

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

TRẦN THỊ CẨM HÀ

**NGHIÊN CỨU THÀNH PHẦN, TÍNH CHẤT CƠ HỌC
VÀ KHẢ NĂNG SỬ DỤNG BITUM EPOXY LÀM CHẤT
KẾT DÍNH CHO HỖN HỢP ASPHALT TẠI VIỆT NAM**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – 2020

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

TRẦN THỊ CẨM HÀ

**NGHIÊN CỨU THÀNH PHẦN, TÍNH CHẤT CƠ HỌC
VÀ KHẢ NĂNG SỬ DỤNG BITUM EPOXY LÀM CHẤT
KẾT DÍNH CHO HỖN HỢP ASPHALT TẠI VIỆT NAM**

Ngành: **Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông**

Mã số: **9580205**

Chuyên ngành: **Xây dựng đường ô tô và đường thành phố**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. PGS.TS Trần Thị Kim Đăng**
- 2. GS.TS Bùi Xuân Cậy**

HÀ NỘI – 2020

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành luận án, tác giả trân trọng cảm ơn các cơ quan đã tạo mọi điều kiện giúp đỡ: Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải; phòng Đào tạo Sau đại học; Trung tâm Khoa học công nghệ GTVT; phòng thí nghiệm trọng điểm LasXD 1256, phòng thí nghiệm công trình Vilas 047; Khoa Công trình; bộ môn Đường bộ; bộ môn Vật liệu xây dựng.

Bằng những tình cảm chân thành nhất, tác giả vô cùng cảm ơn PGS.TS Trần Thị Kim Đăng, GS.TS Bùi Xuân Cây đã định hướng và tận tình hướng dẫn tác giả trong suốt quá trình thực hiện luận án này.

Tác giả xin chân thành cảm ơn PGS.TS Vũ Đức Chính (Viện Khoa học Công nghệ GTVT) và PGS.TS Nguyễn Quang Phúc (Trường ĐH GTVT) đã nhận xét, góp ý về mặt chuyên môn và cung cấp nhiều tài liệu cho tác giả trong quá trình thực hiện luận án. Tác giả cũng xin gửi lời cảm ơn đến TS. Nakanishi và ngài Kato Akihiro (Công ty Taiyu Kensetsu – Nhật Bản) đã cung cấp cho tác giả một số vật liệu và tài liệu phục vụ cho nghiên cứu.

Tác giả xin chân thành cảm ơn các thầy, cô giáo bộ môn Đường bộ, các cán bộ, nhân viên phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng, phòng thí nghiệm trọng điểm LasXD 1256, phòng Vilas047, các em sinh viên ngành Đường bộ khóa 53 và ngành Kỹ thuật Giao thông Đường bộ khóa 54 đã giúp đỡ, cùng chia sẻ các thất bại và vui với thành công trong quá trình thí nghiệm.

Cảm ơn gia đình và bạn bè, những người thân luôn ở bên tôi.

Hà Nội, 6/2020

CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Hà nội, ngày 01 tháng 6 năm 2020

LỜI CAM ĐOAN

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

Tác giả luận án

NCS. Trần Thị Cẩm Hà

MỤC LỤC

ĐẶT VẤN ĐỀ.....	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ BITUM-EPOXY VÀ BÊ TÔNG NHỰA EPOXY TRONG XÂY DỰNG ĐƯỜNG Ô TÔ	4
1.1. Bitum Epoxy và bê tông nhựa Epoxy	4
1.1.1. Tổng quan về phụ gia cải thiện tính năng của bitum.....	4
1.1.2. Phụ gia Epoxy	9
1.1.3. Bitum-Epoxy	17
1.2. Các nghiên cứu về bitum-epoxy và BTN sử dụng BE làm chất kết dính trên thế giới	18
1.2.1. Dự án thử nghiệm BE sử dụng vật liệu địa phương ở 7 quốc gia khác nhau	18
1.2.2. Nghiên cứu hỗn hợp BTNE sử dụng nguồn vật liệu địa phương ở Trung Quốc.....	23
1.2.3. Nghiên cứu sử dụng BE và BTNE ở Nhật Bản	25
1.3. Các ứng dụng của BTNE trên thế giới.....	27
1.3.1. Lớp phủ mặt cầu trên cầu thép bản trục hướng.....	27
1.3.2. Làm mặt đường băng sân bay và mặt đường khu vực cảng.....	28
1.3.3. Lớp phủ mặt cầu.....	29
1.3.4. Lớp láng nhựa BE và BTNE trên bản trục hướng cầu thép.	30
1.3.5. BTNE cấp phối hở làm lớp tạo nhám trên mặt đường ô tô.....	30
1.3.6. BTNE làm mặt đường ô tô.....	31
1.4. Các nghiên cứu và ứng dụng BTNE tại Việt Nam	32
1.5. Xác định vấn đề nghiên cứu của luận án	34
1.6. Phương pháp nghiên cứu.....	36
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH THÀNH PHẦN VÀ MỘT SỐ ĐẶC TÍNH CƠ BẢN CỦA BITUM-EPOXY.....	37
2.1. Xác định thành phần và cách chế tạo BE.....	37
2.1.1. Lựa chọn vật liệu epoxy trong nghiên cứu	37
2.1.2. Lựa chọn bitum sử dụng trong nghiên cứu.....	39

2.1.3. Thiết kế phối trộn hỗn hợp Bitum-Epoxy	40
2.1.4. Lựa chọn thời gian và nhiệt độ bảo dưỡng mẫu Bitum-Epoxy trước khi thí nghiệm.....	41
2.2. Lựa chọn chỉ tiêu và phương pháp thí nghiệm đánh giá BE.....	42
2.2.1. Lựa chọn chỉ tiêu, kế hoạch thí nghiệm và phân tích đánh giá kết quả	42
2.2.2. Phương pháp thí nghiệm.....	45
2.3. Độ kim lún của BE với các tỉ lệ thành phần được nghiên cứu	45
2.3.1. Kết quả thí nghiệm độ kim lún	46
2.3.2. Phân tích kết quả thí nghiệm độ kim lún.....	47
2.4. Chỉ tiêu nhiệt độ hóa mềm	51
2.4.1. Kết quả thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm	51
2.4.2. Phân tích kết quả thí nghiệm nhiệt độ hóa mềm.....	52
2.5. Luận chứng lựa chọn tỷ lệ thành phần trong bitum - epoxy	55
2.6. Thực nghiệm các chỉ tiêu cơ bản của BE với tỉ lệ thành phần được lựa chọn.....	57
2.7. Mô đun cắt động của BE với tỉ lệ thành phần được lựa chọn.....	59
2.7.1. Kế hoạch thực nghiệm nghiên cứu Mô đun cắt động của BE	59
2.7.2. Kết quả thử nghiệm DSR theo chuẩn PG	60
2.8. Kết luận chương 2.....	64
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC CHỈ TIÊU CƠ LÝ CỦA BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG CHẤT KẾT DÍNH BITUM-EPOXY	65
3.1. Thiết kế thành phần hỗn hợp BTNE và BTN đối chứng	65
3.1.1. Luận chứng lựa chọn loại BE cho BTNE và chất kết dính cho BTN đối chứng trong nghiên cứu.....	65
3.1.2. Lựa chọn cốt liệu và bột khoáng sử dụng trong nghiên cứu	67
3.1.3. Xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu cho hỗn hợp BTNE và BTNP bằng phương pháp Marshall	69
3.2. Lựa chọn chỉ tiêu trong nghiên cứu và công tác chế tạo mẫu	71

3.2.1. Lựa chọn chỉ tiêu cơ học của BTN trong nghiên cứu thực nghiệm...	71
3.2.2. Chế tạo mẫu thí nghiệm.....	72
3.3. Độ ổn định, độ dẻo Marshall và độ ổn định còn lại của BTN	72
3.3.1. Kế hoạch thí nghiệm Marshall.....	72
3.3.2. Kết quả thí nghiệm Marshall và phân tích	73
3.4. Mô đun đàn hồi tĩnh của BTNE.....	77
3.4.1. Phương pháp thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh.....	77
3.4.2. Kế hoạch thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh	78
3.4.3. Kết quả mô đun đàn hồi tĩnh của BTN và phân tích.....	78
3.4.4. Xác định mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng của BTN	80
3.5. Cường độ kéo uốn của BTNE.....	81
3.5.1. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo uốn.....	81
3.5.2. Phương pháp thí nghiệm cường độ kéo uốn	81
3.5.3. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn và phân tích	83
3.5.4. Cường độ kéo uốn đặc trưng của BTN.....	86
3.6. Khả năng kháng lún của BTNE	86
3.7. Độ bền mỏi của BTNE	88
3.7.1. Mô hình và thông số thí nghiệm	88
3.7.2. Kết quả thí nghiệm xác định độ bền mỏi và phân tích	92
3.7.3. Xây dựng phương trình đặc trưng độ bền mỏi	97
3.8. Mô đun động của BTNE	100
3.8.1. Lý thuyết cơ bản về mô đun động của BTN.....	100
3.8.2. Kế hoạch và trình tự thí nghiệm mô đun động của BTNE.....	101
3.8.3. Kết quả thí nghiệm mô đun động ($ E^* $) và nhận xét.....	102
3.8.4. Xây dựng đường cong chủ mô đun động của BTNE và vật liệu đối chứng BTNP	107
3.8.5. Mô hình hóa đường cong chủ mô đun động của BTNE và BTNP ..	109
3.9. Kết luận chương.....	112
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG BÊ TÔNG NHỰA EPOXY	

LÀM LỚP MẶT ĐƯỜNG CẤP CAO VÀ LỚP PHỦ MẶT CẦU	114
4.1. Quy mô giao thông và kết cấu áo đường điển hình của các đường cấp cao ở Việt Nam	114
4.1.1. Quy mô giao thông trên các tuyến đường cấp cao hiện nay ở Việt Nam	114
4.1.2. Kết cấu áo đường điển hình trên các tuyến đường cấp cao ở Việt Nam	116
4.2. Phân tích ứng dụng BTNE làm lớp mặt có tính năng cao trong kết cấu áo đường ô tô ở Việt Nam	118
4.2.1. Đánh giá ứng dụng BTNE làm lớp mặt trong kết cấu áo đường khi thiết kế theo tiêu chuẩn 22 TCN 211-06	118
4.2.2. Phân tích kết cấu áo đường sử dụng BTNE bằng phương pháp cơ học – thực nghiệm	120
4.2.3. Phân tích sơ bộ chi phí xây dựng KCAĐ khi sử dụng BTNE đối chứng với BTNP	131
4.2.4. Đề xuất cấu tạo KCAĐ mềm áp dụng cho đường ô tô có quy mô giao thông lớn ở Việt Nam.....	133
4.3. Nghiên cứu ứng dụng BTNE làm lớp phủ mặt cầu thép bản trực hướng	134
4.3.1. Lớp phủ mặt cầu trên cầu thép bản trực hướng	134
4.3.2. Sơ đồ nghiên cứu ứng suất biến dạng của mặt cầu thép bản trực hướng	135
4.3.3. Kết quả tính toán trạng thái ứng suất biến dạng của hệ dầm thép và lớp phủ mặt cầu trong cầu thép bản trực hướng	137
4.3.4. Đề xuất các kết cấu sử dụng BTNE trên mặt cầu thép bản trực hướng	140
4.4. Kết luận chương 4.....	141
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	143
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ.....	145
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	146

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1-1. Cấu trúc hóa học cơ bản của nhóm epoxy.....	10
Hình 1-2. Cấu trúc hóa học của ete diglycidyl bisphenol-A.....	11
Hình 1-3. Cấu trúc hóa học của tetraglycidyl methylene dianiline (TGMDA)	11
Hình 1-4. Cấu trúc hóa học của 1 nhựa cycloaliphatic epoxy tiêu biểu	12
Hình 1-5. Phản ứng Epoxy với amin [41]	13
Hình 1-6. Cấu trúc hóa học của polyamid	14
Hình 1-7. Cấu trúc hóa học của một amidoamin	15
Hình 1-8. Cơ chế phản ứng giữa Epoxy với tổ hợp của boron trifluoride và amin [42].....	15
Hình 1-9. Cơ chế phản ứng giữa Epoxy và anhydrit [42].....	16
Hình 1-10.. Hai thành phần của Bitum-Epoxy	17
Hình 1-11: Kết quả thí nghiệm mô đun độ cứng của hỗn hợp HRA và SMA ở 20 ⁰ C xác định bằng mô hình kéo gián tiếp [21]	19
Hình 1-12: Đường cong chủ $ G^* /\sin\delta$ của BE và bitum PG 70-20 [21]	20
Hình 1-13: Mô hình thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt phản ánh [21].....	21
Hình 1-14: Nứt lan truyền của BTN trong quá trình thử nghiệm [21]	22
Hình 1-15: Hình ảnh mẫu OGPA trước và sau thí nghiệm Cantabro [21].....	22
Hình 1-16: Kết quả thử nghiệm BE	26
Hình 1-17: Biểu đồ quan hệ giữa độ ổn định Marshall với hàm lượng epoxy	26
Hình 1-18: Biểu đồ quan hệ giữa độ bền uốn, biến dạng gãy với hàm lượng epoxy	27
Hình 1-19: Kết quả thử nghiệm môi	27
Hình 1-20. Các hư hỏng do hiện tượng xô dồn bề mặt, mất sự liên kết với	33
Hình 2-1. Một số hình ảnh thí nghiệm độ kim lún	46
Hình 2-2. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê	47
Hình 2-3. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng độ kim lún (Pe)	48
Hình 2-4. Ảnh hưởng các yếu tố BE, T đến Pe	49
Hình 2-5. Biểu đồ quan hệ giữa độ kim lún và hàm lượng epoxy trong	49
Hình 2-6. Biểu đồ tổng hợp độ kim lún (Pe).....	49
Hình 2-7. Một vài hình ảnh thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm.....	51
Hình 2-8. Ảnh hưởng các yếu tố BE, T đến SP.....	53

Hình 2-9. Biểu đồ quan hệ giữa nhiệt độ hóa mềm và hàm lượng epoxy trong bitum-epoxy ở các điều kiện bảo dưỡng khác nhau.	53
Hình 2-10. Biểu đồ tổng hợp nhiệt độ hóa mềm (SP)	54
Hình 2-11. Kết quả thí nghiệm độ nhớt ở 135 ⁰ C (nhớt kế Brookfield) của BE35	57
Hình 2-12. Kết quả thí nghiệm độ nhớt ở 135 ⁰ C (nhớt kế Brookfield) của BE50	58
Hình 2-13. Một số hình ảnh thí nghiệm xác định độ dính bám và điểm chớp cháy	58
Hình 2-14. Thiết bị cắt động lưu biến DSR RHEOTEST RN 4.3 tại Trường ĐH GTVT	59
Hình 2-15. Ảnh hưởng các yếu tố BE, nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng đến $G^*/\sin\delta$..	63
Hình3-1: Đường cong cấp phối của hỗn hợp	68
Hình3-2: Thí nghiệm Marshall	70
Hình 3-3. Độ ổn định Marshall của BTN.....	74
Hình 3-4. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến độ dẻo Marshall (F)	75
Hình 3-5. Độ dẻo Marshall của BTN.....	76
Hình 3-6. Độ ổn định còn lại của các hỗn hợp.....	76
Hình 3-7. Biến dạng của mẫu thí nghiệm theo thời gian gia tải và dỡ tải	77
Hình 3-8. Thiết bị Cooper và mẫu BTN trong thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh	78
Hình 3-9. Đồ thị khoảng giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của các loại BTN	79
Hình 3-10. Biểu đồ so sánh mô đun đàn hồi tĩnh của các loại BTN theo.....	80
Hình 3-11. Đúc mẫu BTN dạng tấm bằng đầm lăn	82
Hình 3-12. Gia công mẫu đầm bằng máy cắt đá hoa cương	82
Hình 3-13. Thí nghiệm kéo uốn mẫu BTN trên máy nén Marshall.....	83
Hình 3-14. Đồ thị khoảng giá trị cường độ kéo uốn trung bình của các loại BTN.....	84
Hình 3-15. Biểu đồ so sánh cường độ kéo uốn của các loại BTN theo phương pháp so sánh từng cặp Fisher (khoảng tin cậy 95%)	85
Hình 3-16. Hình ảnh vết gãy sau thí nghiệm kéo uốn	85
Hình 3-17. Thiết bị và mẫu thí nghiệm hằn lún vết bánh xe tại	87
Hình 3-18. Kết quả thí nghiệm chiều sâu vết lún bánh xe	87
Hình 3-19. Hình ảnh các mẫu BTN sau thí nghiệm xác định khả năng kháng lún	88
Hình 3-20. Thiết bị mồi 4 điểm Cooper CRT-SA4PT-BB [16]	89

Hình 3-21. Mẫu thí nghiệm 380mm x 50mm x 50mm	90
Hình 3-22. Chương trình và tín hiệu trong thí nghiệm mỗi	91
Hình 3-23. Đo lực và chuyển vị trên mẫu.....	92
Hình 3-24. Biểu đồ so sánh N_{f50}	93
Hình 3-25. Biểu đồ quan hệ giữa Độ cứng ban đầu và Góc lệch pha ban đầu với Biến dạng.....	93
Hình 3-26. Biểu đồ giảm mô đun độ cứng theo số chu kỳ tải trọng lặp của BTNP.....	94
Hình 3-27. Biểu đồ giảm mô đun độ cứng theo số chu kỳ tải trọng lặp của BTNE35 ở nhiệt độ 10 ⁰ C, tần số 10Hz.....	94
Hình 3-28. Biểu đồ giảm mô đun độ cứng theo số chu kỳ tải trọng lặp của BTNE50 ở nhiệt độ 10 ⁰ C, tần số 10Hz.....	94
Hình 3-29. Quan hệ mô đun độ cứng với số chu kỳ tải trọng lặp của 3 loại BTN.....	95
Hình 3-30. Quan hệ mô đun độ cứng với số chu kỳ tải trọng lặp của 3 loại BTN.....	95
Hình 3-31. Quan hệ mô đun độ cứng với số chu kỳ tải trọng lặp của 3 loại BTN.....	95
Hình 3-32. Đường đặc trưng mỗi của BTN ở nhiệt độ 10 ⁰ C, tần số 10Hz.....	98
Hình 3-33. Quan hệ ứng suất và biến dạng trong thí nghiệm mô đun động [11].....	100
Hình 3-34. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm bằng đầm xoay Troxler.....	101
Hình 3-35. Thí nghiệm mô đun động trên thiết bị Cooper	102
Hình 3-36. Ảnh hưởng các yếu tố loại BTN, nhiệt độ, tần số đến E^*	105
Hình 3-37. Biểu đồ mô đun động $ E^* $ của BTN ở nhiệt độ 10 ⁰ C	106
Hình 3-38. Biểu đồ mô đun động $ E^* $ của BTN ở nhiệt độ 30 ⁰ C	106
Hình 3-39. Biểu đồ mô đun động $ E^* $ của BTN ở nhiệt độ 60 ⁰ C	106
Hình 3-40. Xây dựng đường cong chủ $ E^* $ của BTNE35	107
Hình 3-41. Đường cong chủ $ E^* $ của BTNE50, BTNE35 và BTNP	108
Hình 3-42. Biểu đồ quan hệ giữa hệ số a_T thực và a_T theo quy tắc WLF	109
Hình 3-43. Sơ đồ mô tả mô hình 2S2P1D [46]	110
Hình 3-44. Mô hình hóa đường cong chủ $ E^* $ của BTNE và BTNP.....	111
Hình 4-1. Trình tự thiết kế KCAĐ mềm theo phương pháp M-E [14][17].....	122
Hình 4-2. Dự báo lún của KCAĐ khi N_0 là 5.930 xe/ngđ theo phương pháp M-E.....	131
Hình 4-3. Dự báo nứt mỗi của KCAĐ khi N_0 là 5.930 xe theo phương pháp M-E	131

Hình 4-4. KCAD đề xuất cho đường ô tô có quy mô giao thông lớn ở Việt Nam.....	134
Hình 4-5. Bản cầu thép trực hướng [60].....	134
Hình 4-6. Mô hình hóa ứng xử của hệ sàn thép và lớp phủ mặt cầu.....	135
Hình 4-7. Sơ đồ nghiên cứu ứng suất, biến dạng.....	136
Hình 4-8. Biểu đồ biến dạng của tổ hợp các kết cấu khi $t=0,5$	138
Hình 4-9. Biểu đồ biến dạng của tổ hợp các kết cấu khi $t=1$	138
Hình 4-10. Biểu đồ biến dạng phụ thuộc vào chiều dày các lớp.....	139
Hình 4-11. Biểu đồ biến dạng phụ thuộc vào điều kiện tiếp xúc.....	139
Hình 4-12. Các kết cấu đề xuất sử dụng trên mặt cầu thép.....	141

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1-1: Các loại phụ gia để cải thiện bitum [61][49]	6
Bảng 1-2: Kết quả thử nghiệm Cantabro của mẫu trước và sau bị ôxy hóa	23
Bảng 1-3: Kết quả thử nghiệm kéo gián tiếp [36]	24
Bảng 1-4: Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu cơ bản của BE [63].....	25
Bảng 2-1. <i>Một số công trình tiêu biểu ở Nhật Bản sử dụng epoxy của công ty TAIYU KENSETSU</i>	38
Bảng 2-2. <i>Một số công trình Trung Quốc sử dụng epoxy của công ty</i>	38
Bảng 2-3. <i>Đặc điểm, thành phần Epoxy [63]</i>	39
Bảng 2-4. Các chỉ tiêu cơ bản của bitum 60/70	40
Bảng 2-5. Khối lượng thí nghiệm xác định Độ kim lún	44
Bảng 2-6. Khối lượng thí nghiệm xác định Điểm hóa mềm	45
Bảng 2-7. Các chỉ tiêu và tiêu chuẩn thí nghiệm	45
Bảng 2-8. Độ kim lún của BE ở các điều kiện bảo dưỡng khác nhau.	46
Bảng 2-9. Đánh giá độ chụm Độ kim lún BE50%.....	47
Bảng 2-10. Nhiệt độ hóa mềm của bitum-epoxy ở các điều kiện bảo dưỡng khác nhau.	51
Bảng 2-11. Đánh giá độ chụm Nhiệt độ hóa mềm BE15.....	52
Bảng 2-12. Khối lượng thí nghiệm một số chỉ tiêu khác	57
Bảng 2-13. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu.....	58
Bảng 2-14. Kế hoạch thí nghiệm mô đun cắt động (G^*) của bitum sử dụng thiết bị cắt động lưu biến DSR theo chuẩn PG	60
Bảng 2-15. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun cắt động theo chuẩn PG	61
Bảng 2-16. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun cắt động theo chuẩn PG	63
Bảng 3-1. Các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của BE35 và BE50	66
Bảng 3-2. Các chỉ tiêu cơ bản của PMB-III.....	67
Bảng 3-3. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu	68
Bảng 3-4. Số lượng mẫu thí nghiệm xác định hàm lượng nhựa tối ưu	69
Bảng 3-5. Chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu đối với bê tông nhựa polime.....	70
Bảng 3-6. Khoảng hàm lượng nhựa tối ưu của các hỗn hợp BTN	71

Bảng 3-7. Số lượng mẫu thí nghiệm Marshall với hàm lượng nhựa đã chọn	72
Bảng 3-8. Đánh giá độ chụm độ ổn định Marshall của mẫu ngâm 60 ⁰ C trong 1h.....	73
Bảng 3-9. Kết quả xác định độ ổn định còn lại của BTN	73
Bảng 3-10. Số lượng thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh của BTN.....	78
Bảng 3-11. Tổng hợp kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh	79
Bảng 3-12. Tổng hợp kết quả xác định mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng (E_{dt})	81
Bảng 3-13. Số lượng thí nghiệm xác định cường độ kéo uốn của BTN.....	81
Bảng 3-14. Tổng hợp kết quả xác định cường độ kéo uốn của BTN	83
Bảng 3-15. Cường độ kéo uốn đặc trưng của BTN	86
Bảng 3-16. Tổng hợp kết quả thử nghiệm mỏi của BTN.....	92
Bảng 3-17. Bảng kết quả tuyến tính hóa dữ liệu mỏi	99
Bảng 3-18. Tổng hợp phương trình đặc tính mỏi của BTN	99
Bảng 3-19. Số lượng mẫu và số lượng thí nghiệm mô đun động.....	101
Bảng 3-20. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun động ($ E^* $) của BTNP	102
Bảng 3-21. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun động ($ E^* $) của BTNE35	103
Bảng 3-22. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun động ($ E^* $) của BTNE50	104
Bảng 3-23. Kết quả xác định các hệ số của quy tắc WLF	108
Bảng 3-24. Các thông số của mô hình 2S2P1D mô phỏng đường cong chủ $ E^* $	111
Bảng 3-25. Đánh giá mức độ phù hợp của mô hình 2S2P1D với số liệu đo $ E^* $	112
Bảng 4-1. Kết cấu áo đường đánh giá và kết cấu áo đường đối chứng	118
Bảng 4-2. Thông số đặc trưng của các lớp vật liệu dùng trong tính toán.....	119
Bảng 4-3. Kết quả xác định chiều dày lớp BTNE ($E_{yc}=191$ Mpa) theo tiêu chuẩn 22TCN211-06.....	119
Bảng 4-4. Kết quả xác định chiều dày KCAĐ theo 22TCN211-06 cho trường hợp $N_e = 5.10^6$ trục/làn xe.....	120
Bảng 4-5. Đề xuất phân loại xe sử dụng trong phương pháp M-E ở Việt Nam.....	123
Bảng 4-6. Tỷ lệ thành phần dòng xe tải, xe khách và hệ số tăng trưởng xe.....	124
Bảng 4-7. Số liệu giao thông tính toán trong phân tích M-E.....	124
Bảng 4-8. Các kết cấu áo đường phân tích theo phương pháp M-E.....	125
Bảng 4-9. Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế	125

Bảng 4-10. Các kết quả phân tích KC1, KC3 và KC5 theo phương pháp M-E trường hợp lưu lượng xe tải năm đầu (N_0) bằng 5.930 xe/ngđ.....	126
Bảng 4-11. Các kết quả phân tích KC2, KC4 và KC6 theo phương pháp M-E trường hợp N_0 bằng 5.930 xe/ngđ.....	126
Bảng 4-12. Các kết quả phân tích KC1, KC3 và KC5 theo phương pháp M-E trường hợp N_0 bằng 7.000 xe/ngđ.....	127
Bảng 4-13. Các kết quả phân tích KC4 và KC6 theo phương pháp M-E.....	127
Bảng 4-14. Các kết quả phân tích KC3, KC5 và KC6 theo phương pháp M-E trường hợp N_0 bằng 8.000 xe/ngđ.....	128
Bảng 4-15. Các kết quả phân tích KC5 theo phương pháp M-E.....	128
Bảng 4-16. Tổng hợp kết quả phân tích kết cấu theo phương pháp M-E.....	130
Bảng 4-17. Bảng tổng hợp chi phí xây dựng	132
Bảng 4-18. Các thông số khảo sát	137

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

- AASHTO (American Association of Highway and Transportation Officials): Hiệp hội người làm đường bộ và vận tải Hoa Kỳ
- BTN: Bê tông nhựa
- BTXM: Bê tông xi măng
- BTNC: Bê tông nhựa chặt
- BTNR: Bê tông nhựa rỗng
- BE: Bitum-Epoxy
- BTNE: Bê tông nhựa sử dụng chất kết dính là bitum-epoxy
- BTNE35: Bê tông nhựa sử dụng chất kết dính bitum-epoxy có hàm lượng epoxy 35%
- BTNE50: Bê tông nhựa sử dụng chất kết dính bitum-epoxy có hàm lượng epoxy 50%
- BTNP: Bê tông nhựa sử dụng chất kết dính PMB III
- BTNE 12,5: Bê tông nhựa sử dụng chất kết dính bitum-epoxy có đường kính hạt lớn nhất danh định là 12,5mm
- OGAC (Open Graded Asphalt Concrete): Bê tông nhựa cấp phối hở
- EMOGPA (Epoxy Modified Open Graded Porous Asphalt) : Bê tông nhựa cấp phối hở sử dụng chất kết dính bitum-epoxy
- HRA (Hot rolled asphalt): Bê tông nhựa nóng đầm chặt bằng lu
- KCAD: Kết cấu áo đường
- SMA (Stone mastic asphalt): Bê tông đá – vữa nhựa
- TE (Thermoplastic Elastomers): Chất đàn hồi nhiệt dẻo
- EVA: Ethylene methyl acrylate (một loại nhựa nhiệt dẻo)
- TP (Thermosetting plastics): Nhựa nhiệt rắn
- SBS: Styrene-butadiene-styrene (một loại chất đàn hồi nhiệt dẻo)
- DGEBA: diglycidyl ete của bisphenol-A
- TGPAP: triglycidyl p-amino-phenol
- TGMDA: tetraglycidyl methylene dianiline

- T_g : Nhiệt độ chuyển tiếp thủy tinh T_g – nhiệt độ mà polime chuyển từ trạng thái đàn hồi sang trạng thái thủy tinh
- EEW: Khối lượng epoxy tương đương (khối lượng nhựa trên một nhóm epoxy)
- ATB (Asphalt Treated Base): Lớp đá gia cố nhựa
- Pe (Penetration): Độ kim lún
- SP (Softening Point): Nhiệt độ hóa mềm
- PG (Performance – Graded): Cấp đặc tính sử dụng
- DSR (Dynamic Shearing Rheometer): Cắt động lưu biến
- G^* : Mô đun cắt động của bitum
- δ_G : Góc lệch pha giữa ứng suất cắt và biến dạng
- RTFO: (Rolling Thin Film Oven) : Thí nghiệm hóa già ngắn hạn bằng lò quay màng mỏng
- PAV: (Pressure Aging Vessel): Thí nghiệm hóa già dài hạn bằng bình áp lực
- N_{f50} : số chu kỳ tải trọng lặp tác dụng làm suy giảm mô đun độ cứng còn lại 50% giá trị ban đầu
- $|E^*|$: Mô đun động của BTN
- QL: Quốc lộ
- MEPDG: Phần mềm thiết kế mặt đường Darwin-ME 2.3.1 của AASHTO (AASHTOWare Pavement ME Design)
- N_0 : lưu lượng xe tải trung bình ngày đêm cho năm đầu tiên khai thác (đơn vị là xe/ngđ)

ĐẶT VẤN ĐỀ

I. TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI

Ở Việt Nam cũng như phần lớn các quốc gia trên thế giới, giao thông và giao thông đường bộ luôn được xem là điều kiện tiên quyết cho sự phát triển kinh tế, xã hội. Bê tông nhựa (BTN) là vật liệu được sử dụng phổ biến để làm tầng mặt cho các tuyến đường cấp cao, đường đô thị. Mặt đường BTN có nhiều ưu điểm như: mặt đường êm thuận, bằng phẳng, ít bụi, ít gây tiếng ồn, cường độ tương đối cao, mặt đường kín không cho nước thấm xuống nền, móng phía dưới, có thể cơ giới hóa toàn bộ các khâu từ chế tạo sản xuất đến thi công, có thể thông xe ngay sau khi thi công, dễ bảo dưỡng sửa chữa. Tuy nhiên, loại mặt đường này vẫn có các nhược điểm cơ bản: nhạy cảm với nhiệt độ, dễ biến dạng khi nhiệt độ cao, nứt khi nhiệt độ thấp, lún không hồi phục tích lũy dưới tải dụng trùng phục của tải trọng xe chạy, bong tróc trong điều kiện ẩm, trượt trôi, xô dòn khi chịu lực ngang lớn. Những nhược điểm này đã được bộc lộ rõ trong thực tế khai thác của mặt đường bê tông asphalt sử dụng bitum thông thường ở điều kiện nhiệt độ môi trường cao, lưu lượng giao thông lớn và tải trọng trục xe nặng.

Thực tế khai thác mặt đường BTN ở Việt Nam cho thấy đã có nhiều sự cố hư hỏng sớm mặt đường trên các trục quốc lộ chính: lún vệt bánh xe ở Quốc lộ 5, Quốc lộ 1, đại lộ Đông-Tây, đường dẫn cầu Thanh Trì, đường vành đai III-Hà Nội; hư hỏng lớp phủ mặt Cầu Thăng Long; lún vệt bánh xe sâu ở đường vào cảng Cát Lái.... Việc xuống cấp về chất lượng của các công trình trên đã ảnh hưởng không nhỏ tới sự phát triển kinh tế- xã hội, chính phủ phải bỏ ra một số lượng tiền lớn để việc sửa chữa, khắc phục hậu quả, đồng thời, người tham gia giao thông cũng bị ảnh hưởng cả về vật chất lẫn tinh thần.

Trong khoảng 05 năm gần đây, Bộ GTVT đã có khá nhiều các hoạt động để hạn chế và dần khắc phục các hư hỏng của mặt đường BTN. Đầu tiên là chiến dịch kiểm soát xe quá tải, tiếp đến là rà soát và tăng cường công tác quản lý chất lượng thi công: từ vật liệu thành phần, thiết kế hỗn hợp và chất lượng thi công mặt đường. Tiếp đến là các nỗ lực nghiên cứu và tìm kiếm giải pháp vật liệu cải tiến, có khả năng sử dụng tốt trong điều kiện khai thác khó khăn như nhiệt độ cao, tải trọng lớn, lượng mưa và độ ẩm cao sử dụng vật liệu và áp dụng công nghệ cải tiến tại các vị trí đặc biệt như lớp phủ mặt cầu, đoạn dốc cao, đường cua gấp, đoạn qua trạm thu phí, nút giao cắt.

Ở nhiều nước trên thế giới như Anh, Mỹ, Nhật bản, Ukraina ...việc nghiên cứu

và đưa vào sử dụng hỗn hợp BTN có chất kết dính là bitum epoxy làm tầng mặt cho các tuyến đường chịu tải trọng nặng, làm lớp phủ mặt cầu thép đã cho kết quả tốt với sự khắc phục được rất rõ một số nhược điểm của mặt đường BTN sử dụng chất kết dính bitum thông thường.

Việt Nam cũng đã có một công trình thực tế sử dụng bê tông nhựa epoxy (BTNE) là lớp phủ mặt cầu Thuận Phước – Đà Nẵng. Đáng tiếc là ứng dụng đầu tiên này đã không thành công. Lớp phủ bê tông nhựa epoxy trên mặt cầu Thuận Phước vì thế đã được thay thế gần như hoàn toàn bằng hỗn hợp BTN sử dụng bitum polime PMB (BTNP). Các nghiên cứu trước khi áp dụng vật liệu này cũng vào công trình cầu Thuận Phước cũng khá hạn chế.

Hiện nay, ở Việt Nam, epoxy có thể có các nguồn cung trong nước và nước ngoài, nhưng chưa có nghiên cứu nào đánh giá khả năng sử dụng bitum có epoxy làm chất kết dính cho hỗn hợp BTN.

Đề tài “Nghiên cứu thành phần, tính chất cơ học và khả năng sử dụng bitum epoxy làm chất kết dính cho hỗn hợp asphalt tại Việt Nam” là đề tài cần thiết.

II. MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU

Với mục đích nghiên cứu về khả năng áp dụng BTNE trong xây dựng công trình giao thông ở Việt Nam, luận án tập trung nghiên cứu về thành phần, những đặc tính cơ học vật liệu, tiêu chuẩn kỹ thuật, khả năng và hiệu quả ứng dụng của BTNE.

III. MỤC TIÊU VÀ NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

III.1 Mục tiêu

1. Thử nghiệm để đánh giá khả năng sử dụng bitum-epoxy (BE) làm chất kết dính bitum cải tiến cho bê tông nhựa cải tiến và đề xuất hàm lượng epoxy cho BE làm chất kết dính cho BTNE;;
2. Thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa epoxy (BTNE), đánh giá BTNE thông qua các chỉ tiêu kỹ thuật chủ yếu có đối chứng với loại bê tông nhựa cải tiến phổ biến sử dụng ở Việt Nam, là BTNP sử dụng PMB III;
3. Phân tích, tổng hợp và đề xuất các loại kết cấu áo đường có sử dụng bê tông nhựa epoxy ở Việt Nam

III.2 Nội dung nghiên cứu

Nội dung luận án tập trung vào một số vấn đề sau:

1. Nghiên cứu tổng quan về BE và BTNE, các nghiên cứu về vật liệu cũng như ứng dụng vật liệu trong xây dựng đường ô tô ở trong nước và ngoài nước;
2. Nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá vật liệu BE với các hàm lượng epoxy khác nhau, đối chứng với các chỉ tiêu kỹ thuật của PMB, đánh giá khả năng sử dụng BE làm chất kết dính cho BTNE làm lớp mặt kết cấu đường ô tô và phân tích lựa chọn hàm lượng epoxy cho BE làm chất kết dính cho BTNE;
3. Đề xuất phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp BTNE và các chỉ tiêu cơ lý để đánh giá BTNE, nghiên cứu thực nghiệm trong phòng các chỉ tiêu cơ lý của BTNE để đánh giá khả năng và phạm vi sử dụng vật liệu BTNE;
4. Nghiên cứu đề xuất các kết cấu mặt đường điển hình sử dụng BTNE.

IV. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ THỰC TIỄN CỦA ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU

- *Ý nghĩa khoa học*: Luận án nghiên cứu bản chất lý thuyết của hỗn hợp BE và BTNE, phân tích ưu nhược điểm và phạm vi áp dụng của loại vật liệu mới này với những điều kiện Việt Nam. Hệ thống hoá được các tiêu chuẩn thí nghiệm đánh giá chất lượng của BE và BTNE.
- *Ý nghĩa thực tiễn*: Dựa trên các kết quả nghiên cứu trong phòng so sánh đánh giá BTNE và các loại BTN khác, từ đó đề xuất phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp, đề xuất các thí nghiệm và tiêu chuẩn đánh giá chất lượng vật liệu BTNE. Trên cơ sở các đặc tính cơ lý thu được từ thực nghiệm, luận án đề xuất một số loại kết cấu mặt đường có sử dụng BTNE trong xây dựng công trình giao thông ở Việt Nam.

CHƯƠNG 1.

TỔNG QUAN VỀ BITUM-EPOXY VÀ BÊ TÔNG NHỰA EPOXY TRONG XÂY DỰNG ĐƯỜNG Ô TÔ

Bitum-epoxy (BE) và bê tông nhựa epoxy (BTNE) đã được sử dụng trên thế giới khá hiệu quả và cũng đã từng được áp dụng ở Việt Nam trong xây dựng mặt đường ô tô. Với mức độ chưa phổ biến và kinh nghiệm chưa thành công ở Việt Nam trong việc ứng dụng vật liệu này, cần có những nghiên cứu về loại, tỷ lệ, phương pháp thiết kế, các chỉ tiêu đánh giá và phạm vi ứng dụng loại vật liệu này trong xây dựng mặt đường ở Việt Nam. Chương 1 phân tích tổng quan về sử dụng bitum-epoxy và bê tông nhựa epoxy từ đó lựa chọn được loại epoxy làm các cơ sở nghiên cứu thực nghiệm ở các chương tiếp theo.

1.1. Bitum Epoxy và bê tông nhựa Epoxy

1.1.1. *Tổng quan về phụ gia cải thiện tính năng của bitum*

1.1.1.1. *Xu thế sử dụng hỗn hợp BTN cải tiến trong xây dựng đường ô tô*

Bitum dầu mỏ truyền thống đáp ứng tốt các yêu cầu về xây dựng đường ô tô và sân bay thông thường. Với các thay đổi về nhiệt độ khai thác do biến đổi khí hậu, lưu lượng xe và tải trọng xe tăng lên do phát triển kinh tế, vật liệu làm đường cần được cải tiến để phù hợp với yêu cầu xây dựng đường ô tô và sân bay cấp cao. Bitum cải tiến với các ưu điểm là tăng khả năng chịu lực và chịu biến dạng của kết cấu mặt đường BTN được nghiên cứu và áp dụng để đáp ứng các yêu cầu đó. Để tối ưu hóa hiệu quả của bitum cải tiến người ta thường sử dụng chúng kết hợp với các cốt liệu có chất lượng cao. Tuy nhiên có một hạn chế là hỗn hợp BTN cải tiến có giá thành cao hơn so với hỗn hợp BTN truyền thống.

1.1.1.2. *Quan điểm và yêu cầu về bitum cải tiến dùng trong xây dựng mặt đường ô tô*

Thành phần chủ yếu của bitum cải tiến là bitum và phụ gia. Có nhiều loại phụ gia được sử dụng, phổ biến là lưu huỳnh, mangan hữu cơ, bột cao su và các polyme dẻo nhiệt [56]. Phụ gia có thể trộn trực tiếp vào BTN khi sản xuất hỗn hợp hoặc được trộn với bitum tại nhà máy sản xuất bitum để được sản phẩm là các bitum cải tiến.

Bitum là vật liệu có tính đàn - nhớt. Tính chất này ảnh hưởng rất lớn đến đặc tính kỹ thuật của BTN, đặc biệt là tính chống biến dạng dư và nứt. Một trong những vai trò cơ bản của chất cải tiến bitum là hạn chế biến dạng dư và hạn chế

tích lũy biến dạng dư trong điều kiện nhiệt độ cao và/hoặc lượng giao thông lớn. Có thể đạt được điều này bằng cách làm cứng hóa bitum hoặc bằng cách tăng tính đàn hồi của bitum để giảm biến dạng dẻo (nhót) từ đó làm giảm biến dạng dư. Tăng độ cứng của bitum sẽ làm tăng độ cứng động học của hỗn hợp BTN. Do đó cải tiến khả năng phân tán lực của vật liệu trong hỗn hợp BTN làm tăng độ bền của kết cấu. Tăng thành phần dẻo của bitum sẽ góp phần cải tiến độ đàn hồi của BTN, tính chất quan trọng cần có do phải chịu ứng suất kéo lớn. Việc cải thiện đặc tính biến dạng của bitum để áp dụng cho đường có tải trọng xe lớn thường đi đôi với yêu cầu duy trì hoặc cải thiện đặc tính kháng nứt mỏi để đảm bảo tuổi thọ sử dụng của mặt đường.

Các chất phụ gia dùng để cải tiến bitum, ngoài yêu cầu thỏa mãn đặc tính kỹ thuật mong muốn, được lựa chọn dựa vào hai yếu tố là tính kỹ thuật và tính kinh tế, tức là:

- Sẵn có và có thể trộn được vào bitum;
- Không biến chất ở nhiệt độ trộn hỗn hợp; không làm cho bitum quá nhót ở nhiệt độ trộn và nhiệt độ đầm nén; không làm bitum bị cứng hoặc giòn khi phải làm việc ở nhiệt độ thấp;
- Đảm bảo tính kinh tế.

Sau khi trộn thêm các chất phụ gia, bitum cải tiến phải có các đặc tính sau:

- Giữ được các đặc tính kỹ thuật (ổn định về lý – hóa học) trong thời gian bảo quản, thi công và suốt thời kì khai thác của kết cấu;
- Có thể được chế tạo bằng các thiết bị và công nghệ thông thường;
- Đạt được độ nhót khi trộn và phun ở nhiệt độ sử dụng.

Các chất phụ gia sau khi trộn vào bitum để có được một loại bitum mới – bitum cải tiến phải đạt được một trong các mục đích sau [56]:

- Hạn chế sự nhạy cảm với nhiệt độ: tăng nhiệt độ hóa mềm, giảm nhiệt độ hóa cứng, làm tăng (rộng) phạm vi nhiệt độ công tác (có lợi) của bitum
- Cải thiện tính dính bám giữa bitum và cốt liệu trong BTN trong mọi nhiệt độ khai thác. Nâng cao được cường độ và tính ổn định cường độ của BTN khi chịu tác dụng bất lợi của nhiệt và nước
- Cải thiện tính đàn hồi: cho phép bitum, BTN có thể biến dạng và phục hồi biến dạng dễ dàng mà không bị đứt, nứt, gãy trong mọi phạm vi nhiệt độ phục vụ
- Cải thiện khả năng chịu mỏi: BTN sử dụng bitum cải tiến sẽ có khả năng

chịu đựng tốt tác dụng trùng phục của xe cộ, đặc biệt là ở nhiệt độ thấp.

1.1.1.3. **Các nhóm chất phụ gia và khả năng cải thiện tính chất của hỗn hợp BTN làm mặt đường**

Chất phụ gia cho BTN được phân thành ba nhóm cơ bản, nhóm phi polime, nhóm polime và nhóm hóa học (tạo phản ứng hóa học). Phân nhóm phụ gia thể hiện trong **Bảng1-1**

Bảng1-1: Các loại phụ gia để cải thiện bitum [61][49]

Nhóm/Loại phụ gia	Ví dụ chất phụ gia
I. Nhóm phi polime	
1. Các loại bột khoáng	Bột vôi, bột các bon, tro bay
2. Phụ gia chống bong tách	Các amin và amit hữu cơ
3. Phụ gia trương nở	Li-nhin, lưu huỳnh
4. Phụ gia chống ô xi hóa	Chất chống ô xy hóa kẽm, chất chống ô xi hóa chì, phenon, amin
5. Hợp chất kim loại – hữu cơ	Hợp chất mangan – hữu cơ, hợp chất coban – hữu cơ
6. Các loại khác	Dầu sét (shale oil); bitum đen (Gilsonite), si-licon, các sợi vô cơ (như sợi các bon, sợi thủy tinh, sợi thép),...
II. Nhóm polime	
1. Chất đàn hồi - Elastomers	Cao su tự nhiên, cao su tổng hợp và các mảnh cao su
2. Chất đàn hồi nhiệt dẻo – Thermoplastic elastomers	Chất đồng trùng hợp khối của butadiene và styrene loại SBS
3. Nhựa nhiệt rắn – Thermosetting plastics	Epoxy, furfurol- và phenol-formaldehyd, carbamide, silicone,...
4. Nhựa nhiệt dẻo – Thermoplastics plastics	polyvinyl acetate, polystyrene, polyisobutylene, polyethylen, polypropylen, polyvinyl clorua, nhựa nhiệt dẻo Elvaloy-4170, latex của butonal loại NS, Viskoplast-S, ethylene methyl acrylate (EVA) và nhựa nguồn gốc dầu mỏ.
III. Phụ gia (tạo phản ứng) hóa học	Chất tạo chuỗi polimer (chất đơn phân) Bitum lưu hóa (bitum + lưu huỳnh) Bitum nitro hóa (bitum + nitric acid (HNO ₃))

Chất đàn hồi - Elastomers

Loại chất phụ gia này gồm cao su tự nhiên, cao su tổng hợp và các mảnh cao su. Đối với bitum polime, thành phần cao su tạo ra một tính chất mới: tính mềm, là tính chất đặc trưng cho cao su tự nhiên trong một dải nhiệt độ rộng. Phụ gia này tạo ra khả năng đàn hồi ở nhiệt độ thấp do đó cải thiện khả năng kháng nứt. Do có thể duy trì tính đàn hồi ở nhiệt độ cao, bitum được cải thiện bằng cao su có khả năng chống lại biến dạng và tăng cường độ. Ngoài ra, cao su còn giúp cho bitum tăng cường khả năng kháng nước, chống băng giá, cải thiện độ bền và khả năng chống lão hóa. Cao su có thể kết hợp với bitum thông qua trộn trực tiếp hoặc nhờ dung môi.

Nhược điểm chính của nhóm phụ gia chất đàn hồi là sự phân tán kém trong bitum, vì vậy cần có các biện pháp đặc biệt để thu được bitum biến tính đồng nhất (nung chảy, dung môi đặc biệt, v.v.). Một nhược điểm nữa là có sự phân tách pha giữa phụ gia và bitum khi bitum cải tiến được bảo ôn ở trạng thái lỏng trong quá trình bảo quản. Trên thực tế, người ta phải sử dụng các máy trộn có lực cắt lớn hoặc trung bình để phân tán hoàn toàn cao su vào bitum và duy trì hoạt động của các thiết bị trộn trong thời gian bảo quản bitum cải tiến.

Phụ gia bột cao su, mảnh cao su từ lốp xe hay các sản phẩm phế thải khác có ưu điểm là chi phí vật liệu đầu vào thấp và giải quyết rác thải đem lại các lợi ích với môi trường. Tuy nhiên, vấn đề chế tạo từ lốp cao su thành bột cao su để trộn với bitum có các yêu cầu cao về công nghệ (bóc tách các vật liệu kim loại, sợi trong lốp; làm lạnh; nghiền) và chi phí cao. Còn các mảnh cao su có yêu cầu và chi phí chế tạo không cao nhưng khó khăn về công nghệ trộn với bitum.

Chất đàn hồi nhiệt dẻo (TE) – Thermoplastic elastomers

Nhóm này có 3 loại chất đồng trùng hợp khối styrene: styrene-butadiene-styrene (SBS), styrene-isoprene-styrene (SIS), styrene-ethylene / butylene-styrene (SEBS) với hàm lượng của polime trong PMB trong khoảng 3-10%. Các chất đồng trùng hợp khối loại SBS được sử dụng phổ biến để cải thiện bitum nhờ khả năng tăng cường độ của bitum và tạo ra các sản phẩm bitum polime có tính đàn hồi kể cả ở nhiệt độ thấp. Chất phụ gia SBS được cấu trúc bởi các chuỗi ba khối Styrene-Butadiene-Styrene với hình thái hai pha của các Styrene rắn (PS) phân tán (pha phân tán) trong các Butadiene dẻo (PB) linh hoạt (pha liên tục). Liên kết hóa học giữa các khối Styrene rắn và Butadiene dẻo có thể cố định pha phân tán các khối Styrene rắn trong pha liên tục các khối Butadiene. Nhiệt độ

chuyển hóa của các khối Styrene rắn là khoảng 95°C , còn của các khối Butadiene là khoảng -80°C , do vậy TE có thể duy trì khả năng biến dạng đàn hồi cao trong phạm vi nhiệt độ khoảng $-80 \div 80^{\circ}\text{C}$. Trong điều kiện nhiệt độ khai thác của mặt đường bê tông nhựa, các khối Styrene rắn có trạng thái cứng-giòn tạo nên cường độ của SBS trong khi các khối Butadiene dẻo đảm bảo tính đàn hồi. Khi được trộn với bitum, các khối Styrene rắn trong SBS thẩm thấu một số các nhánh bão hòa (parafin-naphthenic) và nhánh vòng (hydrocarbon thơm) trong các thành phần nhẹ của bitum, làm mềm các khối Styrene rắn và làm cứng nhựa đường. Khi hàm lượng polime nhỏ, SBS phân bố như là các pha không liên tục trong bitum. Khi hàm lượng polime tăng lên, sự đảo pha trong nhựa đường cải thiện được bắt đầu, tạo lập hai pha giàu bitum và giàu SBS liên tục được liên kết với nhau tạo lập nhựa đường cải thiện có mô đun phức và độ nhớt cao, cải thiện ứng xử đàn hồi và kiểm soát sức kháng nứt ở nhiệt độ thấp.

Nhựa nhiệt rắn (polime nhiệt rắn) – Thermosetting plastics

Nhựa nhiệt rắn (TP) là các polime có thể chuyển sang trạng thái rắn khi gia nhiệt hoặc cho thêm chất làm cứng. Trước khi làm cứng các phân tử TP có cấu trúc tuyến tính, giống như các phân tử nhựa nhiệt dẻo, nhưng kích thước các phân tử của chúng nhỏ hơn đáng kể. Các phân tử TP có hoạt động hóa học mạnh do chúng chứa các liên kết đôi (chưa bão hòa) hoặc các nhóm hoạt động hóa học. Do đó, trong các điều kiện nhất định (khi đun nóng, chiếu xạ hoặc thêm chất làm cứng) các phân tử nhiệt rắn phản ứng với nhau và tạo thành một mạng liên tục. Chất kết dính bitum-polime với phụ gia chất dẻo nhiệt rắn có khả năng dính bám tương đối cao với các hạt khoáng chất và có độ bền cao. Epoxy, phenol-formaldehyd, carbamide, polyester, silicone và các loại chất dẻo khác thuộc nhóm chất dẻo nhiệt rắn. Ba loại bitum polyme nhiệt rắn được biết đến phổ biến là: Shell grip/spray grip; Erophalt và Sheli epoxy asphalt. Các loại này đã bắt đầu được sử dụng trên thế giới từ 1969 và trở nên phổ biến từ năm 1986.

Sử dụng chất dẻo nhiệt rắn cho hỗn hợp bitum-polime tạo ra một số nhược điểm: Độ cứng tăng lên ở nhiệt độ thấp; Việc sử dụng các chất làm cứng đặc biệt làm phức tạp hệ thống và tăng giá thành của nó; Hiệu quả của chất dẻo nhiệt rắn thường chỉ thể hiện rõ khi thêm một lượng lớn vào trong bitum – khoảng hơn 10% khối lượng.

Nhựa nhiệt dẻo (polime nhiệt dẻo) - Thermoplastics plastics

Các polyme nhiệt dẻo thường được sử dụng hiện nay: polyvinyl acetate,

polystyrene, polyisobutylene, polyethylen, polypropylen, polypropylen clorua, Viskoplast-S, EVA, ethylene methyl acrylate; Cao su tổng hợp thuộc loại Butonal NS (BASF, Đức) và nhựa nhiệt dẻo của dòng Elvaloy (DuPont, Hoa Kỳ); Nhựa nguồn gốc dầu mỏ thu được từ các sản phẩm phụ của nhiên liệu hóa thạch nhiệt hóa cũng chiếm vị trí đặc biệt trong các loại nhựa nhiệt dẻo.

Cải tiến bitum bằng cách cho thêm các polime nhiệt dẻo đã được kiểm chứng qua các thí nghiệm về các chất liên kết được cải tiến dùng cho đường bộ. Bởi vì là các chất dẻo dưới tác động của nhiệt, chúng có đặc tính là mềm đi khi nóng lên và cứng lại khi nguội đi. Các polime nhiệt dẻo khi được trộn với bitum, khi ở nhiệt độ môi trường bình thường chúng liên kết với bitum và làm tăng độ nhớt của bitum. Tuy nhiên, các chất polime nhiệt dẻo không làm tăng đáng kể độ đàn hồi của bitum, khi bị nung nóng chúng bị tách ra khỏi bitum, mà điều này có thể dẫn đến phân tán thô khi nguội đi. Tuy vậy, chấp nhận những hạn chế này việc sử dụng EVA với hàm lượng 5% trong bitum 60/70 đã trở nên rất thông dụng. Các đặc tính Marshall và vệt lún bánh xe của BTN rải nóng sử dụng loại bitum cải tiến này có sự cải thiện rất rõ ràng so với BTN sử dụng bitum truyền thống. Cụ thể, độ ổn định Marshall tăng lên từ 1,2 đến 1,3 lần; độ lún trong thí nghiệm hần lún giảm đi 4 lần; mức độ chống lại sự biến dạng cũng ít nhạy cảm đáng kể đối với sự thay đổi nhiệt độ.

1.1.2. *Phụ gia Epoxy*

Epoxy là một loại vật liệu nhiệt rắn (hóa rắn dưới tác dụng của nhiệt độ hay phản ứng hóa học mà sau đó không nóng chảy hay hòa tan lại được nữa), được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng về composite có kết cấu đặc trưng bởi nhựa epoxy mang lại một sự phối hợp các tính chất một cách độc nhất, không thể có được ở các nhựa nhiệt rắn khác. Epoxy có cường độ cao, độ co rút thấp, khả năng bám dính tốt với các chất nền khác nhau, là vật liệu cách nhiệt cách điện hiệu quả, bền với hóa chất và dung môi, giá rẻ và ít độc hại. Epoxy thường xuyên được dùng làm keo dính, lớp phủ, đóng gói, vật liệu đổ khuôn và chất kết dính...

Đối với từng mục đích sử dụng, epoxy sẽ được tạo nên bằng cách phối trộn ba thành phần cơ bản là: nhựa gốc (nhựa chính), chất làm cứng và chất biến tính. Trong khi các công thức phối trộn đơn giản nhất chỉ là kết hợp giữa một nhựa epoxy đơn và một chất làm cứng, thì các công thức phức tạp hơn sẽ bao gồm nhiều nhựa epoxy phức, các chất biến tính và một tổ hợp các chất làm cứng. Phần tiếp sau đây sẽ phân tích đặc điểm, tính chất cũng như ảnh hưởng của ba

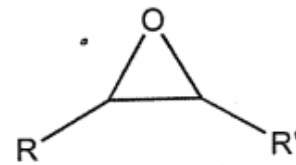
thành phần nói trên đến các đặc tính vật lý và cơ học của vật liệu.

1.1.2.1. Nhựa cơ bản (Nhựa chính)

a. Thành phần hóa học – các dạng nhựa chính [28]

Nhựa epoxy là loại polimer nhiệt rắn trong đó có các liên kết chéo được hình thành từ phản ứng của nhóm epoxy. Nhựa epoxy là một phân tử dạng mạch vòng gồm 3 nguyên tử: một nguyên tử oxy và hai nguyên tử cacbon (**Hình 1-3**). Hai nhánh kết nối vào hai nguyên tử cacbon của mạch vòng có thể rất đa dạng, từ đó tạo ra các loại nhựa epoxy khác nhau.

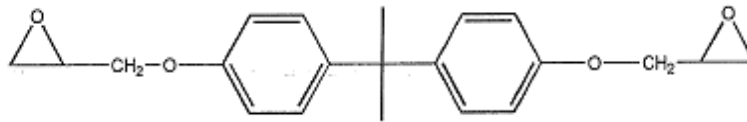
Nhựa epoxy được sản xuất từ các phân tử bazơ có chứa liên kết cacbon-carbon (C-C) chưa bão hòa. Có hai quá trình có thể được sử dụng để chuyển đổi liên kết đôi này thành một vòng oxirane: dehydrohalogenation của một epoxidation peroxit trung gian và halohydrin trực tiếp. Trong đó, quá trình halohydrin được sử dụng là chủ yếu. Nguyên liệu thô quan trọng nhất được sử dụng để sản xuất hầu hết các loại nhựa epoxy thương phẩm là epichlorohydrin. Ba loại nhựa epoxy cơ bản thường được ứng dụng trong vật liệu composit là: phenolic glycidyl ete, aromatic glycidyl amin và cycloaliphatic.



Hình 1-1. Cấu trúc hóa học cơ bản của nhóm epoxy

***/Phenolic glycidyl ete**

Phenolic glycidyl ete được tạo thành từ phản ứng ngưng tụ giữa epichlorohydrin và một nhóm phenol. Cấu trúc của phân tử chứa nhóm phenol và số nhóm phenol trong một phân tử sẽ là yếu tố phân biệt các loại nhựa khác nhau. Trong nhóm này, loại nhựa epoxy thương phẩm đầu tiên là diglycidyl ete của bisphenol-A (DGEBA), mà hiện nay vẫn là loại nhựa được sử dụng rộng rãi nhất. Cấu trúc của DGEBA nguyên chất được thể hiện trong **Hình 1-2**. Việc thay đổi tỷ lệ giữa epichlorohydrin và bisphenol-A trong quá trình sản xuất sẽ tạo thành các nhựa cao phân tử khác nhau. Khối lượng phân tử tăng sẽ làm tăng độ nhớt. Sự biến đổi độ nhớt cũng được quan sát trong quá trình cộng hidro vào các nhựa epoxy thuộc nhóm bisphenol-A. Khi vòng thơm benzene được chuyển hóa thành vòng cyclohexan (tạo nên vật liệu cycloaliphatic) thì độ nhớt của nhựa giảm đi.

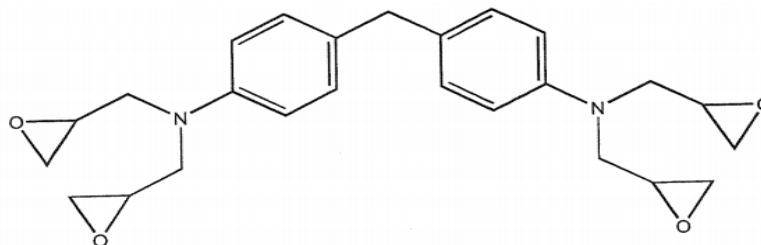


Hình 1-2. Cấu trúc hóa học của ete diglycidyl bisphenol-A

Một loại nhựa trong nhóm này là nhựa epoxy bisphenol hydro hóa. Trong quá trình này, đầu tiên, nhựa epoxy được tạo thành từ epichlorohydrin và bisphenol-A. Tiếp theo, vòng benzen thơm được chuyển thành cyclohexane, tạo ra một vật liệu cycloaliphatic. Điều này dẫn đến nhựa có độ nhớt thấp, tương đối vừa phải với một cấu trúc tương tự như các loại DGEBA.

***/Glycidyl amin**

Glycidyl amin được tạo thành thông qua phản ứng giữa epichlorohydrin và một amin, thường là amin thơm để sử dụng cho các ứng dụng ở nhiệt độ cao. Nhựa quan trọng nhất trong nhóm này là tetraglycidyl methylene dianiline (TGMDA) có cấu trúc được thể hiện trong Hình 1-3. Ưu điểm của nhựa TGMDA là các đặc tính tốt ở nhiệt độ cao.

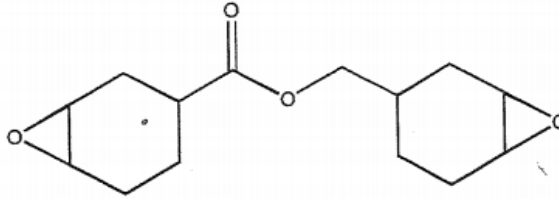


Hình 1-3. Cấu trúc hóa học của tetraglycidyl methylene dianiline (TGMDA)

Các nhựa glycidyl amin thường ở thể lỏng với độ nhớt cao hoặc thể bán rắn ở nhiệt độ trong phòng. Một số nhựa thuộc nhóm glycidyl amin có độ nhớt rất thấp ở nhiệt độ trong phòng là triglycidyl p-amino-phenol (TGPAP), diglycidyl aniline và tetraglycidyl meta-xylene diamin. Nhựa TGPAP, bao gồm ba nhóm epoxy gắn với một vòng benzen đơn. Nhựa này có độ nhớt rất thấp ở nhiệt độ phòng, từ 0,5 đến 5,0 Pa.s (500 đến 5000 cP). Do độ nhớt thấp của nó, các loại nhựa TGPAP thường được trộn với các epoxy khác để điều chỉnh dòng chảy hoặc keo của hệ thống đã được tạo ra mà không làm giảm T_g (nhiệt độ chuyển tiếp thủy tinh), điều này làm cho chúng trở nên hữu ích cho các ứng dụng yêu cầu dòng nhựa rất cao, ví dụ như dây cuộn dây tóc hoặc khuôn dạng lỏng. Nhược điểm chính là chi phí, có thể gấp 6-8 lần so với các loại nhựa bisphenol-A thương phẩm.

***/Cycloaliphatic**

Cycloaliphatic được phân biệt với các nhựa epoxy khác bởi chúng chứa một nhóm epoxy ngay trong cấu trúc vòng thay vì ở ngoài vòng hoặc dạng nhánh (**Hình 1-4**). Các nhựa này có độ nhớt rất thấp (0,25-0,45 Pa.s, hoặc 250-450 cP, ở 25⁰C, hoặc 77⁰F) và tính năng cơ nhiệt tốt. Không giống như epoxy bisphenol-A, epoxy cycloaliphatic phản ứng rất chậm với một số amin ở nhiệt độ trong phòng.



Hình 1-4. Cấu trúc hóa học của 1 nhựa cycloaliphatic epoxy tiêu biểu

b. Một số chỉ tiêu cơ bản của nhựa chính [28]

- Nhiệt độ chuyển tiếp thủy tinh T_g : Một trong những chỉ tiêu đầu tiên về nhiệt độ của các polime composit (trong đó có nhựa epoxy) là nhiệt độ mà polime chuyển từ trạng thái đàn hồi sang trạng thái thủy tinh T_g . Ở dưới nhiệt độ T_g , polymer sẽ tồn tại ở trạng thái thủy tinh trong đó chỉ có một loại chuyển động là chuyển động dao động. Ở trên nhiệt độ này, polymer sẽ chuyển sang trạng thái ‘cao su’ trong đó từng đoạn riêng biệt của phân tử có khả năng chuyển động tương đối với nhau. Mô đun của một vật liệu ở trên nhiệt độ T_g của nó thường thấp hơn so với giá trị ở dưới T_g . T_g của một nhựa epoxy phụ thuộc vào cấu trúc phân tử và mật độ liên kết chéo.
- Trạng thái và độ nhớt: Sự khác nhau căn bản về tính chất vật lý giữa các sản phẩm nhựa epoxy chưa làm cứng trong cùng một họ nhựa là trạng thái vật liệu (dạng vật chất) và độ nhớt ở nhiệt độ trong phòng, với sự thay đổi từ chất lỏng loãng cho tới chất rắn. Ứng dụng hay hướng dẫn quy trình sản xuất sẽ quyết định yêu cầu về độ nhớt và trạng thái của nhựa. Các loại nhựa thông thường được sử dụng có thể mua như bột, chất lỏng, các dung dịch được sản xuất từ các dung môi khác nhau và nhũ tương nước.
- Khối lượng epoxy tương đương (EEW): Một chỉ tiêu quan trọng khác nữa quyết định xem nhựa có phù hợp để sử dụng hay không chính là khối lượng epoxy tương đương (EEW), được xác định bằng khối lượng nhựa trên một nhóm epoxy. EEW được sử dụng để tính toán tỷ lệ cân bằng hóa học giữa epoxy và tác nhân làm cứng, từ đó tối ưu các tính chất sau khi làm cứng của sản phẩm. Các nhà cung cấp nhựa epoxy thường xuyên xác định EEW của từng lô sản xuất thực nghiệm như là một phần của các quy trình kiểm soát chất lượng.

c. Một số loại nhựa epoxy thương phẩm phổ biến

Các loại nhựa epoxy khác nhau có sẵn từ nhiều nhà cung cấp, một số được tóm tắt trong Bảng 1 – Phụ lục 12. Sự khác biệt chính giữa các loại này là độ nhớt, có thể thay đổi trong khoảng từ 5 đến 14 Pa.s (5,000 đến 14,000 cP) ở 25⁰C.

1.1.2.2. Chất làm cứng cho nhựa epoxy

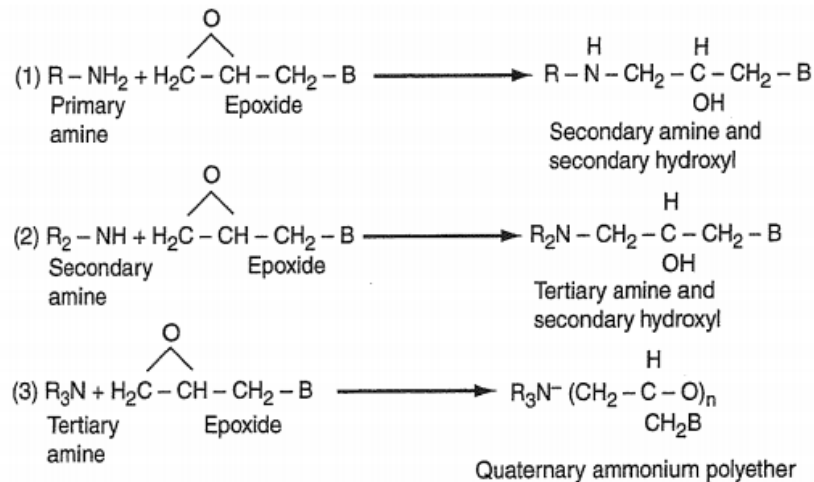
Nhựa epoxy phản ứng với một số lượng lớn các chất hóa học được gọi là chất làm cứng. Nhóm chất làm cứng thường được sử dụng nhất là amin, dẫn xuất của amin và anhidrit. Thời gian làm cứng rất khác nhau, có thể chỉ vài giây cho tới vài ngày, thậm chí đến vài tháng hoặc đến vài năm nếu để ở nhiệt độ trong phòng. Các chất làm cứng được chia thành các loại chính như sau [28][41]:

a. Chất làm cứng không gia nhiệt

Chất làm cứng không gia nhiệt là chất khi trộn vào nhựa epoxy thì không cần gia nhiệt mà hỗn hợp vẫn có khả năng hóa cứng, bao gồm: aliphatic amin, polyamid và aminoamin.

***/ Aliphatic amin (amin no)**

Aliphatic amin là chất làm cứng thường được kết hợp với nhựa epoxy nhất. Hai loại này được kết hợp với nhau theo thành phần tỷ lệ cân bằng hóa học. Tuy nhiên, tỷ lệ phối trộn thường được xác định thông qua thực nghiệm và liều lượng chất làm cứng được đưa ra theo đơn vị phr (số phần chất làm cứng trên 100 phần bis-A epoxy). Cơ chế phản ứng của nhựa epoxy với amin bậc 1, amin bậc 2 và amin bậc 3 được minh họa trong **Hình 1-5**.



Hình 1-5. Phản ứng Epoxy với amin [41]

(1) Nhóm amin chính phản ứng với nhóm epoxy để cung cấp các nhóm amin thứ cấp.

(2) Các nhóm amin thứ cấp phản ứng thêm với các nhóm epoxy và tạo ra các nhóm amin bậc

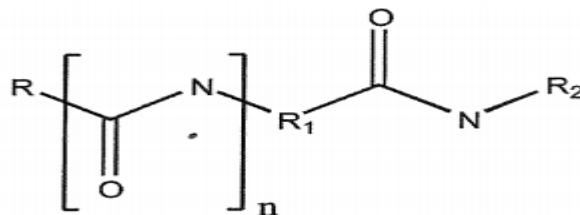
ba, trong cả hai trường hợp, các nhóm hydro được hình thành, được cho là xúc tác cho phản ứng amin-epoxy.

(3) Nhóm amin bậc hai tạo ra hiệu ứng xúc tác và làm cho nhóm epoxy tự trùng hợp để tạo thành một polyether.

Những amin bậc 1 thường được sử dụng là dietylen triamin (DETA), trietylen tetramin (TETA), tetraetylen pentamin (TEPA) và N-aminoethyl-piperazin (N-AEP). Những amin này làm cứng ở nhiệt độ phòng. Các phản ứng của amin bậc 1 tỏa nhiệt mạnh và có thể được phối trộn với nhựa epoxy, etylen hoặc propylene oxide để tạo nên các chất làm cứng có độ nhớt cao, hoạt tính ít hơn và ít độc tố hơn amin nguyên chất.

**/ Polyamid*

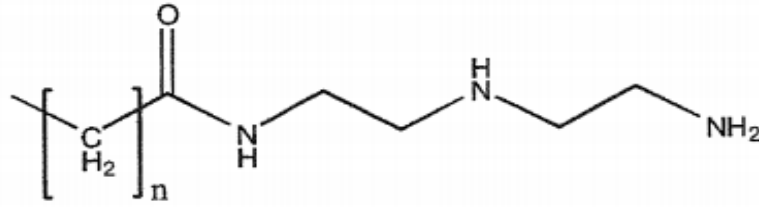
Polyamid giống như polyamin, cũng được phân loại thành bậc 1, bậc 2 và bậc 3 tùy thuộc vào nhóm thế trong nhóm amid **Hình 1-6**. Nói chung, polyamid kém phản ứng hơn hầu hết các polyamin. Chính vì vậy, chúng thường được biến tính hay cộng thêm phụ gia để tăng khả năng phản ứng ở nhiệt độ môi trường, giảm độ nhớt và tăng khả năng tương thích với keo epoxy. Chúng có khả năng bám dính tốt, ít độc và dẻo dai nhưng chúng có xu hướng tối màu nên ứng dụng có thể bị giới hạn. Polyamid hay được dùng làm lớp bao phủ, keo dính, chất hàn.



Hình 1-6. Cấu trúc hóa học của polyamid

**/ Amidoamin*

Amidoamin chứa cả nhóm amin và nhóm amid (**Hình 1-7**). Vật liệu này chứa nhóm imidazoline (cấu trúc vòng 5 cạnh) nên thể hiện độ cứng cao hơn ở sản phẩm đã được làm cứng, dẫn đến T_g lớn hơn. Amidoamin là chất lỏng màu vàng hổ phách có độ nhớt thấp, độ dẻo cao, mềm dẻo và bám dính, đặc biệt là đối với bê tông xi măng. Loại chất làm cứng này có xu hướng kháng ẩm tốt hơn aliphatic polyamine. Cả polyamid và amidoamin chỉ kết hợp với một nhánh của cấu trúc mạch vòng epoxy, nên chúng phải được trộn kỹ trước khi sử dụng. Khi được khuấy trộn kỹ, chất làm cứng và nhựa epoxy có thể phản ứng một phần trước khi chúng trở nên hoàn toàn tương thích với nhau.



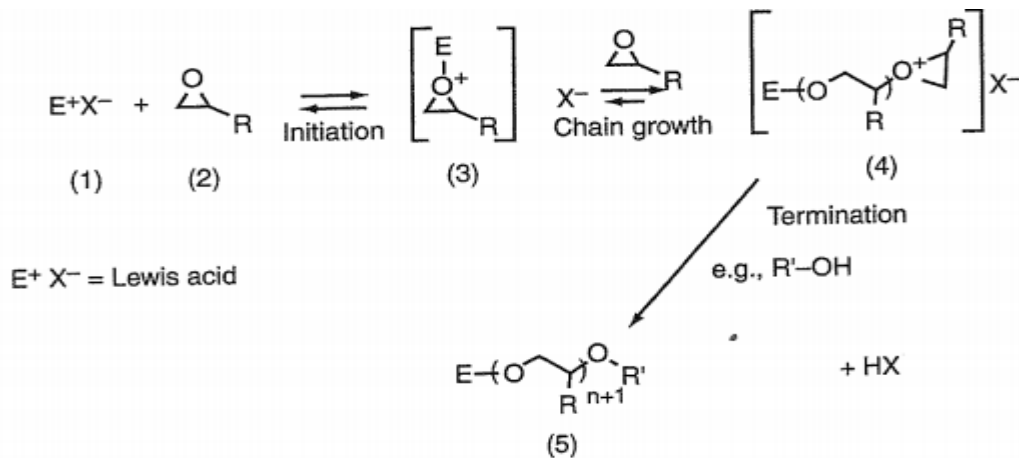
Hình 1-7. Cấu trúc hóa học của một amidoamin

b. Chất làm cứng ở nhiệt độ phòng và nhiệt độ cao

Khác với amin và amid đã được thảo luận ở trên, hai loại chất làm cứng dưới đây bao gồm các tổ hợp của BF_3 và imidazole, bao gồm các biến thể khác nhau, có thể được làm cứng một cách an toàn cả ở nhiệt độ phòng hay ở nhiệt độ cao. Chúng thường được sử dụng như chất tăng tốc kết hợp với các chất làm cứng epoxy khác.

***/ Tổ hợp của boron trifluoride và amin**

Tổ hợp của boron trifluoride và amin làm cứng nhựa epoxy bằng sự polime hóa xúc tác cation. Cơ chế này được chỉ ra trong **Hình 1-8**. Boron trifluoride thuần khiết (BF_3) phản ứng với bis-A epoxy tiêu chuẩn trong vài giây, vì thế độ bền ở nhiệt độ phòng được tạo ra cho phân tử này bằng cách phối trộn BF_3 với các amin khác nhau. Hệ chất làm rắn này có thể được phối trộn để làm cứng trong vài giờ ở nhiệt độ thường hay chúng có thể được thiết kế bền ở nhiệt độ phòng và đòi hỏi làm cứng ở nhiệt độ cao. Ưu điểm của loại chất làm cứng này là được sử dụng với tỷ lệ tương đối thấp chỉ từ 4 đến 17 phần so với 100 phần epoxy.



Hình 1-8. Cơ chế phản ứng giữa Epoxy với tổ hợp của boron trifluoride và amin [42]

***/ Dẫn xuất imidazole**

Dẫn xuất imidazole là một nhóm độc nhất trong các chất làm cứng có ứng dụng trong điện tử, chất dính kết cấu, ô tô và composit trong ngành hàng không vũ trụ.

Chất làm cứng imidazole đặc trưng bởi T_g cao. Quá trình làm cứng đầu tiên xảy ra thường là từ 1,5 đến 2h ở 80 đến 100°C, quá trình làm cứng tiếp theo từ 2 đến 4h ở 150°C đến 200°C. Độ bền hóa học của sản phẩm sau khi làm cứng thường giống như kết quả đạt được với amin thơm và T_g có thể vượt quá 200°C.

c. Chất làm cứng ở nhiệt độ cao

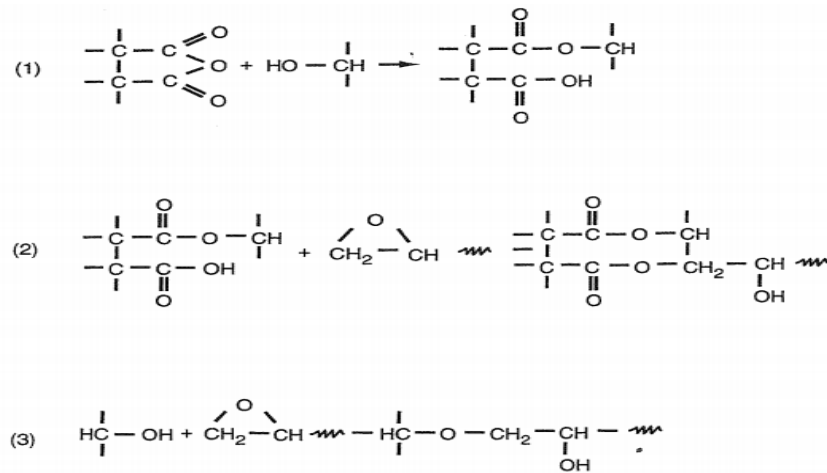
Chất làm cứng ở nhiệt độ cao bao gồm amin thơm và anhidrit.

***/ Amin thơm**

Amin thơm thường là các chất làm cứng dạng bột mịn, được nghiền hay làm nóng chảy trong nhựa epoxy. Các amin thơm thường đắt hơn aliphatic amin và ít đa dạng hơn. Phản ứng giữa amin thơm và nhựa epoxy xảy ra theo cơ chế giống như được miêu tả trong **Hình 1-5**.

***/ Anhidrit**

Một loại chất làm cứng chính khác nữa cho nhựa epoxy là anhydrit (**Hình 1-9**). Phần lớn các sản phẩm sử dụng trong các ứng dụng epoxy – composit là những chất lỏng có độ nhớt thấp hay ở dạng hỗn hợp eutectic có độ nhớt vừa phải, và cũng có không ít anhidrit ở trạng thái rắn. Phản ứng giữa chất làm cứng anhidrit và nhựa epoxy xảy ra theo cơ chế phức tạp, bởi vì có ba phản ứng cạnh tranh cùng xảy ra.



Hình 1-9. Cơ chế phản ứng giữa Epoxy và anhydrit [42].

- (1) Việc mở vòng anhydrit bằng hydro có còn để tạo thành đơn chất.
- (2) Sau đó (1), các nhóm carboxylic mới sinh phản ứng với epoxide để tạo liên kết este.
- (3) Các nhóm epoxy phản ứng với các nhóm hydroxy non trẻ hoặc hiện có, được xúc tác bởi axit, tạo ra một liên kết khác.

Anhidrit thường được sử dụng theo tỷ lệ từ 0,4 đến 1,1 so với epoxy. Quá trình

làm cứng đầu tiên xảy ra trong khoảng từ 80⁰C đến 150⁰C và quá trình làm cứng tiếp theo có thể lên đến 200⁰C.

Chất làm cứng, các chất phụ gia và dẫn xuất của chúng được cung cấp bởi nhiều công ty với nhiều loại sản phẩm (Bảng 2 – Phụ lục 12). Có thể sử dụng phối hợp nhiều chất làm cứng khác nhau và nhiều loại nhựa epoxy khác nhau để tạo ra cùng tính chất của sản phẩm sau khi làm cứng, nhưng khác nhau ở một thông số khác như độ nhớt của hỗn hợp, thời gian làm cứng và hình thức bề ngoài.

1.1.3. *Bitum-Epoxy*

Bitum-Epoxy là một hệ thống hóa học hai thành phần (hai pha), trong đó một phần là epoxy nhiệt rắn (pha liên tục) được pha trộn với các bitum thông thường (pha phân tán). Trước khi trộn, Bitum-Epoxy thường được lưu trữ trong hai thành phần riêng biệt: nhựa epoxy (Phần A) và bitum (Phần B) **Hình 1-10**. Tỷ lệ phần trăm của Epoxy trong BE thường dao động từ 15%÷50% theo khối lượng.



Hình 1-10.. Hai thành phần của Bitum-Epoxy

Bitum là chất kết dính nhạy cảm với nhiệt, nó trở nên mềm dẻo khi bị nung nóng và cứng khi nguội. Epoxy là vật liệu nhiệt rắn, nó trở nên cứng khi gia nhiệt và đạt cứng vĩnh viễn sau quá trình lưu hóa. Trong BE, epoxy đóng vai trò là một pha liên tục ba chiều còn bitum là pha phân tán. BE là vật liệu nhiệt rắn mang cả tính rắn của epoxy và tính mềm dẻo của bitum. BE vì vậy đảm bảo tính đàn hồi khi nhiệt độ lên đến 50⁰C, đồng thời có tính dẻo để cung cấp khả năng chống mỏi cao. BE không bị mềm nhiều như chất kết dính bitum thông thường ở nhiệt độ cao, có sức kháng tốt với lão hóa, với ăn mòn hóa học và không thấm nước. Bitum polime nhiệt rắn hay là bitum epoxy (BE) khác bitum truyền thống (một chất dẻo nhiệt) ở những điểm sau:

- Khi hai thành phần trong bitum polime nhiệt rắn được trộn thì thời gian sử dụng sản phẩm này sẽ bị giới hạn, thời hạn này phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ và tỉ lệ nghịch với nhiệt độ;

- Sau khi một sản phẩm nhiệt rắn được sử dụng nó tiếp tục được lưu hóa và tăng cường độ và độ bền, tốc độ lưu hóa của BE khi sử dụng trong mặt đường phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường;
- Khi nhiệt độ tăng lên bitum truyền thống sẽ bị mềm ra và chảy, các bitum polime nhiệt rắn ít mẫn cảm với nhiệt độ hơn và trong thực tế ít bị tác động của sự thay đổi nhiệt độ mặt đường trong khai thác;
- Bitum polime nhiệt rắn vẫn là một vật liệu đàn hồi, ít thể hiện đặc tính nhớt chảy, ổn định với hóa chất, dung môi, nhiên liệu và dầu.

1.2. Các nghiên cứu về bitum-epoxy và BTN sử dụng BE làm chất kết dính trên thế giới

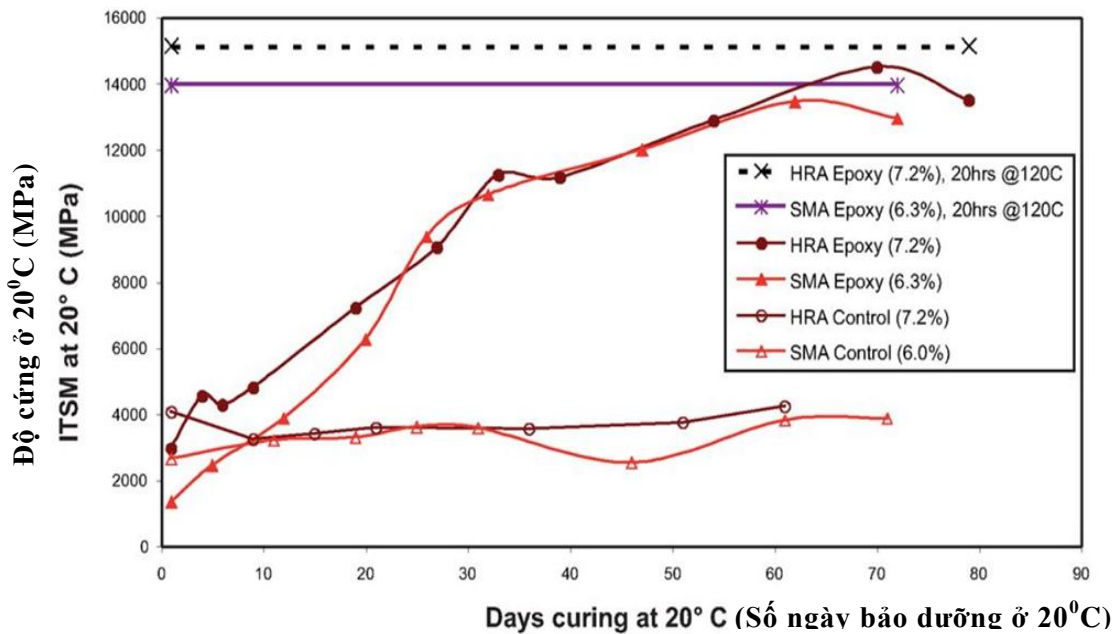
1.2.1. Dự án thử nghiệm BE sử dụng vật liệu địa phương ở 7 quốc gia khác nhau

Trong khoảng thời gian từ 2006 đến 2008, một dự án thử nghiệm BE với sự tham gia đồng thời của 7 quốc gia gồm: Đan Mạch, Pháp, Đức, New-zealand, Ukraina, Vương quốc Anh và Mỹ đã được thực hiện [21]. Mục tiêu của dự án thử nghiệm là để nghiên cứu tính chất và các ứng xử của BE và một số hỗn hợp BTNE sử dụng nguồn vật liệu địa phương tại các phòng thí nghiệm địa phương, từ đó đánh giá khả năng sử dụng của loại chất kết dính này trong công trình xây dựng đường ô tô và sân bay. Trong dự án thử nghiệm, các hỗn hợp tương ứng về thành phần cấp phối với chất kết dính bitum truyền thống được sử dụng để làm vật liệu đối chứng.

Một số kết quả nghiên cứu về BE từ Dự án thử nghiệm:

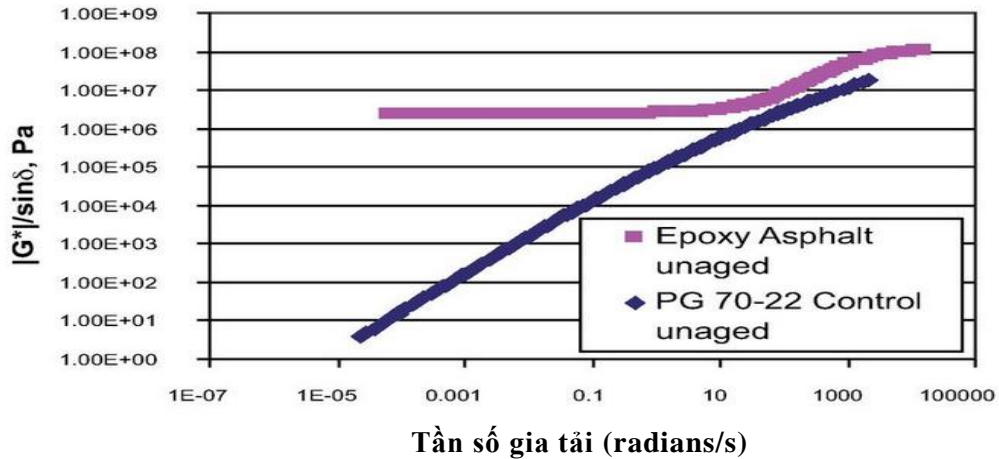
- Các đặc tính của BE trước khi lưu hóa tương tự như bitum truyền thống; Các điều kiện khi trộn hỗn hợp BTN sử dụng BE không có gì khác biệt hỗn hợp BTN sử dụng bitum truyền thống;
- BE mang tính chất của vật liệu nhiệt rắn, sau khi sản xuất cường độ của nó tăng dần trong một khoảng thời gian bảo dưỡng nhất định. Quá trình tăng cường độ đó chính là quá trình lưu hóa của BE. Epoxy sử dụng chất làm cứng có gốc acid có tốc độ lưu hóa chậm hơn loại epoxy sử dụng chất làm cứng có gốc amin. Thời gian lưu hóa tỷ lệ nghịch với nhiệt độ. Nhiệt độ bảo dưỡng (nhiệt độ lưu hóa) được nghiên cứu trong dự án là từ nhiệt độ môi trường đến 135⁰C; Các nhà nghiên cứu của Vương quốc Anh đã chỉ ra rằng quá trình lưu hóa của BE gần như kết thúc sau 20h ở nhiệt độ 120⁰C, 120h ở nhiệt độ 85⁰C, và mất đến 1440h ÷ 1680h (60 ÷ 70 ngày) nếu bảo dưỡng ở nhiệt độ 20⁰C. Để

chứng minh điều này, các nhà nghiên cứu đã theo dõi độ cứng của hỗn hợp HRA và SMA có sử dụng BE làm chất kết dính trong khoảng thời gian từ 70÷80 ngày với nhiệt độ bảo dưỡng là 20⁰C. Kết quả như thể hiện trong **Hình 1-11**, các HRA có độ cứng ban đầu lớn hơn SMA, nhưng sau 25 ngày bảo dưỡng cả hai hỗn hợp này có độ cứng tương tự nhau. Mức độ cứng 13500 MPa (SMA)/14500 MPA (HRA) đã đạt được vào khoảng 60-70 ngày. Độ cứng tối đa này xấp xỉ với giá trị xác định được sau khi bảo dưỡng ở 120⁰C trong 20 giờ và sau khi bảo dưỡng ở 85⁰C trong 120 giờ.



Hình 1-11: Kết quả thí nghiệm mô đun độ cứng của hỗn hợp HRA và SMA ở 20⁰C xác định bằng mô hình kéo gián tiếp [21]

- Sau khi lưu hóa, BE có các đặc tính độ kim lún, nhiệt độ hóa mềm và mô đun cắt động vượt trội so với bitum truyền thống. Mô đun cắt động của BE lớn hơn rất nhiều so với bitum truyền thống đặc biệt ở nhiệt độ cao tần số thấp [**Hình 1-12**];
- Hàm lượng epoxy trong BE dao động từ 15-50% theo khối lượng. Epoxy sử dụng chất làm cứng có gốc amin hàm lượng cần thường cao hơn từ 25-50%. Epoxy sử dụng chất làm cứng có gốc acid hàm lượng epoxy cần thấp hơn, chỉ từ 14-25% theo khối lượng BE;



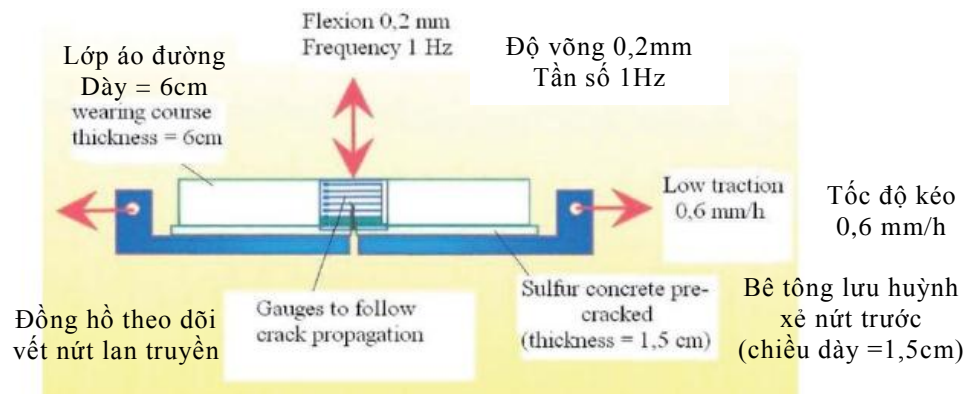
Hình 1-12: Đường cong chủ $|G^*|/\sin\delta$ của BE và bitum PG 70-20 [21]

Một số kết quả nghiên cứu về hỗn hợp BTNE từ Dự án thử nghiệm:

- Các nhà nghiên cứu của Scott Wilson cũng đã chỉ ra rằng ở giai đoạn đầu khi BE chưa lưu hóa thì khả năng kháng biến dạng của BTNE không khác mấy so với BTN sử dụng bitum truyền thống. Ở giai đoạn sau khi BE đã lưu hóa hoàn toàn, các hỗn hợp HRA và SMA sử dụng BE đã chứng minh khả năng chống biến dạng tại 40°C và 60°C trong thí nghiệm hằn lún vệt bánh cao hơn từ $2 \div 8$ lần so với các vật liệu đối chứng tương ứng, cho thấy một sự cải thiện lớn trong kháng lún so với hỗn hợp sử dụng bitum truyền thống. Trong thí nghiệm lún vệt bánh, các hỗn hợp sử dụng BE hầu như không có biến dạng. Vì vậy chúng được coi là thích hợp để dùng làm lớp mặt đường cho các tuyến đường có tải trọng nặng yêu cầu kháng lún rất cao trên mạng lưới đường trục ở Anh.
- Trong dự án này, độ bền ẩm của hỗn hợp BTN cũng được đánh giá thông qua cường độ chịu kéo gián tiếp còn lại (là tỷ lệ giữa cường độ chịu kéo gián tiếp của mẫu ở trạng thái bão hòa với mẫu ở trạng thái khô). Tất cả các mẫu hỗn hợp sử dụng BE ở cả trạng thái chưa lưu hóa và đã lưu hóa hoàn toàn trong nghiên cứu sau 6 chu kỳ bão hòa – khô đều có cường độ chịu kéo gián tiếp còn lại trên 80%. Trong tình trạng "chưa lưu hóa", cả hai hỗn hợp HRA và SMA sử dụng BE có độ bền kéo ở nhiệt độ 25°C tương tự với vật liệu đối chứng. Điều này cho thấy độ bền kéo ban đầu của vật liệu sử dụng BE sẽ tương tự hỗn hợp sử dụng bitum truyền thống. Trong điều kiện đã lưu hóa hoàn toàn, các hỗn hợp HRA và SMA sử dụng BE có độ bền kéo ở nhiệt độ 25°C cao hơn so với các vật liệu đối chứng tương ứng khoảng 3 lần.
- Nứt mỏi có thể xem là một nguyên nhân chính gây ra hư hỏng đối với KCAĐ mềm truyền thống. Hư hỏng được cho là xuất phát từ đáy của các lớp BTN dưới tác dụng của tải trọng trùng phục. Trong dự án nghiên cứu này tuổi thọ

mỗi được thực hiện thông qua thí nghiệm kéo gián tiếp và kết quả cho thấy các hỗn hợp sử dụng BE luôn có tuổi thọ mỏi cao hơn so với hỗn hợp đối chứng tương ứng. Cụ thể tuổi thọ mỏi của HRA và SMA sử dụng BE lớn hơn so với bitum đối chứng ở mức biến dạng từ 30-200 $\mu\epsilon$ ít nhất 10 lần. Tuy nhiên dự án nghiên cứu cũng chỉ rõ, với ứng suất cục bộ thì biến dạng của mặt đường ở dưới bánh xe có thể sẽ lớn hơn nhiều do đó cần phải đánh giá tuổi thọ mỏi của hỗn hợp sử dụng BE ở các mức biến dạng cao hơn và cần sử dụng các mô hình thí nghiệm đánh giá mỏi khác như thí nghiệm uốn dầm 4 điểm.

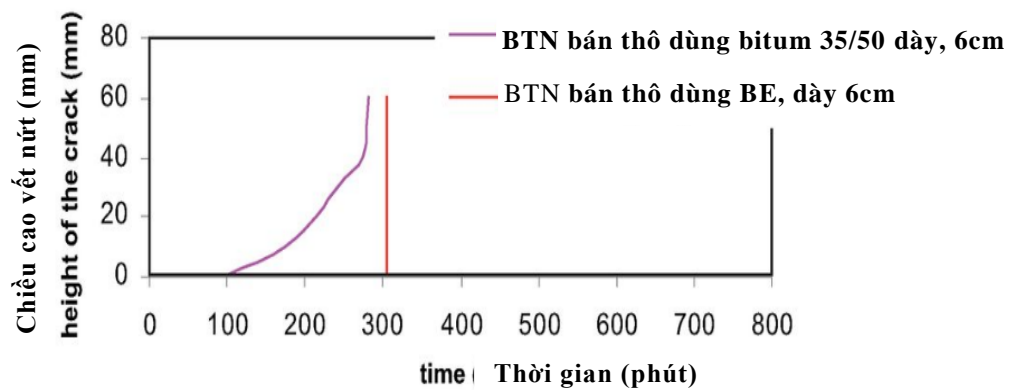
- Kháng nứt ở nhiệt độ thấp của hỗn hợp sử dụng BE được đánh giá bởi Scott Wilson thông qua một thử nghiệm uốn dầm đơn giản. Thử nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ thấp điển hình cho điều kiện ở Anh là 5⁰C. Kết quả cho thấy các hỗn hợp sử dụng BE sau khi lão hóa có cường độ chịu kéo uốn tăng nhưng độ dẻo giảm so với các vật liệu đối chứng. Kết quả này cần được kiểm tra lại bằng khả năng chịu mỏi được thí nghiệm với mức biến dạng lớn. Kết quả sau khi kiểm tra lại có thể giúp xác định phạm vi sử dụng của BTNE trong thực tế.
- Phòng thí nghiệm ở Pháp đã thử nghiệm đánh giá khả năng chống nứt lan truyền của hỗn hợp BTN bán thô đặt trên móng cứng là bê tông xi măng. Trong thử nghiệm, các BE sử dụng epoxy gốc amin được so sánh với bitum 35/50. Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện trong **Hình 1-13**



Hình 1-13: Mô hình thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt phản ánh [21]

Một tấm BTN bán thô có kích thước 130x590x60 mm đặt trên lớp bê tông xi măng có khía. Tốc độ kéo không chế ở 0,6mm/h. Kết quả cho hỗn hợp BTN bán thô đối chứng sử dụng bitum 35/50 và hỗn hợp BTN bán thô sử dụng BE thử nghiệm ở 5⁰C được thể hiện trong **Hình 1-14**. Nứt của vật liệu đối chứng bắt đầu xuất hiện sau 100 phút và tiếp tục lan truyền đến sự phá hoại cuối cùng tại 280 phút. Hỗn hợp BTN bán thô sử dụng BE có khả năng kháng nứt nhiều hơn đáng

kể, nứt bắt đầu sau thời gian kéo là 300 phút nhưng khi đã xảy ra nứt, các vết nứt lan truyền rất nhanh chóng.



Hình 1-14: Nứt lan truyền của BTN trong quá trình thử nghiệm [21]

- Khả năng chống bong bật bề mặt của OGPA ở trạng thái lão hóa ngắn hạn và lão hóa dài hạn được đánh giá thông qua thử nghiệm Cantabro đã được thực hiện ở New Zealand. Các thử nghiệm được thực hiện trên máy xác định độ mài mòn Los Angeles. Mẫu OGPA hình trụ được cho vào trong một trống thép và quay 300 vòng với vận tốc quay 30 vòng/phút. Khả năng chịu mài mòn được đánh giá thông qua tỷ lệ % giữa khối lượng mất đi so với khối lượng mẫu ban đầu. Hình ảnh của mẫu trước và sau khi thử nghiệm được minh họa trong **Hình 1-15**. Mẫu thử nghiệm đã bị oxy hóa bằng cách nung nóng ở 85⁰C trong 38 ngày để mô phỏng khoảng bảy năm của sự lão hóa trong của lớp phủ OGPA ở New Zealand. Trước khi ô xy hóa, các mô đun trung bình của các mẫu OGPA epoxy trong thử nghiệm (bảo dưỡng 120 giờ ở 85⁰C) là 4300 MPa so với 840 MPa đối với mẫu đối chứng, còn mô đun hỗn hợp OGPA epoxy chưa lưu hóa là 570 MPa, thấp hơn so với vật liệu đối chứng. Sau quá trình oxy hóa, mô đun của OGPA epoxy tăng lên đến 7000 Mpa so với 4000 Mpa của mẫu đối chứng. Kết quả kiểm tra Cantabro được thể hiện trong **Bảng 1-2**.



Hình 1-15: Hình ảnh mẫu OGPA trước và sau thí nghiệm Cantabro [21]

Bảng 1-2: Kết quả thử nghiệm Cantabro của mẫu trước và sau bị oxy hóa

Hỗn hợp	Tỉ lệ phần trăm khối lượng mất đi (%)			
	10 ⁰ C		20 ⁰ C	
	Mẫu trước oxy hóa (120h, 85 ⁰ C)	Mẫu sau oxy hóa (912h, 85 ⁰ C)	Mẫu trước oxy hóa (120h, 85 ⁰ C)	Mẫu sau oxy hóa (912h, 85 ⁰ C)
OGPA epoxy	14,9±4,6	17,6±4,6	16,2±3,2	13,0±2,7
OGPA	53,2±5,2	72,1±7,7	16,5±3,0	30,6±4,2

Kết quả kiểm tra Cantabro của các mẫu OGPA epoxy đã lưu hóa hoàn toàn nhưng chưa bị oxy hóa (bảo dưỡng 120 giờ ở 85⁰C) là tương đương với vật liệu đối chứng ở nhiệt độ 25⁰C và tốt hơn đáng kể ở 10⁰C. Sau khi quá trình oxy hóa tồn thất khối lượng cả ở 10⁰C và 25⁰C của các mẫu OGPA epoxy là thấp hơn nhiều so với vật liệu đối chứng. Bong bật bề mặt là dạng hư hỏng chính của OGPA, những kết quả này cho thấy tuổi thọ cải thiện rõ rệt cho OGPA epoxy so với OGPA sử dụng bitum truyền thống.

1.2.2. Nghiên cứu hỗn hợp BTNE sử dụng nguồn vật liệu địa phương ở Trung Quốc

Sự phát triển của bitum cải tiến để cải thiện chất lượng phục vụ và tuổi thọ của mặt đường đã được tập trung nghiên cứu ở Trung Quốc vào những năm cuối thế kỉ 20 [36]. Sử dụng BE trong xây dựng mặt đường là một trong các bước thực hiện theo hướng này. Từ năm 1999, để xây dựng cầu Nam Kinh 2 sông Dương Tử, người ta đã nhập khẩu nhựa epoxy từ Mỹ. Hỗn hợp BE này đã được sử dụng trong Cầu Nhuận Dương, cầu Nam Kinh 3 sông Dương Tử, và những cầu khác qua sông Dương Tử Yangluo. Hiệu suất sử dụng của mặt đường BTNE trên các cây cầu này là tốt. Từ năm 2002, Phòng thí nghiệm mặt đường SEU đã nghiên cứu và phát triển nhựa epoxy địa phương vì những lợi thế kinh tế.

Các nghiên cứu này được khởi xướng bởi sự cần thiết để đánh giá các đặc tính kỹ thuật của mặt đường có chứa chất kết dính BE phát triển tại địa phương bởi hai giáo sư Huang Wei và Qian Zhendong trong phòng thí nghiệm mặt đường của Đại học Đông Nam, Trung Quốc. Trọng tâm chính của nghiên cứu này là đánh giá hỗn hợp BTNE phát triển tại địa phương về: độ bền ẩm, kháng lún, kháng nứt ở nhiệt độ thấp và tuổi thọ mỏi.

Chất kết dính BE sử dụng trong nghiên cứu, là một vật liệu nhiệt rắn, bao gồm hai thành phần: Hợp phần A (nhựa epoxy là vật liệu địa phương) và Hợp phần B

(bitum có độ kim lún 80/100). Đá dăm bazan ở mỏ Jurong ở tỉnh Giang Tô đã được sử dụng sản xuất cấp phối đá dăm dùng trong hỗn hợp BTN, đường kính hạt lớn nhất danh định 9,5mm. Cường độ chịu kéo của bitum epoxy ở nhiệt độ 20⁰C trong nghiên cứu đạt đến 1,9MPa. Hàm lượng chất kết dính 6,2% trong hỗn hợp được xác định bằng phương pháp Marshall. Vật liệu đối chứng là hỗn hợp BTN tương tự nhưng sử dụng chất kết dính bitum có độ kim lún 80/100. Nghiên cứu đã rút ra được một số kết luận sau:

- Độ ổn định và độ ổn định còn lại sau ngâm nước 48h ở 60⁰C của BTNE vượt trội so với vật liệu đối chứng (36,1KN và 5,6KN; 98,9% và 78,6%)
- BTNE sử dụng vật liệu địa phương có độ bền ẩm cao hơn so với vật liệu đối chứng. Độ bền ẩm này cũng được đánh giá thông qua cường độ chịu kéo gián tiếp giữ lại (tỷ lệ cường độ chịu kéo gián tiếp của mẫu ở trạng thái bão hòa với mẫu ở trạng thái khô) **Bảng 1-3**

Bảng 1-3: Kết quả thử nghiệm kéo gián tiếp [36]

Loại hỗn hợp	Cường độ chịu kéo gián tiếp ở 25 ⁰ C (MPa)		Cường độ kéo gián tiếp giữ lại (%)
	Mẫu không điều ẩm	Mẫu đóng đá ở -18 ⁰ C trong 16h, sau đó để ở 60 ⁰ C trong 2h	
BTNE	31,9	25,8	80,9
BTN	7,4	5,6	75,7

- Khả năng kháng lún được đánh giá thông qua thí nghiệm hằn lún vết bánh xe, chiều sâu vết lún sau 2520 chu kỳ của BTNE là 0,9mm so với 1,4mm của BTN đối chứng. Trong thử nghiệm này mẫu BTNE được bảo dưỡng ở 120⁰C trong 6h (ở trạng thái được cho là đã lưu hóa hoàn toàn)
- Cường độ kéo uốn ở nhiệt độ thấp (-15⁰C) của BTNE gấp xấp xỉ 3 lần so với vật liệu đối chứng SMA10 (20,29MPa so với 7,51MPa) trong khi biến dạng ở đáy dầm khi kéo uốn là tương tự nhau (2,6x10⁻³ và 2,16x10⁻³mm).
- Tuổi thọ mỏi của vật liệu trong nghiên cứu được đánh giá bằng thử nghiệm MTS810, ở nhiệt độ 20⁰C với lực gia tải tối đa là 5kN với tần số gia tải 10Hz. Kết quả thử nghiệm cho thấy, tuổi thọ mỏi của BTNE sử dụng vật liệu địa phương cao hơn gấp hơn 3 lần so với vật liệu đối chứng - SMA10 (12.000.000 so với 3.200.000 chu kỳ gia tải).
- BTNE sử dụng vật liệu địa phương kết hợp BE là một loại vật liệu làm mặt đường với những hiệu suất cao và lợi thế kinh tế.

1.2.3. Nghiên cứu sử dụng BE và BTNE ở Nhật Bản

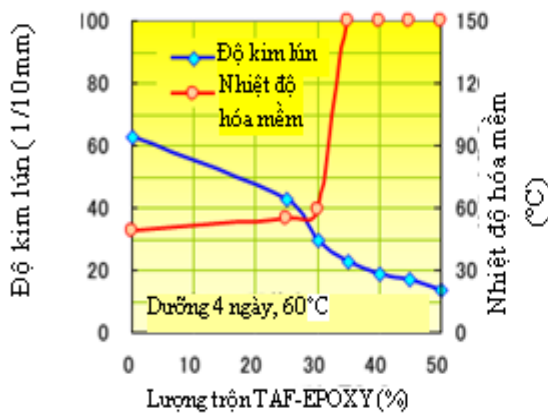
Trong khoảng thời gian cuối thập kỉ 70 của thế kỉ 20, một nghiên cứu khá toàn diện cả về BE và BTNE đã được thực hiện bởi TS Nakanishi và các cộng sự ở công ty Taiyu Kensetsu [63]. Trong thử nghiệm epoxy được trộn với bitum 60/80 với các hàm lượng epoxy từ 0% đến 50% theo khối lượng của BE.

Các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của BE đã được xác định cho tất cả các loại BE tương ứng với các loại hàm lượng epoxy gồm: Độ kim lún; Nhiệt độ hóa mềm; Độ đàn hồi; Độ bền kéo. Các thí nghiệm được thực hiện với mẫu BE đã được bảo dưỡng 96h ở nhiệt độ 60⁰C. Kết quả thử nghiệm của nghiên cứu được thể hiện trong **Bảng 1-4** và **Hình 1-16** cho thấy:

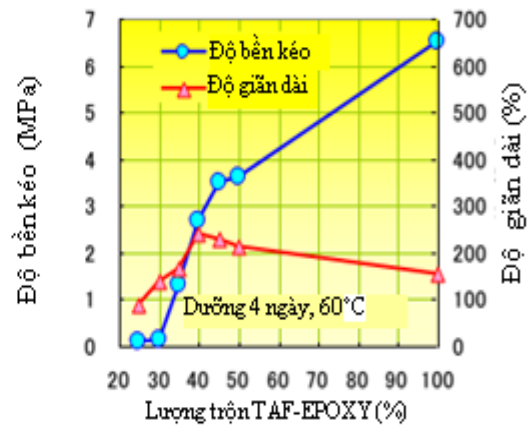
- Về độ kim lún của BE: khi hàm lượng epoxy tăng dần đến 30%, độ kim lún giảm dần theo quan hệ tuyến tính, với hàm lượng epoxy từ 40% trở lên, độ kim lún vẫn duy trì giảm nhưng với tốc độ chậm hơn;
- Về nhiệt độ hóa mềm: khi hàm lượng epoxy đến 30% , nhiệt độ hóa mềm gần như không tăng so với bitum truyền thống, tuy nhiên khi hàm lượng epoxy đến ngưỡng 35%, nhiệt độ hóa mềm tăng đột ngột, hỗn hợp không hóa mềm ngay cả ở 150⁰C;
- Về độ bền kéo (Tensile Strength): khi hàm lượng trộn epoxy đạt mức 35% trở lên, độ bền kéo tăng cao đột ngột và tăng tỷ lệ thuận theo lượng trộn epoxy;
- Độ giãn dài: độ giãn dài tăng khi tăng lượng trộn epoxy đạt mức 40%, sau đó độ giãn dài gần như không thay đổi, thậm chí giảm với tốc độ chậm.

Bảng 1-4: Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu cơ bản của BE [63]

Chỉ tiêu	Hàm lượng epoxy trong BE (%)						
	0	25	30	35	40	45	50
Độ kim lún (1/10mm)	63	43	30	23	19	17	14
Nhiệt độ hóa mềm (°C)	49	55	59	150 Over	150 Over	150 Over	150 Over
Độ bền kéo (MPa)		0,1	0,2	1,3	2,7	3,5	3,6
Độ giãn dài		90	140	170	241	232	215



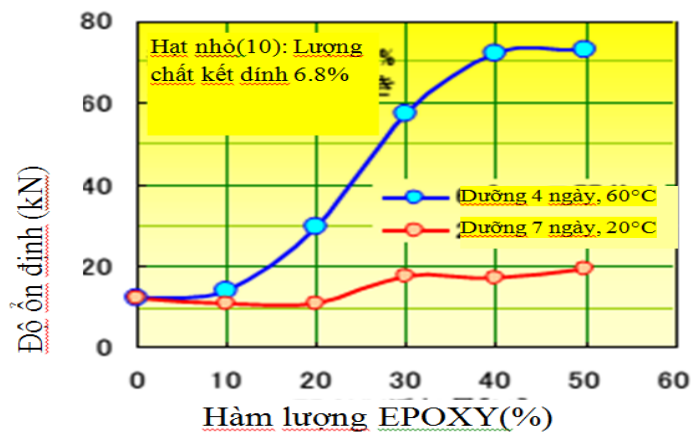
Biểu đồ-1: Biểu đồ quan hệ giữa hàm lượng epoxy với độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm



Biểu đồ-2: Biểu đồ quan hệ giữa hàm lượng epoxy với độ bền kéo và độ giãn dài

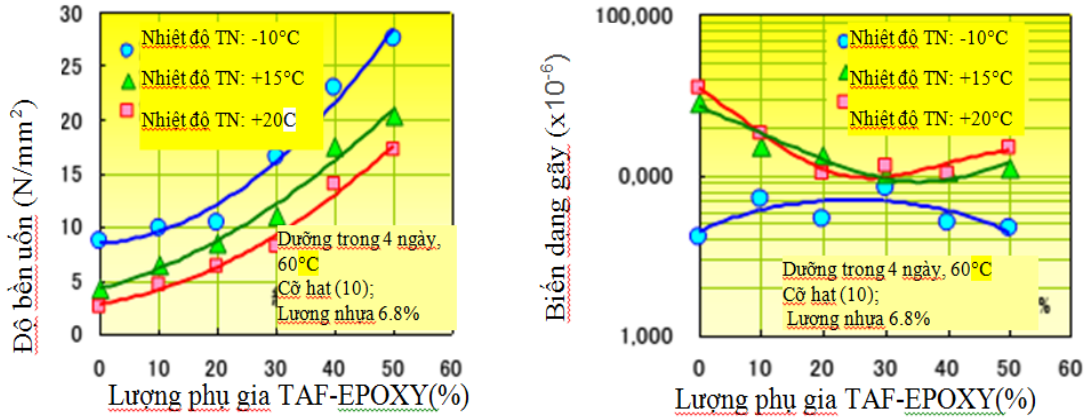
Hình 1-16: Kết quả thử nghiệm BE

Nghiên cứu cũng đã thử nghiệm với hỗn hợp BTNE với cốt liệu có đường kính hạt lớn nhất danh định 10mm. Kết quả thử nghiệm Marshall được thể hiện trong **Hình 1-17** cho thấy độ ổn định Marshall của hỗn hợp BTNE tăng dần khi hàm lượng epoxy tăng đến 40% và đạt đến giá trị 72kN. Khi hàm lượng epoxy tăng từ 40% lên 50% giá trị này gần như không thay đổi.



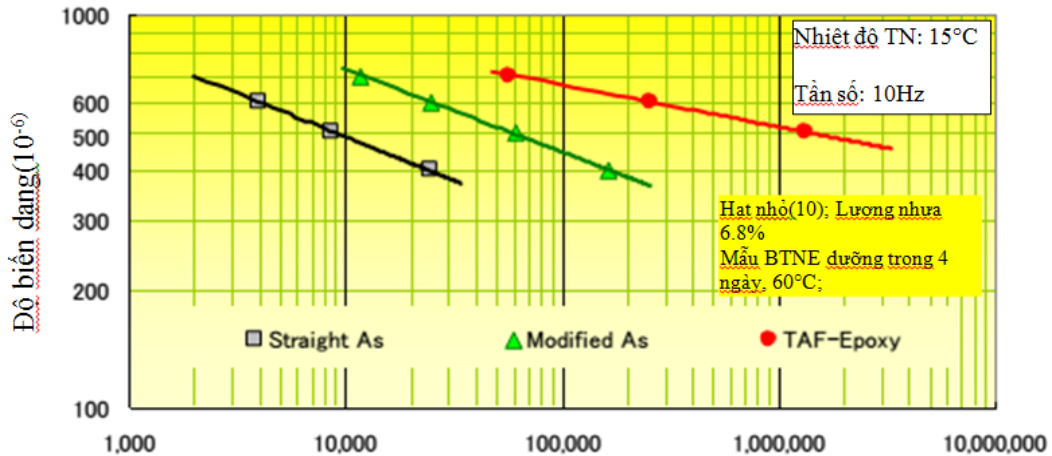
Hình 1-17: Biểu đồ quan hệ giữa độ ổn định Marshall với hàm lượng epoxy

Nghiên cứu cũng đánh giá khả năng chịu kéo uốn của BTNE thông qua thí nghiệm uốn 3 điểm (hai điểm đỡ và 1 điểm gia tải) với mẫu đầm có kích thước 5cm x 5cm x 30cm, tốc độ gia tải 50mm/phút, nhiệt độ thí nghiệm -10°C, 15°C, 20°C. Kết quả thử nghiệm được thể hiện trong **Hình 1-18** cho thấy độ bền uốn được cải thiện rõ rệt cùng quá trình tăng lượng phụ gia, mà không liên quan tới nhiệt độ thí nghiệm; Biến dạng khi nứt gãy (gọi là biến dạng gãy) giảm khi hàm lượng epoxy tăng dần tới mức 20% trong điều kiện nhiệt độ ở mức cao (15°C, 20°C) sau đó, có khuynh hướng tăng nhẹ và không thấy sự thay đổi lớn trong điều kiện nhiệt độ ở mức thấp (-10°C).



Hình 1-18: Biểu đồ quan hệ giữa độ bền uốn, biến dạng gãy với hàm lượng epoxy

Nghiên cứu đã tiến hành đánh giá tuổi thọ mỏi của BTNE bằng thí nghiệm uốn dầm bốn điểm với kích thước mẫu dầm 4cm x 4cm x 36cm, tần số 10Hz, nhiệt độ thí nghiệm 15⁰C. Kết quả thử nghiệm được thể hiện trong **Hình 1-19** cho thấy khi so sánh giá trị trung bình của giới hạn mỏi, ở mức độ biến dạng từ 400με đến 600με, tuổi thọ chịu mỏi của hỗn hợp BTNE sử dụng hàm lượng epoxy 50% lớn gấp 70 lần so với BTN thông thường, và gấp 10 lần so với BTN sử dụng PMBII.



Hình 1-19: Kết quả thử nghiệm mỏi

1.3. Các ứng dụng của BTNE trên thế giới

Hỗn hợp BTNE có nhiều ứng dụng: làm lớp phủ mặt cầu, làm lớp mặt đường cho tuyến đường yêu cầu tuổi thọ dài, làm mặt đường sân bay, mặt đường khu vực cảng...

1.3.1. Lớp phủ mặt cầu trên cầu thép bản trực hướng

Ở Mỹ, ứng dụng đầu tiên của BTNE cấp phối chặt là vào những năm 1960 bởi Cơ quan quản lý các cầu vịnh California. Một sản phẩm ban đầu được nghiên

cứu bởi tập đoàn Shell là EPON-Epoxy Asphalt được sử dụng để rải mặt cầu thép của cầu San Mateo-Hayward vào năm 1967 [36] và được đánh giá là vẫn đảm bảo điều kiện khai thác đến ngày hôm nay, 50 năm sau đó. Tương tự, lớp phủ bằng BTNE cấp phối chặt trên mặt cầu San Francisco-Oakland Bay vẫn khai thác tốt. Cầu Ben Franklin ở Philadelphia ở Mỹ được xây dựng vào năm 1984, cũng sử dụng lớp BTNE cấp phối chặt, dày 35mm vừa là lớp chống thấm vừa là lớp chịu lực.

Bề mặt bản mặt cầu Yangtze II - Song Nanjing (NSYRB)-Trung Quốc xây dựng năm 2000, là lớp BTNE cấp phối chặt với đường kính hạt lớn nhất danh định 9,5 mm, dày 50mm và được chia thành hai lớp 25mm với một lớp dính bám BE. Giữa tấm sàn thép với lớp BTNE cũng được tưới dính bám bằng BE [18]. Sau khi được thông xe vào năm 2001, lớp phủ mặt cầu NSYRB đã cho thấy hiệu quả vượt trội so với các loại hỗn hợp BTN đặt trên cây cầu khác [37]. Thành công này đã thúc đẩy sự ứng dụng rộng rãi của BTNE trên bản mặt cầu thép sàn trực hướng xây dựng sau đó tại Trung Quốc, như cầu Sutong (nhịp chính 1.088 m) và cầu Xihoumen (nhịp chính 1.650 m) [40]. Cả cấp phối hỗn hợp và kết cấu lớp phủ đều tương tự như đã sử dụng trên cầu Yangtze II Song Nanjing.

BTNE cấp phối chặt cũng đã được sử dụng ở một số nơi trên thế giới để làm lớp phủ mới hoặc rải lại lớp phủ mặt cầu thép. Ví dụ, cầu Westgate ở Úc được phủ bằng BTNE vào năm 1978 [51]; Cầu Erskine ở Scotland đã sử dụng BTNE vào năm 1994 [22]; Cầu Hum-ber ở Anh được phủ lớp BTN cát epoxy năm 2001-2002 [22]; và cầu Lions Gate đã được phủ thêm một lớp BTNE dày 38 mm vào năm 1975, và BTNE tiếp tục được sử dụng khi sửa chữa lại vào năm 2002 [33].

1.3.2. *Làm mặt đường băng sân bay và mặt đường khu vực cảng*

Vào cuối những năm 1950, sự tăng trưởng nhanh chóng của cả ngành hàng không quân sự và thương mại dẫn đến trọng lượng máy bay, tải trọng bánh xe và áp suất lốp ngày càng tăng, yêu cầu giải quyết vấn đề kết cấu trong thiết kế mặt đường sân bay. Ngoài vấn đề về kết cấu, mặt đường băng sân bay còn được yêu cầu phải có sức kháng tốt với nhiệt độ cao của động cơ phản lực và tác dụng ăn mòn của nhiên liệu [58].

Để giải quyết những thách thức này, thế hệ đầu tiên của BE được phát triển bởi Công ty Shell, với thương hiệu EPON Epoxy Asphalt. Mặt đường sử dụng chất kết dính mới này đã không bị lún hoặc xô trượt. BE không bị tan dưới tác dụng của nhiên liệu máy bay, dầu nhờn và các chất lỏng thủy lực thường được sử

dụng trên máy bay phản lực thương mại. Lực lượng không quân Mỹ đã đánh giá tính kháng nhiệt của mặt đường bằng cách đặt một máy bay chiến đấu F-86 đứng trên mặt đường, nhằm cho các luồng khí từ động cơ tác dụng trực tiếp lên mặt đường BTNE trong một phút [58][30].

Lần đầu tiên mặt đường BTNE được đặt ở căn cứ không quân vào năm 1959. Trong năm 1960, đã có rất nhiều bài kiểm tra chất kết dính Epoxy EPON Asphalt trên cả hai sân bay quân sự và dân sự, chủ yếu ở đường lăn và sân đỗ nhà ga. Đến giữa năm 1960, BTNE được sử dụng ở hơn 20 sân bay ở Mỹ, chủ yếu là lớp phủ mỏng (dày 19,5-25 mm) để sửa chữa lớp mặt đường cứng và mặt đường mềm. Một số cảng hàng không có ứng dụng vật liệu này, bao gồm Berry Field ở Nashville Tennessee, Base Bunker Hill Air Force ở Indiana, và Sân bay quốc tế Los Angeles [30]. Do cường độ cao và kháng nhiên liệu tốt, BTNE cũng được làm lớp phủ cho bãi đỗ, khu vực tiếp nhiên liệu, khu vực bảo dưỡng, cảng container là những nơi phải chịu tải trọng nặng cục bộ và khu vực thường xuyên bị nhiễm dầu mỡ, dầu và dung môi hóa chất khác. Một số cảng container như Seaforth Dock , Tilbury ở Vương quốc Anh đã được rải lớp bề mặt bằng BTNE vào năm 1977 [38].

1.3.3. *Lớp phủ mặt cầu.*

Bê tông xi măng mặt cầu có thể bị mài mòn và suy giảm độ nhám do tải trọng giao thông lặp lại. Để tái tạo sức kháng trượt bề mặt bản mặt cầu có thể xẻ rãnh, bắn cát, hoặc phủ một lớp vật liệu mới. Xẻ rãnh hoặc bắn cát ít được sử dụng do làm giảm chiều dày bảo vệ cốt thép và kém hiệu quả kinh tế. Khi rải lớp phủ mới, do phải cân nhắc đến việc tăng tĩnh tải cho kết cấu cầu, khả năng dính bám với mặt cầu cũ và yêu cầu chống thấm nên lớp phủ mỏng BTNE cấp phối chặt là một giải pháp tốt.

Trong những năm 70 của thế kỷ trước, đã có hơn 07 cầu ở Mỹ được áp dụng lớp phủ mỏng BTNE cấp phối chặt trên mặt cầu bê tông [23]. Năm 1971, cầu MacDonald tại Halifax và năm 1972, cầu Evergreen Point qua Hồ Washington và cầu qua đảo Ross ở Portland được rải lớp phủ BTNE dày 12,5 mm. Hư hỏng nứt đã xuất hiện ở lớp phủ trên mặt cầu MacDonald vài năm sau khi rải. Sau đó, chiều dày lớp phủ BTNE được đề nghị tăng lên đến 19 mm. Năm 1976, cầu San Francisco-Oakland Bay được rải lớp phủ BTNE chặt, tạo nhám dày 19,5cm. Lớp phủ này cho thấy khả năng chống thấm và tạo nhám tốt, cũng như đặc trưng khai thác tốt trong thời gian khá dài.

1.3.4. Lớp láng nhựa BE và BTNE trên bản trực hướng cầu thép.

Trong những năm từ 1970-1990, ở Mỹ, người ta tiến hành sửa chữa cầu bằng phương pháp thay thế bản bê tông cốt thép mặt cầu cũ bằng bản thép trực hướng có láng nhựa BE [33]. Đầu tiên, người ta phun một lớp dính bám BE dày 1,13mm lên các tấm thép. Sau đó, hỗn hợp cốt liệu kích thước lớn nhất 3.2mm được rải và lu lên trên bề mặt lớp dính bám. Bản mặt thép sau đó được đưa đến để thay thế bản bê tông cốt thép mặt cầu cũ. Sau đó, một lớp phủ BTNE dày 40mm được rải lên các bản mặt cầu đã được thay thế. Giải pháp này nhằm giảm tải trọng tĩnh trên kết cấu cầu cũ, cải thiện điều kiện chịu tải và khả năng chịu tác dụng địa chấn của kết cấu cầu. Đồng thời, việc thay thế được tiến hành nhanh chóng mà không cần cấm xe vào ban ngày. Kỹ thuật này được áp dụng ở nhiều cầu: Cầu Golden Gate ở San Francisco ở Mỹ hoàn thành năm 1987, cầu Champlain ở Montreal (Canada) hoàn thành năm 1993, cầu Lions Gate ở Canada hoàn thành năm 2002. Mặc dù sử dụng như là một lớp phủ tạm thời, lớp láng nhựa BE đã tồn tại trong một thời gian dài.

Cả lớp phủ tạm thời bằng láng nhựa BE và lớp phủ BTNE đều thành công và tồn tại lâu dài của lớp phủ trên bản trực hướng mặt cầu thép. Các lớp phủ dạng này cho thấy dính bám tốt với bản mặt thép, đảm nhận cả chức năng chống thấm, và cung cấp lớp mặt có độ nhám tốt.

1.3.5. BTNE cấp phối hở làm lớp tạo nhám trên mặt đường ô tô

Ứng dụng đầu tiên của BTNE cấp phối hở (EMOGPA) là trong thời gian cuối những năm 1960 trên San Francisco-Oakland Bay Bridge (SFOBB), một trong những tuyến đường bộ có lưu lượng giao thông nặng nhất ở Mỹ [27]. Năm 1963 và 1964, một lớp mặt BTNE cấp phối chặt dày 4,8 mm được rải phủ trên bản bê tông cốt thép. Lớp BTNE chặt này được sử dụng tốt trong một số năm cho đến khi bề mặt bị mài mòn và trơn trượt. Để khôi phục lại độ bám, Phòng Quản lý các tuyến qua vịnh có thu phí – Bang California (California State Division of Bay Toll Crossings) tính toán và so sánh hiệu quả của một số phương án tái tạo độ nhám bao gồm: Bắn cát; xẻ rãnh; tạo gai; phun găm đá trên lớp mặt, sau đó phủ 12.5mm hỗn hợp EMOGPA. BTNE cấp phối hở là phương án lựa chọn do có thể đáp ứng các tiêu chí sau:

- Chiều dày nhỏ 12,5mm để giảm thiểu được tải trọng bản thân;
- Thời gian thi công ngắn để giảm thiểu tác động đến lưu thông bình thường trên tuyến;
- An toàn trong quá trình thi công cho việc thông xe bình thường trên làn bên

cạnh;

- Dính bám tốt với lớp dưới;
- Có cường độ chống trượt cao;
- Có độ ổn định tốt;
- Chịu mài mòn tốt.

Hiệp hội Nhựa đường Nhật Bản (JAA) khởi xướng một nghiên cứu vào năm 1992 đối với BTNE rộng để áp dụng cho các tuyến đường có lưu lượng giao thông lớn. Nghiên cứu đã chứng minh rằng EMOGPA dùng làm lớp mặt đường có rất nhiều ưu điểm, trong đó nổi bật là khả năng thoát nước, ma sát cao, chống ẩm, khả năng chống biến dạng ở nhiệt độ cao và nứt ở nhiệt độ thấp. Nghiên cứu được kiểm chứng thực tế năm 1994, và bắt đầu thi công trên hiện trường năm 1996. Từ kết quả nghiên cứu, JAA công bố Chỉ dẫn kỹ thuật thi công cho BTNE rộng thoát nước cho đường bộ năm 1997 [34][50].

Các khảo sát gần đây về tuổi thọ của các mặt đường tập trung sự chú ý vào EMOGPA. Một nghiên cứu hoàn thành gần đây ở New Zealand công bố khả năng kháng oxy hóa và chống mài mòn tốt hơn của EMOGPA có độ rỗng dư gần 30% [25] [26].

Về mặt chi phí, giá thành của chất kết dính BE có thể cao gấp khoảng 5-10 lần so với các chất kết dính bitum thông thường, nhưng khi bao gồm cả chi phí vật liệu và chi phí xây dựng, EMOGPA chỉ cao hơn khoảng 2,3 lần so với chi phí của một lớp OGPA sử dụng chất kết dính thông thường. Hơn nữa, nếu BE được trộn với 75% chất kết dính bitum thông thường (epoxy chiếm 25% chất kết dính), các EMOGPA vẫn tốt hơn đáng kể so với một OGPA về khả năng chống mài mòn, và tương đương về kháng nứt do môi. Theo quan điểm chi phí vòng đời, một nghiên cứu độ bền dài hạn đã ước tính rằng thời gian khai thác của một EMOGPA có thể cao hơn tám lần so với OGPA thông thường về hư hỏng bong bật [25].

Trong tháng 12 năm 2007, hai phần trên làn đường giới hạn phía bắc ngoài Main North Road tại Belfast ở Christchurch, New Zealand, được làm bằng BTNE cấp phối hở, với một làn có độ rỗng dư 20% và một làn có độ rỗng dư là 30%. Sau hơn ba năm khai thác trong điều kiện lưu lượng giao thông rất lớn, lớp BTNE cấp phối hở vẫn trong tình trạng tốt [25].

1.3.6. **BTNE làm mặt đường ô tô.**

Khi thể hệ đầu tiên của BE được phát triển cho các sân bay, các nhà nghiên cứu đã nghiên cứu ứng dụng nó trên đường cao tốc. Trong năm 1960, kỹ sư từ công

ty Shell Oil sử dụng một lớp BTNE cấp phối chặt dày 12,5 - 25 mm với kích thước cốt liệu lớn nhất 6,3 mm để thảm lên trên mặt đường cũ. Lớp phủ bằng vật liệu này thể hiện đặc trưng khai thác rất tốt. Kết luận từ quan trắc dài hạn cho rằng lớp phủ BTNE dày 25mm có hiệu quả tương tự một lớp phủ dày 50-62,5 mm BTN cấp phối chặt thông thường [53]. Năm 1986, đoạn thử nghiệm BTNE cấp phối chặt đã được bố trí ở Staffordshire, Vương quốc Anh cho kết quả tốt [54]. Vào đầu những năm 1990, Trung Quốc phát triển công thức BE đầu tiên của mình và tiến hành thử nghiệm BTNE cấp phối chặt trên một đoạn đường đô thị tại Thượng Hải [39].

Mặc dù các nghiên cứu đều cho thấy lớp phủ BTNE có các đặc tính khai thác và tổng chi phí vòng đời tốt hơn so với BTN thông thường, nhưng BTNE ít được sử dụng cho mặt đường ô tô do chi phí đầu tư ban đầu lớn. BTN thường là vật liệu rẻ hơn, có thể dễ dàng cào bóc và thay thế. Trong khu vực đô thị, nơi chi phí xã hội phát sinh cao bởi sự tắc nghẽn giao thông trên đường phố, việc duy trì một hệ thống mặt đường chất lượng cao với nhu cầu bảo dưỡng và sửa chữa cải tạo tối thiểu sẽ có giá trị cao. Trong kịch bản này, việc sử dụng BTNE cấp phối chặt cho mặt đường trong đường phố có thể trở thành một lựa chọn thích hợp.

Tổ chức đa quốc gia về hợp tác kinh tế và phát triển (OECD) vừa hoàn thành một giai đoạn thứ hai của một nghiên cứu để tìm kiếm vật liệu mặt đường mới có tuổi thọ lớn (thời gian khai thác hơn 40 năm) trên các tuyến đường có tải trọng nặng. Là một trong hai ứng cử viên duy nhất còn lại trong nghiên cứu, tính năng của BE đã được đánh giá kỹ lưỡng với các phương pháp thử nghiệm ở trạng thái chất kết dính và hỗn hợp thử nghiệm [45] [32]. Kết luận là BE là chất kết dính và đặc tính gắn kết tuyệt vời và kết quả rất đáng khích lệ đối với khu biến dạng vĩnh viễn, hư hỏng do ẩm, lão hóa, nhiệt độ, và đặc tính môi [48].

1.4. Các nghiên cứu và ứng dụng BTNE tại Việt Nam

Theo GS.TS Nguyễn Xuân Đào, vào những năm 1975, 1976 BTNE đã được nghiên cứu thử nghiệm hai đoạn trên hai chiều xe chạy của tuyến đường Bắc Thăng Long – Nội Bài. Theo dõi trong thời gian thử nghiệm chất lượng khai thác của hai đoạn này tốt nhưng BTNE vẫn chưa được đưa vào sử dụng trong thực tế.

Gần đây, Việt Nam cũng đã có một công trình thực tế sử dụng BE và BTNE là cầu Thuận Phước – thành phố Đà Nẵng. Cầu Thuận Phước với tổng chiều dài cả phần cầu và đường dẫn hơn 4200m, được xây dựng nối liền hai trục đường ven biển Liên Chiểu - Thuận Phước và Sơn Trà - Điện Ngọc. Tổng chiều dài cầu

1856 m, trong đó cầu chính có kết cấu bản mặt cầu thép treo trên dây võng với 3 nhịp liên tục $L = 125\text{m} + 405\text{m} + 125\text{m} = 655\text{m}$. Chiều rộng cầu 18 m bao gồm 4 làn xe chạy cho hai chiều. Mặt cầu thép được cấu tạo theo dạng bản trục hướng (Orthotropic). Lớp phủ mặt cầu được sử dụng là lớp BTNE dày 41 mm. Lớp phòng nước đồng thời là lớp dính bám giữa bản mặt thép và lớp BTNE phủ mặt cầu là BE. BE sử dụng trong dự án là Epoxy Asphalt Id của Hãng Chemco System (Hoa Kỳ), loại vật liệu nhựa đường cải tiến Polime có thêm thành phần Epoxy Resin.

Cầu Thuận Phước đã chính thức được thông xe vào ngày 14 tháng 7 năm 2009. Cầu được khai thác bình thường trong năm đầu tiên mà không có hiện tượng hư hỏng gì. Các hư hỏng nhẹ xảy ra trong năm thứ hai sau khi thông xe, chủ yếu là các vị trí cục bộ giữa nhịp, trên vệt xe nặng (do trong năm đầu chưa có biện pháp kiểm soát xe nặng qua cầu). Năm 2013, sau 4 năm khai thác, trên lớp phủ bản mặt cầu đã xuất hiện các hư hỏng, cụ thể là lớp phủ BTNE bị trượt trên mặt bản thép. Đến mùa nắng nóng năm 2013, mặt cầu đã như hỏng nặng trên diện rộng và gây ảnh hưởng lớn đến quá trình lưu thông trên cầu.

Với kết quả quan sát suốt 4 năm phục vụ của lớp phủ mặt cầu, tình trạng mặt đường xấu nhất sau mỗi đợt nắng nóng khoảng tháng 6 và tháng 7 hàng năm nên có thể khẳng định yếu tố nhiệt độ cao là tác nhân chủ yếu gây hư hỏng lớp phủ mặt cầu. Lớp phủ trên mặt cầu thép Thuận Phước chịu rất nhiều yếu tố bất lợi về nhiệt độ làm việc do hiệu ứng tích nhiệt trong dầm thép hộp kín với chiều dài 655 m mà không có hệ thống thông gió. Vào mùa hè, nhiệt độ bên trong hộp thép có thể lên đến $70-80^{\circ}\text{C}$. Điều này khiến lớp phủ mặt cầu và lớp dính bám luôn hoạt động trong trạng bất lợi. Khi nhiệt độ cao khả năng dính bám của lớp phủ giảm đi cộng với biến dạng co giãn đàn hồi của hệ mặt cầu (co giãn nhiệt và chuyển vị do dao động của hệ cầu treo dây võng) sẽ dễ xảy ra hiện tượng bong tróc và xô dón.



Hình 1-20. Các hư hỏng do hiện tượng xô dón bề mặt, mất sự liên kết với bản thép sau 4 năm khai thác [9].

Năm 2013, cầu Thuận Phước đã được tiến hành sửa chữa lớp phủ mặt cầu cụ thể như sau [9]:

- Ở các đoạn hư hỏng: Đào bỏ lớp BTNE cũ và thay mới bằng 2 lớp BTN Polime PMB3, dày 80 mm với công thức cải tiến, có sợi thủy tinh gia cường. Giữa lớp BTN Polime và bản mặt thép vẫn dùng lớp dính bám bằng nhựa đường Epoxy 2 thành phần của Hãng Chemco System (Hoa Kỳ). Tăng cường dính bám bằng cách hàn các gân râu thép vào mặt cầu với khoảng cách 80 cm/vị trí. Giữa 2 lớp BTN Polime PMB3 có tăng cường lớp lưới sợi thủy tinh với cường độ chịu kéo 100 kN.
- Phần mặt đường chưa có hiện tượng hư hỏng được phủ thêm 1 lớp BTN PMB3 dày 40 mm để đảm bảo êm thuận và đồng nhất kết cấu phủ mặt, giữ được mỹ quan chung của mặt cầu. Giữa lớp BTN cũ và lớp BTN mới có tăng cường lớp lưới sợi thủy tinh với cường độ chịu kéo 100 kN.

Sau khi được sửa chữa và đưa vào khai thác, đến nay sau 5 năm được sửa chữa, mặt cầu đã hư hỏng trở lại và lại đang được tiếp tục lên kế hoạch sửa chữa.

Thực tế sử dụng BE và BTNE làm lớp dính bám và lớp phủ mặt cầu Thuận Phước – Đà Nẵng, mặc dù chưa thật sự thành công nhưng nguyên nhân hư hỏng không được kết luận là do BE hay BTNE, nên khi sửa chữa BE vẫn tiếp tục được sử dụng làm lớp dính bám. Hơn nữa các nghiên cứu trước khi sử dụng vật liệu này vào công trình cũng khá hạn chế. Duy nhất thí nghiệm xác định tính dính bám trực tiếp giữa tấm bản thép và lớp phủ mặt cầu được thực hiện trong dự án bằng thí nghiệm nhỏ (pull-off). Một số chỉ tiêu khác Dự án chỉ cập nhật các thông tin thí nghiệm đã thực hiện trong các dự án ở nước ngoài như: Dự án cầu Nam Kinh – Trung Quốc, dự án sửa chữa 13 cầu vượt ở Bangkok.

1.5. Xác định vấn đề nghiên cứu của luận án

Từ các phân tích tổng quan ở trên có thể có các kết luận chính sau:

- BE và BTNE là một xu thế của thế giới để sử dụng làm lớp mặt trên kết cấu áo đường mềm có lưu lượng xe lớn và tải trọng xe nặng, làm lớp phủ trên bản mặt cầu bê tông, lớp phủ trên bản mặt cầu thép. Với khả năng ứng dụng này, BE và BTNE có tiềm năng áp dụng ở Việt Nam.
- Có nhiều loại Epoxy với gốc vật liệu khác nhau được sử dụng với nhiều ứng dụng khác nhau làm vật liệu xây dựng cũng như các sản phẩm thương mại khác. Epoxy đơn giản nhất được tạo thành từ một nhựa epoxy đơn và một chất làm cứng. Có nhiều loại Epoxy khác nhau được tạo thành từ phối hợp các loại

nhựa epoxy đơn hoặc epoxy phức với chất làm cứng và chất biến tính.

- Trên thế giới có khá nhiều nghiên cứu về BE và BTNE, bao gồm cả các thí nghiệm trong phòng và thử nghiệm ngoài hiện trường. Các nghiên cứu này được áp dụng khá nhiều trên thực tế. Trong khi đó, các nghiên cứu tại Việt Nam còn hạn chế, chưa có các nghiên cứu bài bản trong phòng thí nghiệm, mà chỉ có một nghiên cứu mang tính chất ứng dụng công nghệ nước ngoài vào thực tế trên cầu Thuận Phước, nhưng không thực sự thành công. Như vậy có thể nói BE và BTNE là loại vật liệu mới ở Việt Nam và cần có những nghiên cứu để dần từng bước áp dụng.
- BE và BTNE đã được đưa vào sử dụng khá nhiều trên thế giới, nhưng còn nhiều tồn tại vẫn tiếp tục phải nghiên cứu như: Khả năng tương thích giữa epoxy và bitum; hàm lượng epoxy trong bitum epoxy; lựa chọn loại chất nhựa chính và chất làm cứng; tốc độ phản ứng đóng rắn (làm cứng); sự khác biệt giữa kết quả trong phòng thí nghiệm và ứng dụng ngoài thực tế; bài toán về giá thành...

Để áp dụng loại vật liệu này trong xây dựng các công trình giao thông, những nước đã sử dụng nhiều BTNE trên thế giới đã thực hiện các nghiên cứu từ vật liệu, đến các chỉ tiêu cơ học trong thiết kế và xây dựng công trình, công nghệ xây dựng và quản lý chất lượng. Các nghiên cứu tương tự là cần thiết để ứng dụng BE và BTNE vào thực tế xây dựng CTGT ở Việt Nam do sự khác nhau về điều kiện khí hậu và tải trọng khai thác, trình độ công nghệ thi công, điều kiện cung cấp vật liệu và kinh tế. Các nghiên cứu cần được thực hiện theo nguyên tắc kế thừa kết quả nghiên cứu của thế giới và mô phỏng điều kiện thực tế của Việt Nam với các vấn đề mang tính chất đặc thù. Xuất phát từ yêu cầu thực tế này, đề tài “*Nghiên cứu thành phần, tính chất cơ học và khả năng sử dụng bitum epoxy làm chất kết dính cho hỗn hợp asphalt tại Việt Nam*” là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, đồng thời tính thời sự trong giai đoạn phát triển và hội nhập của Việt Nam hiện nay.

Với mục đích nghiên cứu để từng bước áp dụng BTNE trong xây dựng công trình giao thông ở Việt Nam, luận án tập trung giải quyết những vấn đề sau:

- Nghiên cứu thành phần hỗn hợp bitum-epoxy và bê tông nhựa sử dụng bitum-epoxy có các đặc tính phù hợp với điều kiện khí hậu Việt Nam và khả thi với thực tế trình độ công nghệ thi công;

- Hệ thống và đề xuất các tiêu chuẩn thí nghiệm đánh giá và thí nghiệm xác định các đặc tính cơ, lý và đánh giá chất lượng của BE và BTNE;
- Bước đầu đưa ra các chỉ tiêu kỹ thuật của BE với thành phần đề xuất và BTNE sử dụng chất kết dính BE đã đề xuất để làm tầng mặt áo đường với mục tiêu tăng tuổi thọ và chất lượng khai thác trong điều kiện Việt Nam;
- Đề xuất và đánh giá một số kết cấu mặt đường sử dụng BTNE, kiến nghị các kết cấu áp dụng cho mặt đường ô tô và lớp phủ mặt cầu;

Luận án chỉ tập trung nghiên cứu về thành phần, những đặc tính cơ học vật liệu, tiêu chuẩn kỹ thuật, khả năng và hiệu quả ứng dụng của BTNE mà không đi sâu vào nghiên cứu xây dựng quy trình công nghệ thi công BTNE.

1.6. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng tổng hợp các phương pháp nghiên cứu:

- Phương pháp lý thuyết: Phân tích đánh giá cơ sở khoa học sử dụng bitum-epoxy (BE) và BTNE.
- Phương pháp xác suất thống kê: Thiết kế thực nghiệm, xử lý kết quả thí nghiệm, thực nghiệm đảm bảo độ chụm, đảm bảo có ý nghĩa thống kê của kết quả nghiên cứu.
- Phương pháp thực nghiệm: Nghiên cứu thực nghiệm trong phòng xác định các chỉ tiêu cơ lý, chỉ tiêu kỹ thuật của bitum-epoxy và BTNE.
- Phương pháp mô hình hóa: Đề xuất, phân tích đánh giá một số kết cấu điển hình có lớp mặt BTNE để áp dụng ở Việt Nam.

CHƯƠNG 2.

NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH THÀNH PHẦN VÀ MỘT SỐ ĐẶC TÍNH CƠ BẢN CỦA BITUM-EPOXY

Từ mục tiêu nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu và các nội dung nghiên cứu đã được kết luận ở Chương 1, Chương 2 tiến hành nghiên cứu thực nghiệm trong phòng với mục đích lựa chọn được loại epoxy, tỷ lệ và phương pháp trộn bitum-epoxy (BE), thí nghiệm xác định các chỉ tiêu kỹ thuật của bitum-epoxy. Chương này cũng bao gồm các thí nghiệm đối chứng để đánh giá ưu điểm của bitum-epoxy so với các loại bitum đang được sử dụng phổ biến ở Việt Nam.

2.1. Xác định thành phần và cách chế tạo BE

2.1.1. *Lựa chọn vật liệu epoxy trong nghiên cứu*

Epoxy dùng làm lớp dính bám và chất kết dính trong hỗn hợp BTN được cung cấp bởi nhiều hãng ở các nước khác nhau như hãng Chemco System – Mỹ, Taiyu Kensetsu – Nhật Bản, hoặc các nước Đức, Anh, Pháp, Ukraine, New Zealand và cả Trung Quốc cũng phát triển epoxy riêng của mình. Nhật Bản là một trong những nước cung cấp vốn FDI lớn nhất cho Việt Nam và phần lớn trong số đó được đầu tư cho công trình giao thông. Nhật Bản cũng là một trong những nước nghiên cứu và sử dụng epoxy từ rất sớm, từ những năm 1969. Chính vì vậy epoxy có nguồn gốc từ Nhật Bản được sử dụng trong nghiên cứu này.

Epoxy sử dụng trong nghiên cứu được cung cấp bởi công ty TAIYU KENSETSU, địa chỉ 5-14-2, Kanayama, Naka-KU, NAGOYA-CITY, JAPAN. Đây là loại epoxy được sử dụng tương đối rộng rãi ở Nhật Bản (**Bảng 2-1**), Trung Quốc (**Bảng 2-2**) và cả ở Hàn Quốc. Epoxy được tạo bởi hai thành phần là chất nhựa chính và chất làm cứng với đặc điểm, tỷ lệ pha trộn được thể hiện trong **Bảng 2-3**. Trong đó: Chất nhựa chính là 1-Methylethylidene) bis (4,1-phenyleneoxymethylene) bis oxirane homopolymer thuộc nhóm nhựa chính Phenolic glycidyl ete – nhóm chất nhựa chính được sử dụng phổ biến nhất trên thế giới; Chất làm cứng là một amino bậc 1 (thuộc nhóm chất aliphatic amin) – đây là chất làm cứng không gia nhiệt (là chất khi trộn vào nhựa epoxy thì không cần gia nhiệt mà hỗn hợp vẫn có khả năng hóa cứng), như vậy sản phẩm có sử dụng loại epoxy này sau khi chế tạo sẽ không cần bảo dưỡng ở nhiệt độ cao.

**Bảng 2-1. Một số công trình tiêu biểu ở Nhật Bản sử dụng epoxy của công ty
TAIYU KENSETSU**

TT	Tên công trình	Chủ đầu tư	Thời điểm thực hiện	Khối lượng (m ²)
1	Thay thế lớp phủ mặt cầu Tenpaku	Greenification& Public Works Bureau, thành phố Nagoya	Tháng 11/1994 đến 3/1995	2.016
2	Cầu Doumeki và một số cầu khác thuộc tuyến đường 42	Kinki Regional, Bộ Đất đai, hạ tầng, giao thông và du lịch	3/1995	1.160
3	Cầu Tatsuta, đường tỉnh lộ Saya-Tado	Văn phòng xây dựng Tsushima, Sở xây dựng, Quận Aichi	12/1996 đến 3/1997	360
4	Mặt đường tuyến Sindeki-machi	Greenification& Public Works Bureau, thành phố Nagoya	7/1999 đến 3/2000	603
5	Cầu Shin Chidori, tuyến đường 247	Văn phòng xây dựng Chita, tỉnh Aichi	10/2002 đến 1/ 2003	1.780
6	Mặt đường khu vực Numazu, tuyến đường 246	Bộ Đất đai, Hạ tầng, Giao thông vận tải và Du lịch, Cục Phát triển Khu vực Chubu	3/2003 đến 12/2003	8.900
7	Mặt đường xe chạy đoạn San-nou JCT, đường cao tốc tỉnh Nagoya-Shinpo	Tổng công ty đường cao tốc Nagoya	7/2007 đến 8/2007	1.457
8	Mặt đường xe chạy đường thành phố Horita-Takaoka (đoạn phường số 1 Mizuho)	Greenification& Public Works Bureau, thành phố Nagoya	5/2010 đến 3/2011	1.963

**Bảng 2-2. Một số công trình Trung Quốc sử dụng epoxy của công ty
TAIYU KENSETSU**

TT	Tên công trình	Đơn vị đặt hàng	Thời điểm thực hiện	Khối lượng (m ²)
1	Cầu JiangYin ở Giang Tô	Công ty TNHH Cầu Giang Tô Dương Tử (Jiangsu Yangzi Bridge Company Limited).	6/2005	8.930
2	Cầu Hoàng Phố, Quảng Đông	Huangpu Bridge of Pearl River in Guangzhou	10/2008	11.000
3	Cầu Fumen ở Quảng Đông	Humen Bridge in Guangdong	1/2009	8.025

TT	Tên công trình	Đơn vị đặt hàng	Thời điểm thực hiện	Khối lượng (m ²)
4	Cầu Dongsha ở Quảng Châu	Công ty TNHH Guangzhou DongxinExpressway.	3/2010	12.525
5	Cầu Taizhou bắc qua sông Dương Tử ở Giang Tô	Department of Construction for Taizhou Yangtze River Bridge	7/2012	63.000

Bảng 2-3. Đặc điểm, thành phần Epoxy [63]

Chỉ tiêu	Chất nhựa chính	Chất làm cứng
Thành phần	2.2,-[(1-Methylethylidene) bis (4,1-phenyleneoxymethylene)] bis oxirane homopolymer 2.3,-epoxypropyl oleate 2.3,-epoxypropyl stearate	(Z)-Octadec-9-enylamine 2-Propenenitrile polymer with 1.3 butadiene, 1-cyano-1-methyl-4-oxo -4-[[2-(1-piperazinyl) ethyl] amino] butyl-terminated
CAS No	25085-99-8 , 5431-33-4 , 7460-84-6	112-90-3 , 68383-29-4
Tỷ lệ pha trộn	56% theo khối lượng	44% theo khối lượng
Màu sắc	Trong suốt	Vàng rom
Mùi	Không mùi	amoniac
Khối lượng riêng (ở 23 ⁰ C)	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0
Điểm nóng chảy (°C)	< 0	5 ~ 10
Điểm bắt lửa (°C)	≥ 230 ⁰ C	≥ 145 ⁰ C
Độ hòa tan trong nước	Không tan	Không tan
Nguy cơ	Tiếp xúc kéo dài có thể gây mẫn cảm da.	Tiếp xúc với mắt, hệ hô hấp và da có thể gây kích ứng.

2.1.2. Lựa chọn bitum sử dụng trong nghiên cứu

Loại bitum sử dụng phổ biến để làm chất kết dính cho BTN ở Việt Nam là bitum đặc có độ kim lún 60/70. Bitum 60/70 được cung cấp bởi hãng Shell nhập khẩu thông qua Petrolimex Việt Nam được sử dụng để chế tạo BE trong nghiên cứu. Các chỉ tiêu cơ bản của bitum 60/70 được tiến hành thí nghiệm tại Phòng thí nghiệm LASXD 1256 - Trung tâm Khoa học Công nghệ Trường Đại học Giao thông Vận tải với các chỉ tiêu và theo tiêu chuẩn thí nghiệm hiện hành của Việt Nam.

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ bản của loại bitum này được thể hiện trong Bảng 2-4

Bảng 2-4. Các chỉ tiêu cơ bản của bitum 60/70

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị	Phương pháp thử nghiệm
1	Độ kim lún ở 25 ⁰ C, 0,1mm, 5s	1/10 mm	62	TCVN 7495:2005
2	Độ kéo dài ở 25 ⁰ C	mm	>1000	TCVN 7496:2005
3	Nhiệt độ hóa mềm	⁰ C	48,8	TCVN 7497:2005
4	Điểm chớp cháy	⁰ C	328	TCVN 7498:2005
5	Tổn thất khối lượng sau khi gia nhiệt 5 giờ ở 163 ⁰ C	%	0,35	ASTM D1754
6	Khối lượng riêng	g/cm ³	1,032	TCVN 7501:2005

2.1.3. *Thiết kế phối trộn hỗn hợp Bitum-Epoxy*

2.1.3.1. *Hàm lượng epoxy trong bitum-epoxy*

Các đặc tính của BE khác nhau khi hàm lượng epoxy trong hỗn hợp khác nhau. Tỷ lệ phần trăm chất kết dính epoxy trong BE đang được sử dụng ở các nước trên thế giới dao động từ 15-50% theo khối lượng tùy thuộc vào loại epoxy. Các epoxy có gốc acid hàm lượng epoxy thấp hơn thường dao động từ 14,5-25%, loại có gốc amin hàm lượng epoxy thường từ 25-50% [21]. Loại bitum được sử dụng để trộn với epoxy cũng rất khác nhau ở các nước khác nhau, ví dụ như: Pháp dùng bitum có độ kim lún 35/50, Đức 50/70, Ukraine 60/90, New Zealand và Nhật 80/100, Anh 40/60 và ở Mỹ dùng bitum PG 70-22. Điều này có thể được giải thích là do đặc điểm khí hậu, đặc điểm giao thông ở mỗi nước là không giống nhau. Vì vậy trước khi đưa một loại epoxy bất kỳ vào sử dụng ở mỗi nước khác nhau cần phải có nghiên cứu thực nghiệm để tìm ra loại bitum dùng để phối trộn và tỷ lệ phối trộn tối ưu.

Epoxy sử dụng trong nghiên cứu là loại epoxy có gốc amin và hàm lượng epoxy nhà cung cấp khuyến cáo nên sử dụng là 50% theo khối lượng, tức trong BE sẽ gồm 50% epoxy và 50% bitum. Tuy nhiên để đánh giá một cách toàn diện sự ảnh hưởng của tỷ lệ phối trộn đến các đặc tính của BE để từ đó khuyến cáo được hàm lượng epoxy hợp lý với các mục đích sử dụng khác nhau thì cần phải tiến hành thử nghiệm với nhiều tỷ lệ phối trộn khác nhau. Hơn nữa, giá thành epoxy đắt gấp khoảng từ 10÷20 lần so với bitum nên cần phải nghiên cứu đánh giá đặc tính cũng như khả năng của BE với các hàm lượng epoxy thấp hơn để hạ giá thành. Vì vậy trong nghiên cứu này, các đặc tính của BE sẽ được thử nghiệm với các hàm lượng epoxy là 15%, 20%, 30%, 35%, 40%, 50% theo khối lượng.

2.1.3.2. *Trình tự phối trộn chế tạo bitum-epoxy*

Epoxy bao gồm nhựa chính và chất làm cứng, hai chất này được để riêng và được trộn với tỷ lệ 56% nhựa chính, 44% chất làm cứng theo khối lượng epoxy [59]. BE gồm bitum và epoxy với hàm lượng epoxy thử nghiệm 15%, 20%, 30%, 35%, 40%, 50% theo khối lượng hỗn hợp và được kí hiệu lần lượt là: BE15, BE20, BE30, BE35, BE40, BE50. Để thống nhất về cách đặt tên mẫu thí nghiệm, trong đề cương và kết quả thí nghiệm, bitum 60/70 sẽ được ký hiệu là BE0, tức hàm lượng epoxy là 0%.

Mẫu BE được chuẩn bị theo trình tự sau:

Các bước chuẩn bị BE được thực hiện theo khuyến cáo của nhà cung cấp epoxy:

Bước 1: Chế tạo epoxy

+ Chất nhựa chính và chất làm cứng của epoxy được giữ trong tủ sấy với nhiệt độ 60⁰C trong thời gian ≥ 2 tiếng nhằm giảm độ nhớt của chúng xuống, tạo điều kiện thuận lợi cho việc phối trộn.

+ Trộn chất nhựa chính với chất làm cứng với tỉ lệ 56:44 trong thời gian 1 phút. Sản phẩm thu được là epoxy.

Bước 2: Tạo mẫu BE

+ Sấy bitum 60/70 đến nhiệt độ 170⁰C

+ Trộn bitum 60/70 với epoxy đã chuẩn bị ở bước 1 với tỷ lệ đã định, thời gian trộn là 4 phút. Sản phẩm thu được là BE.

+ BE được đổ vào các khuôn thí nghiệm tương ứng với các thí nghiệm cần thực hiện. Sau đó đưa khuôn đã chứa hỗn hợp vào sấy ở nhiệt độ 150⁰C trong vòng 1 giờ.

Bước 3: Bảo dưỡng mẫu

+ Khuôn chứa hỗn hợp ở Bước 2 sẽ tiếp tục được bảo dưỡng ở các điều kiện nhiệt độ và thời gian khác nhau như trình bày ở mục 2.1.4

+ Hết thời gian bảo dưỡng, các khuôn chứa hỗn hợp được lấy ra và tiến hành thí nghiệm theo đúng quy trình thí nghiệm hiện hành.

2.1.4. *Lựa chọn thời gian và nhiệt độ bảo dưỡng mẫu Bitum-Epoxy trước khi thí nghiệm.*

Khác với bitum thông thường, BE là loại vật liệu nhiệt rắn. Đặc trưng của sản phẩm nhiệt rắn là có đặc tính cường độ thay đổi cụ thể là sẽ tăng dần trong một khoảng thời gian nhất định sau khi tạo mẫu thí nghiệm. Mức độ thay đổi đặc tính

trong khoảng thời gian đó còn phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường xung quanh. Để đánh giá các đặc điểm bảo dưỡng của BE người ta tiến hành thử nghiệm cùng một chỉ tiêu ở các thời gian và điều kiện nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau.

Trong nghiên cứu này BE được bảo dưỡng ở 02 điều kiện nhiệt độ: nhiệt độ 60⁰C (phù hợp với nhiệt độ của mặt đường ở các vùng có nhiệt độ rất cao vào mùa hè và nhiệt độ lớp phủ mặt cầu trên cầu thép bản trực hướng); nhiệt độ phòng 25⁰C (phù hợp với nhiệt độ trung bình ở Việt Nam). Mẫu bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng 25⁰C sẽ được thử nghiệm ở các thời gian bảo dưỡng khác nhau: 2h, 4h, 24h, 48h, 72h, 96h, 168h. Mẫu bảo dưỡng ở nhiệt độ 60⁰C được thử nghiệm sau thời gian bảo dưỡng 96h.

2.2. Lựa chọn chỉ tiêu và phương pháp thí nghiệm đánh giá BE

2.2.1. Lựa chọn chỉ tiêu, kế hoạch thí nghiệm và phân tích đánh giá kết quả

2.2.1.1. Lựa chọn chỉ tiêu đánh giá BE

Ở Việt Nam, hệ thống tiêu chuẩn cho bitum được áp dụng theo TCVN7493:2005, Bitum – yêu cầu kỹ thuật. Tiêu chuẩn này bao gồm các phương pháp thử quy định để phân loại mác bitum theo độ kim lún truyền thống như: Độ kim lún, độ kéo dài, nhiệt độ hóa mềm, nhiệt độ bắt lửa, lượng tồn thất sau gia nhiệt ở 163⁰C trong 5 giờ, tỷ lệ độ kim lún sau gia nhiệt ở 163⁰C trong 5 giờ, hàm lượng hoà tan trong Trichloroethylen, khối lượng riêng, độ nhớt Kinematic ở 135⁰C, hàm lượng paraffin và độ dính bám với đá.

Trong tất cả các chỉ tiêu đánh giá bitum nói trên thì hai chỉ tiêu quan trọng nhất là độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm xác định ở nhiệt độ 25⁰C. Vì vậy trong khuôn khổ của nghiên cứu, tiến hành thử nghiệm một số chỉ tiêu cơ bản của BE cụ thể như sau:

- Thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm và thí nghiệm xác định độ kim lún được tiến hành với vật liệu đối chứng là bitum 60/70 và 6 loại BE, tương ứng với 6 hàm lượng epoxy đã được chuẩn bị ở mục 2.1.3. Với mỗi loại BE lại được thử nghiệm sau khi bảo dưỡng ở các nhiệt độ và thời gian khác nhau như đã trình bày ở mục 2.1.4. Từ kết quả thử nghiệm hai chỉ tiêu này bước đầu đề xuất loại BE (hàm lượng epoxy) kiến nghị sử dụng.
- Các chỉ tiêu còn lại: điểm chớp cháy, độ dính bám, lượng tồn thất sau khi gia nhiệt, khối lượng riêng, độ nhớt ở 135⁰C, độ đàn hồi ở 25⁰C chỉ xác định cho các loại BE dự kiến kiến nghị sử dụng ở trạng thái chưa qua bảo dưỡng.

Đặc tính lưu biến của chất kết dính gồm mô đun cắt động (G^*) và góc pha (δ_G) là các chỉ tiêu quan trọng nhất để phân loại nhựa đường theo cấp đặc tính sử

dụng PG theo AASHTO M320-17 “Specification for Performance-Graded Asphalt Binder”. Mô đun cắt động còn được sử dụng để dự đoán ứng xử đàn nhớt tuyến tính của hỗn hợp BTN trong phân tích kết cấu mặt đường. Trong luận án sẽ thực hiện nghiên cứu đặc tính lưu biến của BE với thành phần được kiến nghị để sử dụng và bitum 60/70 để đối chứng.

2.2.1.2. *Kế hoạch thí nghiệm và phân tích đánh giá kết quả thí nghiệm*

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 19 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 với số mẫu nhỏ sử dụng phương pháp của Tukey.

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 và kinh phí thực hiện tăng lên. Các tiêu chuẩn thí nghiệm đều quy định thường là 3, hoặc 2 mẫu/tổ mẫu, kết quả thí nghiệm được đánh giá đảm bảo độ chụm. Số mẫu trong 1 tổ mẫu chọn là 2 hoặc 3 tùy từng thí nghiệm, kết quả thí nghiệm được đánh giá độ chụm theo các tiêu chuẩn tương ứng.

Loại bỏ số liệu ngoại lai và đánh giá độ chụm

Độ chụm là mức độ gần nhau giữa các kết quả thử nghiệm độc lập nhận được trong điều kiện quy định. Độ chụm thể hiện chất lượng công tác thí nghiệm, đảm bảo cơ sở khoa học để phân tích đưa ra những kết luận và kiến nghị của đề tài nghiên cứu.

Sau khi có kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý, đánh giá loại bỏ số liệu ngoại lai (outlier) theo ASTM E178, đánh giá độ chụm theo ASTM C670 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 từ 1-6.

Đối với mỗi tiêu chuẩn thí nghiệm đều quy định độ chụm tương ứng. Nếu tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành chưa có chuẩn đánh giá độ chụm nên sử dụng các tiêu chuẩn AASHTO và ASTM. Nếu chưa có giới hạn đánh giá độ chụm thì sử dụng giá trị hệ số biến sai $C_v=6\%$

Trình tự thiết kế thí nghiệm và xử lý kết quả

- Thiết kế thí nghiệm;
- Thực hiện thí nghiệm tại 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;
- Tính toán các giá trị trung bình, khoảng, độ lệch chuẩn, hệ số biến sai, giá trị đặc trưng, giá trị 95%CI;
- Phân tích thống kê đánh giá ảnh hưởng các yếu tố đầu vào đến hàm đầu ra;
- Thiết lập các phương trình hồi quy (nếu có).

Sử dụng phần mềm Minitab 19 phân tích, vẽ biểu đồ thống kê các kết quả thí nghiệm.

Số lượng mẫu thực nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm được thể hiện trong Bảng 2-5, Bảng 2-6

Bảng 2-5. Khối lượng thí nghiệm xác định Độ kim lún

Nhiệt độ bảo dưỡng (°C)	Thời gian bảo dưỡng (giờ)	Số lượng tổ hợp mẫu						
		Loại chất kết dính thử nghiệm						
		BE0	BE15	BE20	BE30	BE35	BE40	BE50
25	2	1	1	1	1	1	1	1
25	4		1	1	1	1	1	1
25	24		1	1	1	1	1	1
25	48		1	1	1	1	1	1
25	72		1	1	1	1	1	1
25	96		1	1	1	1	1	1
25	168		1	1	1	1	1	1
60	96		1	1	1	1	1	1
Tổng số tổ hợp mẫu mỗi loại bitum		1	8	8	8	8	8	8
Tổng số tổ hợp mẫu		49						

Bảng 2-6. Khối lượng thí nghiệm xác định Điểm hóa mềm

Nhiệt độ bảo dưỡng (°C)	Thời gian bảo dưỡng (giờ)	Số lượng tổ hợp mẫu						
		Loại chất kết dính thử nghiệm						
		BE0	BE15	BE20	BE30	BE35	BE40	BE50
25	2	1	1	1	1	1	1	1
25	4		1	1	1	1	1	1
25	24		1	1	1	1	1	1
25	48		1	1	1	1	1	1
25	72		1	1	1	1	1	1
25	96		1	1	1	1	1	1
25	168		1	1	1	1	1	1
60	96		1	1	1	1	1	1
Tổng số tổ hợp mẫu mỗi loại bitum		1	8	8	8	8	8	8
Tổng số tổ hợp mẫu thí nghiệm		49						

2.2.2. Phương pháp thí nghiệm

Phương pháp thí nghiệm xác định các chỉ tiêu trong nghiên cứu đều tuân thủ theo các tiêu chuẩn hiện hành và được thể hiện trong *Bảng 2-7*

Bảng 2-7. Các chỉ tiêu và tiêu chuẩn thí nghiệm

STT	Chỉ tiêu	Tiêu chuẩn áp dụng
1	Độ kim lún ở 25°C, 0,1mm, 5s	TCVN 7495:2005
2	Nhiệt độ hóa mềm	TCVN 7497:2005
3	Độ đàn hồi ở 25°C	22 TCN 319- 04
4	Điểm chớp cháy	TCVN 7498:2005
5	Tổn thất khối lượng sau khi gia nhiệt 5 giờ ở 163°C	TCVN 7499:2005 ASTM D1754
6	Khối lượng riêng	TCVN 7501:2005
7	Độ dính bám với đá	TCVN 7504:2005
8	Độ nhớt xác định bằng nhớt kế Brookfield	22 TCN 319- 04
9	Mô đun cắt động DSR	AASHTO T315

2.3. Độ kim lún của BE với các tỉ lệ thành phần được nghiên cứu

Tính quán tính biểu thị sức bền nội tại của bitum, nó phụ thuộc vào hàm lượng các nhóm cấu tạo và nhiệt độ của môi trường. Độ kim lún của bitum ở 25°C thể hiện độ quán tính của bitum ở nhiệt độ phục vụ trung bình năm và nó có thể ảnh hưởng đến một số đặc tính khai thác của mặt đường [12]. Độ kim lún tính bằng phần mười milimét của kim tiêu chuẩn xuyên thẳng đứng vào mẫu, trong điều kiện cho trước về nhiệt độ, thời gian và tải trọng qui định. Độ kim lún được xác định theo

tiêu chuẩn TCVN 7495:2005

2.3.1. Kết quả thí nghiệm độ kim lún

Thí nghiệm xác định độ kim lún được tiến hành với vật liệu đối chứng là bitum 60/70 (BE0) và 6 loại BE (BE15, BE20, BE30, BE35, BE40, BE50) tương ứng với 6 hàm lượng epoxy đã được chuẩn bị như ở 2.1.3. Với mỗi loại BE lại được thử nghiệm sau khi bảo dưỡng ở các nhiệt độ và thời gian khác nhau, cụ thể như sau:

- + Mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt phòng (25⁰C) trong các thời gian 2h, 4h, 24h, 48h, 72h, 96h,168h, kể từ lúc trộn bitum với epoxy.
 - + Mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ 60⁰C trong thời gian 96h.
- Tổng số là 49 mẫu thí nghiệm xác định độ kim lún.

Kết quả thí nghiệm xác định độ kim lún được thể hiện trong **Bảng 2-8**



a. Chuẩn bị mẫu



b. Thử nghiệm xác định độ kim lún

Hình 2-1. Một số hình ảnh thí nghiệm độ kim lún

Bảng 2-8. Độ kim lún của BE ở các điều kiện bảo dưỡng khác nhau.

Nhiệt độ bảo dưỡng (°C)	Thời gian bảo dưỡng (giờ)	Độ kim lún (1/10mm)						
		Loại bitum						
		BE0	BE15	BE20	BE30	BE35	BE40	BE50
25	2	62	65,87	62,23	59,40	56,23	56,17	55,37
25	4		65,80	61,73	57,77	56,00	55,13	54,40
25	24		64,03	57,20	54,10	51,13	50,93	48,47
25	48		63,53	55,73	52,53	46,77	44,63	43,60
25	72		61,30	54,47	49,57	42,13	40,47	36,90
25	96		58,33	54,03	45,87	38,60	35,67	32,23
25	168		56,40	52,30	42,93	33,57	29,93	23,57
60	96		54,07	50,57	39,80	29,60	25,87	19,43

2.3.2. Phân tích kết quả thí nghiệm độ kim lún

Sử dụng phần mềm Minitab19 thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design). Số lần lặp thí nghiệm 3. Phân tích phương sai ANOVA và phân tích hậu định phát hiện sai khác theo chuẩn Tukey.

Các biến đầu vào của thiết kế thực nghiệm: 2 biến

- Tỷ lệ epoxy BE: có 6 tỷ lệ là 15%; 20%; 30%; 35%; 40%; 50%.
- Thời gian bảo dưỡng T: có 7 thời gian là 2h; 4h; 24h; 48h; 72h; 96h; 168h.

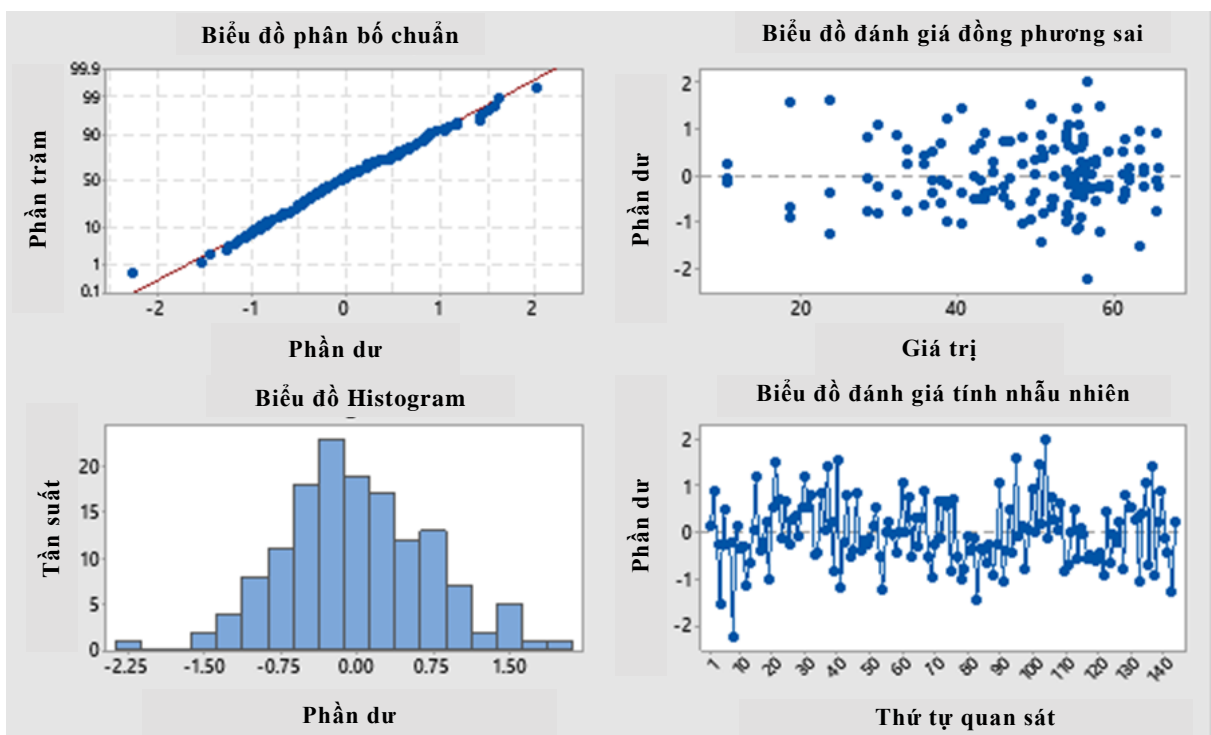
Hàm phân tích đầu ra là Độ kim lún: Pe.

Tổng số kết quả thí nghiệm $6 \times 7 \times 3 = 126$ kết quả.

Phân tích độ chụm của kết quả thí nghiệm độ kim lún theo tiêu chuẩn ASTM D5-2013, kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm và được minh họa một số giá trị như **Bảng 2-9** đối với BE50 và các loại BE khác được thể hiện trong phụ lục 1.

Bảng 2-9. Đánh giá độ chụm Độ kim lún BE50%.

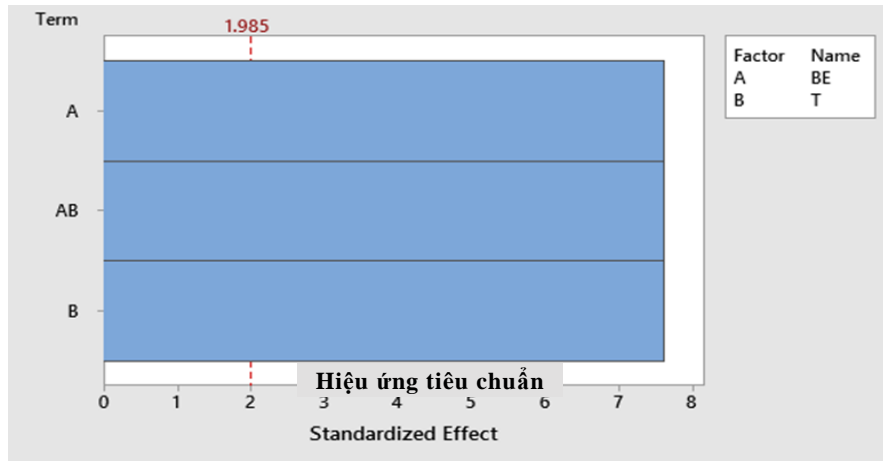
TT	Chỉ tiêu/Th.gian bảo dưỡng h	Mẫu	2	4	24	48	72	96	168
1	Độ kim lún, pen	1	54.20	54.20	49.30	43.10	36.50	33.10	23.20
		2	55.10	55.50	47.40	43.20	37.40	31.80	23.80
		3	56.80	53.50	48.70	44.50	36.80	31.80	23.70
		TB	55.37	54.40	48.47	43.60	36.90	32.23	23.57
2	K hoảng chênh lệch R: max-min	pen	2.60	2.00	1.90	1.40	0.90	1.30	0.60
3	Độ lệch chuẩn cho phép, 1s	pen	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
4	Giá trị độ lệch cho phép: $3.3 \times 1s$	pen	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
5	Đánh giá: So sánh (2) và (4)	-	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt



Hình 2-2. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê

Hình 2-2 là biểu đồ phần dư cho thấy phần dư tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các giá trị ngẫu nhiên, không theo quy luật và phân bố đều hai bên qua đường “0” như vậy thỏa mãn các điều kiện áp dụng phương pháp thống kê thực nghiệm.

Biểu đồ Pareto ở **Hình 2-3**, đường thẳng đứng đều cắt qua tất cả các hàng, thể hiện 2 biến BE, T và tích các biến đều có ảnh hưởng đến độ kim lún (Pe) có ý nghĩa thống kê.



Hình 2-3. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng độ kim lún (Pe)

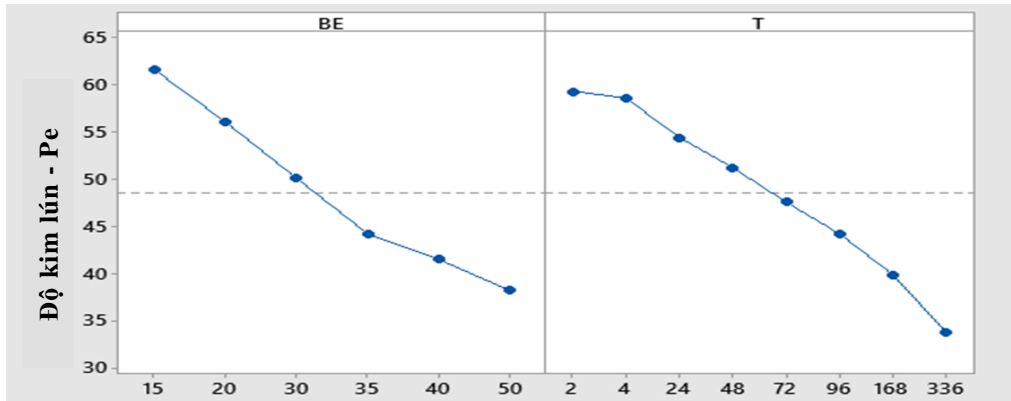
Phân tích phương sai

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	47	22498,6	478,69	613,16	0,000
Linear	12	19969,0	1664,08	2131,54	0,000
BE	5	9695,1	1939,02	2483,71	0,000
T	7	10273,9	1467,70	1879,99	0,000
2-Way Interactions	35	2529,6	72,28	92,58	0,000
BE*T	35	2529,6	72,28	92,58	0,000
Sai số	96	74,9	0,78		
Tổng	143	22573,6			

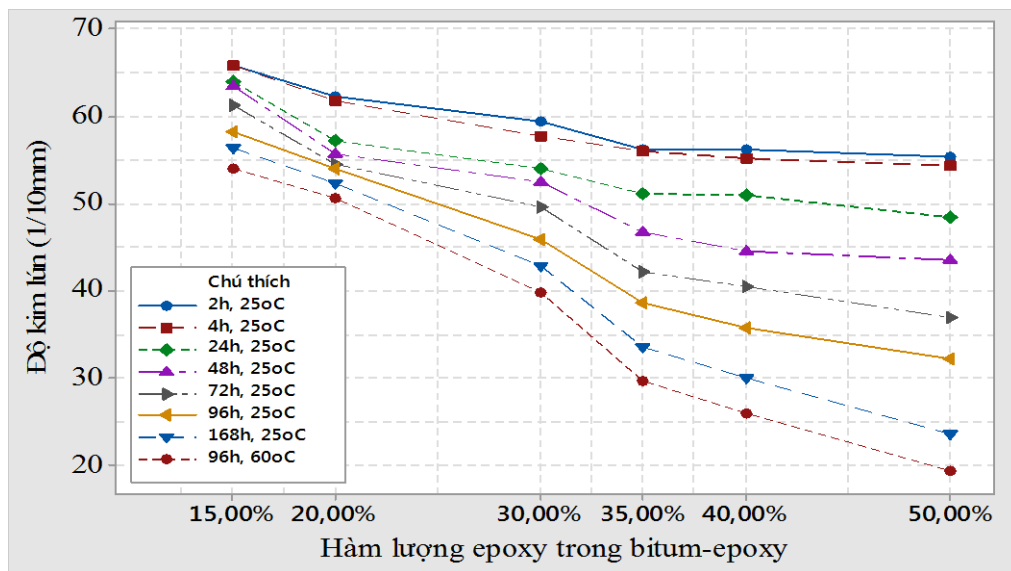
Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,883569	99,67%	99,51%	99,25%

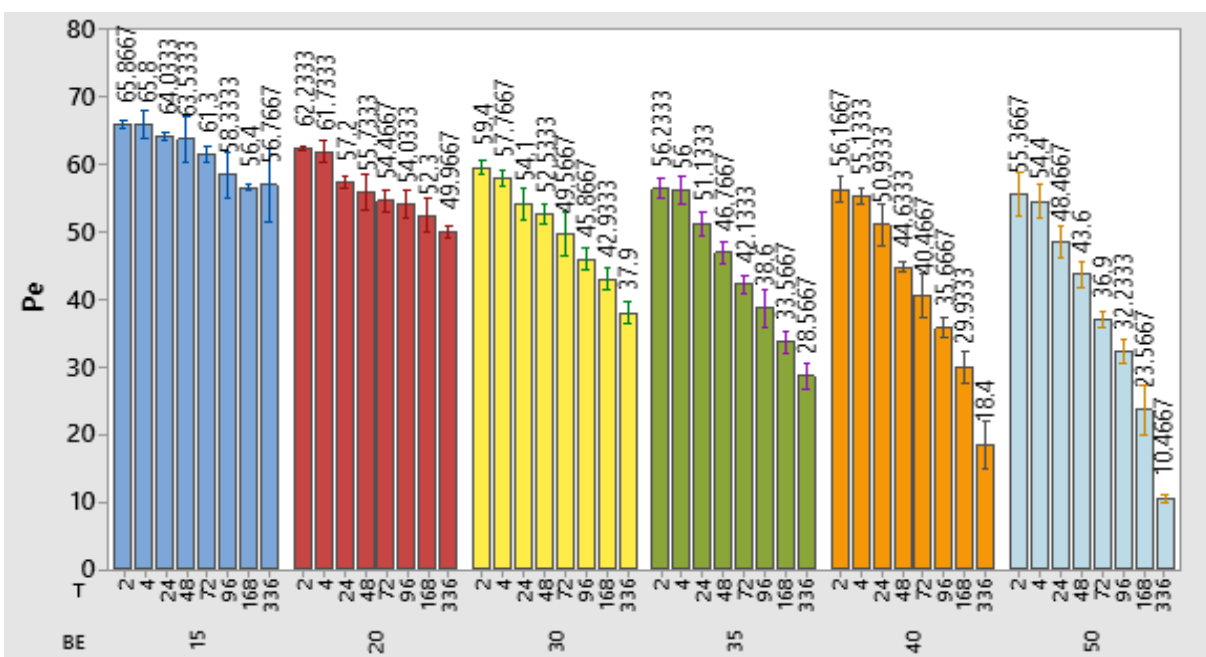
Kết quả phân tích ANOVA cho thấy: Các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$; Hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc} = 99,51\%$. Như vậy kết quả thực nghiệm các yếu tố đầu vào và tích tương tác của chúng đều ảnh hưởng đến độ kim lún (Pe) có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao.



Hình 2-4. Ảnh hưởng các yếu tố BE, T đến Pe



Hình 2-5. Biểu đồ quan hệ giữa độ kim lún và hàm lượng epoxy trong bitum-epoxy ở các thời gian và nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau.



Hình 2-6. Biểu đồ tổng hợp độ kim lún (Pe)

Hình 2-4 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến Pe. Có thể nhận thấy như đã phân tích về lý thuyết thì cả 2 yếu tố hàm lượng epoxy và nhiệt độ đều có ảnh hưởng đến Pe:

- BE trong dãy hàm lượng epoxy trộn thử nghiệm (từ 15% đến 50% theo khối lượng) có Pe giảm khi hàm lượng epoxy tăng. Khi hàm lượng epoxy ở dưới 30% tốc độ giảm của Pe khoảng $6,5 \div 15$ (1/10mm) trên 15% epoxy, tương ứng trung bình 3,64 (1/10mm)/ 5% tăng hàm lượng epoxy. Khoảng biến động đáng kể đối với Pe là khi tăng hàm lượng epoxy từ 30% lên 35%, với mức giảm trung bình 6,7 (1/10mm)/ 5%, sau đó tốc độ giảm lại trở về ở mức ban đầu với mức trung bình 3,64 (1/10mm)/ 5% tăng hàm lượng epoxy. [Xem **Hình 2-4**, **Hình 2-6** và **Hình 2-5**].

- Phân tích **Hình 2-4** và **Hình 2-6** ta thấy ở khi bảo dưỡng mẫu ở nhiệt độ phòng, Pe của tất cả các loại hàm lượng đều giảm dần theo thời gian bảo dưỡng, tuy nhiên với các hàm lượng epoxy dưới 35% sự giảm này không đáng kể và gần như kết thúc ở 96h; còn với hàm lượng 35%, 40%, 50%, việc giảm rất rõ rệt khi thời gian bảo dưỡng tăng và có vẻ sự giảm này vẫn chưa dừng lại ngay cả khi thời gian bảo dưỡng mẫu đã lên tới 168h. Trong 3 loại hàm lượng đó, tốc độ giảm của mẫu 50% là lớn nhất, mẫu 35% là nhỏ nhất.

- Phân tích **Hình 2-5** thấy rõ mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ 60⁰C trong 96h có Pe thấp hơn so với mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ 25⁰C trong 168h. Với hàm lượng 50% và bảo dưỡng nhiệt ở 60⁰C trong 96h thì BE có Pe xuống dưới 20 (1/10mm).

Việc giảm Pe hay là tăng tính cứng của BE so với bitum thông thường là do thành phần nhiệt rắn epoxy. Trong hỗn hợp BE, epoxy là pha liên tục ba chiều mang tính rắn và sẽ trở nên cứng hơn khi gia nhiệt. Khi hàm lượng epoxy tăng lên, hỗn hợp với nhiều thành phần mang tính rắn sẽ làm giảm Pe, đồng thời việc bảo dưỡng hỗn hợp BE ở nhiệt độ cao hơn sẽ giúp BE có đạt tính cứng nhanh hơn. Thời gian bảo dưỡng lâu giúp tiếp tục hoàn thiện pha phân tán epoxy và tăng tính cứng của BE.

Thiết lập phương trình hồi quy bậc 2 quan hệ giữa hàm độ kim lún Pe và các biến BE và T trong phạm vi nghiên cứu như sau:

$$Pe = 79,62 - 1,0153 BE - 0,06700 T + 0,00990 BE*BE + 0,000283 T*T - 0,003223 BE*T \quad (2-1)$$

Hệ số

Tham số	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	79,62	1,28	62,32	0,000	
BE	-1,0153	0,0821	-12,37	0,000	36,81
T	-0,06700	0,00675	-9,93	0,000	19,72
BE*BE	0,00990	0,00125	7,91	0,000	36,01
T*T	0,000283	0,000016	18,21	0,000	12,50
BE*T	-0,003223	0,000129	-25,00	0,000	9,02
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
1,91354	97,76%	97,68%	97,52%		

Phương trình đảm bảo độ tin cậy với hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc}=97,68\%$; Hệ số p-value của các tham số đều nhỏ hơn 0,05.

2.4. Chỉ tiêu nhiệt độ hóa mềm

2.4.1. Kết quả thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm

Loại bitum, số lượng mẫu, điều kiện bảo dưỡng trong thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm hoàn toàn giống thí nghiệm xác định độ kim lún. Thí nghiệm được thực hiện theo tiêu chuẩn hiện hành TCVN 7497:2005-Phương pháp vòng và bi. Đối với mẫu BE40, BE50 có thời gian bảo dưỡng trên 96h (điểm hoá mềm trong khoảng 80°C (176°F) đến 157°C (315°F)) dùng dung dịch USP glycerin thay cho nước cất đun sôi để nguội. Kết quả thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm được thể hiện trong **Bảng 2-10**



Hình 2-7. Một vài hình ảnh thí nghiệm xác định nhiệt độ hóa mềm

Bảng 2-10. Nhiệt độ hóa mềm của bitum-epoxy ở các điều kiện bảo dưỡng khác nhau.

Nhiệt độ bảo dưỡng ($^{\circ}\text{C}$)	Thời gian bảo dưỡng (giờ)	Nhiệt độ hóa mềm ($^{\circ}\text{C}$)						
		Loại bitum						
		BE0	BE15	BE20	BE30	BE35	BE40	BE50
25	2	48,8	52,4	53,5	53,20	54,75	56,95	63,20
25	4	-	52,4	54,65	53,75	55,95	57,35	64,90

Nhiệt độ bảo dưỡng (°C)	Thời gian bảo dưỡng (giờ)	Nhiệt độ hóa mềm (°C)						
		Loại bitum						
		BE0	BE15	BE20	BE30	BE35	BE40	BE50
25	24	-	52,6	54,90	54,30	57,25	59,75	68,50
25	48	-	53,4	55,80	56,85	59,40	64,75	74,10
25	72	-	53,9	56,35	57,30	63,40	68,40	78,85
25	96	-	53,7	56,45	58,85	66,75	74,75	85,30
25	168	-	53,5	56,45	60,25	71,35	81,35	117,70
60	96	-	53,5	55,65	61,55	72,45	84,45	>120,00

2.4.2. Phân tích kết quả thí nghiệm nhiệt độ hóa mềm

Tương tự như với độ kim lún, sử dụng phần mềm Minitab19 thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design). Số lần lặp thí nghiệm 2. Phân tích phương sai ANOVA và phân tích hậu định phát hiện sai khác theo chuẩn Tukey.

Các biến đầu vào của thiết kế thực nghiệm: 2 biến

- Tỷ lệ epoxy BE: có 6 tỷ lệ là 15%; 20%; 30%; 35%; 40%; 50%.
- Thời gian bảo dưỡng T: có 7 thời gian là 2h; 4h; 24h; 48h; 72h; 96h; 168h.

Hàm phân tích đầu ra là Nhiệt độ hóa mềm: SP.

Tổng số kết quả thí nghiệm $6 \times 7 \times 2 = 84$ kết quả.

Phân tích độ chụm của kết quả thí nghiệm nhiệt độ hóa mềm theo tiêu chuẩn ASTM D36-2014, cho thấy kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm và được minh họa một số giá trị như Bảng 2-11 đối với BE15 và các loại hàm lượng epoxy khác được thể hiện trong phụ lục 2.

Bảng 2-11. Đánh giá độ chụm Nhiệt độ hóa mềm BE15.

TT	Chỉ tiêu/ Thời gian bảo dưỡng	Mẫu	2h	4h	24h	48h	72h	96h	168h
1	Nhiệt độ hóa mềm, oC	1	52.60	52.30	52.50	53.30	53.90	53.60	53.30
		2	52.20	52.50	52.70	53.50	53.91	53.80	53.70
		TB	52.40	52.40	52.60	53.40	53.91	53.70	53.50
2	Khoảng chênh lệch R: max-min	oC	0.40	0.20	0.20	0.20	0.01	0.20	0.40
3	Độ lệch chuẩn cho phép, 1s	oC	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
4	Giá trị độ lệch cho phép: 2.8x1s	oC	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
5	Đánh giá: So sánh (2) và (4)	-	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt

Phân tích phương sai

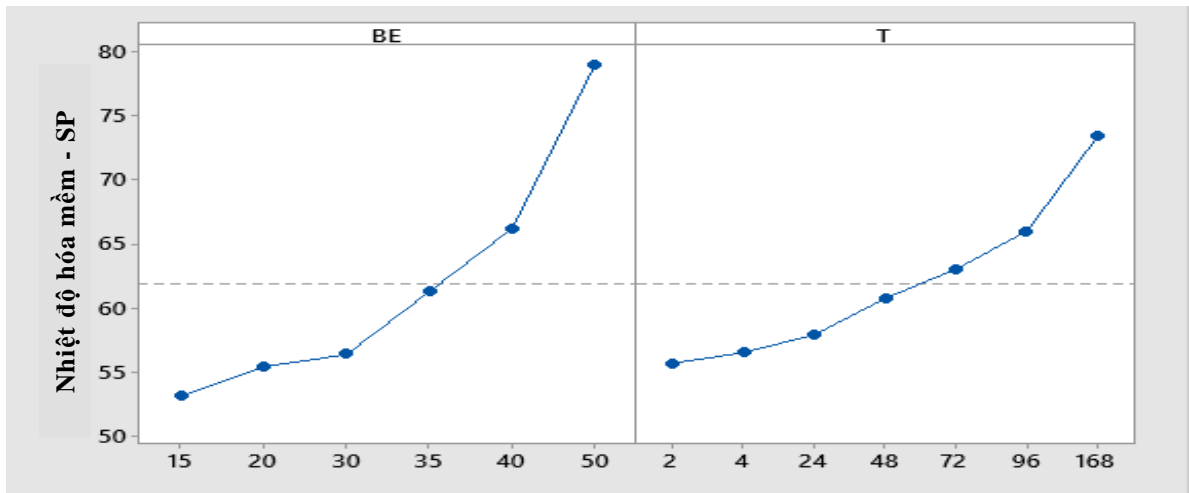
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	41	12251,0	298,80	2259,18	0,000
Linear	11	9243,7	840,34	6353,58	0,000

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
BE	5	6421,1	1284,23	9709,71	0,000
T	6	2822,6	470,43	3556,81	0,000
2-Way Interactions	30	3007,2	100,24	757,90	0,000
BE*T	30	3007,2	100,24	757,90	0,000
Sai số	42	5,6	0,13		
Tổng	83	12256,5			

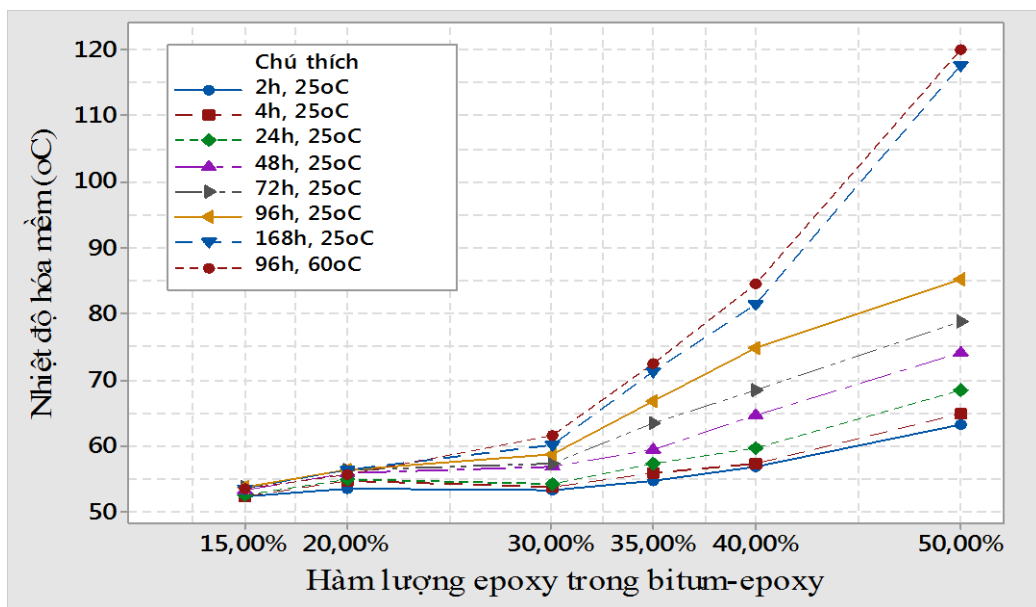
Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.363678	99.95%	99,91%	99,82%

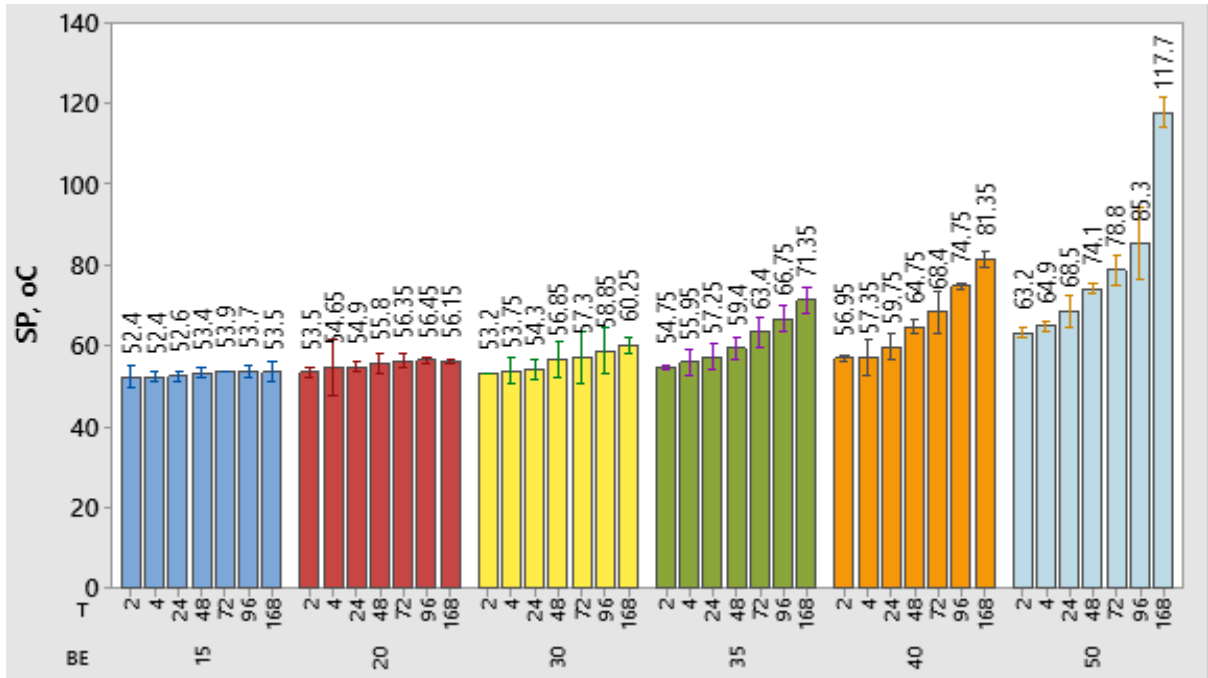
Kết quả phân tích ANOVA cho thấy: Các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$; Hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc}=99,91\%$. Như vậy kết quả thực nghiệm các yếu tố đầu vào và tích tương tác của chúng đều ảnh hưởng đến SP có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao.



Hình 2-8. Ảnh hưởng các yếu tố BE, T đến SP



Hình 2-9. Biểu đồ quan hệ giữa nhiệt độ hóa mềm và hàm lượng epoxy trong bitum-epoxy ở các điều kiện bảo dưỡng khác nhau.



Hình 2-10. Biểu đồ tổng hợp nhiệt độ hóa mềm (SP)

Hình 2-8 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến nhiệt độ hóa mềm (SP). Nhận thấy cả 2 yếu tố hàm lượng epoxy và thời gian bảo dưỡng đều có ảnh hưởng đến SP.

- Ảnh hưởng của tỷ lệ epoxy BE: Khi hàm lượng epoxy tăng lên thì nhiệt độ hóa mềm cũng tăng lên. Khi hàm lượng epoxy tăng từ 15% đến 30%, nhiệt độ hóa mềm tăng tương đối chậm. Tùy thuộc vào điều kiện dưỡng mẫu tăng trong khoảng $0,8 \div 8,1$ ($^{\circ}\text{C}$), tương ứng trung bình $1,3^{\circ}\text{C}/5\%$ tăng hàm lượng epoxy. Sự tăng nhanh nhiệt độ hóa mềm thể hiện rất rõ từ hàm lượng epoxy từ 30% trở lên. Tùy thuộc điều kiện dưỡng mẫu, trong khoảng tăng hàm lượng epoxy từ 30% đến 50%, nhiệt độ hóa mềm tăng thêm lên từ $10 \div 60^{\circ}\text{C}$, tương ứng trung bình xấp xỉ 7°C cho mỗi 5% hàm lượng tăng của epoxy. Điều này thể hiện rõ ở độ dốc của các đường quan hệ giữa nhiệt độ hóa mềm và hàm lượng epoxy tăng đột ngột ở hàm lượng epoxy 30% [Xem Hình 2-10 và Hình 2-9].

- Phân tích **Hình 2-10** ta thấy khi bảo dưỡng mẫu ở nhiệt độ phòng, nhiệt độ hóa mềm của tất cả các loại hàm lượng đều tăng dần theo thời gian bảo dưỡng, tuy nhiên với các hàm lượng epoxy dưới 35% sự tăng này không đáng kể và gần như kết thúc ở 96h; còn với hàm lượng 35%, 40%, 50%, việc tăng rất rõ rệt khi thời gian bảo dưỡng tăng và sự tăng này vẫn chưa dừng lại ngay cả khi thời gian bảo dưỡng mẫu đã lên tới 168h. Trong 3 loại hàm lượng đó, tốc độ tăng của mẫu 50% là lớn nhất, mẫu 35% là nhỏ nhất.

- Phân tích Hình 2-9 thấy rõ mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ 60°C trong 96h có

nhệt độ hóa mềm cao hơn so với mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ 25⁰C trong 168h. Với hàm lượng 50% và bảo dưỡng nhiệt ở 60⁰C trong 96h thì bitum-epoxy không hóa mềm ngay cả ở 120⁰C.

- Với nhiệt độ không khí 25⁰C, 168h sau khi trộn, nhiệt độ hóa mềm của mẫu có hàm lượng epoxy 35% tương đương PMB-II, mẫu có hàm lượng epoxy 40% tương đương PMB-III [1], mẫu có hàm lượng epoxy 50% lên đến 117⁰C.

Cơ sở lý thuyết cho sự thay đổi của nhiệt độ hóa mềm cũng tương tự như đối với độ kim lún. Thành phần nhiệt rắn epoxy trong BE khi tăng lên làm tăng khả năng chịu nhiệt, duy trì tính rắn của BE trong điều kiện nhiệt độ cao. Tỷ lệ epoxy cao hơn mở rộng phạm vi pha liên tục có tính nhiệt rắn sẽ làm tăng nhanh tính rắn của BE trong điều kiện nhiệt độ cao. Tương tự như với độ kim lún cho chế độ bảo dưỡng, bảo dưỡng ở nhiệt độ cao làm tăng nhanh tính cứng của BE và thời gian bảo dưỡng dài sẽ giúp hoàn thiện pha phân tán nhiệt rắn, làm tăng nhiệt độ hóa mềm của BE.

Thiết lập phương trình hồi quy bậc 2 quan hệ giữa hàm nhiệt độ hóa mềm SP và các biến BE và T trong phạm vi nghiên cứu như sau:

$$SP = 70,33 - 1,319 BE - 0,1590 T + 0,02371 BE*BE + 0,008356 BE*T \quad (2-2)$$

Hệ số

Tham số	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	70,33	2,50	28,13	0,000	
BE	-1,319	0,159	-8,28	0,000	37,17
T	-0,1590	0,0161	-9,88	0,000	8,22
BE*BE	0,02371	0,00241	9,82	0,000	36,01
BE*T	0,008356	0,000476	17,54	0,000	9,38
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
2,82114	94,87%	94,61%	93,08%		

Phương trình đảm bảo độ tin cậy với hệ số xác định điều chỉnh R²_{dc}=94,61%; Hệ số p-value của các tham số đều nhỏ hơn 0,05.

2.5. Luận chứng lựa chọn tỷ lệ thành phần trong bitum - epoxy

Từ kết quả thử nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm các kết luận sau được rút ra:

- Khi hàm lượng epoxy ≤ 30%: Tốc độ giảm của độ kim lún và tăng nhiệt độ hóa mềm của BE không cao; Độ kim lún ở tất cả các điều kiện bảo dưỡng đã thử nghiệm đều nằm trong khoảng từ 40-65 (1/10mm), tức chỉ tương đương với PMB-II và PMB-III [1]; Khi hàm lượng epoxy dưới 30%, nhiệt độ hóa

mềm của BE ở tất cả các điều kiện bảo dưỡng đều thấp hơn 60°C tức thấp hơn PMB-I; Với hàm lượng epoxy 30%, nếu bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng 25°C thì thời gian bảo dưỡng phải lên đến 168h lúc đó nhiệt độ hóa mềm mới đạt $60,25^{\circ}\text{C}$ và nếu bảo dưỡng ở 60°C trong 96h nhiệt độ hóa mềm đạt $61,55^{\circ}\text{C}$ tức mới chỉ tương đương với PMB-I.

- Với hàm lượng epoxy từ 35% trở lên, chỉ tiêu độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm của bitum-epoxy vượt trội so với bitum 60/70. Với hàm lượng epoxy lên tới 50% thì hai chỉ tiêu này còn vượt trội so với PMB-III. Cụ thể:
 - + Với BE35 nếu được bảo dưỡng ở 25°C thì khi thời gian bảo dưỡng từ trên 48h đến 96h nhiệt độ hóa mềm đạt tương đương PMB-I (trên 60°C), khi thời gian bảo dưỡng đạt 168h hoặc bảo dưỡng ở 60°C trong thời gian 96h nhiệt độ hóa mềm của nó tương đương PMB-II (trên 70°C);
 - + Với BE40 nếu được bảo dưỡng ở 25°C thì khi thời gian bảo dưỡng từ 48h đến 72h nhiệt độ hóa mềm đạt tương đương PMB-I (trên 60°C), khi thời gian bảo dưỡng từ trên 72h đến 96h nhiệt độ hóa mềm đạt tương đương PMB-II (trên 70°C) và khi thời gian bảo dưỡng đạt 168h hoặc bảo dưỡng ở 60°C trong thời gian 96h nhiệt độ hóa mềm của nó tương đương PMB-III (trên 80°C);
 - + Với BE50 mẫu để ở 25°C từ 2h đến 24h sau khi trộn nhiệt độ hóa mềm đã tương đương PMB-I, khi thời gian bảo dưỡng trên 24h đến 72h nhiệt độ hóa mềm tương đương PMB-II và khi thời gian bảo dưỡng đến 96h nhiệt độ hóa mềm của nó tương đương PMB-III, đặc biệt khi thời gian bảo dưỡng đạt 168h hoặc bảo dưỡng ở 60°C trong thời gian 96h nhiệt độ hóa mềm của nó lên đến 120°C - vượt trội so với PMB-III.
 - + Độ kim lún xuống thấp hơn của PMB-III (dưới 40) khi được bảo dưỡng trên 96h ở 25°C với BE35 và BE40, trên 72h ở 25°C với BE50.

Với những kết luận trên và kết quả tham khảo hàm lượng epoxy thường được sử dụng trong các nghiên cứu, ứng dụng trên thế giới [21], [63], chỉ 02 loại BE với tỉ lệ thành phần 35% và 50% tính theo khối lượng BE là epoxy (BE35 và BE50) được sử dụng để tiến hành các nghiên cứu tiếp theo trong luận án.

2.6. Thực nghiệm các chỉ tiêu cơ bản của BE với tỉ lệ thành phần được lựa chọn.

Như đã trình bày trong mục 2.2, các chỉ tiêu cơ bản còn lại được dùng để đánh giá bitum theo TCVN7493:2005, Bitum – yêu cầu kỹ thuật sẽ được thực hiện đối với loại BE dự kiến đề xuất sử dụng, khối lượng thí nghiệm được thể hiện trong **Bảng 2-12**, tiêu chuẩn thí nghiệm sử dụng được trình bày trong **Bảng 2-7**

Bảng 2-12. Khối lượng thí nghiệm một số chỉ tiêu khác

Chỉ tiêu	Số lượng tổ hợp mẫu			Tổng số tổ hợp mẫu
	Loại bitum-epoxy			
	BE0	BE35	BE50	
Điểm chớp cháy (°C)	1	1	1	3
Độ dính bám với đá	1	1	1	3
Lượng tổn thất khối lượng sau khi gia nhiệt 5 giờ ở 163 ⁰ C (%)	1	1	1	3
Khối lượng riêng (g/cm ³)	1	1	1	3
Độ nhớt ở 135 ⁰ C (nhớt kế Brookfield) (Pa.s)	1	1	1	3
Độ đàn hồi ở 25 ⁰ C (%)	1	1	1	3

Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong **Bảng 2-13** và trong các hình: **Hình 2-11**, **Hình 2-12**, **Hình 2-13**.



Hình 2-11. Kết quả thí nghiệm độ nhớt ở 135⁰C (nhớt kế Brookfield) của BE35



Hình 2-12. Kết quả thí nghiệm độ nhớt ở 135⁰C (nhớt kế Brookfield) của BE50



a. Thí nghiệm xác định độ dính bám với đá

b. TN điểm chớp cháy

Hình 2-13. Một số hình ảnh thí nghiệm xác định độ dính bám và điểm chớp cháy

Bảng 2-13. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu

Chỉ tiêu	Loại bitum			Yêu cầu về bitum 60/70 trong TCVN 7493:2005
	BE0	BE35	BE50	
Điểm chớp cháy, (⁰ C)	328	270	292	Min 232
Độ dính bám với đá	Cấp 3	Cấp 4	Cấp 4	Cấp 3
Lượng tổn thất khối lượng sau khi gia nhiệt 5 giờ ở 163 ⁰ C, (%)	0,35	0,288	0,298	Max 0,5
Tỉ lệ độ kim lún sau gia nhiệt 5 giờ ở 163 ⁰ C so với ban đầu, (%)	80,73	78,94	77,86	Min 75
Khối lượng riêng, (g/cm ³)	1,032	1,0336	1,0333	1,00-1,05
Độ nhớt ở 135 ⁰ C (nhớt kế)	0,445	1,52	2,589	Báo cáo

Chỉ tiêu	Loại bitum			Yêu cầu về bitum 60/70 trong TCVN 7493:2005
	BE0	BE35	BE50	
Brookfield), (Pa.s)				
Độ đàn hồi ở 25 ⁰ C, (%)		78,7	73,2	
Độ kéo dài ở 25 ⁰ C, (mm)	>1000			Min 1000

Kết quả trong **Bảng 2-13** cho thấy cả 2 loại bitum-epoxy là BE35 và BE50 đã thử nghiệm đều thỏa mãn qui định các chỉ tiêu chất lượng của bitum dầu mỏ mức 60/70 sử dụng trong xây dựng theo TCVN 7493:2005.

2.7. Mô đun cắt động của BE với tỉ lệ thành phần được lựa chọn

2.7.1. Kế hoạch thực nghiệm nghiên cứu Mô đun cắt động của BE

Để phân loại bitum theo đặc tính sử dụng PG, cần thực hiện thí nghiệm cắt động lưu biến, xác định mô đun cắt động ($|G^*|$) và góc pha (δ_G) của bitum ở các trạng thái gốc, sau hóa già ngắn hạn RTFO và sau hóa già dài hạn PAV. Thí nghiệm này được thực hiện trên thiết bị DSR RHEOTEST RN 4.3 (**Hình 2-14**). Thí nghiệm được điều khiển bằng phần mềm chuyên dụng, theo tiêu chuẩn AASHTO T315-12.



Hình 2-14. Thiết bị cắt động lưu biến DSR RHEOTEST RN 4.3 tại Trường ĐH GTVT

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm được thực hiện với các điều kiện sau:

- **Đĩa thí nghiệm:** loại đĩa đường kính 8 mm và khoảng cách giữa các đĩa 2 mm (dùng cho thí nghiệm nhiệt độ từ 5⁰C đến 35⁰C), loại đĩa đường kính 25 mm và khoảng cách giữa các đĩa thí nghiệm 1 mm (dùng cho thí nghiệm nhiệt độ từ 40⁰C đến 60⁰C).
- **Kiểu tác dụng tải trọng:** không chế biến dạng.
- **Nhiệt độ thí nghiệm và tần số thí nghiệm:** Để so sánh, đánh giá sự thay đổi mô đun cắt động theo thời gian và điều kiện bảo dưỡng, thí nghiệm được tiến hành ở các nhiệt độ 46⁰C, 52⁰C, 58⁰C, 64⁰C, 70⁰C, 76⁰C, 82⁰C và tần số 1,59Hz theo chuẩn PG (xem **Bảng 2-14**).

- Trong thử nghiệm, biến dạng được tạo ra là một hàm số dạng hình sin của thời gian như thể hiện ở công thức (2-3).

$$\gamma = \gamma_{\max} \sin(\omega t) \quad (2-3)$$

Ứng suất cắt đo được có dạng hình sin của thời gian nhưng có sự lệch pha δ giữa ứng suất cắt và biến dạng. Ứng suất cắt có thể viết dưới dạng công thức (2-4):

$$\tau = \tau_{\max} \sin(\omega t + \delta) \quad (2-4)$$

Các kết quả đo được ghi lại bằng phần mềm chuyên dụng sau đó được tính toán cho kết quả độ lớn mô đun cắt động $|G^*|$ và góc pha δ . Giá trị của mô đun cắt động được tính theo công thức (2-5):

$$|G^*| = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad (2-5)$$

Bảng 2-14. Kế hoạch thí nghiệm mô đun cắt động (G^*) của bitum sử dụng thiết bị cắt động lưu biến DSR theo chuẩn PG

STT	Trạng thái mẫu, tuổi mẫu	Loại nhựa		
		BE 15% (*)	BE 35%	BE 50%
1	2h, t ⁰ phòng	3	3	3
2	48h, t ⁰ phòng	3	3	3
3	96h, t ⁰ phòng	3	3	3
4	168h, t ⁰ phòng	3	3	3
5	336h, t ⁰ phòng	3	3	3
6	96h, 60 ⁰ C	3	3	3
7	Sau RTFO (85 phút, 163 ⁰ C theo AASHTO T240-13)	3	3	3
Tổng số mẫu		21	21	21

(*) để đánh giá thêm về ảnh hưởng của hàm lượng epoxy đến đặc tính của BE, thử nghiệm này được tiến hành cho cả mẫu BE15

2.7.2. Kết quả thử nghiệm DSR theo chuẩn PG

2.7.2.1. Kết quả mẫu nhựa gốc

Kết quả thí nghiệm xác định mô đun cắt động theo chuẩn PG của nhựa chưa lão hóa được thể hiện trong phụ lục 3 và **Bảng 2-15**

Bảng 2-15. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun cắt động theo chuẩn PG (tần số 1,59Hz) – mẫu nhựa gốc

Loại bitum	Nhiệt độ, °C	G*/sin(δ): [Pa]					
		Thời gian và nhiệt độ bảo dưỡng mẫu					
		2h, 25 ⁰ C	48h, 25 ⁰ C	96h, 25 ⁰ C	168h, 25 ⁰ C	336 h, 25 ⁰ C	96h, 60 ⁰ C
BE15	46	24 413	25 153	26 368	26 171	27 905	37 849
	52	10 366	11 374	12 007	12 466	13 579	16 656
	58	4 523	4 890	5 459	5 841	6 188	7 654
	64	2 077	2 226	2 510	2 674	2 778	3 408
	70	1 037	1 109	1 211	1 302	1 344	1 667
	76	551	595	640	679	703	852
	82	308	333	358	375	387	468
BE35	46	26 774	33 861	42 425	50 246	56 307	90 901
	52	13 687	17 618	21 440	25 899	29 818	44 161
	58	6 875	9 564	11 176	13 055	16 864	20 977
	64	3 457	4 942	5 813	7 152	8 818	9 938
	70	1 829	2 600	2 977	3 852	4 649	4 787
	76	1 030	1 433	1 603	2 157	2 544	2 392
	82	600	822	926	1 305	1 500	1 280
BE50	46	35 659	46 925	56 739	57 485	85 999	
	52	19 087	27 747	32 645	34 123	51 078	
	58	9 982	16 677	19 296	25 970	34 256	
	64	5 122	9 453	10 891	18 231	24 313	
	70	2 814	5 884	6 352	7 301	18 773	
	76	1 656	3 776	4 206	4 669	15 571	
	82	1 042	2 520	2 745	3 281	13 907	

Phân tích phương sai ANOVA và phân tích hậu định phát hiện sai khác theo chuẩn Turkey.

Các biến đầu vào của thiết kế thực nghiệm: 3 biến

Hàm lượng epoxy: có 3 hàm lượng là 15%; 35%; 50%

Nhiệt độ thí nghiệm: có 7 nhiệt độ là 46, 52, 58, 64, 70, 76, 82 °C

Thời gian bảo dưỡng: có 5 là 2; 48; 96; 168; 336 h

Hàm phân tích đầu ra là: G*/sinδ (Pa)

Tổng số kết quả thí nghiệm 3 x 7 x 5 x 2 = 210 kết quả.

Phân tích phương sai

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	56	26517204070	473521501	68,36	0,000

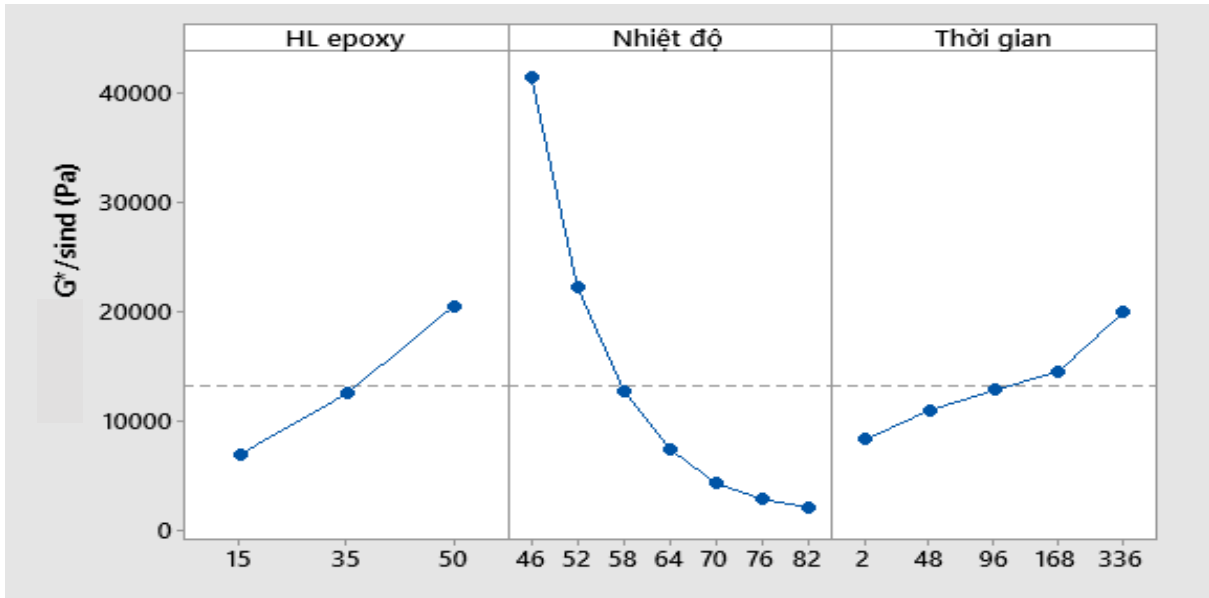
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	12	23325074012	1943756168	280,63	0,000
HL epoxy	2	3274795073	1637397536	236,40	0,000
Nhiệt độ	6	18450694712	3075115785	443,97	0,000
Thời gian	4	1599584227	399896057	57,73	0,000
2-Way Interactions	44	3192130059	72548410	10,47	0,000
HL epoxy*Nhiệt độ	12	1391817874	115984823	16,75	0,000
HL epoxy*Thời gian	8	1059182264	132397783	19,11	0,000
Nhiệt độ*Thời gian	24	741129921	30880413	4,46	0,000
Sai số	48	332470437	6926467		
Tổng	104	26849674507			

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2631,82	98,76%	97,32%	94,07%

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy: Các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$; Hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc}=97,32\%$. Như vậy kết quả thực nghiệm các yếu tố đầu vào và tích tương tác của chúng (hàm lượng epoxy, thời gian và nhiệt độ bảo dưỡng) đều ảnh hưởng đến $G^*/\sin\delta$ có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao. Cụ thể như sau:

- Với việc tăng hàm lượng epoxy từ 15 – 50% theo khối lượng, trị số $G^*/\sin\delta$ tăng rõ rệt khi so sánh ở cùng tần số và nhiệt độ, đặc biệt khi ở nhiệt độ cao.
- Thời gian bảo dưỡng cũng ảnh hưởng đến giá trị mô đun cắt động. Trong cùng một điều kiện nhiệt độ bảo dưỡng 25°C , khi tăng thời gian bảo dưỡng từ 2h lên đến 336h trị số $G^*/\sin\delta$ của cả 3 loại BE đều tăng rõ rệt. Hàm lượng epoxy càng lớn thì thời gian bảo dưỡng càng ảnh hưởng rõ đến $G^*/\sin\delta$ của BE. Cấp đặc tính khai thác của BE35 chưa hóa già được bảo dưỡng ở 25°C với thời gian bảo dưỡng từ 96h trở xuống chỉ tương đương với PG76 và tương đương PG82 khi thời gian bảo dưỡng đạt từ 168h.
- Với cùng thời gian bảo dưỡng 96h, mẫu được bảo dưỡng ở 60°C có $G^*/\sin\delta$ lớn hơn đáng kể so với mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng (25°C) ở tất cả các nhiệt độ thí nghiệm. Thậm chí mẫu được bảo dưỡng ở 60°C trong 96h còn có giá trị $G^*/\sin\delta$ cao hơn mẫu được bảo dưỡng ở 25°C trong 168h và 336h ở tất cả các nhiệt độ thí nghiệm khi hàm lượng epoxy là 15% (BE15). Điều này cũng xảy ra tương tự với khi hàm lượng epoxy là 35% (BE35) khi nhiệt độ thí nghiệm $\leq 70^{\circ}\text{C}$.
- Kết quả thí nghiệm DSR của BE15, BE35, BE50 chưa hóa già RTFO và PAV tương đương với cấp đặc tính khai thác lần lượt là PG70, PG76, PG82.



Hình 2-15. Ảnh hưởng các yếu tố BE, nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng đến $G^*/\sin\delta$

2.7.2.2. Kết quả thí nghiệm mẫu sau RTFO

Kết quả thí nghiệm xác định mô đun cắt động theo chuẩn PG của nhựa sau lão hóa ngắn hạn (sau RTFO) được thể hiện trong Bảng 2-16

Bảng 2-16. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun cắt động theo chuẩn PG (tần số 1,59Hz) – mẫu sau RTFO

Loại bitum	Cấp bitum theo PG của nhựa gốc	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Mô đun cắt động $ G^* $ và góc lệch pha δ						$ G^* /\sin(\delta)$ (Pa)					Cấp bitum theo PG của nhựa sau RTFO	
			Mẫu 1		Mẫu 2		Mẫu 3		Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Trung bình	Đánh giá độ chụm		
			$ G^* $ (Pa)	δ (°)	$ G^* $ (Pa)	δ (°)	$ G^* $ (Pa)	δ (°)					CoV (%)		CoV theo AASHTO T315 $\leq 3.2\%$
BE15	70	70	1 746	78.1	1 752	75.6	1 670	77.0	1 785	1 809	1 714	1 769	2.774	đạt	
		64	2 246	74.0	2 157	73.7	2 140	74.0	2 337	2 247	2 226	2 270	2.607	đạt	64
BE35	76	76	2 125	73.4	2 164	74.0	2 218	74.0	2 218	2 251	2 307	2 259	1.991	đạt	76
BE50	82	82	2 241	70.2	2 269	69.6	2 331	68.4	2 382	2 421	2 508	2 437	2.643	đạt	82

Kết quả thí nghiệm DSR cho mẫu sau lão hóa ngắn hạn cho thấy:

- Cấp đặc tính khai thác theo PG sau RTFO của 2 loại bitum BE35 và BE50 vẫn giữ được như cấp nhựa gốc lần lượt là PG76 và PG82.
- Cấp đặc tính khai thác theo PG sau RTFO của BE15 giảm một cấp so với cấp nhựa gốc từ PG70 xuống PG64, tức là ở tương đương với cấp tương ứng của bitum thường 60/70 (BE0).

2.8. Kết luận chương 2

- BE sử dụng trong nghiên cứu thỏa mãn các qui định về chỉ tiêu chất lượng của bitum sử dụng trong xây dựng theo TCVN 7493:2005. Với hàm lượng epoxy từ 35% trở lên, nhiệt độ hóa mềm của BE cao vượt trội so với bitum thông thường. Với hàm lượng epoxy lên tới 50% thì chỉ tiêu này còn vượt trội so với bitum polime. Hàm lượng epoxy tối thiểu nên sử dụng là 35% theo khối lượng của BE.
- Với cùng một hàm lượng epoxy, nhiệt độ hóa mềm và độ kim lún của BE phụ thuộc vào thời gian và nhiệt độ bảo dưỡng. Sự phụ thuộc này càng lớn khi hàm lượng epoxy càng cao.
- Với nhiệt độ không khí 25⁰C thì sau khi trộn 4 tiếng, các tính chất của BE chưa có sự khác biệt rõ ràng so với mẫu đối chứng (BE0), nên việc sử dụng BE làm chất kết dính cho BTN sẽ không gặp khó khăn gì trong quá trình sản xuất và thi công.
- Chỉ với điều kiện bảo dưỡng ở nhiệt độ không khí khoảng 25⁰C, thì sau 7 ngày, nhiệt độ hóa mềm và độ kim lún của BE đã có giá trị tương tự như mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ 60⁰C trong 4 ngày. Như vậy việc bảo dưỡng mặt đường BTN có sử dụng chất kết dính BE là khả thi để có thể đạt được các chỉ tiêu mong muốn trong việc cải thiện nhiệt độ hóa mềm, một chỉ tiêu quan trọng ảnh hưởng đến khả năng kháng biến dạng không hồi phục của hỗn hợp BTN khi dùng chất dính kết BE.
- Việc giảm độ kim lún trong thời gian khai thác đến khoảng 20÷25 (1/10mm) là nguy cơ đối với việc nứt do hóa cứng của bitum. Nghiên cứu về ảnh hưởng của việc tăng độ cứng của bitum đến khả năng kháng nứt với thí nghiệm mỏi cho BTN sử dụng chất dính kết BE là cần thiết.
- BE15, BE35 và BE50 có cấp đặc tính khai thác dựa vào giá trị $|G^*|/\sin\delta$ của mẫu nguyên gốc và mẫu sau RTFO lần lượt là PG64, PG76, PG82.

CHƯƠNG 3.

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC CHỈ TIÊU CƠ LÝ CỦA BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG CHẤT KẾT DÍNH BITUM-EPOXY

Từ kết quả nghiên cứu các chỉ tiêu kỹ thuật của bitum-epoxy ở Chương 2, Chương 3 tiến hành nghiên cứu đề xuất phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp của bê tông nhựa sử dụng chất kết dính bitum-epoxy (gọi là bê tông nhựa epoxy – BTNE), các chỉ tiêu kỹ thuật của BTNE. Nghiên cứu các đặc tính kỹ thuật ưu việt của BTNE phục vụ đánh giá chất lượng vật liệu, phân tích kết cấu mặt đường sử dụng BTNE ở Việt Nam. Trong đó, ngoài các chỉ tiêu cơ lý thông dụng (độ ổn định, độ dẻo Marshall, mô đun đàn hồi tĩnh, cường độ kéo uốn...), các chỉ tiêu mang tính chất nghiên cứu (tuổi thọ mỏi, mô đun đàn hồi động...) của BTNE cũng được phân tích đánh giá.

3.1. Thiết kế thành phần hỗn hợp BTNE và BTN đối chứng

Mặc dù phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave với những ưu việt như: Phương pháp đầm nén tạo mẫu mô phỏng được tương tự như quá trình đầm nén ở hiện trường; thiết kế hỗn hợp ở nhiệt độ và tải trọng giao thông khác nhau...[10] nhưng ở Việt Nam nó vẫn chưa được sử dụng phổ biến do không có đầy đủ thiết bị thí nghiệm.

Phương pháp Marshall [5][12][10] cho phép xác định hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với một cấp phối cốt liệu thiết kế trên cơ sở kiểm soát các chỉ tiêu thể tích (độ rỗng dư V_a , độ rỗng cốt liệu VMA và độ rỗng lấp đầy nhựa VFA) và các tính chất cơ học của hỗn hợp (độ ổn định và độ dẻo) nằm trong giới hạn quy định. Đây là phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN được sử dụng phổ biến hiện nay. Do vậy, trong nghiên cứu này, phương pháp Marshall cũng được lựa chọn cho thiết kế hỗn hợp BTN.

3.1.1. Luận chứng lựa chọn loại BE cho BTNE và chất kết dính cho BTN đối chứng trong nghiên cứu

3.1.1.1. Lựa chọn loại BE dùng cho BTNE

Với những kết luận đã rút ra được trong Chương 2, trong chương này chỉ tiến hành thử nghiệm hỗn hợp BTNE với hai loại BE là BE35 và BE50. Một số chỉ tiêu cơ lý cơ bản của hai loại BE này được tổng hợp lại trong **Bảng 3-1**

Bảng 3-1. Các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của BE35 và BE50

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Loại chất kết dính		Phương pháp thử nghiệm
			BE35	BE50	
1	Độ kim lún ở 25 ⁰ C, 0,1mm, 5s	1/10 mm	56,23	55,37	TCVN 7495:2005
2	Nhiệt độ hóa mềm	⁰ C	54,75	63,20	TCVN 7497:2005
3	Điểm chớp cháy (⁰ C)	⁰ C	270	292	TCVN 7498:2005
4	Độ dính bám với đá	Cấp	4	4	TCVN 7504:2005
5	Lượng tổn thất khối lượng sau khi gia nhiệt 5 giờ ở 163 ⁰ C (%)	%	0,288	0,298	TCVN 7499:2005
6	Khối lượng riêng	(g/cm ³)	1,0336	1,0333	TCVN 7501:2005
7	Độ nhớt ở 135 ⁰ C (nhớt kế Brookfield)	(Pa.s)	1,52	2,589	22 TCN 319-04
8	Độ đàn hồi ở 25 ⁰ C (%)	(%)	78,7	73,2	22 TCN 319-04

Ghi chú: Các chỉ tiêu của BE trong Bảng 3-1 được xác định ở trạng thái bảo dưỡng 2 giờ ở nhiệt độ phòng sau khi trộn epoxy với bitum.

3.1.1.2. Lựa chọn chất kết dính cho BTN đối chứng

Ở Việt Nam, bitum cải tiến polime nhiệt dẻo đã được nghiên cứu và đưa vào ứng dụng nhiều năm. Thực tế sử dụng đã chứng minh được những hiệu quả đáng kể trong việc cải thiện chất lượng hỗn hợp BTN so với sử dụng bitum truyền thống. Cụ thể, độ ổn định marshall tăng lên từ 1,2 đến 1,3 lần; độ lún trong thí nghiệm hần lún giảm đi 4 lần; mức độ chống lại sự biến dạng cũng ít nhạy cảm đáng kể đối với sự thay đổi nhiệt độ. Bộ Giao thông Vận tải cũng đã ban hành tiêu chuẩn ngành 22TCN 319-04 về yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử nghiệm cho loại bitum cải tiến này. Trong tiêu chuẩn này bitum cải tiến polime nhiệt dẻo được phân thành 3 loại, kí hiệu PMB-I, PMB-II và PMB-III với 11 chỉ tiêu kĩ thuật [1]. PMB-III với yêu cầu kĩ thuật cao nhất trong 3 loại, được sử dụng làm chất kết dính cho hỗn hợp BTN dùng làm lớp mặt cho hầu hết các tuyến đường cao tốc, đường cấp cao được xây dựng trong những năm gần đây ở Việt Nam như Quốc lộ 5 mới (đường cao tốc Hà Nội – Hải Phòng), Quốc lộ 1, đường cao tốc Bắc Giang - Lạng Sơn, đường cao tốc Hạ Long – Vân Đồn,... Chất kết dính PMB-III có sẵn trên thị trường Việt Nam bởi nhiều nhà cung cấp khác nhau với tiêu chuẩn kĩ thuật cao hơn hẳn mà giá thành lại không đắt hơn nhiều so với PMB-I, PMB-II. Đây cũng là một trong những lý do PMB-III được sử dụng phổ biến hơn hẳn 2 loại PMB-I, PMB-II.

Với những phân tích trên, PMB-III được lựa chọn làm chất kết dính cho hỗn hợp BTN đối chứng trong nghiên cứu (BTNP). PMB-III sử dụng trong nghiên cứu

được cung cấp bởi cùng nhà phân phối bitum 60/70 - Công ty TNHH nhựa đường Petrolimex Việt Nam. Các chỉ tiêu cơ bản của PMB-III được tiến hành thí nghiệm tại Phòng thí nghiệm LASXD 1256 - Trung tâm Khoa học Công nghệ - Đại học Giao thông Vận tải theo đúng các tiêu chuẩn thí nghiệm bitum hiện hành của Việt Nam. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ bản của PMB-III sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện trong **Bảng 3-2**.

Bảng 3-2. Các chỉ tiêu cơ bản của PMB-III

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	PMB III	Phương pháp thử nghiệm
1	Độ kim lún ở 25 ⁰ C, 0,1mm, 5s	1/10 mm	47,3	TCVN 7495:2005
2	Nhiệt độ hóa mềm	⁰ C	81,7	TCVN 7497:2005
3	Điểm chớp cháy (⁰ C)	⁰ C	236	TCVN 7498:2005
4	Độ dính bám với đá	Cấp	4	TCVN 7504:2005
5	Lượng tổn thất khối lượng sau khi gia nhiệt 5 giờ ở 163 ⁰ C (%)	%	0,308	TCVN 7499:2005
6	Khối lượng riêng	(g/cm ³)	1,04	TCVN 7501:2005
7	Độ nhớt ở 135 ⁰ C (nhớt kế Brookfield)	(Pa.s)	2,618	22 TCN 319-04
8	Độ đàn hồi ở 25 ⁰ C (%)	(%)	86,1	22 TCN 319-04

Các chỉ tiêu cơ bản của PMB III sử dụng trong nghiên cứu đều thỏa mãn 22TCN 319-04 Tiêu chuẩn vật liệu nhựa đường polime.

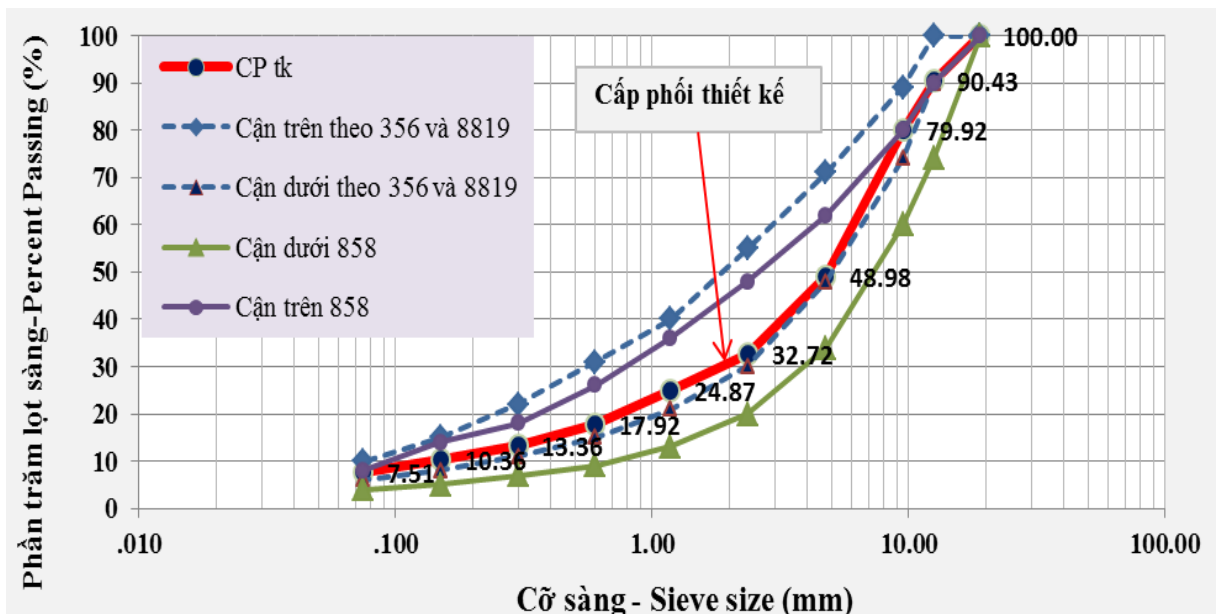
3.1.2. *Lựa chọn cốt liệu và bột khoáng sử dụng trong nghiên cứu*

Để tối ưu hóa hiệu quả của bitum cải tiến người ta thường sử dụng chúng kết hợp với các cốt liệu có chất lượng cao nên đá, cát được lấy tại mỏ đá Sunway, xã Phú Lãm, huyện Quốc Oai, Hà Nội là một trong những mỏ đá có chất lượng cao ở các tỉnh phía Bắc. Đá của mỏ Sunway thuộc loại đá Bazan (một loại trong nhóm đá Mácma). Bột khoáng được cung cấp bởi Xí nghiệp tư nhân Hồng Lạc, Hải Dương. Các chỉ tiêu cơ bản của các loại cốt liệu sử dụng được thể hiện ở **Bảng 3-3** cho thấy đá, cát, bột khoáng sử dụng trong nghiên cứu thỏa mãn yêu cầu theo 22 TCN 356-06 "Quy trình công nghệ thi công và nghiệm thu mặt đường bê tông nhựa sử dụng nhựa đường polime".

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

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị				Bột khoáng	Phương pháp thử nghiệm
			Đá 0x5 (mm)	Đá 5x10 (mm)	Đá 10x20 (mm)	Đá 2,36x12,5 (mm)		
1	Cường độ nén của đá gốc trạng thái khô	MPa	135,6				103,7	TCVN 7572-10:2006
2	Cường độ nén của đá gốc trạng thái bão hòa	MPa	126,5				95,3	TCVN 7572-10:2006
3	Độ mài mòn LA	%		20,8	18,9			TCVN 7572:2006
4	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,73	2,74	2,73	2,73	2,713	TCVN 7572:2006
5	Hàm lượng hạt toai dẹt	%	1,3	4,1	3,1	3,2		TCVN 7572:2006
6	Hàm lượng bụi bùn sét	%	0,42	0,28	0,29	0,37		TCVN 7572:2006

Trong nghiên cứu này, chỉ tập trung nghiên cứu một loại BTN là bê tông nhựa chặt có đường kính hạt lớn nhất danh định 12,5mm (BTNC 12,5) (loại được sử dụng phổ biến để làm lớp trên cùng trong kết cấu mặt đường mềm ở Việt Nam) với 01 tỷ lệ phối trộn của các nhóm cốt liệu cho cả 3 loại chất kết dính BE35, BE50 và PMB III. Đường cong cấp phối của hỗn hợp sau khi phối trộn sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện trong **Hình3-1**.



Hình3-1: Đường cong cấp phối của hỗn hợp

3.1.3. Xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu cho hỗn hợp BTNE và BTNP bằng phương pháp Marshall

3.1.3.1. Lập kế hoạch thực nghiệm

Với cấp phối thiết kế và 3 loại chất kết dính đã lựa chọn, tiến hành xác định hàm lượng nhựa tối ưu của các hỗn hợp theo phương pháp Marshall. Số lượng các mẫu thí nghiệm cho từng tổ hợp cấp phối cốt liệu và chất kết dính được thể hiện ở **Bảng 3-4**. Khoảng hàm lượng nhựa thử nghiệm được căn cứ vào hàm lượng nhựa tối ưu thường thấy trong các nghiên cứu cũng như thực tế sử dụng trong nước và trên thế giới tương ứng với từng loại nhựa, đồng thời dựa vào kết quả của thí nghiệm thăm dò.

Bảng 3-4. Số lượng mẫu thí nghiệm xác định hàm lượng nhựa tối ưu

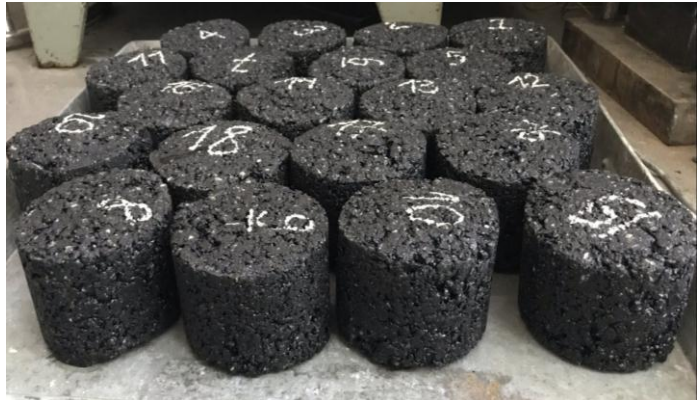
STT	Hàm lượng nhựa (%)	Số lượng mẫu thử nghiệm		
		BE35	BE50	PMB III
1	4,0			3
2	4,5	3		3
3	5,0	3	3	3
4	5,5	3	3	3
5	6,0	3	3	3
6	6,5	3	3	
7	7,0	3	3	
8	7,5		3	
Tổng số mẫu		18	18	15

3.1.3.2. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu theo phương pháp Marshall

- Thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu và nhựa đường.
- Phối trộn các cốt liệu theo cấp phối thiết kế.
- Chuẩn bị mẫu hỗn hợp cốt liệu để đúc các mẫu Marshall. Khối lượng 1 mẫu thí nghiệm khoảng 1200g.
- Chuẩn bị chất kết dính BE như mục 2.1.3.2.
- Trộn cốt liệu với chất kết dính đã chuẩn bị, sau đó đầm mẫu Marshall. Chiều cao mẫu sau khi đầm trong khuôn phải nằm trong khoảng quy định $63,5\text{mm} \pm 1,3\text{mm}$.
- Thí nghiệm và tính toán các chỉ tiêu thể tích của hỗn hợp BTN.
- Thí nghiệm xác định độ ổn định và độ dẻo trên các mẫu Marshall (xem **Hình3-2**) theo các hướng dẫn trong TCVN 8860-1:2011. Kết quả thí nghiệm độ

ổn định Marshall được hiệu chỉnh bằng cách nhân với hệ số hiệu chỉnh theo Bảng 1 của tiêu chuẩn này.

- Lựa chọn hàm lượng nhựa tối ưu: Trước tiên vẽ các đồ thị quan hệ giữa hàm lượng nhựa và các chỉ tiêu liên quan như độ ổn định, độ dẻo, độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ rỗng lấp đầy nhựa, khối lượng thể tích của mẫu BTN. Sau đó, căn cứ vào yêu cầu kỹ thuật đối với hỗn hợp, xác định khoảng hàm lượng nhựa tối ưu thỏa mãn các chỉ tiêu kỹ thuật từ 2 – 7 ở **Bảng 3-5** (Chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu đối với BTNP được sử dụng để làm mới, sửa chữa, nâng cấp mặt đường ô tô (đường có lưu lượng xe tải nặng lớn, đường có độ dốc lớn), đường phố (đường có ý nghĩa quan trọng, hạn chế duy tu sửa chữa), đường sân bay (đường cất hạ cánh, đường lăn, sân đỗ), trạm thu phí, bến bãi, quảng trường).



a. Máy nén Marshall cung lực 100kN

b. Mẫu sau nén Marshall

Hình3-2: Thí nghiệm Marshall

Bảng 3-5. Chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu đối với bê tông nhựa polime (Theo 22TCN356 -06) [4]

STT	Chỉ tiêu	Quy định	Phương pháp thử
1	Số chảy đầm	75 x 2	
2	Độ ổn định ở 60 ⁰ C, 60 phút, KN	≥12	AASHTO T245-97(2001) TCVN 8860-1:2011
3	Độ dẻo, mm	3 ÷ 4	
4	Độ ổn định còn lại, %	≥ 85	AASHTO T245-97(2001) TCVN 8860-12:2011
5	Độ rỗng dư, %	3 ÷ 6	AASHTO T245-97(2001) TCVN 8860-9:2011
6	Độ rỗng cốt liệu (tương ứng với độ rỗng dư 4%), %	≥ 14	AASHTO T245-97(2001) TCVN 8860-10:2011
7	Độ rỗng lấp đầy nhựa, %	55 ÷ 70	

3.1.3.3. *Kết quả xác định hàm lượng nhựa tối ưu*

Kết quả thí nghiệm xác định khoảng hàm lượng nhựa tối ưu cho 3 loại chất kết dính khác nhau được thể hiện ở **Bảng 3-6**. Kết quả chi tiết thí nghiệm Marshall được thể hiện trong phụ lục 4.

Bảng 3-6. Khoảng hàm lượng nhựa tối ưu của các hỗn hợp BTN

TT	Loại chất kết dính	Kí hiệu loại hỗn hợp BTN	Hàm lượng nhựa tối ưu (% theo khối lượng hỗn hợp)
1	BE35	BTNE35	5,55 ÷ 6,10
2	BE50	BTNE50	5,35 ÷ 6,20
3	PMB III	BTNP	4,80 ÷ 5,30

Chọn giá trị hàm lượng nhựa tối ưu thiết kế cho các hỗn hợp BTNE và BTNP tương ứng với độ rỗng dư $V_a = 4,5\% \div 5\%$ (là khoảng giá trị được khuyến nghị trong quyết định 858/QĐ – BGTVT) [6]. Kết quả hàm lượng nhựa tối ưu thiết kế lựa chọn của BTNP là 5,2%, BTNE35 và BTNE50 chọn cùng một hàm lượng là 6,0% theo khối lượng hỗn hợp. Hàm lượng nhựa này được sử dụng cho tất cả các thử nghiệm trong nghiên cứu.

3.2. Lựa chọn chỉ tiêu trong nghiên cứu và công tác chế tạo mẫu

3.2.1. *Lựa chọn chỉ tiêu cơ học của BTN trong nghiên cứu thực nghiệm*

Các chỉ tiêu đánh giá hỗn hợp BTN trong nghiên cứu được đề xuất dựa trên các đặc tính của hỗn hợp BTN, các yêu cầu về hỗn hợp BTN polime theo 22 TCN 356-06 gồm các chỉ tiêu sau:

- Độ ổn định, độ dẻo Marshall
- Độ ổn định còn lại
- Chiều sâu vết lún bánh xe

Nhằm cung cấp thông số đầu vào của vật liệu BTNE phục vụ bài toán thiết kế kết cấu áo đường mềm theo 22 TCN 211-06 và phương pháp cơ học – thực nghiệm các chỉ tiêu sau cũng được nghiên cứu:

- Mô đun đàn hồi tĩnh của BTN ở các nhiệt độ 15⁰C, 30⁰C, 60⁰C
- Cường độ kéo uốn của BTN ở 15⁰C
- Mô đun động của BTN ở 6 nhiệt độ trong phạm vi từ 10⁰C - 60⁰C và tần số từ 0,1 Hz – 10 Hz.

Để nghiên cứu sâu hơn về đặc tính cũng như để đánh giá hiệu quả khi sử dụng BTNE, đặc tính môi của BTNE và vật liệu đối chứng cũng sẽ được thực hiện trong khuôn khổ luận án.

3.2.2. *Chế tạo mẫu thí nghiệm*

Công tác chế tạo mẫu BTNE trong các thí nghiệm được thực hiện theo các bước sau:

- Bước 1: Chế tạo BE theo trình tự trong mục 2.1.3.2.
- Bước 2: Chế tạo hỗn hợp BTNE
 - BE sau khi được chế tạo ở Bước 1 sẽ được cho ngay vào tủ sấy để đưa lên nhiệt độ 140⁰C.
 - Cốt liệu được sấy lên đến nhiệt độ 170⁰C
 - Bột đá để ở dạng nguội
 - Trộn chất kết dính BE, cốt liệu và bột đá như hỗn hợp BTN thông thường.
- Bước 3: Chế tạo các mẫu BTNE bằng thiết bị đầm xoay hoặc đầm lăn. Mẫu BTNE sau chế bị được bảo dưỡng ở nhiệt độ 25⁰C trong 168h (7 ngày). Sau đó tiến hành thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý theo đúng quy trình thí nghiệm hiện hành tương ứng.

Như vậy có thể thấy quy trình chế tạo mẫu hỗn hợp BTNE cho các thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý của BTN tương tự như hỗn hợp BTN thông thường, chỉ khác ở phần chế tạo chất kết dính BE.

3.3. **Độ ổn định, độ dẻo Marshall và độ ổn định còn lại của BTN**

Độ ổn định và độ dẻo Marshall của mẫu BTN đã đầm nén là hai chỉ tiêu cơ học chính dùng trong phương pháp thiết kế Marshall.

3.3.1. *Kế hoạch thí nghiệm Marshall*

Sau khi xác định khoảng hàm lượng nhựa tối ưu cho cấp phối thiết kế với các loại chất kết dính khác nhau, chọn giá trị hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với từng loại chất kết dính để chế tạo các tổ mẫu Marshall. Tiến hành thí nghiệm nén Marshall xác định độ ổn định và độ dẻo của các tổ mẫu này trong 2 điều kiện thí nghiệm là ngâm mẫu ở 60⁰C trong 1h và 24h. Trong nghiên cứu này, NCS tiến hành thử nghiệm theo tiêu chuẩn AASHTO T245-97(2008). Số lượng thí nghiệm Marshall được thể hiện trong **Bảng 3-7**

Bảng 3-7. Số lượng mẫu thí nghiệm Marshall với hàm lượng nhựa đã chọn

STT	Chỉ tiêu	Loại BTN			Tổng số mẫu
		BTNE35	BTNE50	BTNP	
1	Các chỉ tiêu thể tích	3	3	3	9
2	Độ ổn định và độ dẻo Marshall sau ngâm nước 60 ⁰ C trong 1h				
3	Độ ổn định và độ dẻo Marshall sau ngâm nước 60 ⁰ C trong 24h	3	3	3	9

Độ ổn định còn lại (R) của mẫu BTN được tính theo công thức (3-1).

$$R = \frac{S_a}{S} \cdot 100 \quad (3-1)$$

Trong đó:

S - độ ổn định Marshall của mẫu BTN khi ngâm mẫu trong bể ổn nhiệt ở 60°C trong 1 h, xác định theo AASHTO T245-97(2008).

S_a - độ ổn định Marshall của mẫu BTN khi ngâm mẫu trong bể ổn nhiệt ở 60°C trong 24 h, xác định theo AASHTO T245-97(2008).

3.3.2. Kết quả thí nghiệm Marshall và phân tích

Phân tích độ chụm của kết quả thí nghiệm Marshall gồm độ ổn định và độ dẻo Marshall theo tiêu chuẩn ASTM D6927-15, cho thấy kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm và được minh họa một số giá trị như Bảng 3.1 và trong phụ lục 4.

Bảng 3-8. Đánh giá độ chụm độ ổn định Marshall của mẫu ngâm 60°C trong 1h

TT	Chỉ tiêu	Mẫu	BTNP (5,2% PMB3)	BTNE 35 (6% BE35)	BTNE 50 (6% BE50)
1	Độ ổn định Marshall ở 60°C, 1 giờ, kN	1	14,77	35,41	53,14
		2	15,60	32,91	51,93
		3	16,32	33,26	50,08
		TB	15,56	33,86	51,72
2	Khoảng chênh lệch R: max-min	kN	1,55	2,50	3,06
3	Hệ số biến sai cho phép Cv	%	6	6	6
4	Khoảng chấp nhận cho phép so với giá trị trung bình: 3.3xCv	%	19,8	19,8	19,8
5	Giá trị độ lệch cho phép	kN	3,08	6,70	10,24
6	Đánh giá: So sánh (2) và (5)	-	Đạt	Đạt	Đạt

Tổng hợp kết quả được thể hiện trong **Bảng 3-9** và **Hình 3-3**, **Hình 3-5**, **Hình 3-6**

Bảng 3-9. Kết quả xác định độ ổn định còn lại của BTN

Loại BTN	Độ ổn định trung bình mẫu ngâm 60°C, 1 giờ	Độ dẻo trung bình mẫu ngâm 60°C, 1 giờ	Độ ổn định trung bình mẫu ngâm 60°C, 24 giờ	Độ dẻo trung bình mẫu ngâm 60°C, 24 giờ	Độ ổn định còn lại (%)	Độ ổn định còn lại min theo 22 TCN 356-06 (%)
BTNP	15,56	3,59	13,96	5,76	89,68	85
BTNE35	33,86	4,05	29,08	5,58	85,87	
BTNE50	51,72	3,89	46,33	5,53	89,57	

Thực hiện phân tích thống kê với các biến đầu vào 2 biến, số mẫu 3 mẫu/tổ

- Loại BTN: có 3 loại là BTNP; BTNE35; BTNE50
- Thời gian ngâm mẫu trong nước 60⁰C: có 2 là 1h; 24h

Hàm phân tích đầu ra là: Độ ổn định Marshall (S) và Độ dẻo Marshall (F)

Tổng số kết quả thí nghiệm 3 x 2 x 3 = 18 kết quả.

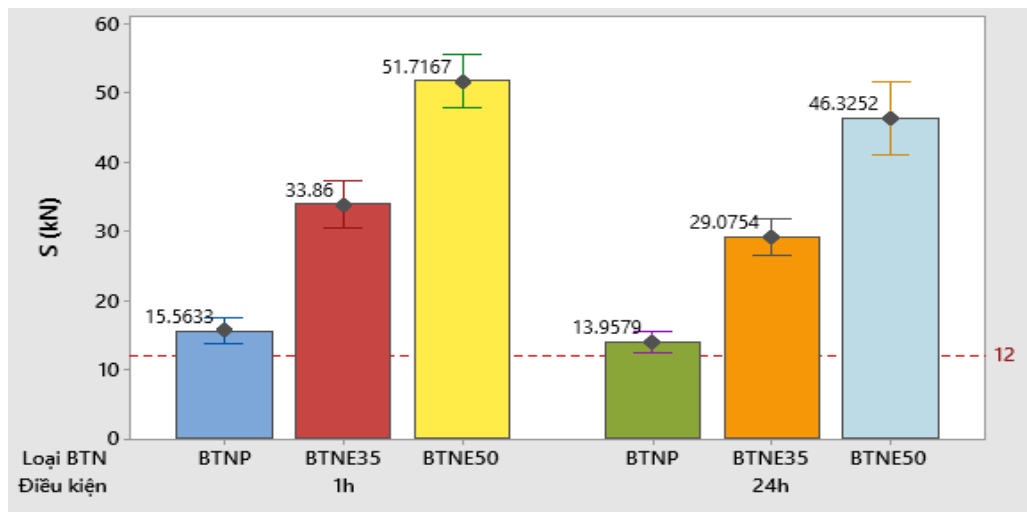
Kết quả phân tích phương sai độ ổn định Marshall

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	3591,42	1197,14	494,71	0,000
Linear	3	3591,42	1197,14	494,71	0,000
Loại BTN	2	3522,02	1761,01	727,73	0,000
Điều kiện	1	69,40	69,40	28,68	0,000
Error	14	33,88	2,42		
Lack-of-Fit	2	12,41	6,20	3,47	0,065
Pure Error	12	21,47	1,79		
Total	17	3625,30			

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,55559	99,07%	98,87%	98,46%

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy: Các biến đều có hệ số p-value << 0,05; Hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc}=98,87\%$. Như vậy kết quả thực nghiệm các yếu tố đầu vào và tích tương tác của chúng đều ảnh hưởng đến độ ổn định Marshall (S) có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao.



Hình 3-3. Độ ổn định Marshall của BTN

Biểu đồ **Hình 3-3** cho thấy có sự khác biệt rõ rệt về độ ổn định Marshall của các hỗn hợp khi sử dụng 3 loại chất kết dính khác nhau. Với độ tin cậy 95%, sự sai khác này được chỉ ra là có ý nghĩa thống kê. Cụ thể, độ bền Marshall ở trạng thái ngâm 60⁰C trong 1h của hỗn hợp sử dụng chất kết dính BE50 (BTNE50) đạt tới giá trị trung bình là 51,72 kN, bằng 3,328 lần giá trị của hỗn hợp sử dụng

chất kết dính PMB III (BTNP) đạt được (15,56 kN) và xấp xỉ bằng 1,53 lần giá trị của hỗn hợp sử dụng chất kết dính BE35 (BTNE35) đạt được (33,86 kN). Độ bền Marshall ở trạng thái ngâm 60⁰C trong 24h của hỗn hợp sử dụng chất kết dính BE50 đạt tới giá trị trung bình là 46,33 kN, bằng 3,319 lần giá trị của hỗn hợp sử dụng chất kết dính PMB III đạt được là 13,96 kN và xấp xỉ bằng 1,59 lần giá trị của hỗn hợp sử dụng chất kết dính BE35 đạt được (29,08 kN) trong cùng trạng thái thử nghiệm. Giá trị trung bình độ bền Marshall của hỗn hợp BTNE35 đạt được bằng 2,18 và 2,08 lần giá trị của hỗn hợp BTNP đạt được tương ứng với 2 trạng thái ngâm 60⁰C trong 1h và ngâm 60⁰C trong 24h.

Kết quả phân tích phương sai ANOVA độ dẻo Marshall

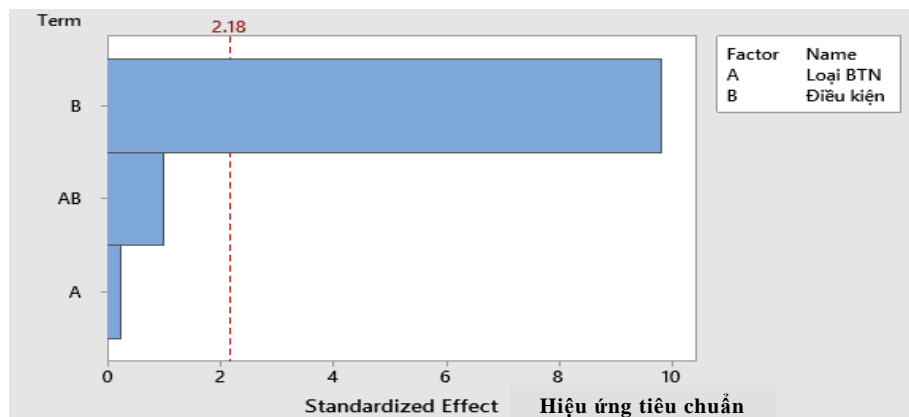
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	14,6819	2,9364	19,89	0,000
Linear	3	14,3299	4,7766	32,36	0,000
Loại BTN	2	0,0616	0,0308	0,21	0,815
Điều kiện	1	14,2683	14,2683	96,66	0,000
2-Way Interactions	2	0,3520	0,1760	1,19	0,337
Loại BTN*Điều kiện	2	0,3520	0,1760	1,19	0,337
Sai số	12	1,7713	0,1476		
Tổng	17	16,4532			

Kết quả

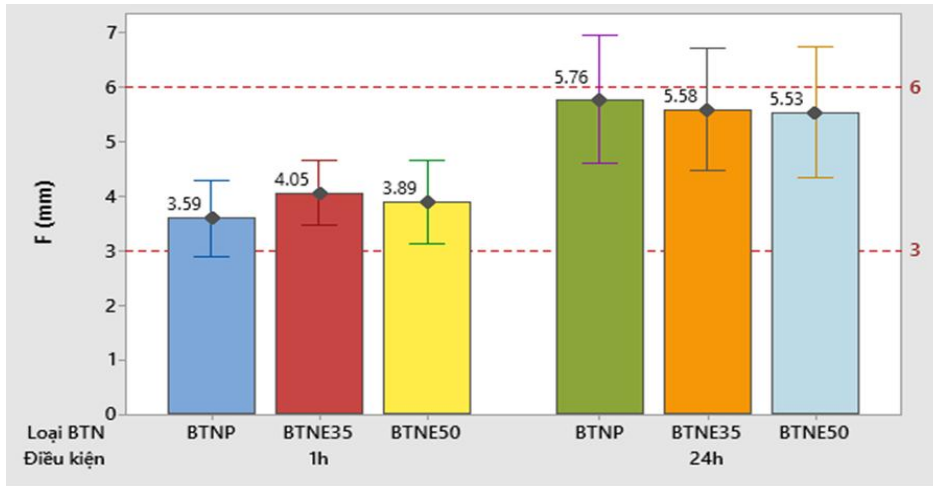
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,384198	89,23%	84,75%	75,78%

Kết quả phân tích ANOVA độ dẻo Marshall cho thấy: Chỉ có biến điều kiện (thời gian ngâm mẫu) có hệ số p-value << 0,05; Biến loại BTN có hệ số p-value bằng 0,815 lớn >> 0,05. Biểu đồ Pareto ở **Hình 3-4**, đường thẳng đứng chỉ cắt qua hàng điều kiện, thể hiện chỉ biến điều kiện có ảnh hưởng đến F có ý nghĩa thống kê. Như vậy có thể kết luận:

- Thời gian ngâm mẫu ảnh hưởng đến độ dẻo Marshall (F) có ý nghĩa thống kê;
- Loại BTN không ảnh hưởng đến F hay nói cách khác là BTNE có độ dẻo Marshall (F) tương tự như BTNP. Đây là ưu điểm của BTNE, độ ổn định Marshall cao còn độ dẻo vẫn trong giới hạn cho phép.

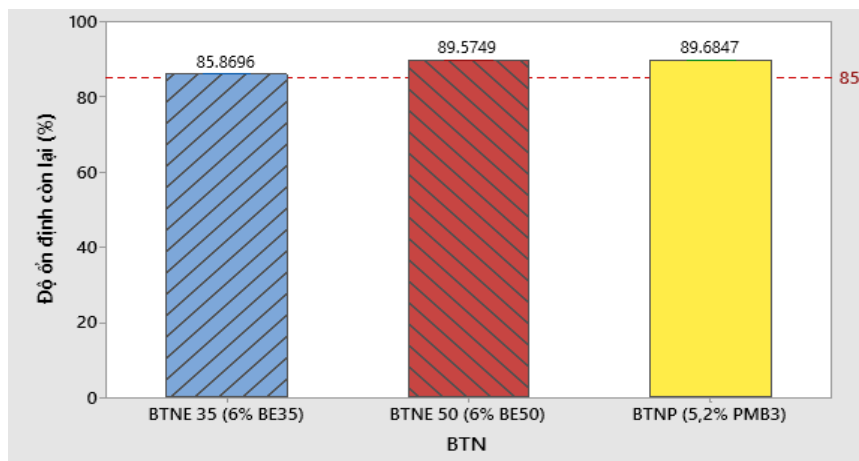


Hình 3-4. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng đến độ dẻo Marshall (F)



Hình 3-5. Độ dẻo Marshall của BTN

Biểu đồ **Hình 3-5** cho thấy độ dẻo Marshall của các hỗn hợp đều thỏa mãn yêu cầu đối với hỗn hợp bê tông nhựa polime trong **Bảng 3-5** là nằm trong khoảng từ 3mm – 6mm. Ở trạng thái ngâm 60⁰C trong 1h, hỗn hợp BTNP có giá trị trung bình của độ dẻo là nhỏ nhất; ở trạng thái ngâm 60⁰C trong 24h, hỗn hợp BTNP có giá trị trung bình của độ dẻo là lớn nhất trong 3 loại hỗn hợp nhưng với độ tin cậy 95% thì sự khác biệt này không có ý nghĩa thống kê.



Hình 3-6. Độ ổn định còn lại của các hỗn hợp

Kết quả trong **Bảng 3-9** và biểu đồ **Hình 3-6** chỉ ra rằng các loại BTN trong nghiên cứu đều có độ ổn định còn lại trung bình lớn hơn 85%, thỏa mãn yêu cầu đối với hỗn hợp BTN polime trong **Bảng 3-5**. Mặc dù hỗn hợp BTNE50 có độ ổn định Marshall cao gấp hơn 3 lần so với hỗn hợp BTNP nhưng độ ổn định còn lại của hai hỗn hợp này lại tương đương nhau. Hỗn hợp BTNE35 có độ ổn định Marshall cao gấp hơn 2 lần so với hỗn hợp BTNP nhưng độ ổn định còn lại của nó lại thấp hơn hỗn hợp BTNP tới 3,8%.

BE với thành phần nhiệt rắn epoxy rõ ràng đã đóng vai trò quan trọng trong việc

hình thành tính rắn và cải thiện độ ổn định Marshall của BTNE. Thành phần bitum duy trì tính dẻo của hỗn hợp thể hiện qua độ chảy dẻo Marshall không khác nhiều so với BTNP.

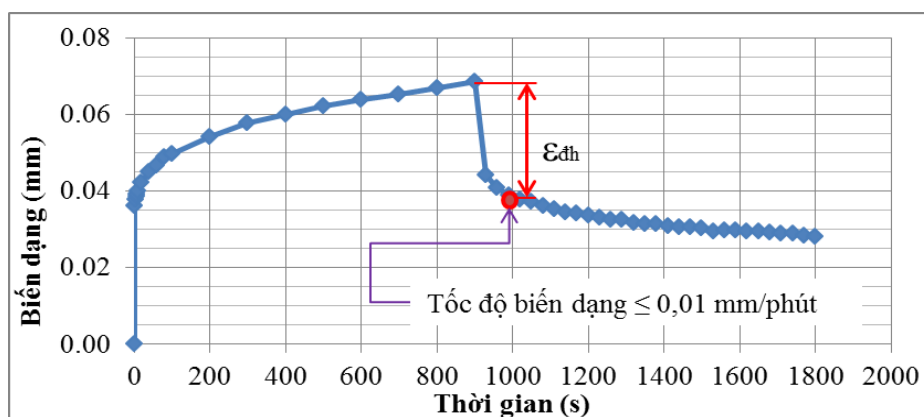
3.4. Mô đun đàn hồi tĩnh của BTNE

Mô đun đàn hồi tĩnh là một trong các chỉ tiêu quan trọng sử dụng trong thiết kế KCMĐ mềm theo 22 TCN 211-06. Vì vậy, thực nghiệm trong phòng xác định mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sẽ cung cấp thông số cho thiết kế KCMĐ. Hơn nữa, cũng có thể sử dụng chỉ tiêu này để so sánh, đánh giá ưu điểm của BTNE so với BTNP khi ứng dụng trong KCMĐ mềm.

3.4.1. Phương pháp thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Mô đun đàn hồi tĩnh được thí nghiệm theo Phụ lục C, 22TCN211-06 [2]: Mô đun đàn hồi tĩnh được thực hiện bằng cách nén các mẫu trụ tròn trong điều kiện cho nở hông tự do. Mẫu xác định mô đun đàn hồi tĩnh là mẫu hình trụ có (đường kính x chiều cao) bằng (100mm x 100mm) được chế bị bằng máy đầm xoay. Mẫu sau khi chế bị được bảo dưỡng 7 ngày ở nhiệt độ phòng 25⁰C. Trước khi thử nghiệm, mẫu sẽ được đặt trong buồng bảo ôn có nhiệt độ bằng nhiệt độ thử nghiệm ít nhất trong 2h.

Để thực hiện thí nghiệm này, sử dụng thiết bị Cooper với buồng ổn nhiệt để duy trì nhiệt độ thí nghiệm. Tác dụng tải trọng với áp lực 500 KPa được duy trì trong thời gian 15 phút để đảm bảo cho biến dạng lún của mẫu ổn định với tốc độ biến dạng không vượt quá 0,01 mm/ phút. Sau đó dỡ tải và chờ biến dạng phục hồi trong 15 phút. Toàn bộ biến dạng theo thời gian tác dụng và dỡ tải được ghi lại bằng phần mềm chuyên dụng. Từ đó vẽ biểu đồ quan hệ giữa biến dạng và thời gian như ở **Hình 3-7** để xác định biến dạng đàn hồi của mẫu thí nghiệm.



Hình 3-7. Biến dạng của mẫu thí nghiệm theo thời gian gia tải và dỡ tải

Mô đun đàn hồi tĩnh của vật liệu được tính theo trị số biến dạng đàn hồi ΔH đo được khi thí nghiệm nén tương ứng với áp lực p (MPa) với công thức sau:

$$E_{dh} = \frac{p \cdot H}{\Delta H} \quad (3-2)$$

Trong đó:

H - chiều cao mẫu;

ΔH – biến dạng đàn hồi;

P – lực tác dụng lên bàn nén (kN);

p – áp lực tác dụng lên mẫu (MPa), $p = \frac{4P}{\pi D^2}$.

D - đường kính mẫu (đường kính bàn nén);

3.4.2. Kế hoạch thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Mô đun tĩnh của BTN được xác định ở 3 trạng thái nhiệt độ 15⁰C, 30⁰C và 60⁰C, tương ứng với 3 nhiệt độ khi kiểm toán kết cấu áo đường ở 3 trạng thái theo 22TCN211-06. Số lượng mẫu thí nghiệm trong phòng xác định mô đun đàn hồi tĩnh thể hiện ở **Bảng 3-10**

Bảng 3-10. Số lượng thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh của BTN

Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính, %	Số mẫu thí nghiệm ở nhiệt độ			Số thí nghiệm
		15 ⁰ C	30 ⁰ C	60 ⁰ C	
BTNP	5,2	3	3	3	9
BTNE35	6,0	6	6	6	18
BTNE50	6,0	6	6	6	18
Tổng số thí nghiệm cần thực hiện:					45

3.4.3. Kết quả mô đun đàn hồi tĩnh của BTN và phân tích

Kết quả thử nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh của 3 loại BTN ở 3 trạng thái nhiệt độ 15, 30 và 60⁰C được thể hiện trong phụ lục 5, **Bảng 3-11** và **Hình 3-9**.



Hình 3-8. Thiết bị Cooper và mẫu BTN trong thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Bảng 3-11. Tổng hợp kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

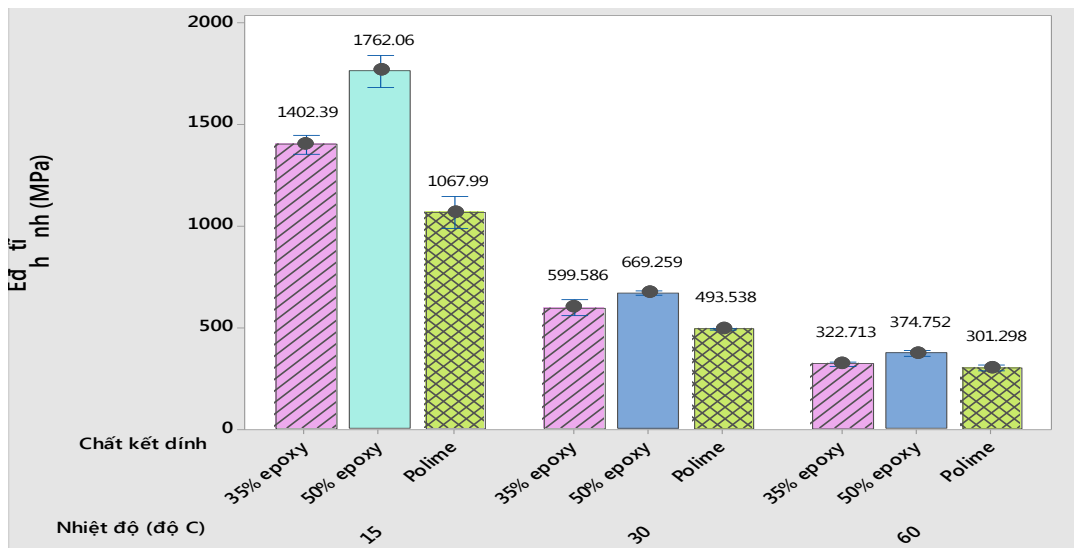
Loại BTN	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Mô đun đàn hồi tĩnh (Mpa)							Độ lệch chuẩn (Mpa)	
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	Trung bình		
BTNP	15	1 092,7	1 032,1	1 079,2					1 068,0	31,8
BTNE35	15	1 416,8	1 413,0	1 387,4	1 357,2	1 361,4	1 478,6		1 402,4	44,9
BTNE50	15	1 773,4	1 755,5	1 670,7	1 809,0	1 870,3	1 693,6		1 762,1	73,7
BTNP	30	494,0	492,9	493,7					493,5	0,6
BTNE35	30	638,8	548,1	584,1	582,1	606,4	638,1		599,6	35,4
BTNE50	30	681,0	651,5	664,3	674,1	674,3	670,4		669,3	10,3
BTNP	60	295,9	308,0	300,1					301,3	6,1
BTNE35	60	333,6	324,7	330,8	302,9	316,1	328,2		322,7	11,4
BTNE50	60	379,7	372,4	388,7	392,9	354,7	360,1		374,8	15,3

Với thiết kế thực nghiệm và phân tích thống kê bằng phần mềm Minitab 18 ở mức tin cậy 95%, số mẫu thí nghiệm là 6 mẫu/tổ mẫu, đánh giá độ chụm theo ASTM C670-2015 cho thấy kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm. Kết quả phân tích ANOVA cho thấy đảm bảo ý nghĩa thống kê ở mức ý nghĩa 95% với hệ số $p < 0.05$ và hệ số xác định điều chỉnh $R_{dc}^2 = 99,55\%$.

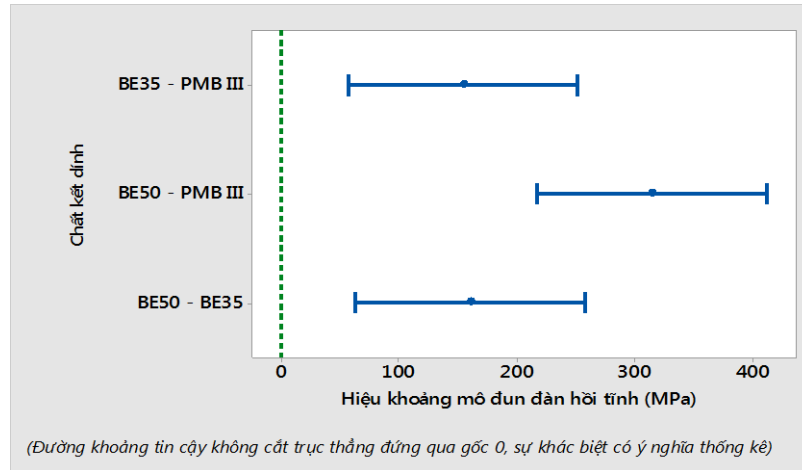
Phân tích phương sai ANOVA (Analysis of Variance)

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	12984258	1623032	1460,13	0,000
Linear	4	12317198	3079299	2770,24	0,000
Chất kết dính	2	889822	444911	400,26	0,000
Nhiệt độ	2	11427375	5713688	5140,22	0,000
2-Way Interactions	4	667061	166765	150,03	0,000
Chất kết dính*Nhiệt độ	4	667061	166765	150,03	0,000

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
33,3401	99,62%	99,55%	99,45%



Hình 3-9. Đồ thị khoảng giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của các loại BTN (độ tin cậy 95%)



Hình 3-10. Biểu đồ so sánh mô đun đàn hồi tính của các loại BTN theo phương pháp so sánh từng cặp Fisher (khoảng tin cậy 95%)

Các biểu đồ **Hình 3-9**, **Hình 3-10** cho thấy có sự khác biệt rõ rệt về mô đun đàn hồi tính của các mẫu BTN khi sử dụng 3 loại chất kết dính khác nhau tương ứng với 3 nhiệt độ thí nghiệm. Với độ tin cậy 95%, sự sai khác này được chỉ ra là có ý nghĩa thống kê (đường khoảng tin cậy trong **Hình 3-10** không cắt trục thẳng đứng gốc 0). Phân tích kết quả cho thấy, ở cả 3 nhiệt độ thử nghiệm (15⁰C, 30⁰C, 60⁰C), mô đun đàn hồi tính của BTNE35 và BTNE50 cao hơn so với BTNP. Ở nhiệt độ 15⁰C, 30⁰C, 60⁰C mô đun đàn hồi tính trung bình của BTNE50 cao hơn so với BTNP lần lượt là 64,98%, 35,60% và 24,37%; của BTNE35 cao hơn so với BTNP lần lượt là 31,31%, 21,49% và 7,11%. Ở 15⁰C sự chênh lệch mô đun đàn hồi giữa 3 loại BTN thử nghiệm là rất rõ rệt, độ chênh giảm dần ở nhiệt độ 30⁰C và ở 60⁰C thì không còn đáng kể, đặc biệt giữa BTNE35 với BTNP.

3.4.4. Xác định mô đun đàn hồi tính đặc trưng của BTN

Mô đun đàn hồi đặc trưng E_{dt} ở độ tin cậy 95% được xác định theo công thức (3-3), kết quả tính được thể hiện trong **Bảng 3-2**:

$$E_{dt} = E_{tb} - k.S \quad (3-3)$$

Trong đó:

E_{tb} - mô đun đàn hồi trung bình,

S - độ lệch chuẩn

$k=1,645$ hệ số ứng với $R=95\%$

Bảng 3-12. Tổng hợp kết quả xác định mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng (E_{dt})

Loại BTN	Nhiệt độ 15 ⁰ C			Nhiệt độ 30 ⁰ C			Nhiệt độ 60 ⁰ C		
	E_{tb}	S	E_{dt}	E_{tb}	S	E_{dt}	E_{tb}	S	E_{dt}
BTNP	1068,00	31,83	1015,64	493,54	0,57	492,60	301,30	6,13	291,22
BTNE35	1402,39	44,88	1328,57	599,59	35,38	541,39	322,71	11,44	303,89
BTNE50	1762,06	73,67	1640,88	669,26	10,28	652,35	374,75	15,30	349,58

Kết quả trong **Bảng 3-2** cho thấy, ở 3 nhiệt độ thí nghiệm 15⁰C, 30⁰C, 60⁰C mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng của BTNE50 cao hơn so với BTNP lần lượt là 61,56%, 32,43% và 20,04%; của BTNE35 cao hơn so với BTNP lần lượt là 30,81%, 9,90% và 4,35%. Ở nhiệt độ thử nghiệm 60⁰C, BTNE35 có mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng cao hơn không đáng kể so với BTNP.

Mô đun đàn hồi tĩnh hay khả năng kháng biến dạng của BTNE trong thí nghiệm cao hơn so với giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của BTN thường [2], và cao hơn so với BTNP sử dụng PMB III hiện đang sử dụng phổ biến ở Việt Nam. Thành phần nhiệt rắn epoxy với khả năng cải thiện tính rắn và duy trì tính đàn hồi của BE chính là nguyên nhân cho kết quả tăng mô đun đàn hồi của BTNE.

3.5. Cường độ kéo uốn của BTNE

Cường độ kéo uốn ở nhiệt độ thấp là một thông số quan trọng thể hiện khả năng chịu lực của BTN được sử dụng trong kiểm toán thiết kế KCAĐ mềm theo tiêu chuẩn 22 TCN 211-06 [2].

3.5.1. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo uốn

Số lượng thí nghiệm cường độ kéo uốn của BTN thể hiện ở **Hình 3-13**

Bảng 3-13. Số lượng thí nghiệm xác định cường độ kéo uốn của BTN

Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính, %	Nhiệt độ thí nghiệm, ⁰ C	Số lượng mẫu	Số lượng thí nghiệm
BTNP	5,2	15	6	6
BTNE35	6,0	15	6	6
BTNE50	6,0	15	6	6
Tổng số thí nghiệm cần thực hiện:				18

3.5.2. Phương pháp thí nghiệm cường độ kéo uốn

Cường độ kéo uốn của mẫu BTN được xác định theo phụ lục C của tiêu chuẩn 22 TCN 211-06 [2], thực hiện trên mẫu kiểu dầm kích thước 240 x 60 x 60 mm.

Mẫu được bảo ôn ở 15°C trong thời gian tối thiểu 120 phút. Thí nghiệm được thực hiện trên máy nén Marshall với tốc độ gia tải 50,8 mm/phút.

Để chế tạo các mẫu thí nghiệm, các hỗn hợp BTN được trộn và đúc trên máy đầm lăn tại phòng thí nghiệm LASXD 1256 – Trường Đại học Giao thông vận tải xem **Hình 3-11**. Sau đó các mẫu dạng tấm được cắt thành các mẫu dầm tại xưởng sản xuất đá hoa cương đạt kích thước thiết kế 240 x 60 x 60 mm (xem **Hình 3-12**).

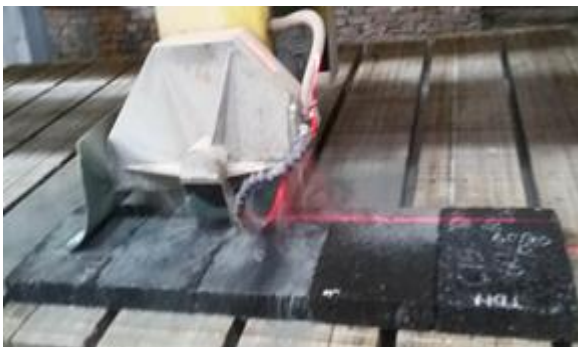


a/ Thiết bị đầm lăn



b/ Mẫu dạng tấm sau khi đầm

Hình 3-11. Đúc mẫu BTN dạng tấm bằng máy đầm lăn



a) Thiết bị cắt mẫu



b) Mẫu sau khi cắt

Hình 3-12. Gia công mẫu dầm bằng máy cắt đá hoa cương

Mẫu được đặt trong tủ bảo ôn ở 15°C trong thời gian ít nhất 120 phút trước khi làm thí nghiệm kéo uốn. Sau đó, lấy mẫu ra và đặt mẫu trên bộ gá có 2 gối tựa cách nhau 200 mm (xem **Hình 3-13**). Thí nghiệm được thực hiện trên máy nén Marshall với tốc độ gia tải 50,8 mm/phút. Để đảm bảo tính chính xác của thí nghiệm, thời gian từ lúc lấy mẫu ra khỏi tủ bảo ôn đến khi thí nghiệm xong không được quá 45 giây.



a/ Thí nghiệm kéo uốn trên máy Marshall

b/ mẫu sau kéo uốn

Hình 3-13. Thí nghiệm kéo uốn mẫu BTN trên máy nén Marshall

Cường độ kéo uốn R_{ku} của vật liệu được xác định theo công thức:

$$R_{ku} = \frac{3.P.L}{2b.h^2} \quad (3-4)$$

Trong đó:

P – Lực nén phá hoại mẫu;

L – khoảng cách giữa 2 gối;

b, h – tương ứng là chiều rộng và chiều cao mẫu.

3.5.3. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn và phân tích

Kết quả chi tiết thí nghiệm cường độ kéo uốn của 3 loại BTN trong nghiên cứu được thể hiện trong phụ lục 6, **Bảng 3-14** và **Hình 3-14**. Một vài hình ảnh về mặt gãy của các mẫu BTN được thể hiện trong **Hình 3-16**.

Bảng 3-14. Tổng hợp kết quả xác định cường độ kéo uốn của BTN

ST T	Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính (%)	Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)	Lực nén lớn nhất, N	Bề rộng mẫu, mm	Chiều cao mẫu, mm	Cường độ kéo uốn $-R_{ku}$ MPa	Cường độ kéo uốn trung bình $-R_{ku}$, MPa	Độ lệch chuẩn, MPa
1	BTNE35	6,0	15	4590	50,0	50	11,02	10,80	0,55
2	BTNE35	6,0	15	4760	50,7	50	11,27		
3	BTNE35	6,0	15	4480	51,0	50	10,54		
4	BTNE35	6,0	15	4550	51,0	50	10,71		
5	BTNE35	6,0	15	4830	51,0	50	11,36		
6	BTNE35	6,0	15	4200	51,0	50	9,88		

ST T	Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính (%)	Nhiệt độ (°C)	Lực nén lớn nhất, N	Bề rộng mẫu, mm	Chiều cao mẫu, mm	Cường độ kéo uốn -R _{ku} MPa	Cường độ kéo uốn trung bình -R _{ku} , MPa	Độ lệch chuẩn, MPa
7	BTNE50	6,0	15	6690	50,5	50	15,90	16,72	0,60
8	BTNE50	6,0	15	7240	50,5	50	17,20		
9	BTNE50	6,0	15	7140	50,5	50	16,97		
10	BTNE50	6,0	15	7020	50,1	50	16,83		
11	BTNE50	6,0	15	7090	49,0	50	17,36		
12	BTNE50	6,0	15	6560	49,0	50	16,07		
13	BTNP	5,2	15	3630	48,2	50	9,04	8,92	0,49
14	BTNP	5,2	15	3800	49,0	50	9,31		
15	BTNP	5,2	15	3930	49,1	50	9,61		
16	BTNP	5,2	15	3460	49,2	50	8,44		
17	BTNP	5,2	15	3430	49,3	50	8,34		
18	BTNP	5,2	15	3590	49,0	50	8,79		

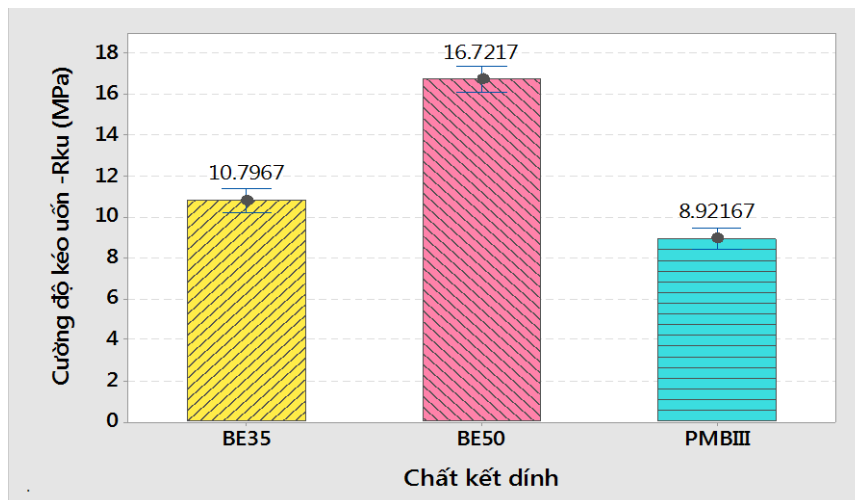
Phân tích tương tự như với mô đun đàn hồi, kết quả thí nghiệm kéo uốn đảm bảo độ chụm, kết quả phân tích ANOVA đảm bảo ý nghĩa thống kê với hệ số $p < 0,05$ và hệ số xác định điều chỉnh $R_{dc}^2 = 97,47\%$.

Phân tích phương sai ANOVA (Analysis of Variance)

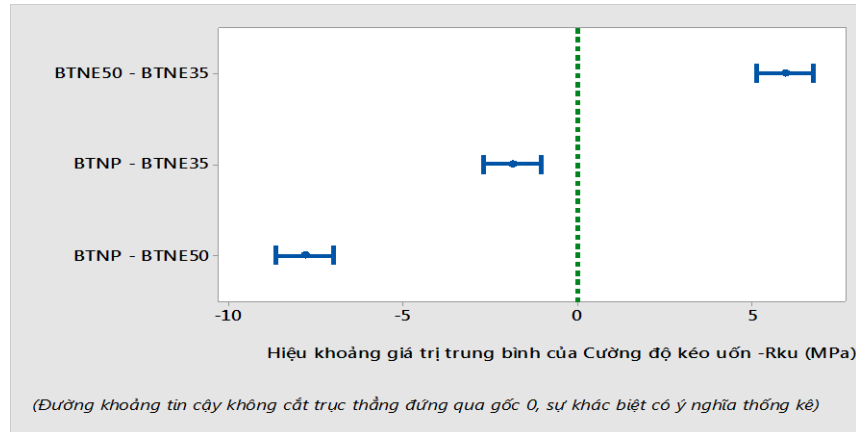
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Chất kết dính_1	2	198,922	99,4612	328,57	0,000
Sai số	15	4,541	0,3027		
Tổng	17	203,463			

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,550194	97,77%	97,47%	96,79%



Hình 3-14. Đồ thị khoảng giá trị cường độ kéo uốn trung bình của các loại BTN



Hình 3-15. Biểu đồ so sánh cường độ kéo uốn của các loại BTN theo phương pháp so sánh từng cặp Fisher (khoảng tin cậy 95%)

Từ kết quả cường độ kéo uốn của các loại BTN trong **Bảng 3-14**, **Hình 3-14** và phân tích ANOVA (**Hình 3-15**) cho thấy: Kết quả thí nghiệm kéo uốn đảm bảo độ chụm; ở nhiệt độ 15⁰C cường độ kéo uốn trung bình của BTNE35 và BTNE50 cao hơn so với BTNP lần lượt là 21,07% ; 87,44% và có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy 95%.

Phân tích mặt cắt gãy của mẫu sau khi thí nghiệm được thể hiện ở **Hình 3-16** cho thấy: Vết gãy của mẫu BTNE35 và BTNP chỉ xảy ra ở vị trí chất liên kết; vết gãy của mẫu BTNE50 rất thẳng và xuyên qua các hạt cốt liệu. Điều đó cho thấy, chất liên kết bitum-epoxy với 50% epoxy (BE50) có độ cứng rất cao do vai trò của thành phần nhiệt rắn epoxy trong BE.



a. Mẫu BTNE50



b. Mẫu BTNE35

c. Mẫu BTNP

Hình 3-16. Hình ảnh vết gãy sau thí nghiệm kéo uốn

3.5.4. Cường độ kéo uốn đặc trưng của BTN

Cường độ kéo uốn đặc trưng R_{ku}^{dt} của BTN được xác định theo công thức (3-5).

$$R_{ku}^{dt} = \overline{R_{ku}} - K.S \quad (3-5)$$

Trong đó:

$\overline{R_{ku}}$ - cường độ kéo uốn trung bình của các mẫu thí nghiệm, MPa.

S – độ lệch chuẩn, MPa.

K – hệ số phụ thuộc vào độ tin cậy yêu cầu, K = 1,645 với độ tin cậy 95%.

Kết quả xác định cường độ kéo uốn đặc trưng của 3 loại BTN tương ứng với 3 loại chất kết dính thể hiện trong **Bảng 3-15**

Bảng 3-15. Cường độ kéo uốn đặc trưng của BTN

Loại BTN	Cường độ kéo uốn trung bình (MPa)	Độ lệch chuẩn S	Cường độ kéo uốn đặc trưng R _{dt} (MPa)
BTNP	8,92	0,49	8,11
BTNE35	10,80	0,55	9,89
BTNE50	16,72	0,60	15,73

Kết quả trong **Bảng 3-15** và **Hình 3-14**, **Hình 3-15** cho thấy, ở nhiệt độ thí nghiệm 15⁰C cường độ kéo uốn đặc trưng của BTNE35 và BTNE50 cao hơn so với BTNP lần lượt là 21,95%, 93,96% và có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy 95%. Cường độ kéo uốn đặc trưng của BTNE50 cao hơn so với BTNE35 là 59,05%. Như vậy có thể thấy khả năng chịu kéo khi uốn của BTNE50 vượt trội so với BTNE35 và BTNP. Cường độ kéo uốn cao ở nhiệt độ thí nghiệm (15⁰C) là khá phù hợp với kết quả nghiên cứu trong dự án thử nghiệm ở châu Âu [21], và được cho rằng do vai trò của thành phần nhựa chính trong epoxy đảm bảo độ linh hoạt và dẻo của BE trong điều kiện nhiệt độ thấp, khi mà bitum thông thường có trạng thái cứng - giòn. Đặc điểm này được kiểm chứng thêm với thí nghiệm mỏi đối với BTNE.

3.6. Khả năng kháng lún của BTNE

Để đánh giá khả năng kháng lún của các loại hỗn hợp BTN, tiến hành thí nghiệm hằn lún vệt bánh xe theo phương pháp A của quyết định số 1617/QĐ-BGTVT [7]. Tuy nhiên để nghiên cứu kỹ hơn thử nghiệm được tiến hành với 80.000 lượt tác dụng tải.

Mẫu thí nghiệm có dạng tấm hình chữ nhật với kích thước 320 x 260 x 60 mm được chế tạo bằng phương pháp đầm lặn; mẫu thử được đầm nén đạt độ rỗng dư đạt $(7 \pm 2) \%$. Mẫu sau khi chế tạo được bảo dưỡng 7 ngày trong điều kiện nhiệt độ phòng (25°C). Thí nghiệm chiều sâu vết lún bánh xe được thực hiện trong môi trường nước có nhiệt độ là 60°C . Tiến hành thí nghiệm hần lún trên máy Wheel tracking tại phòng thí nghiệm Lasxd 1256 – Trường Đại học GTVT.

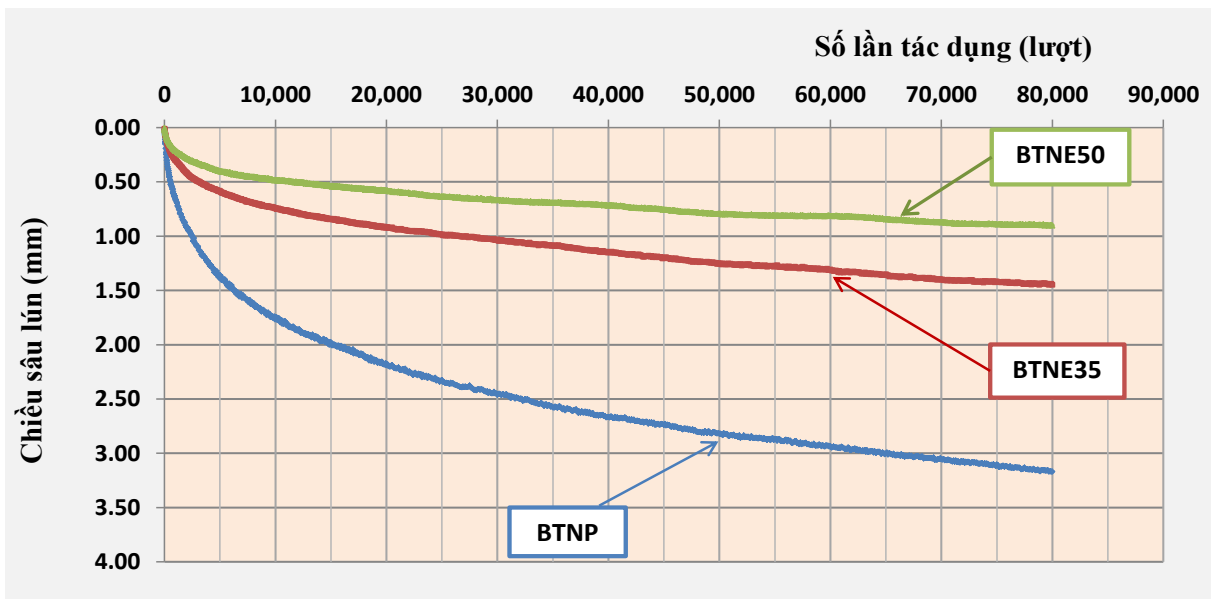


a) Thiết bị Wheel tracking

b) Mẫu BTN trước thí nghiệm

Hình 3-17. Thiết bị và mẫu thí nghiệm hần lún vết bánh xe tại phòng thí nghiệm LASXD 1256 – Trường Đại học GTVT

Kết quả thí nghiệm xác định chiều sâu vết lún bánh xe sau 40.000 chu kỳ tác dụng tải thể hiện ở phụ lục 7 và **Hình 3-18**, hình ảnh mẫu sau khi thí nghiệm được thể hiện ở **Hình 3-19**



Hình 3-18. Kết quả thí nghiệm chiều sâu vết lún bánh xe



Hình 3-19. Hình ảnh các mẫu BTN sau thí nghiệm xác định khả năng kháng lún

Biểu đồ **Hình 3-18** cho thấy sau 20.000 chu kỳ và thậm chí là sau 40.000 chu kỳ tác dụng tải trọng thì chiều sâu vết lún của tất cả các mẫu BTN trong nghiên cứu đều nhỏ hơn rất nhiều so với tiêu chuẩn giới hạn quy định cho BTN polime (sau 40.000 chu kỳ tải, chiều sâu vết lún của BTNE50 và BTNE35 chỉ xấp xỉ bằng 10% và 15% giá trị tối đa cho phép (10mm) ở 20.000 chu kỳ) [4]. Các mẫu BTNE có chiều sâu vết lún bánh xe nhỏ hơn đáng kể so với các mẫu BTNP. Cụ thể là sau 40.000 chu kỳ tác dụng tải, chiều sâu lún của BTNE50 và BTNE35 chỉ xấp xỉ bằng 1/3 và 1/2 chiều sâu lún của BTNP. Chiều sâu vết lún của mẫu BTNE50 sau 40.000 chu kỳ tác dụng tải chỉ tương đương với chiều sâu vết lún của mẫu BTNP sau khoảng 1.400 chu kỳ và của BTNE35 sau 13.000 chu kỳ. Chiều sâu vết lún của mẫu BTNE35 sau 40.000 chu kỳ tác dụng tải chỉ tương đương với chiều sâu vết lún của mẫu BTNP sau khoảng 3.600 chu kỳ. Như vậy có thể thấy BTNE, đặc biệt là BTNE50 có khả năng kháng lún vết bánh xe rất cao.

Ưu điểm rõ rệt của BTNE về khả năng kháng lún so với BTNP là thể hiện cơ bản của đặc điểm chất nhiệt rắn epoxy, với tính rắn và khả năng duy trì đàn hồi ở nhiệt độ cao. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với nhiều nghiên cứu trên thế giới [21], [36], [63] và là thế mạnh rõ rệt của BE.

3.7. Độ bền mỏi của BTNE

3.7.1. Mô hình và thông số thí nghiệm

Hiện tượng mỏi có thể được định nghĩa như là hiện tượng nứt gãy của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng trùng phục hoặc ứng suất thay đổi theo thời gian. Ứng suất này thay đổi làm xuất hiện các vết nứt mỏi, sau đó các vết nứt mỏi ấy phát triển và dẫn tới sự phá hủy vật liệu.

Nguyên nhân mỏi có thể được cho là do nội bộ vật liệu tồn tại các khiếm khuyết, lỗ rỗng hoặc không đồng nhất gây ra các ứng suất tập trung, tiếp theo là xuất hiện các chỗ nứt nhỏ dưới tác dụng của tải trọng lặp và dần dần các vết nứt nhỏ

này mở rộng ra. Vật liệu sẽ không ngừng bị giảm nhỏ phần diện tích hữu hiệu chịu ứng suất, tạo nên sự giảm nhỏ từng bước mô đun độ cứng và cường độ. Kết quả là sự phá hoại sau một số lần tác dụng của tải trọng lặp. Khả năng chống lại phá hoại mới của vật liệu có thể biểu thị bằng giá trị của ứng suất lặp với số lần tác dụng của tải trọng (độ bền mới) mà vật liệu có thể thu nhận được đến khi đạt đến phá hoại mới (N_f). Phá hoại do mỏi có nhiều dạng khác nhau, tuy nhiên tổng thể có thể quy về 2 loại đặc trưng là nứt từ dưới lên (nứt dạng cá sấu) và nứt từ trên xuống (nứt theo chiều dọc).

Mô hình thí nghiệm

Để xác định độ bền mỏi của BTN có hai mô hình được áp dụng là mô hình kéo-nén (kéo nén đúng tâm và kéo gián tiếp – ép chệch) và mô hình uốn dầm. Với mô hình uốn dầm, có các dạng thí nghiệm uốn dầm 2 điểm - dạng ngàm, uốn dầm 3 điểm, uốn dầm 4 điểm, uốn dầm 5 điểm, uốn lặp trên nền đàn hồi. Dạng thí nghiệm uốn dầm 3, 4, 5 điểm được mô phỏng giống với các điều kiện khai thác thực tế mà lớp mặt đường BTN phải làm việc.

Căn cứ vào tình hình thiết bị thí nghiệm thực tế tại trường Đại học Giao thông Vận tải, thí nghiệm đánh giá khả năng cải thiện độ bền mỏi được thực hiện trên thiết bị mỏi 4 điểm Cooper CRT-SA4PT-BB (Stand Alone Four Point Bending Beam Machine) (Hình 3-20). Thiết bị này được đặt trong buồng bảo ôn nhiệt CRT-TCC để duy trì nhiệt độ trong suốt quá trình thí nghiệm. Thí nghiệm được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM D7460-10 [16].



Hình 3-20. Thiết bị mỏi 4 điểm Cooper CRT-SA4PT-BB [16]

Mẫu thí nghiệm

Theo tiêu chuẩn ASTM D7460-10, kích thước của mẫu dạng dầm, chiều rộng B và chiều cao H của mẫu phải lớn hơn 3 lần đường kính cốt liệu lớn nhất, khoảng cách có hiệu gia tải giữa 2 kẹp L ít nhất bằng 6 lần giá trị lớn nhất của B và H. Nghiên cứu chọn mẫu dầm có chiều rộng B bằng chiều cao H và bằng 50mm, chiều dài mẫu 380mm đủ để bố trí khoảng cách kẹp L (Hình 3-21). Quy trình chuẩn bị mẫu như sau: Chế tạo tấm BTN với kích thước 400mm x 300mm x 50mm bằng máy đầm lăn. 24h sau khi đầm, tiến hành tháo khuôn, bảo dưỡng ở

nhệt độ phòng (25°C) trong 7 ngày. Dùng máy cắt đá hoa cương để cắt tạo mẫu đầm kích thước $380\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$. Mẫu được đặt trong buồng bảo ôn ở nhiệt độ thí nghiệm ít nhất 6h trước khi lắp vào thiết bị mỗi 4 điểm.



Hình 3-21. Mẫu thí nghiệm $380\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$

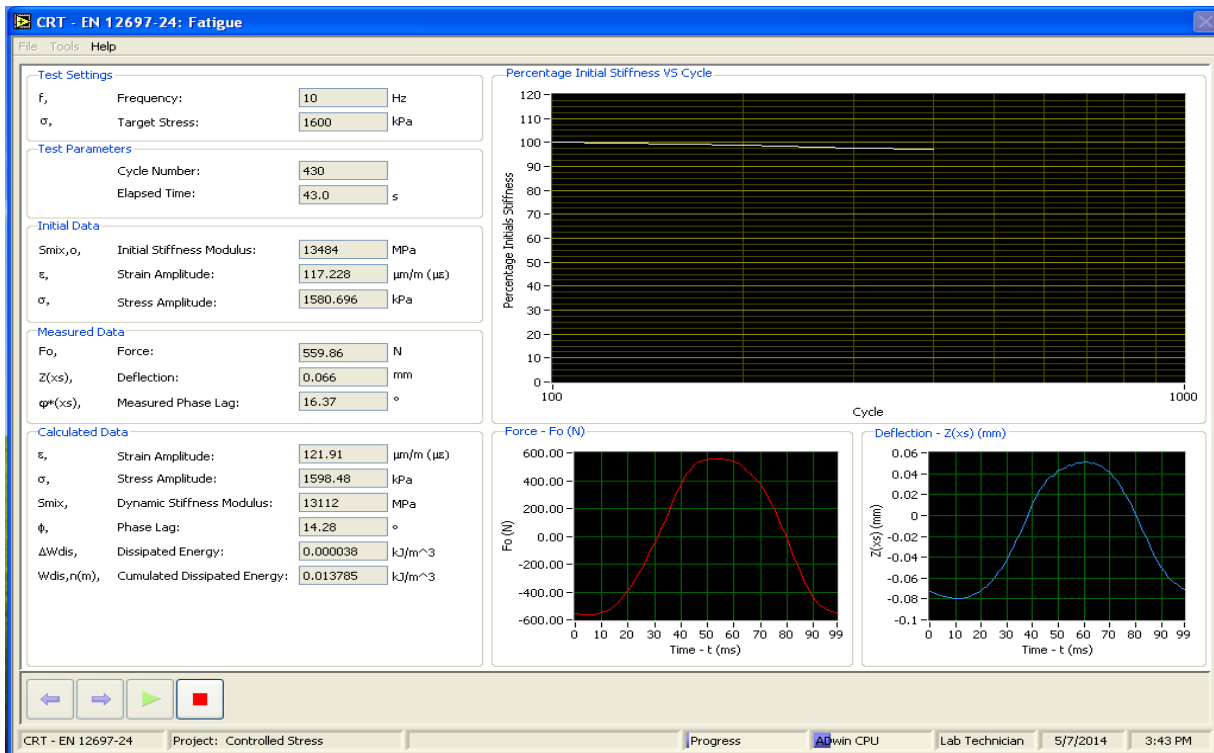
Nguyên tắc và các thông số thí nghiệm

Kết quả độ bền mỏi của vật liệu BTN có sự khác nhau khi thực hiện theo các phương pháp thí nghiệm khác nhau, điều kiện tải, môi trường thí nghiệm và tính chất vật liệu khác nhau.

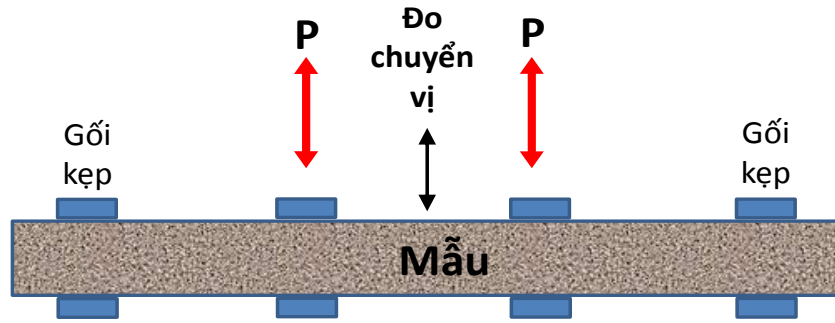
- Nguyên tắc thí nghiệm mỏi là tác dụng tải trọng hình sin liên tục lên mẫu đầm (**Hình 3-22**). Hệ thống ghi lại tín hiệu lực và độ võng tại giữa đầm theo từng chu kỳ tải (**Hình 3-22**, **Hình 3-23**). Theo từng chu kỳ, dựa vào lực và chuyển vị đo được sẽ tính toán được độ lớn mô đun phức động (kí hiệu $|E^*|$) hay còn gọi là độ cứng của đầm (kí hiệu S) và độ lệch pha ứng suất biến dạng (kí hiệu φ) của vật liệu.
- Thí nghiệm mỏi được thực hiện bằng hai chế độ là không chế ứng suất và không chế biến dạng dưới tác dụng của tải trọng. Ở chế độ không chế ứng suất, ứng suất được duy trì cố định dẫn đến biến dạng sẽ phải luôn thay đổi. Ở chế độ không chế biến dạng, biến dạng được duy trì ở một giá trị không đổi, khi đó ứng suất sẽ thay đổi. Theo [57], với mặt đường có lớp BTN dày ($> 12,7$ cm) thì chế độ không chế ứng suất sẽ mô hình hóa gần hơn với thực tế khai thác của nó. Mặt đường có lớp BTN mỏng ($< 12,7$ cm) thì chế độ không chế biến dạng lại phù hợp hơn với thực tế khai thác. Ở Việt Nam, lớp BTN thường được thiết kế với chiều dày nhỏ hơn 8cm, vì vậy trong nghiên cứu này sử dụng loại thí nghiệm không chế chuyển vị. Với thí nghiệm không chế biến dạng, mức biến dạng kéo tại đáy giữa đầm được chọn để đảm bảo rằng mô đun độ cứng mẫu không bị suy giảm quá nhanh, đảm bảo độ bền mỏi (N_{f50}) vào khoảng 10^4 đến 2×10^6 chu kỳ. Thông thường biến dạng được chọn trong

khoảng $200 \div 800 \mu\epsilon$ cho BTN [16]. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm được thực hiện ở ba mức độ biến dạng 200, 300 và $400 \mu\epsilon$.

- Như đã phân tích ở trên, hiện tượng mỏi là nhân tố phá hoại chủ yếu kết cấu áo đường ở nhiệt độ thấp. Theo [57], lớp BTN trong kết cấu mặt đường mềm có biểu hiện mỏi hoặc suy giảm độ cứng dưới tác dụng của tải trọng lặp trong khoảng nhiệt độ từ 10°C đến 30°C . Ở Việt Nam hiện nay nhiệt độ trung bình tương đối cao, tuy nhiên vào mùa đông khá nhiều vùng (Tây nguyên, miền Bắc ...) nhiệt độ xuống rất thấp, thường xuyên dưới 10°C . Trong tiêu chuẩn thiết kế kết cấu áo đường mềm 22 TCN 211-06, khi kiểm toán điều kiện chịu kéo khi uốn, mô đun đàn hồi của lớp BTN cũng được xác định ở 10°C hoặc 15°C . Vì vậy trong nghiên cứu này, nhiệt độ thí nghiệm mỏi được chọn là 10°C .
- Tần số gia tải trong thí nghiệm mỏi nằm trong khoảng từ 5 Hz đến 10 Hz, với 10 Hz thường được sử dụng hơn cả do được xem là tần số tải mô phỏng điều kiện tác dụng tải trọng lặp lại trên các tuyến đường bộ cấp cao [16]. Trong nghiên cứu này, tần số thí nghiệm mỏi sử dụng là 10 Hz.



Hình 3-22. Chương trình và tín hiệu trong thí nghiệm mỏi



Hình 3-23. Đo lực và chuyển vị trên mẫu

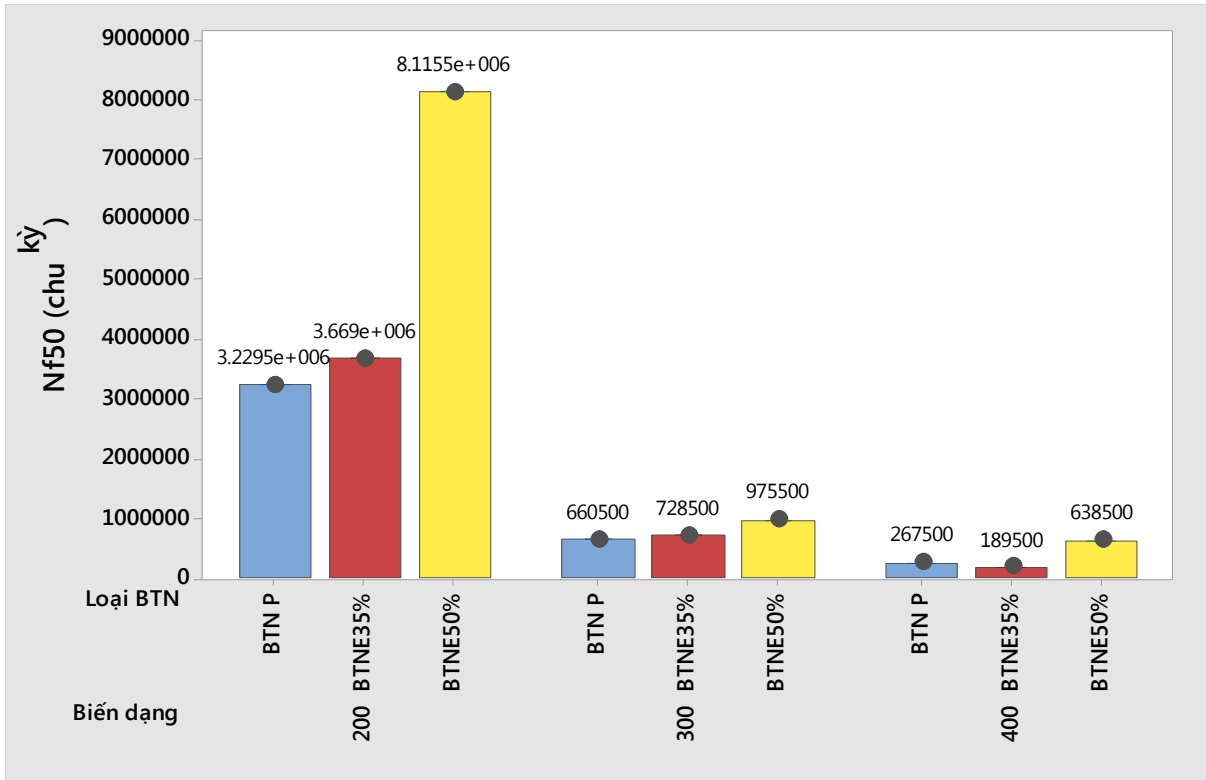
3.7.2. *Kết quả thí nghiệm xác định độ bền mỏi và phân tích*

Kết quả thử nghiệm mỏi ở nhiệt độ 10⁰C, tần số 10Hz được thể hiện trong **Bảng 3-16** và **Hình 3-24**

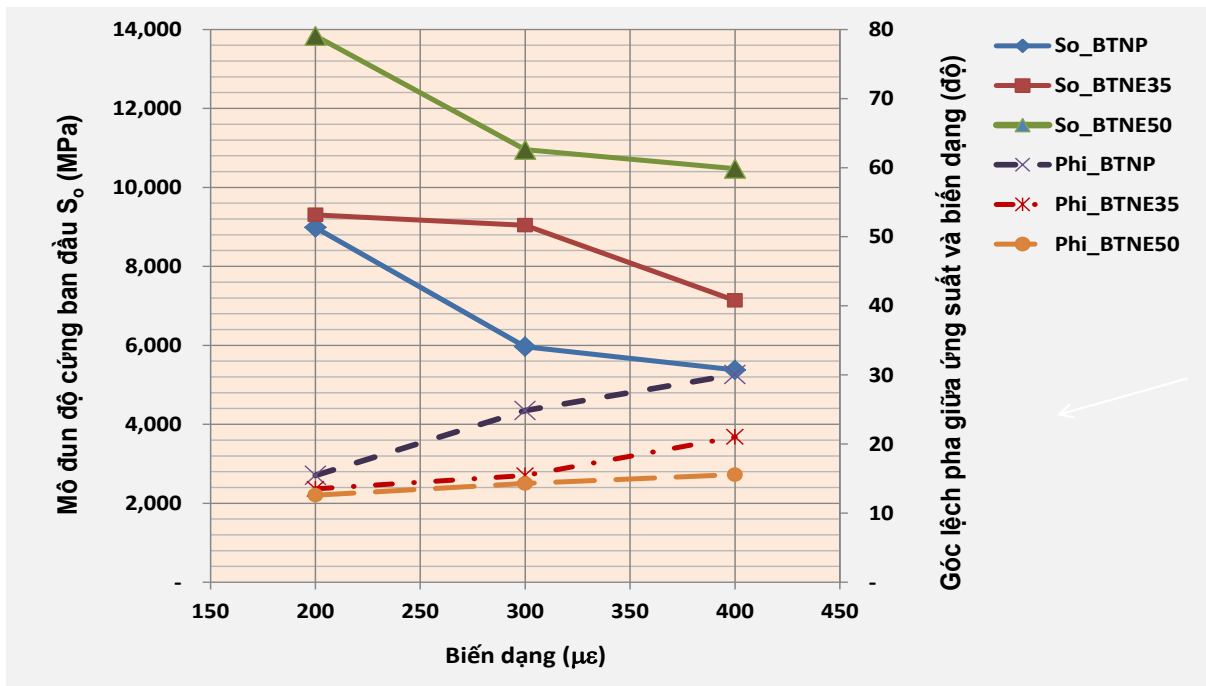
Bảng 3-16. Tổng hợp kết quả thử nghiệm mỏi của BTN

Loại BTN	Nhiệt độ, °C	Tần số, Hz	ϵ ($\mu\epsilon$)	S_o (MPa)	σ_o (kPa)	F_o (N)	ϕ_o (độ)	Z, mm	N_{f50} (chu kỳ)
BTNP	10	10	200	8.984,4	1.797,7	792,9	15,48	0,11	3.229.500
BTNE35	10	10	200	9.305,8	1.867,4	823,5	13,51	0,11	3.669.000
BTNE50	10	10	200	13.837,4	2.675,3	1.181,6	12,61	0,10	8.115.500
BTNP	10	10	300	5.964,4	1.800,0	792,2	24,86	0,16	660.500
BTNE35	10	10	300	9.040,1	2.635,8	1.162,3	15,46	0,16	728.500
BTNE50	10	10	300	10.953,5	2.979,7	1.314,7	14,29	0,16	975.500
BTNP	10	10	400	5.377,7	2.163,6	951,8	30,05	0,22	267.500
BTNE35	10	10	400	7.136,8	2.817,3	1.241,1	21,04	0,21	189.500
BTNE50	10	10	400	10.473,5	3.669,4	1.619,1	15,57	0,19	638.500

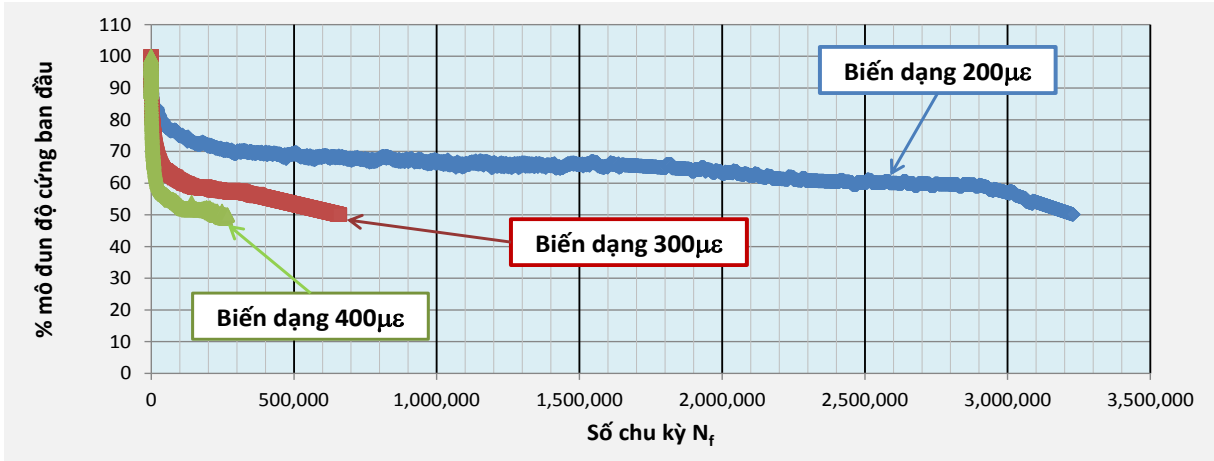
Trong đó: ϵ - biến dạng kéo; S_o , σ_o , F_o , ϕ_o - lần lượt là mô đun độ cứng ban đầu, ứng suất, lực tác dụng, độ lệch pha giữa ứng suất và biến dạng tại thời điểm sau khi dầm đã chịu 100 chu kỳ tải trọng tác dụng; Z – độ võng giữa dầm; N_{f50} – số chu kỳ tải trọng lặp tác dụng làm suy giảm mô đun độ cứng còn lại 50% giá trị ban đầu.



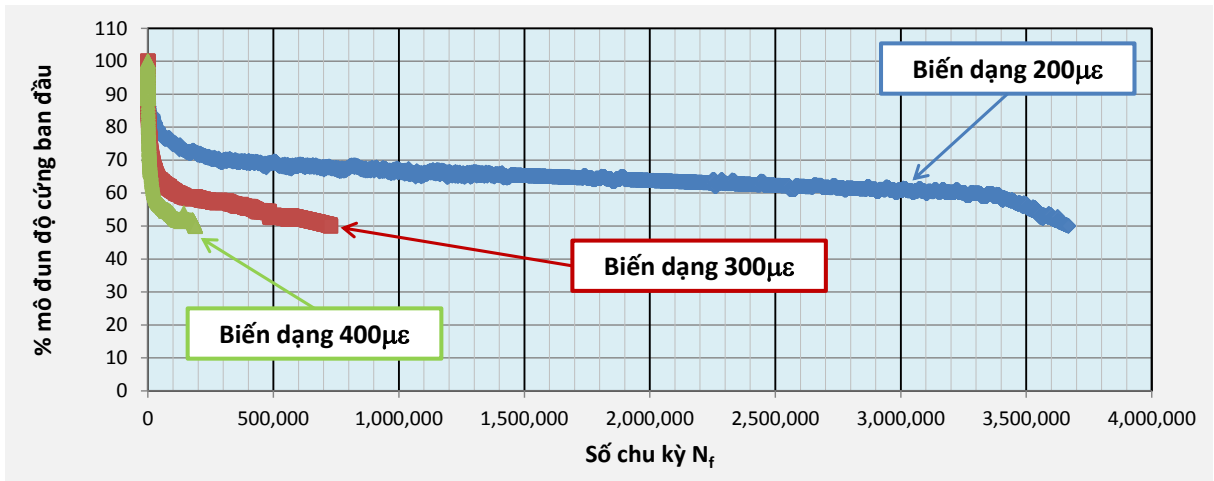
Hình 3-24. Biểu đồ so sánh N_{f50}



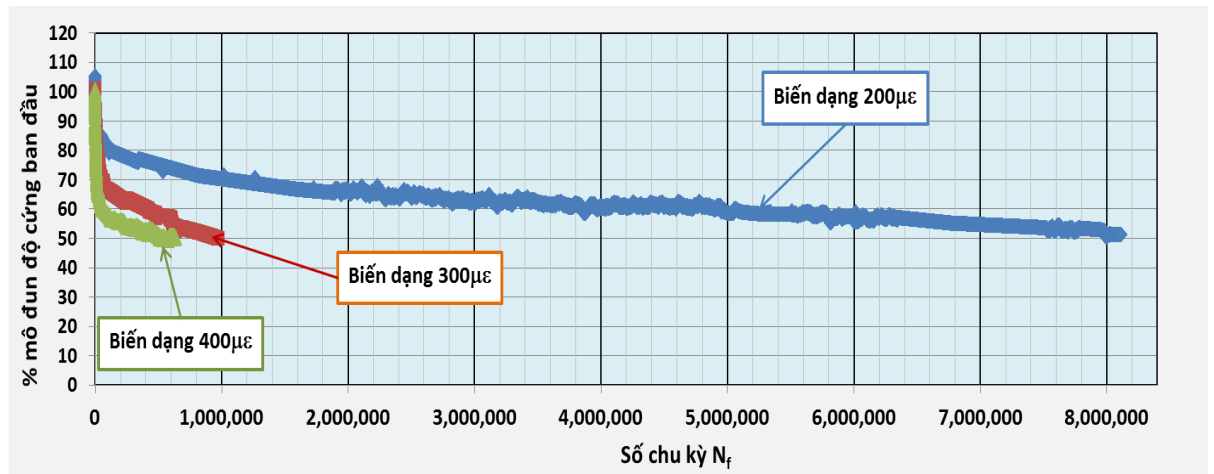
Hình 3-25. Biểu đồ quan hệ giữa Độ cứng ban đầu và Góc lệch pha ban đầu với Biến dạng



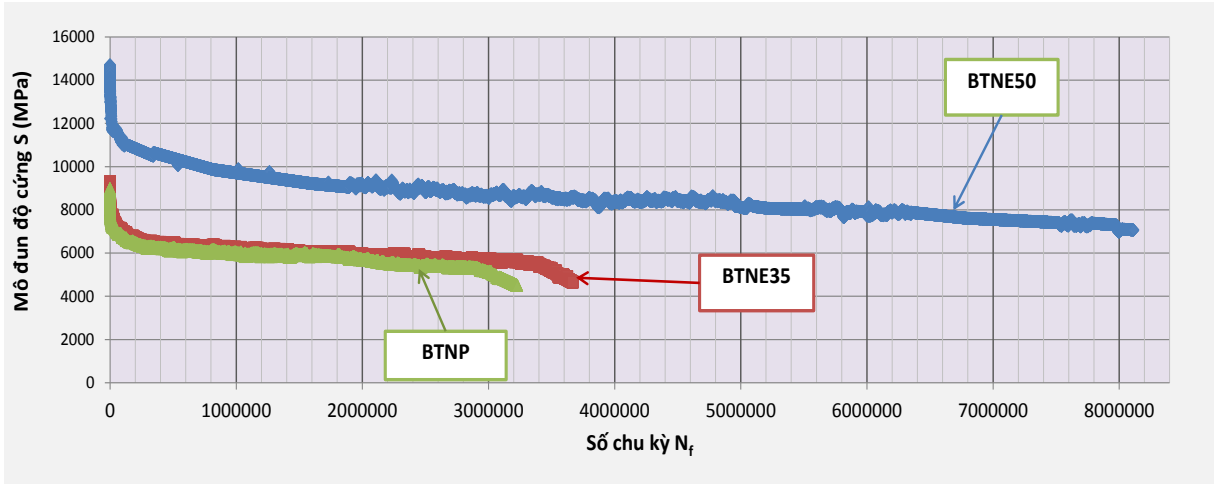
Hình 3-26. Biểu đồ giảm mô đun độ cứng theo số chu kỳ tải trọng lặp của **BTNP** ở nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz



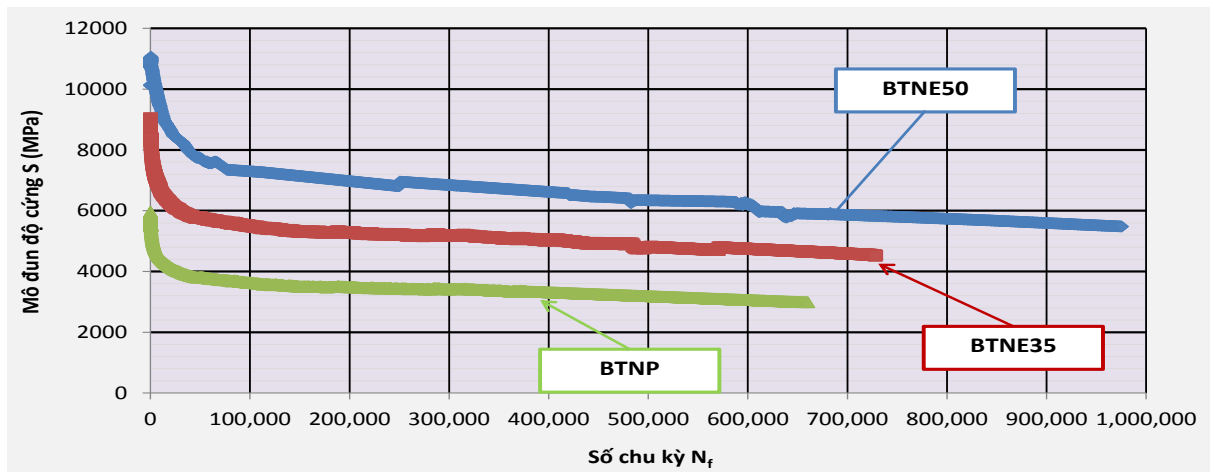
Hình 3-27. Biểu đồ giảm mô đun độ cứng theo số chu kỳ tải trọng lặp của **BTNE35** ở nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz



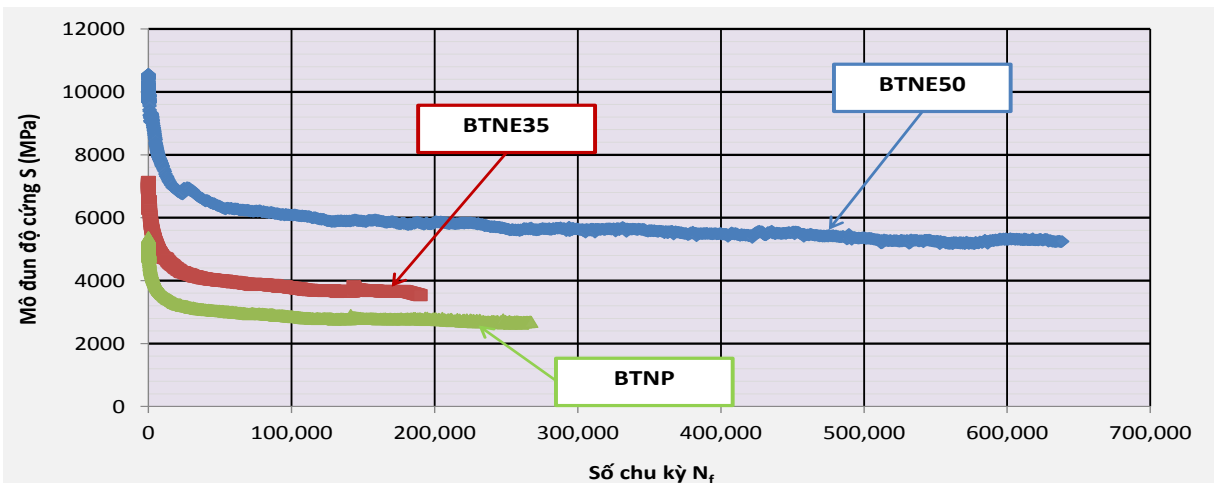
Hình 3-28. Biểu đồ giảm mô đun độ cứng theo số chu kỳ tải trọng lặp của **BTNE50** ở nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz



Hình 3-29. Quan hệ mô đun độ cứng với số chu kỳ tải trọng lặp của 3 loại BTN ở nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz, biến dạng $200\mu\epsilon$



Hình 3-30. Quan hệ mô đun độ cứng với số chu kỳ tải trọng lặp của 3 loại BTN ở nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz, biến dạng $300\mu\epsilon$



Hình 3-31. Quan hệ mô đun độ cứng với số chu kỳ tải trọng lặp của 3 loại BTN ở nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz, biến dạng $400\mu\epsilon$

Qua kết quả thử nghiệm mỗi ở nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz của ba loại BTN ở ba mức biến dạng 200, 300 và $400\mu\epsilon$ có thể rút ra một số nhận xét như sau:

- Ở cùng điều kiện thí nghiệm (nhiệt độ, tần số), giá trị mô đun độ cứng của cả ba loại BTN thử nghiệm đều giảm khi mức biến dạng tăng lên (**Hình 3-25**). Mô đun độ cứng (S) của mẫu dầm BTN sẽ suy giảm khi số chu kỳ tải trọng lặp tăng lên (**Hình 3-26, Hình 3-27, Hình 3-28**). Sự suy giảm này phụ thuộc vào từng giai đoạn tác dụng của tải trọng lặp. **Hình 3-25** cũng cho thấy, ở cả ba mức biến dạng được thử nghiệm, mô đun độ cứng ban đầu (S_0) của BTNE50 cao hơn rất nhiều so với BTNE35 và BTNP. BTNE50 có S_0 bằng 1,487; 1,123 và 1,468 lần so với S_0 của BTNE35; bằng 1,54; 1,702 và 1,947 lần so với S_0 của BTNP tương ứng với mức biến dạng 200, 300 và $400\mu\epsilon$. BTNE35 có S_0 bằng 1,036; 1,516 và 1,327 lần so với S_0 của BTNP tương ứng với mức biến dạng 200; 300 và $400\mu\epsilon$.
- Độ lệch pha ứng suất biến dạng ban đầu của các loại BTN trong thử nghiệm có giá trị từ $12,61 \div 31,05$ độ, nằm trong khoảng độ lệch pha thường thấy của BTN (từ $0 \div 70$ độ). Độ lệch pha này là một thông số đàn nhớt tuyến tính của vật liệu BTN, độ lệch pha càng lớn cho đặc tính vật liệu thiên về tính nhớt và ngược lại độ lệch pha nhỏ cho đặc tính vật liệu thiên nhiều về tính đàn hồi. Xem Bảng 3-16 và Hình 3-25 ta thấy, ở cả ba mức biến dạng 200; 300 và $400\mu\epsilon$, giá trị độ lệch pha của BTNE50 là thấp nhất và của BTNP cao nhất, điều này cho thấy BTNE50 thể hiện đặc tính thiên về nhớt thấp nhất còn BTNP có đặc tính thiên về nhớt cao nhất trong ba loại BTN được thử nghiệm. Giá trị độ lệch pha ứng suất biến dạng của mỗi loại BTN được thử nghiệm đều tăng khi mức biến dạng tăng (**Hình 3-25**).
- Ở điều kiện thí nghiệm đã thực hiện trong thử nghiệm (nhiệt độ 10^0C , tần số 10Hz), ở cả 3 mức biến dạng, số chu kỳ tải trọng lặp tác dụng làm suy giảm mô đun độ cứng còn lại 50% giá trị ban đầu (N_{f50}) của BTNE50 lớn vượt trội so với BTNE35 và BTNP. Cụ thể như sau:
 - Ở mức biến dạng $200\mu\epsilon$, N_{f50} của BTNE50 đạt 8.115.500 chu kỳ, gấp 2,212 lần so với 3.669.000 chu kỳ của BTNE35 và gấp 2,513 lần so với 3.229.500

chu kỳ của BTNP.

- Ở mức biến dạng $300\mu\epsilon$, N_{f50} của BTNE50 đạt 975.500 chu kỳ, gấp 1,339 lần so với 728.500 chu kỳ của BTNE35 và gấp 1,477 lần so với 660.500 chu kỳ của BTNP.

- Ở mức biến dạng $400\mu\epsilon$, N_{f50} của BTNE50 đạt 638.500 chu kỳ, gấp 3,369 lần so với 189.500 chu kỳ của BTNE35 và gấp 2,387 lần so với 267.500 chu kỳ của BTNP.

- N_{f50} của BTNE35 cao hơn BTNP không đáng kể ở 2 mức biến dạng 200 và $300\mu\epsilon$, nhưng lại thấp hơn tương đối nhiều ở mức biến dạng $400\mu\epsilon$. Cụ thể như sau:

- N_{f50} của BTNE35 đạt 3.669.000, bằng 1,136 lần so với 3.229.500 chu kỳ của BTNP khi mức biến dạng là $200\mu\epsilon$ và đạt 728.500 chu kỳ, bằng 1,103 lần so với 660.500 chu kỳ của BTNP khi mức biến dạng là $300\mu\epsilon$.

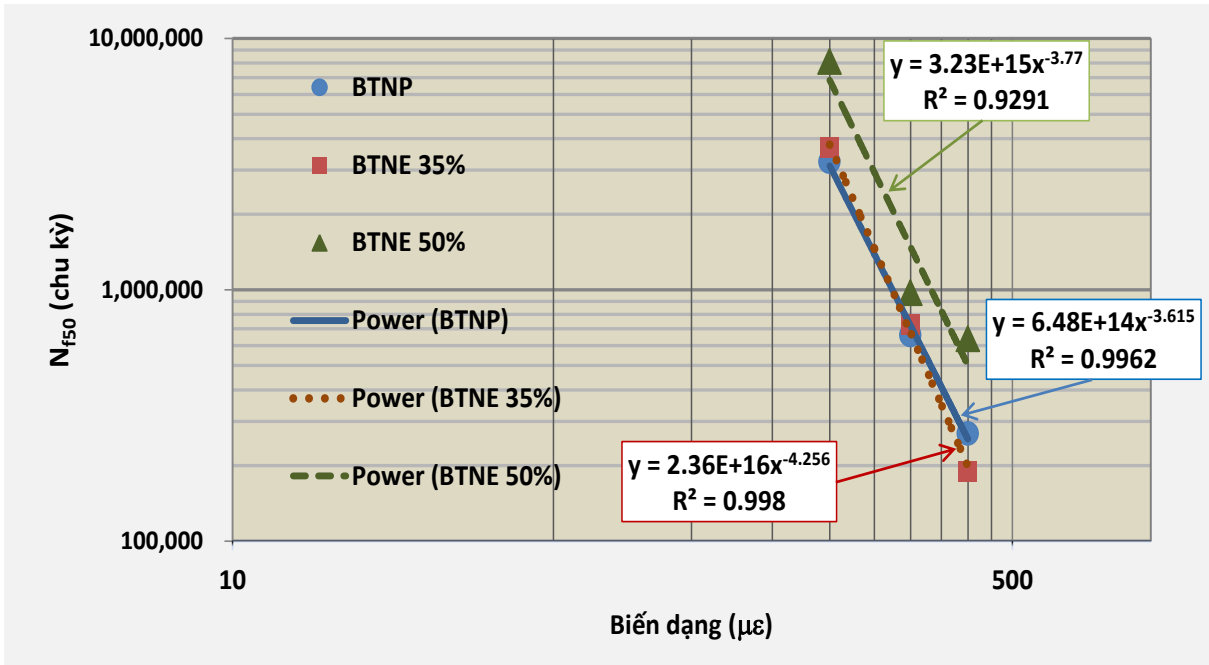
- Ở mức biến dạng $400\mu\epsilon$, N_{f50} của BTNE35 chỉ đạt 189.500 chu kỳ, bằng 0,708 lần so với 267.500 chu kỳ của BTNP.

Mô đun độ cứng cao hơn và góc pha nhỏ hơn của BTNE có hàm lượng epoxy cao (BTNE50) cho thấy rõ hơn vai trò của thành phần nhiệt rắn epoxy đảm bảo tính đàn hồi cao hơn của BE trong hỗn hợp BTNE.

Độ bền mỏi cao hơn của BTNE, đặc biệt là BTNE50 kiểm chứng khả năng duy trì độ dẻo dai của chất dính kết BE trong hỗn hợp. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu mỏi của BTNE kháng nứt lan truyền [21], cũng như trong nghiên cứu thực nghiệm mỏi với mô hình kéo – nén lặp lại [63]

3.7.3. Xây dựng phương trình đặc trưng độ bền mỏi

Đường đặc trưng cho độ bền mỏi hay còn gọi là đường đặc tính mỏi được tuyến tính hóa thành một đường thẳng trong hệ tọa độ logarit. Từ kết quả thử nghiệm mỏi trong **Bảng 3-16**, đường đặc tính mỏi của ba loại BTN đã được xây dựng và thể hiện trong **Hình 3-32**.



Hình 3-32. Đường đặc trưng môi của BTN ở nhiệt độ 10⁰C, tần số 10Hz

Để đánh giá khả năng kháng môi của BTN, phương trình độ bền môi được xây dựng trên cơ sở kết quả thí nghiệm. Theo [24], mối quan hệ giữa độ bền môi (N_{f50}) và biến dạng (ϵ) được biểu diễn thông qua phương trình (3-6)

$$N_{f50} = k_1 \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{k_2} \quad (3-6)$$

Trong đó: ϵ - Biến dạng kéo ($\mu\epsilon$)

N_{f50} - Số chu kỳ tải trọng lặp tác dụng làm suy giảm mô đun độ cứng (S) còn lại 50% giá trị độ cứng ban đầu (chu kỳ)

k_1, k_2 - hệ số hồi quy thực nghiệm, được xác định theo phương pháp bình phương nhỏ nhất

Tiến hành Logarit Nepe (ln) hai vế phương trình (3-6) ta được (3-7)

$$\ln(N_{f50}) = \ln(k_1) + k_2 \times \ln\left(\frac{1}{\epsilon}\right) \quad (3-7)$$

Đặt: $Y = \ln(N_{f50}); B = \ln(k_1); A = k_2; X = \ln\left(\frac{1}{\epsilon}\right)$

Phương trình (3-7) được viết thành $Y = B + A.X$

Kết quả tuyến tính hóa dữ liệu với hàm tuyến tính $Y = B + A.X$ của ba loại BTN ở nhiệt độ thử nghiệm 10⁰C, tần số 10Hz dựa vào kết quả thiết lập đường đặc tính môi trong **Hình 3-32** được thể hiện trong bảng **Bảng 3-17**

Bảng 3-17. Bảng kết quả tuyến tính hóa dữ liệu môi

Loại BTN	Hàm tuyến tính mới	A	B	Hệ số R ²
BTNP	$Y = 34,1 + 3,615 * X$	3,615	34,1	0,9962
BTNE35	$Y = 37,7 + 4,256 * X$	4,256	37,7	0,9980
BTNE50	$Y = 35,71 + 3,770 * X$	3,770	35,71	0,9291

Kết quả xây dựng phương trình đặc tính môi (*quan hệ giữa độ bền môi (N_{f50}) với biến dạng (ϵ)*) của ba loại BTN trong thử nghiệm ở điều kiện nhiệt độ 10⁰C, tần số 10Hz được thể hiện trong các phương trình (3-8), (3-9), (3-10) (xem **Bảng 3-18**)

Bảng 3-18. Tổng hợp phương trình đặc tính môi của BTN

Loại BTN	Phương trình đặc tính môi $N_{f50}=f(\epsilon)$	Độ dốc đường đặc tính môi	Kí hiệu
BTNP	$N_{f50} = 6,48 \times 10^{14} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3,615}$	3,615	(3-8)
BTNE35	$N_{f50} = 2,36 \times 10^{16} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{4,256}$	4,256	(3-9)
BTNE50	$N_{f50} = 3,23 \times 10^{15} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{3,77}$	3,770	(3-10)

Thử nghiệm đã cung cấp các dữ liệu cơ bản đủ để xây dựng được các phương trình đặc trưng môi cho BTNP (3-8), BTNE35 (3-9) và BTNE50 (3-10). Các đường đặc tính được xác định đều có giá trị R² cao (từ 0.929 trở lên). Giá trị độ dốc đường đặc trưng môi của BTNP, BTNE35 và BTNE50 lần lượt là 3,615; 4,256 và 3,770 là phù hợp với những kết quả nghiên cứu về môi của BTN trên thế giới đã công bố (theo [55] giá trị độ dốc đường đặc trưng môi thường nằm trong khoảng từ 2 ÷ 6).

Giá trị độ dốc của đường đặc tính môi A thể hiện độ nhạy cảm môi của vật liệu. Giá trị này càng lớn thì khi biến dạng tăng, tuổi thọ môi của vật liệu giảm càng nhiều. Phân tích **Hình 3-32** cho thấy: Trong ba loại BTN thử nghiệm, độ nhạy cảm môi của BTNE35 là lớn nhất, cao hơn BTNP và BTNE50 lần lượt là 17,73% và 12,89%; Đường đặc tính môi của BTNE35 nằm rất sát và cắt đường đặc tính môi của BTNP; Mặc dù độ nhạy cảm môi của BTNE50 lớn hơn BTNP 4,287%, đường đặc tính môi của BTNE50 vẫn nằm cao hơn và cách rất xa đường đặc tính

mỗi của BTNP và BTNE35 do N_{f50} của nó ở các biến dạng thử nghiệm gấp đến $1,339 \div 3,369$ lần của BTNP và BTNE35.

3.8. Mô đun động của BTNE

3.8.1. Lý thuyết cơ bản về mô đun động của BTN

Mô đun động ($|E^*|$) của BTN là một thông số quan trọng được sử dụng trong phương pháp thiết kế mặt đường cơ học – thực nghiệm [17]. $|E^*|$ của các lớp BTN được dùng để tính toán ứng suất, biến dạng trong KCAĐ mềm [47] và được sử dụng trong phân tích dự báo hư hỏng lún, mỏi của KCAĐ mềm [19]. Mô đun động thường được đo dựa trên tiêu chuẩn AASHTO TP 62-03 “Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures (AASHTO, 2004)”. Tiêu chuẩn này hướng dẫn trình tự chuẩn bị và thí nghiệm để xác định $|E^*|$ và góc pha (φ) trong một phạm vi xác định của tần số và nhiệt độ [35]. Theo tiêu chuẩn này, mô đun động được xác định thông qua thí nghiệm nén dọc trục không hạn chế nở hông trên mẫu hình trụ tròn. Tải trọng tác dụng lên mẫu có dạng một hàm điều hòa dạng hình sin. Đối với tải trọng dạng hình sin, tính nhớt của hỗn hợp BTN được chỉ ra bởi việc tồn tại góc lệch pha (φ) giữa ứng suất và biến dạng **Hình 3-33**. Công thức (3-11) và (3-12) thể hiện ứng suất σ và biến dạng ε cho dạng tải trọng này.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(t)\sin(\omega t) \tag{3-11}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0(t)\sin(\omega t + \varphi) \tag{3-12}$$

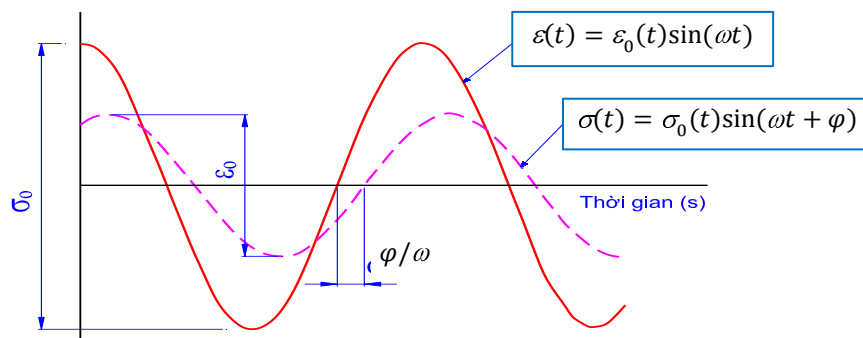
Trong đó:

ε_0 và σ_0 lần lượt là biên độ biến dạng và ứng suất,

ω là vận tốc góc ($\omega = 2.\pi.f$, f là tần số).

Mô đun động của BTN được tính theo công thức (3-13).

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \tag{3-13}$$



Hình 3-33. Quan hệ ứng suất và biến dạng trong thí nghiệm mô đun động [11]

3.8.2. *Kế hoạch và trình tự thí nghiệm mô đun động của BTNE*

3.8.2.1. *Kế hoạch thí nghiệm mô đun động*

Số lượng thí nghiệm, số lượng mẫu của BTNE và vật liệu đối chứng được thể hiện trong **Bảng 3-19**

Bảng 3-19. Số lượng mẫu và số lượng thí nghiệm mô đun động

Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính (%)	Số lượng mẫu	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Tần số thí nghiệm (Hz)	Số lượng thí nghiệm
BTNP	5,2	3	10; 20; 30; 40; 50; 60	10; 5; 1,0; 0,5; 0,1;	18
BTNE35	6,0	3			18
BTNE50	6,0	3			18
Tổng số:			6	5	54
Tổng số kết quả thí nghiệm:					270

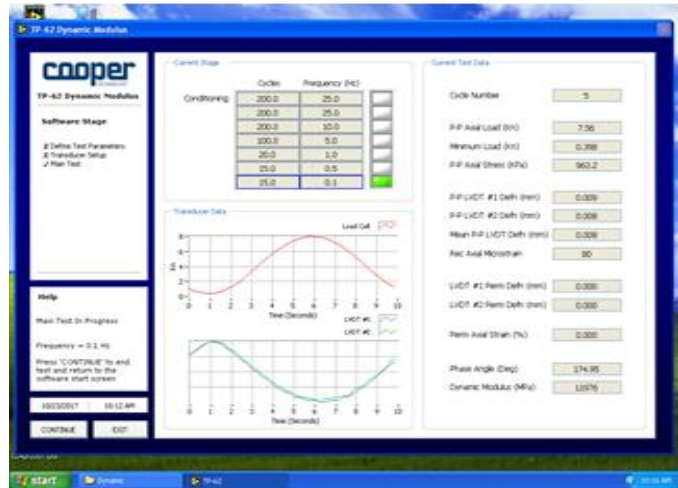
3.8.2.2. *Trình tự thí nghiệm mô đun động*

Các hỗn hợp BTNE và BTNP được chế tạo như mục 3.2.2. Các hỗn hợp sau đó được đầm nén trong khuôn có đường kính 100 mm với áp lực 600 KPa bằng thiết bị đầm xoay (xem **Hình 3-34**). Sau chế tạo mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng trong thời gian là 7 ngày (168h).

Thí nghiệm mô đun động $|E^*|$ được thực hiện theo tiêu chuẩn AASHTO TP-62 trên thiết bị Cooper ở Phòng thí nghiệm Vật liệu – Bộ môn Vật liệu xây dựng – Trường Đại học GTVT (xem **Hình 3-35**). Tất cả các mẫu được đặt trong buồng ổn định nhiệt để có thể duy trì nhiệt độ trong khoảng từ $-10^{\circ}\text{C} \div 60^{\circ}\text{C}$. Những mẫu này được thí nghiệm ở mức ứng suất để đạt được mức biến dạng lớn hơn $50\mu\epsilon$ ở nhiệt độ thấp và nhỏ hơn $150\mu\epsilon$ khi thí nghiệm ở nhiệt độ cao. Điều này để đảm bảo ứng xử của vật liệu là tuyến tính trong miền nhiệt độ thí nghiệm. Do vậy, trong nghiên cứu này áp lực thí nghiệm được lựa chọn tùy thuộc vào nhiệt độ thí nghiệm và loại hỗn hợp BTN.



Hình 3-34. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm bằng đầm xoay Troxler



Hình 3-35. Thí nghiệm mô đun động trên thiết bị Cooper

3.8.3. Kết quả thí nghiệm mô đun động ($|E^*|$) và nhận xét

Kết quả thử nghiệm mô đun động ($|E^*|$) ở dải tần số từ 0,1 – 10 Hz và vùng nhiệt độ từ 10⁰C - 60⁰C thể hiện trong **Bảng 3-20**, **Bảng 3-21** và **Bảng 3-22**

Bảng 3-20. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun động ($|E^*|$) của BTNP

Nhiệt độ (°C)	Tần số (Hz)	Mô đun động (MPa)				
		M4	M5	M6	Trung bình	Độ lệch chuẩn
10	10,0	11 855,28	12 871,93	12 171,29	12 299,50	520,31
10	5,0	12 920,13	11 616,89	11 927,12	12 154,71	680,77
10	1,0	11 512,80	10 506,92	10 838,53	10 952,75	512,57
10	0,5	10 692,43	9 978,70	10 321,99	10 331,04	356,95
10	0,1	8 919,32	8 153,02	8 198,82	8 423,72	429,81
20	10,0	9 423,24	8 569,88	8 532,33	8 841,82	503,88
20	5,0	8 474,08	7 811,76	7 667,12	7 984,32	430,27
20	1,0	6 807,82	6 192,36	5 868,85	6 289,68	476,99
20	0,5	6 028,06	5 459,78	5 125,38	5 537,74	456,36
20	0,1	4 255,47	3 869,31	3 604,16	3 909,65	327,52
30	10,0	5 956,66	6 153,71	6 484,79	6 198,39	266,88
30	5,0	5 151,28	5 226,55	5 615,74	5 331,19	249,29
30	1,0	3 637,35	3 815,94	3 977,93	3 810,41	170,35
30	0,5	3 226,41	3 371,26	3 469,12	3 355,60	122,11
30	0,1	2 517,72	2 548,74	2 552,56	2 539,67	19,11
40	10,0	3 273,29	3 443,72	3 588,01	3 435,01	157,54
40	5,0	2 923,80	2 795,44	2 975,58	2 898,27	92,74
40	1,0	2 167,90	2 071,89	2 120,93	2 120,24	48,01
40	0,5	1 923,89	1 828,77	1 855,55	1 869,40	49,05
40	0,1	1 439,50	1 531,61	1 481,24	1 484,12	46,12
50	10,0	1 827,98	1 762,06	1 840,82	1 810,29	42,26
50	5,0	1 532,19	1 531,20	1 703,34	1 588,91	99,10

Nhiệt độ (°C)	Tần số (Hz)	Mô đun động (MPa)				
		M4	M5	M6	Trung bình	Độ lệch chuẩn
50	1,0	1 175,55	1 190,38	1 275,91	1 213,95	54,17
50	0,5	1 025,68	1 189,61	1 130,37	1 115,22	83,01
50	0,1	863,89	975,87	858,18	899,31	66,36
60	10,0	809,01	917,95	911,12	879,36	61,02
60	5,0	757,89	839,53	845,48	814,30	48,94
60	1,0	596,89	666,34	656,53	639,92	37,59
60	0,5	535,62	591,42	581,96	569,67	29,86
60	0,1	436,95	475,02	464,85	458,94	19,71

Bảng 3-21. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun động ($|E^*|$) của BTNE35

Nhiệt độ (°C)	Tần số (Hz)	Mô đun động (MPa)				
		M7	M8	M9	Trung bình	Độ lệch chuẩn
10	10,0	12 961,65	12 190,48	13 028,60	12 726,91	465,77
10	5,0	12 829,38	12 332,95	12 561,87	12 574,73	248,47
10	1,0	12 192,71	12 326,21	11 513,90	12 010,94	435,59
10	0,5	10 907,37	11 985,65	11 176,88	11 356,64	561,16
10	0,1	9 451,44	10 218,83	9 835,20	9 835,16	383,70
20	10,0	9 873,33	9 962,57	9 881,98	9 905,96	49,22
20	5,0	8 420,05	10 332,33	9 810,53	9 520,97	988,48
20	1,0	7 346,23	8 580,13	8 332,10	8 086,15	652,68
20	0,5	6 731,69	7 909,91	7 675,60	7 439,06	623,71
20	0,1	5 218,83	5 969,83	5 984,60	5 724,42	437,92
30	10,0	7 387,80	7 219,47	7 143,21	7 250,16	125,15
30	5,0	6 272,00	6 490,02	6 941,12	6 567,71	341,26
30	1,0	4 986,78	5 041,47	5 310,95	5 113,06	173,54
30	0,5	4 436,07	4 403,66	4 633,94	4 491,23	124,65
30	0,1	3 208,31	3 115,90	3 195,26	3 173,16	50,01
40	10,0	3 954,78	4 448,49	4 560,20	4 321,16	322,17
40	5,0	3 504,52	3 832,71	4 002,93	3 780,05	253,34
40	1,0	2 531,85	2 648,71	2 828,64	2 669,73	149,51
40	0,5	2 224,31	2 307,21	2 473,31	2 334,94	126,79
40	0,1	1 675,72	1 696,51	1 841,90	1 738,04	90,54
50	10,0	2 373,63	2 455,01	2 475,59	2 434,75	53,92
50	5,0	2 032,21	2 097,85	2 093,11	2 074,39	36,61
50	1,0	1 518,08	1 547,32	1 537,59	1 534,33	14,89
50	0,5	1 374,89	1 389,42	1 376,76	1 380,36	7,90
50	0,1	1 107,81	1 143,25	1 122,66	1 124,57	17,79
60	10,0	1 107,01	1 132,32	1 127,32	1 122,22	13,40
60	5,0	1 006,82	1 006,39	990,59	1 001,27	9,25
60	1,0	850,30	836,29	822,35	836,32	13,97
60	0,5	784,42	766,57	748,83	766,61	17,80
60	0,1	655,49	645,54	638,42	646,48	8,58

Bảng 3-22. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun động ($|E^*|$) của BTNE50

Nhiệt độ (°C)	Tần số (Hz)	Mô đun động (MPa)				
		M1	M2	M3	Trung bình	Độ lệch chuẩn
10	10,0	13 508,92	13 575,99	13 858,03	13 647,65	185,25
10	5,0	13 386,99	13 133,39	13 426,91	13 315,76	159,20
10	1,0	13 870,06	11 699,14	13 617,16	13 062,12	1 187,13
10	0,5	13 553,19	11 894,63	13 392,06	12 946,63	914,61
10	0,1	11 942,73	12 494,61	12 372,24	12 269,86	289,83
20	10,0	12 576,51	12 475,60	12 603,54	12 551,88	67,43
20	5,0	12 242,19	12 454,61	11 816,96	12 171,25	324,69
20	1,0	11 141,03	11 580,34	11 504,26	11 408,54	234,77
20	0,5	10 657,22	11 115,97	11 319,83	11 031,00	339,38
20	0,1	8 981,23	9 014,40	9 419,08	9 138,24	243,78
30	10,0	8 187,49	8 442,41	8 707,16	8 445,68	259,85
30	5,0	7 846,36	8 025,60	8 240,00	8 037,32	197,08
30	1,0	6 321,49	6 128,05	6 415,76	6 288,43	146,68
30	0,5	5 600,85	5 395,36	5 794,04	5 596,75	199,37
30	0,1	4 147,53	3 881,03	4 294,72	4 107,76	209,69
40	10,0	4 801,11	4 977,84	4 815,75	4 864,90	98,08
40	5,0	4 267,48	4 361,55	4 220,60	4 283,21	71,78
40	1,0	3 002,42	3 063,45	2 971,84	3 012,57	46,64
40	0,5	2 638,37	2 705,37	2 604,28	2 649,34	51,43
40	0,1	1 975,86	2 011,50	1 956,72	1 981,36	27,80
50	10,0	3 014,73	2 929,30	2 867,30	2 937,11	74,02
50	5,0	2 643,60	2 605,82	2 547,54	2 598,99	48,39
50	1,0	1 910,09	1 855,95	1 839,62	1 868,55	36,89
50	0,5	1 720,45	1 655,72	1 649,32	1 675,16	39,35
50	0,1	1 358,17	1 303,97	1 305,12	1 322,42	30,97
60	10,0	1 343,76	1 344,95	1 480,72	1 389,81	78,74
60	5,0	1 192,18	1 153,27	1 322,94	1 222,80	88,88
60	1,0	884,54	978,14	1 013,82	958,83	66,77
60	0,5	789,53	802,37	861,21	817,71	38,22
60	0,1	765,06	779,90	768,01	770,99	7,86

Sử dụng phần mềm Minitab19 thiết kế thí nghiệm tổng quát (General full factorial design). Số lần lặp thí nghiệm 3. Phân tích phương sai ANOVA và phân tích hậu định phát hiện sai khác theo chuẩn Tukey.

Các biến đầu vào của thiết kế thực nghiệm: 3 biến

Loại BTN: có 3 loại gồm BTNP, BTNE35, BTNE50.

Nhiệt độ thí nghiệm: có 6 loại gồm 10⁰C, 20⁰C, 30⁰C, 40⁰C, 50⁰C, 60⁰C.

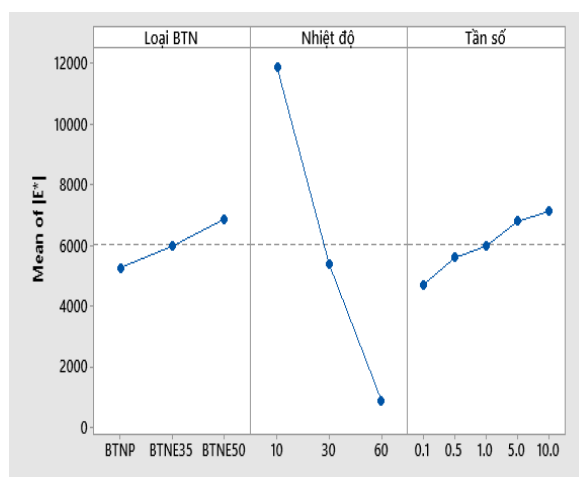
Tần số thí nghiệm: có 5 loại 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,1Hz,

Tổng số kết quả thí nghiệm 3 x 3 x 6 x 5 = 270 kết quả.

Phân tích kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm. Kết quả phân tích ANOVA cho thấy: Các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$; Hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{dc}=99,25\%$. Như vậy kết quả thực nghiệm các yếu tố đầu vào và tích tương tác của chúng đều ảnh hưởng đến mô đun động có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao [Hình 3-36].

Phân tích phương sai ANOVA

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Valu
Model	20	2969004395	148450220	890,4	0,000
Linear	8	2912110206	364013776	2183,3	0,000
Loại BTN	2	58413810	29206905	175,1	0,000
Nhiệt độ	2	2753307915	137665395	8257,1	0,000
Tần số	4	100388482	25097120	150,5	0,000
2-Way Interactions	12	56894188	4741182	28,4	0,000
Loại BTN*Nhiệt độ	4	17899418	4474855	26,8	0,000
Nhiệt độ*Tần số	8	38994770	4874346	29,2	0,000



Kết quả

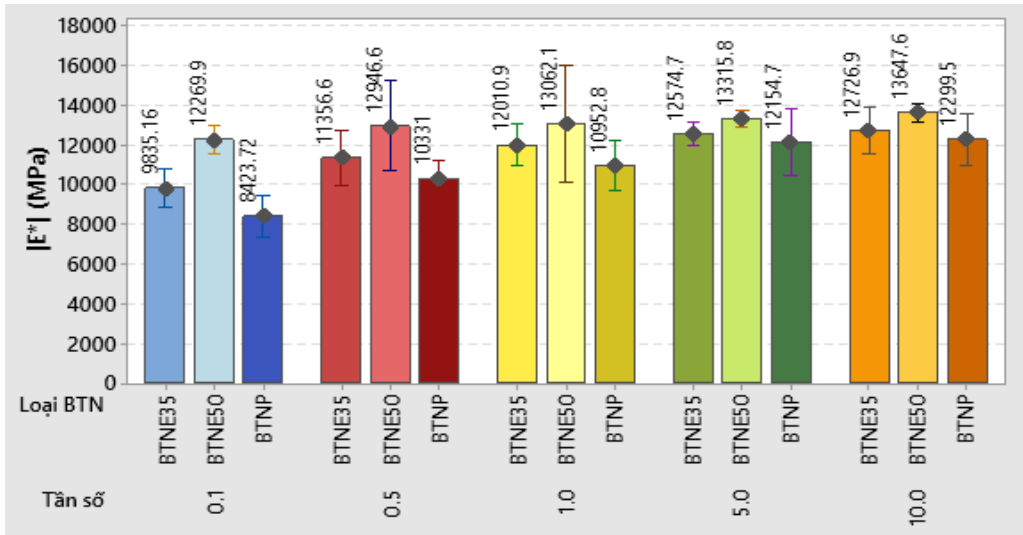
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
408,316	99,36%	99,25%	99,11%

Hình 3-36. Ảnh hưởng các yếu tố loại BTN, nhiệt độ, tần số đến E^*

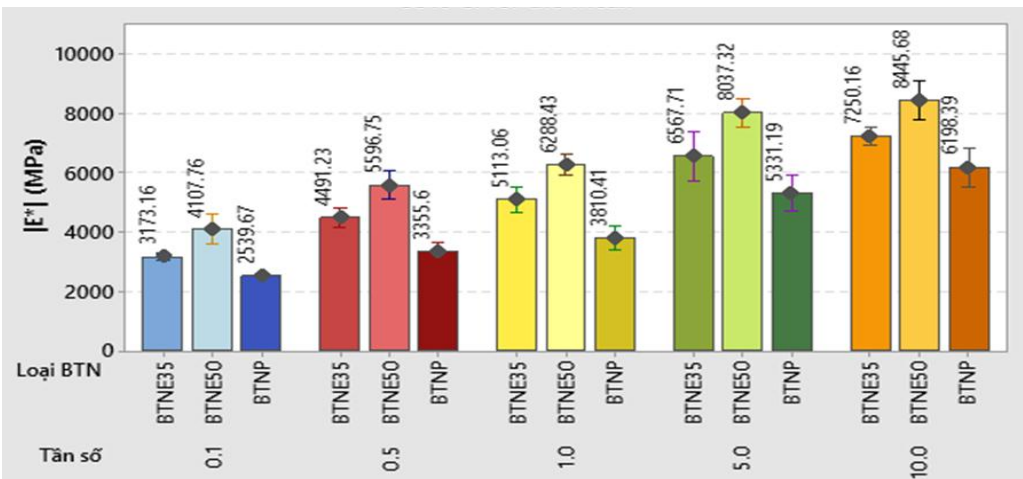
Kết quả thí nghiệm xác định mô đun động có thể đưa ra một số nhận xét sau:

- Điều kiện thí nghiệm gồm nhiệt độ và tần số gia tải ảnh hưởng rất lớn đến mô đun động ($|E^*|$) của cả ba loại BTN được thử nghiệm. Cụ thể như sau: Ở cùng một tần số, khi nhiệt độ tăng lên thì $|E^*|$ giảm đi rất nhanh; ở cùng một nhiệt độ, khi tần số giảm xuống thì $|E^*|$ cũng giảm. Điều này giải thích tính đàn nhớt của BTNP và BTNE.
- Ở tất cả các nhiệt độ (từ 10 – 60⁰C) và các tần số thí nghiệm, giá trị trung bình của $|E^*|$ của BTNE50 đều lớn hơn so với của BTNE35 và của BTNE35 thì lớn hơn so với của BTNP. Tuy nhiên sự chênh lệch này không giống nhau ở các nhiệt độ và tần số thí nghiệm khác nhau. Ở nhiệt độ càng cao, sự chênh lệch giá trị $|E^*|$ giữa BTNE và BTNP càng lớn (xem các biểu đồ **Hình 3-37**, **Hình 3-38** và **Hình 3-39**):
 - $|E^*|$ của BTNE50 lớn gấp khoảng 1,09 – 1,45 lần ở 10⁰C, 1,36 – 1,66 lần ở 30⁰C và gấp khoảng 1,43 – 1,68 lần ở 60⁰C so với BTNP
 - $|E^*|$ của BTNE35 lớn gấp khoảng 1,03 – 1,16 lần ở 10⁰C, 1,17 – 1,34 lần ở 30⁰C và gấp khoảng 1,22 – 1,4 lần ở 60⁰C so với BTNP

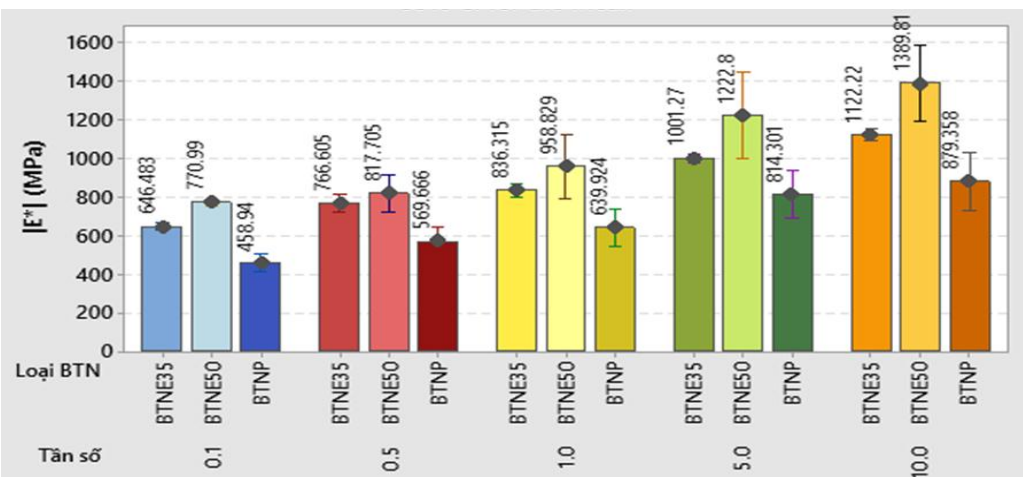
- $|E^*|$ của BTNE50 lớn hơn so với BTNE35 khoảng 1,05 – 1,24 lần ở 10^0C , 1,16 – 1,29 lần ở 30^0C và gấp khoảng 1,06 – 1,24 lần ở 60^0C .



Hình 3-37. Biểu đồ mô đun động $|E^*|$ của BTN ở nhiệt độ 10^0C



Hình 3-38. Biểu đồ mô đun động $|E^*|$ của BTN ở nhiệt độ 30^0C

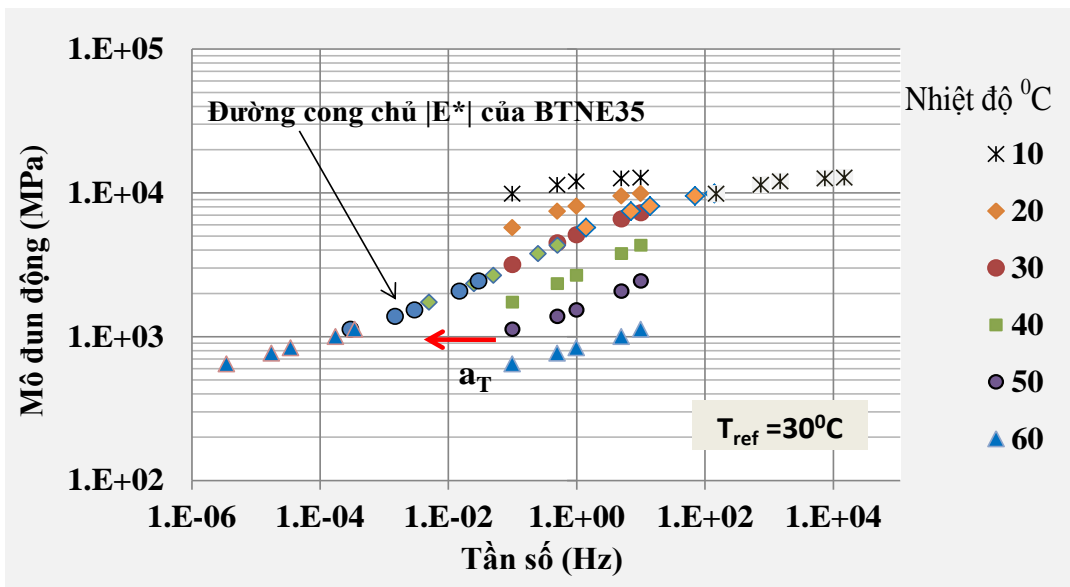


Hình 3-39. Biểu đồ mô đun động $|E^*|$ của BTN ở nhiệt độ 60^0C

3.8.4. Xây dựng đường cong chủ mô đun động của BTNE và vật liệu đối chứng BTNP

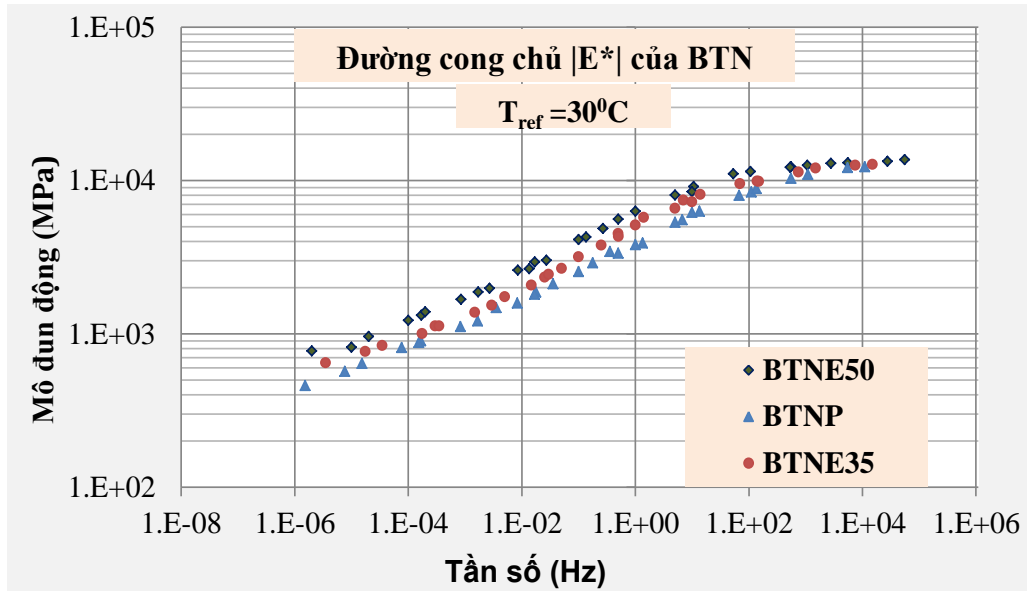
Đường cong chủ mô đun động ($|E^*|$) của BTN được xây dựng từ quy tắc tương quan tần số - nhiệt độ [43]. Để xây dựng đường cong chủ $|E^*|$, cần có được dữ liệu về $|E^*|$ trong một dải rộng nhiệt độ và tần số [13], [17], [20], [52]. Chọn nhiệt độ tham chiếu là 30°C , các đường cong $|E^*|$ tương ứng với nhiệt độ thấp hơn 30°C sẽ được dịch chuyển sang phải còn các đường cong $|E^*|$ tương ứng với nhiệt độ lớn hơn 30°C sẽ được dịch chuyển sang trái bằng các hệ số dịch chuyển (a_T) sao cho các đường cong hòa vào nhau tạo ra một đường cong trơn liên tục [20], [62]. Đường cong chủ $|E^*|$ là đường cong đặc trưng cho tính chất đàn nhớt của vật liệu BTN trong một vùng rộng của tần số và nhiệt độ. Nó được sử dụng để dự đoán $|E^*|$ ở các tần số tải và nhiệt độ khác nhau [43],[20].

Từ kết quả thí nghiệm $|E^*|$ ở 6 nhiệt độ và 5 tần số của từng loại BTN thể hiện trong **Bảng 3-20**, **Bảng 3-21** và **Bảng 3-22**, tiến hành xây dựng đường cong chủ $|E^*|$. **Hình 3-40** minh họa phương pháp xây dựng đường cong chủ $|E^*|$ của BTNE35 ở nhiệt độ tham chiếu 30°C .



Hình 3-40. Xây dựng đường cong chủ $|E^*|$ của BTNE35 ở nhiệt độ tham chiếu 30°C

Thực hiện tương tự như đã làm với BTNE35, đường cong chủ $|E^*|$ của BTNE50 và BTNP đã được xây dựng. **Hình 3-41** thể hiện đường cong chủ của cả ba loại BTN trong nghiên cứu (chi tiết được thể hiện trong phụ lục 8).



Hình 3-41. Đường cong chủ $|E^*|$ của BTNE50, BTNE35 và BTNP ở nhiệt độ tham chiếu $30^{\circ}C$

Quan hệ giữa hệ số dịch chuyển a_T và nhiệt độ thí nghiệm được mô hình hóa theo công thức của Williams, Landel và Ferry (WLF) [43], [51].

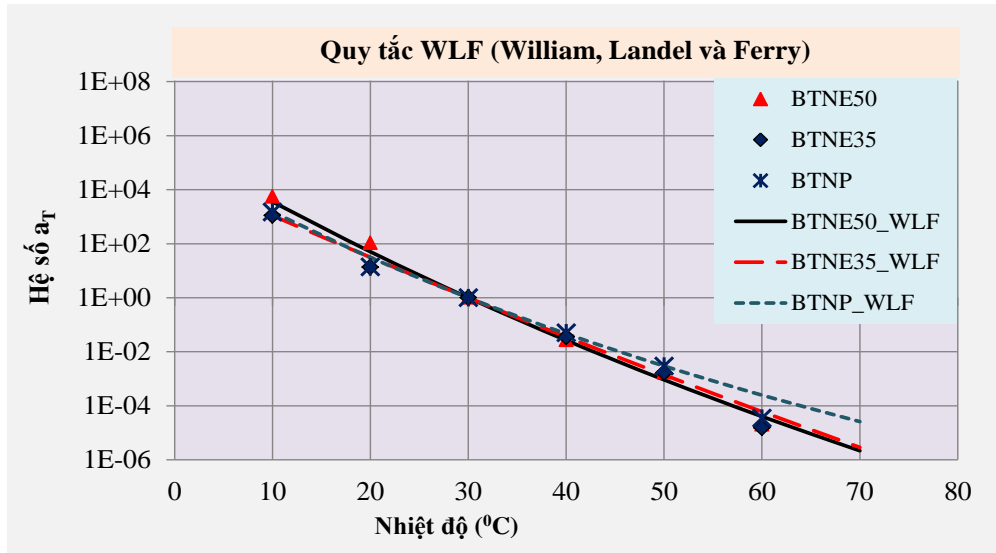
$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (3-14)$$

Trong đó: C_1 và C_2 là các hệ số của phương trình WLF được xác định bằng cách tối ưu hóa theo phương pháp bình phương nhỏ nhất. NCS đã sử dụng hàm “Solver” trong Microsoft Excel để xác định các hệ số này.

Kết quả xác định các hệ số C_1 , C_2 theo quy tắc WLF của ba loại BTN thể hiện ở **Bảng 3-23** và **Hình 3-42**.

Bảng 3-23. Kết quả xác định các hệ số của quy tắc WLF

Loại BTN	C_1	C_2
BTNP	93,25	633,20
BTNE35	24,76	175,92
BTNE50	41,94	256,13



Hình 3-42. Biểu đồ quan hệ giữa hệ số a_T thực và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ

Biểu đồ **Hình 3-41** cho thấy đường cong chủ $|E^*|$ ở nhiệt độ tham chiếu 30°C của BTNE50 nằm ở trên cùng và của BTNP nằm ở dưới cùng. Điều này chứng tỏ $|E^*|$ của BTNE50, BTNE35 lớn hơn so với BTNP ở tất cả các tần số và nhiệt độ. Tuy nhiên, ở phía bên phải, các đường cong chủ $|E^*|$ của ba loại BTN nằm rất sát nhau, điều này cho thấy ở tần số cao hoặc nhiệt độ thấp, sự khác nhau giữa $|E^*|$ của BTNE và BTNP là không lớn. Ở tần số thấp hoặc nhiệt độ cao, $|E^*|$ có sự khác biệt đáng kể giữa các loại BTNE và BTNP, điều này được thể hiện bằng sự cách xa nhau giữa các đường cong chủ ở phía dưới bên trái. Hay nói cách khác, BTNE đặc biệt BTNE50 thể hiện đặc tính vượt trội so với BTNP khi ở nhiệt độ cao và/hoặc tần số thấp trong thử nghiệm mô đun động.

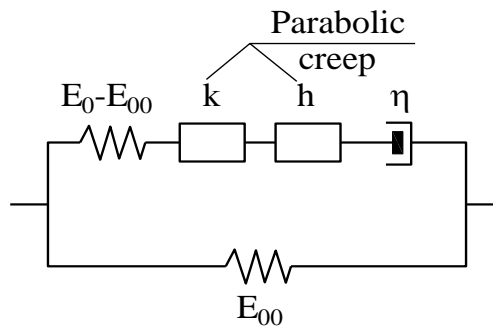
3.8.5. Mô hình hóa đường cong chủ mô đun động của BTNE và BTNP

3.8.5.1. Phân tích lựa chọn mô hình và tiến hành mô hình hóa

Để mô phỏng các số liệu thực nghiệm $|E^*|$ của nhựa đường và BTN đã có nhiều mô hình khác nhau được sử dụng như mô hình Huet, mô hình Huet- Sayegh và mô hình 2S2P1D...[29][46]. Mô hình Huet được đánh giá là phù hợp để mô phỏng số liệu thực nghiệm $|E^*|$ cho nhựa đường ở mọi tần số và nhiệt độ nhưng lại không phù hợp cho hỗn hợp BTN ở tần số thấp và/hoặc nhiệt độ cao. Mô hình Huet-Sayegh có thể mô tả được chính xác ứng xử đàn nhớt tuyến tính của BTN trong vùng tần số và nhiệt độ bất kỳ nhưng mô hình này lại không phù hợp cho bitum ở vùng tần số thấp. Mô hình 2S2P1D là mô hình có thể mô phỏng đặc tính

đàn nhớt tuyến tính của cả bitum và BTN trong miền biến dạng nhỏ với vùng nhiệt độ và tần số bất kỳ [46]. Vì vậy trong nghiên cứu này, mô hình 2S2P1D được nghiên cứu ứng dụng để mô hình hóa các đường cong chủ $|E^*|$ của BTN (BTNE và vật liệu đối chứng BTNP).

Mô hình 2S2P1D được nghiên cứu và đề xuất bởi Olard, F., & Di Benedetto (2003). Đây là một mô hình tổng quát xây dựng dựa trên sự kết hợp của các thành phần vật lý gồm 2 lò xo (2 Springs), 2 thành phần hỗn hợp (2 Parabolic elements) và 1 thành phần nhớt (1 Dashpot) [46], [44]. Mô hình này gồm 7 thông số đầu vào (E_{00} , E_0 , δ , β , τ , k và h) cần thiết để mô hình hóa đặc tính đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và BTN. Mô hình 2S2P1D được mô tả bằng sơ đồ thể hiện ở **Hình 3-43** [46].



Hình 3-43. Sơ đồ mô tả mô hình 2S2P1D [46]

Theo mô hình này, $|E^*|$ được tính toán bằng công thức (3-15).

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (3-15)$$

Trong đó:

i - đơn vị ảo với $i^2 = -1$;

ω - vận tốc góc $\omega = 2\pi f$ (f tần số);

k, h - hệ số $0 < k < h < 1$;

δ - hằng số;

E_0 - mô đun động khi $\omega\tau \rightarrow \infty$ (tần số rất cao hoặc nhiệt độ rất thấp);

E_{00} - mô đun động khi $\omega\tau \rightarrow 0$ (tần số rất thấp hoặc nhiệt độ rất cao), tương đương mô đun tĩnh;

η - hệ số nhớt $\eta = (E_0 - E_{00})\beta\tau$

τ - thời gian đặc trưng, là thông số phụ thuộc nhiệt độ. Thông số này là hàm số của $a_T(T)$, $\tau(T) = a_T(T)\tau_0$. Trong đó, τ_0 được xác định ở nhiệt độ

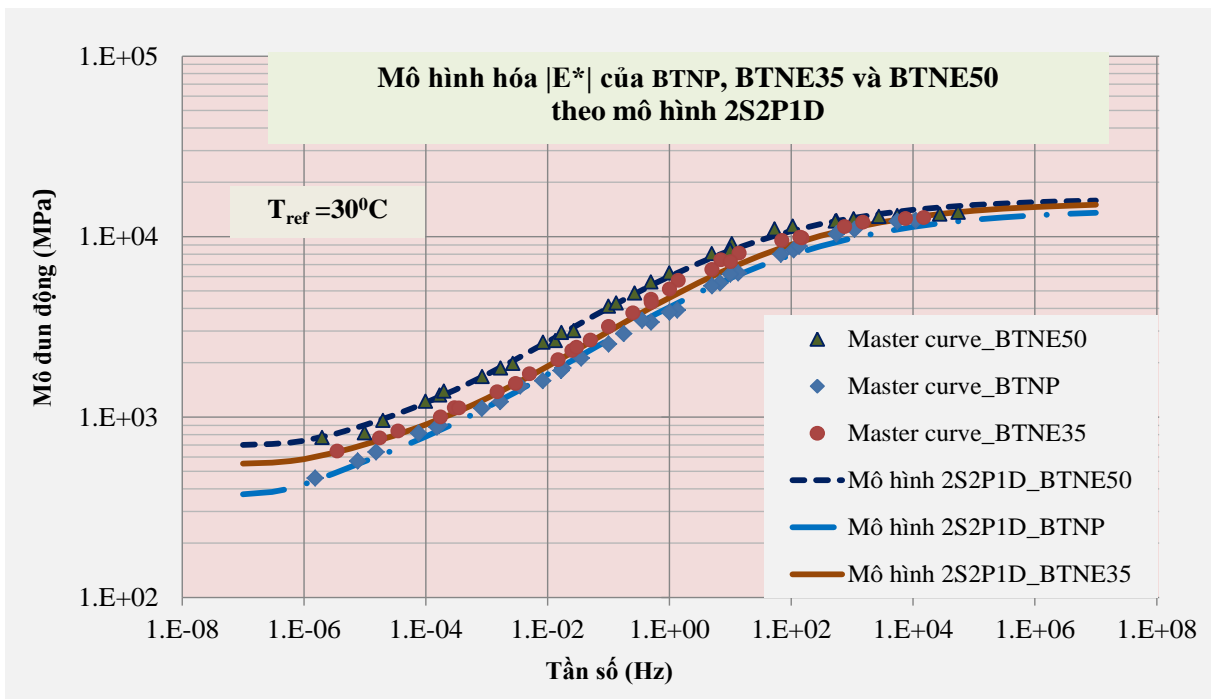
tham chiếu T_{ref} .

Các thông số của mô hình 2S2P1D được xác định bằng cách thử dần để tối thiểu hóa sai số giữa thực nghiệm và mô hình, trong đó hai thông số E_{00} và E_0 của mô hình tham khảo tài liệu [46], [51]. Kết quả xác định các thông số của mô hình 2S2P1D được thể hiện trong **Bảng 3-24**. Kết quả mô hình hóa $|E^*|$ của BTNE và BTNP được thể hiện ở **Hình 3-43** (chi tiết được thể hiện trong phụ lục 8).

Bảng 3-24. Các thông số của mô hình 2S2P1D mô phỏng đường cong chủ $|E^*|$

Loại BTN	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β
BTNP	370	20 000	0,24	0,33	4,25	5.00E-01	2 500
BTNE35	550	22 000	0,25	0,37	4,00	4.00E-01	2 000
BTNE50	700	23 000	0,25	0,40	4,40	1.80E+00	500

Khi so sánh với các kết quả nghiên cứu về BTN ở [46], [51] cho thấy các giá trị k, h, δ , τ , β trong **Bảng 3-24** đều nằm trong khoảng giá trị tham khảo.



Hình 3-44. Mô hình hóa đường cong chủ $|E^*|$ của BTNE và BTNP bằng mô hình 2S2P1D

3.8.5.2. *Đánh giá sự phù hợp của mô hình 2S2P1D với kết quả thí nghiệm*

Phương pháp mức độ phù hợp (Goodness of Fit) [15], [52] được sử dụng để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình 2S2P1D với số liệu đo $|E^*|$ của BTN trong

ngiên cứu. Trong phương pháp này, sai số tiêu chuẩn của ước lượng (S_e) và độ lệch chuẩn (S_y) được tính bằng các công thức sau:

$$S_e = \left[\frac{1}{(n-p-1)} \sum_1^n \left(\log |\hat{E}^*|_i - \log |E^*|_i \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3-16)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\log |E^*|_i - \overline{\log |E^*|} \right)^2}{n-1}} \quad (3-17)$$

Trong đó:

n – Tổng số cặp tần số và nhiệt độ thí nghiệm;

p – số lượng thông số của mô hình;

$\log |E^*|_i$ – logarit cơ số 10 của $|E^*|$ thí nghiệm ở mỗi cặp tần số - nhiệt độ;

$\log |\hat{E}^*|_i$ - logarit cơ số 10 của $|E^*|$ dự báo sau khi tối ưu ở mỗi cặp tần số - nhiệt độ;

$\overline{\log |E^*|}$ - trung bình của logarit cơ số 10 của $|E^*|$ thí nghiệm.

Hệ số R^2 được xác định theo công thức sau:

$$R^2 = 1 - \frac{(n-p-1)S_e^2}{(n-1)S_y^2} \quad (3-18)$$

Kết quả xác định hệ số xác định R^2 và S_e/S_y thể hiện ở **Bảng 3-25**.

Bảng 3-25. Đánh giá mức độ phù hợp của mô hình 2S2P1D với số liệu đo $|E^*|$

Loại BTN	R^2	S_e/S_y	Đánh giá
BTNP	0,9894	0,118	Rất tốt
BTNE35	0,9944	0,086	Rất tốt
BTNE50	0,9801	0,162	Rất tốt

Kết quả trong **Bảng 3-25** cho thấy, mô hình 2S2P1D phù hợp để mô phỏng đường cong chủ $|E^*|$ của cả BTNE35, BTNE50 và BTNP (các hệ số xác định đều thỏa mãn $R^2 > 0,90$ và $S_e/S_y < 0,35$ [15][52]).

3.9. Kết luận chương

Chương 3 đã tập trung nghiên cứu thực nghiệm trong phòng về BTNE sử dụng epoxy có nguồn gốc từ Nhật Bản và vật liệu đối chứng là BTN sử dụng PMB III do Petrolimex cung cấp với 01 thành phần thiết kế lựa chọn. Một số kết luận sau được rút ra từ chương này:

- Độ ổn định Marshall của BTNE50 và BTNE35 lần lượt cao gấp hơn 3 lần và hơn 2 lần so với BTNP đối chứng. Độ ổn định còn lại của BTNE35 là thấp nhất, chỉ vừa đủ giá trị tối thiểu theo yêu cầu về BTN polime được quy định trong tiêu chuẩn 22 TCN356 -06.
- Mô đun đàn hồi tĩnh của BTNE50 cao hơn đáng kể (từ $64\% \div 24\%$) so với BTNP cả khi ở nhiệt độ thấp (15°C) và khi ở nhiệt độ cao (60°C). Trong khi đó chỉ tiêu này của BTNE35 chỉ cao hơn so với BTNP khi nhiệt độ ở mức thấp (15°C) hoặc trung bình (30°C), còn khi ở nhiệt độ cao (60°C) thì chỉ cao hơn không đáng kể ($4,35\%$).
- Cường độ kéo uốn của BTNE50 vượt trội so với BTNE35 và BTNP, nó gấp xấp xỉ 2 lần so với BTNP trong khi BTNE35 chỉ gấp khoảng 1,2 lần so với BTNP. BE50 có độ cứng rất lớn.
- Cả BTNE50 và BTNE35 đều có khả năng kháng lún vết bánh rất rất cao.
- Độ bền mỏi của BTNE50 vượt trội so với BTNE35 và BTNP, lần lượt gấp từ $1,339 \div 3,369$ lần và từ $1,477 \div 2,387$ lần của BTNE35 và BTNP.
- BTNE35 có độ bền mỏi chỉ tương đương thậm chí còn thấp hơn của BTNP khi thử nghiệm ở mức biến dạng lớn ($400 \mu\epsilon$) và độ dốc đường đặc tính mỏi của nó cũng là cao nhất trong ba loại BTN được thử nghiệm.
- Các đường cong chủ $|E^*|$ của BTNE và BTNP ở nhiệt độ tham chiếu 30°C đã được xây dựng cho thấy $|E^*|$ của BTNE50 có giá trị lớn nhất ở tất cả các tần số và nhiệt độ, sau đó đến của BTNE35 và nhỏ nhất là của vật liệu đối chứng – BTNP.
- Mô hình 2S2P1D phù hợp để mô hình hóa cho $|E^*|$ của BTNE, BTNP và được dùng để xác định mô đun động của BTN ở nhiệt độ và tần số bất kỳ.
- BTNE vẫn có tính đàn nhót và tính nhạy cảm nhiệt của BTN thông thường. Điều này được thể hiện ở việc xuất hiện góc lệch pha giữa ứng suất và biến dạng trong thử nghiệm mỏi và mô đun động cũng như việc mô đun động của BTNE có giá trị khác nhau tùy thuộc vào nhiệt độ và tần số thí nghiệm. Nhưng độ nhạy cảm nhiệt của BTNE được cải thiện rất nhiều so với BTN thông thường.

CHƯƠNG 4.

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG BÊ TÔNG NHỰA EPOXY LÀM LỚP MẶT ĐƯỜNG CẤP CAO VÀ LỚP PHỦ MẶT CẦU

Từ kết quả nghiên cứu các chỉ tiêu cơ học của BTNE và vật liệu đối chứng là BTNP ở chương 3 (cường độ kéo uốn, mô đun đàn hồi tĩnh và mô đun động), trong chương 4 một số tổ hợp kết cấu áo đường điển hình được đề xuất căn cứ vào thực tế của Việt Nam, có sử dụng lớp mặt là các BTNE đã nghiên cứu để phân tích. Việc phân tích các tổ hợp kết cấu áo đường đề xuất được thực hiện theo phương pháp đang phổ biến hiện hành ở Việt Nam [2] và theo phương pháp hiện đại nhất hiện nay trong thiết kế kết cấu áo đường – phương pháp cơ học thực nghiệm (ME). Các kết quả phân tích giúp khẳng định ưu điểm và khả năng sử dụng BTNE làm lớp mặt cho kết cấu áo đường ở Việt Nam, xác định phạm vi ứng dụng vật liệu đối với mặt đường của đường cấp cao hoặc đường có lưu lượng xe nặng lớn. Cũng trong chương này, các nghiên cứu và phân tích kết cấu khi sử dụng BTNE làm lớp phủ mặt cầu cũng được sơ bộ thực hiện để bước đầu đánh giá khả năng sử dụng vật liệu này làm lớp phủ mặt cầu với điều kiện khai thác của Việt Nam. Ngoài ra, một phân tích sơ bộ về chi phí xây dựng kết cấu áo đường có lớp mặt BTNE cũng được thực hiện ở trong chương 4, làm cơ sở cho việc lựa chọn sử dụng vật liệu hoặc qui định phạm vi sử dụng BTNE.

4.1. Quy mô giao thông và kết cấu áo đường điển hình của các đường cấp cao ở Việt Nam

4.1.1. Quy mô giao thông trên các tuyến đường cấp cao hiện nay ở Việt Nam

Thực tế cho thấy các tuyến quốc lộ (QL) lớn ở Việt Nam hiện nay như QL 1, QL 5, QL 18 và các tuyến đường cao tốc đang khai thác đều có lưu lượng giao thông rất lớn với số lượng xe có tải trọng trục lớn, xe nhiều trục chiếm tỷ lệ tương đối cao. Các số liệu đếm xe và cân xe trên một số QL có xuất hiện tình trạng hư hỏng lún hằn vệt bánh xe ở Việt Nam được công bố trong đề tài cấp Bộ [8] đã chứng minh các tuyến đường đang phải chịu tải trọng cũng như lưu lượng quá lớn và đây chính là nguyên nhân dẫn đến hư hỏng. Trong nghiên cứu này một số nhận xét về lưu lượng và tải trọng xe đã được rút ra [8]:

- Các tuyến đường khảo sát đều có lưu lượng xe lưu thông trên thực tế lớn hơn nhiều lần so với dự báo khi tính toán thiết kế kết cấu áo đường của các đơn vị tư vấn thiết kế;

- Các loại xe có tải trọng lớn như xe container, xe khách và xe tải chở hàng hóa, vật liệu xây dựng chiếm tỷ lệ khá lớn (chiếm trên 47% - 57% thành phần dòng xe);
- Tải trọng trục xe trên các tuyến là rất lớn, tải trọng trục lớn nhất lên đến 27,23 T. Tải trọng trục lớn hơn 10 T chiếm từ 20,11% đến 25,71%; tải trọng trục lớn hơn 12 T chiếm trên 15% đến 50,87%. Cụm trục ba (ba trục xe), tải trọng cụm trục xe ≤ 21 tấn số xe vượt tải 48,63% đến 81,82% số xe cân được. Mức độ vượt tải so với quy định của thông tư 07/2010/TT-BGTVT và thông tư 03/2011/TT-BGTVT là rất lớn.

Dự báo lưu lượng xe trên QL1 (đoạn Dốc Xây, Thanh Hóa) với thời hạn thiết kế 15 năm và mức độ tăng trưởng xe thấp nhất là 1% có tổng số trục xe tiêu chuẩn tích lũy N_e là $1,067.10^7$ (trục/làn). Nếu mức độ tăng trưởng xe lên đến 7% thì tổng số trục xe tiêu chuẩn tích lũy N_e sau 15 năm và 20 năm của tuyến này lên đến $1,665.10^7$ và $2,717.10^7$ (trục/làn).

Dự báo lưu lượng xe trên QL5 (đoạn qua trạm thu phí Quán Toan, thành phố Hải Phòng) với thời hạn thiết kế 15 năm và mức độ tăng trưởng xe thấp nhất là 1% có tổng số trục xe tiêu chuẩn tích lũy N_e đã là $2,1.10^7$ (trục/làn). Nếu mức độ tăng trưởng xe lên đến 7% thì tổng số trục xe tiêu chuẩn tích lũy N_e sau 15 năm và 20 năm của tuyến này lên đến hơn $3,287.10^7$ và $5,362.10^7$ (trục/làn).

Theo báo cáo thiết kế KCMĐ của một số dự án đường cao tốc như Hà Nội – Hải Phòng, Bắc Giang – Lạng Sơn, Bến Lức – Long Thành..., các tuyến đường này đều được dự báo có quy mô giao thông lớn. Ví dụ như tuyến cao tốc Bến Lức – Long Thành có tổng số tải trọng trục 10T tích lũy dự báo trong thời kỳ thiết kế 20 năm từ $8.10^6 \div 9.10^6$ trục tiêu chuẩn 10 T/làn xe.

Theo quy định tại mục 1.3 của Hướng dẫn ban hành cùng QĐ số 858 của Bộ GTVT [6], tuyến đường có quy mô giao thông lớn ở đây 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 tích lũy trong thời hạn thiết kế (xác định tại mục A.2 tiêu chuẩn 22 TCN 211-06) $N_e \geq 5.10^6$ trục hoặc các tuyến đường có số xe tải trọng hạng trung trở lên và xe khách lớn trung bình ngày đêm lưu thông trên một làn $N \geq 1500$ xe/ngày đêm.làn xe”. Như vậy đối chiếu với quy định này thì các QL và đường cao tốc ở Việt Nam đều thuộc tuyến đường có quy mô giao thông lớn.

4.1.2. *Kết cấu áo đường điển hình trên các tuyến đường cấp cao ở Việt Nam*

Ở Việt Nam, hầu hết các tuyến đường ô tô cấp cao hiện nay đều sử dụng KCMĐ mềm. Kết cấu áo đường của các tuyến đường cao tốc, quốc lộ ở nước ta thường gặp một số dạng như sau [8]:

➤ ***Kết cấu đường cao tốc có $E_{yc} \geq 200$ MPa:***

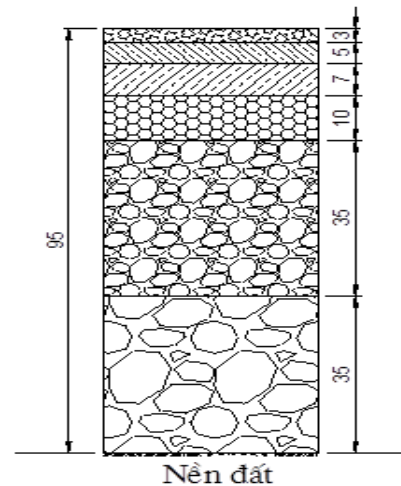
Với các tuyến đường có $E_{yc} \geq 200$ MPa, kết cấu áo đường thường có tổng chiều dày từ 90 - 100 cm và bao gồm các lớp:

- Lớp bê tông nhựa tạo nhám: 3-5 cm (bằng BTN hoặc novachip);
- Tầng mặt thường gồm 2 lớp BTN với tổng chiều dày: 12 – 15 cm;
- Tầng móng gồm 02 lớp vật liệu truyền thống là Cấp phối đá dăm loại 1 và loại 2 có tổng chiều dày 70 – 85 cm; Hoặc sử dụng vật liệu mới ATB thay thế một phần lớp cấp phối đá dăm loại 1.

Ví dụ kết cấu áo đường cao tốc *Long Thành – Giàu Dây*, gói 1b, gói 2, gói 3 với $E_{yc} \geq 200$ MPa, có tổng chiều dày 95 cm với các lớp cụ thể sau:

1. Lớp bê tông nhựa tạo nhám: 3cm
2. Lớp bê tông nhựa hạt mịn: 5cm
3. Lớp bê tông nhựa hạt trung: 7cm
4. Lớp ATB: 10cm
5. Lớp cấp phối đá dăm loại 1: 35cm
6. Lớp cấp phối đá dăm loại 2: 35cm

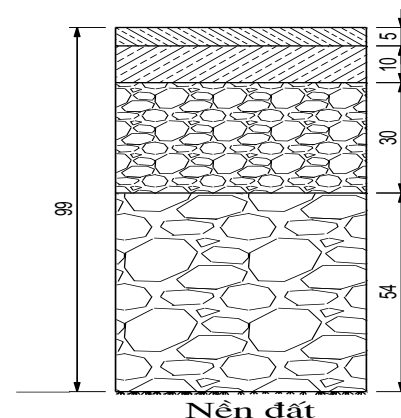
Giữa các lớp bê tông nhựa tưới nhựa dính bám: 0,5 kg/m²; Tưới nhựa thấm bám 1,5kg/m² trên lớp cấp phối đá dăm loại 1.



Ví dụ kết cấu áo đường cao tốc *Nội Bài – Lào Cai*, có $E_{yc} = 200$ MPa, được thiết kế với tổng chiều dày 99cm với các lớp cụ thể sau:

1. Lớp bê tông nhựa hạt mịn: 5 cm
2. Lớp bê tông nhựa hạt trung: 10 cm
3. Lớp cấp phối đá dăm loại 1: 30 cm
4. Lớp cấp phối đá dăm loại 2: 54 cm

Giữa các lớp bê tông nhựa tưới nhựa dính bám: 0,5 kg/m²; Tưới nhựa thấm bám 1,5 kg/m² trên lớp cấp phối đá dăm loại 1.



➤ **Kết cấu áo đường đường cao tốc $E_{yc}=190-200$ MPa:**

Với các tuyến đường có $E_{yc} = 190-200$ MPa, kết cấu áo đường thông thường có tổng chiều dày 70-80 cm và bao gồm các lớp:

- Có hoặc không có lớp bê tông nhựa tạo nhám: 3-5 cm (bằng BTN hoặc novachip);

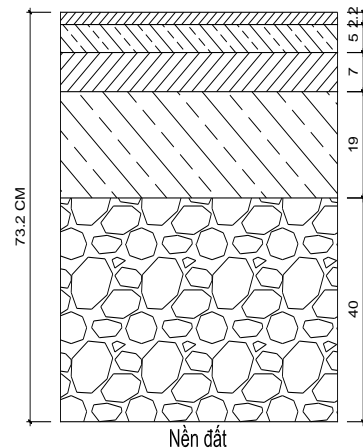
- Tầng mặt thường gồm 2 lớp BTN với tổng chiều dày: 12 – 15 cm;

- Tầng móng gồm 02 lớp vật liệu truyền thống là Cấp phối đá dăm loại 1 và loại 2 có tổng chiều dày 40 – 65 cm; Hoặc sử dụng vật liệu mới ATB (10 cm), Cấp phối đá dăm gia cố xi măng thay thế một phần lớp cấp phối đá dăm loại 1.

Ví dụ kết cấu áo đường cao tốc *Quốc lộ 5 mới*, có $E_{yc} = 191$ MPa, được thiết kế với tổng chiều dày 73,2 cm với các lớp cụ thể sau:

- | | |
|--------------------------------|--------|
| 1. Lớp Novachip: | 2,2 cm |
| 2. Lớp bê tông polime 12,5: | 5 cm |
| 3. Lớp BTNC 19: | 7 cm |
| 4. Lớp ATB: | 19 cm |
| 5. Lớp cấp phối đá dăm loại 1: | 40 cm |

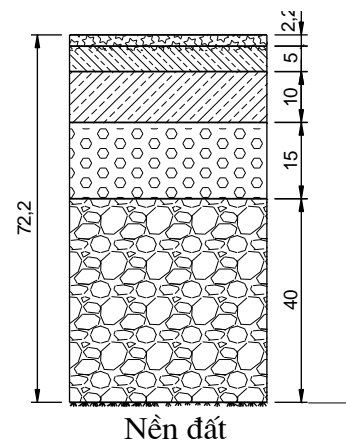
Giữa các lớp bê tông nhựa tưới nhựa dính bám: $0,5 \text{ kg/m}^2$; Tưới nhựa thấm bám $1,5 \text{ kg/m}^2$ trên lớp cấp phối đá dăm loại 1.



Ví dụ kết cấu áo đường cao tốc *Tp Hồ Chí Minh – Trung Lương* với $E_{yc} \geq 190$ MPa, có tổng chiều dày 72,2 cm với các lớp cụ thể sau:

- | | |
|--------------------------------|--------|
| 1. Lớp Novachip: | 2.2 cm |
| 2. Lớp bê tông nhựa hạt mịn: | 5 cm |
| 3. Lớp bê tông nhựa hạt trung: | 10 cm |
| 4. Lớp cấp phối đá gia cố XM: | 15 cm |
| 5. Lớp cấp phối đá dăm loại 1: | 40 cm |

Giữa các lớp bê tông nhựa tưới nhựa dính bám: $0,5 \text{ kg/m}^2$; Tưới nhựa thấm bám $1,5 \text{ kg/m}^2$ trên lớp cấp phối đá dăm trên.



Nhận xét: Ở Việt Nam, kết cấu áo đường trên các tuyến đường cao tốc, đường cấp cao, đường quốc lộ có cấu tạo thành phần các lớp tương đối giống nhau. Tuy nhiên về số lớp và chiều dày mỗi lớp trên các dự án xây dựng có khác nhau

(khác nhau không nhiều) tùy theo lưu lượng xe, điều kiện địa chất, nguồn vật liệu xây dựng. Cụ thể như sau:

- Tầng mặt: Bao gồm 1-2 lớp BTNC rải nóng với lớp trên có hoặc không sử dụng phụ gia polime, có hoặc không có lớp BTN chức năng tạo nhám, giảm tiếng ồn và thoát nước; Tổng chiều dày 2 lớp BTN thường dao động trong khoảng 12-14 cm.
- Tầng móng bao gồm lớp móng trên và lớp móng dưới: Lớp móng trên thường là cấp phối đá dăm loại 1 có gia cố hoặc không gia cố ximăng, lớp ATB (Asphalt Treated Base), lớp cấp phối đá gia cố nhựa; Lớp móng dưới thường là cấp phối đá dăm loại 1, cấp phối đá dăm loại 2.

4.2. Phân tích ứng dụng BTNE làm lớp mặt có tính năng cao trong kết cấu áo đường ô tô ở Việt Nam

Để đánh giá BTNE khi ứng dụng làm lớp mặt trong kết cấu áo đường ô tô, sử dụng kết cấu áo đường đã được áp dụng trên đường cao tốc Quốc lộ 5 mới chỉ thay lớp BTNP bằng lớp BTNE để phân tích, so sánh, đánh giá.

4.2.1. Đánh giá ứng dụng BTNE làm lớp mặt trong kết cấu áo đường khi thiết kế theo tiêu chuẩn 22 TCN 211-06

Ở Việt Nam, tiêu chuẩn 22 TCN 211-06 [2] được áp dụng để tính toán chiều dày các lớp KCAĐ mềm cho hầu hết các dự án đường giao thông. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng tiêu chuẩn này để phân tích, đánh giá khi đưa BTNE vào kết cấu áo đường thay thế vật liệu đối chứng là BTNP. Cấu tạo kết cấu áo đường mềm sẽ đánh giá được thể hiện trong **Bảng 4-1**.

Bảng 4-1. Kết cấu áo đường đánh giá và kết cấu áo đường đối chứng

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp trong KCAĐ đối chứng (QL5 mới), cm	Chiều dày các lớp trong KCAĐ đánh giá, cm	
			BTNE35	BTNE50
1	BTNP	5		
2	BTNE35		TK	
3	BTNE50			TK
4	BTNC19	7	7	7
5	ATB25	19	19	19
6	Cấp phối đá dăm loại 1	40	40	40

Ghi chú: “TK” – chiều dày do tính toán quyết định

Các thông số đặc trưng của các lớp vật liệu được thể hiện ở **Bảng 4-2**. Trong đó,

mô đun đàn hồi tĩnh và cường độ kéo uốn của BTNE35, BTNE50 và BTNP được lấy theo kết quả thí nghiệm thể hiện ở mục 3.4 và 3.5 trong Chương 3; các thông số tính toán của đất nền, CPĐĐ, ATB và BTNC19 tham khảo tiêu chuẩn 22 TCN 211-06 và thuyết minh dự án Quốc lộ 5 mới.

Bảng 4-2. Thông số đặc trưng của các lớp vật liệu dùng trong tính toán

TT	Vật liệu	E (MPa)			R _{ku} (MPa)	C (MPa)	φ (°)
		Kéo uốn	Võng đàn hồi	Trượt			
1	BTNP	1068,00	493,54	301,30	8,1		
2	BTNE 35%	1402,39	599,59	322,71	10,8		
3	BTNE 50%	1762,06	669,26	374,75	16,7		
4	BTNC 19	808,13	329,49	304,23	7,3		
5	ATB25	949,22	468,80	371,47	5,7		
6	CPĐĐ loại I	275,00	275,00	275,00			
7	CPĐĐ loại I	275,00	275,00	275,00			
	Nền đất	50				0,02	30

Kết quả xác định chiều dày lớp BTNE và các giá trị đặc trưng của kết cấu áo đường khi tính toán theo 22 TCN 211-06 với $E_{yc} = 191$ Mpa (E_{yc} đã được dùng để thiết kế chiều dày KCAĐ tuyến QL5 mới) được thể hiện trong **Bảng 4-3**. Nội dung tính toán chi tiết được thể hiện ở phụ lục 9.

Bảng 4-3. Kết quả xác định chiều dày lớp BTNE ($E_{yc}=191$ Mpa) theo tiêu chuẩn 22TCN211-06

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp trong KCAĐ, cm		
		BTNP (QL5 mới)	BTNE35	BTNE50
1	BTNP	5		
2	BTNE35		4	
3	BTNE50			4
4	BTNC19	7	7	7
5	ATB25	19	19	19
6	Cấp phối đá dăm loại 1	40	40	40
$E_{yc} * K_{cd}^{dv}$ (độ tin cậy 90%), Mpa		210,1		
E_{ch} , Mpa		211,97	211,29	212,44

Tiến hành xác định chiều dày lớp BTNP, BTNE35, BTNE50 trong KCAĐ có cấu tạo các lớp phía dưới giống KCAĐ của QL5 mới cho tuyến đường có quy mô giao thông lớn được quy định trong 858/QĐ-BGTVT . Cụ thể, với tổng số trục xe tích lũy trong thời hạn thiết kế $N_e = 5.10^6$ trục/làn xe, thời hạn thiết kế giả

định 15 năm, hệ số tăng trưởng giả định 5%, xác định được lưu lượng tính toán $N_{tt}=1.257$ trục/lần.ngày đêm, tra bảng 3.4 tiêu chuẩn 22 TCN 211-06 xác định được $E_{yc}=196$ Mpa. Chọn hệ số độ tin cậy 90%, xác định được $E_{yc} * K_{cd}^{dv}=215$ Mpa. Kết quả tính toán chiều dày các lớp KCAĐ thể hiện trong **Bảng 4-4**.

Bảng 4-4. Kết quả xác định chiều dày KCAĐ theo 22TCN211-06 cho trường hợp $N_e = 5.10^6$ trục/lần xe

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp trong KCAĐ, cm		
		BTNP (QL5 mới)	BTNE35	BTNE50
1	BTNP	6,5		
2	BTNE35		5,5	
3	BTNE50			5
4	BTNC19	7	7	7
5	ATB25	19	19	19
6	Cấp phối đá dăm loại 1	40	40	40
$E_{yc} * K_{cd}^{dv}$ (độ tin cậy 90%), Mpa		215		
E_{ch} , Mpa		215,86	215,94	215,83

Từ các kết quả tính toán chiều dày KCAĐ mềm theo 22 TCN 211 - 06, có thể rút ra nhận xét sau: Do BTNE50 và BTNE35 có mô đun đàn hồi tĩnh lớn hơn đáng kể so với BTNP nên có thể giảm đáng kể chiều dày so với sử dụng BTNP. Giá trị chiều dày giảm được này là không giống nhau khi E_{yc} trong thiết kế khác nhau. Khi E_{yc} càng lớn thì giá trị chiều dày giảm được khi sử dụng BTNE thay thế BTNP càng lớn. Ví dụ cụ thể:

- Khi sử dụng BTNE thay thế BTNP cho QL5 mới, chiều dày lớp mặt sẽ giảm xuống 20%.
- Khi sử dụng BTNE50, BTNE35 làm lớp mặt cho tuyến đường có quy mô giao thông lớn được quy định trong 858/QĐ-BGTVT với các lớp phía dưới giống hệt KCAĐ QL5 mới, chiều dày lớp mặt giảm tương ứng 30% và 18,18% so với sử dụng lớp BTNP.

4.2.2. Phân tích kết cấu áo đường sử dụng BTNE bằng phương pháp cơ học – thực nghiệm

4.2.2.1. Tổng quan về thiết kế áo đường mềm theo phương pháp cơ học-thực nghiệm (M-E)

Thiết kế áo đường mềm theo phương pháp cơ học thực nghiệm (Mechanical-Empirical Pavement Design, (M-E)), là phương pháp được nghiên cứu và phát

triển bởi Hoa Kỳ. Phương pháp này đã được áp dụng ở nhiều bang nước Mỹ và Canada, được nghiên cứu ở nhiều nước trên thế giới như Hàn Quốc, Úc, Ấn Độ,... để cập nhật những cơ sở khoa học, những công nghệ, kỹ thuật mới cho phương pháp thiết kế mặt đường của mình. Phương pháp M-E được đánh giá là có nhiều ưu điểm hơn các phương pháp thiết kế áo đường mềm ở Việt Nam hiện nay như 22TCN 211-06, 22TCN 274-01, cụ thể:

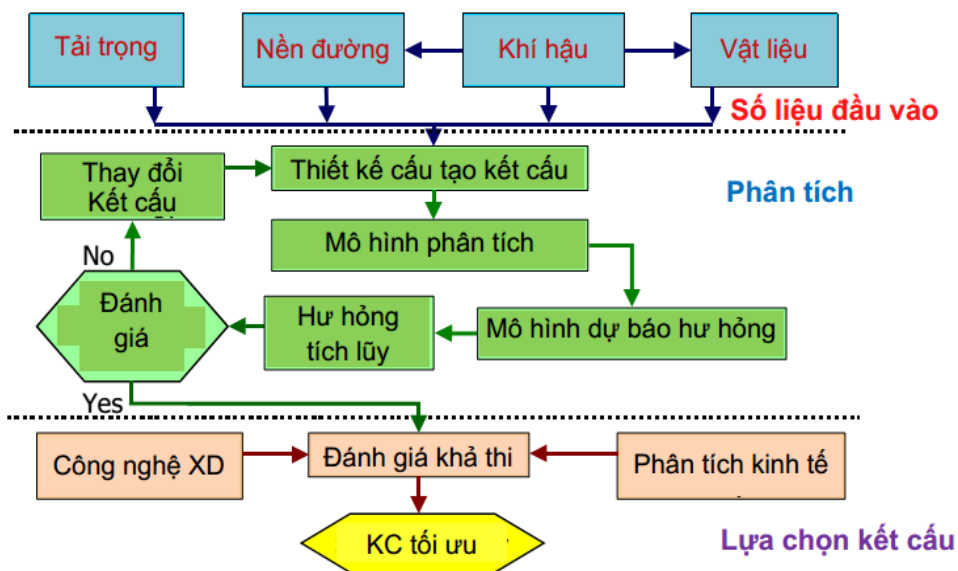
- Yêu cầu của các thông số đầu vào cho chương trình thiết kế phù hợp hơn với điều kiện làm việc của kết cấu áo đường;
- Có khả năng dự báo được ứng xử của kết cấu áo đường mềm trong quá trình khai thác theo thời gian như dự báo hằn lún vệt bánh, chỉ số độ gồ ghề quốc tế (IRI), dự báo nứt phân bố và nứt nhiệt theo thời gian trong quá trình khai thác.

Quá trình thiết kế theo phương pháp M-E là quá trình thử dần đúng. Người thiết kế phải đưa ra 1 kết cấu mặt đường cùng với các giới hạn hư hỏng có thể chấp nhận được như: Biến dạng không phục hồi (độ lún), Nứt do mỏi (nứt dọc & nứt lưới), nứt do nhiệt (nứt ngang), độ gồ ghề (IRI)... tương ứng với từng dự án. Nếu kết cấu đó không thoả 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 **Hình 4-1**. Các bước chính được tóm tắt như sau [17]:

- Sơ bộ lựa chọn cấu tạo KCAĐ mềm thiết kế;
- Lựa chọn các tiêu chuẩn cho dự án: các tiêu chuẩn cho tính chất của áo đường có thể chấp nhận ở cuối thời kỳ thiết kế. Các tiêu chuẩn này được thiết lập để phản ánh mức độ của hư hỏng áo đường dẫn đến phải sửa chữa lớn hoặc xây dựng lại. Tiêu chuẩn này dựa trên cấp hạng đường và tùy thuộc vào từng địa phương.
- Lựa chọn độ tin cậy chấp nhận cho dự án dựa trên mức độ chấp nhận rủi ro của thiết kế và được lựa chọn cho mỗi chỉ tiêu chất lượng riêng biệt.
- Tập hợp tất cả các dữ liệu đầu vào gồm các tính chất của nền đường, các lớp móng và mặt đường asphalt, điều kiện giao thông, điều kiện khí hậu, đặc trưng về loại mặt đường thiết kế.
- Ứng dụng phần mềm tính toán sự thay đổi các tính chất của các lớp vật liệu, các hư hỏng và phá hoại chính và chỉ số IRI của áo đường trong thời hạn thiết kế. Các bước chính như sau:

- ✓ Nhập dữ liệu giao thông hàng tháng, hệ số vật liệu theo mùa, dữ liệu về khí hậu cần thiết cho thiết kế trong thời hạn thiết kế.
- ✓ Tính toán ứng xử của KCAĐ (ứng suất và biến dạng tương ứng với mỗi loại trục và tải trọng xe và sự gia tăng mức độ hư hỏng tính toán trong suốt thời hạn thiết kế.
- ✓ Tính toán hư hỏng tích lũy ở cuối mỗi giai đoạn phân tích trong toàn bộ thời hạn thiết kế.
- ✓ Dự đoán hư hỏng chủ yếu (lún, nứt) tại cuối mỗi giai đoạn phân tích trong suốt thời hạn thiết kế sử dụng mô hình M-E đã được định chuẩn.
- ✓ Dự đoán IRI từ IRI ban đầu và các hư hỏng mặt đường tích lũy trong toàn bộ thời hạn thiết kế.

Các bước thiết kế KCAĐ theo phương pháp M-E được tóm tắt ở **Hình 4-1** [17].



Hình 4-1. Trình tự thiết kế KCAĐ mềm theo phương pháp M-E [14][17]

4.2.2.2. Ứng dụng phương pháp cơ học - thực nghiệm phân tích KCAĐ mềm sử dụng BTNE

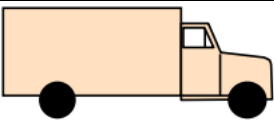
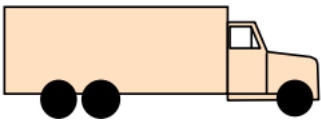
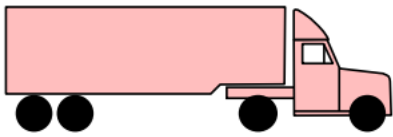
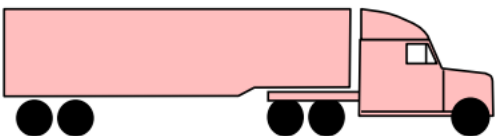
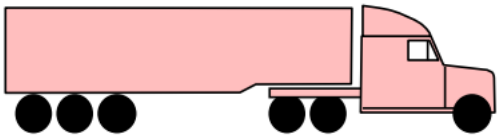
Trong phần này, phần mềm thiết kế mặt đường Darwin-ME 2.3.1 của AASHTO (AASHTOWare Pavement ME Design - MEPDG) được sử dụng để hỗ trợ thiết kế mặt đường theo phương pháp M-E. Trong đó, các số liệu về giao thông sử dụng kết quả khảo sát và lựa chọn đặc trưng quy mô giao thông trên các tuyến đường QL và cao tốc ở Việt Nam; Số liệu về khí hậu thu thập đặc trưng cho khí hậu của thành phố Hà Nội – Việt Nam; Số liệu của lớp BTNE và BTNP lấy theo kết quả thí nghiệm trong phòng đã được thể hiện trong Chương 3; Số liệu các

loại vật liệu khác tham khảo theo dự án QL5 mới.

a. Giao thông

Phương pháp M-E sử dụng số liệu lưu lượng xe tải trung bình ngày đêm cho năm đầu tiên (N_0) cũng như tỷ lệ của từng loại xe trong các phân tích kết cấu [17] và MEPDG đã phân loại xe thành 13 nhóm để phục vụ tính toán thiết kế. Ở Việt Nam, từ các kết quả khảo sát giao thông trên một số tuyến quốc lộ điển hình ở Việt Nam, nghiên cứu [14] đã phân loại các xe trong dòng giao thông thành 5 nhóm xe điển hình căn cứ vào loại xe, số trục xe và tải trọng trục. Các nhóm xe gồm N5, N6, N8, N9 và N10 tương ứng với các loại xe theo hướng dẫn phân loại của AASHTO là loại 5, loại 6, loại 8, loại 9 và loại 10 [14][17] (xem Bảng 4-5).

Bảng 4-5. Đề xuất phân loại xe sử dụng trong phương pháp M-E ở Việt Nam

Nhóm xe	Hình vẽ mô tả	Đặc điểm xe
N5		Xe tải trung thân liền 2 trục Trục trước đơn, bánh đơn Trục sau đơn, bánh kép
N6		Xe tải thân liền 3 trục: 1-2 Trục trước đơn, bánh đơn Trục sau kép, bánh kép
N8		Xe container 4 trục <i>Đầu kéo:</i> Trục trước đơn, bánh đơn Trục sau đơn, bánh kép <i>Moc kéo theo:</i> Trục sau kép, bánh kép
N9		Xe container 5 trục <i>Đầu kéo:</i> Trục trước đơn, bánh đơn Trục sau kép, bánh kép <i>Moc kéo theo:</i> Trục sau kép, bánh kép
N10		Xe container 6 trục <i>Đầu kéo:</i> Trục trước đơn, bánh đơn Trục sau kép, bánh kép <i>Moc kéo theo:</i> Trục sau ba, bánh kép

Tổng lưu lượng xe năm đầu tiên tham khảo lưu lượng xe thiết kế tuyến QL5 mới và có thử nghiệm thêm một số lưu lượng xe khác để phân tích đánh giá KCAD. Hệ số tăng trưởng xe hàng năm chọn 3%, tương ứng với hệ số tăng trưởng xe trung bình trên các đường QL ở Việt Nam. Tỷ lệ các xe trong dòng xe tải, xe khách lấy theo kiến nghị của đề tài cấp Bộ [14] thể hiện trong **Bảng 4-6**. Thời

hạn thiết kế là 15 năm. Xét tuyến đường thiết kế theo tiêu chuẩn đường cấp III - ĐB với 4 làn xe theo 2 chiều xe chạy.

Bảng 4-6. Tỷ lệ thành phần dòng xe tải, xe khách và hệ số tăng trưởng xe

Loại xe	Phân nhóm	Lưu lượng xe năm đầu (xe/ngđ)	Tỷ lệ phần trăm (%)	Hệ số tăng trưởng (%)	Hệ số tải trọng	Trục xe 10T tích lũy N_e (trục/làn)
Xe khách, xe tải nhẹ 2 trục, xe tải trung 2 trục	N5	4.379	73,85%	3,0	0,3497	3.638.910
Xe tải nặng 3 trục	N6	845	14,25%	3,0	0,5951	1.194.790
Xe tải nặng 4 trục	N8	114	1,93%	3,0	0,7707	208.750
Xe container 5 trục	N9	509	8,58%	3,0	0,9735	1.177.353
Xe container 6 trục	N10	83	1,39%	3,0	2,0791	410.019
Tổng:		5.930	100%			6.629.822

Từ các số liệu về lưu lượng xe và hệ số tăng trưởng xe (xem **Bảng 4-6**), tính toán được tổng số xe tích lũy thể hiện ở **Bảng 4-7**.

Bảng 4-7. Số liệu giao thông tính toán trong phân tích M-E

Thời gian (năm)	Số xe nặng tích lũy (xe) tương ứng với lưu lượng xe tải trung bình ngày đêm năm đầu (năm 2021) - N_0 (xe/ngđ)				
	5.930 (QL5 mới)	7.000	8.000	9.000	10.000
2028 (7 năm)	5.350.940	6.316.450	7.218.800	8.121.150	9.023.500
2036 (15 năm)	11.793.500	13.921.500	15.910.300	17.899.100	19.887.900

Từ kết quả tính toán quy đổi về tải trọng trục tiêu chuẩn 10T cho trường hợp lưu lượng xe thấp nhất (5.930 xe) trong các lưu lượng dùng để phân tích (xem **Bảng 4-6**) cho thấy tổng trục xe 10T tích lũy lớn hơn 5.10^6 trục. Điều này thể hiện rõ đặc điểm tuyến đường nghiên cứu có quy mô giao thông lớn.

b. Số liệu khí hậu

Điều kiện khí hậu và thời tiết có ảnh hưởng rất lớn tới ứng xử của vật liệu mặt đường. Số liệu khí hậu sử dụng dữ liệu thu thập trong vòng 2 năm từ trạm khí tượng của Hà Nội bao gồm nhiệt độ, lượng mưa, tốc độ gió, phần trăm ánh nắng mặt trời và độ ẩm tương đối. Các thông tin này được xây dựng thành tệp dữ liệu thời tiết phục vụ cho việc dự đoán nhiệt độ và độ ẩm trong KCAĐ thiết kế.

c. Lựa chọn các kết cấu mặt đường phân tích

Với các số liệu giao thông tại **Bảng 4-7**, và kết quả tính toán chiều dày KCAĐ theo 22 TCN 211-06 như trong **Bảng 4-3**, **Bảng 4-4** đề xuất các kết cấu thể hiện trong **Bảng 4-8** để tiếp tục phân tích theo phương pháp cơ học thực nghiệm M-E. Các kết cấu này chỉ khác nhau ở lớp BTN trên cùng (loại BTN và chiều dày), các lớp phía dưới hoàn toàn giống nhau.

Bảng 4-8. Các kết cấu áo đường phân tích theo phương pháp M-E

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp trong KCAĐ, cm					
		KC1	KC2	KC3	KC4	KC5	KC6
1	BTNP	5	4				
2	BTNE35			5	4		
3	BTNE50					5	4
4	BTNC19	7			7		7
5	ATB25	19			19		19
6	Cấp phối đá dăm loại 1	40			40		40

d. Các tiêu chuẩn giới hạn

Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế tham khảo đề xuất cho đường trục quan trọng, đường Quốc lộ, đường cấp III-ĐB trong nghiên cứu [14], độ tin cậy R=90%, các giá trị cụ thể như **Bảng 4-9**.

Bảng 4-9. Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế

TT	Tiêu chuẩn	Giá trị	Độ tin cậy, %
1	Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	2,71	90,00
2	Tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn KCAĐ (mm)	25,4	90,00
3	Nứt mới từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25,00	90,00
4	Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	189,4	90,00
5	Nứt mới từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	378,8	90,00
6	Chiều sâu lún vệt bánh trong các lớp BTN (mm)	12,5	90,00

e. Xác định các thông số cần thiết của các lớp vật liệu

Các thông số $|E^*|$ của BTNP, BTNE35 và BTNE50 được lấy từ kết quả thí nghiệm và tính toán từ các đường cong chủ tương ứng ở các tần số và nhiệt độ yêu cầu (các đường cong chủ đã được xây dựng trong Chương 3). Các đặc trưng thể tích của 3 loại BTN này được lấy từ kết quả thí nghiệm. Các kết quả tính toán này được thể hiện trong phụ lục 10.

Thông số $|E^*|$ của BTNC19 và ATB tham khảo kết quả thực nghiệm tương ứng với loại BTNC19 và ATB sử dụng bitum 60/70 trong [11]. Các thông số cần

thiết của đất nền, lớp móng CPĐĐ như mô đun đàn hồi M_r tham khảo ở tiêu chuẩn 22 TCN 274-01 [3].

4.2.2.3. Kết quả phân tích kết cấu áo đường mềm theo phương pháp cơ học-thực nghiệm

Sử dụng phần mềm Darwin-ME [31] với các số liệu về khí hậu và đặc trưng của các lớp vật liệu để phân tích các kết cấu từ KC1 đến KC6 tương ứng với các số liệu về giao thông khác nhau theo M-E. Kết quả phân tích thể hiện trong phụ lục 10 và từ **Bảng 4-10** đến **Bảng 4-15**.

Bảng 4-10. Các kết quả phân tích KC1, KC3 và KC5 theo phương pháp M-E trường hợp lưu lượng xe tải năm đầu (N_0) bằng 5.930 xe/ngđ

Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC3		KC5	
		Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	2,7	2,33	Đạt	2,31	Đạt	2,27	Đạt
Tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn KCAĐ (mm)	25,0	22,16	Đạt	21,6	Đạt	19,78	Đạt
Nứt mỗi từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25,0	1,61	Đạt	1,6	Đạt	1,6	Đạt
Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	189,4	5,15	Đạt	5,15	Đạt	5,15	Đạt
Nứt mỗi từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	378,8	212,24	Đạt	196,8	Đạt	190,06	Đạt
Chiều sâu lún vệt bánh trong các lớp BTN (mm)	12,5	11,8	Đạt	11,27	Đạt	9,59	Đạt

Bảng 4-11. Các kết quả phân tích KC2, KC4 và KC6 theo phương pháp M-E trường hợp N_0 bằng 5.930 xe/ngđ

Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC2		KC4		KC6	
		Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	2,7	2,36	Đạt	2,35	Đạt	2,32	Đạt
Tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn KCAĐ (mm)	25,0	23,31	Đạt	22,86	Đạt	21,81	Đạt
Nứt mỗi từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25,0	1,63	Đạt	1,63	Đạt	1,62	Đạt
Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	189,4	5,15	Đạt	5,15	Đạt	5,15	Đạt
Nứt mỗi từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	378,8	259,78	Đạt	220,45	Đạt	206,56	Đạt
Chiều sâu lún vệt bánh trong các lớp BTN (mm)	12,5	12,77	Không đạt	12,36	Đạt	11,44	Đạt

Bảng 4-12. Các kết quả phân tích KC1, KC3 và KC5 theo phương pháp M-E trường hợp N₀ bằng 7.000 xe/ngđ

Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC3		KC5	
		Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	2,7	2,36	Đạt	2,34	Đạt	2,29	Đạt
Tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn KCAĐ (mm)	25,0	23,24	Đạt	22,63	Đạt	20,68	Đạt
Nứt mỗi từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25,0	1,64	Đạt	1,63	Đạt	1,62	Đạt
Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	189,4	5,15	Đạt	5,15	Đạt	5,15	Đạt
Nứt mỗi từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	378,8	281,65	Đạt	224,84	Đạt	215,01	Đạt
Chiều sâu lún vệt bánh trong các lớp BTN (mm)	12,5	12,71	Không đạt	12,15	Đạt	10,33	Đạt

Bảng 4-13. Các kết quả phân tích KC4 và KC6 theo phương pháp M-E trường hợp N₀ bằng 7.000 xe/ngđ

Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC4		KC6	
		Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	2,7	2,38	Đạt	2,35	Đạt
Tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn KCAĐ (mm)	25,0	23,99	Đạt	22,85	Đạt
Nứt mỗi từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25,0	1,67	Đạt	1,66	Đạt
Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	189,4	5,15	Đạt	5,15	Đạt
Nứt mỗi từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	378,8	240,73	Đạt	230,86	Đạt
Chiều sâu lún vệt bánh trong các lớp BTN (mm)	12,5	13,32	Không đạt	12,33	Đạt

Bảng 4-14. Các kết quả phân tích KC3, KC5 và KC6 theo phương pháp M-E trường hợp N₀ bằng 8.000 xe/ngđ

Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC3		KC5		KC6	
		Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	2,7	2,37	Đạt	2,31	Đạt	2,37	Đạt
Tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn KCAĐ (mm)	25,0	23,75	Đạt	21,45	Đạt	23,52	Đạt
Nứt mỗi từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25,0	1,69	Đạt	1,65	Đạt	1,66	Đạt
Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	189,4	5,15	Đạt	5,15	Đạt	5,15	Đạt
Nứt mỗi từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	378,8	300,02	Đạt	240,74	Đạt	257,59	Đạt
Chiều sâu lún vệt bánh trong các lớp BTN (mm)	12,5	13,1	Không đạt	10,97	Đạt	12,9	Không đạt

Bảng 4-15. Các kết quả phân tích KC5 theo phương pháp M-E trường hợp N₀ bằng 9.000 và 10.000 xe/ngđ

Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	Kết cấu – N ₀ (xe/ngđ)			
		KC5 – 9.000		KC5 – 10.000	
		Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	2,7	2,39	Đạt	2,41	Đạt
Tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn KCAĐ (mm)	25,0	24,34	Đạt	25,11	Không đạt
Nứt mỗi từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25,0	1,69	Đạt	1,72	Đạt
Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	189,4	5,15	Đạt	5,15	Đạt
Nứt mỗi từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	378,8	255,41	Đạt	269,67	Đạt
Chiều sâu lún vệt bánh trong các lớp BTN (mm)	12,5	13,61	Không đạt	14,27	Không đạt

Từ các kết quả phân tích kết cấu mặt đường theo M-E sau 15 năm sử dụng có thể rút ra một số kết luận sau:

- ✓ Với cùng chiều dày kết cấu và lưu lượng xe, KCAĐ sử dụng BTNE50 (KC5, KC6) có đặc tính khai thác tốt nhất, KCAĐ sử dụng BTNP (KC1, KC2) có đặc tính khai thác kém nhất. Điều này được thể hiện ở tất cả các chỉ tiêu hư hỏng dự báo của KCAĐ sử dụng BTNE50 đều có giá trị nhỏ nhất.
- ✓ KCAĐ với lớp trên cùng là 4 cm BTNE35 có đặc tính khai thác tương đương

hoặc tốt hơn KCAĐ có lớp trên cùng là 5 cm BTNP. KCAĐ với lớp trên cùng là 4 cm BTNE50 có đặc tính sử dụng tương đương KCAĐ có lớp trên cùng là 5 cm BTNE35. Kết quả này tương tự như kết quả kiểm toán kết cấu áo đường theo 22 TCN 211-06 trong mục 4.2.1.

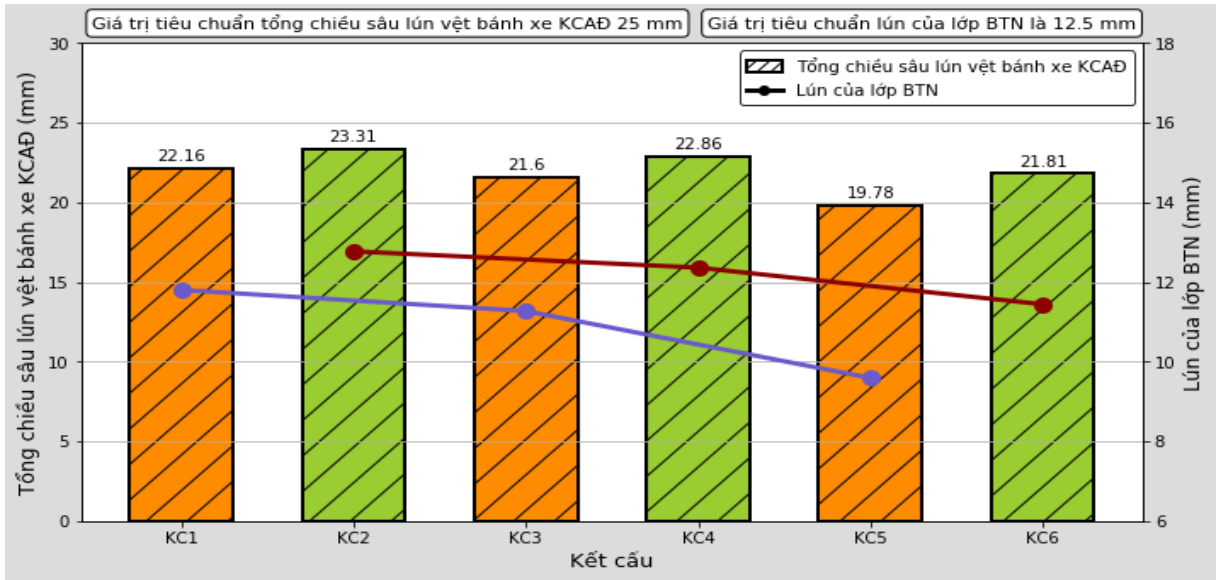
- ✓ Khi chiều dày lớp BTN trên cùng là 5cm, KC1 không đạt yêu cầu khi N_0 bằng 7.000 xe, KC3 không đạt yêu cầu khi N_0 bằng 8.000 xe và KC5 chỉ không đạt yêu cầu khi N_0 lên đến 9.000 xe (**Bảng 4-16**). Như vậy, KCAĐ sử dụng BTNE35 (KC3) hoặc BTNE50 (KC5) dày 5cm có thể đáp ứng tuyến đường có tổng số xe nặng tích lũy cao hơn lần lượt là 14,29% và 28,57% so với sử dụng BTNP (KC1) có chiều dày tương đương.
- ✓ Khi chiều dày lớp BTN trên cùng là 4cm, KC2 không đạt yêu cầu ngay khi N_0 là 5.930 xe (tương đương lưu lượng xe thiết kế QL5 mới), KC4 không đạt yêu cầu khi N_0 đạt 7.000 xe và KC6 chỉ không đạt yêu cầu khi N_0 lên đến 8.000 xe (**Bảng 4-16**). Như vậy, KCAĐ sử dụng BTNE35 (KC4) hoặc BTNE50 (KC6) dày 4cm có thể đáp ứng tuyến đường có tổng số xe nặng tích lũy cao hơn tối thiểu lần lượt là 18,04% và 34,91% so với sử dụng BTNP (KC2) có chiều dày tương đương.
- ✓ Chỉ tiêu lún của lớp BTN là chỉ tiêu không đạt đầu tiên của tất cả các kết cấu trong nghiên cứu. Chỉ tiêu tổng chiều sâu lún KCAĐ là chỉ tiêu không đạt xuất hiện tiếp theo khi tiếp tục tăng lưu lượng xe thử nghiệm **Bảng 4-15**, **Bảng 4-16**.
- ✓ Với N_0 từ 5.930 ÷ 7.000 xe, tổng chiều sâu lún vết bánh xe toàn KCAĐ dự báo sau 15 năm khai thác của KC3 và KC5 thấp hơn so với KC1 lần lượt từ 2,53% ÷ 2,62% và từ 10,74% ÷ 11,02%, chiều sâu lún vết bánh trong các lớp BTN của KC3 và KC5 thấp hơn so với KC1 lần lượt từ 4,41% ÷ 4,49% và 18,73% (**Hình 4-2**).
- ✓ Với N_0 là 5.930 xe, tổng chiều sâu lún vết bánh xe toàn KCAĐ dự báo sau 15 năm khai thác của KC4 và KC6 thấp hơn so với KC2 lần lượt là 1,93% và 6,44%, chiều sâu lún vết bánh trong các lớp BTN của KC4 và KC5 thấp hơn so với KC2 lần lượt là 3,21% và 10,42% (**Hình 4-2**).
- ✓ Nứt do nhiệt và nứt phản ánh của tất cả các kết cấu dự báo sau 15 năm khai thác ở các lưu lượng xe nghiên cứu là không có sự khác biệt, đều có giá trị 5,15 m/km, rất thấp so với giá trị tối đa cho phép (189,4 m/km).
- ✓ Nứt mới từ đáy lên tăng khi lưu lượng xe tăng lên và chiều dày lớp BTN trên

cùng giảm đi. Chỉ tiêu này của tất cả các kết cấu trong nghiên cứu đều có giá trị rất thấp, chỉ bằng từ 6,4% ÷ 6,88% so với giá trị tối đa cho phép. Với cùng một chiều dày lớp mặt và cùng lưu lượng xe, nứt mỗi từ đáy lên của kết cấu sử dụng BTNE50 (KC5 và KC6) là nhỏ nhất và kết cấu sử dụng BTNP (KC1 và KC2) lớn nhất. Tuy nhiên, sự khác biệt không đáng kể chỉ từ 0,61% ÷ 1,77%.

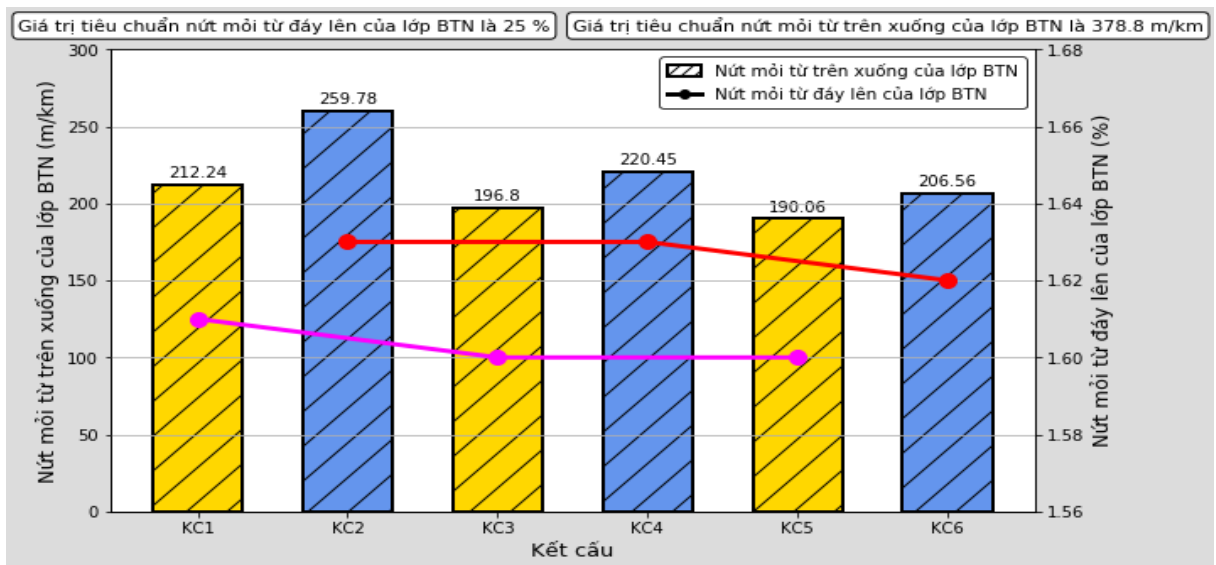
- ✓ Trong khi nứt do nhiệt, nứt mỗi từ đáy lên dự báo sau 15 năm khai thác của các kết cấu đều rất thấp so với giá trị cho phép (dưới 6,88%), thì nứt của lớp BTN từ trên xuống lại có giá trị tương đối lớn (từ 50,17% ÷ 79,2% so với giá trị tối đa cho phép) **Hình 4-3**. Với N_0 bằng 5.930, hư hỏng nứt từ trên xuống dự báo của KC3 và KC5 giảm lần lượt 7,27% và 10,45% so với KC1. Nhưng khi N_0 lên đến 7.000 xe, thì hư hỏng nứt từ trên xuống dự báo của KC3 và KC5 giảm đến 20,17% và 23,66% so với KC1. Điều này một lần nữa cho thấy khả năng đáp ứng tốt cho tuyến đường có lưu lượng xe lớn của BTNE.

Bảng 4-16. Tổng hợp kết quả phân tích kết cấu theo phương pháp M-E

Kết cấu	Lưu lượng xe tải trung bình ngày đêm năm đầu khai thác (N_0) (xe/ngđ)				
	5.930 (QL5 mới)	7.000	8.000	9.000	10.000
KC1	Đạt	Không đạt (Lún của lớp BTN)	-	-	-
KC2	Không đạt (Lún của lớp BTN)	-	-	-	-
KC3	Đạt	Đạt	Không đạt (Lún của lớp BTN)	-	-
KC4	Đạt	Không đạt (Lún của lớp BTN)	-	-	-
KC5	Đạt	Đạt	Đạt	Không đạt (Lún của lớp BTN)	Không đạt (Lún của lớp BTN và tổng chiều sâu lún của KCAĐ)
KC6	Đạt	Đạt	Không đạt (Lún của lớp BTN)	-	-



Hình 4-2. Dự báo lún của KCAĐ khi N_0 là 5.930 xe/ngđ theo phương pháp M-E



Hình 4-3. Dự báo nứt môi của KCAĐ khi N_0 là 5.930 xe theo phương pháp M-E

Như vậy, khi sử dụng lớp mặt đường BTNE đặc biệt là BTNE50 thay thế lớp BTNP để đặt trên lớp mặt dưới là BTNC19, móng trên bằng hỗn hợp ATB sử dụng bitum 60/70 và móng dưới là cấp phối đá dăm đạt được sự cải thiện đáng kể khả năng kháng lún và nứt của KCAĐ.

4.2.3. Phân tích sơ bộ chi phí xây dựng KCAĐ khi sử dụng BTNE đối chứng với BTNP

Để phân tích, so sánh sơ bộ chi phí xây dựng (CPXD) của KCAĐ có sử dụng BTNE với BTNP, dùng các KCAĐ là kết quả xác định chiều dày lớp BTNP, BTNE35, BTNE50 trong KCAĐ có cấu tạo các lớp phía dưới giống KCAĐ của QL5 mới cho tuyến đường có quy mô giao thông lớn được quy định trong 858/QĐ-BGTVT (tổng số trục xe tích lũy trong thời hạn thiết kế $N_e = 5.10^6$

trục/lần xe, thời hạn thiết kế giả định 15 năm, hệ số tăng trưởng giả định 5%, xác định được lưu lượng tính toán $N_{tt}=1.257$ trục/lần.ngày đêm) theo 22 TCN 211 – 06 đã được thể hiện trong **Bảng 4-4**. Các kết cấu chỉ khác nhau lớp trên cùng cụ thể như sau: lớp BTNP dày 6,5 cm, lớp BTNE35 dày 5,5 cm và lớp BTNE50 dày 5 cm.

Chi phí xây dựng được xác định bằng phương pháp phân tích đơn giá (sử dụng định mức được ban hành theo quyết định 1776 /BXD-VP năm 2007 của Bộ Xây dựng). Trong đó đơn giá đầu vào vật liệu, nhân công, máy được lấy như sau:

- Đơn giá vật liệu được lấy theo thông báo giá số 02/2019/CBGVL-SXD, ngày 01/6/2019 của UBND thành phố Hà Nội. Riêng giá bitum 60/70 và PMB III được lấy theo công văn số 283^A/CV-PLC.NĐ-TT của công ty TNHH nhựa đường Petrolimex Việt Nam. Giá dầu diezen, dầu bảo ôn theo thông cáo số 25/2019/PLX-TCBC của Petrolimex – tập đoàn xăng dầu Việt Nam. Đơn giá epoxy do công ty Taiyu Kensetsu cung cấp.
- Đơn giá ca máy được lấy theo quyết định số 689/QĐ-UBND ngày 09/02/2017 của thành phố Hà Nội. Vì khi sản xuất BTNE, trạm trộn sẽ phải có thêm bộ phận chứa 2 thành phần của epoxy và thiết bị trộn bitum với epoxy nên chi phí trạm trộn dùng để tính chi phí xây dựng cho BTNE tạm nhân hệ số 1,2.
- Đơn giá nhân công được lập theo thông tư số 05/2016/TT-BXD ngày 10/3/2016 của Bộ Xây dựng.

Chi phí chung, thu nhập chịu thuế tính trước được lấy theo nghị định số 68/2019/NĐ-CP của Chính phủ về quản lý chi phí đầu tư xây dựng.

Chi tiết tính toán được thể hiện trong phụ lục 11. Tổng hợp kết quả tính chi phí xây dựng được thể hiện trong **Bảng 4-17**.

Bảng 4-17. Bảng tổng hợp chi phí xây dựng

Lớp vật liệu	Đơn vị	Chi phí xây dựng tương ứng loại lớp mặt		
		BTNP dày 6,5cm	BTNE35 dày 5,5cm	BTNE50 dày 5cm
BTNP	đ/m ²	315.639		
BTNE35	đ/m ²		892.071	
BTNE50	đ/m ²			1.069.168
BTNC19	đ/m ²	221.546	221.546	221.546
ATB25	đ/m ²	598.458	598.458	598.458
Cấp phối đá dăm loại 1	đ/m ²	180.547	180.547	180.547
Chi phí xây dựng của KCAD	đ/m²	1.316.191	1.892.623	2.069.720

Kết quả CPXD trong **Bảng 4-17** cho thấy: KCAĐ tính theo tiêu chuẩn 22 TCN 211 – 06 cho tuyến đường có quy mô giao thông lớn khi sử dụng BTNE50 và BTNE35 làm lớp mặt sẽ có CPXD ban đầu lớn hơn tương đối nhiều so với sử dụng BTNP (gấp 1,57 và 1,44 lần); CPXD ban đầu của kết cấu sử dụng BTNE50 cao hơn không nhiều (chỉ gấp 1,09 lần) so với sử dụng BTNE35. CPXD ban đầu cao là một điểm trừ tương đối lớn của BTNE.

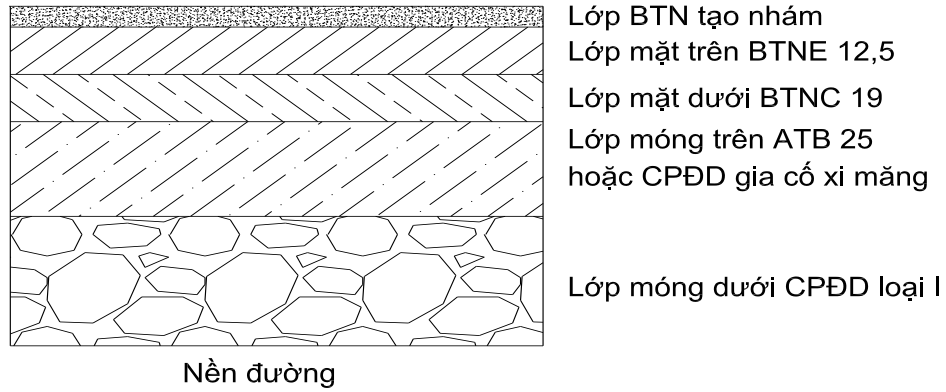
4.2.4. **Đề xuất cấu tạo KCAĐ mềm áp dụng cho đường ô tô có quy mô giao thông lớn ở Việt Nam**

Kết cấu áo đường thiết kế trên các đường cao tốc, đường ô tô có quy mô giao thông lớn và đường ô tô nói chung phụ thuộc vào: Số năm khai thác, tải trọng trục và số trục tiêu chuẩn tích lũy tác dụng lên mặt đường từ khi đưa đường vào sử dụng tới cuối thời kỳ khai thác; Tình hình đất nền đường và vật liệu làm lớp móng trong kết cấu mặt đường; Điều kiện khí hậu địa phương; Công nghệ khai thác bảo dưỡng,...

Dựa trên cơ sở tổng hợp, đánh giá chất lượng khai thác KCAĐ điển hình trên các tuyến đường cấp cao ở Việt Nam gần đây và kết quả phân tích một số KCAĐ có sử dụng lớp mặt là BTNP, BTNE theo tiêu chuẩn 22 TCN 211 – 06 và theo phương pháp M-E cũng như kết quả tính sơ bộ Chi phí Xây dựng, tác giả đề xuất kết cấu định hình sử dụng cho đường ô tô có quy mô giao thông lớn như **Hình 4-4** với cấu tạo như sau:

- **Tầng mặt:** gồm lớp BTN tạo nhám có chiều dày khoảng 3 cm (lớp này chỉ được sử dụng trong trường hợp $V_{tk} \geq 80$ km/h), lớp mặt trên BTNE 12,5 dày $5 \div 6$ cm nếu dùng BTNE35, dày $4 \div 5$ cm nếu dùng BTNE50 và lớp mặt dưới BTNC 19 dùng bitum 60/70 dày $6 \div 8$ cm. Giữa các lớp BTN được tưới nhựa dính bám từ $0,5 \div 1,3$ kg/m² để đảm bảo dính bám giữa các lớp.
- **Tầng móng:** gồm lớp móng trên và móng dưới.
 - Lớp móng trên: sử dụng lớp ATB 25 hoặc lớp CPĐĐ gia cố xi măng
 - Lớp móng dưới: sử dụng CPĐĐ loại 1

Kết cấu móng lựa chọn loại vật liệu và chiều dày dựa trên cơ sở điều kiện cụ thể và tính toán cường độ theo các tiêu chuẩn thiết kế và các nhà đầu tư sẽ lựa chọn kết cấu phù hợp.



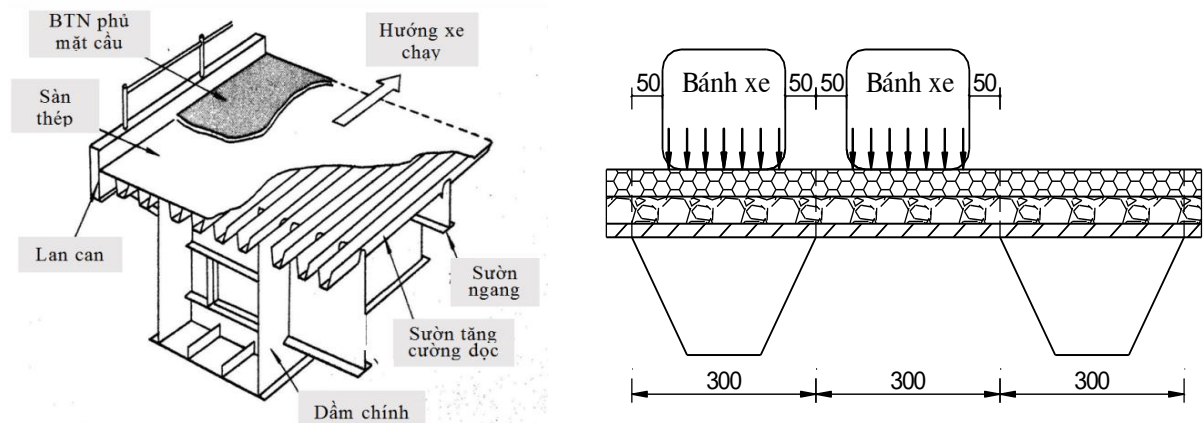
Hình 4-4. KCAD đề xuất cho đường ô tô có quy mô giao thông lớn ở Việt Nam

4.3. Nghiên cứu ứng dụng BTNE làm lớp phủ mặt cầu thép bản trực hướng

Cầu thép bản trực hướng, với sự linh hoạt vốn có của nó đã đặt ra thách thức đặc biệt khi lựa chọn kết cấu lớp phủ mặt cầu: Phải tính đến biến dạng lớn của mặt cầu; độ ổn định, mức độ kín nước của lớp phủ; trọng lượng của lớp phủ; khả năng kháng môi dưới tải trọng giao thông lớn; cũng như khả năng kháng trượt.

4.3.1. Lớp phủ mặt cầu trên cầu thép bản trực hướng

Sự làm việc của lớp phủ BTN trên mặt cầu thép bản trực hướng dưới tác dụng của tải trọng xe chạy và các điều kiện về môi trường là rất phức tạp. Kết cấu bản mặt cầu thép có cấu tạo hình học đặc biệt và các tấm bản thép có độ đàn hồi gây ứng suất và biến dạng lớn trong lớp phủ mặt cầu.



a) Cấu tạo bản mặt cầu thép

b) Sơ đồ xếp tải trọng bánh xe

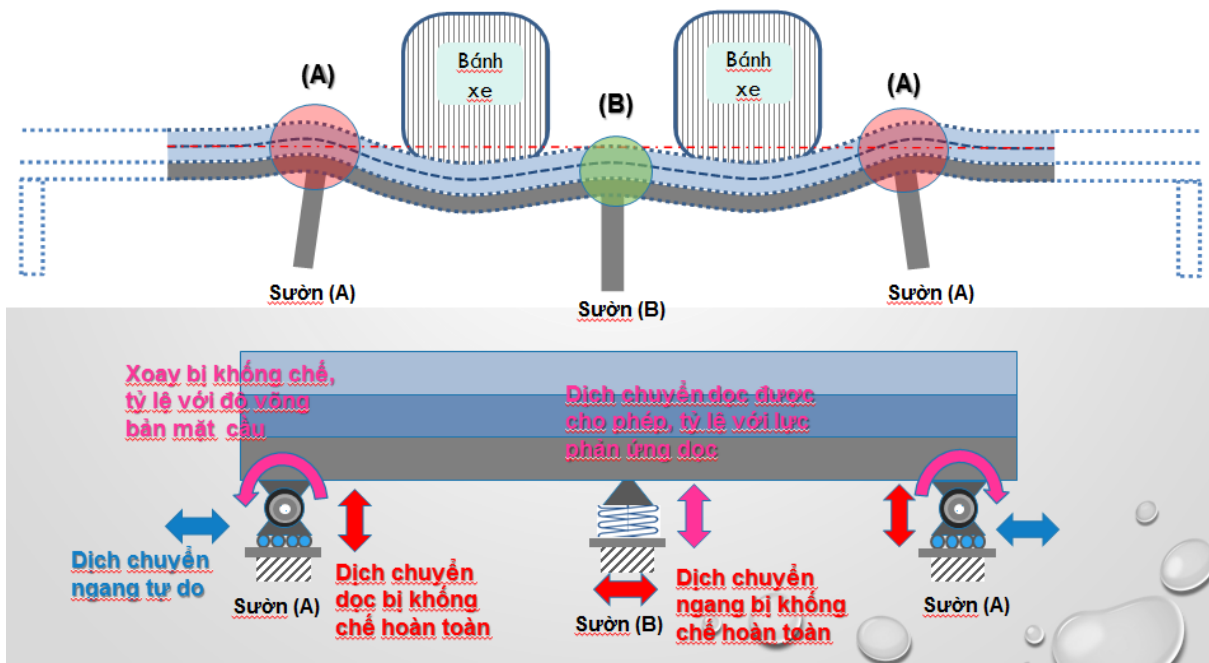
Hình 4-5. Bản cầu thép trực hướng [60]

BTN trên mặt cầu thép bản trực hướng, ngoài chức năng tạo bề mặt bằng phẳng và khả năng kháng trượt tốt, còn phải có các chức năng riêng biệt khác. Lớp BTN này phải đảm bảo kín nước để đóng vai trò lớp phòng nước, phải đủ độ đàn

hồi để chịu được các trạng thái ứng suất-biến dạng xuất hiện trong lớp này dưới tác dụng của hoạt tải phân bố, vốn rất khác so với lớp phủ của mặt đường mềm thông thường. Ngoài ra do các vết bánh xe có chiều hướng cố định ở 1 vị trí (xe chạy đúng làn) nên yêu cầu chống lún vết bánh xe và nứt do mỏi cũng là chỉ tiêu rất quan trọng trong việc chọn loại vật liệu áp dụng trên mặt cầu.

4.3.2. Sơ đồ nghiên cứu ứng suất biến dạng của mặt cầu thép bản trực hướng

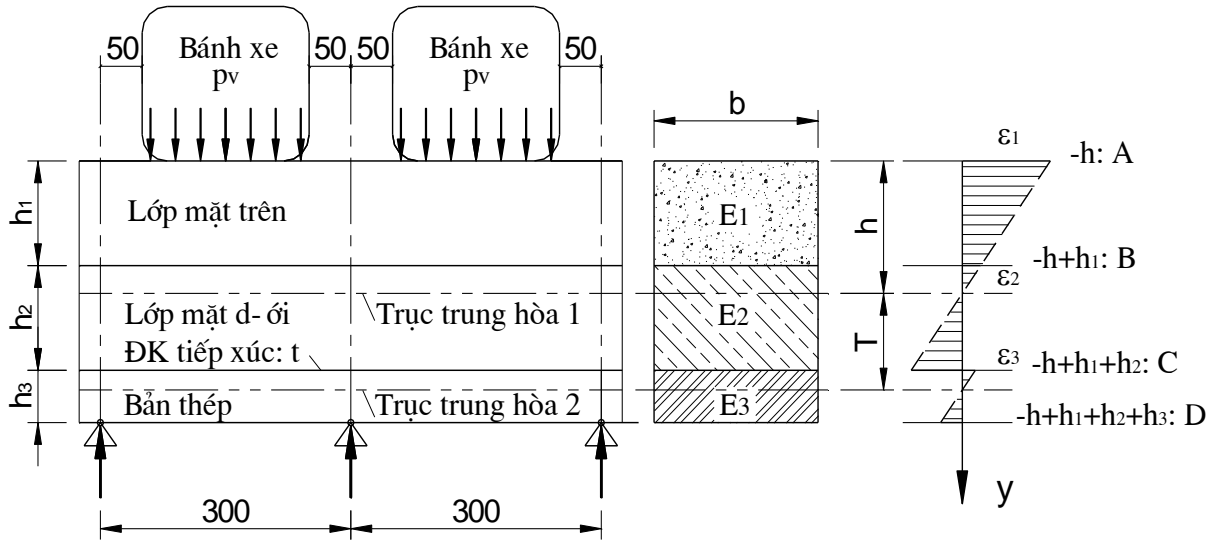
Theo Hiromitsu Nakanishi [60] sơ đồ nghiên cứu hệ bản mặt cầu là hệ dầm 3 lớp liên tục, trong đó 2 lớp phủ mặt trên là BTN, lớp dưới là bản thép dày 12mm ÷ 14mm được tăng cường bằng các sườn thép. Các gối của hệ dầm liên tục chính là các sườn tăng cường, tải trọng bánh xe kép 50 kN tác dụng chính giữa dầm (Hình 4-6, Hình 4-7). Điều kiện liên kết giữa các lớp từ dính chặt $t = 1$ đến chuyển dịch tự do $t = 0$.



Hình 4-6. Mô hình hóa ứng xử của hệ sườn thép và lớp phủ mặt cầu trong cầu thép bản trực hướng [60]

Sườn B được mô phỏng là một gối đàn hồi, tại vị trí này không có góc xoay và không có dịch chuyển theo phương ngang

Sườn A được mô phỏng là một gối di động có góc xoay bị khống chế phụ thuộc vào độ võng của bản mặt cầu



Hình 4-7. Sơ đồ nghiên cứu ứng suất, biến dạng

Khi hệ số dính bám $t = 0$ lớp BTN dưới hoàn toàn không liên kết với bản thép, lúc này tồn tại 2 trục trung hòa và sự phân phối biến dạng theo giả thiết của Bernoulli-Euler. Khoảng cách từ trục trung hòa thứ 1 đến lớp mặt trên (surface course) khi $t=0$ là h_0 được tính theo công thức 4-1, thông số như **Hình 4-7**.

$$h_0 = \frac{h_1}{2} \left(\frac{1 + 2\alpha\gamma + \alpha\gamma^2}{1 + \alpha\gamma} \right) \quad (4-1)$$

trong đó $\alpha = \frac{E_2}{E_1}$; $\gamma = \frac{h_2}{h_1}$

Khoảng cách giữa 2 trục trung hòa T được tính theo công thức 4-2:

$$T = (1-t) \left(h_1 + h_2 - h_0 + \frac{h_3}{2} \right) \quad (4-2)$$

Phạm vi khảo sát hệ số dính bám $t=1,0; 0,8; 0,5$ và 0 tùy từng trường hợp.

Vị trí h của trục trung hòa thứ nhất theo công thức 4-3:

$$h = \frac{h_1}{2} \left(\frac{1 + 2\alpha\gamma + \alpha\gamma^2 + 2\beta\omega + \beta\omega^2 - 2\frac{\beta\omega T}{h_1}}{1 + \alpha\gamma + \beta\omega} \right) \quad (4-3)$$

trong đó: $\beta = \frac{E_3}{E_1}$; $\omega = \frac{h_3}{h_1}$

Mô men quán tính J được xác định theo công thức:

$$J = \frac{b}{3} \left[(B^3 - A^3) + \alpha(C^3 - B^3) + \beta(D^3 - C^3) - 3\beta T(D^2 - C^2) + 3\beta T^2(D - C) \right] \quad (4-4)$$

với $A = -h$; $B = -h+h_1$; $C = -h+h_1+h_2$; $D = -h+h_1+h_2+h_3$

Biến dạng trên bề mặt của hệ dầm hỗn hợp (sàn thép và lớp phủ mặt cầu) được xác định bằng công thức:

$$\varepsilon_x = \frac{M}{E_1 J} y = \frac{M}{E_1 J} A \quad (4-5)$$

với M là mô men uốn do tải trọng bánh xe.

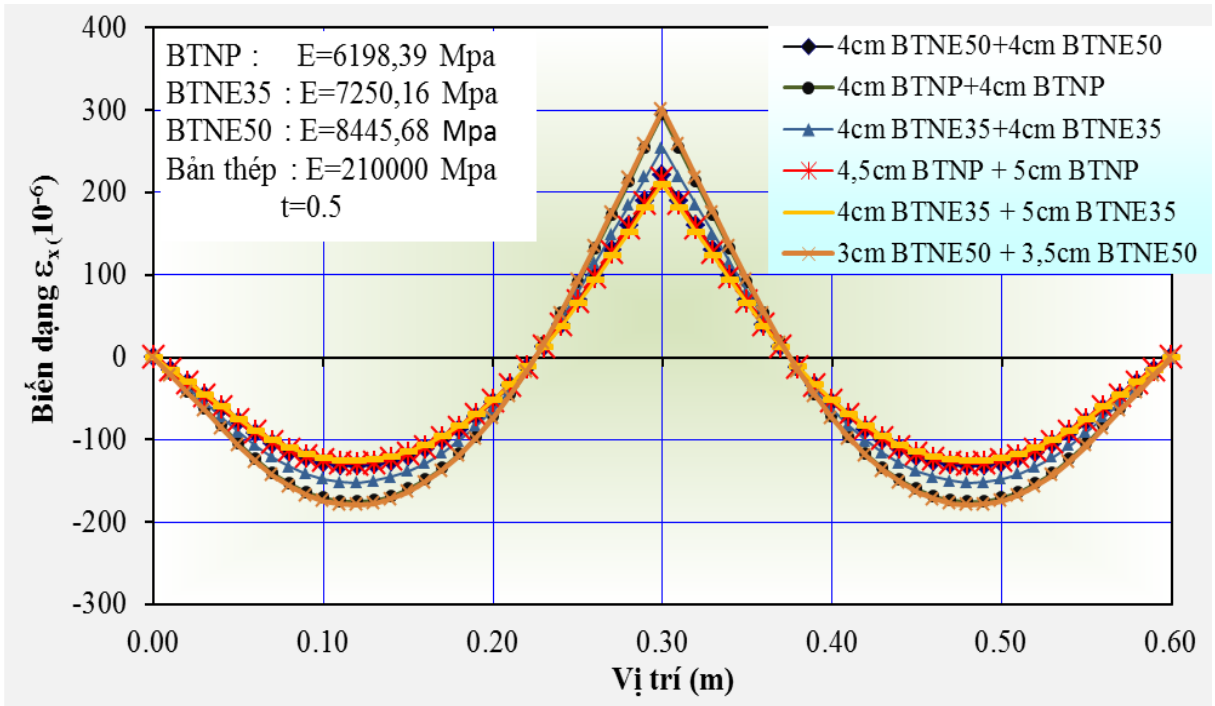
4.3.3. *Kết quả tính toán trạng thái ứng suất biến dạng của hệ dầm thép và lớp phủ mặt cầu trong cầu thép bản trực hướng*

Từ các công thức 4.1 đến 4.5 tác giả tiến hành khảo sát trạng thái ứng suất biến dạng trong kết cấu phụ thuộc vào tải trọng nhằm tìm ra được kết cấu thích hợp nhất và chứng minh được sự ưu việt khi sử dụng BTNE thay thế BTNP làm lớp phủ mặt cầu cho cầu thép bản trực hướng.

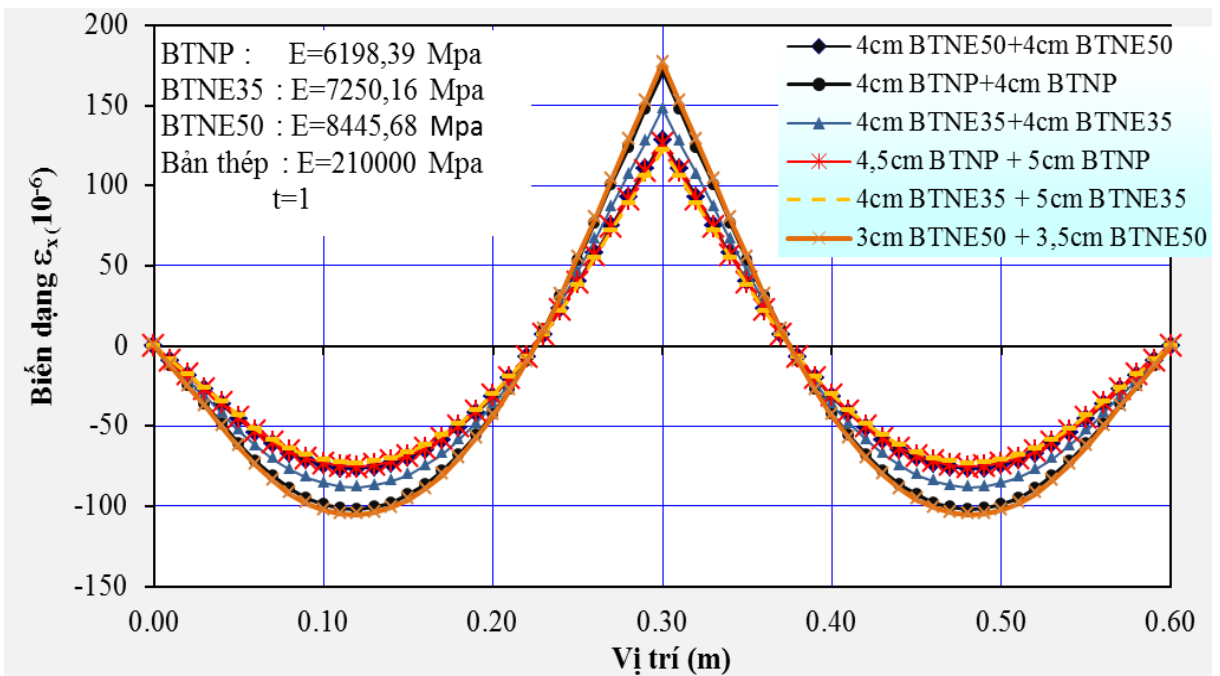
Bảng 4-18. Các thông số khảo sát

Thông số	Đơn vị	Khoảng giá trị
Tải trọng bánh xe tính toán	kN	$P_v = 2 \times 25$
Chiều dày lớp mặt trên (surface course) h_1	cm	4; 4,5; 5
Chiều dày lớp mặt dưới (protection course) h_2	cm	4; 5
Mô đun ĐH lớp mặt trên và dưới (E_1, E_2) (lấy theo kết quả thực nghiệm trong Chương 3)		
- BTNP	MPa	6198,39
- BTNE35		7250,16
- BTNE50		8445,62
Chiều dày h_3 ; Mô đun E_3 của bản thép	cm; MPa	$h_3 = 1,2$; $E_3 = 210\ 000$
Điều kiện tiếp xúc giữa lớp BTN dưới với bản mặt thép (hệ số dính bám) t		0; 0,5; 0,8; 1

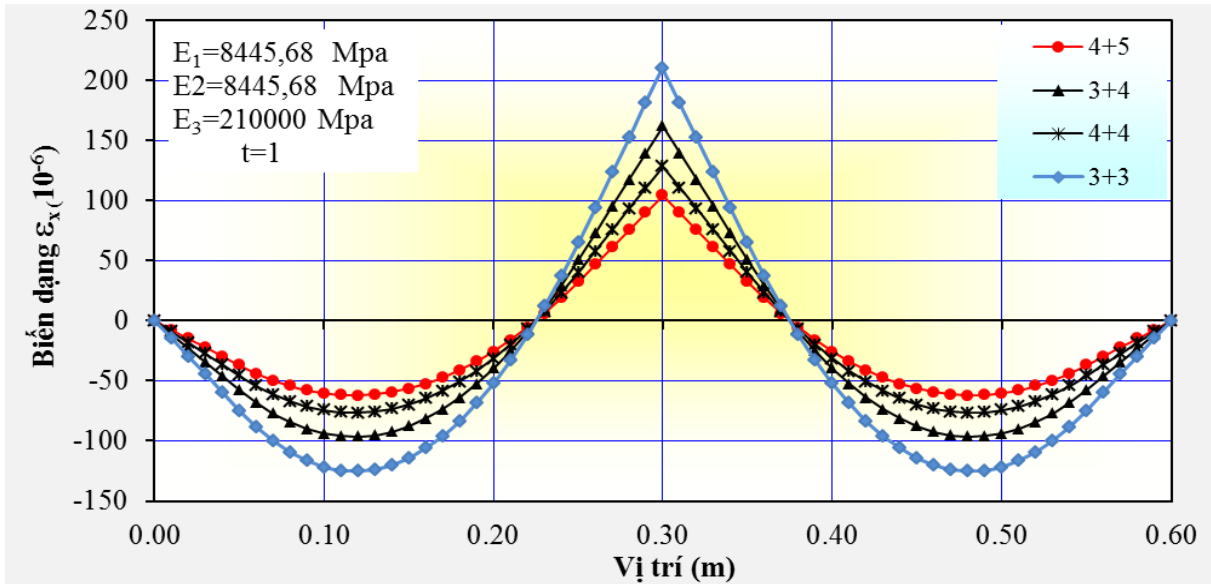
Kết quả chi tiết xác định biến dạng trên bề mặt của hệ dầm hỗn hợp (sàn thép và lớp phủ mặt cầu) được thể hiện trong phụ lục 12 và từ Hình 4-8 đến Hình 4-11



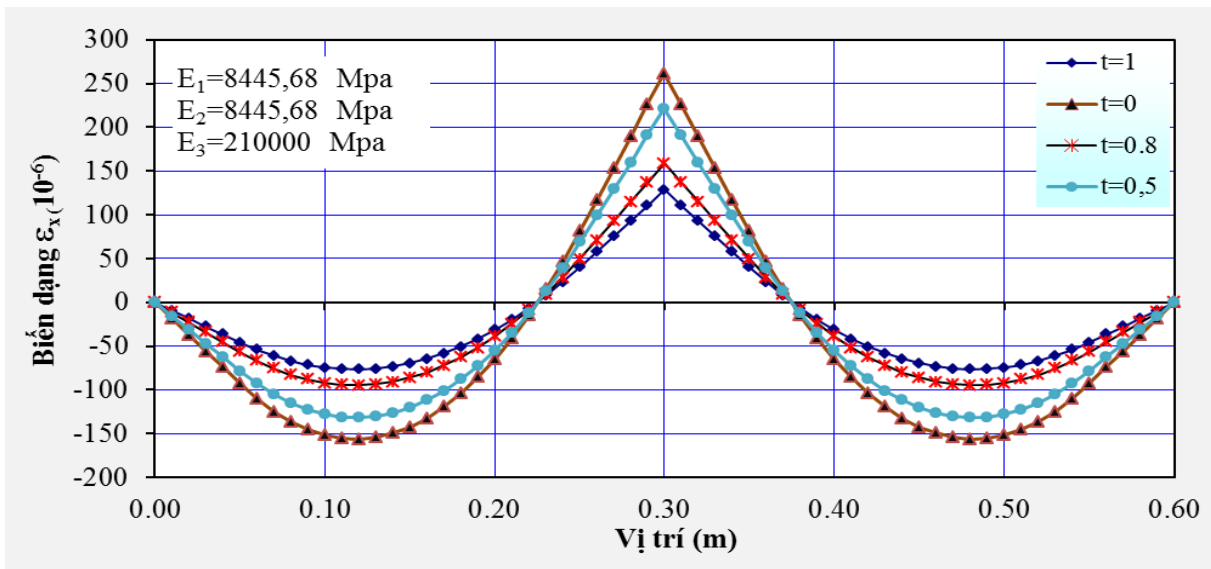
Hình 4-8. Biểu đồ biến dạng của tổ hợp các kết cấu khi $t=0,5$



Hình 4-9. Biểu đồ biến dạng của tổ hợp các kết cấu khi $t=1$



Hình 4-10. Biểu đồ biến dạng phụ thuộc vào chiều dày các lớp của kết cấu sử dụng BTNE50, trong điều kiện tiếp xúc hoàn toàn ($t=1$)



Hình 4-11. Biểu đồ biến dạng phụ thuộc vào điều kiện tiếp xúc của kết cấu 4cm BTNE50 + 4cm BTNE50

Bình luận kết quả

Từ biểu đồ **Hình 4-8**, **Hình 4-9** thể hiện biến dạng trên bề mặt của các tổ hợp kết cấu 2 lớp và điều kiện tiếp xúc $t=0,5$ và $t=1$ có thể rút ra hai nhận xét sau:

- Với cùng chiều dày lớp trên và lớp dưới 4cm, kết quả tổ hợp 4cm BTNE50 + 4cm BTNE50 cho ϵ_x là nhỏ nhất sau đó đến các tổ hợp 4cm BTNE35 + 4cm BTNE35 và 4cm BTNP + 4cm BTNP. Như vậy tổ hợp 2 lớp BTNE50 thích hợp nhất khi sử dụng trên bản mặt cầu thép.
- Tổ hợp 3cm BTNE50 + 3,5cm BTNE50 có ϵ_x tương đương tổ hợp 4cm BTNP + 4cm BTNP; tổ hợp 4cm BTNE50 + 4cm BTNE50 có ϵ_x tương đương tổ hợp

4,5cm BTNP + 5cm BTNP. Như vậy khi sử dụng BTNE50 chiều dày lớp phủ giảm 15,79 - 18,75% so với sử dụng BTNP, điều này rất có ý nghĩa trong thiết kế lớp phủ mặt cầu do giảm được tĩnh tải.

Biểu đồ **Hình 4-10** tổng hợp mối quan hệ giữa chiều dày các lớp và biến dạng trên bề mặt của kết cấu với điều kiện tiếp xúc $t=1$. Khi chiều dày tăng thì biến dạng giảm và ngược lại, nhưng vì tính kinh tế và làm tăng tĩnh tải cầu nên không thể tăng chiều dày lớn mà phải sử dụng lớp vật liệu có cường độ cao, khả năng chịu kéo lớn.

Biểu đồ **Hình 4-11** thể hiện biến dạng trên bề mặt của kết cấu phụ thuộc vào điều kiện tiếp xúc, kết quả cho thấy khi liên kết giữa bản thép và lớp BTNE50 không tốt sẽ xuất hiện ứng suất kéo rất lớn trên bề mặt.

Từ các kết quả phân tích trạng thái biến dạng trên bề mặt cầu thép cho thấy, điểm xuất hiện ϵ_x kéo lớn nhất luôn luôn ở vị trí gân sườn tăng cường giữa, nếu kết cấu mặt cầu có khả năng chịu kéo kém sẽ phát sinh nứt dẫn đến phá hoại. Biến dạng của lớp mặt cầu thép phụ thuộc rất lớn vào chiều dày, mô đun đàn hồi lớp và điều kiện liên kết với bản thép. Khi chiều dày lớn, sử dụng vật liệu có cường độ cao và liên kết tốt với bản thép thì biến dạng trong lớp mặt nhỏ và ngược lại.

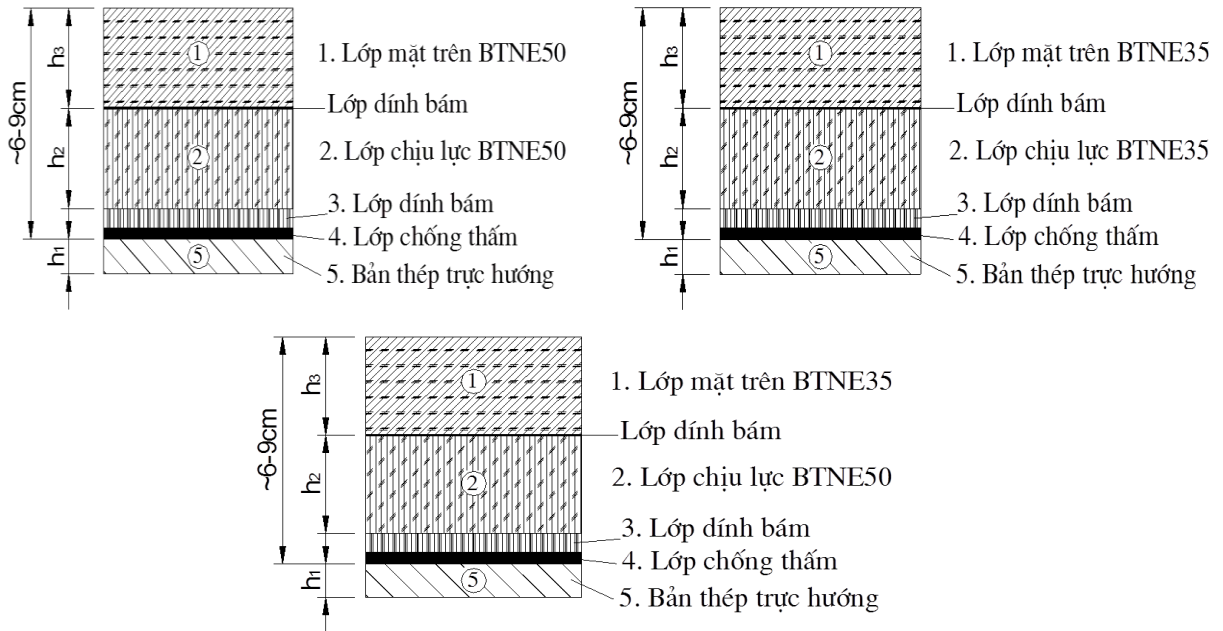
Mô hình nghiên cứu theo sơ đồ **Hình 4-7** còn chưa xét được ảnh hưởng của điều kiện liên kết giữa các lớp BTN mà đang coi liên kết giữa các lớp BTN là dính chặt hoàn toàn. Khi các lớp này không hoàn toàn dính chặt thì ứng suất và biến dạng trong các lớp BTN sẽ tăng lên rất nhiều.

Những nghiên cứu thực nghiệm và ứng dụng thực tế trên thế giới [18], [22], [33], [36], [40], [51] cũng cho thấy vật liệu BTNE có tuổi thọ mỏi hơn hẳn so với những loại BTN khác khi sử dụng trên bản mặt cầu thép trục hướng, nhất là khi kết hợp sử dụng BE làm lớp dính bám giữa lớp BTNE với mặt thép, rõ ràng đây là ưu điểm của BTNE.

Tổng kết những phân tích ở trên cho thấy, so với BTNP, BTNE đặc biệt là BTNE50 có ưu điểm vượt trội về khả năng chịu kéo, chịu cắt trượt, tuổi thọ mỏi cao, giảm tĩnh tải do giảm được chiều dày nên rất thích hợp để sử dụng trên mặt cầu thép.

4.3.4. Đề xuất các kết cấu sử dụng BTNE trên mặt cầu thép bản trục hướng

Qua các phân tích ứng suất, biến dạng và tổng hợp các kết quả nghiên cứu thực nghiệm tác giả đề xuất các kết cấu lớp phủ mặt cầu thép bản trục hướng như **Hình 4-12**.



Hình 4-12. Các kết cấu đề xuất sử dụng trên mặt cầu thép

$h_1=1,2-1,4$ cm;

$h_2=3,0-5,0$ cm;

$h_3=3,0-4,0$ cm;

Trong đó:

- Lớp dính bám giữa bản thép và lớp BTNE là bitum epoxy (BE) hàm lượng $0,4 \text{ kg/m}^2$ hoặc bitum cao su (Rubberised Bitum) quét 2 lần $0,2 \text{ l/m}^2/\text{lớp}$;
- Lớp chống thấm: Là loại vật liệu chống thấm cấu tạo bởi lưới sợi cường độ cao có khả năng chống chọc thủng tốt, chịu nhiệt được. Đây là loại màng tự dính và được thi công ở nhiệt độ thường. Kết cấu vật liệu kết hợp bằng bitum cao su hóa dẻo có tính tự dính cao, cung cấp khả năng dính bám tốt và khả năng truyền được lực do hãm xe xuống phía lớp dưới. Nếu sử dụng lớp BE làm lớp dính bám thì có bỏ qua lớp chống thấm vì BE có thể đảm nhận được cả vai trò của lớp chống thấm.
- Giữa các lớp BTNE cần quét 1 lớp dính bám bằng BE $0,3 \div 0,4 \text{ kg/m}^2$.

Mặt cầu thép cần được làm vệ sinh sạch sẽ bằng phun cát và được sơn một lớp bảo vệ Epoxy giàu kẽm. Trước khi thi công lớp chống thấm mặt cầu, cần vệ sinh lại sạch sẽ bề mặt bằng vòi phun nước áp lực cao và phải sấy khô hoàn toàn bề mặt trước khi quét lớp dính bám.

4.4. Kết luận chương 4

Từ các kết quả tính toán KCAĐ mềm theo 22 TCN 211-06, phân tích các KCAĐ theo phương pháp M-E và tính toán ứng suất-biến dạng trên bề mặt lớp phủ mặt cầu thép bản trực hướng có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Tính toán thiết kế KCAĐ mềm theo 22 TCN 211-06 cho thấy có thể giảm chiều dày lớp mặt bằng BTNE so với các phương án sử dụng BTNP. Cụ thể là khi sử dụng BTNE thay thế BTNP cho QL5 mới ($E_{yc}=191$ MPa), chiều dày lớp mặt sẽ giảm xuống 20%; với tuyến đường có quy mô giao thông lớn, khi các lớp phía dưới giống hệt KCAĐ QL5 mới, chiều dày lớp mặt giảm 30% và 18,18% so với sử dụng lớp BTNP khi sử dụng BTNE50 và BTNE35.
- Phân tích KCAĐ mềm theo phương pháp M - E cho thấy ưu điểm về khả năng kháng lún và nứt của các KCAĐ mềm có lớp mặt trên là BTNE so với phương án sử dụng BTNP, đặc biệt là BTNE50. KCAĐ mềm có sử dụng BTNE35 hoặc BTNE50 dày 4 ÷ 5 cm có thể đáp ứng tuyến đường có tổng số xe nặng tích lũy cao hơn so với sử dụng BTNP có chiều dày tương đương (tối thiểu lần lượt là 14,29 % và 28,57% trong trường hợp có lớp mặt dưới và móng giống KCAĐ QL5 mới).
- So với BTNP, BTNE đặc biệt là BTNE50 thích hợp hơn nhiều để sử dụng trên mặt cầu thép bản trực hướng do có ưu điểm vượt trội về khả năng chịu kéo, chịu cắt trượt, tuổi thọ mỏi cao và giảm được tĩnh tải do giảm được chiều dày lớp phủ.
- Trong chương này, các kết cấu đề xuất cho đường cao tốc, đường có lưu lượng xe lớn và lớp phủ cầu thép bản trực hướng đã được đưa ra, tuy nhiên các kết cấu cần được nghiên cứu thử nghiệm cẩn thận trước khi ứng dụng rộng rãi.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. KẾT LUẬN

Nghiên cứu theo hướng kế thừa và ứng dụng các thành tựu về vật liệu và công nghệ mới vào Việt Nam trong thời kỳ hội nhập là cần thiết. Bằng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp thực nghiệm trong phòng, trên loại vật liệu được lựa chọn, với các thiết bị thí nghiệm hiện đại, số mẫu thử hợp lý, số liệu thí nghiệm được phân tích thống kê, mô phỏng và phân tích tổ hợp kết cấu áo đường bằng phương pháp thiết kế và phần mềm thiết kế kết cấu áo đường hiện đại, luận án đã có một số đóng góp về mặt khoa học và thực tiễn như sau:

1. Bằng thực nghiệm đề xuất hàm lượng epoxy tối thiểu nên sử dụng là 35% khối lượng BE. Đã chứng minh được tính khả thi trong việc sử dụng BE làm chất kết dính cho BTNE trong điều kiện thi công thông thường ở Việt Nam.
2. Đã chứng tỏ BTNE, đặc biệt là BTNE50 có ưu điểm hơn so với BTNP về cường độ và các chỉ tiêu khai thác như độ ổn định Marshall, mô đun đàn hồi tĩnh, mô đun đàn hồi động, cường độ kéo uốn, khả năng kháng lún vệt bánh, khả năng kháng môi.
3. Xây dựng được phương trình hồi quy bậc 2 quan hệ giữa hàm độ kim lún (Pe), hàm nhiệt độ hóa mềm (SP) với các biến hàm lượng epoxy (BE) và thời gian bảo dưỡng (T)
4. Xây dựng được phương trình đặc trưng mỗi của BTNE35, BTNE50 và BTNP sử dụng PMBIII có cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm.
5. Xây dựng các đường cong chủ $|E^*|$ của BTNE35, BTNE50 và BTNP ở nhiệt độ tham chiếu 30⁰C. Bước đầu chỉ ra khả năng ứng dụng mô hình lưu biến 2S2P1D để mô hình hóa mô đun động $|E^*|$ của BTNE.
6. Đề xuất một số KCAĐ mềm cấp cao với lớp mặt sử dụng BTNE và bước đầu chứng minh đây là một giải pháp tốt để giảm chiều dày cũng như cải thiện tuổi thọ của KCAĐ sử dụng cho đường có quy mô giao thông lớn.
7. Đề xuất kết cấu lớp phủ mặt cầu thép bản trực hướng và bước đầu cũng đã chứng minh tính ưu việt của kết cấu sử dụng BTNE đặc biệt là BTNE50.

II. NHỮNG HẠN CHẾ

Đề tài luận án còn một số hạn chế sau:

- Các nghiên cứu của luận án mới thực hiện ở trong phòng thí nghiệm và sử dụng các mô hình dự báo mà chưa có điều kiện thực nghiệm ở hiện trường;

- Nghiên cứu mới chỉ thực nghiệm với một loại epoxy có nguồn gốc từ Nhật Bản, mới chỉ sử dụng một nguồn cốt liệu đá dăm ở mỏ đá Sunway, xã Phú Lãm, huyện Quốc Oai, Hà Nội, chưa phổ quát cho điều kiện Việt Nam;
- Các phân tích kinh tế mới dừng lại ở tính chi phí xây dựng đối với kết cấu áo đường có sử dụng BTNE và kết cấu đối chứng với BTNP mà chưa có phân tích về chi phí vòng đời để cho thấy hiệu quả kinh tế của BTNE.
- Luận án mới chỉ tập trung nghiên cứu về thành phần, những đặc tính cơ học vật liệu, tiêu chuẩn kỹ thuật, khả năng ứng dụng của BTNE mà chưa nghiên cứu xây dựng quy trình công nghệ thi công BTNE.

III. KIẾN NGHỊ

- Từ các kết quả nghiên cứu trong phòng và phân tích cơ học - thực nghiệm các KCAĐ mềm, kiến nghị tiếp tục nghiên cứu ứng dụng BTNE ở hiện trường;
- Kiến nghị tiếp tục đánh giá tính khả thi của KCAĐ mềm có lớp mặt BTNE cho đường ô tô cấp cao có quy mô giao thông lớn và kết cấu lớp phủ mặt cầu thép có sử dụng BTNE ở Việt Nam.

IV. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Các hướng nghiên cứu tiếp theo sau đây đối với BTNE để tiếp tục khẳng định ưu thế của vật liệu này không chỉ về cường độ mà còn về độ bền của nó trong phạm vi ứng dụng đề xuất, bao gồm:

- Nghiên cứu thử nghiệm ở hiện trường và đo biến dạng dưới đáy các lớp KCAĐ mềm. Phân tích các kết quả thực nghiệm và so sánh với các kết quả tính toán theo lý thuyết;
- Nghiên cứu, đánh giá các chỉ tiêu cơ lý của các loại BE kể cả BE0 ở nhiều hơn các điều kiện bảo dưỡng khác nhau về nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng.
- Tiếp tục các nghiên cứu, đánh giá BTNE sử dụng chất kết dính BE15, BE20, BE30 và BE40.
- Tiếp tục nghiên cứu ứng dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm để phân tích ứng xử của KCAĐ mềm có dùng lớp BTNE trong kết cấu có cấu tạo lớp mặt dưới và móng khác nhau.
- Nghiên cứu một số gốc epoxy khác đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật và kinh tế.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

1. Trần Thị Cẩm Hà, Trần Thị Kim Đăng (2017), *Xác định một số chỉ tiêu cơ lý cơ bản của Bitum – epoxy*, Tạp chí Giao thông vận tải số tháng 5/2017.
2. Trần Thị Cẩm Hà, Bùi Xuân Cây (2018), *Nghiên cứu thực nghiệm mô-đun đàn hồi và cường độ kéo uốn của bê tông nhựa sử dụng chất kết dính Bitum - epoxy*, Tạp chí Giao thông vận tải số tháng 5/2018.
3. Trần Thị Cẩm Hà (2018), *Nghiên cứu thực nghiệm mô-đun cắt động của bitum - epoxy*, Tạp chí Giao thông vận tải số tháng 11/2018.
4. Trần Thị Cẩm Hà, Nguyễn Quang Tuấn, Trần Anh Tuấn, Hoàng Việt Hải (2018), *Ứng xử chịu cắt của lớp phủ bê tông nhựa và vật liệu dính bám epoxy trên bản thép*, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải số 66 tháng 10/2018.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

TÀI LIỆU TIẾNG VIỆT

1. Bộ Giao thông Vận tải (2004), 22 TCN 319 – 04, *Tiêu chuẩn vật liệu nhựa đường Polime (yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thí nghiệm)*.
2. Bộ Giao thông Vận tải (2006), 22 TCN 211 – *Mặt đường mềm – Yêu cầu thiết kế*.
3. Bộ Giao thông Vận tải (2001), 22 TCN 274 – *Tiêu chuẩn thiết kế mặt đường mềm*.
4. Bộ Giao thông Vận tải (2006), 22 TCN 356 – 06, *Quy trình công nghệ thi công và nghiệm thu mặt đường BTN sử dụng nhựa đường polime*.
5. Bộ Khoa học công nghệ (2011), TCVN 8820: *Hỗn hợp bê tông nhựa nóng- Thiết kế theo phương pháp Marshall*.
6. Bộ Giao thông Vận tải (2014), *Quyết định số 858/QĐ-BGTVT về việc 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 bê tông nhựa nóng đối với các tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn*.
7. Bộ Giao thông Vận tải (2014), *Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT về việc Ban hành Quy định kỹ thuật về phương pháp thử độ sâu vết hằn bánh xe của bê tông nhựa xác định bằng thiết bị Wheel tracking*.
8. Vũ Đức Chính (2014), *Nghiên cứu lựa chọn kết cấu và vật liệu cho kết cấu áo đường mềm trên các tuyến đường có xe tải trọng nặng phù hợp với điều kiện nhiệt ẩm – Đề tài cấp bộ năm 2014, Mã số: DT 144047, Bộ Giao thông Vận tải, Việt Nam*.
9. Công ty cổ phần tư vấn và đầu tư xây dựng ECC (tháng 8 năm 2013), *Báo cáo công tác sửa chữa lớp phủ mặt cầu Thuận Phước*.
10. Trần Thị Kim Đăng (2010), *Độ bền và tuổi thọ khai thác bê tông nhựa mặt đường*, Nhà xuất bản Giao thông Vận tải, Hà Nội, Việt Nam.
11. Trần Danh Hợi (2019), *Nghiên cứu hỗn hợp đá nhựa nóng cường độ cao dùng trong kết cấu mặt đường ô tô cấp cao ở Việt Nam*, luận án tiến sĩ kỹ thuật, trường ĐH GTVT, Hà Nội.

12. Phạm Duy Hữu, Vũ Đức Chính, Đào Văn Đông, Nguyễn Thanh Sang (2010), *Bê tông Asphalt và hỗn hợp Asphalt*, Nhà xuất bản Giao thông Vận tải, Hà Nội, Việt Nam.
13. Nguyễn Mai Lâm, Nguyễn Quang Tuấn, Hoàng Thị Thanh Nhân (2015), *Nghiên cứu mô-đun phức động của nhựa đường 60/70 sử dụng tại Việt Nam bằng thí nghiệm trên máy DMA*, Tạp chí GTVT, tháng 12/2015.
14. Nguyễn Hoàng Long (2017), *Nghiên cứu cơ sở khoa học để áp dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm (The Mechanistic Empirical Pavement Design – MEPD) trong phân tích kết cấu áo đường mềm ở Việt Nam – Đề tài cấp bộ năm 2017*, Mã số: DT 174055, Bộ Giao thông Vận tải, Việt Nam.

TÀI LIỆU TIẾNG ANH

15. AASHTO (2010), *Developing Dynamic Modulus Master Curves for Hot Mix Asphalt (HMA)*.
16. ASTM D7460-10 (2010), *Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending*, United States.
17. CDOT (2018), *M-E pavement design manual*, USA.
18. ChemCo Systems Inc Redwood City, California, USA (2000), *Construction specifications for installation of epoxy asphalt concrete surfacing: Nanjing 2nd Yangtze Bridge*.
19. Congress, I. R. (2012), *IRC 37 - Guidelines for the design of flexible pavements*.
20. Dougan, C. E., Stephens, J. E., Mahoney, J., & Hansen, G (2003), *E* - Dynamic modulus – Test protocol – Problems and Solutions (No. CT-SPR-0003084-F-03-3)*, Connecticut Transportation Institute, University of Connecticut, USA.
21. Elliott, R., Fergusson, C., Richardson, J., Stevenson, A., & James, D. (2015). *Long life surfaces for busy roads*, Introduction to Unmanned Aircraft Systems, 211.
22. Forrest, E. (2002), *A 21st Birthday Treat for Humber Bridge*, Construction

- News. <http://www.cnplus.co.uk/news/a-21st-birthday-treat-for-humber-bridge/875234.article#.U_9HzfldXmd>. Accessed August 20, 2014.
23. Gaul R.W., Seim C (1993), *Epoxy Asphalt Concrete: A Polymer Concrete with 25 Years Experience*, Polymer Concrete Overlays, American Concrete Institute Technical Session, Minneapolis, MN Conference.
 24. George Way-RTERF/Consulpav, Kamil Kaloush-ASU, Jorge SousaConsulpav, Ali Zareh-ADOT (2009), *Arizona's 15 Years of Experience Using the Four Point Bending Beam Test*, 2nd Workshop on 4PB, 24-25th 2009. Guimarães, Portugal.
 25. Herrington D (2010), *Epoxy-modified Porous Asphalt*, NZ Transport Agency research report 410.
 26. Herrington P., Alabaster D., Arnold G., Cook S., Fussell A., Reilly S (2015), *Epoxy Modified Open-graded Porous Asphalt, Economic Evaluation of Long-life Pavements, Phase II, Design and Testing of Long-life Wearing Courses*. Land Transport New Zealand Research Report 321; 2007.
 27. Highway Research Board Special Report No. 116; (1970), *Epoxy-Asphalt Open-Graded Pavement as a Skid-Resistance Treatment on the San Francisco Bay Bridge*, Brewer R.A.
 28. H. Lee and K. Neville (1967), *Handbook of Epoxy Resins*, McGraw-Hill.
 29. Huang, Y. H. (2004), *Pavement analysis and design*, Second edition, Pearson Education, Inc.
 30. Joseph, A.H (1965), *Behavior of Epoxy-Asphalt Airfield Pavements 1963 Inspections*, Miscellaneous Paper No. 4-704, USA Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
 31. Kaya, O. (2015), *Investigation of AASHTOWare Pavement ME Design/Darwin-ME TM performance prediction models for Iowa pavement analysis and design*, Iowa State University, USA.
 32. Larrard, F.D., Garcin O., Hammoum F., Travers F (2005), *Preliminary Tests on a Hydraulic Surface Dressing for Wearing Courses with a Long Life Cycle*, Technical Memorandum, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, NT 4586, 121-128.
 33. Laxdal J. (2013), *Orthotropic Deck Wear Surface System Selection - Lions Gate Bridge North Approach Viaduct, Vancouver BC*, Proceedings, 2013

- Conference of the Transportation Association of Canada, Winnipeg, Manitoba, Canada.
34. Li Z.F (1999), *Epoxy Asphalt for Drainage Pavements*, Foreign Updates on Municipal Engineering, vol. 3, Tianjin, China, 11–13.
 35. Li, J., Zofka, A., & Yut, I. (2012), *Evaluation of dynamic modulus of typical asphalt mixtures in Northeast US region*, Road materials and pavement design, 13(2), 249-265.
 36. Luo Sang, Wang Jianwei and Qian Zhendong (SATC 2007), *Research on the performance of locally developed epoxy asphalt mixes*, Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference.
 37. Lu Q., Luo S. (2010), *Condition Survey and Analysis of First Epoxy Asphalt Concrete Pavement on Orthotropic Bridges in China - A Ten-Year Review. Working Paper*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, USA.
 38. Lu WM (1994), *Research and application of epoxy asphalt concrete material at home and abroad*. Chin Petrol Asphalt, 11–5.
 39. Lu W.M., Guo Z.Y., Wang X.L., Li J.H (1996), *Characteristic Performance and Application of Cold Mix Epoxy Asphalt*, East China Highway. No. 2 (Total No.99), 64–68.
 40. Masterton (I. 2007), *Route Master: Sutong Rises High. Bridge Design & Engineering, Issue Number 46*, Hemming Information Services, p. 22–26.
 41. Maureen A. Boyle, Gary J. Martin, and John D. Netmer, Hexcei Corporation (2001), *ASM Handbook Volume 21 Composites*, ASM International, (Epoxy Resins, 78-89).
 42. M. Goosey, M. Roth, T. Kainmuller, and W.Seiz (1999), *Epoxy Resins and Their Formulation, Plastics for Electronics*, Academic Publishers, p 103
 43. Nguyen Q. T., Di Benedetto H., Sauzéat C (2013), *Prediction of linear viscoelastic behaviour of asphalt mixes from binder properties and reversal*, International RILEM Symposium on Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials, Stockholm, Sweden, pp 237-248.

44. NI, M. (2010), "The 2S2P1D - An Excellent Linear Viscoelastic Model", *UNIMAS e-Journal of civil Engineering*, 1(2).
45. OECD (2005), *Economic Evaluation of Long-Life Pavements Phase 1*, European Conference of Ministers of Transport. OECD Publishing, Printed in France.
46. Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003), "General 2S2P1D model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes", *Road materials and pavement design*, 4(2), pp. 185-224.
47. Olard, F. (2012), "GB5 mix design: high-performance and cost-effective asphalt concretes by use of gap-graded curves and SBS modified bitumens", *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), pp.234-259.
48. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2008), *Long-Life Surfaces for Busy Roads*, European Conference of Ministers of Transport, International Transport Forum.
49. Pysh'yev S., Gunka V., Grytsenko Yu., Bratychak M (2016), *Polymer Modified Bitumen*, Chemical Technology, Lviv Polytechnic National University, Vol. 10, No. 4(s).
50. Qian Z. D., Lu Q (2014), *Design and Laboratory Evaluation of Small Particle Porous Epoxy Asphalt Concrete*, Presented at Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington, D.C.
51. Ramirez Cardona, D. A., Pouget, S., Di Benedetto, H., & Olard, F. (2015), *Viscoelastic behaviour characterization of a gap-graded asphalt mixture with SBS polymer modified bitumen*, *Materials Research*, 18(2), 373-381.
52. Rais, N. M., Wahab, M. Y. A., Endut, I. R., & Latif, A. A. (2013), "Dynamic Modulus Master Curve Construction Using the Modified MEPDG Model", *In Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS), 2013 1st International Conference*, pp. 212-21, IEEE.
53. Read J, Whiteoak D (2003), *The shell bitumen handbook. fifth edition*, Tonbridge, UK: Thomas Telford Publishing.
54. Rebbechi J.J. (1980), *Epoxy Asphalt Surfacing of the Westgate Bridge*, Proceedings of Australian Road Research Board (ARRB) Conference, Sydney, vol. 10, 136-146.
55. Research Report ARR 334 (1999), *Asphalt fatigue life prediction models-a*

literature review, ARRB Transport Research Ltd, NIS (National Interest Service program), Australia.

56. Robert N. Hunter, Andy Self and Professor John Read (2003), *The shell bitumen handbook, Sixth edition*.
57. Runhua Guo (December 2007), *Predicting in-service fatigue life of flexible pavements based on accelerated pavement testing*, Doctor of Philosophy, The University of Texas at Austin.
58. Seim, C. (1979), *An Innovative Pavement System for Long Span Bridge Decks*, Preprint 3771, ASCE Convention, Atlanta, GA.
59. TAIYU KENSETSU CO.,LLD (2015), *Material safety data sheet, Consists of RESIN and HADENER*, TEJ22010EP.
60. T.O.Medani (2001), *Asphalt Surfacing Applied to Orthotropic Steel Bridge Decks*, ISSN 0169-9288, Delft University of Technology, The Netherlands.
61. U.Isacsson, X.Lu (1995), Department of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden – *Testing and appraisal of polymer modified road bitumens – state of the art* – Materials and Structures, 28, 139-159.
62. Xiaoge, T., & Bin, H. (2009), “Dynamic Modulus of Asphalt Treated Mixtures”, *In Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference* (pp. 16-21).

TÀI LIỆU TIẾNG NHẬT

63. Nakanishi (1980), *Taf-mix epoxy*, 中央研究所 邮政号码 454-0055