau:

- Thực tế kết quả trong các phòng thí nghiệm cho thấy: hầu như không xác định được điểm bong màng nhựa, hoặc nếu xác định được thì số chu kỳ tác dụng tải rất lớn. Từ đó nếu để xác định được điểm bong màng nhựa thì chi phí thí nghiệm khá lớn.
- Để có thể phân biệt một cách rõ ràng ảnh hưởng của nước đến liên kết đá-nhựa, giải pháp đồng thời thí nghiệm LVBX trên mẫu khô và trên mẫu ướt để đối chứng là cần thiết. Tuy nhiên, trên thế giới không khuyến nghị sử dụng cách này, chỉ sử dụng hoặc thí nghiệm LVBX với mẫu “ướt”, hoặc thí nghiệm LVBX với mẫu “khô” (như phương pháp B của Quyết định 1617/QĐ-BGTVT).

Thí nghiệm ứng suất do độ ẩm (Moisture Induced Stress Tester) theo ASTM D7870/D7870M thường được sử dụng như một quy trình điều hòa độ ẩm đối với các mẫu hỗn hợp bê tông nhựa đã được nén chặt chịu các thử nghiệm cơ học và độ bền kéo. Sau đó, những thay đổi trong kết quả thử nghiệm trước và sau khi điều hòa được sử dụng để đánh giá khả năng chống hư hỏng do ẩm của hỗn hợp. Nhiệt độ thử nghiệm

là 60°C đối với hỗn hợp BTN sử dụng cấp nhựa PG lớn hơn 60 và 50°C đối với hỗn hợp BTN sử dụng cấp nhựa PG nhỏ hơn 60. Tuy nhiên phương pháp thử này lại chưa có chuẩn đánh giá “đạt” để sử dụng khi thiết kế hỗn hợp BTN.

Thí nghiệm cường độ kéo gián tiếp (TSR) theo AASHTO T283 dùng để dự đoán độ nhạy ẩm của BTN, khả năng liên kết giữa cốt liệu và nhựa đường trong hỗn hợp bê tông nhựa trong thời gian sử dụng, đánh giá hiệu quả của chất phụ gia tăng dính bám sử dụng trong bê tông nhựa (nếu có).



Hình 2-13. Bản đồ các Bang lựa chọn thí nghiệm đánh giá khả năng kháng ẩm [61]

Theo nghiên cứu [61], hầu hết tất cả các Bang của Hoa Kỳ đều yêu cầu thí nghiệm đánh giá độ ẩm của hỗn hợp bê tông nhựa khi thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa. Trong đó có 36/50 bang lựa chọn thí nghiệm TSR theo AASHTO T 283 (Hình 2-13).

Về ngưỡng giới hạn chỉ số TSR: Thông thường giới hạn TSR tối thiểu là 80%. Một số bang cũng yêu cầu một ngưỡng tối thiểu của các giá trị cường độ ITS khô và/hoặc ướt ngoài TSR. Bảng 2-6 thể hiện ngưỡng giới hạn TSR tại các Bang của Hoa Kỳ [31].

Bảng 2-5. Ngưỡng giới hạn giá trị TSR của một số bang tại Hoa Kỳ

TT	Bang	Ngưỡng giới hạn
1	Alabama	Min. 80% TSR
2	California	Min. ITS khô: 100 psi Min. ITS bão hòa: 70 psi
3	Colorado	Min. TSR: 70%
4	Connecticut	Min. TSR: 80%
5	Florida	Min. TSR: 80%

TT	Bang	Ngưỡng giới hạn
6	Georgia	Min. TSR: 80% Min. ITS khô và ITS bão hòa: 60 psi hoặc, Min. TSR: 70% Min. ITS khô và ITS bão hòa: 100 psi (Điều kiện thí nghiệm của Georgia khác với AASHTO T283)
7	Illinois	Min. TSR: 85%
8	Indiana	Min. TSR: 80%
9	Kansas	Min. TSR: 80%
10	Kentucky	Min. TSR: 80%
11	Maryland	Min. TSR: 85%
12	Michigan	Min. TSR: 80%
13	Minnesota	Min. TSR: 80% với nhà thầu Min. TSR: 70% với cơ quan quản lý
14	Missouri	Min. TSR: 80%
15	Mississippi	Min. TSR: 85%
16	Montana	Min. TSR: 70%
17	North Carolina	Min. TSR: 85% cho lớp mặt và lớp giữa Min. TSR: 80% cho lớp móng
18	Nebraska	Min. TSR: 80%
19	New Hampshire	Min. TSR: 80%
20	New Jersey	Min. TSR: 80%
21	New Mexico	Min. TSR: 85%
22	Nevada	Min. TSR: 70%
23	New York	Min. TSR: 80%
24	Ohio	Min. TSR: 80%
25	Oklahoma	Min. TSR: 80%
26	Oregon	Min. TSR: 80% cho thiết kế Min. TSR: 80% cho thi công
27	Pennsylvania	Min. TSR: 80% Min. ITS khô: 80 psi với nhựa PG 76-22 và PG 64-22

TT	Bang	Ngưỡng giới hạn
		Min. ITS khô: 65 psi với nhựa PG 58-28 Min. ITS bão hòa: 50 psi
28	South Carolina	Min. TSR: 85% Min. ITS bão hòa: 65 psi
29	South Dakota	Min. TSR: 80%
30	Tennessee	Min. TSR: 80% Min. ITS bão hòa: 100 psi với nhựa PMB Min. ITS bão hòa: 80 psi với nhựa thường
31	Virginia	Min. TSR: 80%
32	Vermont	Min. TSR: 80%
33	Wisconsin	Min. TSR: 75%
34	Wyoming	Min. TSR: 75%

Như đã phân tích ở trên nhận thấy:

Đa số các bang của Hoa Kỳ lựa chọn thí nghiệm TSR theo AASHTO T 283 để đánh giá khả năng kháng ẩm với ngưỡng giới hạn chỉ số TSR thông thường tối thiểu là 80%. Thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave theo AASHTO M323, AASHTO R35 và TCVN 12818:2019 cũng sử dụng AASHTO T283 để đánh giá độ nhạy ẩm của BTN với ngưỡng giới hạn chỉ số TSR tối thiểu là 80%. Mặt khác, Việt Nam đã biên soạn và ban hành TCVN 12914:2020 “Bê tông nhựa - xác định khả năng kháng ẩm của mẫu đã đầm chặt” [11] trên cơ sở tham khảo AASHTO T283. Do vậy, đề xuất sử dụng sử dụng tiêu chuẩn TCVN 12914:2020 (AASHTO T283) để đánh giá để đánh giá khả năng kháng ẩm khi thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng tại Việt Nam với ngưỡng giới hạn TSR tối thiểu là 80%.

2.5. Kết luận chương 2

1. Đã đề xuất lựa chọn phương pháp, nguyên tắc và trình tự thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng ở Việt Nam theo cách A - Thiết kế theo thể tích Superpave và kiểm tra, xác nhận các đặc tính làm việc (Volumetric Design with Performance Verification).
2. Đã phân tích kỹ thuật, kinh tế, tính khả thi, và đề xuất lựa chọn các phương pháp thí nghiệm và chuẩn đánh giá đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa Superpave ở Việt Nam bằng 01 trong 02 thí nghiệm theo thứ tự ưu tiên như sau:
 - (1). Thí nghiệm IDEAL CTindex (theo ASTM D8225) với ngưỡng chỉ số chịu nứt tối thiểu (CTindex) là 70 để chấp nhận hỗn hợp BTN.
 - (2). Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB (theo AASHTO T393, TCVN 13347:2021) với ngưỡng chỉ số mềm tối thiểu (FI) là 8.0 để chấp nhận hỗn hợp BTN.
3. Đã phân tích đề xuất lựa chọn phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống LVBX theo phương pháp Hamburg Wheel Tracking theo Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT và phương pháp thí nghiệm đánh giá độ nhạy ẩm theo TCVN 12914:2020 (AASHTO T283) với ngưỡng giới hạn TSR tối thiểu là 80%.

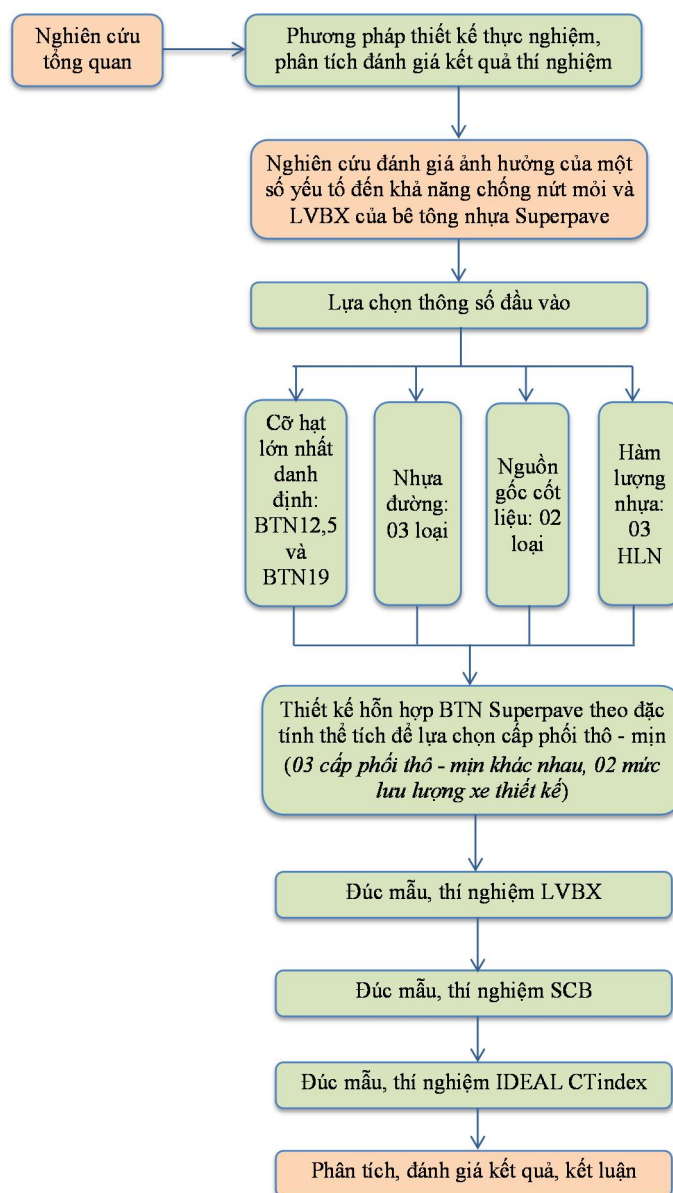
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG NỨT CỦA BÊ TÔNG NHỰA SUPERPAVE THEO NGUYÊN LÝ CÂN BẰNG

3.1. Mục tiêu, nội dung nghiên cứu thực nghiệm, thiết kế thí nghiệm và trình tự phân tích thống kê xử lý số liệu

3.1.1. Mục tiêu

Mục tiêu nghiên cứu thực nghiệm trong phòng gồm là: đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố (cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN, nguồn gốc cốt liệu, loại nhựa đường và hàm lượng nhựa) đến khả năng chống nứt môi và chống LVBX của bê tông nhựa Superpave thiết kế theo nguyên lý cân bằng trong điều kiện Việt Nam.

Sơ đồ trình tự thí nghiệm trong phòng như Hình 3-1.



Hình 3-1. Sơ đồ nghiên cứu thí nghiệm trong phòng

3.1.2. Thiết kế thí nghiệm và trình tự phân tích thống kê xử lý số liệu

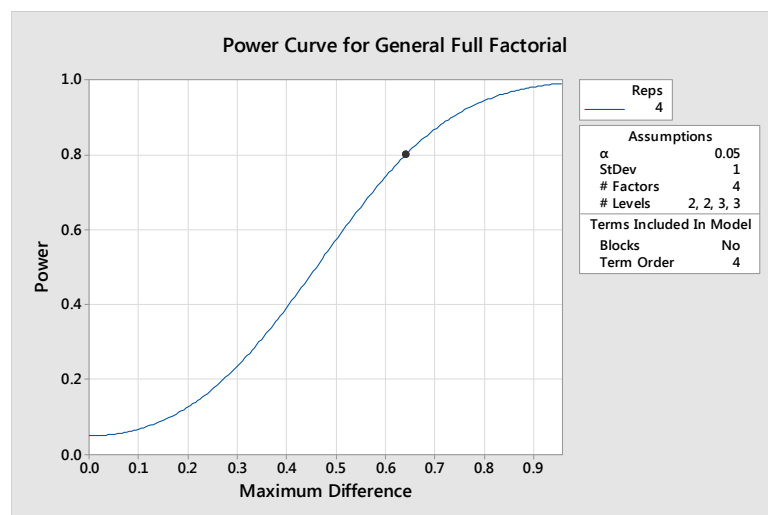
3.1.2.1. Thiết kế thí nghiệm

Thiết kế thực nghiệm DoE (Design of Experiments) bao gồm lựa chọn thí nghiệm, quy hoạch mẫu, thực hiện thí nghiệm và phân tích thống kê xử lý kết quả. Nghiên cứu thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design) sử dụng phần mềm Minitab ở độ tin cậy 95%, mức ý nghĩa $\alpha=5\%$. Số mẫu tùy theo mức độ chính xác đảm bảo phát hiện sai khác của thí nghiệm.

Phân tích phương sai ANOVA (Analysis Of Variance) một nhân tố là phương pháp thống kê để dùng để kiểm định giả thuyết trung bình bằng nhau của từ 3 nhóm mẫu trở lên với khả năng phạm sai lầm chỉ là 5%. Phân tích hậu định (post-hoc) dùng để xem có sự khác biệt cụ thể giữa nhóm nào và nhóm nào về một vấn đề nào đó có ý nghĩa thống kê không. Hiện có nhiều phương pháp phân tích hậu định theo các tác giả khác nhau như Tukey, Fisher, Duncan,... trong khuôn khổ luận án nghiên cứu thực nghiệm với số mẫu trong tổ mẫu tối thiểu 4 mẫu nên sử dụng phương pháp của Tukey.

3.1.2.2. Đánh giá số mẫu trong tổ mẫu

Việc lựa chọn số mẫu trong tổ mẫu rất quan trọng, nếu số mẫu quá ít sẽ không đánh giá được chính xác kết quả thí nghiệm và ngược lại nếu số mẫu quá nhiều sẽ kéo dài thời gian thí nghiệm dẫn đến kết quả bị ảnh hưởng bởi tuổi mẫu. Với số lần lặp là 4 mẫu/ tổ mẫu, kiểm tra bằng Minitab xác định được mức độ phát hiện sai khác 0,64 độ lệch chuẩn với $\alpha=0,05$ và độ mạnh Power=0,8 như thể hiện ở Hình 3-2.



Hình 3-2. Kiểm tra số mẫu khi phân tích thống kê

3.1.2.3. Loại bỏ số liệu ngoại lai và đánh giá độ chụm

Sau khi có kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý, đánh giá loại bỏ số liệu ngoại lai theo ASTM E178 [46], đánh giá độ chụm theo ASTM C670 [43] với giới hạn chấp nhận được quy định của các tiêu chuẩn thí nghiệm tương ứng. Tiêu chuẩn Grubbs được sử dụng để đánh giá, loại bỏ số liệu ngoại lai của các kết quả thí nghiệm. Trình tự đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm theo TCVN 6910 [6].

3.1.2.4. Trình tự thiết kế thí nghiệm và xử lý kết quả thí nghiệm

- Thiết kế thí nghiệm;
- Thực hiện thí nghiệm tại các phòng thí nghiệm hợp chuẩn được các kết quả;
- Loại bỏ các số liệu ngoại lai (nếu có); Đánh giá độ chụm của kết quả;
- Sử dụng phần mềm Minitab phân tích, vẽ biểu đồ thống kê các kết quả thí nghiệm.
- Mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy các yếu tố ảnh hưởng.

3.1.3. Lựa chọn vật liệu đầu vào

- Về cỡ hạt lớn nhất danh định: Lựa chọn 2 cỡ hạt lớn nhất danh định là 12,5mm và 19mm để chế tạo BTN vì loại BTN12,5 và BTN19 làm lớp mặt đường, có vai trò quan trọng và được sử dụng nhiều.
- Về nhựa đường: Lựa chọn 3 loại nhựa đường khác nhau. Cấp nhựa đường PG theo điều kiện nhiệt độ không khí các tỉnh, thành của Việt Nam là PG64-16 đối với tất cả các công trình đường bộ, và điều chỉnh cấp nhựa đường theo PG theo đặc tính đặc tính dòng xe. Tuy nhiên hiện nay, Việt Nam vẫn đang sử dụng nhựa đường phân cấp theo độ kim lún mà chưa có nhựa đường PG, do vậy đề xuất sử dụng nhựa đường 60/70; 40/50; nhựa đường polime PMB.III (là những loại nhựa đang được sử dụng phổ biến tại các dự án) trên cơ sở thí nghiệm theo PG để tìm ra các cấp nhựa tương đương với cấp nhựa PG áp dụng cho thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave.
- Về nguồn gốc vật liệu: Theo kết quả nghiên cứu của Viện Khoa học và Công nghệ GTVT tại miền Bắc hầu hết là các mỏ đá vôi, chiếm gần 40% tổng số lượng mỏ trên cả nước và một phần là mỏ đá bazan. Miền Trung cũng đa phần là các mỏ đá vôi, tuy nhiên có thêm một số mỏ đá granite ở Hà Tĩnh và Đà Nẵng. Nam miền Trung, Miền Nam và Tây Nguyên chủ yếu là đá diorit, andesite và đá bazan [18]. Như vậy, để thí nghiệm đại diện cho các loại đá thì khối lượng mẫu là rất lớn, điều này không khả thi với thời gian của đề tài. Trong phạm vi đề tài này, đề xuất chọn loại đá vôi và đá bazan là 2 loại đá đang được sử dụng khá phổ biến ở miền Bắc để chế tạo BTN tại nhiều dự án là: Đá vôi tại mỏ Transmeco – Hà Nam và đá bazan tại mỏ Phú Mãn - Hà Nội.
- Về hàm lượng nhựa: Lựa chọn 3 hàm lượng nhựa khác nhau với mỗi loại BTN (Hàm lượng dự kiến thiết kế P_b ; hàm lượng nhựa $P_b-0,5\%$ và hàm lượng nhựa $P_b+0,5\%$).

3.1.4. Thiết kế thực nghiệm xác định số lượng mẫu thí nghiệm

3.1.4.1. Hàm mục tiêu

Sử dụng một số phép kiểm chứng thống kê trên cơ sở số liệu thí nghiệm để chứng minh mối tương quan các yếu tố tác động đến chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX.

$$Y = F(X)$$

Trong đó: Y là biến phụ thuộc; X là biến độc lập.

3.1.4.2. Biến phụ thuộc

(1). Chiều sâu LVBX

Biến phụ thuộc Y_1 là chiều sâu LVBX (mm) tại số lần tác dụng tải {15000; 40000}.

(2). Chỉ số mềm FI

Biến phụ thuộc Y_2 là chỉ số mềm FI thí nghiệm tại nhiệt độ 25⁰C.

(3). Chỉ số CTindex

Biến phụ thuộc Y_3 là chỉ số CTindex thí nghiệm tại nhiệt độ 25⁰C.

3.1.4.3. Biến độc lập

Các biến độc lập ảnh hưởng tới các biến phụ thuộc Y_1 , Y_2 và Y_3 bao gồm:

X_1 : Loại BTN, $X_1 = \{BTN12,5; BTN19\}$.

X_2 : Nguồn gốc đá dăm, $X_2 = \{\text{đá bazan; đá vôi}\}$.

X_3 : Loại nhựa, $X_3 = \{60/70; 40/50; PMBIII\}$.

X_4 : Hàm lượng nhựa, $X_4 = \{P_b-0,5; P_b; P_b+0,5\}$.

Sử dụng phần mềm MINITAB thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design) xác định được số lượng mẫu thí nghiệm LVBX như trong Bảng 3-1, thí nghiệm chỉ số mềm FI như trong Bảng 3-2 và chỉ số CTindex như trong Bảng 3-3.

Bảng 3-1. Số mẫu thí nghiệm chiều sâu LVBX

Loại nhựa/ Hàm lượng nhựa	BTN12,5						BTN19					
	Đá vôi			Đá bazan			Đá vôi			Đá bazan		
	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$
60/70	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40/50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PMB.III	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tổng	36											

Bảng 3-2. Số mẫu thí nghiệm chỉ số mềm FI

Loại nhựa/ Hàm lượng nhựa	BTN12,5						BTN19					
	Đá vôi			Đá bazan			Đá vôi			Đá bazan		
	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$	$P_b-0,5$	P_b	$P_b+0,5$
60/70	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
40/50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PMB.III	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Tổng	144											

Bảng 3-3. Số mẫu thí nghiệm chỉ số CTindex

Loại nhựa/ Hàm lượng nhựa	BTN12,5						BTN19					
	Đá vôi			Đá bazan			Đá vôi			Đá bazan		
	P _{b-} 0,5	P _b	P _{b+} 0,5	P _{b-} 0,5	P _b	P _{b+} 0,5	P _{b-} 0,5	P _b	P _{b+} 0,5	P _{b-} 0,5	P _b	P _{b+} 0,5
60/70	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
40/50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
PMB.III	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Tổng	144											

3.2. Thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của vật liệu

Tiến hành thí nghiệm kiểm tra chất lượng các vật liệu đầu vào: cốt liệu thô, cốt liệu mịn, bột khoáng và nhựa đường, kết quả thí nghiệm chi tiết như sau:

Bảng 3-4. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu

TT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm	
			Đá vôi	Đá bazan
1	Mặt vỡ cốt liệu thô, 1 mặt / 2 mặt	%	100/100	100/100
2	Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	8,42	9,56
3	Độ góc cạnh của cốt liệu mịn	%	47,7	51,4
4	Đương lượng cát	%	97,4	77,2
5	Độ hao mòn Los Angeles	%	24,45	19,62
6	Độ dính bám	Cấp	4	4

Bảng 3-5. Các chỉ tiêu cơ lý của bột khoáng

TT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
1	Thành phần hạt		
	Cỡ sàng		100
	0,6		97,15
	0,3	%	79,21
	0,075		
2	Độ ẩm	%	0,27
3	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,721
4	Chỉ số dẻo	%	Không dẻo

Thông qua kết quả thí nghiệm tại Bảng 3-4 và Bảng 3-5, nhận thấy: Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu thô, cốt liệu mịn và bột khoáng thỏa mãn theo quy định.

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường 60/70, nhựa đường 40/50 theo Thông tư 27/2014/TT-BGTVT và nhựa đường polymer PMB.III theo TCVN 11193:2017 đều thỏa mãn theo quy định.

Kết quả thí nghiệm các loại nhựa đường 60/70, nhựa đường 40/50, polymer PMB.III theo chuẩn PG được đưa ra tại Bảng 3-6.

Bảng 3-6. Các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường theo chuẩn PG

TT	Nội dung	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm			YCKT
			60/70	40/50	PMB.III	
I	Thử nghiệm với nhựa gốc					
1	Nhiệt độ chớp cháy		270	289	287	≥ 230
2	Độ nhớt ở 135 ⁰ C	Pa.s	0,753	0,616	1,700	≤ 3
3	Cắt động lưu biến					
3.1	G*/ sinδ ở 64 ⁰ C	kPa	1,074	1,493	5,333	≥ 1,00
3.2	G*/ sinδ ở 70 ⁰ C	kPa	0,505	0,706	3,410	≥ 1,00
3.3	G*/ sinδ ở 76 ⁰ C	kPa			2,104	≥ 1,00
3.4	G*/ sinδ ở 82 ⁰ C	kPa			1,448	≥ 1,00
II	Thử nghiệm sau RTFO					
1	Tồn thất khối lượng	%	0,040	0,181	-0,018	≤ 1,0
2	Cắt động lưu biến					
2.1	G*/ sinδ ở 64 ⁰ C	kPa	2,960	3,803	9,743	≥ 2,20
2.2	G*/ sinδ ở 70 ⁰ C	kPa	1,382	1,847	5,949	≥ 2,20
2.3	G*/ sinδ ở 76 ⁰ C	kPa			3,550	≥ 2,20
2.4	G*/ sinδ ở 82 ⁰ C	kPa			2,263	≥ 2,20
III	Thử nghiệm sau PAV					
1	Cắt động lưu biến					
1.1	G*. sinδ ở 34 ⁰ C	kPa			513	
1.2	G*. sinδ ở 31 ⁰ C	kPa	1986	2616	771	≤ 5000
1.3	G*. sinδ ở 28 ⁰ C	kPa	2849	3602		≤ 5000
1.4	G*. sinδ ở 25 ⁰ C	kPa	3992	5004		≤ 5000
1.5	G*. sinδ ở 22 ⁰ C	kPa	5432	6840		≤ 5000
Cấp nhựa PG tương ứng			PG64-22	PG64-16	PG82-22	

Thông qua kết quả thí nghiệm tại Bảng 3-6 nhận thấy:

- Nhựa đường 60/70 thí nghiệm theo chuẩn PG đạt cấp PG64-22; nhựa đường 40/50 thí nghiệm theo chuẩn PG đạt cấp PG64-16.

- Nhựa đường polymer PMB.III thí nghiệm theo chuẩn PG đạt cấp PG82-22.

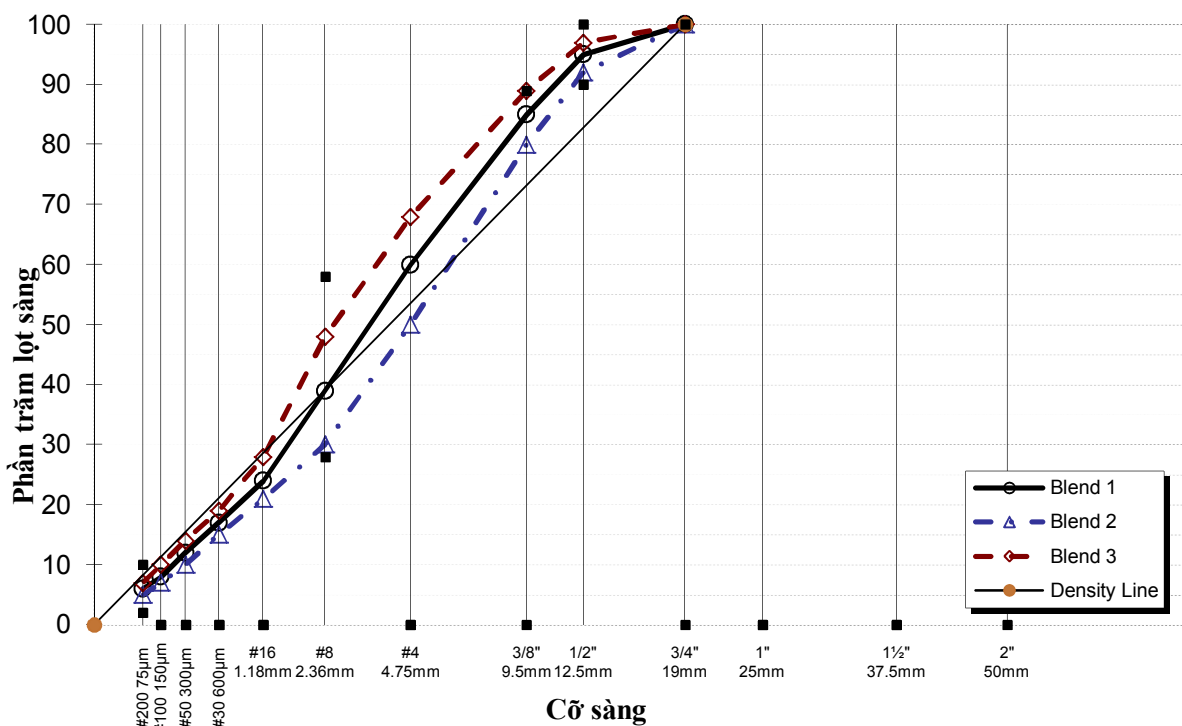
3.3. Thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo đặc tính thể tích để lựa chọn cấp phối thô - mịn

Cấp phối hỗn hợp BTN12,5 và BTN19 được thiết kế với 03 loại cấp phối có mức độ thô-mịn khác nhau nằm giới hạn quy định của TCVN 12818:2019 [10], (Chi tiết xem Bảng 3-7 và Hình 3-3, Hình 3-4):

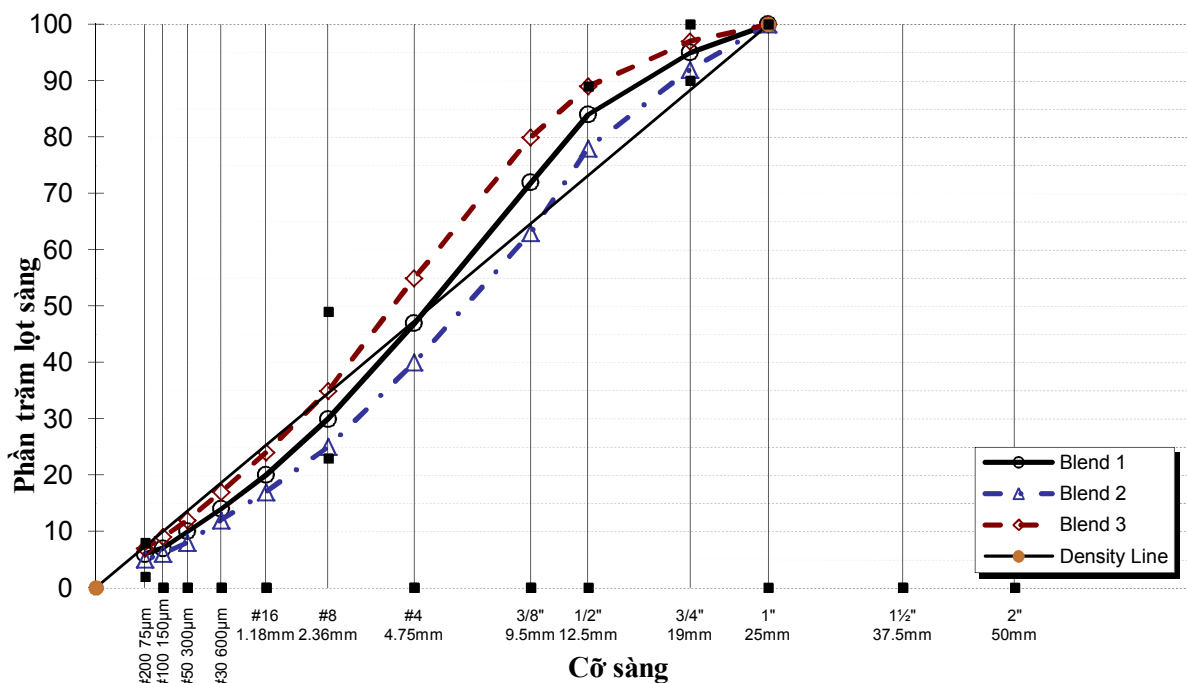
- Cấp phối vừa: lượng lọt sàng qua cỡ sàng không chế (cỡ sàng 2,36mm với BTN12,5 và cỡ sàng 4,75mm với BTN19) bằng với lượng lọt sàng không chế quy định.
- Cấp phối thô: lượng lọt sàng qua cỡ sàng không chế (cỡ sàng 2,36mm với BTN12,5 và cỡ sàng 4,75mm với BTN19) nhỏ hơn lượng lọt sàng không chế quy định.
- Cấp phối mịn: lượng lọt sàng qua cỡ sàng không chế (cỡ sàng 2,36mm với BTN12,5 và cỡ sàng 4,75mm với BTN19) lớn hơn lượng lọt sàng không chế quy định.

Bảng 3-7. Thành phần hạt của cấp phối thí nghiệm

Cỡ sàng (mm)	Phần trăm lọt sàng BTN12,5 (%)					Phần trăm lọt sàng BTN19 (%)						
	Cấp phối vừa (1)	Cấp phối thô (2)	Cấp phối mịn (3)	Giới hạn		Không chế	Cấp phối vừa (1)	Cấp phối thô (2)	Cấp phối mịn (3)	Giới hạn		Không chế
25,0							100	100	100	100	100	
19,0	100	100	100	100	100		95	92	97	90	100	
12,5	95	92	97	90	100		84	78	89		90	
9,5	85	80	89		90		72	63	80			
4,75	60	50	68				47	40	55			47
2,36	39	30	48	28	58	39	30	25	35	23	49	
1,18	24	21	28				20	17	24			
0,6	17	15	19				14	12	17			
0,3	12	10	14				10	8	12			
0,15	8	7	10				7	6	9			
0,075	6	5	7	2	10		6	5	7	2	8	



Hình 3-3. Thành phần hạt của 03 cấp phối thí nghiệm BTN12,5



Hình 3-4. Thành phần hạt của 03 cấp phối thí nghiệm BTN19

Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa đường PG64-22 với lưu lượng xe thiết kế là (0,3 – 3) triệu ESALs được đưa ra tại Bảng 3-8.

Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa đường PG64-16 với lưu lượng xe thiết kế là (0,3 – 3) triệu ESALs được đưa ra tại Bảng 3-9.

Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa đường PG82-22 với lưu lượng xe thiết kế >30 triệu ESALs được đưa ra tại Bảng 3-10.

Bảng 3-8. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN sử dụng nhựa PG64-22

TT	Tên chỉ tiêu	BTN12,5- nhựa PG64-22 (cấp phối vừa)		BTN19- nhựa PG64-22 (cấp phối vừa)		YCKT
		Đá vôi	Đá bazan	Đá vôi	Đá bazan	
1	Hàm lượng nhựa, %	5,10	5,10	4,90	4,90	
2	Độ rỗng dư Va, %	4,00	4,05	3,98	3,95	4
3	Độ rỗng cốt liệu, VMA, %	15,05	14,59	15,1	14,65	≥14
4	Độ rỗng lấp đầy nhựa, VFA, %	73,45	72,22	73,9	73,15	65-75
5	Tỷ số D/B	1,08	1,15	1,07	1,13	0,8-1,6
6	Tỷ số TSR	0,90	0,88	0,90	0,88	>0,8

Bảng 3-9. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN sử dụng nhựa PG64-16

TT	Tên chỉ tiêu	BTN12,5- nhựa PG64-16 (cấp phối vừa)		BTN19- nhựa PG64-16 (cấp phối vừa)		YCKT
		Đá vôi	Đá bazan	Đá vôi	Đá bazan	
1	Hàm lượng nhựa, %	5,10	5,10	4,90	4,90	
2	Độ rỗng dư Va, %	4,03	3,97	4,00	4,10	4
3	Độ rỗng cốt liệu, VMA, %	15,05	14,48	14,25	14,06	≥14
4	Độ rỗng lấp đầy nhựa, VFA, %	73,20	72,57	71,90	70,86	65-75
5	Tỷ số D/B	1,08	1,15	1,17	1,22	0,8-1,6
6	Tỷ số TSR	0,92	0,89	0,92	0,91	>0,8

Bảng 3-10. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN sử dụng nhựa PG82-22

TT	Tên chỉ tiêu	BTN12,5- nhựa PG82-22 (cấp phối thô)		BTN19- nhựa PG82-22 (cấp phối thô)		YCKT
		Đá vôi	Đá bazan	Đá vôi	Đá bazan	
1	Hàm lượng nhựa, %	5,10	5,15	4,90	4,90	
2	Độ rỗng dư Va, %	3,99	4,05	4,04	4,05	4
3	Độ rỗng cốt liệu, VMA, %	14,86	14,25	14,21	14,05	≥14
4	Độ rỗng lấp đầy nhựa, VFA, %	73,18	71,18	71,58	71,14	65-75
5	Tỷ số D/B	1,10	1,19	1,18	1,22	0,8-1,6
6	Tỷ số TSR	0,96	0,97	0,93	0,94	>0,8

Thông qua kết quả thí nghiệm trong phòng với hỗn hợp BTN12,5 và BTN19 được thiết kế với 03 loại cấp phối có mức độ thô-mịn khác nhau nằm giới hạn quy định của TCVN 12818:2019, nhận thấy: với mức lưu lượng xe thiết kế nhẹ (0,3 – 3) triệu ESALs thì chỉ cần sử dụng cấp phối vừa là đáp ứng yêu cầu, còn với mức lưu lượng xe thiết kế nặng >30 triệu ESALs thì nên sử dụng cấp phối thô.

3.4. Thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt mỏi và chống LVBX của bê tông nhựa Superpave

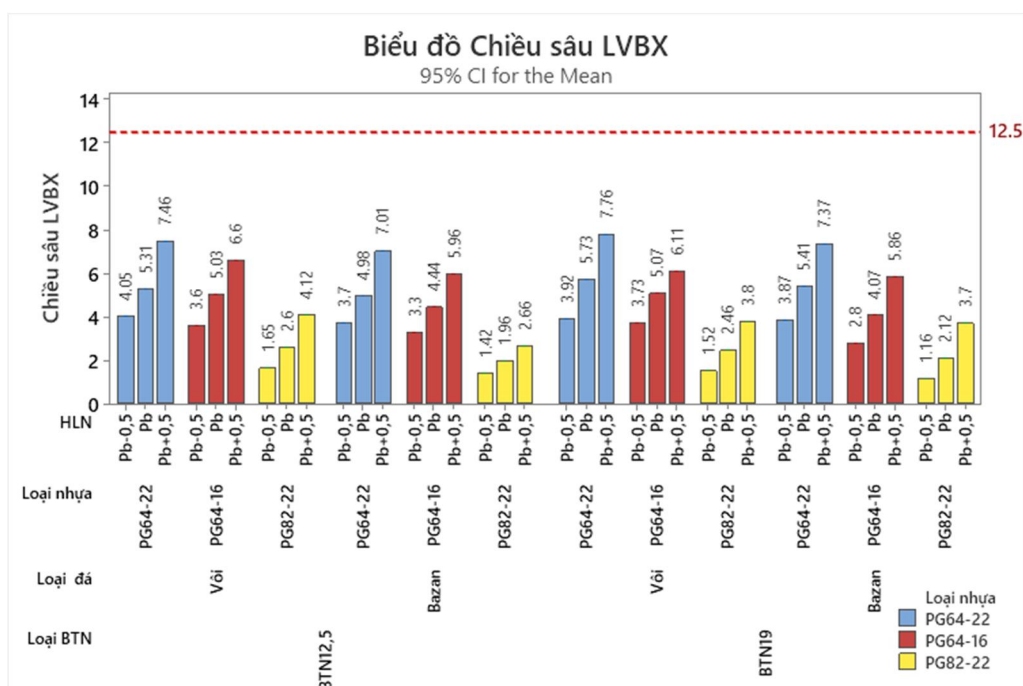
Do thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave phù hợp với điều kiện Việt Nam cần tuân theo nguyên lý cân bằng, nên luận án nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt mỏi có xem xét đồng thời cả khả năng chống LVBX của bê tông nhựa.

3.4.1. Thí nghiệm HWTT đánh giá khả năng chống lún vệt bánh xe

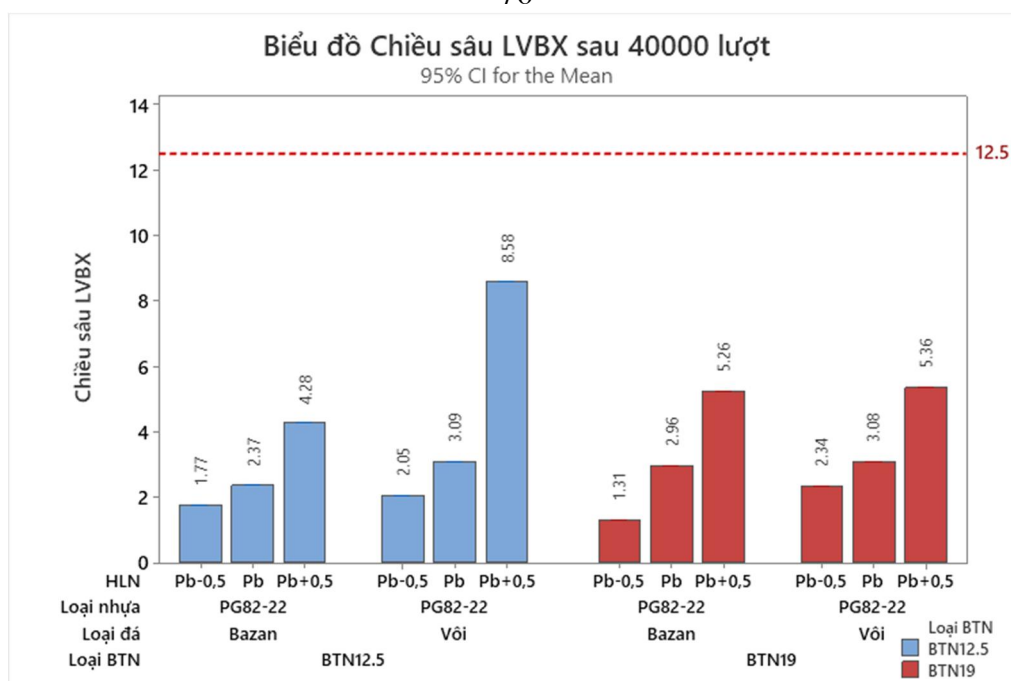
Công tác thí nghiệm LVBX được thực hiện thử nghiệm trong môi trường nước ở nhiệt độ 50°C theo phương pháp A của Quyết định 1617/QĐ-BGTVT [3].

Các mẫu thí nghiệm LVBX được đúc trên thiết bị đầm lặn với độ rỗng dư (7±2)%, Các mẫu BTN được bảo dưỡng sau khi đúc 02 ngày mới tiến hành thí nghiệm LVBX.

Kết quả thí nghiệm LVBX sau 15000 lượt tác dụng tải của BTN12,5 và BTN19 được đưa ra tại Hình 3-5. Kết quả thí nghiệm LVBX sau 40000 lượt tác dụng tải của BTN12,5 và BTN19 (sử dụng nhựa đường PG82-22) được đưa ra tại Hình 3-6.



Hình 3-5. Biểu đồ chiều sâu LVBX sau 15000 lượt của BTN12,5 và BTN19



Hình 3-6. Biểu đồ chiều sâu LVBX sau 40000 lượt của BTN12,5 và BTN19
 Thông qua kết quả thí nghiệm được đưa ra tại Hình 3-5 và Hình 3-6 nhận thấy:

- Giá trị chiều sâu LVBX sau 15000 lượt tác dụng tải và 40000 lượt tác dụng tải của các mẫu thí nghiệm BTN12,5 và BTN19 đều đạt yêu cầu ($\leq 12,5\text{mm}$).
- Giá trị chiều sâu LVBX sau 15000 lượt tác dụng tải của các mẫu thí nghiệm BTN12,5 nằm trong khoảng từ 1,42mm đến 7,46mm và BTN19 nằm trong khoảng từ 1,16mm đến 7,76mm.
- Giá trị chiều sâu LVBX sau 40000 lượt tác dụng tải của các mẫu thí nghiệm BTN12,5 sử dụng nhựa đường PG82-22 nằm trong khoảng từ 1,77mm đến 8,58mm và BTN19 sử dụng nhựa đường PG82-22 nằm trong khoảng từ 1,31mm đến 5,36mm.

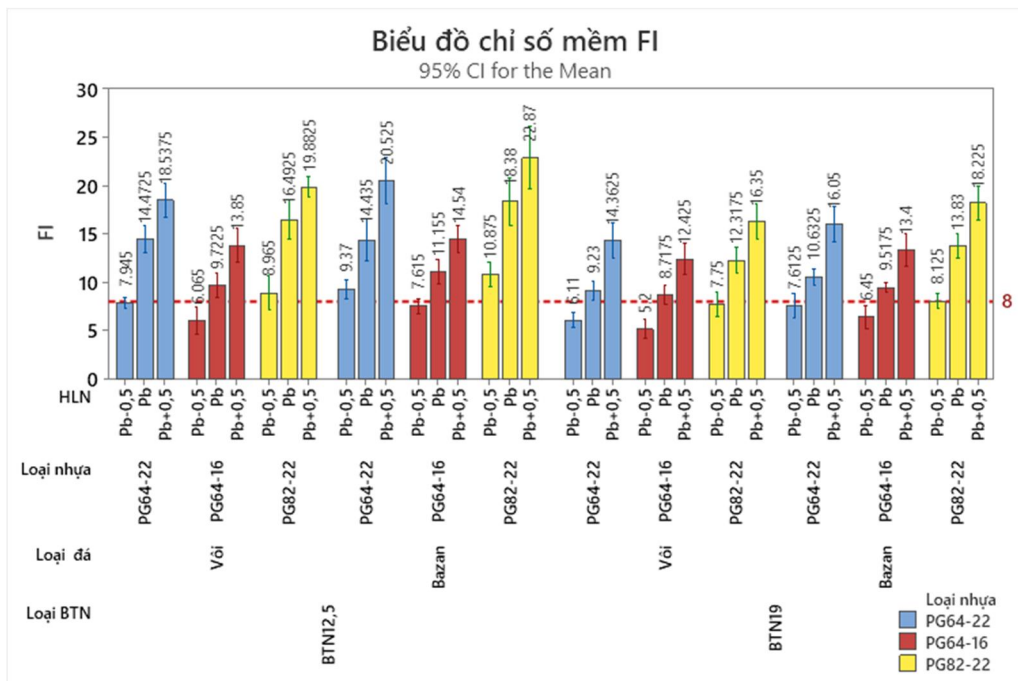
3.4.2. Thí nghiệm SCB đánh giá khả năng chống nứt

Trộn mẫu, ủ hỗn hợp theo AASHTO R30 [33], đầm mẫu bằng đầm xoay theo AASHTO T312 với đường kính (150 ± 1) mm, chiều cao 160mm, độ rỗng dư (7 ± 1)%.

Từ giữa mẫu SGC cắt 2 mẫu dày (50 ± 1) mm. Tiếp tục cắt mỗi mẫu tròn thành 2 mẫu bán nguyệt SCB. Kết quả được 4 mẫu SCB. Xẻ rãnh theo trục đối xứng của mỗi mẫu SCB với chiều cao (15 ± 1) mm và chiều rộng $\leq 2,25\text{mm}$.

Tiến hành thí nghiệm theo trình tự quy định tại TCVN 13347:2021 [14]: Tải trọng tác dụng trên đỉnh cong của mẫu dọc theo bán kính của mẫu thử với tốc độ gia tải không đổi bằng 50 mm/ phút được khống chế trong suốt thời gian thử nghiệm ở nhiệt độ ($25 \pm 0,5$)°C.

Kết quả thí nghiệm Chỉ số mềm FI của BTN12,5 và BTN19 được đưa ra tại Hình 3-7.



Hình 3-7. Biểu đồ Chỉ số mềm FI của BTN12,5 và BTN19



Hình 3-8. Một số hình ảnh thí nghiệm SCB

Thông qua kết quả thí nghiệm được đưa ra tại Hình 3-7 nhận thấy:

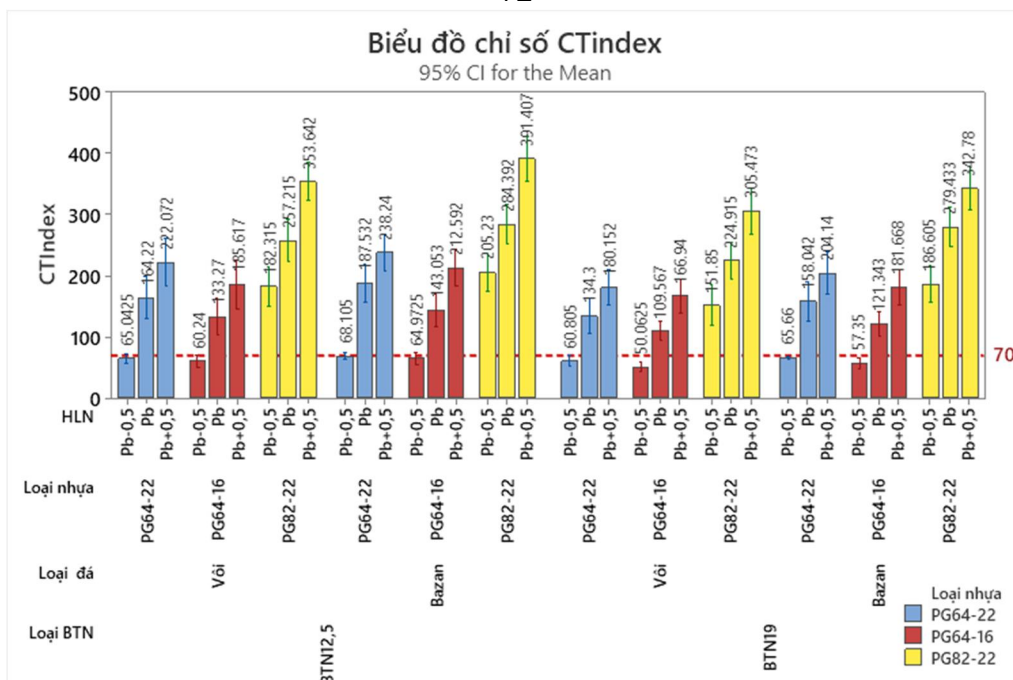
- Chỉ số mềm FI của các mẫu BTN12,5 nằm trong khoảng từ 6,07 đến 22,87 và của các mẫu BTN19 nằm trong khoảng từ 5,20 đến 18,23.
- Có 03/18 tổ mẫu BTN12,5 (chiếm 16,67%) và 05/18 tổ mẫu BTN19 (chiếm 27,78%) có chỉ số mềm FI nhỏ hơn giá trị tối thiểu theo quy định ($FI \geq 8$).

3.4.3. Thí nghiệm IDEAL CT_{INDEX} đánh giá khả năng chống nứt

Trộn mẫu, ủ hỗn hợp theo AASHTO R30 [33], đầm mẫu bằng đầm xoay theo AASHTO T312 với đường kính (150±2) mm, chiều cao (62±1) mm, độ rỗng dư (7±0,5)%.

Tiến hành thí nghiệm CT_{index} theo trình tự quy định tại ASTM D8225 [45]: Tải trọng tác dụng trên đỉnh cong của mẫu dọc theo bán kính của mẫu thử với tốc độ gia tải không đổi 50 mm/phút ở nhiệt độ 25°C.

Kết quả thí nghiệm chỉ số CT_{index} của BTN12,5 và BTN19 được đưa ra tại Hình 3-9.



Hình 3-9. Biểu đồ Chỉ số CTindex của BTN12,5 và BTN19



Hình 3-10. Một số hình ảnh thí nghiệm CTindex

Thông qua kết quả thí nghiệm được đưa ra tại Hình 3-8 nhận thấy:

- Chỉ số CTindex của các mẫu BTN12,5 nằm trong khoảng từ 53,98 đến 412,58 và của các mẫu BTN19 nằm trong khoảng từ 43,08 đến 371,11.
- Có 04/18 tổ mẫu BTN12,5 (chiếm 22,22%) và 04/18 tổ mẫu BTN19 (chiếm 22,22%) có chỉ số CTindex nhỏ hơn so với giá trị tối thiểu theo quy định ($CTindex \geq 70$).

3.5. Phân tích thống kê, đánh giá kết quả thí nghiệm

Sau khi có các kết quả thí nghiệm, tiến hành phân tích thống kê để đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt mỏi và chống LVBX của BTN. Trình tự phân tích thống kê theo các bước sau:

- Phân tích độ chụm của các kết quả thí nghiệm.
- Phân tích thống kê đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX.

- Mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX.

3.5.1. Phân tích độ chụm của các kết quả thí nghiệm

Độ chụm được đánh giá theo tiêu chuẩn ASTM C670 và TCVN6910-6.

Bảng 3-11 đưa ra ví dụ đánh giá độ chụm chỉ số mềm FI. Bảng 3-12 đưa ra ví dụ đánh giá độ chụm chỉ số CTindex. Kết quả đều đạt độ chụm. Các kết quả thí nghiệm khác cũng đều đạt độ chụm.

Bảng 3-11. Đánh giá độ chụm chỉ số mềm FI

Loại BTN	Mẫu	Chỉ số mềm FI	Chỉ số mềm FI trung bình	COV (%)	Khoảng chênh lệch R: max-min (6)	Khoảng chấp nhận cho phép so với giá trị trung bình	Giá trị độ lệch cho phép (8)	Đánh giá: So sánh (6) và (8)
BTN12,5- đá vôi, nhựa PG64-22, Hàm lượng nhựa Pb	1	14,14	14,47	6,26	2,12	75,9	10,98	Đạt
	2	13,50						
	3	14,63						
	4	15,62						

Bảng 3-12. Đánh giá độ chụm chỉ số CTindex

Loại BTN	Mẫu	Chỉ số CTindex	Chỉ số CT _{index} trung bình	COV (%)	Khoảng chênh lệch R: max-min (6)	Độ lệch chuẩn cho phép, 1s	Giá trị độ lệch cho phép: 3,6x1s (8)	Đánh giá: So sánh (6) và (8)
BTN12,5- đá bazan, nhựa PG64-22, Hàm lượng nhựa Pb-0,5	1	67,54	68,01	5,38	8,85	13,5	48,6	Đạt
	2	64,20						
	3	67,63						
	4	73,05						

3.5.2. Phân tích, đánh giá kết quả thí nghiệm chỉ số mềm FI

Sử dụng phần mềm MINITAB thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design) và phân tích kết quả thí nghiệm. Kết quả phân tích mô hình phương sai-hồi quy tập mẫu chỉ số mềm FI sau khi đã loại các biến không có ý nghĩa thống kê được đưa ra tại Bảng 3-13.

Bảng 3-13. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu Chỉ số mềm FI

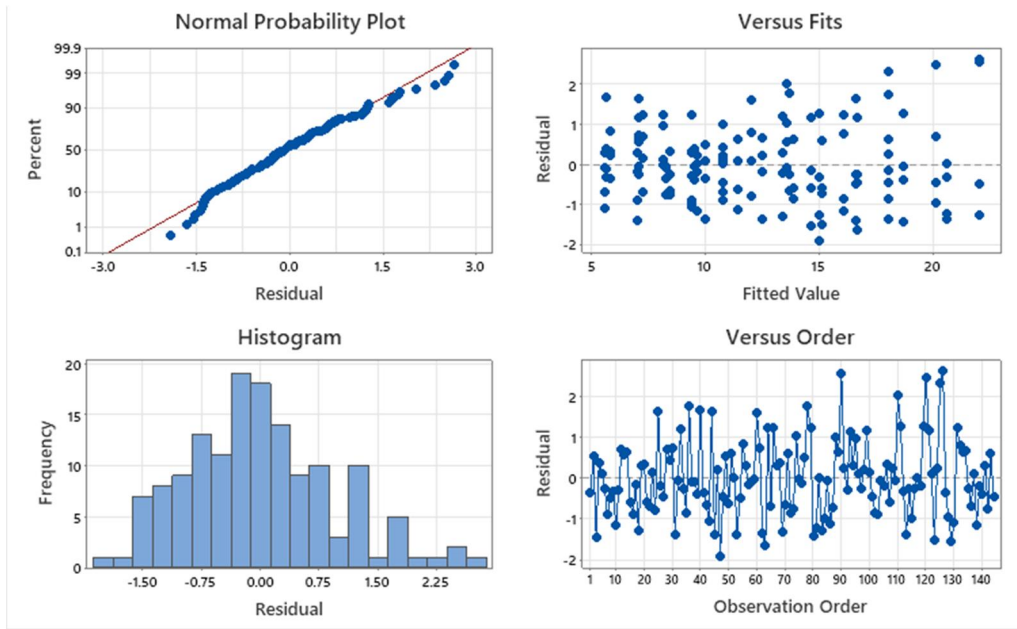
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	14	2958.58	211.327	215.41	0.000
Bậc nhất	6	2834.25	472.375	481.51	0.000
Loại BTN	1	271.07	271.069	276.31	0.000
Loại đá	1	70.63	70.630	72.00	0.000
Loại nhựa	2	513.52	256.759	261.72	0.000
HLN	2	1979.04	989.518	1008.65	0.000
Tương tác 2 chiều	8	124.33	15.541	15.84	0.000
Loại BTN*Loại nhựa	2	42.60	21.298	21.71	0.000
Loại BTN*HLN	2	23.82	11.909	12.14	0.000
Loại nhựa*HLN	4	57.91	14.478	14.76	0.000
Sai số	129	126.55	0.981		
Lack-of-Fit	21	24.27	1.156	1.22	0.250
Sai số	108	102.29	0.947		
Tổng	143	3085.13			

Tổng hợp mô hình

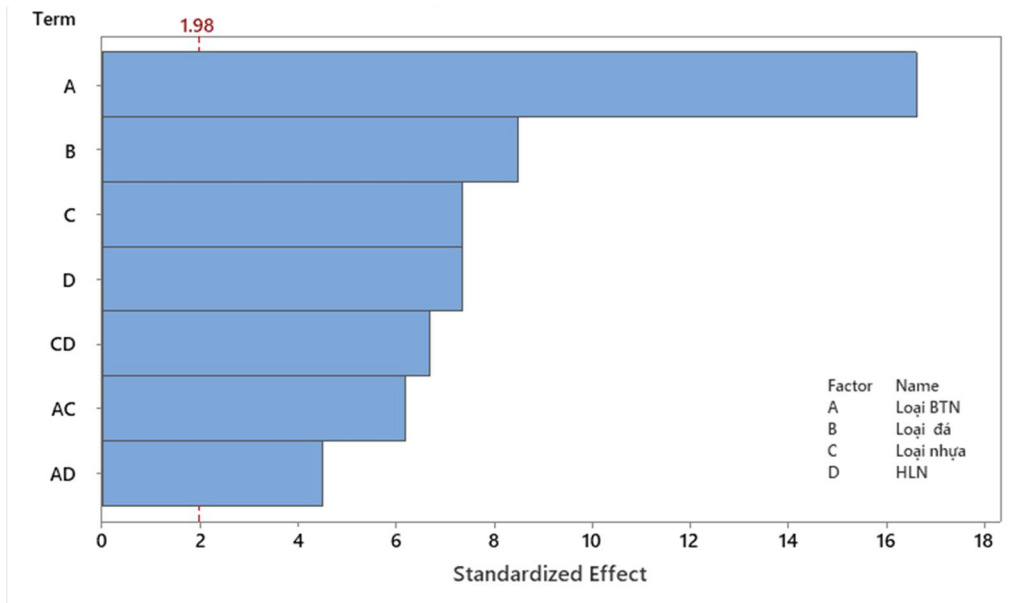
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.990468	95.90%	95.45%	94.89%

Phân tích hậu định Tukey:

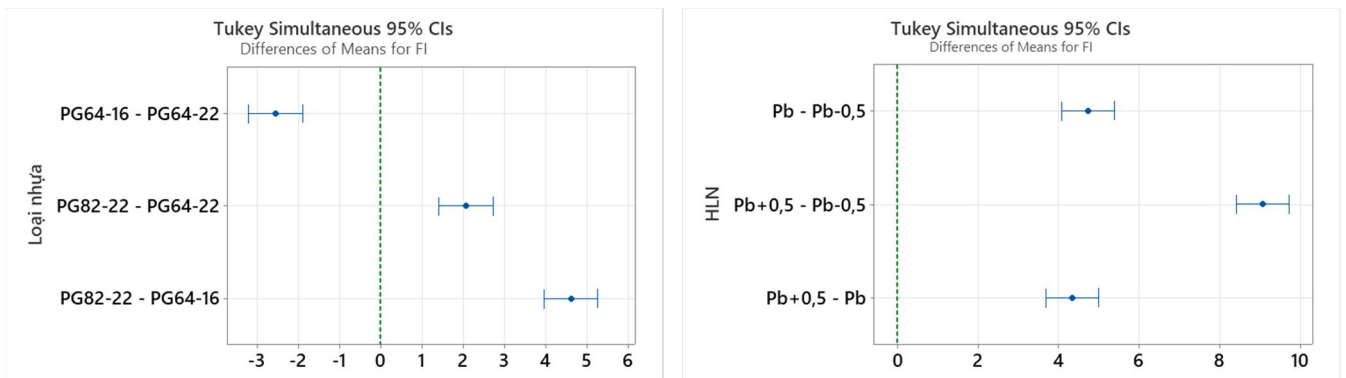
Loại BTN	N	Mean	Nhóm	Loại đá	N	Mean	Nhóm
BTN12,5	72	13.6499	A	Bazan	72	12.9782	A
BTN19	72	10.9058	B	Vôi	72	11.5775	B
Loại nhựa	N	Mean	Nhóm	HLN	N	Mean	Nhóm
PG82-22	48	14.5052	A	Pb+0,5	48	16.7515	A
PG64-22	48	12.4402	B	Pb	48	12.4085	B
PG64-16	48	9.8881	C	Pb-0,5	48	7.6735	C



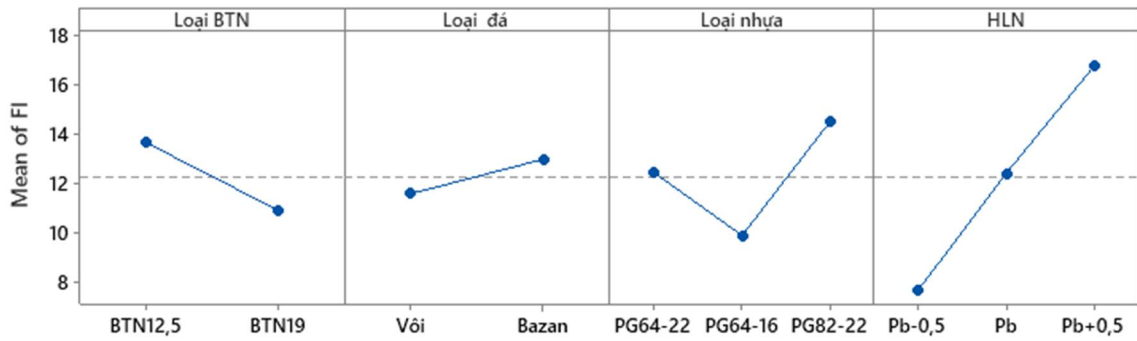
Hình 3-11. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chỉ số mềm FI



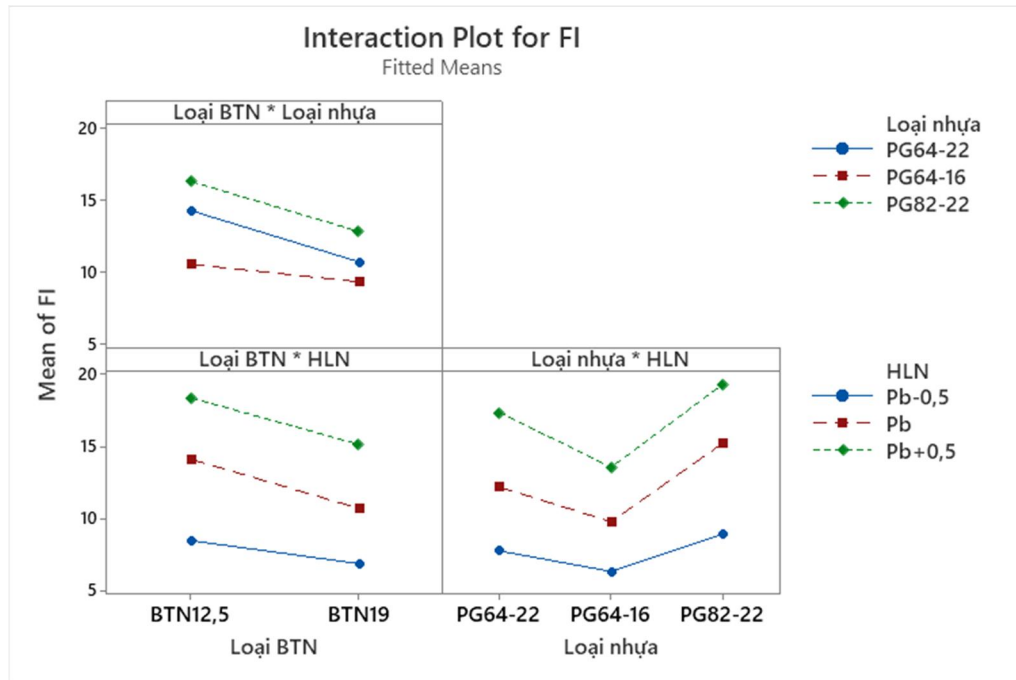
Hình 3-12. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ số mềm FI



Hình 3-13. Phân tích hậu định Turkey ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ số mềm FI



Hình 3-14. Các biến ảnh hưởng chính tới chỉ số mềm FI



Hình 3-15. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chỉ số mềm FI

Nhận xét:

- Hình 3-11 biểu đồ phân dư của chỉ số mềm FI tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các điểm phân bố ngẫu nhiên, thỏa mãn các điều kiện của phân tích thống kê.
- Kết quả phân tích phương sai hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 95,45\%$, Lack-of-Fit $= 0,250 > 0,05$, các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$ đảm bảo mức ý nghĩa 95%.
- Kết quả biểu đồ Pareto ở Hình 3-12 và phân tích hậu định Tukey ở Hình 3-13 cho thấy tất cả các yếu tố đều ảnh hưởng đến chỉ số mềm FI có ý nghĩa thống kê. Do vậy có thể kết luận rằng: Có sự ảnh hưởng của loại BTN; nguồn gốc đá; loại nhựa và HLN đến chỉ số mềm FI (khả năng chống nứt mỏi) của BTN12,5 và BTN19.
- Hình 3-14 và Hình 3-15 là biểu đồ các biến ảnh hưởng chính tới chỉ số mềm FI. Ảnh hưởng lớn nhất đến chỉ số mềm FI là HLN. Tiếp đến là loại nhựa, loại BTN và loại đá. Ảnh hưởng tương tác của các yếu tố cơ bản là như nhau.
- Chỉ số mềm FI của BTN12,5 cao hơn so với BTN19 khoảng 25%.
- Chỉ số mềm FI của BTN12,5 và BTN19 sử dụng đá dăm gốc bazan cao hơn so với BTN sử dụng đá dăm gốc đá vôi khoảng 12%.

- Chỉ số mềm FI của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 (nhựa 60/70) cao hơn so với BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 (nhựa 40/50) khoảng 26%.
- Chỉ số mềm FI của BTN sử dụng nhựa đường PG82-22 (polime PMB.III) cao hơn nhiều so với BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 (nhựa 60/70) và nhựa đường PG64-16 (nhựa 40/50).
- Chỉ số mềm FI của BTN12,5 và BTN19 tăng lên khi tăng hàm lượng nhựa thiết kế trong hỗn hợp BTN.

3.5.3. Phân tích, đánh giá kết quả thí nghiệm chỉ số CTindex

Sử dụng phần mềm MINITAB thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design) và phân tích kết quả thí nghiệm. Kết quả phân tích mô hình phương sai-hồi quy tập mẫu chỉ số CTindex sau khi đã loại các biến không có ý nghĩa thống kê được đưa ra tại Bảng 3-14.

Bảng 3-14. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu chỉ số CTindex

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	14	1120937	80067	265.68	0.000
Bậc nhất	6	1103657	183943	610.35	0.000
Loại BTN	1	21323	21323	70.75	0.000
Loại đá	1	16456	16456	54.60	0.000
Loại nhựa	2	543759	271879	902.14	0.000
HLN	2	522119	261060	866.24	0.000
Tương tác 2 chiều	8	17280	2160	7.17	0.000
Loại BTN*HLN	2	3700	1850	6.14	0.003
Loại đá*Loại nhựa	2	3777	1889	6.27	0.003
Loại nhựa*HLN	4	9803	2451	8.13	0.000
Sai số	129	38877	301		
Lack-of-Fit	21	5090	242	0.77	0.744
Sai số	108	33787	313		
Tổng	143	1159814			

Tổng hợp mô hình

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
17.3600	96.65%	96.28%	95.82%

Phân tích hậu định Tukey:

Loại BTN	N	Mean	Grouping
----------	---	------	----------

BTN12,5	72	189.995	A
BTN19	72	165.615	B

Loại nhựa	N	Mean	Grouping
-----------	---	------	----------

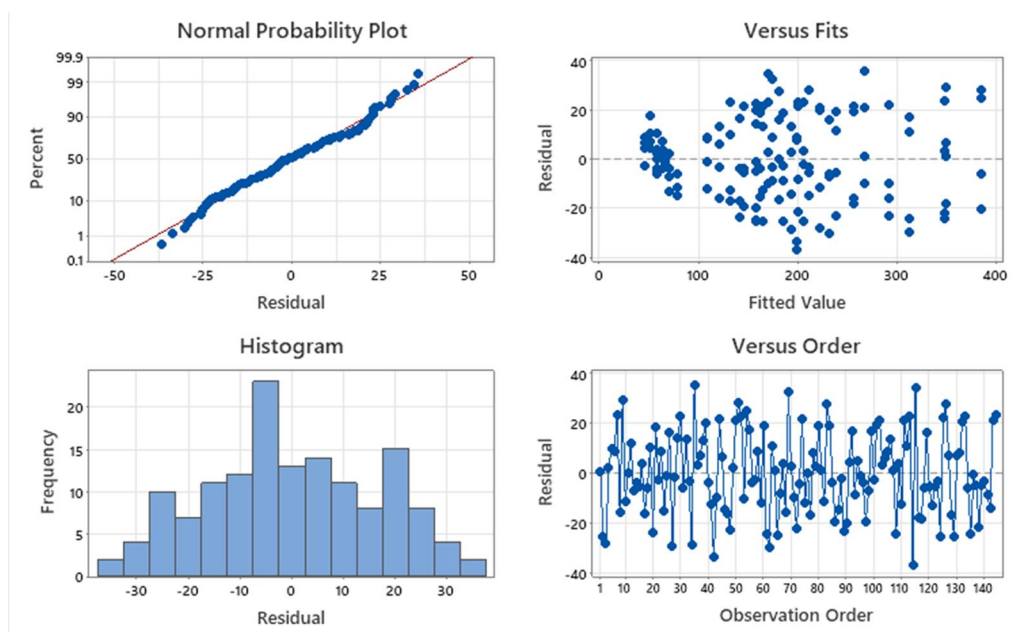
PG82-22	48	263.771	A
PG64-22	48	145.755	B
PG64-16	48	123.889	C

Loại đá	N	Mean	Grouping
---------	---	------	----------

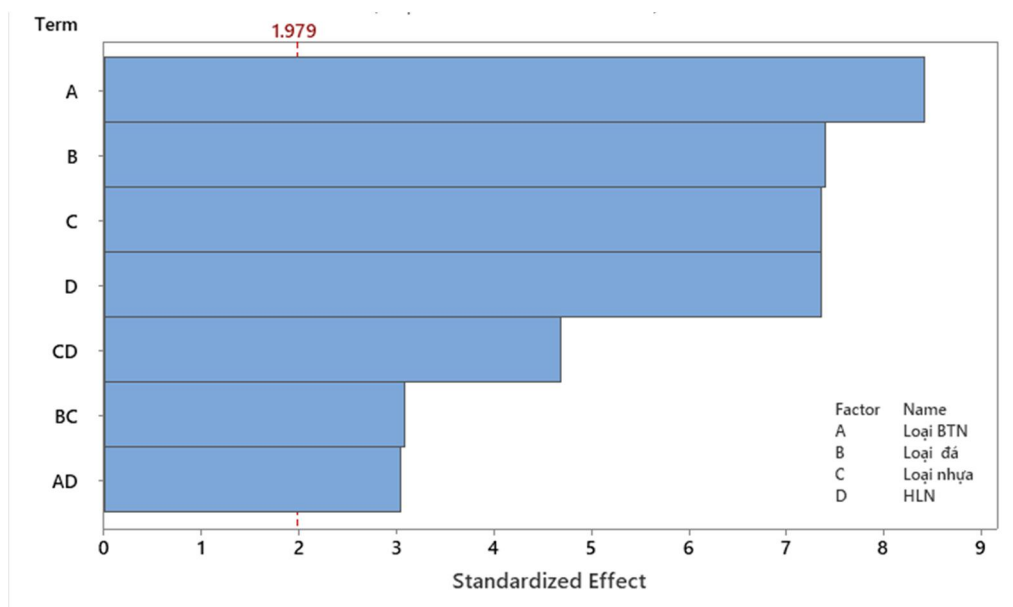
Bazan	72	188.475	A
Vôi	72	167.135	B

HLN	N	Mean	Grouping
-----	---	------	----------

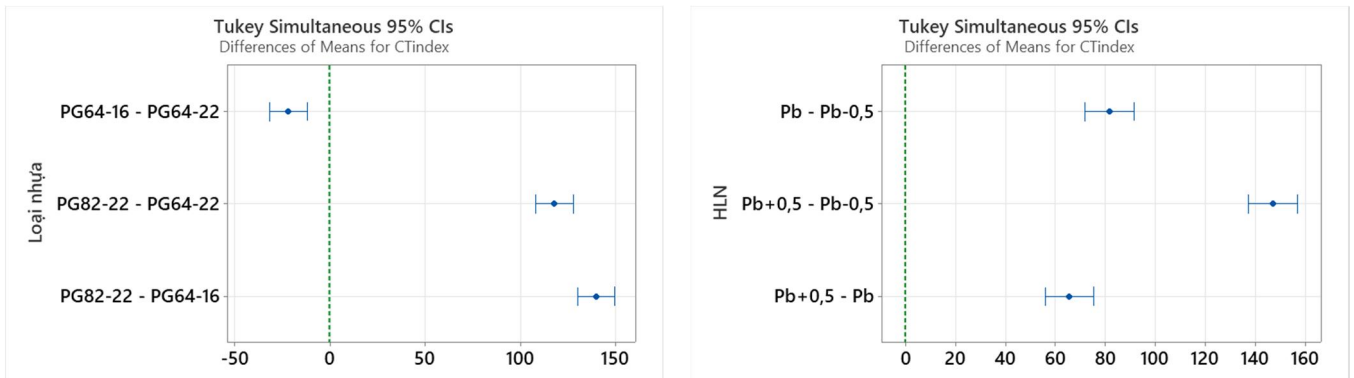
Pb+0,5	48	248.789	A
Pb	48	183.106	B
Pb-0,5	48	101.520	C



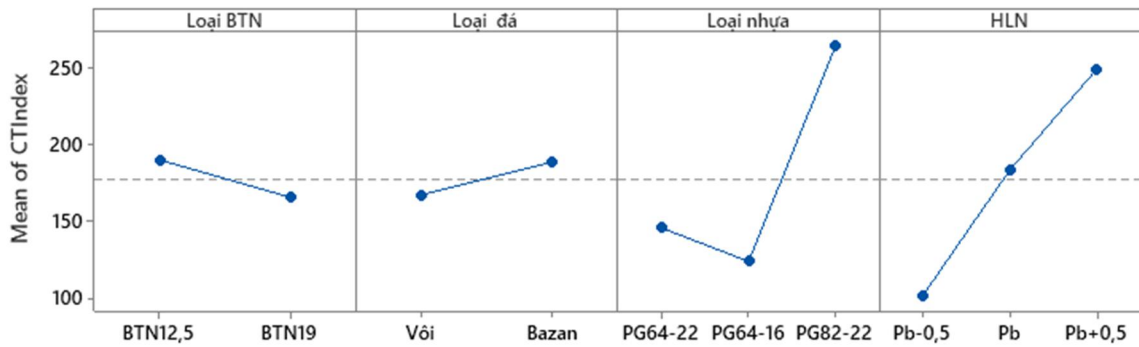
Hình 3-16. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chỉ số CTindex



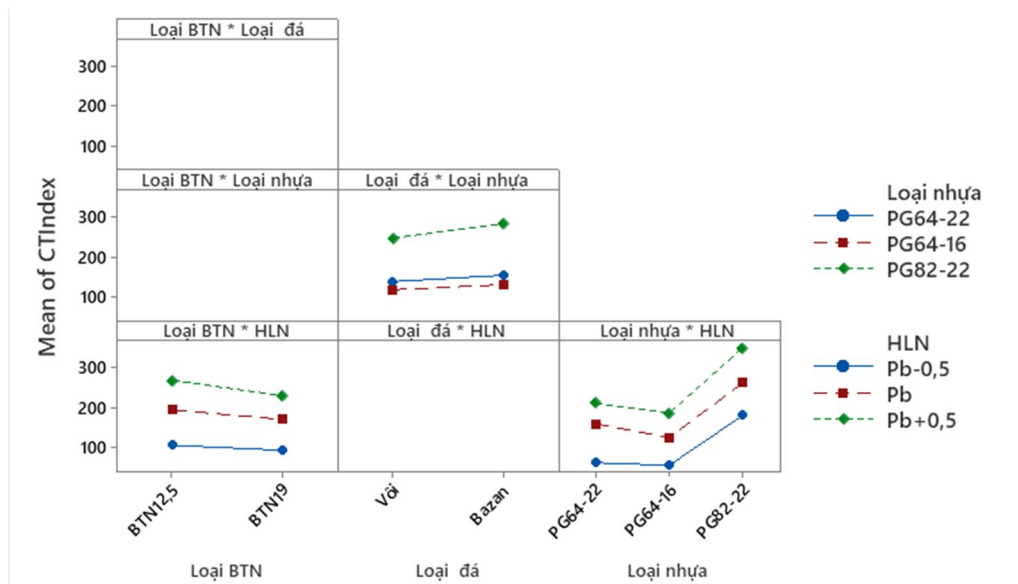
Hình 3-17. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ số CTindex



Hình 3-18. Phân tích hậu định Turkey ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ số CTIndex



Hình 3-19. Các biến ảnh hưởng chính tới chỉ số CTIndex



Hình 3-20. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chỉ số CTIndex

Nhận xét:

- Hình 3-16 biểu đồ phần dư của chỉ số CTIndex tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các điểm phân bố ngẫu nhiên, thỏa mãn các điều kiện của phân tích thống kê.
- Kết quả phân tích phương sai hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 96,28\%$, Lack-of-Fit $= 0,744 > 0,05$, các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$ đảm bảo mức ý nghĩa 95%.
- Kết quả biểu đồ Pareto ở Hình 3-17 và phân tích hậu định Tukey ở Hình 3-18 cho thấy tất cả các yếu tố đều ảnh hưởng đến chỉ số CTIndex có ý nghĩa thống kê. Do vậy

có thể kết luận rằng: Có sự ảnh hưởng của loại BTN; nguồn gốc đá; loại nhựa và HLN đến chỉ số CTindex (khả năng chống nứt mỏi) của BTN12,5 và BTN19.

- Hình 3-19 và Hình 3-20 là biểu đồ các biến ảnh hưởng chính tới chỉ số CTindex. Ảnh hưởng lớn nhất đến chỉ số CTindex là HLN. Tiếp đến là loại nhựa, loại BTN và loại đá. Ảnh hưởng tương tác của các yếu tố cơ bản là như nhau.

- Chỉ số CTindex của BTN12,5 cao hơn so với BTN19 khoảng 15%.

- Chỉ số CTindex của BTN12,5 và BTN19 sử dụng đá dăm gốc bazan cao hơn so BTN sử dụng đá dăm gốc đá vôi khoảng 13%.

- Chỉ số CTindex của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 (nhựa 60/70) cao hơn so với BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 (nhựa 40/50) khoảng 18%.

- Chỉ số CTindex của BTN sử dụng nhựa đường PG82-22 (polime PMB.III) cao hơn nhiều so với BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 (nhựa 60/70) và nhựa đường PG64-16 (nhựa 40/50).

- Chỉ số CTindex của BTN12,5 và BTN19 tăng lên khi tăng hàm lượng nhựa thiết kế trong hỗn hợp BTN.

3.5.4. Phân tích, đánh giá kết quả thí nghiệm chiều sâu LVBX

Kết quả phân tích mô hình phương sai-hồi quy tập mẫu chiều sâu LVBX sau khi đã loại các biến không có ý nghĩa thống kê được đưa ra tại Bảng 3-15.

Bảng 3-15. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu chiều sâu LVBX

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	9	114.178	12.6864	200.30	0.000
Bậc nhất	5	112.212	22.4424	354.34	0.000
Loại đá	1	2.117	2.1170	33.43	0.000
Loại nhựa	2	62.487	31.2433	493.29	0.000
HLN	2	47.608	23.8042	375.84	0.000
Tương tác 2 chiều	4	1.965	0.4914	7.76	0.000
Loại nhựa*HLN	4	1.965	0.4914	7.76	0.000
Sai số	26	1.647	0.0633		
Tổng	35	115.824			

Tổng hợp mô hình

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.251668	98.58%	98.09%	97.27%

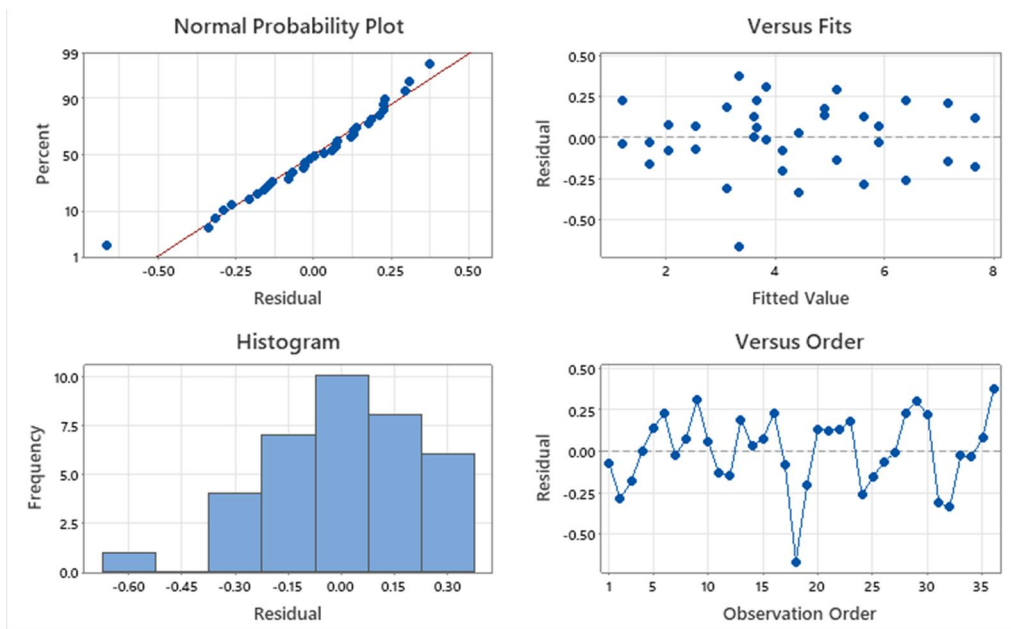
Phân tích hậu định Tukey:

Loại BTN	N	Mean	Grouping
BTN19	18	4.24778	A
BTN12.5	18	4.21389	A

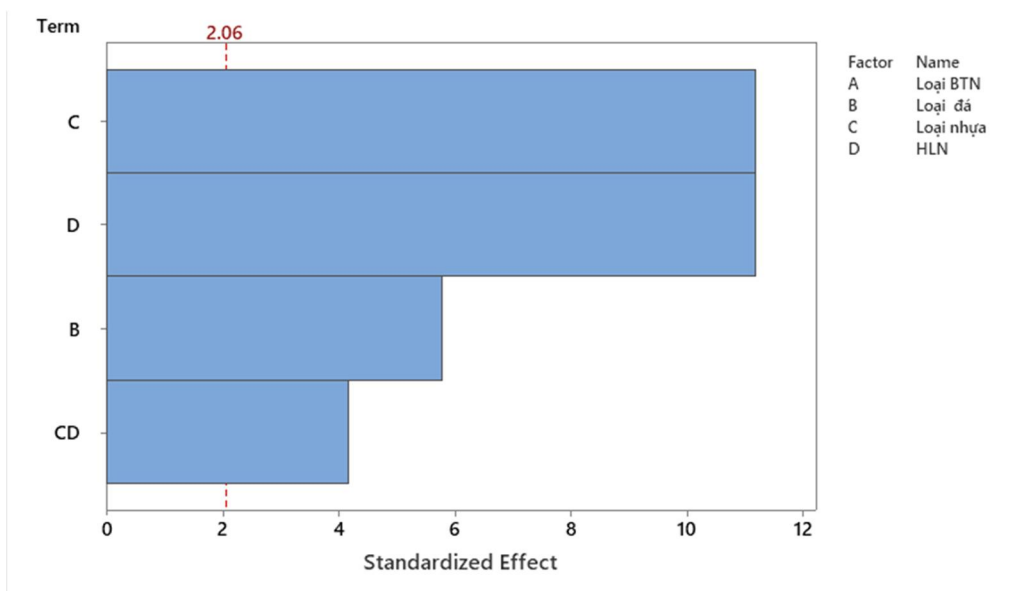
Loại nhựa	N	Mean	Grouping
PG64-22	12	5.54750	A
PG64-16	12	4.71417	B
PG82-22	12	2.43083	C

Loại đá	N	Mean	Grouping
Vôi	18	4.47333	A
Bazan	18	3.98833	B

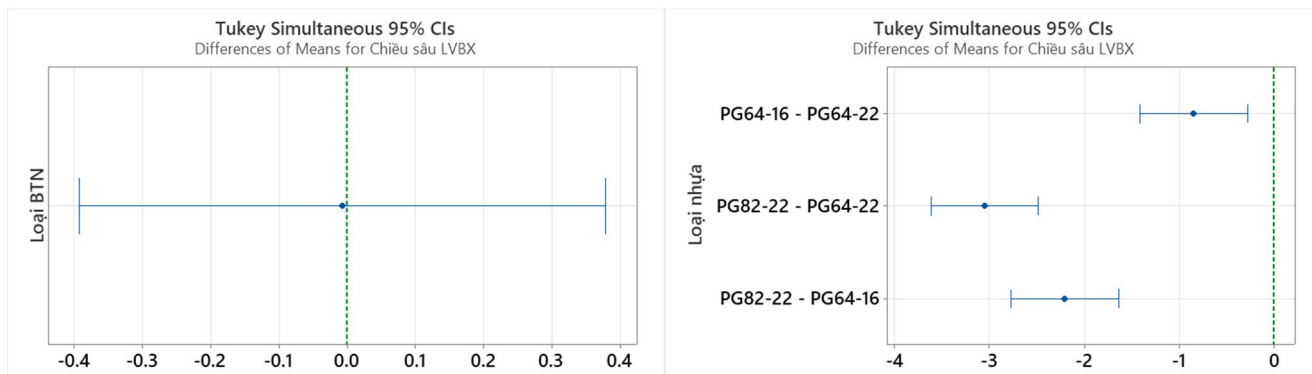
HLN	N	Mean	Grouping
Pb+0,5	12	5.70083	A
Pb	12	4.09833	B
Pb-0,5	12	2.89333	C



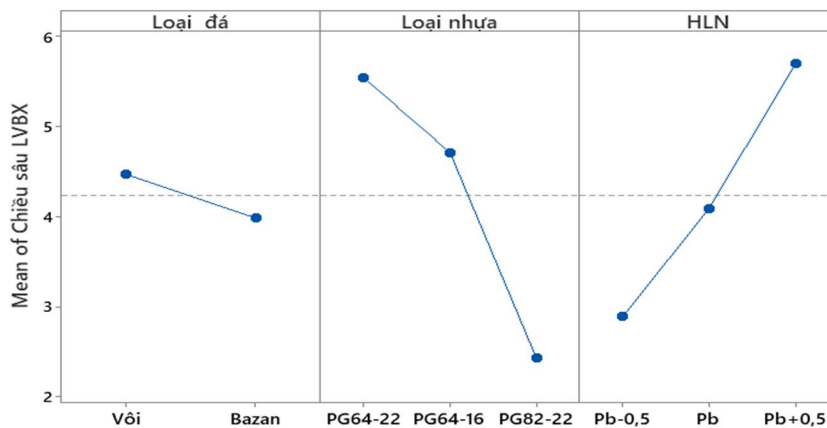
Hình 3-21. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chiều sâu LVBX



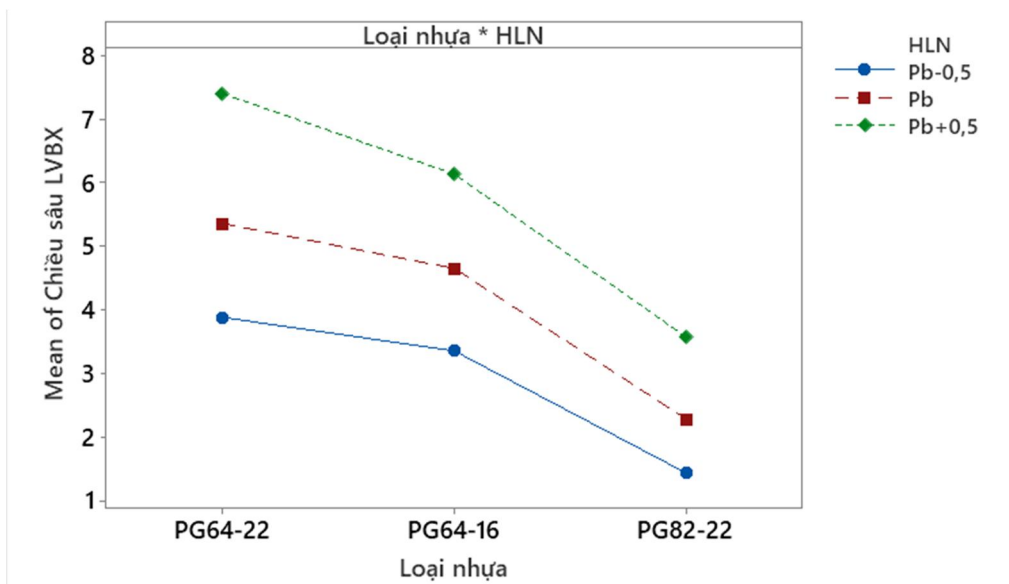
Hình 3-22. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến chiều sâu LVBX



Hình 3-23. Phân tích hậu định Turkey ảnh hưởng của các yếu tố đến chiều sâu LVBX



Hình 3-24. Các biến ảnh hưởng chính tới chiều sâu LVBX



Hình 3-25. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chiều sâu LVBX

Nhận xét:

- Hình 3-21 biểu đồ phân dư của chiều sâu LVBX tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các điểm phân bố ngẫu nhiên, thỏa mãn các điều kiện của phân tích thống kê.
- Kết quả phân tích phương sai hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc} = 98,09\%$, các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$ đảm bảo mức ý nghĩa 95%.

- Kết quả biểu đồ Pareto ở Hình 3-22 và phân tích hậu định Tukey ở Hình 3-23 cho thấy chỉ có loại đá, loại nhựa, HLN và tích loại nhựa * HLN có ảnh hưởng đến chiều sâu LVBX, còn loại BTN và tích các biến còn lại không ảnh hưởng đến chiều sâu LVBX có ý nghĩa thống kê. Do vậy có thể kết luận rằng: Có sự ảnh hưởng của nguồn gốc đá, loại nhựa và HLN đến khả năng chống LVBX của BTN12,5 và BTN19; chưa thể kết luận có ảnh hưởng của loại BTN đến khả năng chống LVBX.

- Hình 3-24 và Hình 3-25 là biểu đồ các biến ảnh hưởng chính tới chiều sâu LVBX. Ảnh hưởng lớn nhất đến chiều sâu LVBX là loại nhựa và HLN. Tiếp đến là loại đá, tích loại nhựa * HLN.

- Khả năng chống LVBX của mẫu BTN12,5 và BTN19 là không khác nhau nhiều.

- Khả năng chống LVBX của BTN12,5 và BTN19 sử dụng đá dăm gốc bazan cao hơn so BTN sử dụng đá dăm gốc đá vôi khoảng 12%.

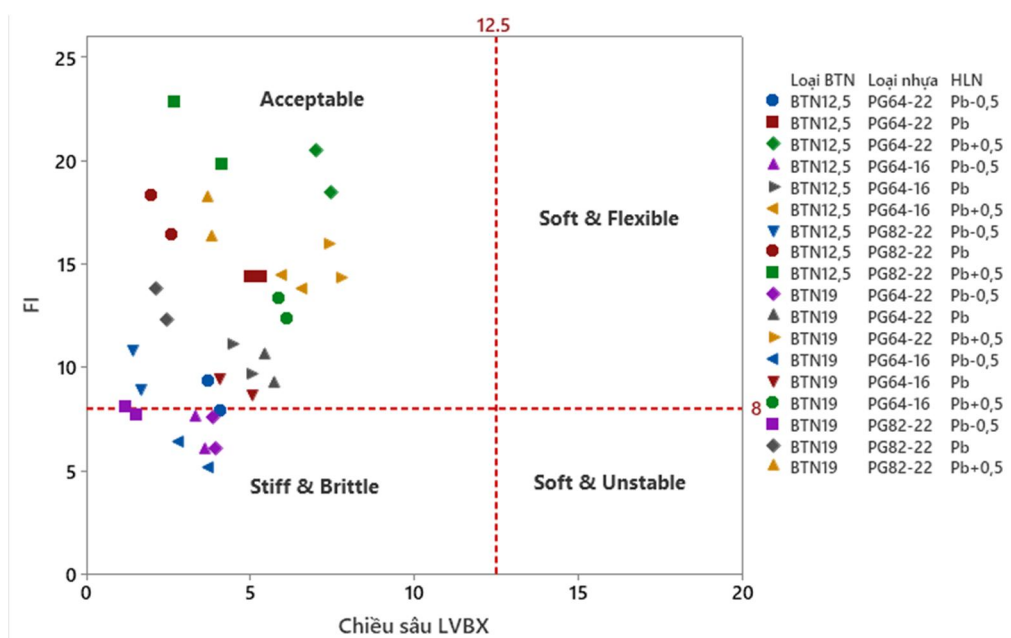
- BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 (nhựa 40/50) có khả năng chống LVBX cao hơn so BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 (nhựa 60/70) khoảng 18%.

- BTN sử dụng nhựa đường PG82-22 (polime PMB.III) có khả năng chống LVBX cao hơn nhiều so với BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 (nhựa 60/70) và nhựa đường PG64-16 (nhựa 40/50).

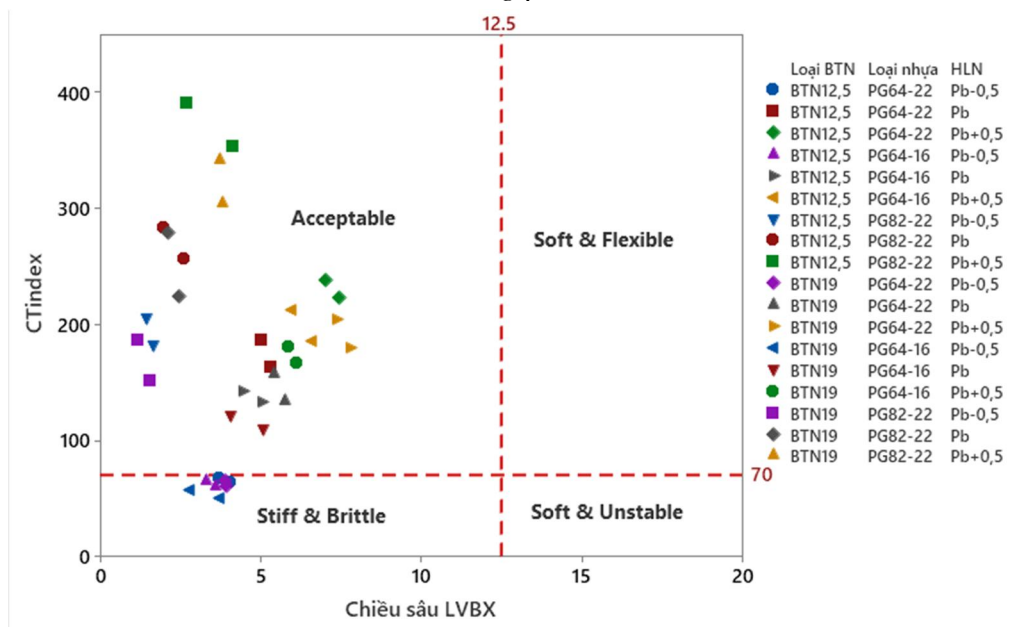
- Khả năng chống LVBX của BTN12,5 và BTN19 giảm đi khi tăng hàm lượng nhựa thiết kế trong hỗn hợp BTN.

3.5.5. Phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đến khả năng chống nứt mỏi và LVBX

Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, tiến hành vẽ các biểu đồ quan hệ giữa chỉ số mềm FI với chiều sâu LVBX và chỉ số CTindex với chiều sâu LVBX, chi tiết được thể hiện ở Hình 3-26 và Hình 3-27.



Hình 3-26. Biểu đồ quan hệ giữa chỉ số mềm FI với chiều sâu LVBX



Hình 3-27. Biểu đồ quan hệ giữa chỉ số CTindex với chiều sâu LVBX

Trên cơ sở kết quả phân tích thống kê tại mục 3.5.2, 3.5.3, 3.5.4 và các Hình 3-26, Hình 3-27, đưa ra một số kết luận như sau:

- Về ảnh hưởng của cỡ hạt lớn nhất danh định: khi tăng cỡ hạt lớn nhất danh định từ 12,5mm lên 19mm thì khả năng chống LVBX của BTN là không khác nhau nhiều, nhưng khả năng chống nứt mỗi lại giảm xuống.

- Về ảnh hưởng của nguồn gốc cốt liệu: Khả năng chống nứt mỗi và chống LVBX của BTN12,5 và BTN19 sử dụng đá dăm gốc bazan tốt hơn gốc đá vôi (khả năng chống nứt mỗi cao hơn từ 12% đến 13% và chống LVBX cao hơn khoảng 12%). Điều này có thể giải thích là do đá bazan có độ nhám bề mặt cao, độ góc cạnh lớn sẽ tạo nên liên kết đá chèn đá tốt, tăng góc nội ma sát φ , giảm khả năng biến dạng dẻo của BTN nên tăng khả năng chống LVBX, đồng thời đá bazan có độ nhám bề mặt cao, độ góc cạnh lớn sẽ tạo nên BTN có cường độ cao, dẫn tới tăng khả năng chống nứt tốt hơn.

- Về ảnh hưởng của loại nhựa:

+ Khả năng chống nứt mỗi và chống LVBX của mẫu BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa PG82-22 (polime PMB.III) là tốt hơn nhiều so với nhựa PG64-22 (nhựa 60/70) và nhựa PG64-16 (nhựa 40/50). Điều này có thể giải thích là do đặc tính lưu biến của nhựa đường: nhựa PG82-22 có tỷ số $G^*/\sin\delta$ (đặc trưng cho khả năng chống LVBX, đánh thông qua thí nghiệm cắt động lưu biến DSR trên mẫu nhựa đường nguyên thủy và nhựa đường sau khi đã được hóa già ngắn hạn) cao hơn rất nhiều so với nhựa PG64-22 và nhựa PG64-16 nên khả năng chống LVBX là tốt hơn nhiều; Mặt khác nhựa PG82-22 cũng có tỷ số $G^*.\sin\delta$ (đặc trưng cho khả năng chống mỗi, đánh thông qua thí nghiệm cắt động lưu biến DSR trên mẫu nhựa đường sau khi đã được hóa già dài hạn) thấp hơn rất nhiều so với nhựa PG64-22 và nhựa PG64-16 nên khả năng chống nứt mỗi là tốt hơn nhiều.

+ Khả năng chống LVBX của BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa PG64-16 (nhựa 40/50) cao hơn so với nhựa PG64-22 (nhựa 60/70) khoảng 18% nhưng khả năng chống nứt mỗi lại kém hơn từ 18% đến 26%. Điều này có thể giải thích là do đặc tính lưu biến của nhựa đường: nhựa PG64-16 có tỷ số $G^*/\sin\delta$ (đặc trưng cho khả năng chống LVBX) cao hơn so với nhựa PG64-22 nên khả năng chống LVBX là tốt nhưng tỷ số $G^*.\sin\delta$ (đặc trưng cho khả năng chống mỏi) của nhựa PG64-16 lại thấp hơn so với nhựa PG64-22 nên khả năng chống nứt mỏi là kém hơn.

- Về ảnh hưởng của hàm lượng nhựa: Khả năng chống nứt mỏi của BTN tăng lên khi tăng hàm lượng nhựa thiết kế trong hỗn hợp BTN nhưng khả năng chống LVBX lại giảm xuống. Điều này có thể giải thích là do hàm lượng nhựa quá ít thì hỗn hợp BTN quá khô, cứng dẫn đến khó rải và đầm nén khi thi công BTN và dẫn đến giảm cường độ lớp BTN, giảm khả năng chống nứt. Ngược lại, hàm lượng nhựa quá nhiều thì hỗn hợp BTN quá dẻo, dẫn đến xô dòn BTN và giảm khả năng chống LVBX.

- Có 08/18 hỗn hợp BTN12,5 và 08/18 hỗn hợp BTN19 có chiều sâu LVBX nhỏ hơn 12,5mm nhưng chỉ số mềm FI nằm dưới đường giới hạn bằng 8, chỉ số CTindex nằm dưới đường giới hạn bằng 70, cho nên các hỗn hợp này thể hiện đặc tính cứng, giòn và dễ nứt (các hỗn hợp này sử dụng HLN thấp (Pb-0,5) không đảm bảo tiêu chí thiết kế cân bằng khi chỉ đảm bảo được khả năng chống LVBX mà chưa đảm bảo được khả năng chống nứt mỏi).

Chính vì vậy, khi thiết kế hỗn hợp BTN cần lựa chọn một hỗn hợp BTN đảm bảo cân bằng được khả năng chống nứt mỏi và LVBX.

3.6. Mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy

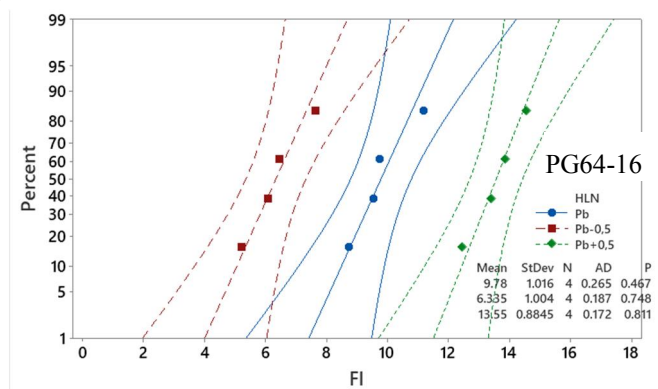
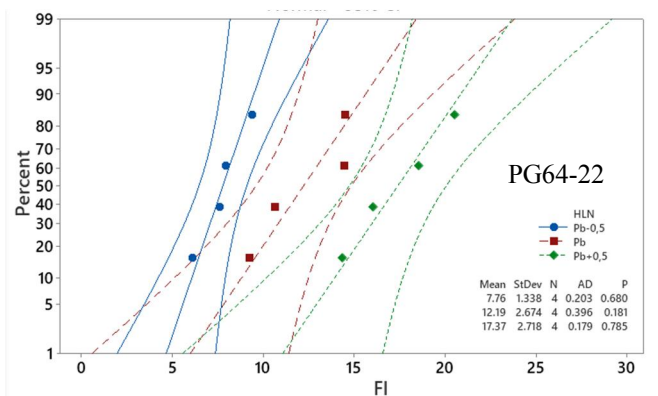
Các dự án xây dựng đường bộ tại Việt Nam hiện nay chủ yếu sử dụng nhựa đường 60/70 (tương đương PG64-22) và nhựa đường 40/50 (tương đương PG64-16) để sản xuất BTN, vì vậy tập trung phân tích, đánh giá tương quan và mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 và PG64-16.

Trình tự mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy theo các bước sau:

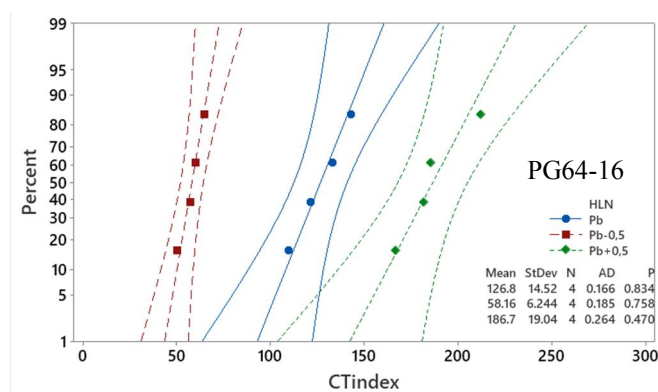
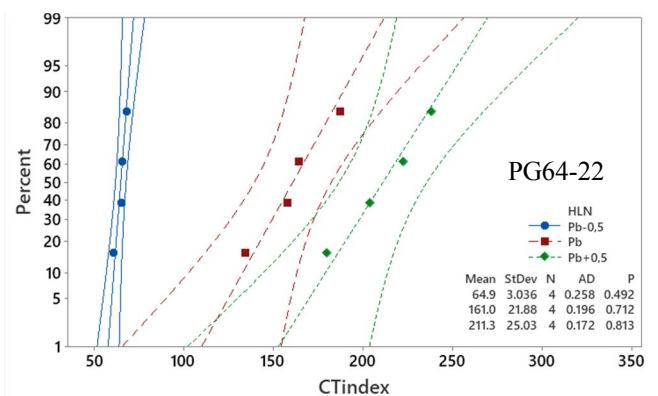
- Kiểm tra phân phối chuẩn của kết quả thí nghiệm.
- Khảo sát hệ số tương quan Pearson.
- Mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy.

3.6.1. Kiểm tra phân phối chuẩn của kết quả thí nghiệm.

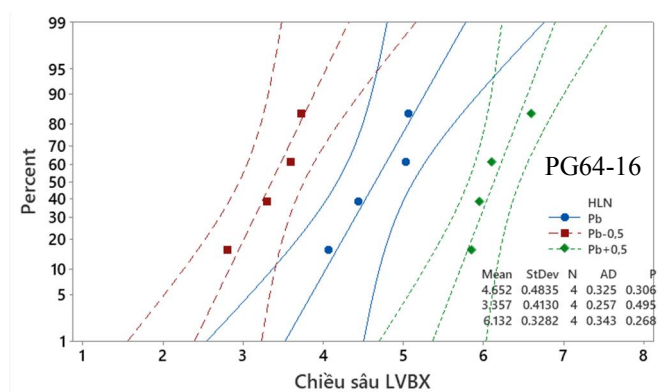
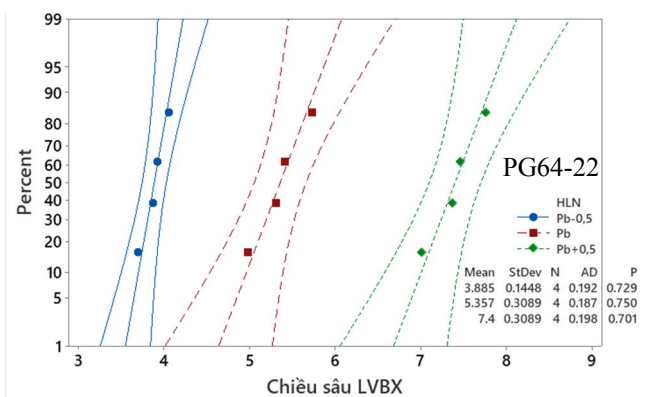
Trên cơ sở kết quả thí nghiệm Chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 và PG64-16, sử dụng phần mềm Minitab để kiểm tra phân phối chuẩn của các kết quả thí nghiệm. Kết quả kiểm tra các số liệu đều tuân theo phân phối chuẩn, hệ số p-value > 0,05 như ở Hình 3-28, Hình 3-29 và Hình 3-30.



Hình 3-28. Kiểm tra phân phối chuẩn của chỉ số mềm FI



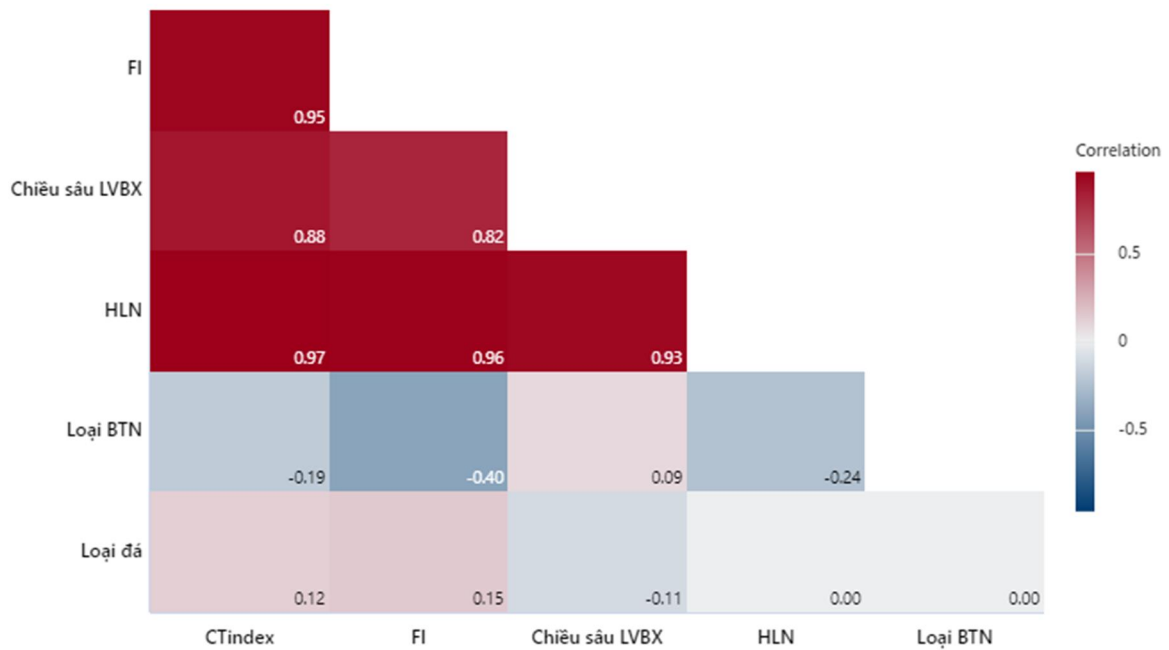
Hình 3-29. Kiểm tra phân phối chuẩn của chỉ số CTindex



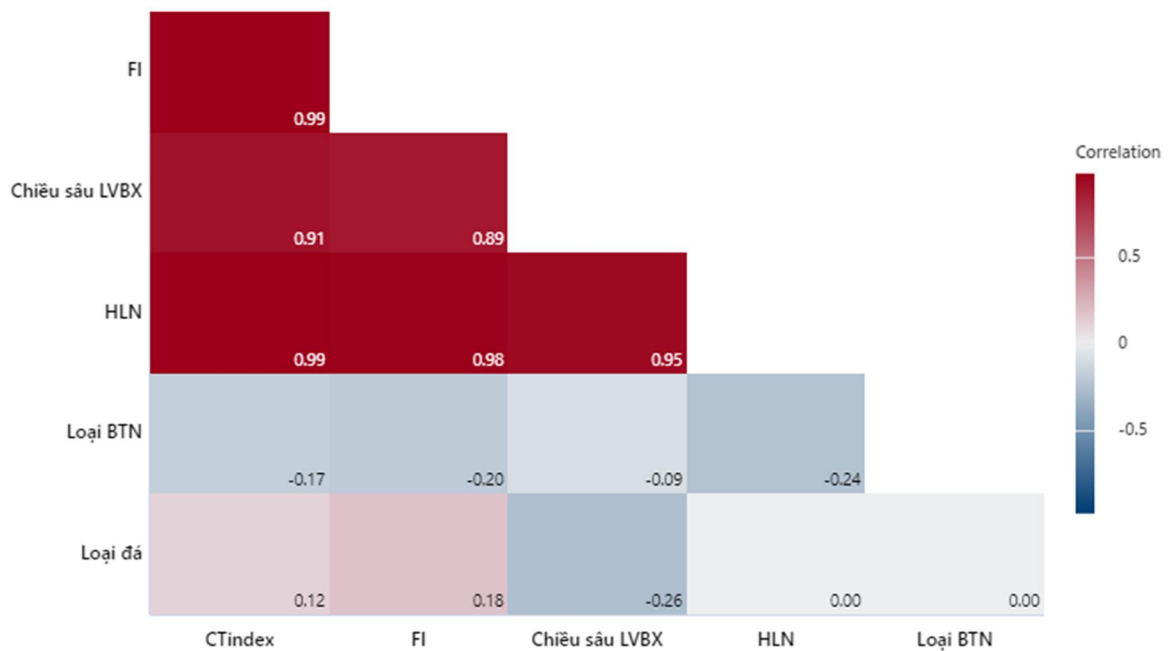
Hình 3-30. Kiểm tra phân phối chuẩn của chiều sâu LVBX

3.6.2. Khảo sát hệ số tương quan Pearson

Sử dụng phần mềm Minitab để xác định giá trị của hệ số tương quan Pearson, và mức độ quan trọng của hệ số tương quan này theo thống kê bằng giá trị p-value. Kết quả phân tích cho thấy chỉ có chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex, chiều sâu LVBX và HLN là có hệ số tương quan mạnh ($r > 0,8$) và có ý nghĩa thống kê ($p\text{-value} < 0,05$), như vậy sử dụng phần mềm Minitab để mô hình hóa, xây dựng phương trình hồi quy giữa các biến này. Các biến còn lại có hệ số tương quan yếu và không có ý nghĩa thống kê (chi tiết xem Hình 3-31 và Hình 3-21).



Hình 3-31. Biểu đồ tương quan giữa các biến của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22



Hình 3-32. Biểu đồ tương quan giữa các biến của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16

3.6.3. Phương trình hồi quy giữa chỉ số CTIndex và chỉ số mềm FI

Trong khuôn khổ nghiên cứu, đưa ra phương trình hồi quy giữa chỉ số CTIndex và chỉ số mềm FI của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 như công thức 3.1 và của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 như công thức 3.2:

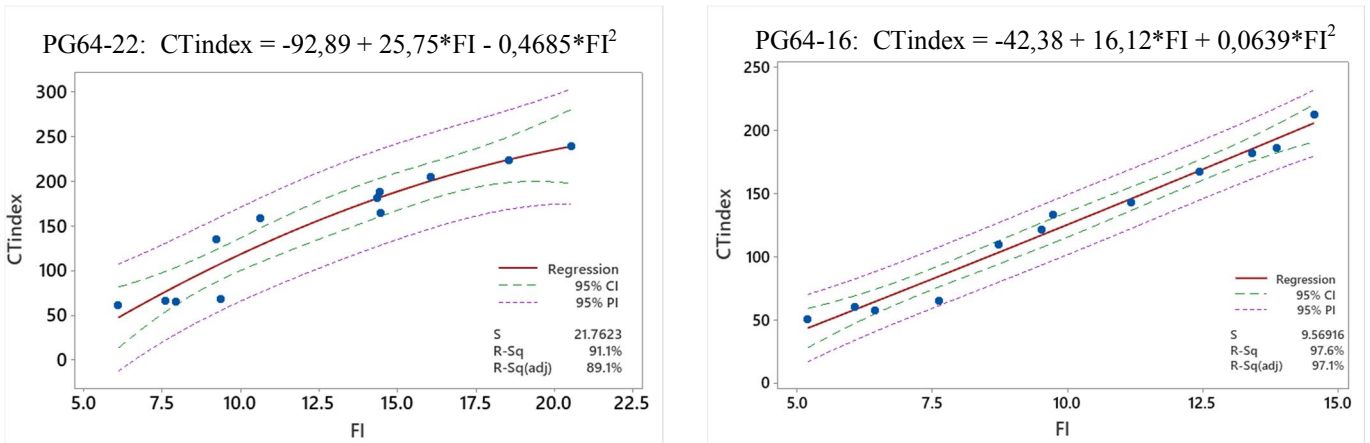
$$CTIndex = -92,89 + 25,75*FI - 0,4685*FI^2 \quad (3.1)$$

$$CTIndex = -42,38 + 16,12*FI + 0,0639*FI^2 \quad (3.2)$$

Trong đó: + CTIndex : là chỉ số CTIndex của mẫu BTN;

+ FI: là chỉ số mềm FI của mẫu BTN thí nghiệm theo TCVN 13347:2021.

Mô hình hồi quy có ý nghĩa thống kê thể hiện $p\text{-value} = 0,000 < 0,05$ và hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 91,1\%$ với PG64-22 và $R^2_{đc} = 97,6\%$ với PG64-16.



Hình 3-33. Quan hệ giữa chỉ số CTindex và chỉ số mềm FI

3.6.4. Phương trình hồi quy giữa chỉ số mềm FI và chiều sâu LVBX

Trong khuôn khổ nghiên cứu, đưa ra phương trình hồi quy giữa chỉ số mềm FI và chiều sâu LVBX của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 như công thức 3.3 và của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 như công thức 3.4:

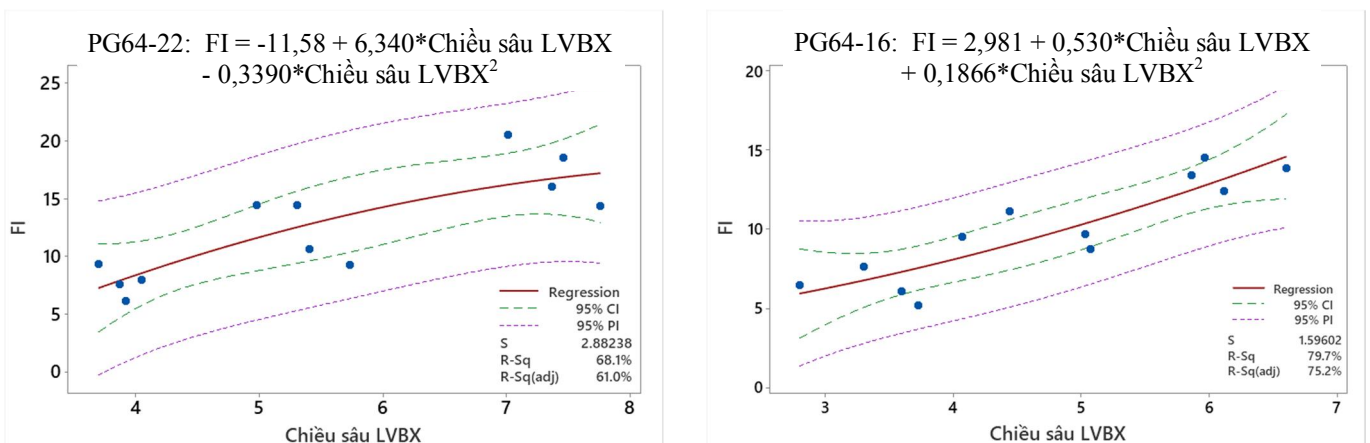
$$FI = -11,58 + 6,340*Chiều\ sâu\ LVBX - 0,3390*Chiều\ sâu\ LVBX^2 \quad (3.3)$$

$$FI = 2,981 + 0,530*Chiều\ sâu\ LVBX + 0,1866*Chiều\ sâu\ LVBX^2 \quad (3.4)$$

Trong đó: + FI: là chỉ số mềm FI;

+ Chiều sâu LVBX: là chiều sâu LVBX (mm) của mẫu BTN thí nghiệm theo Quyết định 1617/QĐ-BGTVT.

Mô hình hồi quy có ý nghĩa thống kê thể hiện $p\text{-value} = 0,000 < 0,05$ và hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 68,1\%$ với PG64-22 và $R^2_{đc} = 79,7\%$ với PG64-16.



Hình 3-34. Quan hệ giữa chỉ số mềm FI và chiều sâu LVBX

3.6.5. Phương trình hồi quy giữa chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX

Trong khuôn khổ nghiên cứu, đưa ra phương trình hồi quy giữa chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 như công thức 3.5 và của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 như công thức 3.6:

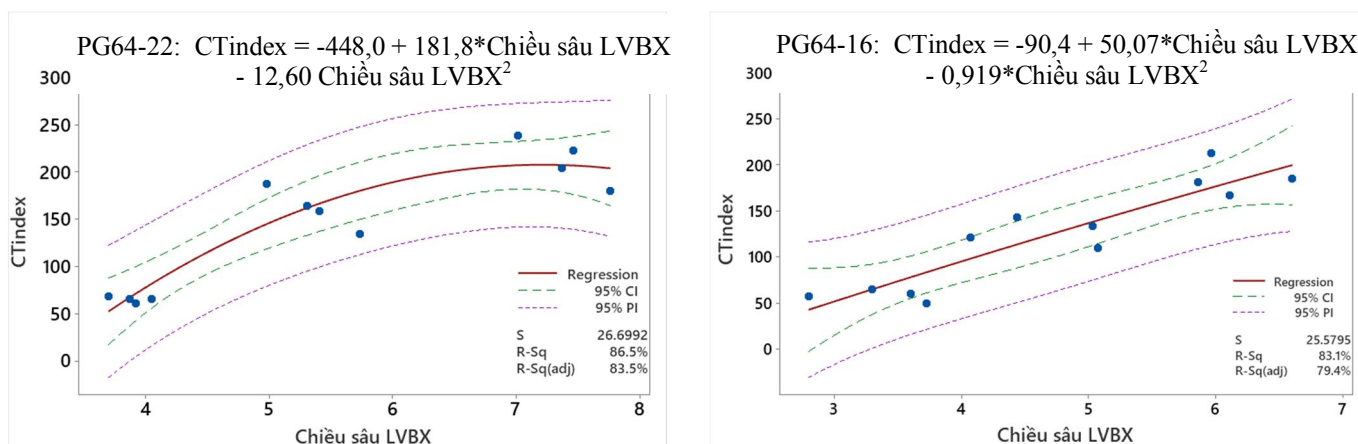
$$CTindex = -448,0 + 181,8*Chiều\ sâu\ LVBX - 12,60*Chiều\ sâu\ LVBX^2 \quad (3.5)$$

$$CTindex = -90,4 + 50,07*Chiều\ sâu\ LVBX - 0,919*Chiều\ sâu\ LVBX^2 \quad (3.6)$$

Trong đó: + CTindex : là chỉ số CTindex của mẫu BTN;

+ Chiều sâu LVBX: là chiều sâu LVBX (mm) của mẫu BTN thí nghiệm theo Quyết định 1617/QĐ-BGTVT.

Mô hình hồi quy có ý nghĩa thống kê thể hiện p-value = 0,000 < 0,05 và hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 86,5\%$ với PG64-22 và $R^2_{đc} = 83,1\%$ với PG64-16.



Hình 3-35. Quan hệ giữa chỉ số chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX

3.6.6. Phương trình hồi quy giữa chỉ số CTindex và hàm lượng nhựa

Trong khuôn khổ nghiên cứu, đưa ra phương trình hồi quy giữa chỉ số CTindex và hàm lượng nhựa của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 như công thức 3.7 và của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 như công thức 3.8:

$$CTindex = -1410 + 479,8*HLN - 33,49*HLN^2 \quad (3.7)$$

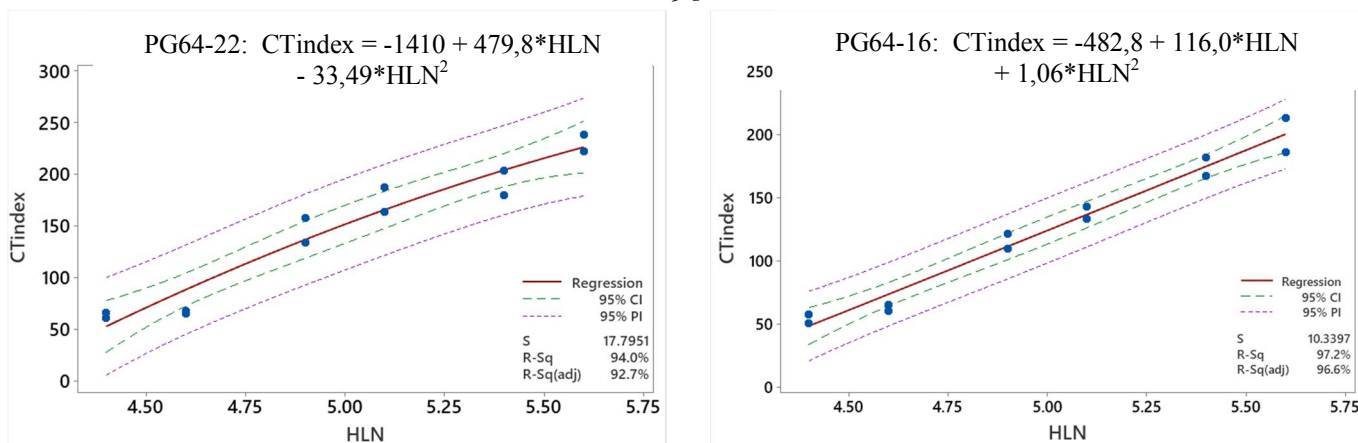
$$CTindex = -482,8 + 116,0*HLN + 1,06*HLN^2 \quad (3.8)$$

Với HLN nằm trong khoảng $\pm 0,5\%$ so với HLN thiết kế

Trong đó: + CTindex: là chỉ số CTindex của mẫu BTN;

+ HLN: là hàm lượng nhựa theo hỗn hợp (%) của mẫu BTN.

Mô hình hồi quy có ý nghĩa thống kê thể hiện p-value = 0,000 < 0,05 và hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 94,0\%$ với PG64-22 và $R^2_{đc} = 97,2\%$ với PG64-16.



Hình 3-36. Quan hệ giữa chỉ số chỉ số CTindex và hàm lượng nhựa

3.6.7. Phương trình hồi quy giữa chỉ số mềm FI và hàm lượng nhựa

Trong khuôn khổ nghiên cứu, đưa ra phương trình hồi quy giữa chỉ số mềm FI và hàm lượng nhựa của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 như công thức 3.9 và của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 như công thức 3.10:

$$FI = -9,57 + 0,59*HLN + 0,657*HLN^2 \tag{3.9}$$

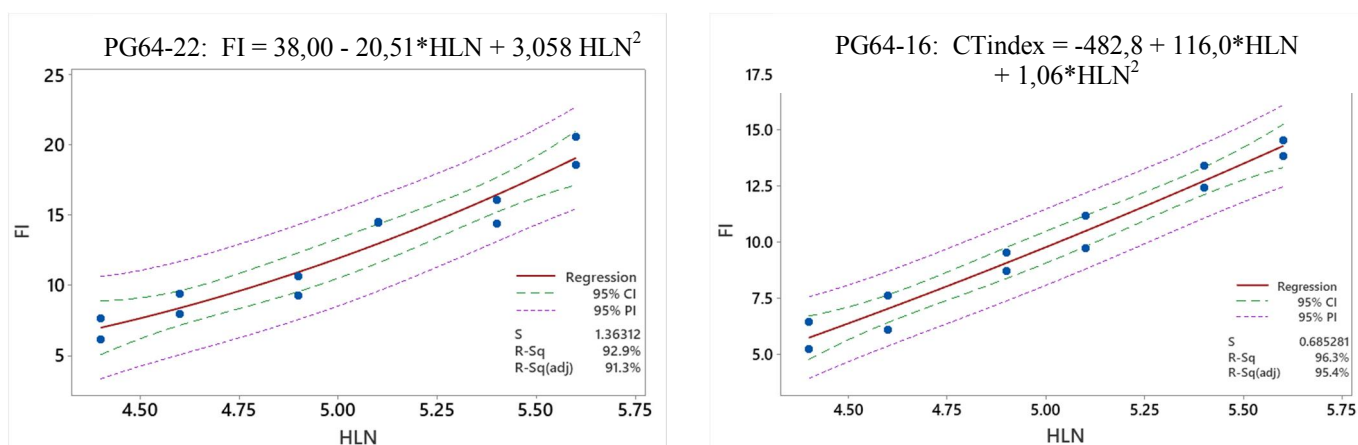
$$FI = 38,00 - 20,51*HLN + 3,058*HLN^2 \tag{3.10}$$

Với HLN nằm trong khoảng $\pm 0,5\%$ so với HLN thiết kế

Trong đó: + FI: là chỉ số mềm FI của mẫu BTN;

+ HLN: là hàm lượng nhựa theo hỗn hợp (%) của mẫu BTN.

Mô hình hồi quy có ý nghĩa thống kê thể hiện p-value = 0,000 < 0,05 và hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 92,9\%$ với PG64-22 và $R^2_{đc} = 96,3\%$ với PG64-16.



Hình 3-37. Quan hệ giữa chỉ số chỉ số mềm FI và hàm lượng nhựa

3.6.8. Phương trình hồi quy giữa chiều sâu LVBX và hàm lượng nhựa

Trong khuôn khổ nghiên cứu, đưa ra phương trình hồi quy giữa chiều sâu LVBX và hàm lượng nhựa của BTN sử dụng nhựa đường PG64-22 như công thức 3.11 và của BTN sử dụng nhựa đường PG64-16 như công thức 3.12:

$$\text{Chiều sâu LVBX} = 2,21 - 1,95 \text{ HLN} + 0,519 \text{ HLN}^2 \tag{3.11}$$

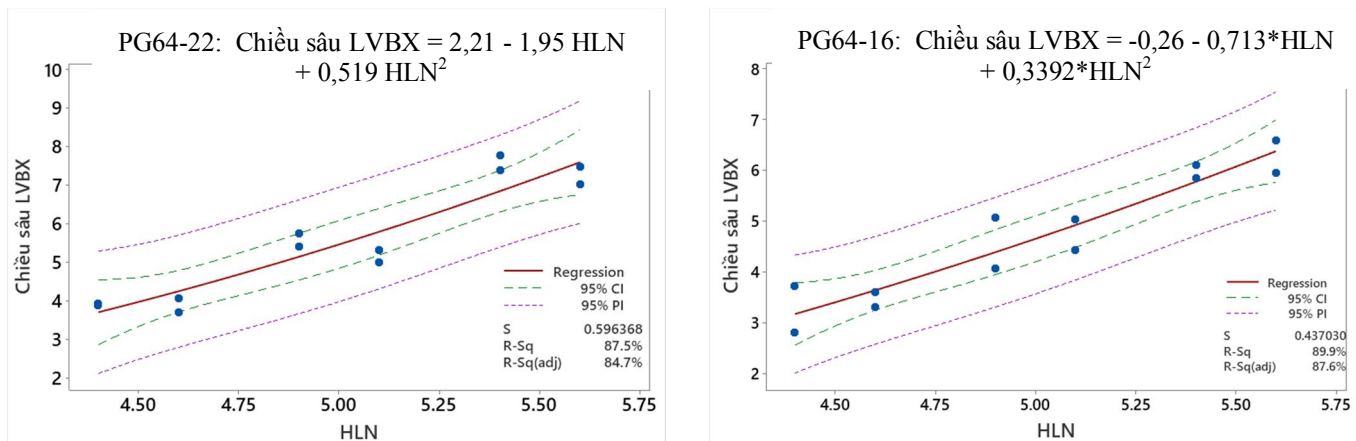
$$\text{Chiều sâu LVBX} = -0,26 - 0,713 \cdot \text{HLN} + 0,3392 \cdot \text{HLN}^2 \quad (3.12)$$

Với HLN nằm trong khoảng $\pm 0,5\%$ so với HLN thiết kế

Trong đó: + Chiều sâu LVBX: là chiều sâu LVBX (mm) của mẫu BTN;

+ HLN: là hàm lượng nhựa theo hỗn hợp (%) của mẫu BTN.

Mô hình hồi quy có ý nghĩa thống kê thể hiện $p\text{-value} = 0,000 < 0,05$ và hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{\text{đc}} = 87,5\%$ với PG64-22 và $R^2_{\text{đc}} = 89,9\%$ với PG64-16.



Hình 3-38. Quan hệ giữa chiều sâu LVBX và hàm lượng nhựa

3.7. Kết luận chương 3

Qua nghiên cứu thực nghiệm trong phòng với 02 cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN (BTN12,5 và BTN19), 02 nguồn gốc đá dăm (đá vôi và đá bazan), 03 loại nhựa đường (nhựa PG64-16; PG64-22; PG82-22), 03 hàm lượng nhựa (Pb-0,5, Pb, Pb+0,5) đến khả năng chống nứt môi và chống LVBX của bê tông nhựa Superpave trong điều kiện Việt Nam, có các nhận xét kết luận sau:

1. Kết quả thực nghiệm chỉ số mềm FI có độ chụm cao. Chỉ số mềm FI của các mẫu BTN12,5 nằm trong khoảng từ 6,07 đến 22,87 và các mẫu BTN19 nằm trong khoảng từ 5,20 đến 18,23. Có 03/18 tổ mẫu BTN12,5 và 05/18 tổ mẫu BTN19 có chỉ số mềm FI nhỏ hơn so với ngưỡng tối thiểu quy định ($FI \geq 8$).

2. Kết quả thực nghiệm chỉ số CTindex có độ chụm cao. Chỉ số CTindex của các mẫu BTN12,5 nằm trong khoảng từ 53,98 đến 412,58 và các mẫu BTN19 nằm trong khoảng từ 43,08 đến 371,11. Có 04/18 tổ mẫu BTN12,5 và 04/18 tổ mẫu BTN19 có chỉ số CTindex nhỏ hơn so với ngưỡng tối thiểu quy định ($CTindex \geq 70$).

3. Đã tiến hành phân tích thống kê từ tập mẫu thí nghiệm chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex và chiều sâu LVBX của BTN12,5 và BTN19, và nhận thấy:

3.1. Khả năng chống LVBX của mẫu BTN12,5 và BTN19 là không khác nhau nhiều, nhưng khả năng chống nứt môi lại giảm xuống (BTN12,5 có khả năng chống nứt môi cao hơn so với BTN19).

3.2. Khả năng chống nứt mới và chống LVBX của mẫu BTN12,5 và BTN19 sử dụng đá dăm gốc bazan tốt hơn gốc đá vôi (khả năng chống nứt mới cao hơn từ 12% đến 13% và chống LVBX cao hơn khoảng 12%).

3.3. Khả năng chống nứt mới và chống LVBX của mẫu BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa PG82-22 (polime PMB.III) là tốt hơn nhiều so với nhựa PG64-22 (nhựa 60/70) và nhựa PG64-16 (nhựa 40/50).

3.4. Khả năng chống LVBX của BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa PG64-16 (nhựa 40/50) cao hơn so với nhựa PG64-22 (nhựa 60/70) khoảng 18% nhưng khả năng chống nứt mới lại kém hơn từ 18% đến 26%.

3.5. Khả năng chống nứt mới của BTN12,5 và BTN19 tăng lên khi tăng hàm lượng nhựa thiết kế trong hỗn hợp BTN nhưng khả năng chống LVBX lại giảm xuống.

4. Trong khuôn khổ nghiên cứu, đã xây dựng 12 phương trình hồi quy giữa: chỉ số CTindex với chỉ số mềm FI; chỉ số CTindex với chiều sâu LVBX; chỉ số mềm FI với chiều sâu LVBX; chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex, chiều sâu LVBX với hàm lượng nhựa của BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa đường PG64-22 và nhựa đường PG64-16, chi tiết tại các công thức từ (3.1) đến (3.12).

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ĐẶC TRƯNG KHAI THÁC CỦA KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP CƠ HỌC THỰC NGHIỆM

Nội dung chương này tập chung phân tích phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm bằng phương pháp cơ học - thực nghiệm (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide - MEPDG), giới thiệu phần mềm ME, trình tự các bước thiết kế và áp dụng đối với các kết cấu mặt đường mềm có tầng mặt là các lớp bê tông nhựa, phân tích ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến đặc trưng khai thác của kết cấu mặt đường bê tông nhựa Superpave bằng phần mềm ME.

4.1. Phân tích phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo cơ học - thực nghiệm và khả năng áp dụng ở Việt Nam

4.1.1. Phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo phương pháp cơ học - thực nghiệm

Áo đường là kết cấu quan trọng và có giá trị lớn trong kết cấu nền – mặt đường ô tô. Trong quá trình khai thác, mặt đường chịu tác động trực tiếp của các yếu tố tải trọng phương tiện, khí hậu môi trường xung quanh (nhiệt độ, bức xạ mặt trời, oxy hóa, độ ẩm,...) và ở một số trạng thái giới hạn sẽ phát sinh các hư hỏng. Hư hỏng kết cấu áo đường và lớp mặt đường có thể xảy ra rất đa dạng, ở nhiều mức độ khác nhau tùy thuộc mức độ đáp ứng của kết cấu áo đường với các điều kiện khai thác. Để đảm bảo áo đường có thể chịu được các tác động tổng hợp trong suốt vòng đời khai thác, cần tính toán, bố trí kết cấu áo đường đáp ứng được các tác động dự báo.

Trong quá trình phát triển nghiên cứu về lĩnh vực đường bộ, có nhiều cách tiếp cận, phương pháp luận phục vụ cho tính toán kết cấu áo đường. Nghiên cứu [23] đã tổng kết các phương pháp thiết kế kết cấu áo đường có thể tạm được chia thành 4 nhóm:

- + Phương pháp thiết kế catalog kết cấu áo đường cho các khu vực cụ thể;
- + Phương pháp thiết kế dựa trên lý thuyết cơ học;
- + Phương pháp thiết kế dựa trên các mô hình dữ liệu thực nghiệm;
- + Phương pháp thiết kế theo cơ học – thực nghiệm.

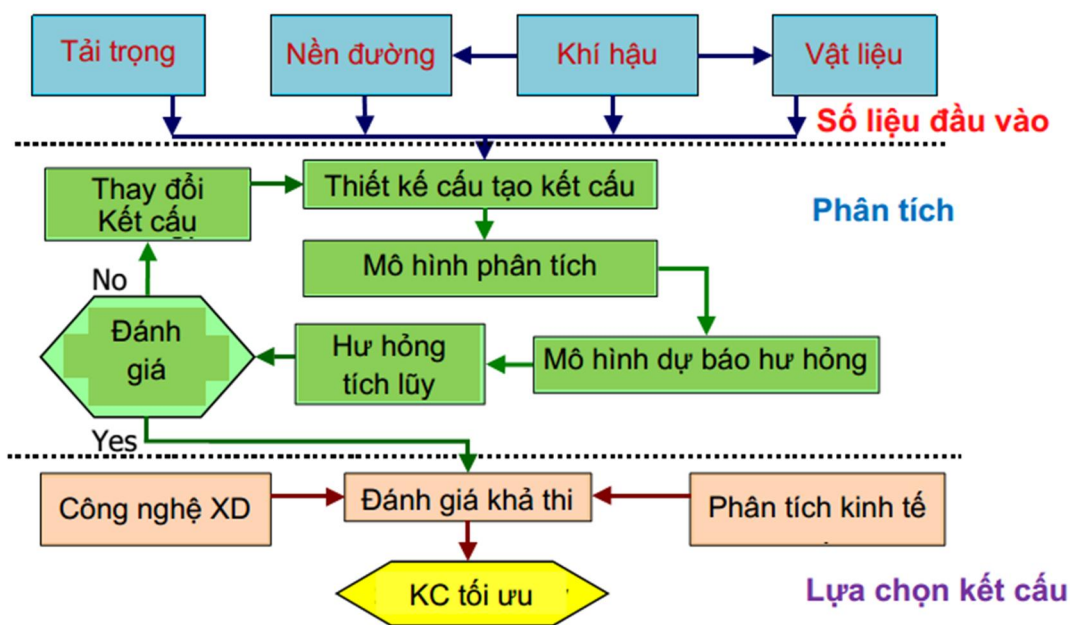
Phương pháp thiết kế theo cơ học – thực nghiệm được xây dựng nhằm phát huy những ưu điểm của 2 nhóm phương pháp cơ học, thực nghiệm, đồng thời giải quyết những hạn chế của chúng. Từ năm 1998 đến năm 2004, dưới sự tài trợ của Viện hàn lâm Khoa học quốc gia Hoa Kỳ (US NAS) và Chương trình nghiên cứu chiến lược đường bộ Hoa Kỳ (NCHRP), phương pháp cơ học - thực nghiệm đã được phát triển và cải tiến từ phương pháp thiết kế thuần thực nghiệm (Phương pháp AASHTO 1993) cả về cơ sở thiết kế và mức độ phức tạp trong tính toán.

Phương pháp thiết kế theo cơ học - thực nghiệm là sự phát triển và cải tiến phương pháp thiết kế thuần thực nghiệm (Phương pháp AASHTO 1993) cả về cơ sở thiết kế và mức độ phức tạp trong tính toán nên có thể tạo ra những thiết kế kinh tế và đáng tin cậy hơn rất nhiều so với phương pháp truyền thống. Quá trình thiết kế theo phương pháp cơ học-thực nghiệm là quá trình thử dần đúng. Người thiết kế phải đưa ra một kết cấu mặt đường mẫu cùng với các giới hạn hư hỏng có thể chấp nhận được như: Độ lún vệt bánh xe (độ lún trong lớp bê tông nhựa, lún trong các lớp vật liệu không gia cố, lún trong nền đất); Nứt môi (nứt môi trong lớp bê tông nhựa, nứt môi trong hỗn hợp gia cố vô cơ); Nứt do nhiệt, nứt ngang; Nứt dọc; Độ gồ ghề (IRI)... tương ứng với từng dự án. Nếu kết cấu mẫu không thỏa mãn các giới hạn đã được đưa ra, người thiết kế sẽ điều chỉnh và tính toán lại cho đến khi các chỉ tiêu giới hạn trên đều đạt.

Trình tự thiết kế được quy định trong tài liệu hướng dẫn của Chương trình nghiên cứu Đường bộ Quốc gia của Hoa Kỳ (NHCRP) và Hướng dẫn thiết kế mặt đường cơ học – thực nghiệm AASHTO 2008. Phiên bản mới nhất của phần mềm thiết kế MEPDG là Phần mềm thiết kế mặt đường AASHTOWare.

Phương pháp cơ học - thực nghiệm đã và đang được sử dụng trong thiết kế kết cấu mặt đường ở Hoa Kỳ, Canada, Hàn Quốc và được rất nhiều nước nghiên cứu áp dụng trong phân tích kết cấu mặt đường.

Trình tự phân tích kết cấu mặt đường mềm theo phương pháp cơ học - thực nghiệm gồm 3 khối: Số liệu đầu vào; Phân tích; và Lựa chọn kết cấu như thể hiện ở Hình 4-1, trong đó phần quan trọng nhất quyết định đến thiết kế là các số liệu đầu vào.



Hình 4-1. Trình tự phân tích kết cấu mặt đường theo cơ học thực nghiệm [23]

Khối số liệu đầu vào của phương pháp cơ học thực nghiệm có 4 phần là Tải trọng; Nền đường; Khí hậu; và Vật liệu được xác định theo mức: 1, 2, 3 tùy thuộc vào từng điều kiện cụ thể và bước thiết kế sơ bộ, hay thiết kế kỹ thuật chi tiết.

Một sự khác biệt đáng kể giữa các phương pháp thiết kế MEPDG và AASHTO 1993 là đặc tính của các đầu vào thiết kế. MEPDG sử dụng cách tiếp cận phân cấp cho thiết kế mặt đường đầu vào; cách tiếp cận này được thiết kế để phản ánh sự cân nhắc mức độ nỗ lực và chi phí chung dành cho việc hoàn thành thiết kế mặt đường phải tỷ lệ thuận với mức độ quan trọng của dự án và nguy cơ hư hỏng sớm của mặt đường:

- Đầu vào Mức 1 cung cấp độ chính xác và độ tin cậy cao nhất, nhưng thường yêu cầu thử nghiệm chi tiết trong phòng thí nghiệm riêng biệt và đo đạc tại hiện trường để mô tả giao thông, vật liệu và khí hậu.
- Đầu vào Mức 2 đại diện cho mức độ chính xác trung gian và thường được lấy từ phòng thí nghiệm và thử nghiệm hiện trường hạn chế hoặc ước tính bằng cách sử dụng tương quan hoặc số liệu giao thông.
- Đầu vào Mức 3 cung cấp mức độ chính xác thấp nhất, mức độ không chắc chắn cao nhất và thường dựa trên các giá trị mặc định có được từ kinh nghiệm của cơ quan giao thông ở cấp khu vực. Các cơ quan giao thông có thể sử dụng các mức đầu vào khác nhau trong cùng một thiết kế mặt đường.

Nhiều bang của Hoa Kỳ đã hoàn thành các nghiên cứu kiểm tra MEPDG và điều chỉnh cho phù hợp với điều kiện địa phương. Những nghiên cứu này thường bao gồm một hoặc nhiều hoạt động sau:

- So sánh các thiết kế mặt đường tính toán bằng phương pháp thiết kế mặt đường hiện tại (điển hình là AASHTO 1993) và MEPDG được hiệu chuẩn.
- Xác định độ nhạy của MEPDG với các yếu tố đầu vào giao thông, khí hậu, vật liệu và kết cấu mặt đường cần thiết cho thiết kế mặt đường.
- Xác minh tính chính xác của các mô hình hư hỏng mặt đường MEPDG được hiệu chuẩn dựa trên các thiết kế mặt đường địa phương và dữ liệu khả năng khai thác, thường là từ Hệ thống quản lý mặt đường và hiệu chỉnh lại các mô hình khi cần thiết.

4.1.2. Nghiên cứu ứng dụng phương pháp thiết kế mặt đường theo phương pháp cơ học thực nghiệm tại Việt Nam

Phương pháp MEPDG mới bước đầu nghiên cứu trong phân tích thiết kế kết cấu áo đường mềm từ năm 2014, được thực hiện bởi tác giả Nguyễn Quang Phúc, kết quả nghiên cứu bước đầu đã đưa ra được ứng xử của kết cấu áo đường mềm theo thời gian thông qua các chỉ tiêu như: tổng độ lún vệt hằn bánh xe ở mặt đường, độ gồ ghề IRI, và tỷ lệ vết nứt ở mặt đường. Cũng với phương pháp MEPDG, tác giả Nguyễn Ngọc Lân và Nguyễn Quang Phúc (2013) đã tiến hành phân tích ứng xử của kết cấu áo đường mềm khi xét đến điều kiện dính bám khác nhau giữa các lớp thông qua phần mềm MEPDG, kết quả phân tích đã đưa ra sự khác biệt đáng kể về các thông số tổng độ lún vệt hằn bánh xe, độ gồ ghề IRI, và tỷ lệ nứt mới của kết cấu mặt đường được phân tích khi xét đến các mức độ dính bám giữa các lớp khác nhau. Các kết quả phân tích ở trên đều sử dụng các thông số liên quan đến vật liệu được tham khảo trong các nghiên cứu trước đó hoặc khuyến cáo của AASHTO.

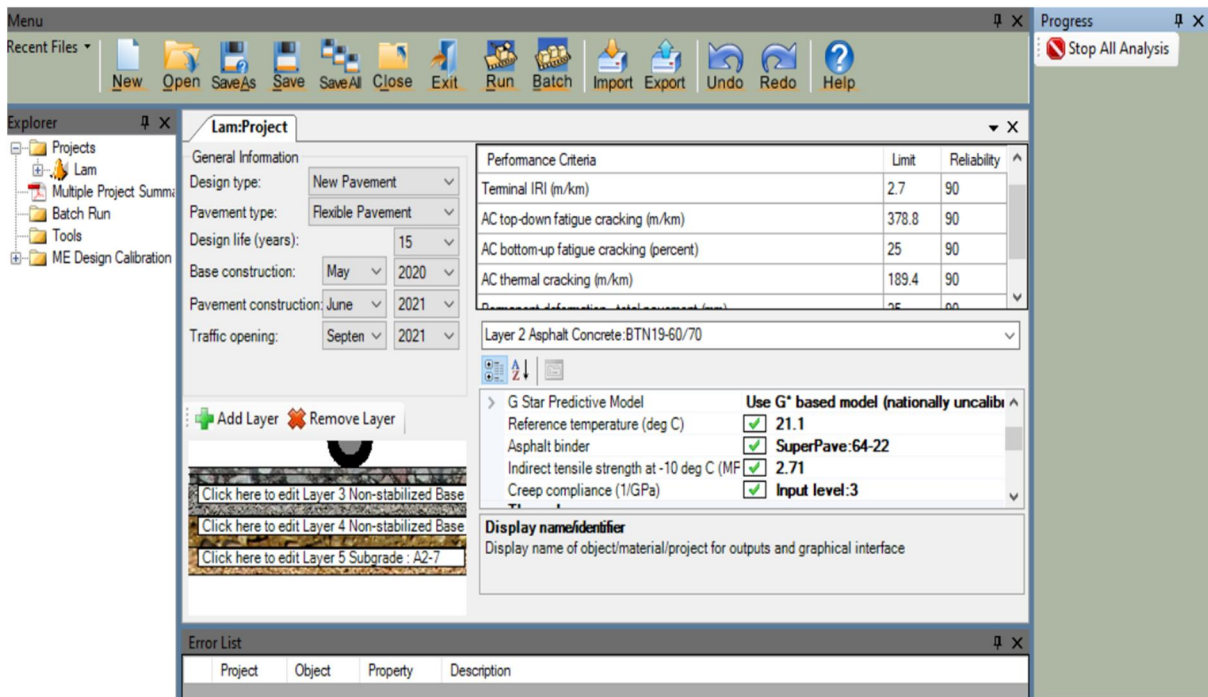
Trong những năm gần đây, Trường Đại học Công nghệ GTVT, Viện Khoa học và Công nghệ GTVT đã thực hiện một số đề tài KHCN liên quan đến phương pháp cơ học - thực nghiệm, như: đề tài DT174055 “Nghiên cứu các điều kiện cần thiết để áp dụng phương pháp cơ học - thực nghiệm (MEPDG) trong phân tích kết cấu mặt đường ở Việt Nam”; đề tài DT203043 “Nghiên cứu cơ sở khoa học của phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường cứng dựa trên phương pháp cơ học thực nghiệm và đề xuất áp dụng tại Việt Nam”. Trên cơ sở các nghiên cứu này, đã bước đầu tiếp cận và nắm được phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm và mặt đường cứng theo phương pháp cơ học - thực nghiệm; đã phân tích các điều kiện cần thiết để sử dụng phương pháp cơ học thực nghiệm trong phân tích kết cấu áo đường ở Việt Nam.

4.1.3. Giới thiệu về phần mềm Darwin-ME

AASHTOWare Pavement ME Design là thế hệ kế tiếp của phần mềm thiết kế mặt đường AASHTOWare®, được xây dựng dựa trên hướng dẫn thiết kế mặt đường theo cơ học - thực nghiệm, mở rộng và cải tiến các tính năng trong phần mềm tính toán. Tên thương mại DARWin-ME là viết tắt của phần mềm thiết kế, phân tích, và cải tạo kết cấu mặt đường trên nền Windows (Design, Analysis, and Rehabilitation for Windows- Mechanistic-Empirical).

Phần mềm DARWin-ME có thể phân tích 17 loại kết cấu mới hoặc nâng cấp cải tạo với nhiều thư viện kết cấu/vật liệu phong phú, các thông số đầu vào mặc định hoặc có tính tùy biến cao:

- Kết cấu mặt đường mềm có lớp mặt BTN làm mới hoặc xây dựng lại;
- Kết cấu mặt đường BTXM phân tằm (JPCP) hoặc BTXM cốt thép liên tục (CRCP) làm mới hoặc xây dựng lại;
- Lớp BTN tăng cường trên mặt đường cũ BTN, BTXM phân tằm hoặc BTXM cốt thép liên tục;
- Lớp BTXM tăng cường, dính chặt hoặc không dính trên mặt đường cũ BTXM phân tằm, BTXM cốt thép liên tục, hoặc mặt đường BTN;
- Kết cấu mặt đường tăng cường có sử dụng lớp tái chế.



Hình 4-2. Cửa sổ chính phần mềm DARWin-ME

4.1.4. Các bước phân tích kết cấu mặt đường

Với các phương trình được thiết lập chủ yếu theo cơ học, sử dụng các hệ số hiệu chỉnh được xác lập từ thực nghiệm, phương pháp cơ học thực nghiệm được thực hiện theo trình tự thiết kế như sau:

1. Thiết kế cấu tạo một kết cấu mặt đường ban đầu bao gồm: số lớp vật liệu, loại và chiều dày mỗi lớp, phù hợp với những điều kiện cụ thể như: Đất nền, đặc trưng vật liệu, tải trọng, khí hậu, điều kiện thi công, ...
2. Đưa ra các thông số trạng thái giới hạn (các đặc trưng hư hỏng), đặc trưng cho tình trạng mặt đường ở cuối thời kỳ khai thác (ví dụ: LVBX, nứt mỗi, nứt do nhiệt, độ gồ ghề).
3. Chọn mức độ tin cậy cho các đặc trưng trên. Do sự sai khác của vật liệu, sự thay đổi của điều kiện khí hậu, điều kiện giao thông và công nghệ xây dựng, cần phải xét đến độ tin cậy trong thiết kế kết cấu mặt đường. Để xác định độ tin cậy trong thiết kế, các sai số hoặc hệ số sai số của các thông số đầu vào như vật liệu, khí hậu, điều kiện giao thông và kể cả chiều dày lớp được xem xét đến ngay từ các bước xác định thông số đầu vào từ bước (1) đến bước (4). Các ứng suất, biến dạng xác định được theo các mô hình tính toán vì thế đã bao gồm độ tin cậy.
4. Đưa các thông số khí hậu tại khu vực thiết kế, xây dựng. Thông thường ME đã có các số liệu trên toàn bộ lãnh thổ Hoa Kỳ và Canada, cần có những nghiên cứu mô hình khí hậu để đưa các thông số của Việt Nam, trước mắt sử dụng bộ số liệu khí hậu MERRA-2.

5. Xử lý các thông số đầu vào để xác định: lưu lượng giao thông trung bình tháng, các đặc trưng vật liệu theo từng thời kỳ khí hậu trong năm, các đặc trưng khí hậu trong suốt thời kỳ thiết kế
6. Tính toán ứng suất & biến dạng của mặt đường khi làm việc sử dụng mô hình hệ nhiều lớp hoặc mô hình phần tử hữu hạn, biến dạng không hồi phục sử dụng lý thuyết dẻo, ứng suất nhiệt sử dụng các phương trình nhiệt ứng với mỗi loại tải trọng, mỗi cấp tải trọng và mỗi loại hình hư hỏng trong suốt thời kỳ thiết kế
7. Dự đoán các hư hỏng (lún, nứt từ dưới lên, nứt từ trên xuống, nứt do nhiệt) tại cuối mỗi thời kỳ tính toán, trong suốt thời kỳ thiết kế, sử dụng mô hình cơ học - thực nghiệm đã được hiệu chỉnh. Dự đoán phát triển độ gồ ghề với độ gồ ghề ban đầu, sự phát triển các hư hỏng và điều kiện khai thác.
8. Ước lượng các thông số đặc trưng cho tình trạng mặt đường ở cuối thời kỳ tính toán, ứng với độ tin cậy đã chọn.
9. Nếu các thông số đặc trưng cho tình trạng mặt đường ở cuối thời kỳ tính toán không đạt yêu cầu, điều chỉnh thiết kế ở bước 1 và lặp lại các bước từ 5 đến 8, cho đến khi đạt. Kết cấu cuối cùng được lựa chọn thỏa mãn các mô hình trạng thái giới hạn ứng với mỗi mô hình phân tích hư hỏng được tính toán.

Các thông số thiết kế, tùy theo mức độ chi tiết, có 3 mức:

Mức độ 1: Số liệu thu được từ các thí nghiệm, phép đo trực tiếp. Ví dụ: Đặc trưng vật liệu rút ra từ thí nghiệm trong phòng, số liệu đếm xe và cân xe.

Mức độ 2: Số liệu rút ra từ các mối tương quan với các số liệu khác. Ví dụ: Mô đun đàn hồi của vật liệu rút ra từ giá trị CBR thông qua các công thức thực nghiệm, mô đun đàn hồi của bê tông nhựa được xác định từ thành phần hỗn hợp, loại và hàm lượng nhựa, độ rỗng Va, VMA,...

Mức độ 3: Số liệu mặc định đặc trưng cho từng vùng hoặc từng quốc gia.

Mức độ chi tiết của số liệu đầu vào tùy thuộc: mức độ ảnh hưởng của số liệu đến kết quả tính toán (độ nhạy của số liệu), tầm quan trọng của dự án, nguồn lực dành cho dự án,...

Trong các mức độ trên với chi tiết yêu cầu giảm dần, mức độ 1 là khó thực hiện nhất, đòi hỏi phải có những thí nghiệm, kết quả đếm và cân xe thực tế, mức độ 3 là dễ nhất nhưng độ tin cậy của kết quả thiết kế không cao nhất.

Trình tự các bước thiết kế kết cấu áo đường bằng ME như Hình 4-1:

1. Giai đoạn 1: Xác lập kết cấu và các thông số

Loại kết cấu làm mới hay tăng cường, đề xuất phương án kết cấu. Khảo sát điều kiện nền đường, điều kiện thoát nước, điều kiện đóng/tan băng, đo cường độ mặt đường bằng thí nghiệm FWD,...

Thí nghiệm xác định hoặc sử dụng các thông số mặc định vật liệu.

Nhập và phân tích điều kiện khí hậu.

Nhập và phân tích số liệu tải trọng.

Nhập các số liệu của các lớp vật liệu.

Các tiêu chuẩn thiết kế và hệ số hiệu chỉnh.

2. Giai đoạn 2: Phân tích kết cấu

Mô hình hóa kết cấu mặt đường

Tính toán ứng suất, biến dạng và chuyển vị

Phân tích lựa chọn độ tin cậy tính toán

Tính toán phá hoại kết cấu theo các mô hình phụ thuộc độ tin cậy: Lún, nứt, IRI, gãy, cập kênh,...

Kiểm toán các tiêu chuẩn giới hạn, nếu không thỏa mãn phải thay đổi loại vật liệu hoặc chiều dày rồi tính toán lại.

3. Giai đoạn 3: Lựa chọn quyết định phương án kết cấu

Các vấn đề chính sách và quyết định

Phân tích chi phí vòng đời

Phân tích điều kiện công nghệ thi công, kiểm soát chất lượng, bảo trì,...

Quyết định lựa chọn kết cấu

Phần mềm ME có thể thiết kế tối ưu kết cấu đảm bảo thỏa mãn các tiêu chuẩn giới hạn. Các trạng thái giới hạn hay những tiêu chuẩn cần kiểm toán khi thiết kế là:

Độ lún vệt bánh tổng cộng toàn kết cấu; Độ lún vệt bánh của các lớp BTN, lớp móng không gia cố và nền đất

Nứt ngang không do tải trọng

Nứt da cá sấu, nứt phát triển từ dưới lên do tác dụng trùng phục của tải trọng

Nứt dọc, nứt phát triển từ trên xuống do tải trọng trùng phục, tải trọng nặng

Nứt phản ánh bề mặt lớp BTN trên các vết nứt hoặc khe nối của lớp dưới mặt đường mềm, bán cứng, hỗn hợp và mặt đường cứng

Độ gồ ghề IRI.

4.2. Phân tích kết cấu mặt đường bê tông nhựa Superpave bằng phương pháp cơ học thực nghiệm ở các vùng khí hậu Việt Nam

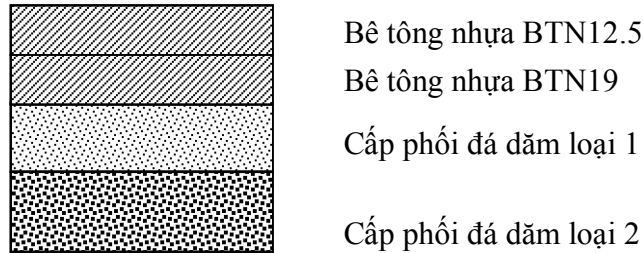
4.2.1. Kết cấu áo đường nghiên cứu

Tuyến đường phân tích là Quốc lộ 1, cấp III-ĐB, vận tốc thiết kế $V=80\text{km/h}$, vận tốc xe tải và xe khách 60km/h , 4 làn xe, chiều rộng làn xe 3.5m , có dải phân cách giữa. Lưu lượng xe trung bình năm đầu 3000 xe/nd . Hệ số tăng trưởng xe 3% năm.

Điều kiện khí hậu MERRA-2 từng giờ trong 32 năm liên tục cho 3 trạm điển hình Việt Nam trải theo vĩ độ thấp dần từ Bắc xuống Nam: Hà Nội, Nghệ An, Đồng Nai.

Thời gian tính toán kết cấu $t=15$ năm. Độ tin cậy thiết kế $R=90\%$.

Phương án kết cấu đề xuất: đề xuất kết cấu như Hình 4-3.



Hình 4-3. Kết cấu mặt đường nghiên cứu

Chiều dày các lớp được bố trí theo cấu tạo và tính toán bằng các phương pháp AASHTO-1993 và cơ học thực nghiệm MEPDG.

4.2.2. Tính toán kết cấu theo AASHTO-1993, TCCS 37:2022/TCĐBVN

Đường quốc lộ 1, cấp III-ĐB, độ tin cậy $R=90\%$, đảm bảo thoát nước tốt, vận tốc xe tải tính toán $V=60\text{km/h}$, 4 làn xe, có dải phân cách $DD=0,5$; $DL=0,8$.

Từ lưu lượng xe trung bình năm đầu 3000 xe/nđ, hệ số tăng trưởng xe 3% năm tính ra được $W18=9292564$ ESAL18kip/1 làn xe tích lũy trong 15 năm khai thác.

Các thông số của phương trình $S0=0,45$; $ZR=-1,282$; $P0=4,2$; $Pt=2,2$; $\Delta\text{PSI}=2,0$.

Các thông số vật liệu và hệ số thoát nước:

Lớp BTN12,5: Hệ số $a=0,44$; Hệ số thoát nước $m=1,00$

Lớp BTN19: Hệ số $a=0,40$; Hệ số thoát nước $m=1,00$

Lớp CPĐD1: Hệ số $a=0,12$; Hệ số thoát nước $m=0,90$

Lớp CPĐD2: Hệ số $a=0,102$; Hệ số thoát nước $m=0,90$

Nền đường: $M_R=50\text{MPa}$; $\text{CBR}\geq 8\%$

Giải phương trình AASHTO 1993 được chỉ số kết cấu $\text{SN}=4,745$ và chiều dày các lớp, đã xét đến điều kiện cấu tạo, điều kiện thi công như sau:

Lớp BTN12,5: dày 7cm

Lớp BTN19: dày 8cm

Lớp CPĐD loại 1: dày 30cm

Lớp CPĐD loại 2: dày 30cm

4.2.3. Nghiên cứu xác định các thông số đầu vào

4.2.3.1. Các thông số về giao thông

Lưu lượng xe thiết kế năm đầu 3000 xe/nđ cho cả 2 chiều, mỗi chiều 2 làn xe.

Thời gian tính toán 15 năm.

Hệ số tăng trưởng xe hàng năm 3% theo mô hình hàm mũ.

Tỷ lệ xe tải/xe khách theo hướng 50%.

Tỷ lệ xe tải/xe khách chạy trên làn tính toán 80%.

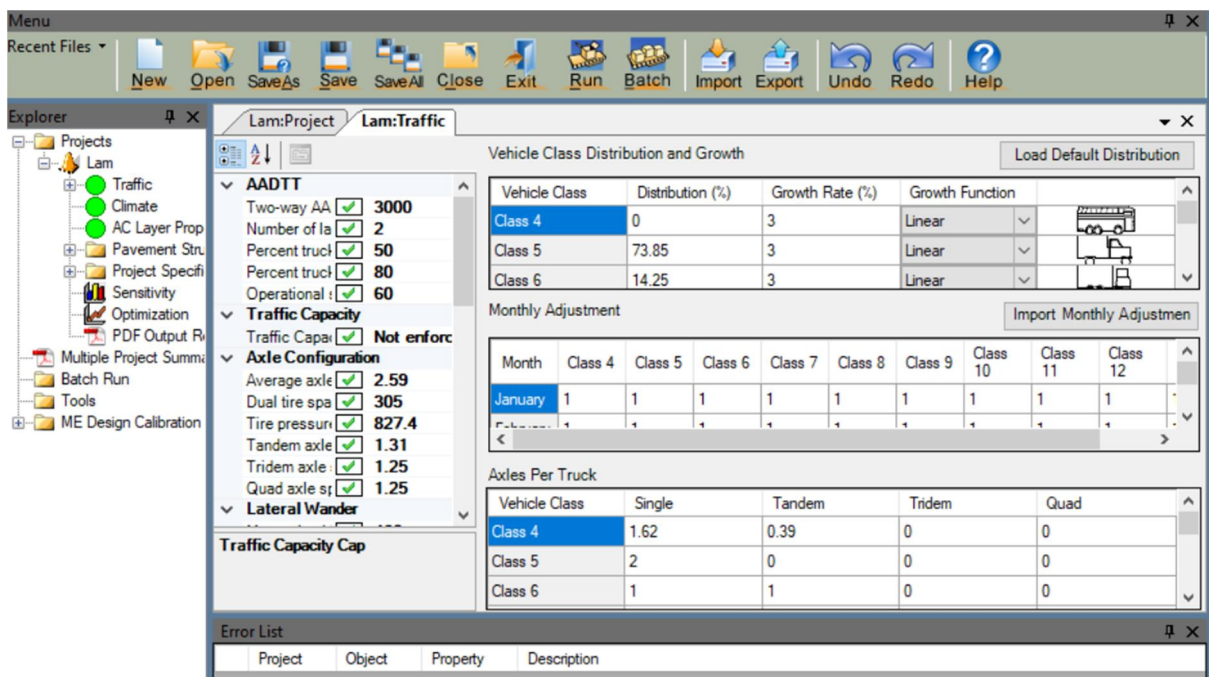
Độ lệch chuẩn (hay độ dao động) của bánh xe chạy theo phương ngang trên mặt đường 10in (25,4cm).

Áp lực bánh xe tiêu chuẩn 120psi (827,37kPa).

Khoảng cách 2 bánh kép 12in (30,48cm)

Khoảng cách các trục trong cụm trục: 51,6in (131,1cm) với cụm trục đôi; 49,2in (125cm) với cụm trục ba và cụm trục tứ

Các thông số khác lấy theo mặc định chương trình như Hình 4-4.



Hình 4-4. Nhập số liệu giao thông

4.2.3.2. Các tiêu chuẩn giới hạn

Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế đề xuất như Bảng 4-1. Mặc định của chương trình tổng chiều sâu LVBX của toàn kết cấu giới hạn 0,75in và chiều sâu LVBX trong các lớp BTN là 0,25in để đảm bảo tuổi thọ kết cấu và an toàn chạy xe, nhất là về mùa đông nước đóng băng vào chỗ lún. Tuy nhiên với điều kiện Việt Nam giới hạn trên rất khó đạt được vì tỷ lệ xe quá tải trong dòng xe nhiều, trình độ thi công, quản lý khai thác chưa cao và Việt Nam cũng không có đóng băng dài ngày trên vệt bánh nên đề xuất tổng chiều sâu LVBX giới hạn là 1 in (25,4mm) và chiều sâu LVBX trong các lớp BTN là 0,5 in (12,5mm). Đề xuất này cũng phù hợp với các quy định khai thác đường hiện nay.

Các giới hạn khác được lấy theo mặc định ứng với đường trục quan trọng, độ tin cậy 90%.

Bảng 4-1. Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế

Tiêu chuẩn	Hệ US	Hệ SI	Độ tin cậy, %
Độ gồ ghề IRI ban đầu	63,00 (in/mile)	1,00 (m/km)	90,00
Độ gồ ghề IRI cuối cùng	172,00 (in/mile)	2,71 (m/km)	90,00
Tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu	1,00 (in)	25,4 (mm)	90,00
Nứt mới từ dưới lên của lớp bê tông nhựa	25,00 (% diện tích làn)	25,00 (% diện tích làn)	90,00
Nứt mới từ trên xuống của lớp bê tông nhựa	2000 (ft/mile)	378,8 (m/km)	90,00
Chiều sâu LVBX trong các lớp bê tông nhựa	0,50 (in)	12,5 (mm)	90,00

4.2.3.3. Các thông số khí hậu

Thông số khí hậu được lấy từ trạm MERRA-2 trong khoảng thời gian từ năm 1985 đến năm 2020 cho 3 trạm điển hình Việt Nam: Hà Nội, Nghệ An, Đồng Nai. Số liệu được nhập (Hình 4-5) vào MEPDG bao gồm:

Nhiệt độ không khí - Temperature theo giờ trong khu vực thiết kế

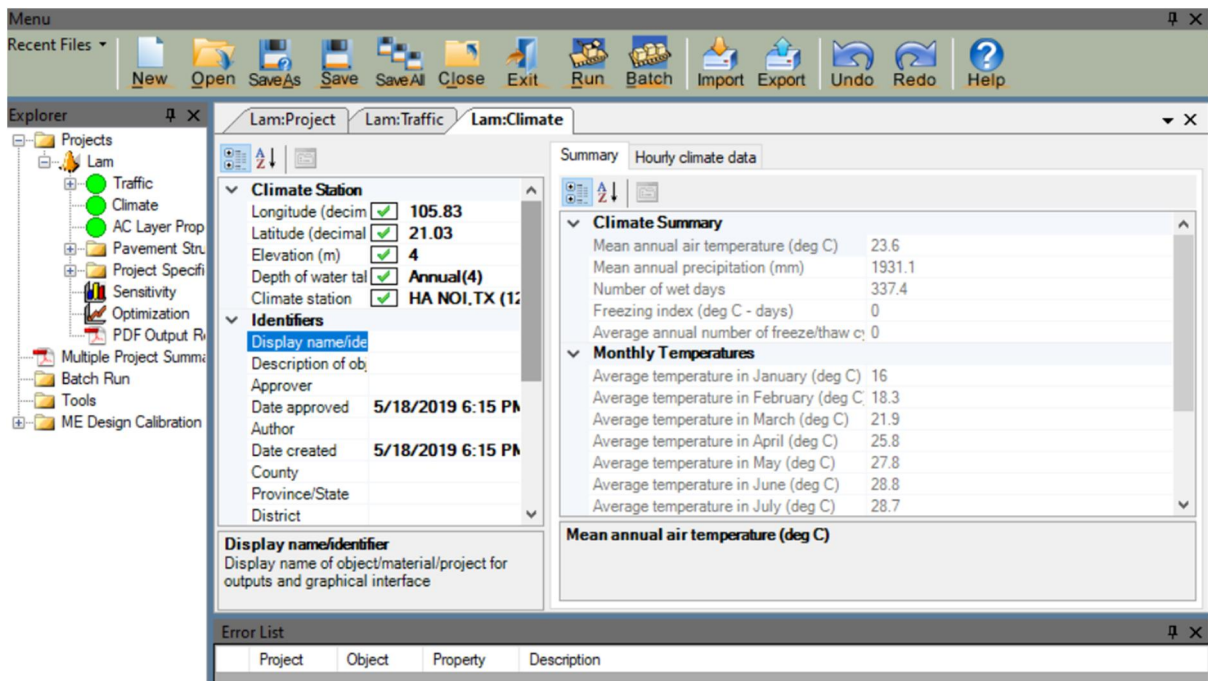
Lượng mưa - Precipitation theo giờ trong khu vực thiết kế

Vận tốc gió - Wind Speed theo giờ trong khu vực thiết kế

Tỷ lệ phân trăm nắng (thông qua độ che phủ của mây) - Cloud Cover theo giờ trong khu vực thiết kế

Độ ẩm tương đối - Relative Humidity môi trường theo giờ trong khu vực thiết kế

Chiều sâu từ đáy lớp kết cấu tới mực nước ngầm: lấy giá trị không đổi 10ft (3,048m)



Hình 4-5. Nhập số liệu khí hậu

4.2.3.4. Thông số các lớp vật liệu và nền đất

Thông số của các lớp bê tông nhựa: các đặc tính thể tích, loại nhựa PG lấy theo kết quả thực nghiệm của đề tài; một số thông số về nhiệt, mô đun phức động lấy theo mức 3 và mặc định của chương trình.

Thông số của lớp cấp phối đá dăm và nền đất theo mức 2, 3 phụ thuộc vào loại vật liệu, cấp phối và chỉ số CBR.

4.2.4. Phân tích kết cấu mặt đường

Để tổng quát quá trình phân tích phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo phương pháp cơ học thực nghiệm, tiến hành phân tích ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến hàm trạng thái giới hạn. Việc lựa chọn các thông số đầu vào từ kinh nghiệm phân tích kết cấu, đảm bảo ảnh hưởng đáng kể đến hàm giới hạn đầu ra. Các thông số đầu vào và mức biến thiên được tập hợp ở Bảng 4-2.

Bảng 4-2. Các thông số đầu vào, mức biến thiên

TT	Tên thông số	Mức	Các mức biến thiên		
1	Khí hậu	3	Hà Nội	Nghệ An	Đồng Nai
2	Loại BTN	2	12,5	19	
3	Loại đá	2	Vôi	Bazan	
4	Loại nhựa	3	PG64-22	PG64-16	PG82-22
5	HLN	3	Pb-0,5	Pb	Pb+0,5

Đối với phương pháp MEPDG có 4 hàm đầu ra là: Tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu (mm); Chiều sâu LVBX trong các lớp bê tông nhựa (mm); Nứt mỗi từ dưới lên của lớp bê tông nhựa (% diện tích); Nứt mỗi từ trên xuống của lớp bê tông nhựa (m/km).

Sử dụng phần mềm Minitab quy hoạch thực nghiệm (DOE) xác định được 108 lần phân tích kết cấu. Tiến hành phân tích thống kê mức độ ảnh hưởng của các thông số đến hàm đầu ra.

Sau khi thiết kế quy hoạch 108 bài toán, tiến hành tính toán từng trường hợp. Kết quả tính toán được tổng hợp ở Bảng 4-3.

Bảng 4-3. Kết quả phân tích kết cấu theo MEPDG

STT	Khí hậu	Loại BTN	Loại đá	Loại nhựa	HLN	Tổng lún (mm)	Lún BTN (mm)	Nứt từ dưới lên (%)	Nứt từ trên xuống (m/km)
1	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb-0,5	36.21	22.52	4.37	181.90
2	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb	36.00	22.33	4.26	114.04
3	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb+0,5	35.81	22.15	4.17	87.67
4	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb-0,5	35.56	21.92	4.17	180.16
5	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb	35.34	21.70	4.04	114.35
6	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb+0,5	35.19	21.57	3.96	87.32
7	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb-0,5	33.84	20.21	3.96	193.77
8	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb	33.59	19.99	3.87	120.86
9	Hà Nội	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb+0,5	33.44	19.84	3.79	90.57
10	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb-0,5	36.09	22.41	4.37	190.27
11	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb	35.90	22.24	4.22	121.44
12	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb+0,5	35.84	22.17	4.17	89.89
13	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb-0,5	35.47	21.81	4.12	192.75
14	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb	35.19	21.58	4.00	118.22
15	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb+0,5	35.13	21.51	3.96	88.87
16	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb-0,5	33.68	20.05	3.91	217.76
17	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb	33.50	19.89	3.84	125.75
18	Hà Nội	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb+0,5	33.38	19.78	3.79	91.76
19	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb-0,5	36.15	22.47	4.27	229.19
20	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb	35.60	21.97	4.08	122.31
21	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb+0,5	35.54	21.93	4.04	94.44

STT	Khí hậu	Loại BTN	Loại đá	Loại nhựa	HLN	Tổng lún (mm)	Lún BTN (mm)	Nứt từ dưới lên (%)	Nứt từ trên xuống (m/km)
22	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb-0,5	35.41	21.78	4.04	226.60
23	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb	34.91	21.32	3.87	120.42
24	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb+0,5	34.89	21.31	3.84	96.26
25	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb-0,5	33.65	20.03	3.87	232.53
26	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb	33.19	19.62	3.68	128.57
27	Hà Nội	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb+0,5	33.13	19.56	3.64	96.59
28	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb-0,5	35.96	22.28	4.22	235.87
29	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb	35.54	21.91	4.04	126.32
30	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb+0,5	35.56	21.93	4.04	95.10
31	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb-0,5	35.35	21.71	4.04	225.71
32	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb	34.88	21.29	3.87	127.45
33	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb+0,5	34.85	21.27	3.83	90.57
34	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb-0,5	33.65	20.03	3.87	249.34
35	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb	33.16	19.58	3.68	131.50
36	Hà Nội	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb+0,5	33.13	19.56	3.65	94.93
37	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb-0,5	53.15	38.73	12.87	215.03
38	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb	52.87	38.48	12.59	135.33
39	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb+0,5	52.56	38.19	12.39	102.42
40	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb-0,5	52.22	37.84	12.20	220.43
41	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb	51.88	37.53	11.91	140.30
42	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb+0,5	51.67	37.33	11.71	104.64
43	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb-0,5	48.02	33.72	10.82	250.11
44	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb	47.72	33.44	10.51	157.81
45	Nghệ An	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb+0,5	47.50	33.25	10.22	115.25
46	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb-0,5	52.93	38.52	12.77	225.73
47	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb	52.68	38.28	12.58	145.40
48	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb+0,5	52.62	38.23	12.39	105.27
49	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb-0,5	51.97	37.61	12.10	236.67
50	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb	51.63	37.29	11.81	146.30

STT	Khí hậu	Loại BTN	Loại đá	Loại nhựa	HLN	Tổng lún (mm)	Lún BTN (mm)	Nứt từ dưới lên (%)	Nứt từ trên xuống (m/km)
51	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb+0,5	51.55	37.22	11.62	106.99
52	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb-0,5	47.72	33.44	10.62	281.01
53	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb	47.54	33.28	10.42	165.69
54	Nghệ An	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb+0,5	47.41	33.16	10.22	117.33
55	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb-0,5	53.21	38.81	12.77	270.39
56	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb	52.32	37.97	12.10	148.87
57	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb+0,5	52.25	37.89	11.91	111.62
58	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb-0,5	52.07	37.73	12.00	277.74
59	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb	51.30	36.99	11.31	152.89
60	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb+0,5	51.30	37.00	11.22	118.96
61	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb-0,5	47.81	33.55	10.52	300.00
62	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb	47.19	32.96	9.91	176.96
63	Nghệ An	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb+0,5	47.14	32.93	9.81	127.17
64	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb-0,5	52.84	38.44	12.58	281.01
65	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb	52.19	37.85	12.01	155.49
66	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb+0,5	52.29	37.93	12.01	114.19
67	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb-0,5	51.94	37.58	11.91	277.10
68	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb	51.21	36.92	11.31	162.51
69	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb+0,5	51.18	36.89	11.21	109.63
70	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb-0,5	47.81	33.54	10.52	318.77
71	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb	47.11	32.89	9.82	178.30
72	Nghệ An	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb+0,5	47.14	32.92	9.82	124.47
73	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb-0,5	37.92	24.12	6.27	200.78
74	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb	37.70	23.92	6.04	125.18
75	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG64-22	Pb+0,5	37.48	23.71	5.90	94.77
76	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb-0,5	37.27	23.50	5.89	198.82
77	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb	37.02	23.27	5.68	125.75
78	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG64-16	Pb+0,5	36.83	23.11	5.54	94.44
79	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb-0,5	35.55	21.81	5.54	214.10

STT	Khí hậu	Loại BTN	Loại đá	Loại nhựa	HLN	Tổng lún (mm)	Lún BTN (mm)	Nứt từ dưới lên (%)	Nứt từ trên xuống (m/km)
80	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb	35.27	21.56	5.34	132.88
81	Đồng Nai	BTN12,5	Vôi	PG82-22	Pb+0,5	35.08	21.39	5.21	98.06
82	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb-0,5	37.79	24.00	6.19	210.38
83	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb	37.61	23.82	6.04	133.83
84	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG64-22	Pb+0,5	37.52	23.75	5.96	97.57
85	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb-0,5	37.14	23.38	5.82	213.19
86	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb	36.86	23.13	5.61	130.11
87	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG64-16	Pb+0,5	36.77	23.05	5.54	96.26
88	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb-0,5	35.36	21.63	5.41	239.94
89	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb	35.15	21.45	5.27	138.57
90	Đồng Nai	BTN12,5	Bazan	PG82-22	Pb+0,5	35.02	21.33	5.15	99.36
91	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb-0,5	37.86	24.06	6.12	252.39
92	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb	37.27	23.52	5.69	135.06
93	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG64-22	Pb+0,5	37.18	23.46	5.61	102.90
94	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb-0,5	37.08	23.35	5.69	250.13
95	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb	36.53	22.85	5.34	133.01
96	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG64-16	Pb+0,5	36.50	22.82	5.27	104.64
97	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb-0,5	35.30	21.60	5.34	256.12
98	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb	34.80	21.13	5.02	142.01
99	Đồng Nai	BTN19	Vôi	PG82-22	Pb+0,5	34.74	21.08	4.96	105.27
100	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb-0,5	37.64	23.87	6.04	259.80
101	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb	37.18	23.45	5.69	139.76
102	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG64-22	Pb+0,5	37.18	23.44	5.61	102.10
103	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb-0,5	36.99	23.27	5.68	249.34
104	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb	36.50	22.81	5.34	141.22
105	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG64-16	Pb+0,5	36.43	22.74	5.22	96.75
106	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb-0,5	35.33	21.60	5.34	273.76
107	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb	34.77	21.09	4.97	145.27
108	Đồng Nai	BTN19	Bazan	PG82-22	Pb+0,5	34.74	21.08	4.96	103.38

4.3. Đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chống nứt của kết cấu mặt đường BTN Superpave

Trên cơ sở kết quả phân tích kết cấu mặt đường bê tông nhựa Superpave bằng phương pháp cơ học thực nghiệm ở các vùng khí hậu Việt Nam, sử dụng phần mềm Minitab để phân tích thống kê.

4.3.1. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến nứt mỗi từ dưới lên của BTN

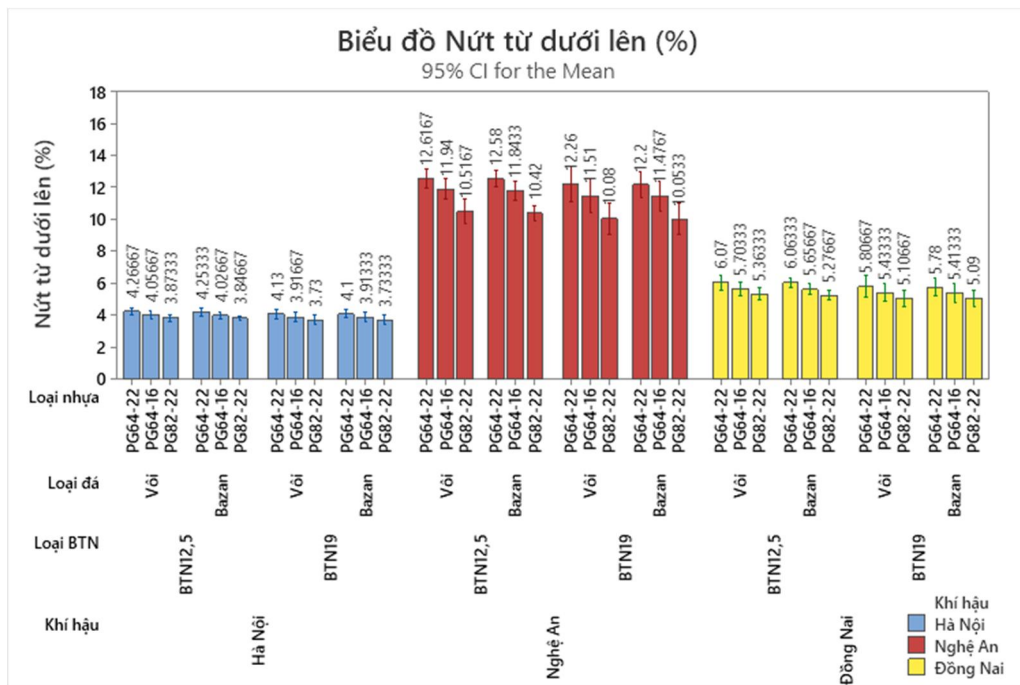
Kết quả phân tích mô hình phương sai-hồi quy sau khi đã loại các biến không có ý nghĩa thống kê được đưa ra tại Bảng 4-4.

Bảng 4-4. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu nứt mỗi từ dưới lên của BTN

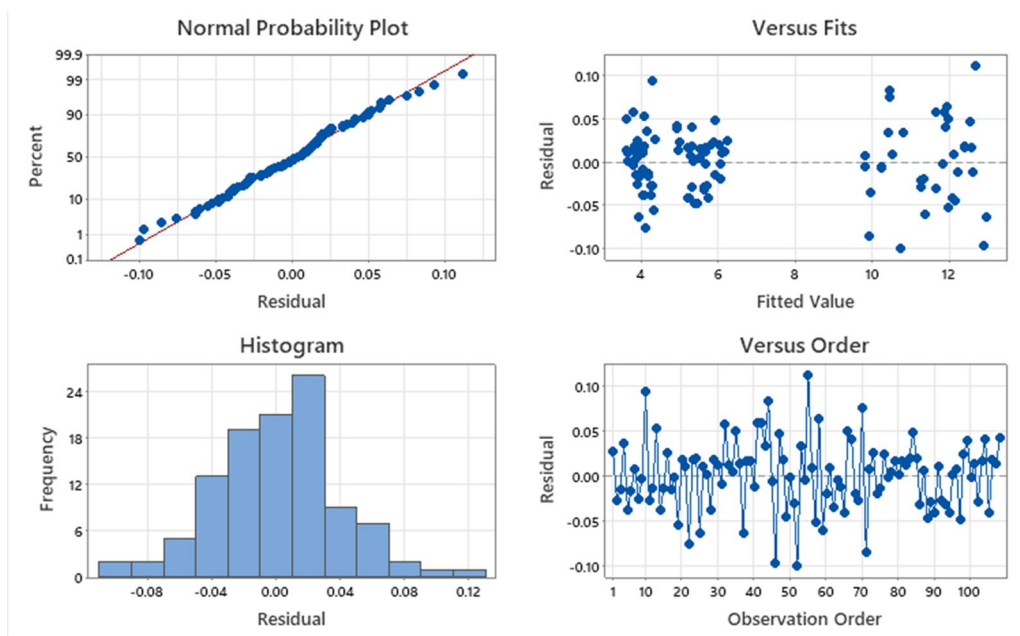
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	22	1154.97	52.499	28124.33	0.000
Bậc nhất	8	1142.77	142.846	76524.57	0.000
Khí hậu	2	1116.51	558.257	299066.23	0.000
Loại BTN	1	1.79	1.794	961.14	0.000
Loại đá	1	0.04	0.036	19.06	0.000
Loại nhựa	2	21.52	10.759	5763.78	0.000
HLN	2	2.91	1.453	778.18	0.000
Tương tác 2 chiều	14	12.21	0.872	467.05	0.000
Khí hậu*Loại BTN	2	0.30	0.148	79.25	0.000
Khí hậu*Loại nhựa	4	11.16	2.791	1494.95	0.000
Khí hậu*HLN	4	0.53	0.132	70.94	0.000
Loại BTN*HLN	2	0.20	0.099	53.27	0.000
Loại đá*HLN	2	0.02	0.009	5.06	0.008
Sai số	85	0.16	0.002		
Tổng	107	1155.13			

Tổng hợp mô hình

<u>S</u>	<u>R-sq</u>	<u>R-sq(adj)</u>	<u>R-sq(pred)</u>
0.0432049	99.99%	99.98%	99.98%



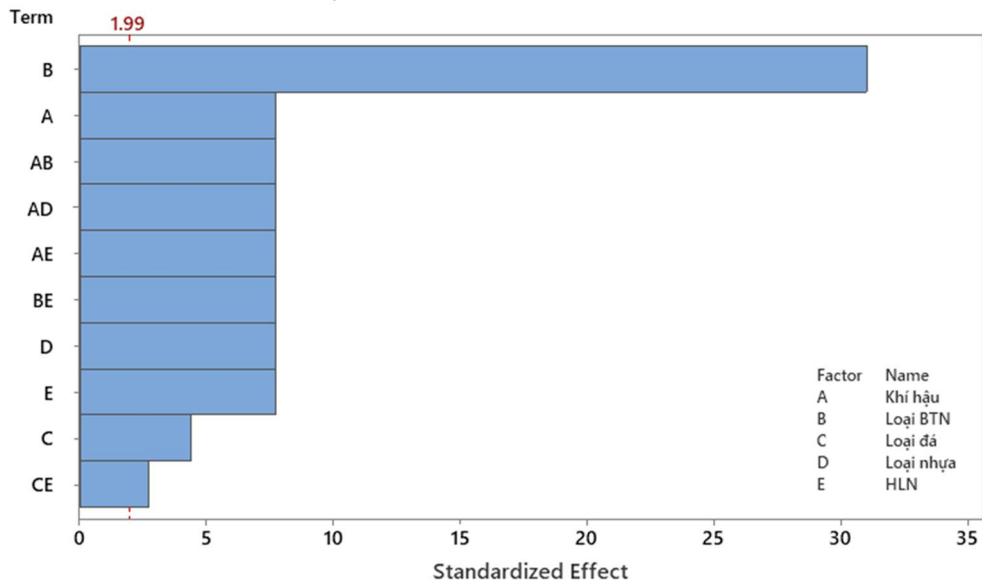
Hình 4-6. Biểu đồ nút mỗi từ dưới lên của BTN



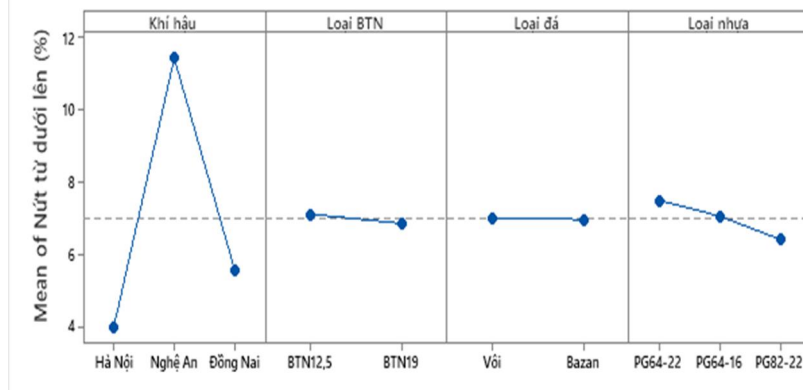
Hình 4-7. Biểu đồ phân tích phân dư tập mẫu nút mỗi từ dưới lên của BTN

Pareto Chart of the Standardized Effects

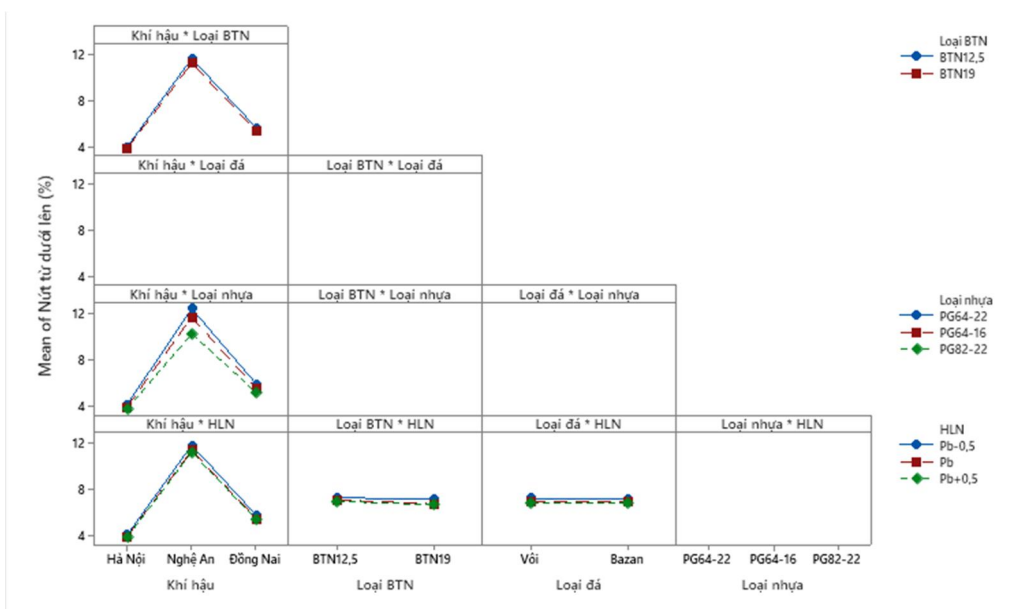
(response is Nứt từ dưới lên (%), $\alpha = 0.05$)



Hình 4-8. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến nứt mỗi từ dưới lên của BTN



Hình 4-9. Các biến ảnh hưởng chính tới nứt mỗi từ dưới lên của BTN



Hình 4-10. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới nứt mỗi từ dưới lên của BTN

Nhận xét: Trên cơ sở kết quả phân tích thống kê từ tập mẫu nút mối từ dưới lên của BTN cho thấy:

- Hình 4-7 biểu đồ phần dư của nút mối từ dưới lên của BTN tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các điểm phân bố ngẫu nhiên.

- Kết quả phân tích phương sai hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 99,98\%$, các biến đều có hệ số p-value < 0,05 đảm bảo mức ý nghĩa 95%.

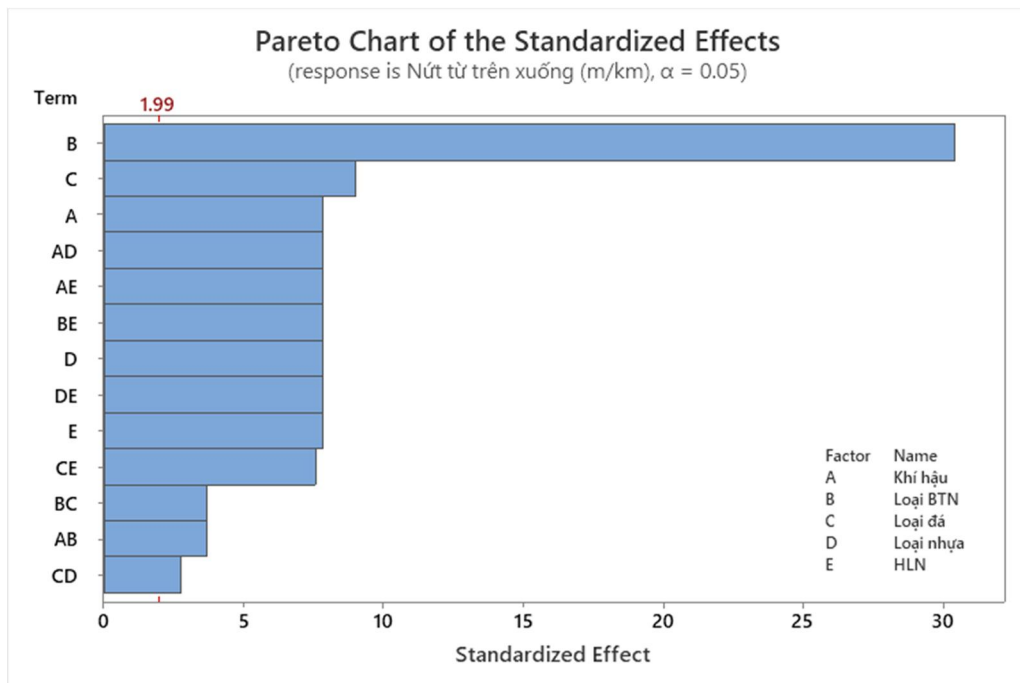
- Kết quả biểu đồ Pareto ở Hình 4-8 cho thấy tất cả các biến khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN có ảnh hưởng đến nút mối từ dưới lên của BTN có ý nghĩa thống kê. Do vậy có thể kết luận rằng: Có sự ảnh hưởng của khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN đến khả năng chống nút mối từ dưới lên của BTN. Ảnh hưởng lớn nhất là khí hậu, trong đó vùng khí hậu Nghệ An có nút mối từ dưới lên của BTN lớn nhất, sau đó đến Đồng Nai và Hà Nội. Các thông số khác ảnh hưởng đến nút mối từ dưới lên của BTN không nhiều (xem Hình 4-9 và Hình 4-10).

4.3.2. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến nút mối từ trên xuống của BTN

Kết quả phân tích mô hình phương sai-hồi quy sau khi đã loại các biến không có ý nghĩa thống kê được đưa ra tại Bảng 4-5.

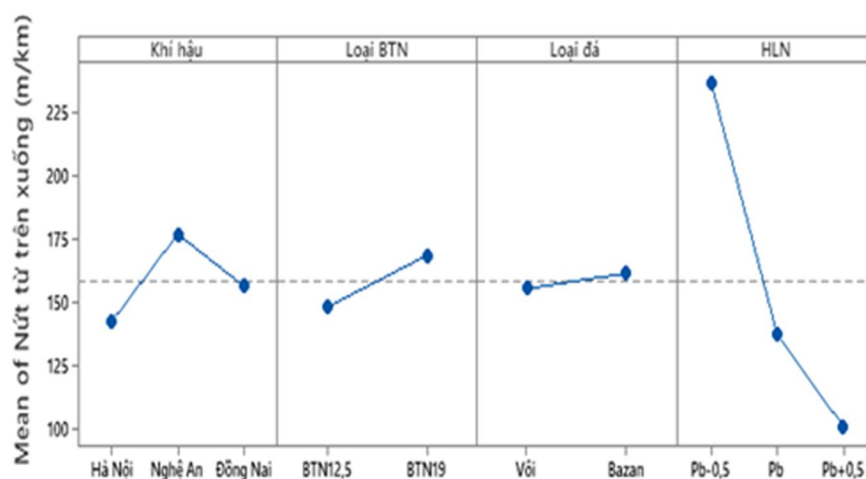
Bảng 4-5. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu nút mối từ trên xuống của BTN

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	29	405984	13999	1155.06	0.000
Bậc nhất	8	391644	48955	4039.17	0.000
Khí hậu	2	21844	10922	901.13	0.000
Loại BTN	1	11196	11196	923.76	0.000
Loại đá	1	985	985	81.27	0.000
Loại nhựa	2	4274	2137	176.32	0.000
HLN	2	353344	176672	14576.71	0.000
Tương tác 2 chiều	21	14341	683	56.34	0.000
Khí hậu*Loại BTN	2	206	103	8.51	0.000
Khí hậu*Loại nhựa	4	1321	330	27.24	0.000
Khí hậu*HLN	4	2499	625	51.55	0.000
Loại BTN*Loại đá	1	164	164	13.51	0.000
Loại BTN*HLN	2	7980	3990	329.20	0.000
Loại đá*Loại nhựa	2	127	64	5.25	0.007
Loại đá*HLN	2	779	389	32.13	0.000
Loại nhựa*HLN	4	1265	316	26.10	0.000
Sai số	78	945	12		

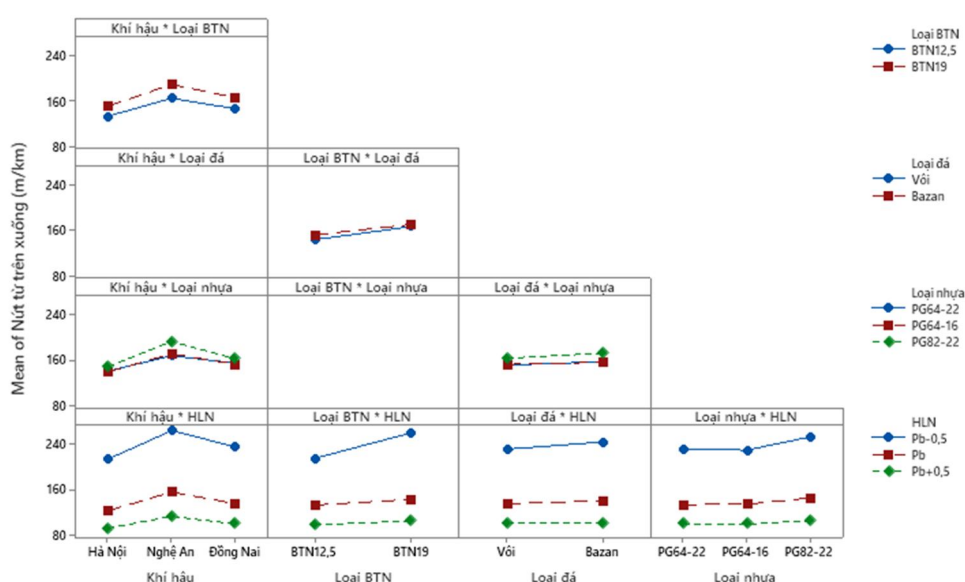


Hình 4-13. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến nứt mỗi từ dưới lên của BTN
Kết quả phân tích thống kê từ tập mẫu nứt mỗi từ trên xuống của BTN cho thấy:

- Phân dư tuân của nứt mỗi từ trên xuống của BTN theo quy luật phân bố chuẩn, các điểm phân bố ngẫu nhiên, thỏa mãn các điều kiện của phân tích thống kê (Hình 4-12).
- Kết quả phân tích phương sai hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc} = 99,68\%$, các biến đều có hệ số p-value < 0,05 đảm bảo mức ý nghĩa 95%.
- Kết quả biểu đồ Pareto ở Hình 4-13 cho thấy tất cả các biến khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN có ảnh hưởng đến nứt mỗi từ trên xuống của BTN có ý nghĩa thống kê. Do vậy có thể kết luận rằng: có sự ảnh hưởng của khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN đến khả năng chống nứt mỗi từ trên xuống của BTN.



Hình 4-14. Các biến ảnh hưởng chính tới nứt mỗi từ dưới lên của BTN



Hình 4-15. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới nút môi từ dưới lên của BTN. Hình 4-14 và Hình 4-15 là biểu đồ các biến ảnh hưởng chính tới nút môi từ trên xuống của BTN. Ảnh hưởng lớn nhất đến nút môi từ trên xuống của BTN là HLN, trong đó HLN (Pb-0,5) có nút môi từ trên xuống lớn nhất. Tiếp đến là khí hậu, trong đó vùng khí hậu Nghệ An có nút môi từ trên xuống lớn nhất, sau đó đến Đồng Nai và Hà Nội. Các thông số khác ảnh hưởng đến nút môi từ dưới lên của BTN không nhiều.

4.3.3. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu

Kết quả phân tích mô hình phương sai-hồi quy sau khi đã loại các biến không có ý nghĩa thống kê được đưa ra tại Bảng 4-6.

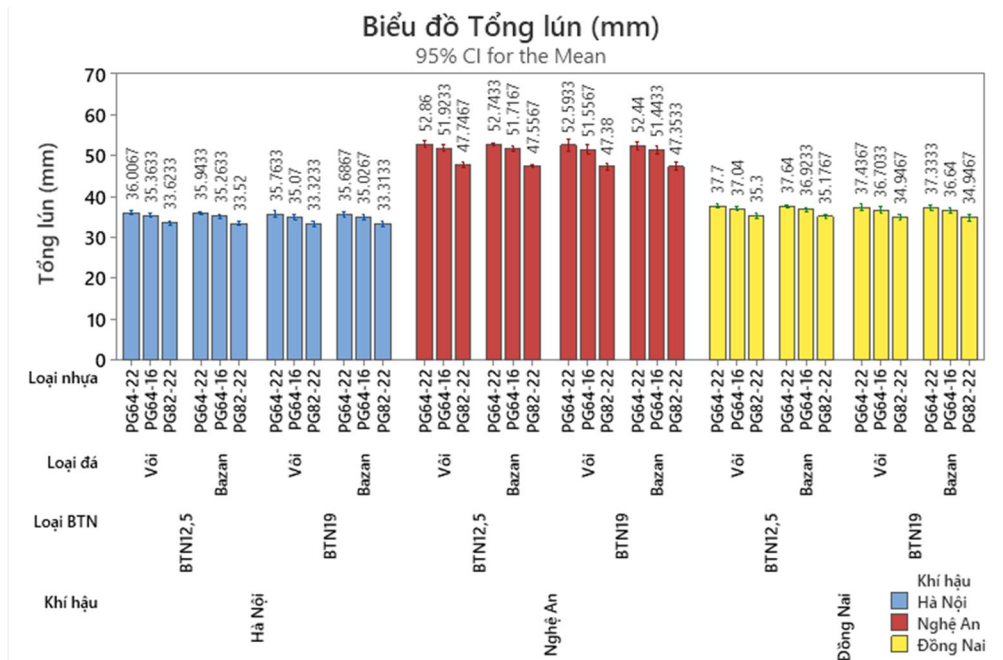
Bảng 4-6. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	23	5679.49	246.93	120518.03	0.000
Bậc nhất	8	5643.06	705.38	344266.95	0.000
Khí hậu	2	5417.57	2708.78	1322039.87	0.000
Loại BTN	1	2.16	2.16	1053.72	0.000
Loại đá	1	0.23	0.23	113.43	0.000
Loại nhựa	2	217.99	108.99	53194.99	0.000
HLN	2	5.12	2.56	1249.39	0.000
Tương tác 2 chiều	15	36.43	2.43	1185.26	0.000
Khí hậu*Loại đá	2	0.02	0.01	5.87	0.004
Khí hậu*Loại nhựa	4	35.70	8.93	4356.49	0.000
Khí hậu*HLN	4	0.11	0.03	13.24	0.000
Loại BTN*Loại đá	1	0.02	0.02	9.77	0.002
Loại BTN*HLN	2	0.51	0.25	123.36	0.000

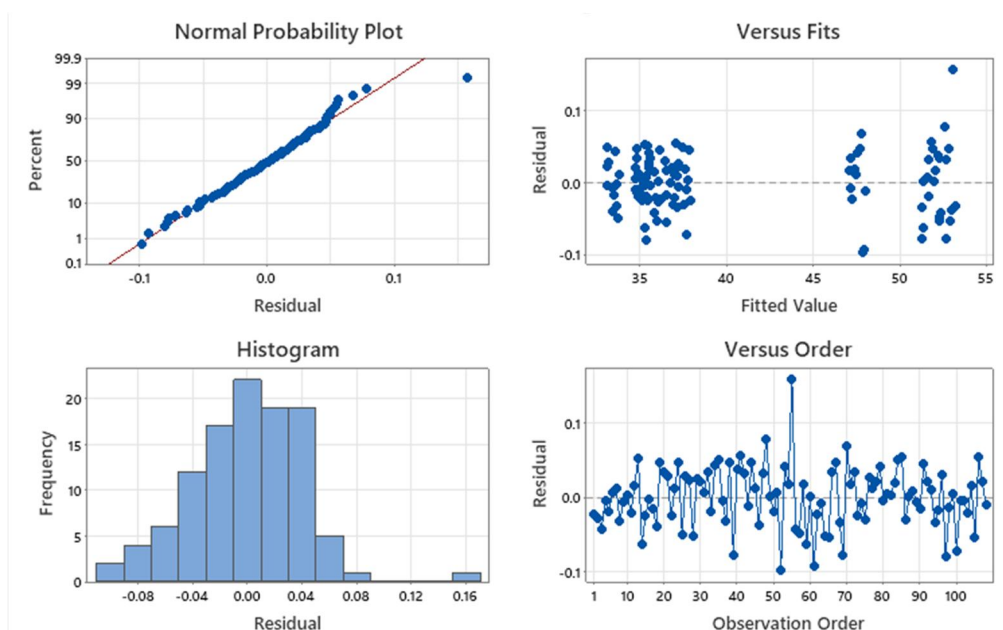
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Loại đá*HLN	2	0.07	0.03	15.91	0.000
Sai số	84	0.17	0.00		
Tổng	107	5679.66			

Tổng hợp mô hình

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0452652	100.00%	100.00%	99.99%

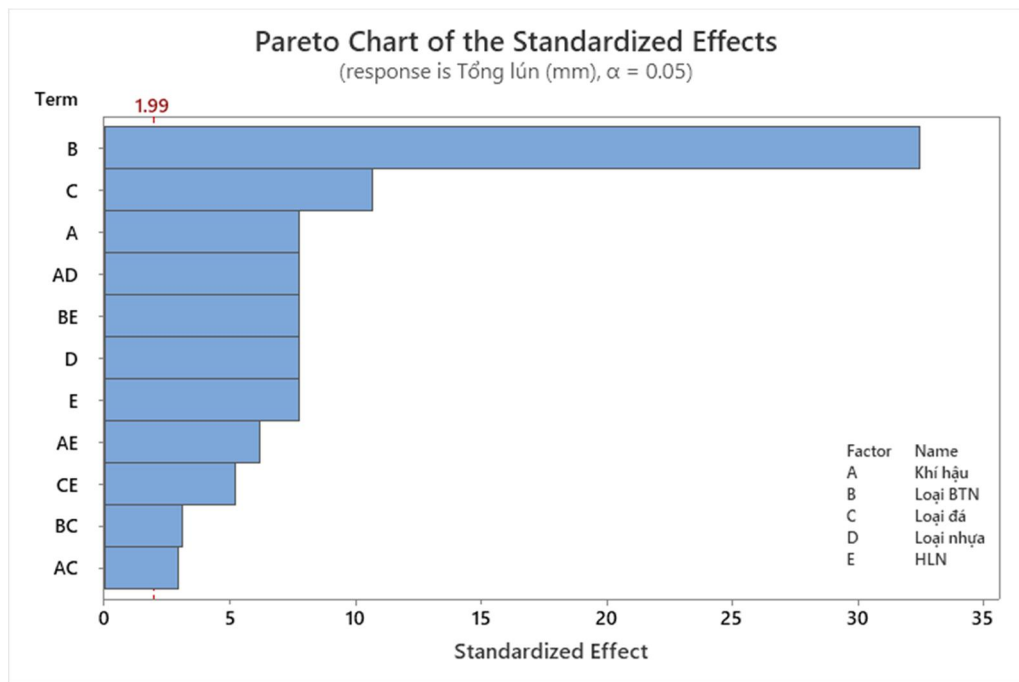


Hình 4-16. Biểu đồ tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu

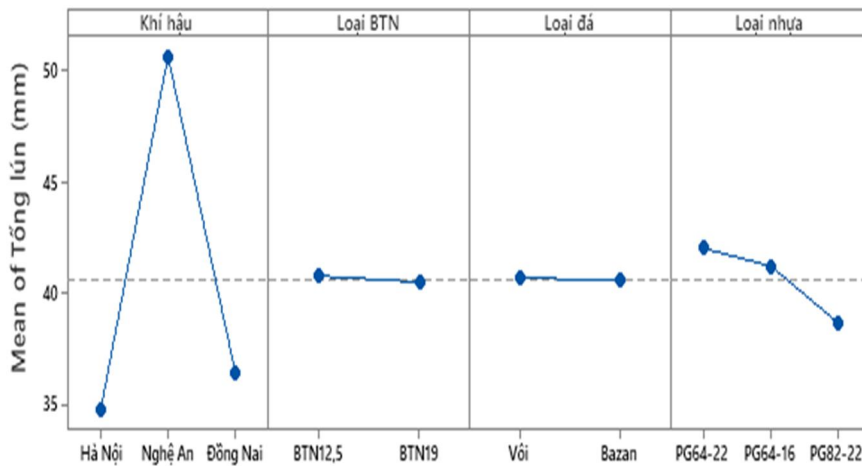


Hình 4-17. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu
 Hình 4-17 là biểu đồ phần dư của tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các điểm phân bố ngẫu nhiên, thỏa mãn các điều kiện của phân

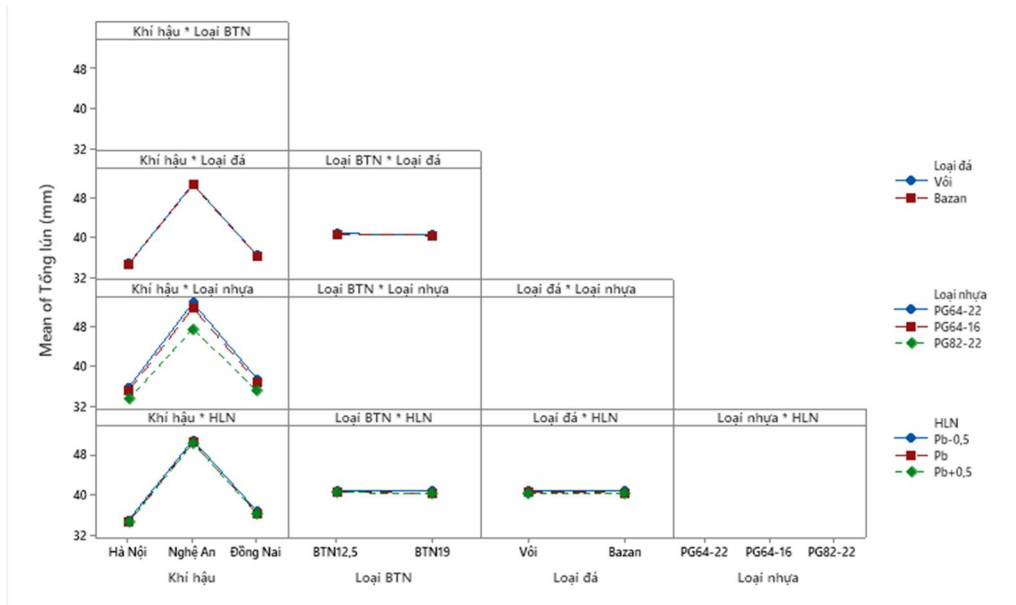
tích thống kê. Kết quả phân tích phương sai hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc} = 100\%$, các biến đều có hệ số $p\text{-value} < 0,05$ đảm bảo mức ý nghĩa 95%.



Hình 4-18. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu cầu



Hình 4-19. Các biến ảnh hưởng chính tới tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu cầu



Hình 4-20. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu

Hình 4-18 là biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu, kết quả cho thấy tất cả các biến khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN có ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu có ý nghĩa thống kê. Do vậy có thể kết luận rằng: có sự ảnh hưởng của khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu.

Hình 4-19 và Hình 4-20 là biểu đồ các biến ảnh hưởng chính tới tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu. Ảnh hưởng lớn nhất đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu là khí hậu, trong đó vùng khí hậu Nghệ An có tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu lớn nhất, sau đó đến Đồng Nai và Hà Nội. Tiếp đến là loại nhựa, nhựa đường PG64-22 có tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu lớn nhất, sau đó đến PG64-16 và PG82-22. Các thông số khác ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu không nhiều.

4.3.4. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến chiều sâu LVBX của BTN

Kết quả phân tích mô hình phương sai-hồi quy sau khi đã loại các biến không có ý nghĩa thống kê được đưa ra tại Bảng 4-7.

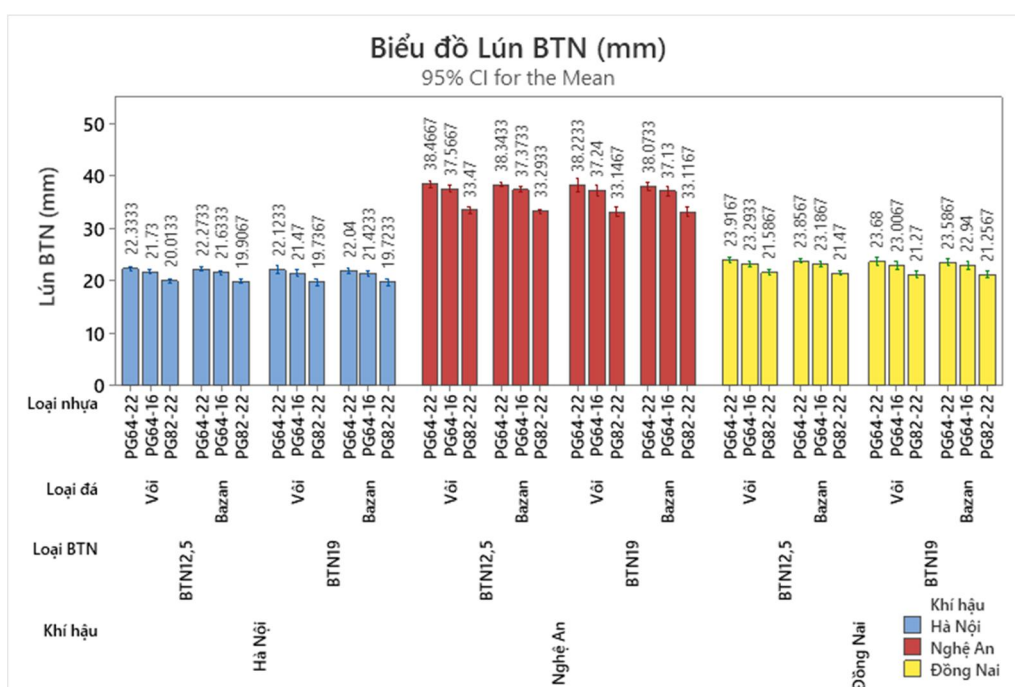
Bảng 4-7. Kết quả chi tiết phân tích sai số tập mẫu chiều sâu LVBX của BTN

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mô hình	23	5206.56	226.37	128245.60	0.000
Bậc nhất	8	5171.94	646.49	366254.52	0.000
Khí hậu	2	4957.79	2478.89	1404356.45	0.000
Loại BTN	1	1.71	1.71	967.38	0.000
Loại đá	1	0.23	0.23	128.01	0.000
Loại nhựa	2	207.93	103.96	58897.68	0.000
HLN	2	4.29	2.15	1216.27	0.000

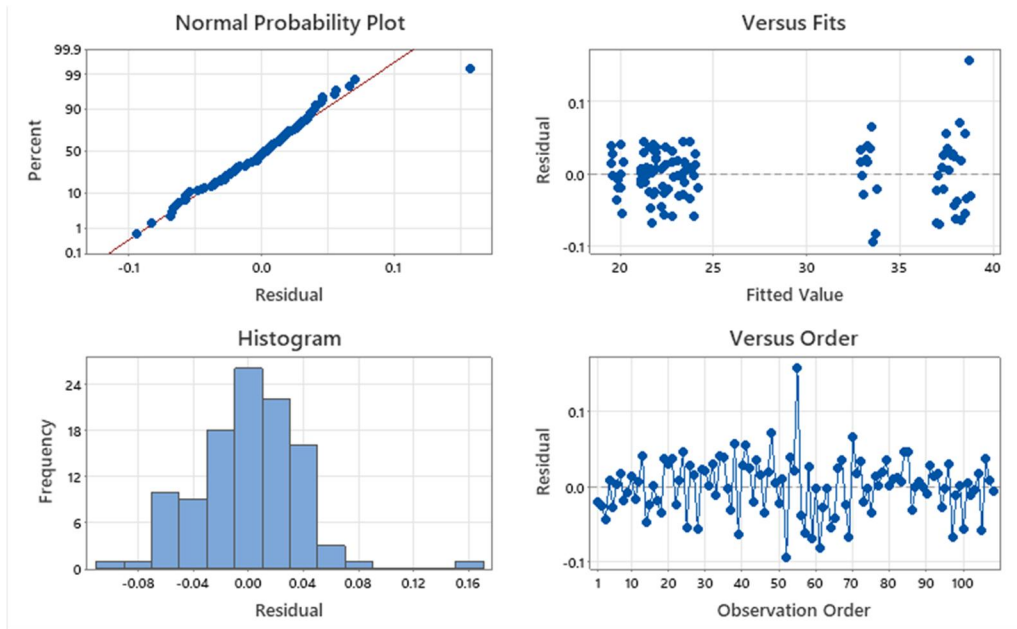
Nguyên	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tương tác 2 chiều	15	34.62	2.31	1307.51	0.000
Khí hậu*Loại đá	2	0.02	0.01	5.93	0.004
Khí hậu*Loại nhựa	4	33.98	8.50	4813.02	0.000
Khí hậu*HLN	4	0.11	0.03	15.09	0.000
Loại BTN*Loại đá	1	0.02	0.02	8.87	0.004
Loại BTN*HLN	2	0.44	0.22	123.39	0.000
Loại đá*HLN	2	0.06	0.03	16.33	0.000
Sai số	84	0.15	0.00		
Tổng	107	5206.71			

Tổng hợp mô hình

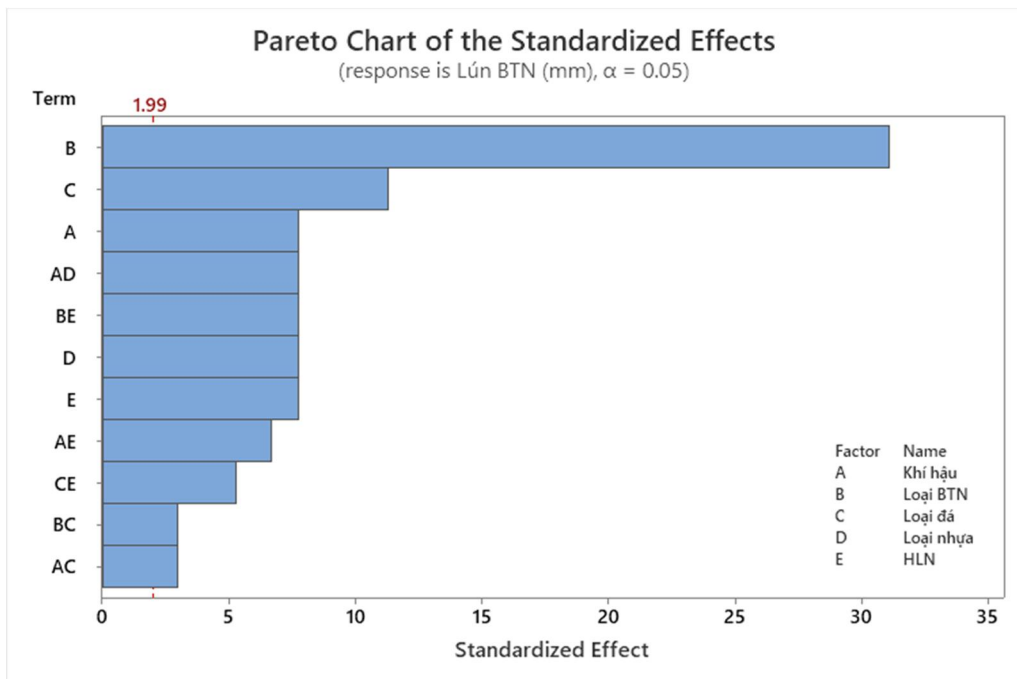
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0420136	100.00%	100.00%	100.00%



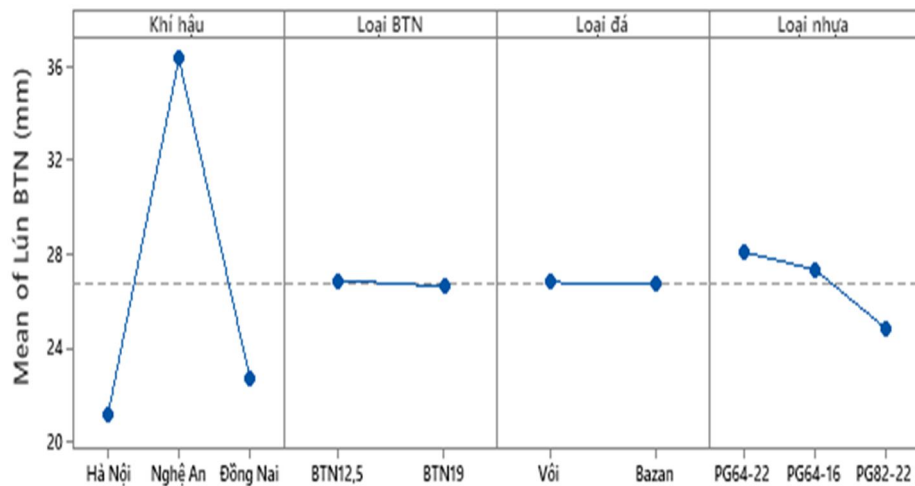
Hình 4-21. Biểu đồ chiều sâu LVBX của BTN



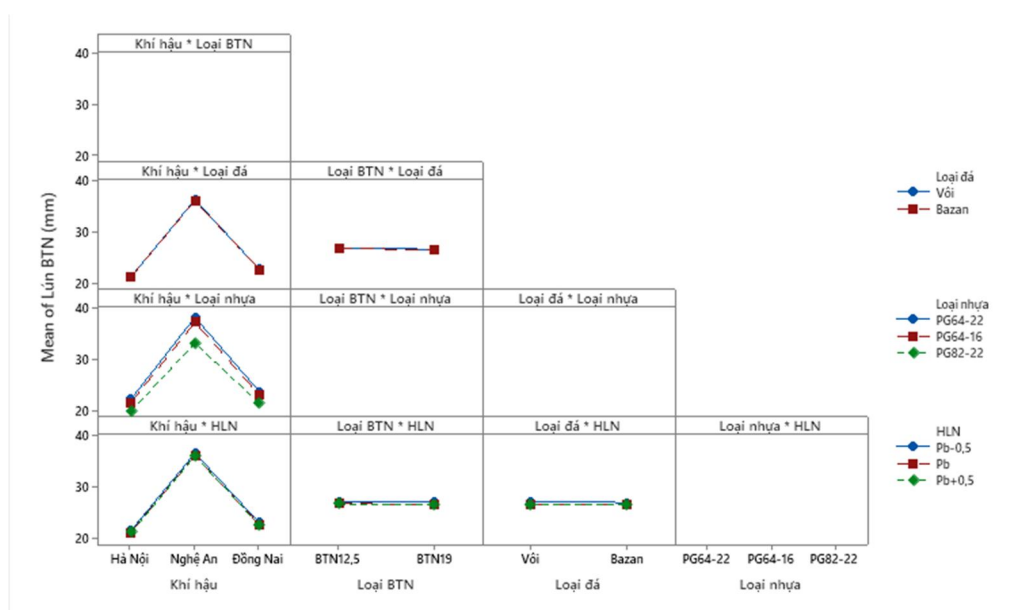
Hình 4-22. Biểu đồ phân tích phần dư tập mẫu chiều sâu LVBX của BTN



Hình 4-23. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX của BTN



Hình 4-24. Các biến ảnh hưởng chính tới chiều sâu LVBX của BTN



Hình 4-25. Ảnh hưởng tương tác của các biến tới chiều sâu LVBX của BTN

Nhận xét: Trên cơ sở kết quả phân tích thống kê từ tập mẫu chiều sâu LVBX của BTN cho thấy:

- Phần dư của chiều sâu LVBX của BTN tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các điểm phân bố ngẫu nhiên, thỏa mãn các điều kiện của phân tích thống kê (Hình 4-22).
- Kết quả phân tích phương sai hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc} = 100\%$, các biến đều có hệ số p-value < 0,05 đảm bảo mức ý nghĩa 95%.
- Kết quả biểu đồ Pareto ở Hình 4-23 cho thấy tất cả các biến khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN có ảnh hưởng đến chiều sâu LVBX của BTN có ý nghĩa thống kê. Do vậy có thể kết luận rằng: có sự ảnh hưởng của khí hậu, loại BTN, loại đá, loại nhựa và HLN đến chiều sâu LVBX của BTN.
- Ảnh hưởng lớn nhất đến chiều sâu LVBX của BTN là khí hậu, trong đó vùng khí hậu Nghệ An có chiều sâu LVBX của BTN lớn nhất, sau đó đến Đồng Nai và Hà Nội. Tiếp đến là loại nhựa, nhựa đường PG64-22 có chiều sâu LVBX của BTN lớn nhất, sau đó

đến PG64-16 và PG82-22. Các thông số khác ảnh hưởng đến chiều sâu LVBX của BTN không nhiều (Hình 4-24 và Hình 4-25).

4.3.5. Tổng hợp phân tích đánh giá

Khi phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến giới hạn thiết kế theo phương pháp cơ học thực nghiệm MEPDG nhận thấy:

- Có thể sử dụng phương pháp MEPDG để tính toán kết cấu mặt đường mềm ở Việt Nam.
- Kết cấu đã tính toán đảm bảo theo tiêu chuẩn 22TCN274-01 nhưng chưa thỏa mãn khi phân tích với MEPDG.
- Phương pháp MEPDG các trạng thái giới hạn phản ánh trực tiếp đến điều kiện khai thác của kết cấu. Các thông số đầu vào đều ảnh hưởng rõ rệt đến các trạng thái giới hạn khai thác. Các yếu tố chính ảnh hưởng là Khí hậu, Loại nhựa, HLN, Loại BTN, Loại đá. Trong đó Khí hậu là ảnh hưởng lớn nhất đến các trạng thái giới hạn khai thác, tiếp theo là đến Loại nhựa, HLN, Loại BTN, còn loại đá có mức độ ảnh hưởng không đáng kể đến các trạng thái giới hạn khai thác.
- Các dạng phá hoại chủ yếu là LVBX của toàn kết cấu, LVBX của các lớp BTN, nứt mỗi từ dưới lên và nứt mỗi từ trên xuống của các lớp BTN. Khu vực miền Trung điều kiện khí hậu khắc nghiệt hơn, xác suất kết cấu làm việc an toàn thấp hơn miền Bắc và miền Nam.
- Từ các phân tích trên cần chú ý đến việc lựa chọn vật liệu, thiết kế cấu tạo kết cấu mặt đường để đảm bảo chất lượng khai thác.

4.4. Kết luận chương 4

- Các thông số đầu vào đều ảnh hưởng rõ rệt đến các trạng thái giới hạn khai thác của mặt đường theo phương pháp MEPDG (LVBX của toàn kết cấu, LVBX của các lớp BTN, nứt mỗi từ dưới lên và nứt mỗi từ trên xuống của các lớp BTN). Các yếu tố chính ảnh hưởng là Khí hậu, Loại nhựa, HLN, Loại BTN, Loại đá, chi tiết như sau:

+ Ảnh hưởng lớn nhất đến nứt mỗi từ dưới lên của BTN là khí hậu, trong đó vùng khí hậu Nghệ An có nứt mỗi từ dưới lên của BTN lớn nhất, sau đó đến Đồng Nai và Hà Nội. Các thông số khác ảnh hưởng đến nứt mỗi từ dưới lên của BTN không nhiều.

+ Ảnh hưởng lớn nhất đến nứt mỗi từ trên xuống của BTN là HLN, trong đó HLN (Pb-0,5) có nứt mỗi từ trên xuống lớn nhất. Tiếp đến là khí hậu, trong đó vùng khí hậu Nghệ An có nứt mỗi từ trên xuống lớn nhất, sau đó đến Đồng Nai và Hà Nội. Tiếp đến là loại nhựa, loại BTN và loại đá.

+ Ảnh hưởng lớn nhất đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu và chiều sâu LVBX của BTN là khí hậu, trong đó vùng khí hậu Nghệ An có tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu lớn nhất, sau đó đến Đồng Nai và Hà Nội. Tiếp đến là loại nhựa, nhựa đường PG64-22 có tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu và chiều sâu LVBX của BTN lớn nhất, sau đó đến nhựa đường PG64-16 và PG82-22. Các thông số khác ảnh hưởng đến tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu và chiều sâu LVBX của BTN không nhiều.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

A. Kết luận, những đóng góp mới của luận án

Bằng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp thực nghiệm trong phòng, trên các loại vật liệu được lựa chọn, với các thiết bị thí nghiệm hiện đại, số mẫu thử hợp lí, số liệu thí nghiệm được phân tích thống kê, luận án đã có một số đóng góp mang tính mới về mặt khoa học và thực tiễn như sau:

1. Đã đề xuất lựa chọn phương pháp, trình tự thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave theo nguyên lý cân bằng ở Việt Nam theo cách A - Thiết kế theo thể tích Superpave và kiểm tra, xác nhận các đặc tính làm việc, với phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng chống nứt bằng 01 trong 02 thí nghiệm theo thứ tự ưu tiên như sau:

(1). Thí nghiệm IDEAL CTindex theo ASTM D8225 với ngưỡng chỉ số chịu nứt tối thiểu (CTindex) là 70 để chấp nhận hỗn hợp BTN.

(2). Thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt SCB theo TCVN 11347:2021 với ngưỡng chỉ số mềm tối thiểu (FI) là 8.0 để chấp nhận hỗn hợp BTN.

2. Đã thực hiện nghiên cứu thực nghiệm trong phòng với bê tông nhựa Superpave sử dụng 02 cỡ hạt lớn nhất danh định của BTN (BTN12,5 và BTN19), 02 nguồn gốc đá dăm (đá vôi và đá bazan), 03 loại nhựa đường (PG64-16; PG64-22; PG82-22) và 03 hàm lượng nhựa (Pb-0,5, Pb, Pb+0,5), kết quả đưa ra:

2.1. Về ảnh hưởng của cỡ hạt lớn nhất danh định: khi tăng cỡ hạt lớn nhất danh định từ 12,5mm lên 19mm thì khả năng chống LVBX của BTN là không khác nhau nhiều, nhưng khả năng chống nứt môi lại giảm xuống.

2.2. Về ảnh hưởng của nguồn gốc cốt liệu: Khả năng chống nứt môi và chống LVBX của BTN12,5 và BTN19 sử dụng đá dăm gốc bazan tốt hơn gốc đá vôi (khả năng chống nứt môi cao hơn từ 12% đến 13% và chống LVBX cao hơn khoảng 12%).

2.3. Về ảnh hưởng của loại nhựa: Khả năng chống nứt môi và chống LVBX của mẫu BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa PG82-22 (polime PMB.III) là tốt hơn nhiều so với nhựa PG64-22 (nhựa 60/70) và nhựa PG64-16 (nhựa 40/50). Khả năng chống LVBX của BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa PG64-16 (nhựa 40/50) cao hơn so với nhựa PG64-22 (nhựa 60/70) khoảng 18% nhưng khả năng chống nứt môi lại kém hơn từ 18% đến 26%.

2.4 Về ảnh hưởng của hàm lượng nhựa: Khả năng chống nứt môi của BTN tăng lên khi tăng hàm lượng nhựa thiết kế trong hỗn hợp BTN nhưng khả năng chống LVBX lại giảm xuống.

2.5. Trong khuôn khổ nghiên cứu, đã xây dựng 12 phương trình hồi quy giữa: chỉ số CTindex với chỉ số mềm FI; chỉ số CTindex với chiều sâu LVBX; chỉ số mềm FI với chiều sâu LVBX; chỉ số mềm FI, chỉ số CTindex, chiều sâu LVBX với hàm lượng nhựa của BTN12,5 và BTN19 sử dụng nhựa đường PG64-22 và nhựa đường PG64-16, chi tiết tại các công thức từ (3.1) đến (3.12).

3. Các thông số đầu vào đều ảnh hưởng rõ rệt đến các trạng thái giới hạn khai thác của mặt đường theo phương pháp MEPDG (LVBX của toàn kết cấu, LVBX của các lớp BTN, nứt môi từ dưới lên và nứt môi từ trên xuống của các lớp BTN). Các yếu tố chính ảnh hưởng theo thứ tự là khí hậu, loại nhựa, HLN, loại BTN, loại đá. Trong đó khí hậu là ảnh hưởng lớn nhất đến các trạng thái giới hạn khai thác (Nghệ An có điều kiện khí hậu khắc nghiệt hơn, xác suất kết cấu làm việc an toàn thấp hơn Hà Nội và Đồng Nai).

B. Những tồn tại, hạn chế

Kết quả nghiên cứu của luận án còn một số những hạn chế sau:

- Chưa thử nghiệm với loại BTN 25 do loại BTN này chưa được áp dụng phổ biến hiện nay tại Việt Nam.
- Chưa thử nghiệm BTN với nhiều loại đá dăm nguồn gốc khác nhau, đại diện cho nhiều vùng của Việt Nam.
- Chưa thử nghiệm với BTN sản xuất tại trạm trộn trong quá trình thi công.

C. Kiến nghị và dự kiến hướng nghiên cứu tiếp theo

- Nghiên cứu đánh giá khả năng chống nứt mỏi và LVBX của bê tông nhựa Superpave với nhiều loại đá dăm nguồn gốc khác nhau, đại diện cho nhiều vùng của Việt Nam.
- Cần bổ sung chỉ tiêu đánh giá khả năng chống nứt mỏi khi thiết kế hỗn hợp BTN cho các tuyến đường cấp cao, có quy mô giao thông lớn tại Việt Nam.
- Kiến nghị Bộ GTVT có chủ trương cho nghiên cứu thử nghiệm hiện trường trên đoạn đường BTN thiết kế theo phương pháp Superpave theo nguyên lý cân bằng để theo dõi đánh giá khả năng chống nứt mỏi, LVBX của bê tông nhựa Superpave trong thực tế.
- Cần sớm chuyển đổi sang áp dụng tiêu chuẩn phân cấp nhựa đường theo PG và thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave theo nguyên lý cân bằng cho Việt Nam. Vì thiết kế BTN theo Superpave đã giải quyết vấn đề liên quan đến lựa chọn vật liệu BTN trong đó có lựa chọn nhựa đường theo cấp đặc tính PG phục vụ cho thiết kế hỗn hợp BTN phù hợp với đặc tính dòng xe, nhằm giảm thiểu các hư hỏng mặt đường như nứt mỏi, LVBX trong quá trình khai thác.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

1. Bài báo khoa học

- (1). Lưu Ngọc Lâm, Lâm Hữu Quang, Cao Anh Tuấn (2018), “Nghiên cứu thực nghiệm phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa Superpave”, Tạp chí Giao thông vận tải, Số tháng 10/2018.
- (2). Lưu Ngọc Lâm, Nguyễn Quang Phúc (2019), “Nghiên cứu đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa theo mô hình uốn dầm bán nguyệt SCB”, Tạp chí Giao thông vận tải, Số tháng 9/2019.
- (3). Lưu Ngọc Lâm, Nguyễn Quang Phúc (2020), “Phân tích phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa theo Superpave và một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm”, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Số 3 tháng 3/2020.
- (4). Lưu Ngọc Lâm, Nguyễn Quang Phúc (2020), “Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố đến khả năng chống nứt của bê tông nhựa thiết kế theo Superpave”, Tạp chí Giao thông vận tải, Số tháng 10/2020.
- (5). Lưu Ngọc Lâm, Nguyễn Quang Phúc, Vũ Ngọc Phương (2021), “Nghiên cứu đánh giá khả năng chống nứt của bê tông nhựa thông qua chỉ số chống nứt Cracking Tolerance Index (CTindex)”, Tạp chí Giao thông vận tải, Số tháng 10/2021.
- (6). Lưu Ngọc Lâm, Nguyễn Quang Phúc, Vũ Ngọc Phương (2021), “Nghiên cứu phương pháp thiết kế cân bằng hỗn hợp bê tông nhựa và một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm”, Tuyển tập báo cáo Hội nghị KH-CN năm 2021 của Viện Khoa học và Công nghệ GTVT.

2. Đề tài khoa học

- (1). Lưu Ngọc Lâm và nnk (2018), “Nghiên cứu ứng dụng phương pháp thiết kế bê tông nhựa Superpave phù hợp với điều kiện Việt Nam”. Đề tài cấp Bộ GTVT.
- (2). Lưu Ngọc Lâm và nnk (2019), “Nghiên cứu ứng dụng mô hình thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt SCB (Semi-Circular Bending) để xác định đặc trưng chống nứt mỏi của bê tông nhựa chặt ở Việt Nam và đề xuất các giải pháp cải thiện”. Đề tài cấp Bộ GTVT.
- (3). Lưu Ngọc Lâm và nnk (2022), “Nghiên cứu phương pháp thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa chặt theo nguyên lý cân bằng trong điều kiện Việt Nam”, đề tài cấp Bộ GTVT.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

I. TIẾNG VIỆT

- [1]. Bộ Giao thông vận tải (2011), *TCVN 8819 : 2011 Mặt đường BTN nóng- Yêu cầu thi công và nghiệm thu.*
- [2]. Bộ Giao thông vận tải (2011), *TCVN 8820 : 2011 Hỗn hợp BTN nóng-Thiết kế theo phương pháp Marshall.*
- [3]. Bộ Giao thông vận tải (2014), *Quyết định số 1617 Bộ GTVT “Quy định kỹ thuật về phương pháp thử độ sâu vết hằn bánh xe của BTN xác định bằng thiết bị lún vết bánh xe”.*
- [4]. Bộ Giao thông vận tải (2014), *Quyết định số 858/QĐ-BGTVT “Hướng dẫn áp dụng hệ thống các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành nhằm tăng cường quản lý chất lượng thiết kế và thi công mặt đường BTN nóng đối với các tuyến đường ô tô có quy mô lớn”.*
- [5]. Bộ Giao thông vận tải (2014), *Thông tư số 27/2014/TT-BGTVT “Quy định về quản lý chất lượng vật liệu nhựa đường sử dụng trong xây dựng công trình giao thông”.*
- [6]. Bộ Giao thông vận tải (2001), *TCVN 6910-1:2001 (ISO 5725-1:1994) về Độ chính xác (độ đúng và độ chụm) của phương pháp đo và kết quả đo.*
- [7]. Bộ Giao thông vận tải (2005), *TCVN 4054:2005 Đường ô tô - Yêu cầu thiết kế.*
- [8]. Bộ Giao thông vận tải (2012), *TCVN 5729:2012 Đường ô tô cao tốc - Yêu cầu thiết kế.*
- [9]. Bộ Giao thông vận tải (2019), *TCVN12579-2019 Bê tông nhựa – Xác định độ bền mỏi theo phương pháp uốn dầm sử dụng tải trọng lặp.*
- [10]. Bộ Giao thông vận tải (2019), *TCVN 12818:2019 - Hỗn hợp BTN nóng - Thiết kế theo đặc tính thể tích Superpave.*
- [11]. Bộ Giao thông vận tải (2020), *TCVN 12914:2020 Bê tông nhựa - Xác định khả năng kháng ẩm của mẫu đã đầm chặt.*
- [12]. Bộ Giao thông vận tải (2020), *TCVN 13049:2020 Nhựa đường phân cấp theo đặc tính làm việc - Yêu cầu kỹ thuật.*
- [13]. Bộ Giao thông vận tải (2021), *TCVN 11193:2021 Nhựa đường Polyme - Yêu cầu kỹ thuật.*
- [14]. Bộ Giao thông vận tải (2021), *TCVN 13347:2021 Bê tông nhựa – Phương pháp xác định khả năng chống nứt bằng mô hình uốn mẫu bán nguyệt SCB.*

- [15]. Bộ Giao thông vận tải (2022), *TCVN 13567:2022 Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu*.
- [16]. Lã Văn Chăm, nnk (2019), “Đánh giá việc sử dụng xi măng thay thế bột khoáng nhằm cải thiện tính năng của BTN nóng”, *Tạp chí KH&CN Đại học công nghiệp Hà Nội*, số 2/2019.
- [17]. Vũ Đức Chính, Lưu Ngọc Lâm và nnk (2016), “Nghiên cứu phân loại nhựa đường theo Superpave (nhựa đường PG) và đề xuất áp dụng trong xây dựng đường bộ Việt Nam”, Đề tài cấp Bộ GTVT, mã số DT154015.
- [18]. Bùi Ngọc Hưng (2016), *Nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng đến biến dạng lún vết bánh xe có xét đến đặc tính môi của bê tông nhựa chặt làm lớp mặt đường ô tô*, Luận án tiến sĩ, Viện Khoa học và Công nghệ GTVT, Hà Nội.
- [19]. Lưu Ngọc Lâm và nnk (2018), “Nghiên cứu ứng dụng phương pháp thiết kế bê tông nhựa Superpave phù hợp với điều kiện Việt Nam”. Đề tài cấp Bộ GTVT, mã số DT174058.
- [20]. Lưu Ngọc Lâm và nnk (2019), “Nghiên cứu ứng dụng mô hình thí nghiệm uốn mẫu dầm bán nguyệt SCB (Semi-Circular Bending) để xác định đặc trưng chống nứt môi của bê tông nhựa chặt ở Việt Nam và đề xuất các giải pháp cải thiện”. Đề tài cấp Bộ GTVT, mã số DT184085.
- [21]. Nguyễn Ngọc Lâm và nnk (2018), “Nghiên cứu đánh giá ứng xử nứt của bê tông asphalt thí nghiệm theo mô hình uốn mẫu bán nguyệt”, *Tạp chí GTVT*, số tháng 8/2018.
- [22]. Nguyễn Ngọc Lâm và nnk (2018), “Ảnh hưởng của hàm lượng tái chế mặt đường asphalt đến ứng xử nứt của hỗn hợp bê tông asphalt ấm”, *Tạp chí KH&CN GTVT*, số 11/2018.
- [23]. Nguyễn Hoàng Long và nnk (2018), *Nghiên cứu các điều kiện cần thiết để áp dụng phương pháp cơ học - thực nghiệm (MEPDG) trong phân tích kết cấu mặt đường ở Việt Nam*. Đề tài cấp Bộ GTVT, mã số DT174055.
- [24]. Trần Thiện Lưu (2015), *Nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng tới độ bền môi bê tông asphalt làm lớp mặt đường tại Việt Nam*, Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội.
- [25]. Lâm Hữu Quang và nnk (2018), “Nghiên cứu đánh giá chất lượng nhựa đường đang áp dụng tại Việt Nam (nhựa đường theo mức độ kim lún, nhựa đường cải thiện polime) theo tiêu chuẩn nhựa đường PG”. Đề tài cấp Bộ GTVT, mã số DT174057.
- [26]. Vũ Phương Thảo (2015), *Nghiên cứu ảnh hưởng cốt sợi thủy tinh phân tán đến khả năng chống môi và chống lún vết bánh xe của bê tông asphalt trong điều kiện Việt Nam*, Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội.

II. TIẾNG ANH

- [27]. AASHTO M 20 (2004), *Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement.*
- [28]. AASHTO M 226 (2004), *Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder.*
- [29]. AASHTO M 323-13 (2013), *Superpave Volumetric Mix Design.*
- [30]. AASHTO M 320-10 (2015), *Performance-Graded Asphalt Binder.*
- [31]. AASHTO MP 46-20 (2020), *Standard Specification for Balanced Mix Design.*
- [32]. AASHTO PP 105-20 (2020), *Standard Practice for Balanced Design of Asphalt Mixtures.*
- [33]. AASHTO R 30 (2022), *Standard Practice for Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures.*
- [34]. AASHTO R 35-15, *Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures.*
- [35]. AASHTO T 283-14 (2014), *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.*
- [36]. AASHTO T 312 (2019), *Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.*
- [37]. AASHTO T 320-07 (2020), *Standard Method of Test for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tester (SST).*
- [38]. AASHTO T 324-19, *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).*
- [39]. AASHTO T 340, *Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA).*
- [40]. AASHTO T 378-17 (2021), *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).*
- [41]. AASHTO TP 124-18 (2018), *Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using Flexibility Index Test (FIT).*
- [42]. [Asphaltmagazine.com/history of asphalt mix design in north america.](http://Asphaltmagazine.com/history-of-asphalt-mix-design-in-north-america)
- [43]. ASTM C670-15, *Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials.*
- [44]. ASTM D3515-01, *Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures.*

- [45]. ASTM D8225-19 (2019), *Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*.
- [46]. ASTM E178-21, *Standard Practice for Dealing With Outlying Observations*.
- [47]. David L. Lippert, et al (2016), *Construction and Performance Monitoring of Various Asphalt Mixes in Illinois: 2015 Interim Report*, Illinois Center for Transportation, Research Report No. FHWA-ICT-16-009.
- [48]. David L. Lippert, et al (2017), *Construction and Performance Monitoring of Various Asphalt Mixes in Illinois: 2016 Interim Report*, Illinois Center for Transportation, Research Report No. FHWA-ICT-17-003.
- [49]. Fujie Zhou (2019), *Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance*, Final Report for NCHRP IDEA Project 195.
- [50]. Grobler, J., Rebbechi, J., & Denneman, E. (2018). *National Performance-based Asphalt Specification Framework*, AP-T331-18, ISBN 978-1-925671-26-1 Austroads.
- [51]. Hasan Ozer, et al (2016), *Fracture Characterization of Asphalt Mixtures with RAP and RAS Using the Illinois Semi-Circular Bending Test Method and Flexibility Index*, Submitted for the 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- [52]. [Highways.dot.gov/federal-lands/specs/state-specifications](https://highways.dot.gov/federal-lands/specs/state-specifications).
- [53]. Illinois Test Procedure 405 (2016), *Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT)*.
- [54]. Imad L. Al-Qadi, et al (2015), *Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS*, Illinois Center for Transportation, Research Report No. FHWA-ICT-15-017.
- [55]. Imad L. Al-Qadi, et al (2017), *Utilizing Lab Tests To Predict Asphalt Concrete Overlay Performance*, Illinois Center for Transportation, Research Report No. FHWA-ICT-17-020.
- [56]. MS-2 Asphalt Institute (2015), *Mix Design Method for Asphalt Concrete*.
- [57]. NCHRP Report 673 (2011), *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*, NCHRP, USA.
- [58]. NCHRP Report 9-57 (2016), *Experimental design for field validation of laboratory tests to assess cracking resistance of asphalt mixtures*, NCHRP, USA.
- [59]. NCHRP Report 492 (2016), *Performance Specifications for Asphalt Mixtures*, NCHRP, USA.

- [60]. Randy West, et al (2018), *Phase VI (2015-2018) NCAT Test Track Findings*, National Center for Asphalt Technology at Auburn University Auburn, AL.
- [61]. Randy West, et al (2018), *Development of a Framework for Balanced Mix Design, Project NCHRP 20-07/Task 406*, National Center for Asphalt Technology at Auburn University Auburn, AL.
- [62]. Randy West, et al (2021), *Phase VII (2018-2021) NCAT Test Track Findings*, NCAT Report 21-03, 9/2021, National Center for Asphalt Technology at Auburn University Auburn, AL.