

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ GIAO THÔNG VẬN TẢI

PHÙNG BÁ NHÂN

**NGHIÊN CỨU BÊ TÔNG NHỰA MẶT ĐƯỜNG SỬ DỤNG
SỢI BAZAN PHÂN TÁN TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM**

NGÀNH: KỸ THUẬT XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH GIAO THÔNG

MÃ SỐ: 9580205

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. TS. LÝ HẢI BẰNG

2. TS. NGUYỄN MINH KHOA

Hà Nội, 2024

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Lý Hải Bằng và TS. Nguyễn Minh Khoa. 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

Phùng Bá Nhân

LỜI CẢM ƠN

Sau quá trình học tập và nỗ lực không ngừng tại Trường Đại học Công nghệ GTVT, với sự hỗ trợ nhiệt tình từ các thầy cô, đồng nghiệp, bạn bè, gia đình và người thân, Nghiên cứu sinh (NCS) đã hoàn thành luận án mang tiêu đề *“Nghiên cứu bê tông nhựa mặt đường sử dụng sợi bazan phân tán trong điều kiện Việt Nam”*.

Để hoàn thành luận án này, NCS xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến hai thầy hướng dẫn, TS. Lý Hải Bằng và TS. Nguyễn Minh Khoa, đã tận tâm định hướng và hỗ trợ NCS suốt quá trình thực hiện luận án.

NCS chân thành cảm ơn Trường Đại học Công nghệ GTVT và các đơn vị trong trường như Phòng Đào tạo Sau đại học, Khoa Công trình, Bộ môn Đường bộ, Trung tâm Thí nghiệm Đường bộ cao tốc, và Phòng thí nghiệm LAS-XD72 đã hỗ trợ về trang thiết bị, nhân lực, cũng như quan tâm, động viên và tạo điều kiện thuận lợi để NCS hoàn thành nhiệm vụ học tập và nghiên cứu.

NCS cũng xin bày tỏ lòng biết ơn đối với các thầy cô trong và ngoài trường Đại học Công nghệ GTVT, bạn bè đồng nghiệp, đã luôn nhiệt tình hỗ trợ và cung cấp những tài liệu khoa học quý báu để NCS thực hiện đề tài nghiên cứu này.

Ngoài ra, NCS xin bày tỏ lòng biết ơn đến Phòng thí nghiệm trọng điểm thuộc Viện khoa học vật liệu thuộc Viện hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Phòng thí nghiệm vật liệu xây dựng của Bộ môn Vật liệu xây dựng tại Trường Đại học GTVT, đã hỗ trợ NCS trong việc thực hiện các thí nghiệm trong phạm vi luận án.

Cuối cùng, NCS xin bày tỏ lòng biết ơn gia đình và người thân đã luôn động viên, ủng hộ và giúp đỡ NCS về cả tinh thần lẫn vật chất suốt suốt quá trình làm luận án.

Trân trọng!

Nghiên cứu sinh

Phùng Bá Nhân

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT.....	ix
DANH MỤC BẢNG SỐ LIỆU.....	xi
DANH MỤC HÌNH VẼ	xiii
MỞ ĐẦU	1
Chương 1. TỔNG QUAN VỀ SỢI GIA CƯỜNG VÀ SỢI BAZAN SỬ DỤNG CHO HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA	4
1.1. Bê tông nhựa có phụ gia dạng sợi làm lớp mặt đường ô tô.....	4
1.1.1. Tổng quan về sử dụng phụ gia sợi cho hỗn hợp bê tông nhựa	4
1.1.2. Hiện trạng sử dụng sợi cho hỗn hợp bê tông nhựa ở Hoa Kỳ và các quốc gia trên thế giới.....	6
1.1.3. Hàm lượng sợi sử dụng dụng trong hỗn hợp BTN	8
1.2. Sợi bazan dùng cho bê tông nhựa	9
1.2.1. Tổng quan về sợi bazan	9
1.2.2. Tính chất của sợi bazan và các ứng dụng	10
1.2.3. Các nghiên cứu lựa chọn sợi bazan và phương pháp trộn sợi trong hỗn hợp bê tông nhựa	12
1.3. Các nghiên cứu về bê tông nhựa sử dụng sợi bazan	16
1.3.1. Hình thái và sự phân bố của sợi bazan trong bê tông nhựa	16
1.3.2. Nghiên cứu phương pháp Marshall và hàm lượng nhựa đường tối ưu	16
1.3.3. Nghiên cứu lún vệt bánh xe và độ ổn định động (DS)	17
1.3.4. Nghiên cứu khả năng kháng âm	23
1.3.5. Nghiên cứu mô đun đàn hồi.....	25
1.4. Nghiên cứu sử dụng các mô hình học máy dự báo tính chất của bê tông nhựa	26
1.4.1. Tổng quan về học máy (ML)	26
1.4.2. Các mô hình ML phổ biến và ứng dụng dự báo tính chất bê tông nhựa	27
1.4.3. Các nghiên cứu áp dụng ML dự báo tính chất bê tông nhựa sử dụng sợi bazan	29
1.5. Đánh giá các kết quả nghiên cứu về bê tông nhựa sử dụng sợi bazan.....	29
1.5.1. Đánh giá các kết quả nghiên cứu ngoài nước	29

1.5.2. Đánh giá các kết quả nghiên cứu ở Việt Nam	29
1.6. Xác định các vấn đề nghiên cứu của luận án.....	30
1.7. Phương pháp nghiên cứu.....	31
Chương 2. NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ, CHẾ TẠO HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG SỢI BAZAN VỚI TỶ LỆ HỢP LÝ.....	32
2.1. Xây dựng chương trình thực nghiệm hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng sợi bazan	32
2.1.1. Lựa chọn vật liệu	32
2.1.1.1. <i>Lựa chọn loại bê tông nhựa sử dụng trong nghiên cứu</i>	<i>32</i>
2.1.1.2. <i>Lựa chọn cốt liệu thô, cốt liệu mịn và bột khoáng</i>	<i>32</i>
2.1.1.3. <i>Lựa chọn chất kết dính</i>	<i>33</i>
2.1.1.4. <i>Lựa chọn loại sợi bazan</i>	<i>33</i>
2.1.2. Lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan	34
2.1.2.1. <i>Lựa chọn phương pháp thiết kế.....</i>	<i>34</i>
2.1.2.2. <i>Thiết kế thành phần cấp phối các loại BTN sử dụng trong nghiên cứu</i>	<i>35</i>
2.1.2.3. <i>Phương pháp thí nghiệm</i>	<i>36</i>
2.1.2.4. <i>Lựa chọn phương pháp trộn sợi bazan trong hỗn hợp bê tông nhựa</i>	<i>37</i>
2.1.3. Công tác chế bị mẫu	37
2.1.4. Thiết kế thí nghiệm và trình tự phân tích thống kê xử lý số liệu.....	38
2.2. Phân tích liên kết và phân bố sợi bazan trong hỗn hợp bê tông nhựa.....	39
2.2.1. Phương pháp nghiên cứu hình thái vật chất bằng kính hiển vi điện tử quét SEM	39
2.2.2. Công tác chuẩn bị mẫu thí nghiệm SEM	40
2.2.3. Kết quả thí nghiệm phân tích hình thái SEM	40
2.2.3.1. <i>Liên kết và sự phân bố giữa sợi bazan và nhựa đường.....</i>	<i>40</i>
2.2.3.2. <i>Ảnh hưởng của hàm lượng sợi bazan trong hỗn hợp BTN</i>	<i>42</i>
2.3. Ứng dụng học máy trong hỗ trợ thiết kế thành phần bê tông nhựa sử dụng sợi bazan	45
2.3.1. Ứng dụng học máy trong dự báo tính chất cơ lý của vật liệu.....	45
2.3.2. Một số thuật toán và các kỹ thuật được sử dụng	45
2.3.2.1. <i>Mô hình độ dốc tăng cường cấp cao Extreme Gradient Boosting.....</i>	<i>45</i>

2.3.2.2. Thuật toán tối ưu hóa Sailfish Optimizer	46
2.3.2.3. Thuật toán tối ưu hóa Aquila Optimizer	46
2.3.2.4. Kỹ thuật xác thực chéo	46
2.3.2.5. Các chỉ tiêu đánh giá năng lực dự báo của mô hình	47
2.3.3. Quy trình xây dựng công cụ hỗ trợ thiết kế thành phần bê tông nhựa sử dụng sợi bazan	47
2.3.4. Xây dựng cơ sở dữ liệu	48
2.3.5. Điều chỉnh siêu tham số của mô hình XGB	50
2.3.6. Kết quả xây dựng mô hình dự báo XGB cho MS và MF	50
2.3.6.1. Kết quả dự đoán MS	50
2.3.6.2. Kết quả dự đoán MF	51
2.3.7. Xây dựng công cụ hỗ trợ thiết kế thành phần bê tông nhựa	51
2.3.8. Đánh giá kết quả thiết kế thành phần bê tông nhựa của phương pháp ML và định hướng nghiên cứu thực nghiệm	53
2.4. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu cho hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng sợi bazan 54	
2.4.1. Phân tích độ ổn định Marshall (MS)	54
2.4.2. Phân tích độ dẻo Marshall (MF)	56
2.4.3. Xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu của hỗn hợp BTN với các hàm lượng sợi bazan khác nhau	57
2.4.3.1. Lập kế hoạch thí nghiệm	57
2.4.3.2. Kết quả thí nghiệm xác định hàm lượng nhựa tối ưu	58
2.5. Kết luận Chương 2	60
Chương 3. NGHIÊN CỨU THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC CHỈ TIÊU CƠ HỌC CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG SỢI BAZAN	62
3.1. Lựa chọn chỉ tiêu nghiên cứu và kế hoạch thí nghiệm	62
3.1.1. Lựa chọn chỉ tiêu cơ học của BTN trong nghiên cứu thí nghiệm	62
3.1.2. Kế hoạch thí nghiệm	62
3.2. Thí nghiệm đánh giá LVBX	63
3.2.1. Phương pháp thí nghiệm đánh giá LVBX	63
3.2.2. Kế hoạch thí nghiệm LVBX	63
3.2.3. Kết quả thí nghiệm LVBX	65

3.3. Thí nghiệm cường độ kéo uốn.....	66
3.3.1. Phương pháp thí nghiệm cường độ kéo uốn.....	66
3.3.2. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo uốn.....	68
3.3.3. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn.....	68
3.4. Thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN	70
3.4.1. Phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN	70
3.4.1.1. <i>Mô tả thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của vật liệu BTN (IDEAL-CT)</i>	71
3.4.1.2. <i>Công thức tính CT_{Index}</i>	73
3.4.2. Kế hoạch thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN.....	74
3.4.3. Kết quả thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN	74
3.5. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh.....	80
3.5.1. Phương pháp thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh.....	80
3.5.2. Kế hoạch thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh.....	81
3.5.3. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh	82
3.6. Thí nghiệm đánh giá mô đun đàn hồi động.....	87
3.6.1. Phương pháp thí nghiệm mô đun đàn hồi động.....	87
3.6.2. Kế hoạch thí nghiệm mô đun đàn hồi động.....	88
3.6.3. Kết quả thí nghiệm mô đun động	89
3.6.4. Xây dựng đường cong chủ mô đun động.....	95
3.6.5. Mô hình hóa mô đun động.....	97
3.6.5.1. <i>Lựa chọn và xây dựng mô hình</i>	97
3.6.5.2. <i>Đánh giá sự phù hợp của mô hình 2S2PID với kết quả thí nghiệm</i> ...	99
3.7. Kết luận Chương 3	100
Chương 4. NGHIÊN CỨU DỰ BÁO TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA VẬT LIỆU THEO HỌC MÁY VÀ ỨNG DỤNG BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG SỢI BAZAN TRONG KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG.....	102
4.1. Ứng dụng học máy trong dự báo độ ổn định Marshall	102
4.1.1. Xây dựng cơ sở dữ liệu các mẫu thí nghiệm độ ổn định Marshall.....	102
4.1.2. Các công cụ ML và mô hình tính toán độ ổn định Marshall.....	103
4.1.3. Xây dựng mô hình ML dự báo độ ổn định Marshall của BTN sử dụng sợi bazan	104

4.1.4. Xây dựng giao diện GUI dự báo MS của BTN sử dụng sợi bazan	106
4.2. Thực trạng giao thông trên các tuyến đường cấp cao ở Việt Nam và đề xuất cấu tạo kết cấu áo đường mềm	107
4.2.1. Quy mô giao thông trên các tuyến đường cấp cao hiện nay ở Việt Nam	107
4.2.2. Một số kết cấu áo đường điển hình trên các tuyến đường QL ở Việt Nam	108
4.2.3. Đề xuất KCAĐ mềm ứng dụng BTN sử dụng sợi bazan làm lớp mặt trong KCAĐ ô tô ở Việt Nam	109
4.3. Phân tích kết cấu áo đường mềm theo tiêu TCCS 38:2022/TCĐBVN.....	110
4.4. Phân tích KCAĐ mềm sử dụng BTN sợi bazan theo phương pháp cơ học thực nghiệm	112
4.4.1. Một số vấn đề chung về thiết kế áo đường theo cơ học thực nghiệm	112
4.4.2. Ứng dụng phương pháp M-E phân tích các KCAĐ	114
4.4.2.1. Các số liệu khí hậu	115
4.4.2.2. Các số liệu về giao thông	115
4.4.2.3. Xác định các thông số của vật liệu trong phân tích M-E	117
4.4.2.4. Tiêu chuẩn giới hạn	117
4.4.2.5. Kết quả phân tích kết cấu mặt đường theo M-E	117
4.5. Xác định sơ bộ chi phí xây dựng kết cấu áo đường khi sử dụng sợi bazan 119	
4.5.1. Các căn cứ lập chi phí xây dựng kết cấu áo đường	119
4.5.2. Kết quả sơ bộ xác định các chi phí xây dựng kết cấu áo đường	120
4.6. Đề xuất sơ bộ hướng chế tạo bê tông nhựa sử dụng sợi bazan ngoài trạm trộn 121	
4.7. Kết luận chương 4	122
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	119
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ	126
TÀI LIỆU THAM KHẢO	127
A. TIẾNG VIỆT	127
B. TIẾNG ANH	127

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

AC	Asphalt Concrete - Mặt đường bê tông asphalt
AASHTO	American Association of State Highway Transportation Officials Hiệp hội Đường cao tốc và Giao thông Hoa Kỳ
ASTM	American Society of Testing Materials
BTN	Bê tông nhựa
BTNC	Bê tông nhựa chặt
BTNR	Bê tông nhựa rỗng
CV	Cross Validation - Kỹ thuật xác thực chéo
DS	Dynamic Stability - Độ ổn định động
FHWA	Federal Highway Administration – Cục đường bộ Liên bang (Mỹ)
KCADM	Kết cấu áo đường mềm
LVBX	Lún vệt bánh xe
HMA	Hot Mix Asphalt - Hỗn hợp Bê tông nhựa nóng
L.A.	Abrasion-LosAngeles Abrasion - Độ hao mòn LosAngeles
LATS	Luận án tiến sĩ
M-E	Mechanistic Empirical - Cơ học thực nghiệm
ML	Machine Learning - Học máy
MS	Marshall Stability - Độ ổn định marshall
MF	Marshall Flow - Độ dẻo marshall
NAPA	National Asphalt Pavement Association - Hiệp hội mặt đường BTN quốc gia - Mỹ
NCAT	National Center for Asphalt Technology - Trung tâm công nghệ asphalt quốc gia - Mỹ
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program - chương trình hợp tác nghiên cứu đường bộ quốc gia - Mỹ
NMAS	Nominal Maximum Aggregate Size - Cỡ hạt lớn nhất danh định của cốt liệu
OAC	Optimum Asphalt Content - Hàm lượng bitum tối ưu
QĐ	Quyết định
QĐ 858	Quyết định số 858/QĐ-BGTVT ngày 26/3/2014 của Bộ GTVT

QĐ 1037	Quyết định số 1037/QĐ-BKH&CN ngày 20/6/2022 của Bộ KH&CN về việc công bố tiêu chuẩn quốc gia (TCVN 13567-1:2022; TCVN 13567-2:2022 TCVN 13567-3:2022)
QĐ 1617	Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT ngày 29/4/2014 của Bộ GTVT
SHRP	Strategic Highway Research Plan - Chương trình nghiên cứu chiến lược đường bộ - Mỹ
SEM	Scanning Electron Microscope - Kính hiển vi điện tử quét
V _a	Air Voids - Độ rỗng dư
VFA	Voids Filled with Asphalt - Độ rỗng lấp đầy nhựa
VMA	Voids in the Mineral Aggregate - Độ rỗng cốt liệu

DANH MỤC BẢNG SỐ LIỆU

Bảng 1.1. Hàm lượng nhựa đường tối ưu từ các nghiên cứu của FHWA [80]	9
Bảng 1.2. So sánh tính chất giữa các loại sợi khác nhau [86]	10
Bảng 1.3. Tính chất của các loại sợi gia cường [44]	11
Bảng 1.4. Tổng hợp các nghiên cứu trên thế giới về tính chất cơ bản của sợi bazan được dùng trong hỗn hợp BTN.....	4
Bảng 1.5. Bảng tổng hợp quy trình trộn sợi bazan trong hỗn hợp BTN ở một số nghiên cứu gần đây trên thế giới	14
Bảng 1.6. Hàm lượng nhựa đường tối ưu tương ứng với từng hàm lượng sợi.....	17
Bảng 1.7. Tính chất cơ lý của các loại sợi [121]	18
Bảng 1.8. Tính chất cơ lý của sợi bazan có nguồn gốc ở Trung Quốc [38].....	21
Bảng 2.1. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu	32
Bảng 2.2. Kết quả thử nghiệm các chỉ tiêu cơ bản của nhựa đường 60/70.....	33
Bảng 2.3. Một số tính chất của sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu.....	34
Bảng 2.4. Thành phần cấp phối lựa chọn để thiết kế hỗn hợp BTN	35
Bảng 2.5. Kế hoạch thí nghiệm hình thái của sợi bazan	43
Bảng 2.6. Phân tích thống kê các thông số đầu vào và đầu ra của bộ dữ liệu MS	49
Bảng 2.7. Phân tích thống kê các thông số đầu vào và đầu ra của bộ dữ liệu MF	49
Bảng 2.8. Số lượng mẫu thí nghiệm xác định hàm lượng nhựa tối ưu	58
Bảng 2.9. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0% sợi bazan).....	58
Bảng 2.10. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,1% sợi bazan).....	58
Bảng 2.11. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,2% sợi bazan).....	59
Bảng 2.12. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,3% sợi bazan).....	59
Bảng 2.13. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,4% sợi bazan).....	59
Bảng 2.14. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,5% sợi bazan).....	59
Bảng 2.15. Hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với từng hàm lượng sợi.....	60
Bảng 3.1. Số lượng thí nghiệm đánh giá tính năng của các loại hỗn hợp.....	62
Bảng 3.2. Số lượng mẫu thí nghiệm LVBX cho các loại BTN.....	64
Bảng 3.3. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo uốn	68
Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn	68
Bảng 3.5. Bảy giai đoạn của đường cong chuyển vị tải trọng.....	72

Bảng 3.6. Kế hoạch thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN - theo tiêu chuẩn ASTM D8225.....	74
Bảng 3.7. Giá trị của chỉ số kháng nứt CT_{Index}	76
Bảng 3.8. Giá trị trung bình đặc trưng kháng nứt CT_{Index}	77
Bảng 3.9. Giá trị độ dốc $ m_{75} $ của đường cong chuyển vị - tải trọng	77
Bảng 3.10. Giá trị góc dốc của đường cong chuyển vị - tải trọng.....	77
Bảng 3.11. Số lượng thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh	81
Bảng 3.12. Mô đun đàn hồi tĩnh của các hỗn hợp BTN ở 15°C, 30°C và 60°C	82
Bảng 3.13. Số lượng thí nghiệm mô đun đàn hồi động.....	88
Bảng 3.14. Kết quả xác định các hệ số của quy tắc WLF	96
Bảng 3.15. Các thông số của mô hình 2S2P1D mô phỏng đường cong chủ $ E^* $	98
Bảng 3.16. Đánh giá kết quả dự báo $ E^* $ của BTN bằng mô hình 2S2P1D	100
Bảng 4.1. Phân tích thống kê các thông số của bộ dữ liệu MS	100
Bảng 4.2. Siêu tham số của mô hình XGB trong dự báo MS	103
Bảng 4.3. Các kết cấu áo đường sử dụng trong nghiên cứu.....	110
Bảng 4.4. Các thông số đặc trưng của vật liệu	107
Bảng 4.5. Kết quả kiểm toán KCAĐ theo TCCS 38:2022.....	111
Bảng 4.6. Lưu lượng xe dự báo năm đầu và hệ số tăng trưởng xe.....	116
Bảng 4.7. Số liệu giao thông tính toán trong phân tích M-E.....	117
Bảng 4.8. Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế.....	117
Bảng 4.9. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E sau 15 năm sử dụng.....	117
Bảng 4.10. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E sau 16 năm sử dụng.....	118
Bảng 4.11. Tổng hợp sơ bộ chi phí xây dựng các KCAĐ.....	120

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Bản đồ số lượng các Bang ở Mỹ trả lời cho câu hỏi “Tổ chức của bạn hiện có chỉ định hoặc cho phép sử dụng sợi trong hỗn hợp BTN không? [80]	7
Hình 1.2. Quy trình sản xuất sợi bazan [62].....	10
Hình 1.3. Hình ảnh chụp SEM hỗn hợp BTN gia cường sợi bazan [121]	16
Hình 1.4. Hàm lượng nhựa đường tối ưu với hàm lượng sợi bazan khác nhau	18
Hình 1.5. Độ ổn định Marshall của hỗn hợp BTN gia cường các loại sợi	19
Hình 1.6. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến độ ổn định động của hỗn hợp BTN.....	19
Hình 1.7. Độ ổn định động của hỗn hợp BTN với các hàm lượng sợi bazan [121].....	20
Hình 1.8. Biến dạng uốn tối đa của hỗn hợp BTN với các hàm lượng sợi bazan khác nhau [121].....	21
Hình 1.9. Kết quả thí nghiệm độ ổn định động ở nhiệt độ cao với hàm lượng sợi bazan khác nhau [38]	22
Hình 1.10. Độ ổn định động của hỗn hợp BTN gia cường các loại sợi khác nhau.....	22
Hình 1.11. TSR của BTN với hàm lượng sợi bazan khác nhau [121]	24
Hình 1.12. TSR của BTN ở nhiệt độ 25°C với hàm lượng sợi bazan khác nhau.....	24
Hình 1.13. Tính năng của hỗn hợp BTN gia cường các loại sợi khác nhau.....	25
Hình 1.14. Kết quả thí nghiệm mô đun độ cứng kéo gián tiếp ở nhiệt độ thấp của hỗn hợp BTN sử dụng các hàm lượng sợi bazan khác nhau: (a) ở 5°C, (b) ở 20°C	26
Hình 2.1. Sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu	33
Hình 2.2. Đường cong cấp phối thiết kế hỗn hợp BTN sau khi phối trộn	35
Hình 2.3. Quá trình đúc mẫu và thí nghiệm Marshall	36
Hình 2.4. Thiết bị chụp hiển vi điện tử SEM	39
Hình 2.5. Hình ảnh chụp SEM của sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu	40
Hình 2.6. Liên kết giữa sợi bazan và chất kết dính	41
Hình 2.7. Phân bố của sợi bazan với các hàm lượng khác nhau	43
Hình 2.8. Liên kết giữa các sợi bazan với nhau trong hỗn hợp BTN.....	44
Hình 2.9. Sơ đồ quy trình ứng dụng ML dự báo MS của BTN sử dụng sợi bazan.....	47
Hình 2.10. Phân tích hồi quy trong dự đoán MS dữ liệu đào tạo và kiểm chứng	50
Hình 2.11. Phân tích hồi quy trong dự đoán MF dữ liệu đào tạo và kiểm chứng	51
Hình 2.12. 40 mẫu BTN được đề xuất bởi mô hình XGB_SFO_40	52

Hình 2.13. Ảnh hưởng các yếu tố nhựa đường, sợi bazan đến độ ổn định Marshall	54
Hình 2.14. Biểu đồ tổng hợp độ ổn định Marshall (MS) của hỗn hợp BTN.....	55
Hình 2.15. Ảnh hưởng các yếu tố nhựa, sợi bazan đến độ dẻo Marshall.....	56
Hình 2.16. Biểu đồ tổng hợp độ dẻo Marshall của hỗn hợp BTN.....	57
Hình 3.1. Chế tạo mẫu BTN thí nghiệm LVBX.....	64
Hình 3.2. Quá trình chạy LVBX	65
Hình 3.3. Mẫu BTN sau quá trình chạy LVBX.....	65
Hình 3.4. Biểu đồ chiều sâu LVBX của các loại BTN sử dụng hàm lượng sợi bazan khác nhau	66
Hình 3.5. Mẫu sau khi đầm và cắt mẫu	67
Hình 3.6. Thí nghiệm kéo uốn mẫu	67
Hình 3.7. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn của các loại BTN với hàm lượng sợi khác nhau	70
Hình 3.8. Thiết bị thí nghiệm và đường cong chuyển vị - tải trọng sau khi nén mẫu bằng phương pháp thí nghiệm IDEAL-CT	71
Hình 3.9. Minh họa về điểm PPP_{75} và độ dốc $ m_{75} $	72
Hình 3.10. Mẫu thí nghiệm sau khi đúc bằng máy đầm xoay	75
Hình 3.11. Mẫu thí nghiệm sau khi phá hoại	75
Hình 3.12. Quá trình thí nghiệm xác định chỉ số kháng nứt CT_{Index}	75
Hình 3.13. Đường cong lực - chuyển vị của 6 hỗn hợp BTN sử dụng các hàm lượng sợi bazan khác nhau.....	78
Hình 3.14. Kết quả thí nghiệm chỉ số kháng nứt CT_{Index} của các loại bê tông nhựa với hàm lượng sợi khác nhau.....	79
Hình 3.15. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh.....	81
Hình 3.16. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh.....	82
Hình 3.17. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê cho mô đun đàn hồi tĩnh	84
Hình 3.18. Ảnh hưởng các yếu tố nhiệt độ và hàm lượng sợi bazan đến mô đun đàn hồi tĩnh	84
Hình 3.19. Biểu đồ đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của hàm lượng sợi và nhiệt độ đến mô đun đàn hồi tĩnh của BTN.....	85
Hình 3.20. Mô đun đàn hồi tĩnh của 6 loại BTN.....	86

Hình 3.21. Quá trình thí nghiệm mô đun đàn hồi động.....	88
Hình 3.22. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê cho mô đun đàn hồi động $ E^* $	90
Hình 3.23. Mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến $ E^* $	90
Hình 3.24. Biểu đồ ảnh hưởng giữa các yếu tố đến $ E^* $	91
Hình 3.25. Ảnh hưởng của tần số đến $ E^* $ của 6 loại BTN	92
Hình 3.26. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến $ E^* $ của 6 loại BTN.....	93
Hình 3.27. Mô đun đàn hồi động $ E^* $ của các hỗn hợp BTN ứng với 6 tần số và 6 mức nhiệt độ	94
Hình 3.28. Đường cong chủ $ E^* $ của BTN_Bazan 0.4 ở nhiệt độ tham chiếu 30°C	95
Hình 3.29. Đường cong chủ $ E^* $ của 6 loại BTN ở nhiệt độ tham chiếu 30°C.....	96
Hình 3.30. Biểu đồ quan hệ giữa a_T thực và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ	97
Hình 3.31. Biểu đồ quan hệ giữa a_T thực và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ	98
Hình 3.32. Mô hình hóa đường cong chủ $ E^* $ của BTN theo mô hình 2S2P1D.....	99
Hình 4.1. So sánh kết quả thí nghiệm MS và các giá trị được tính toán bởi mô hình XGB	104
Hình 4.2. Biểu đồ hồi quy so sánh kết quả thí nghiệm MS và các giá trị được tính toán bởi mô hình XGB	105
Hình 4.3. Biểu đồ sai số giữa kết quả thí nghiệm MS và các giá trị được tính toán bởi mô hình XGB.....	105
Hình 4.4. Giao diện GUI để dự báo MS của bê tông nhựa sử dụng sợi bazan	106
Hình 4.5. Trình tự thiết kế KCAĐ theo phương pháp M-E [33].....	114
Hình 4.6. Đề xuất phân loại xe sử dụng trong phương pháp M-E ở Việt Nam	112
Hình 4.7. Quy trình sản xuất BTN_Bazan ở trạm trộn	122

MỞ ĐẦU

1. Sự cần thiết của vấn đề nghiên cứu

Mặt đường bê tông nhựa (BTN) là một lựa chọn phổ biến cho nhiều dự án đường bộ trên toàn thế giới, và Việt Nam không phải là ngoại lệ. Về cơ bản, BTN sử dụng nhựa đường thông thường không có phụ gia đặc biệt cũng có thể đáp ứng tốt các yêu cầu của công trình đường bộ. Tuy nhiên, trong môi trường khắc nghiệt của Việt Nam, đặc biệt là trên các tuyến đường ô tô cấp cao có lưu lượng giao thông lớn, việc sử dụng BTN không dùng phụ gia có thể gặp phải các vấn đề về hiệu suất, tuổi thọ khai thác chưa đạt được như thiết kế mong muốn ban đầu. Ngoài ra, trong các điều kiện thời tiết nhiệt đới, nắng nóng, và mưa nhiều, mặt đường BTN phải đối mặt với những tác động của môi trường khắc nghiệt. Hệ thống giao thông cơ sở cần phải đáp ứng nhiều yêu cầu kỹ thuật khắt khe, bao gồm khả năng chịu tải trọng, độ bám dính và độ bền vững trong điều kiện thời tiết biến đổi.

Nhằm nâng cao chất lượng mặt đường BTN, đã có nhiều giải pháp được áp dụng cả tại Việt Nam và trên thế giới. Các biện pháp này đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện tính chất và hiệu suất của BTN để đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật và thời tiết khắc nghiệt. Một trong những giải pháp quan trọng là thay đổi thành phần cấp phối hỗn hợp. Điều này bao gồm việc tối ưu hóa tỷ lệ các thành phần cấp phối, nhựa đường và các phụ gia để tạo ra một hỗn hợp BTN có đặc tính cơ lý tốt hơn. Cải thiện chất lượng nhựa đường là một phần quan trọng khác, vì nhựa đường đóng vai trò quyết định trong tính năng kết dính và khả năng chống nứt của hỗn hợp. Thêm vào đó, sử dụng các phụ gia trong sản xuất BTN là một giải pháp cải thiện được đánh giá cao. Các phụ gia như sợi gia cường đã được sử dụng rộng rãi để tăng cường các đặc tính cơ lý của hỗn hợp BTN. Loại phụ gia sợi có thể đa dạng như amiăng, carbon, aramid, sợi cellulose, polyester, polypropylene, sợi thép, sợi thủy tinh, và sợi bazan. Sử dụng các loại sợi này có thể giúp tăng độ bền và đàn hồi của BTN, giảm nguy cơ nứt và gia tăng tuổi thọ khai thác. Những biện pháp này không chỉ đóng góp vào việc nâng cao chất lượng và hiệu suất của BTN, mà còn đảm bảo an toàn và bền vững của hạ tầng đường bộ. Việc nghiên cứu và áp dụng các giải pháp này là một phần quan trọng trong sự phát triển và cải thiện hệ thống giao thông ở Việt Nam và trên khắp thế giới.

Sợi bazan, được xuất phát từ nguồn gốc tự nhiên, là một vật liệu đa dạng và đặc biệt. Điểm mạnh của sợi bazan so với các loại sợi khác là tính cứng, khả năng chịu kéo

vượt trội, và độ bền trong điều kiện khắc nghiệt. Đặc biệt, sợi bazan có khả năng kháng hóa chất, kháng nhiệt, và có ảnh hưởng thấp đối với môi trường, điều này làm cho sợi trở thành một lựa chọn lý tưởng cho các ngành đòi hỏi tính an toàn và độ bền cao. Cụ thể, sợi bazan đã được sử dụng trong ngành hàng không vũ trụ và trong sản xuất ô tô như một vật liệu chống cháy đáng tin cậy. Ngoài ra, sợi bazan cũng được sử dụng rộng rãi trong ngành sản xuất các sản phẩm tổng hợp khác. Ứng dụng đa dạng của sợi bazan còn bao gồm cả việc làm vật liệu chống cháy, vật liệu gia cường, và vật liệu cơ học trong nhiều ngành công nghiệp khác nhau.

Trong bối cảnh Việt Nam, giá thành của sợi bazan được xem là tương đối hợp lý so với các loại sợi khác được sử dụng phổ biến trên thế giới, như sợi thủy tinh, sợi cellulose, hoặc sợi carbon. Mặc dù sợi bazan có tính chất vượt trội, nhưng sự tiềm năng của sợi trong việc cải thiện hỗn hợp BTN ở Việt Nam chưa được nghiên cứu rộng rãi. Trong khi đã có các tác giả nghiên cứu sử dụng các loại sợi khác như sợi thủy tinh, sợi Forta FI, và sợi cellulose cho BTN, việc sử dụng sợi bazan vẫn chưa được thực hiện. Điều này mở ra cơ hội mới để nghiên cứu và thử nghiệm sự tiềm năng của sợi bazan trong cải thiện chất lượng và hiệu suất của BTN tại Việt Nam. Chính những căn cứ trên, lựa chọn đề tài: *“Nghiên cứu bê tông nhựa mặt đường sử dụng sợi bazan phân tán trong điều kiện Việt Nam”*, trong đó tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của sợi bazan đến các tính chất cơ lý của hỗn hợp BTN là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Mục đích nghiên cứu

Với mục đích đánh giá tính khả thi của BTN mặt đường sử dụng sợi bazan phân tán phù hợp với điều kiện Việt Nam, luận án tập trung nghiên cứu các nội dung sau:

- Nghiên cứu cơ chế liên kết và phân bố sợi bazan trong BTN, qua đó xác định hàm lượng nhựa tối ưu cho hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan;
- Thiết kế hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan với các hàm lượng khác nhau, so sánh với BTN đối chứng cùng thành phần thông qua các chỉ tiêu cơ lý của BTN;
- Ứng dụng các thuật toán học máy (ML) để hỗ trợ thiết kế và dự báo một số tính chất cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan;
- Đề xuất KCAĐM của BTN sử dụng sợi bazan cho một số tuyến đường ô tô tại Việt Nam, kiểm toán với các phương pháp, tiêu chuẩn hiện hành, xác định sơ bộ chi phí và hướng chế tạo BTN sử dụng sợi bazan ngoài trạm trộn.

3. Đối tượng nghiên cứu

Hỗn hợp bê tông nhựa với cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm sử dụng sợi bazan các hàm lượng sợi khác nhau làm lớp mặt cho KCAĐM.

4. Phạm vi nghiên cứu

Phân tích tổng quan tình hình sử dụng sợi gia cường và sợi bazan sử dụng cho hỗn hợp bê tông nhựa ở Việt Nam và trên thế giới;

Nghiên cứu thí nghiệm trong phòng, xác định các chỉ tiêu kỹ thuật của hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng sợi bazan với các hàm lượng sợi khác nhau và hỗn hợp BTN đối chứng;

Phạm vi nghiên cứu chỉ dừng ở nghiên cứu với: BTN 12,5 mm, nhựa đường 60/70; sợi bazan có nguồn gốc tự nhiên của Trung Quốc có đường kính 12 μm , chiều dài 12mm.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Ý nghĩa khoa học:

- Phân tích, làm rõ cơ sở khoa học việc sử dụng cốt sợi bazan phân tán trong hỗn hợp BTN, và phân tích được cơ chế liên kết giữa sợi bazan và nhựa đường;
- Phân tích thành phần và cấu trúc của hỗn hợp BTN sử dụng cốt sợi bazan phân tán, qua đó nêu bật được ưu nhược điểm thông qua các chỉ tiêu cơ lý và đưa ra phạm vi áp dụng của loại vật liệu mới này trong điều kiện Việt Nam;
- Phân tích và đề xuất được KCAĐM của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan thỏa mãn tất cả các đặc tính khai thác theo tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam.

Ý nghĩa thực tiễn:

- Ứng dụng mô hình học máy xây dựng được công cụ dự báo nhanh một số đặc tính cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan phân tán;
- Xác định được các chỉ tiêu kỹ thuật của BTN sử dụng sợi bazan phân tán khi thiết kế kết cấu mặt đường theo tiêu chuẩn TCCS 38:2022 và phương pháp cơ học – thực nghiệm;
- Đề xuất một số kết cấu áo đường mềm cấp cao cho BTN sử dụng cốt sợi bazan phân tán trong điều kiện Việt Nam.

Chương 1. TỔNG QUAN VỀ SỢI GIA CƯỜNG VÀ SỢI BAZAN SỬ DỤNG CHO HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA

Phụ gia dạng sợi cho bê tông nhựa (BTN) làm áo đường mềm không phải là một khái niệm mới, nó đã được nghiên cứu từ những năm đầu những năm 1960. Việc sử dụng loại sợi nào, lợi ích, chi phí và hiệu suất của chúng tới BTN là chủ đề thảo luận của nhiều nghiên cứu. Ở Việt Nam, các nghiên cứu này mới đang ở giai đoạn đầu nhưng cũng có một số triển vọng nhất định. Tuy nhiên, những nghiên cứu về phụ gia dạng sợi sử dụng trong BTN ở Việt Nam là chưa nhiều. Vì vậy, nội dung chương 1 tập trung phân tích tổng quan về sợi gia cường trong cải thiện BTN trên thế giới và ở Việt Nam, từ đó lựa chọn loại sợi và phương pháp nghiên cứu ở các chương tiếp theo.

1.1. Bê tông nhựa có phụ gia dạng sợi làm lớp mặt đường ô tô

1.1.1. Tổng quan về sử dụng phụ gia sợi cho hỗn hợp bê tông nhựa

Sử dụng sợi gia cường là một trong những giải pháp để tăng cường một số đặc tính cơ lý của hỗn hợp BTN. Các loại sợi thường được sử dụng như: amiăng, carbon, aramid, sợi cellulose, polyester, polypropylene, sợi thép, sợi thủy tinh... Phương pháp này đã được nghiên cứu từ những năm 50 của thế kỷ trước và đã được sử dụng ở nhiều nước như Hoa Kỳ, Nhật Bản, Hàn Quốc, Trung Quốc Về cơ bản, sợi được thêm vào hỗn hợp BTN có hai vai trò chính: (i) - *Hạn chế khả năng chảy của nhựa đường trong hỗn hợp BTN (như hỗn hợp SMA, BTN cấp phối hở)*; (ii) - *Tăng khả năng chịu kéo uốn, tăng tuổi thọ mỏi dưới tác dụng của tải trọng trùng phục cũng như cải thiện đặc tính lún vết bánh xe (LVBX), đặc biệt trong điều kiện nhiệt độ môi trường tương đối cao và lưu lượng giao thông lớn* [65], [80], [101].

Từ những năm đầu của thế kỷ XX, đã có các nghiên cứu về việc sử dụng sợi amiăng để gia cường cho hỗn hợp đá nhựa nguội nhằm cải thiện hiện tượng chảy nhựa vào mùa hè của Công ty Warren Brothers, và đã được cấp bằng sáng chế năm 1917 và 1918 [64]. Năm 1963, Zuehlke và các cộng sự đã công bố nghiên cứu về ưu điểm của BTN nóng sử dụng sợi amiăng so với BTN đối chứng không sử dụng cốt sợi thể hiện ở độ bền Marshall và khả năng chịu kéo uốn của BTN. Thử nghiệm cường độ chịu kéo uốn tại 40°F và 100°F đều cho thấy cường độ kéo uốn của BTN sử dụng sợi amiăng cao hơn so với BTN thông thường [123].

Nghiên cứu của Speer và các cộng sự năm 1962 cũng đã cho thấy, hỗn hợp BTN nóng sử dụng sợi amiăng giúp giảm LVBX so với BTN thường đối với cả hai loại nhựa có độ kim lún 85 và 60 [94].

Cuối những năm 1960, những lo ngại về sức khỏe và môi trường do sử dụng sợi amiăng, các nhà nghiên cứu BTN cốt sợi đã chuyển sang việc sử dụng các loại sợi khác, như: sợi polyester (PE), polypropylene (PP), và polyvinyl (PV) [32]. Năm 1980, kết quả nghiên cứu của Freeman và các cộng sự đã chứng minh hiệu quả của sử dụng sợi PE cường độ cao có hiệu quả gần tương đương so với sợi amiăng; Ưu điểm của sợi PE là không làm tăng nhiều hàm lượng nhựa trong BTN. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, sử dụng sợi thép cải thiện được đáng kể chất lượng BTN, tuy nhiên sợi thép trong BTN nhanh bị ăn mòn [51]. Năm 1993, Jiang và các cộng sự đã công bố nghiên cứu về việc sử dụng sợi PE, PP cho BTN có khả năng hạn chế LVBX và nứt phản ánh. Nhược điểm lớn nhất của các loại cốt sợi gốc nhựa này là khả năng chịu nhiệt kém (160°C), và bị hóa già theo thời gian do có nguồn gốc là nhựa hữu cơ [67].

Gần đây, cùng với sự xuất hiện của các loại BTN như BTN cấp phối gián đoạn (SMA), BTN cấp phối hở, đòi hỏi sử dụng hàm lượng nhựa dùng cao hơn so với các loại BTN thường. Tuy nhiên, vấn đề gặp phải sau đó là việc chảy nhựa khỏi cốt liệu; với hàm lượng nhựa cao và ít cốt liệu mịn (như hỗn hợp SMA) để giữ nhựa trong hỗn hợp, nhựa có xu hướng chảy ra khỏi cốt liệu lớn. Sau nhiều các thử nghiệm, sợi amiăng là một chất ức chế thoát nước tốt (được gọi là chất ổn định) đã được thừa nhận. Chất ổn định dùng để ngăn hiện tượng chảy nhựa có thể là sợi cellulose, sợi khoáng hoặc sợi tổng hợp. Các loại sợi này thông thường được đưa vào hỗn hợp trong quá trình trộn khô giúp ngăn chặn hiện tượng nhựa đường bị chảy ra trong quá trình trộn, vận chuyển, đầm nén và khai thác sau này [70].

Để khắc phục nhược điểm chịu nhiệt kém của các loại cốt sợi PE, PP, PV, vài năm gần đây, các loại sợi tổng hợp (synthetic fibers) có cường độ chịu kéo cao (620 MPa), khả năng chịu nhiệt cao (230°C) đang được nghiên cứu sử dụng làm cốt cho BTN trong tương lai gần.

Năm 2015, Jahromi đã công bố nghiên cứu về ảnh hưởng của sợi carbon nano đến tính chất của hỗn hợp BTN. Nghiên cứu cho thấy rằng, sợi carbon thể hiện tính nhất quán trong các kết quả thử nghiệm, do vậy việc sử dụng sợi sẽ ảnh hưởng đến các đặc tính của hỗn hợp nhựa đường, là tăng độ ổn định và giảm độ dẻo trong hỗn hợp BTN. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng sợi carbon có khả năng chống lại biến dạng kết cấu của mặt đường do tải trọng giao thông ngày càng tăng và vì vậy, cải thiện tăng

tuổi thọ mới bằng cách tăng sức kháng nứt hoặc tăng khả năng kháng biến dạng vĩnh cửu [66].

Năm 2010, nghiên cứu của Mahrez và các cộng sự đã chứng minh khả năng cải thiện đặc tính mới của hỗn hợp Stone Mastic Asphalt (SMA) gia cường sợi thủy tinh so với hỗn hợp SMA không gia cường sợi. Sử dụng sợi gia cường giúp tăng khả năng kháng nứt và biến dạng vĩnh cửu của hỗn hợp. Nghiên cứu cũng kết luận rằng, việc sử dụng sợi thủy tinh cho hỗn hợp BTN sẽ có ý nghĩa và hiệu quả khi xét đến các tuyến đường chịu tải trọng xe nặng [79]. Năm 2015, LATs của Vũ Phương Thảo đã công bố nghiên cứu về cải thiện khả năng LVBX của BTN polime gia cường sợi thủy tinh phân tán trong [14]. Nghiên cứu được thực hiện trên mẫu BTN gia cường sợi thủy tinh phân tán sử dụng bitum polime PMBIII, hàm lượng sợi gia cường là 0% (mẫu đối chứng); 0,3%; 0,5%. Kết quả cho thấy chiều sâu vết lún giảm khi hàm lượng sợi tăng từ 0%-0,3%, chiều sâu vết lún tăng trở lại khi hàm lượng sợi tăng từ 0,3%-0,5%. Mức độ giảm chiều sâu lún lớn nhất so với mẫu đối chứng là 27% tương ứng với mẫu sử dụng hàm lượng sợi thủy tinh là 0,3%.

1.1.2. Hiện trạng sử dụng sợi cho hỗn hợp bê tông nhựa ở Hoa Kỳ và các quốc gia trên thế giới

Trên thế giới, việc sử dụng phụ gia sợi để gia cường BTN là một phần quan trọng của công nghệ xây dựng và đang được áp dụng rộng rãi ở nhiều quốc gia. Tại Hoa Kỳ, phụ gia sợi đã được sử dụng rộng rãi trong việc gia cường BTN, đặc biệt trong các dự án giao thông như đường cao tốc và cầu đường. Vào những năm 1990, BTN sử dụng sợi bazan đã được xây dựng với chất lượng mặt đường rất tốt ở Hoa Kỳ.

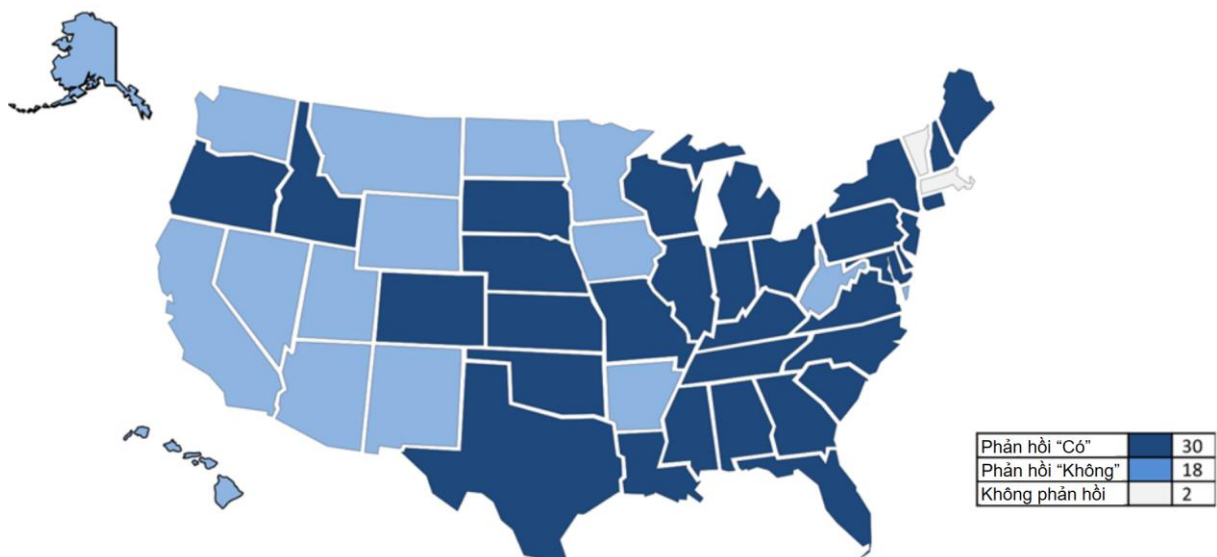
Cho tới nay, khoảng 28 tiểu bang báo cáo sử dụng sợi cho hỗn hợp BTN. Cho đến nay, phần lớn sử dụng sợi cho hỗn hợp SMA và BTN rỗng (cấp phối hở) hoặc BTN độ nhám cao để kiểm soát việc chảy nhựa. Trước đây, sợi được sử dụng cho hỗn hợp BTNC ở một số Bang, nhưng việc sử dụng đã giảm trong khoảng 20 năm trở lại đây. Việc sử dụng SMA và BTNR cũng đang giảm ở một số Bang do chi phí cao, nhưng tình hình có thể thay đổi trong thời gian tới, do tuổi thọ khai thác của loại hỗn hợp như SMA thường kéo dài trung bình tới 20-25 năm, so với tuổi thọ lớp BTNC thông thường là 14-15 năm.

Nhiều loại sợi đã được sử dụng cho hỗn hợp BTN ở Mỹ, bao gồm sợi cellulose, khoáng, polyme tổng hợp và sợi thủy tinh, cũng như một số loại sợi ít phổ biến hơn. Các vật liệu sợi tái chế, như giấy in báo, sợi thảm và sợi lốp tái chế - cũng đã được sử

dụng. Các loại sợi khác nhau này có những ưu và nhược điểm khiến chúng phù hợp hơn cho một số ứng dụng so với những loại sợi khác. Ví dụ, sợi cellulose có khả năng chịu kéo không cao, nhưng có tính hấp thụ và giữ nhựa đường, do đó nó rất thích hợp để giảm chảy nhựa trong các hỗn hợp cấp phối hờ và cấp phối gián đoạn, nhưng không phù hợp để gia cường BTNC.

Phần lớn những nghiên cứu về việc sử dụng sợi trong nhựa đường tập trung vào các thí nghiệm trong phòng và thí nghiệm hiện trường của chất kết dính và hỗn hợp nhựa đường đã được cải biến bằng việc sử dụng sợi. Các kết quả của nghiên cứu đã được trộn xem xét, phân tích, đặc biệt là liên quan đến việc sử dụng sợi trong hỗn hợp BTNC. Trong một số trường hợp, sợi đã được báo cáo là đã cải thiện khả năng kháng lún và kháng nứt của chất kết dính và hỗn hợp BTNC; trong các trường hợp khác, không có sự cải thiện đáng kể nào. Nói chung, việc sử dụng sợi dường như có hiệu quả hơn trong việc cải thiện tính năng của hỗn hợp BTN thông thường. Sợi hiếm khi gây bất lợi cho các tính năng của hỗn hợp BTNC, nhưng nếu chúng không cải thiện hiệu suất, thì có thể không hiệu quả về mặt chi phí. Riêng đối với hỗn hợp Stone Mastic Asphalt (SMA) và hỗn hợp BTN tạo nhám cao (OGFC), tác dụng của sợi chỉ đã được chứng minh rõ ràng là có tác dụng giảm chảy nhựa và được sử dụng phổ biến, mặc dù có thể sử dụng các vật liệu thay thế - chẳng hạn như chất kết dính cải tiến polyme và RAS.

Hình 1.1 liệt kê các trạng thái đã phản hồi và tình trạng sử dụng sợi ở tất cả các Bang tại Mỹ. 30 Bang ở Mỹ đã trả lời là có sử dụng sợi.



Hình 1.1. Bản đồ số lượng các Bang ở Mỹ trả lời cho câu hỏi “Tổ chức của bạn hiện có chỉ định hoặc cho phép sử dụng sợi trong hỗn hợp BTN không? [80]

Việc sử dụng sợi trên thế giới cũng tương tự như ở Mỹ; nghĩa là, việc sử dụng cellulose hoặc sợi khoáng trong hỗn hợp cấp phối gián đoạn và cấp phối hở là thông lệ ở nhiều quốc gia. Đường như ngày càng có nhiều sự quan tâm đến các khu vực đang phát triển trên thế giới trong việc sử dụng các nguyên liệu thực vật có sẵn tại địa phương - chẳng hạn như dừa, đay, gai dầu, ... làm nguồn sợi; điều này cho phép tận dụng lợi ích của sợi về mặt kinh tế đồng thời tạo ra thị trường cho nguyên liệu sản xuất trong nước [80].

1.1.3. Hàm lượng sợi sử dụng dụng trong hỗn hợp BTN

Theo thời gian, hàm lượng sợi thích hợp để sử dụng trong một loại hỗn hợp có thể gần như trở thành tiêu chuẩn cho một số loại sợi nhất định; Ví dụ, 0,3% và 0,4% khối lượng hỗn hợp là tỷ lệ sử dụng phổ biến đối với sợi cellulose và sợi khoáng trong hỗn hợp SMA, được khuyến cáo trong tiêu chuẩn thiết kế hỗn hợp SMA của Mỹ (AASHTO M325-08).

Tuy nhiên, việc sử dụng hàm lượng sợi quá cao có thể làm công tác đầm nén khó khăn hơn, điều này dẫn đến độ rỗng hỗn hợp trong phòng thí nghiệm hoặc tại hiện trường cao hơn. Nghiên cứu của Chowdhury và các cộng sự năm 2005 đã phát hiện ra rằng việc sử dụng 1% sợi từ lớp tái chế dài 6 mm đã làm cứng SMA và làm cho hỗn hợp dễ bị nứt [80].

Thông thường, hàm lượng chất kết dính trong hỗn hợp BTN sử dụng sợi sẽ cao hơn, đặc biệt là với sợi cellulose hoặc các sợi gốc thực vật. Hấp thụ là một đặc tính có lợi ở một mức độ nào đó vì nó cho phép tăng hàm lượng chất kết dính hoặc mastic trong hỗn hợp BTN, có thể làm tăng độ bền, đặc biệt đối với hỗn hợp cấp phối gián đoạn và cấp phối hở. Tuy nhiên, hấp thụ quá nhiều sẽ dẫn đến hàm lượng nhựa tối ưu sẽ tăng lên, làm tăng chi phí xây dựng của công trình. Ngoài khả năng hấp thụ cao hơn, sợi có thể có diện tích bề mặt cao cần được phủ bằng nhựa đường [80].

Trong báo cáo của FHWA năm 2012 [80], Gibson và các cộng sự đã tóm tắt kết quả của một nghiên cứu trước đây, so sánh hỗn hợp BTN sử dụng nhựa đường cải tiến và hỗn hợp BTNC gia cường sợi. Hàm lượng nhựa tối ưu cho các hỗn hợp khác nhau được thể hiện trong Bảng 1.1. Công việc do FHWA tiến hành theo NCHRP 90-07 đã chứng minh sự gia tăng hàm lượng chất kết dính liên quan đến việc sử dụng sợi. Hàm lượng chất kết dính tối ưu được xác định ở độ rỗng 4%, 75 chày đầm xoay Superpave và ở nhiệt độ đầm cố định là 140°C. Bảng 1.1 cho thấy hỗn hợp sử dụng sợi có hàm

lượng chất kết dính tối ưu cao hơn từ 0,5% đến 1,0% so với hỗn hợp BTN sử dụng nhựa đường cải tiến và cao hơn 0,8% so với hỗn hợp đối chứng thông thường.

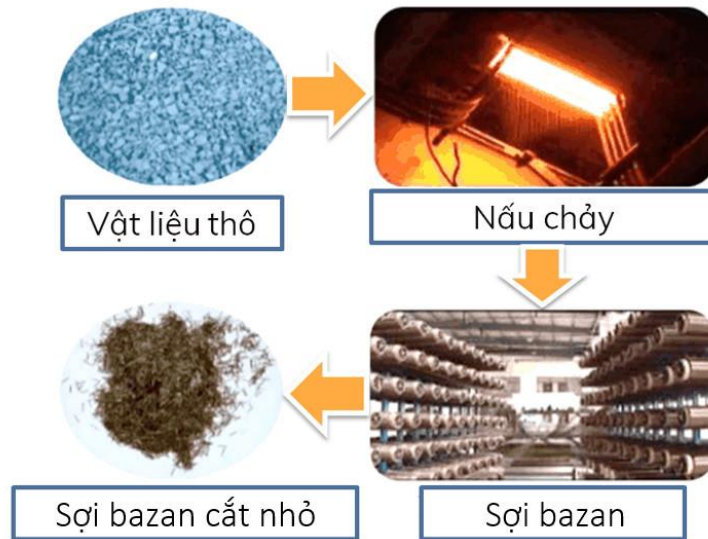
Bảng 1.1. Hàm lượng nhựa đường tối ưu từ các nghiên cứu của FHWA [80]

Hỗn hợp BTN sử dụng phụ gia	Hàm lượng nhựa tối ưu (%)
Terpolymer	4,4
Ethylene vinyl acetate (EVA)	4,4
SBS-LG	4,5
SBS radial grafted	4,6
Ethylene styrene interpolymer	4,6
Nhựa đường bột	4,8
Vụn cao su cải tiến hóa học	4,9
Nhựa đường PG 70-22	4,6
Nhựa đường 70-22 sử dụng 0,3% sợi polyester (theo khối lượng cốt liệu)	5,4

1.2. Sợi bazan dùng cho bê tông nhựa

1.2.1. Tổng quan về sợi bazan

Sợi bazan là vật liệu có nguồn gốc từ tự nhiên. Sợi bazan có tính chất vượt trội so với sợi thủy tinh về độ cứng, khả năng chịu kéo rất cao, bền với hóa chất, nhiệt độ, thân thiện với môi trường. Sợi bazan được sử dụng làm vật liệu chống cháy trong ngành hàng không vũ trụ, ô tô, đồng thời, cũng được sử dụng làm vật liệu tổng hợp để sản xuất nhiều sản phẩm phổ biến khác. Về mặt giá thành, sợi bazan có giá tương đối hợp lý so với các loại sợi khác đang được sử dụng phổ biến trên thế giới như sợi thủy tinh, sợi cellulose, sợi carbon...



Hình 1.2. Quy trình sản xuất sợi bazan [62]

Được hình thành từ đá bazan núi lửa do đó sợi bazan có nhiều đặc tính có lợi. Bên cạnh có mô đun đàn hồi cao và chịu nhiệt độ cao, sợi bazan còn có tính cách âm và chống rung rất cao. Với nhiều đặc tính vượt trội thì việc nghiên cứu về ứng dụng sợi bazan được phát triển mạnh mẽ và là hướng nghiên cứu được nhiều nhà khoa học quan tâm [34], [50], [90]. Quy trình sản xuất sợi bazan được thể hiện ở Hình 1.2.

1.2.2. Tính chất của sợi bazan và các ứng dụng

Theo nghiên cứu của Anne Ross (2006) [90], composite cốt sợi bazan cho đặc tính tương tự như sợi thủy tinh hệ thống silicon bằng nhôm-magiê (S-2 glass) và cũng có mức giá tương đối hợp lý nằm giữa S-2 glass và sợi thủy tinh E không kiềm (E-glass).

Nghiên cứu của Richard Parnas và cộng sự (2007) [86] cho thấy khi so sánh tính chất của các sợi thương phẩm phổ biến, thì cho thấy sợi bazan có tính chất vượt trội so với sợi thủy tinh về độ cứng, khả năng chịu kéo rất cao, bền với hóa chất, nhiệt độ, thân thiện với môi trường. Kết quả chi tiết thể hiện trong Bảng 1.2.

Bảng 1.2. So sánh tính chất giữa các loại sợi khác nhau [86]

Tính chất	Đơn vị	Bazan	E-Glass	S-Glass	Silica
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,7	2,57	2,48	2,15
Độ bền kéo	MPa	4840	3450	4710	4750
Mô đun đàn hồi	GPa	89	77	89	66
Độ dẫn dài tại điểm gãy	%	3,15	4,7	5,6	1,2
Độ bền nén	MPa	3792	3033		3516

Tính chất	Đơn vị	Bazan	E-Glass	S-Glass	Silica
Nhiệt độ làm việc nhỏ nhất	(°C)	-260°	-60		-170°
Nhiệt độ nóng chảy	(°C)	1450°	1120°		1550°
Đường kính	(μm)	9-23	9-13		9-15
Hấp thụ ẩm (65%RAH)	(%)	<0,1	<0,1		<0,1
Độ ổn định khi kéo (20 °C)	(%)	100	100		100
Độ ổn định khi kéo (200 °C)	(%)	95	92		94
Độ ổn định khi kéo (400 °C)	(%)	82	52		80
% Mất mát khối lượng sau 3 giờ đun sôi trong:					
- H_2O	(%)	0,2	0,7		0,05
- $2n NaOH$ (Natri hidroxit)	(%)	5,0	6,0		5,0
- $2n HCl$ (Acid hydrochloric)	(%)	2,2	38,9		15,7

Chikhradze và cộng sự (2012) [44] đã so sánh các tính chất của sợi bazan và các sợi truyền thống khác, như thủy tinh glass, sợi carbon thì sợi bazan có tính chất cơ học gần tương đương với sợi thủy tinh loại tốt. Kết quả thể hiện trong Bảng 1.3.

Bảng 1.3. Tính chất của các loại sợi gia cường [44]

Loại sợi	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Ứng suất phá hủy, GPa	Độ dẫn dài tại điểm gãy, %	Mô đun đàn hồi, GPa
Thủy tinh	2,4-2,5	2,8-3,0	4,7-5,6	74-95
Bazan	2,6-2,8	1,9-2,6	3,5-4,5	70-90
Carbon	1,9-2,1	2,2-7,2	0,5-2,4	200-785

Năm 2013, P. Amuthakkannan và các cộng sự [22] đã nghiên cứu về ảnh hưởng của chiều dài sợi và chất xơ sợi bazan trên tính chất cơ học của vật liệu composite chế tạo trên nền nhựa polyester, kết quả các đặc tính của các vật liệu tổng hợp cho thấy chiều dài sợi là có ảnh hưởng đáng kể trên các tính chất cơ học của vật liệu composite và cũng như hàm lượng xơ. Tỷ lệ trọng lượng chất xơ tối ưu của 68% sợi và chiều dài tối ưu của sợi 10 mm đã được khảo sát. Độ bền kéo của vật liệu composite sợi bazan cho thấy rằng với 68% chất xơ và 10 mm chiều dài của sợi có đặc tính tốt hơn so với độ

dài khác của sợi. Độ bền uốn của vật liệu composite cũng cho thấy tính chất tốt hơn trong 68% chất xơ và 10 mm chiều dài của sợi.

1.2.3. Các nghiên cứu lựa chọn sợi bazan và phương pháp trộn sợi trong hỗn hợp bê tông nhựa

Các đặc tính vật lý quan trọng cần xem xét khi phân tích sợi bazan là chiều dài, cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi, độ giãn dài khi đứt và nhiệt độ nóng chảy. Những đặc tính này có tác động trực tiếp đến hiệu suất chất kết dính và hỗn hợp BTN. Các đặc tính cơ bản của sợi bazan được sử dụng trong hỗn hợp BTN ở các nghiên cứu trên thế giới được tóm tắt trong Bảng 1.4. Sợi bazan có khối lượng riêng 2,46 - 3,3 g/cm³, độ bền kéo 1100 – 4850 MPa, mô đun đàn hồi 40–110 Gpa và độ giãn dài khi đứt là 2,5–3,3% (một số nghiên cứu >3,3%). Chiều dài sợi bazan được nghiên cứu phổ biến trong khoảng từ 3 mm đến 24 mm, đặc biệt tập trung ở các loại sợi bazan có kích cỡ ngắn (3 mm) hoặc trung bình (6 mm). Sợi bazan sở hữu các đặc tính như chịu nhiệt độ cao, độ bền kéo cao, khả năng chống ăn mòn cao và bức xạ tia cực tím và thân thiện với môi trường [62].

Sự phân phối đồng nhất của sợi giống như một loại gia cường không định hướng có tác động đáng kể đến khả năng nâng cao chất lượng của hỗn hợp BTN. Khi sử dụng sợi trong hỗn hợp BTN, cần tránh việc sợi trong hỗn hợp bị vón thành cụm để đảm bảo tối đa phân bố đồng đều [93].

Bảng 1.5 liệt kê các quy trình trộn hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan trên thế giới trong thời gian gần đây. Hiện nay, các nhà nghiên cứu trên thế giới đã sử dụng ba phương pháp để thêm sợi bazan vào hỗn hợp BTN, đó là: trộn ướt, trộn khô và kết hợp cả trộn ướt và trộn khô [87].

- Phương pháp trộn ướt: sử dụng máy trộn cắt tốc độ cao và sợi được trộn với chất kết dính trước khi trộn với cốt liệu [23], [81].

- Phương pháp trộn khô: sợi được trộn cùng cốt liệu trước, sau đó trộn với chất kết dính. Theo các nghiên cứu, phương pháp trộn khô ưu việt và thông dụng hơn phương pháp trộn ướt vì không yêu cầu máy trộn cắt tốc độ cao. Hơn nữa, nhược điểm của sự kết tụ sợi trong phương pháp trộn khô là ít hơn so với phương pháp trộn ướt [18], [39], [48], [87].

- Phương pháp cuối cùng là sự kết hợp giữa phương pháp trộn khô và trộn ướt; cốt liệu và chất kết dính được trộn với nhau trước, sau đó sợi được thêm vào.

Bảng 1.4. Tổng hợp các nghiên cứu trên thế giới về tính chất cơ bản của sợi bazan được dùng trong hỗn hợp BTN

TT	Chiều dài (mm)	Đường kính (μm)	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Nhiệt độ nóng chảy (°C)	Cường độ chịu kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Độ giãn dài khi đứt (%)	Tiêu chuẩn	Nguồn
1	1.5	11-13	-	1500-1600	>2000	-	-	-	[121]
2	3-5	-	-	1350	-	84	2.8	ASTM D2256	[35]
3	3, 6, 9	13	-	-	>3000	-	3.2	-	[98]
4	3, 6, 9, 12	13	-	1600	2218	-	-	-	[99]
5	3, 9, 12, 15	16	-	-	2200-2500	-	2.71	-	[75]
6	4.5	13	-	-	4100-4840	93.1-110	3.1-3.2	-	[97]
7	6	9-12	2.63	1450	3800-4840	-	3.1	-	[119]
8	6	13	2.817	1500	2000	-	-	-	[112]
9	6	13	2.7	-	3000-3500	-	2.7	-	[52]
10	6	15	2.463	-	3000-4840	-	-	-	[47]
11	6	21	-	-	>1500	93.1-110	3.2	-	[78]
12	6	20	2.7	-	4500	100	3.1	-	[118]
13	6	13	-	-	3200	>40	3.2	-	[38]
14	6	13	2.56-3.05	-	4100-4830	90-110	3.0-3.3	ASTMD 3800-16, ASTM D 5034-17	[61]
15	6	8	2.5	1505	3000	-	3	-	[21]
16	6, 9, 15	17	-	1050	4000-4850	90	>3.2	ASTM D 276-00a, ASTM D 2987-88, ASTM D 5034-95, ASTM D2130-90, ASTM D204-02	[88]
17	6-12	12-15	-	1450-1500	2800-3800	90-110	3.2	-	[73]
18	6-12	12-15	2.56-3.05	-	2800-3800	90-100	3.2	-	[110]
19	6,12, 20	13	-	-	3200	-	2.5-2.8	-	[58]

TT	Chiều dài (mm)	Đường kính (μm)	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Nhiệt độ nóng chảy (°C)	Cường độ chịu kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Độ giãn dài khi đứt (%)	Tiêu chuẩn	Nguồn
20	9	16	-	-	2000-2500	>80	-	-	[76]
21	9	17	2.64	-	3600	90	3.9	-	[95]
22	9	13-15	-	1050	3000	105	3.1	-	[71]
23									
26	9	-	-	2500	2500	-	-	ASTM D3800, ASTM D276, ASTM D7138, ASTM D2256, ASTM D204, ASTM D5103	[20]
27	10-12	12-14	-	-	2800-3400	80-90	3.1	-	[69]
28	12	13	-	-	3200	78.6 94.2	2.5-2.8	-	[57]
29	12	13	-	-	2700	65	2.5-2.8	-	[113]
30	12	13-20	2,8	1450	4840	-	3.15	-	[89]
31	12	9-23	2,6-2,8	1450	4840	89	3.2	-	[36]
32	12	15	1,36-1,4	1050	3900	-	3.2	-	[109]
33	24	18	-	-	1100	89	3.15	RBR18-T 10/24	[96]
34	24	18	-	-	4100-4850	89	3.1	-	[46]
35	-	-	2,8-3,3	-	3000-4500	91-110	3.2	-	[53]

Bảng 1.5. Bảng tổng hợp quy trình trộn sợi bazan trong hỗn hợp BTN ở một số nghiên cứu gần đây trên thế giới

Loại hỗn hợp	Loại chất kết dính	Phương pháp trộn	Quy trình trộn sợi bazan	Nguồn
Mastic nhựa đường	Nhựa đường sử dụng phụ gia SBS	Trộn khô	1. Sợi bazan và bột khoáng được sấy khô ở 120°C. Nhựa đường được gia nhiệt đến 175°C. 2. Trộn sợi bazan và bột khoáng. 3. Sợi bazan và bột khoáng được trộn vào nhựa đường thành 3 phần, tốc độ trộn 1000 vòng/phút trong 30 phút. Sau đó tốc độ 500 vòng/phút trong 20 phút.	[102]

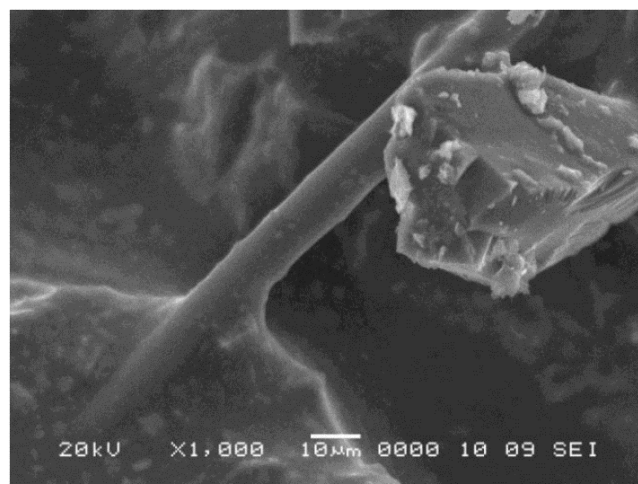
Loại hỗn hợp	Loại chất kết dính	Phương pháp trộn	Quy trình trộn sợi bazan	Nguồn
(BTN 16) gia cường diatomite	PG 64-22	Trộn khô	1. Nhựa đường và diatomit được gia nhiệt đến 135°C trong 4 giờ, sau đó trộn trong 15 phút. 2. Trộn sợi bazan và cốt liệu đã nung nóng. 3. Thêm nhựa đường vào và trộn trong 5-6 phút.	[46]
BTN độ nhám cao (OGFC-10)	PG 82-22	Trộn khô	1. Sợi bazan được trộn với cốt liệu đã được sấy khô trong 1 phút. 2. Nhựa đường được thêm vào và trộn trong thời gian 2 phút ở 180°C.	[119]
SMA-13	Nhựa đường sử dụng phụ gia SBS	Trộn khô	1. Cốt liệu và bột khoáng được gia nhiệt ở 180°C trong 2 giờ. Nhựa đường biến tính SBS được gia nhiệt đến 170°C. 2. Cốt liệu và sợi bazan được trộn cùng nhau. 3. Nhựa đường được trộn với cốt liệu và sợi bazan ở 165°C. 4. Bột khoáng được thêm vào và trộn ở nhiệt độ 165°C.	[98]
BTNC-13	Nhựa đường sử dụng phụ gia SBS	Trộn khô	1. Sợi bazan được trộn với cốt liệu trong 90 giây. 2. Thêm nhựa đường và bột khoáng vào và trộn ở tốc độ 75 vòng/phút trong 180 giây.	[121]
BTNC-13	AH-90	Trộn khô	1. Cốt liệu được nung nóng trước trộn với sợi bazan trong 90 giây. 2. Nhựa đường được gia nhiệt trước được thêm vào và trộn trong 90 giây. 3. Bột đá vôi được thêm vào và trộn trong 90 giây.	[38]
SMA-13, BTNC-13	Nhựa đường sử dụng phụ gia SBS	Trộn khô	1. Sợi bazan được trộn cùng cốt liệu trong 90 giây. 2. Nhựa đường được thêm vào và trộn.	[105]
SMA-16	B50/70, Nhựa đường sử dụng phụ gia SBS	Trộn khô	1. Cốt liệu và sợi bazan được trộn trong 2 phút và sau đó gia nhiệt ở 170°C trong 2 giờ. 2. Nhựa đường được đun nóng đến 145°C và sau đó trộn với cốt liệu (đã trộn sợi bazan) trong 2 phút.	[36]
BTNC-13	B70	Kết hợp trộn ướt và trộn khô	1. Cốt liệu và nhựa đường được trộn ở 160°C trong 90 giây. 2. Sợi bazan được thêm vào và trộn trong 90 giây. 3. Chất độn khoáng đã được thêm vào.	[113]
BTNC 12,5	PG 76-22	Kết hợp trộn ướt và trộn khô	1. Trộn cốt liệu đã gia nhiệt và nhựa đường. 2. Sợi bazan được thêm vào hỗn hợp thành bốn đợt, cách nhau 15 giây.	[20]
BTN độ nhám cao (OGFC-16)	Nhựa đường B70 sử dụng nano-silica	Kết hợp trộn ướt và trộn khô	1. Nano-silica và SBS được trộn với tốc độ 1800 vòng/phút ở 160°C trong 20 phút. 2. Cốt liệu và bột khoáng được trộn với nhựa đường. Sau đó sợi được thêm vào.	[96]
BTNC-13	AH-70	Kết hợp trộn ướt và trộn khô	1. Cốt liệu được gia nhiệt trước được trộn với nhựa đường trong 90 giây. 2. Sợi bazan được thêm vào và trộn trong 90 giây. 3. Bột khoáng được thêm vào sau cùng.	[58]

Loại hỗn hợp	Loại chất kết dính	Phương pháp trộn	Quy trình trộn sợi bazan	Nguồn
BTNC-16	AH-70	Kết hợp trộn ướt và trộn khô	1. Sợi bazan và bột khoáng được sấy khô ở 60°C trong 1 giờ. Nhựa đường được gia nhiệt ở 160°C. 2. Nhựa đường và bột khoáng được trộn trong thời gian 3 phút. 3. Sợi bazan được thêm vào và trộn ở tốc độ 2000 vòng/phút trong 5 phút.	[88]
BTNC-13	PG 64-22	Kết hợp trộn ướt và trộn khô	1. Cốt liệu và nhựa đường được trộn trong 90 giây ở 170°C. 2. Sợi bazan được thêm vào và trộn trong 90 giây. 3. Bột khoáng được thêm vào sau cùng.	[57]
BTNC-13	AH-70	Kết hợp trộn ướt và trộn khô	1. Nhựa đường và cốt liệu được trộn trong 90 giây. 2. Sợi bazan được thêm vào và trộn trong 90 giây. 3. Bột khoáng được thêm vào sau cùng và trộn trong 90 giây.	[68]

1.3. Các nghiên cứu về bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

1.3.1. Hình thái và sự phân bố của sợi bazan trong bê tông nhựa

Zhao và các cộng sự [121] đã tiến hành chụp mẫu BTN sử dụng sợi bazan bằng thiết bị chụp hiển vi điện tử - SEM (Hình 1.3), nghiên cứu cho thấy sợi bazan phân bố ngẫu nhiên trong không gian ba chiều của hỗn hợp BTN, sợi bazan giúp phân tán ứng suất và tránh ứng suất quá mức. Kết quả cho thấy sợi bazan đóng một vai trò "cầu nối" giúp cải thiện khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN, đồng thời làm chậm sự phát triển của các vết nứt.



Hình 1.3. Hình ảnh chụp SEM hỗn hợp BTN gia cường sợi bazan [121]

1.3.2. Nghiên cứu phương pháp Marshall và hàm lượng nhựa đường tối ưu

Hỗn hợp BTN với các tỷ lệ sợi bazan khác nhau là 0% (đối chứng), 0,2%, 0,3%, 0,4% và 0,5% khối lượng, được chuẩn bị, và được ký hiệu bằng nhóm 1 (đối chứng), 2,

3, 4 và 5, tương ứng. Thí nghiệm sử dụng phương pháp thiết kế Marshall để xác định hàm lượng nhựa đường tối ưu tương ứng với từng hàm lượng sợi (xem Bảng 1.6). Từ Bảng 1.6, có thể thấy rằng hàm lượng nhựa đường tối ưu (OAC) của các loại BTN khác nhau hỗn hợp tăng dần theo hàm lượng sợi bazan. Xu hướng này tương đồng với các kết quả thu được trong nghiên cứu khác như nghiên cứu của Xiong (2015) [112], Chen (2010) [40].

Bảng 1.6. Hàm lượng nhựa đường tối ưu tương ứng với từng hàm lượng sợi

Nhóm	1 (đối chứng)	2	3	4	5
Hàm lượng sợi bazan	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5
Hàm lượng nhựa đường tối ưu	5,03	5,16	5,27	5,35	5,42

1.3.3. Nghiên cứu lún vật bánh xe và độ ổn định động (DS)

Năm 2010, Fan [49] đã công bố nghiên cứu so sánh các đặc tính cơ lý của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan, sợi polyester và sợi xylogen. Hàm lượng sợi được dùng trong thử nghiệm cho cả 3 loại sợi là 0,15%, 0,30% và 0,45%. Các kết quả thí nghiệm cho thấy hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan cho giá trị độ ổn định marshall (MS), độ ổn định động DS, khả năng kháng ẩm tốt hơn hai loại hỗn hợp BTN sử dụng sợi polyester và xylogen.

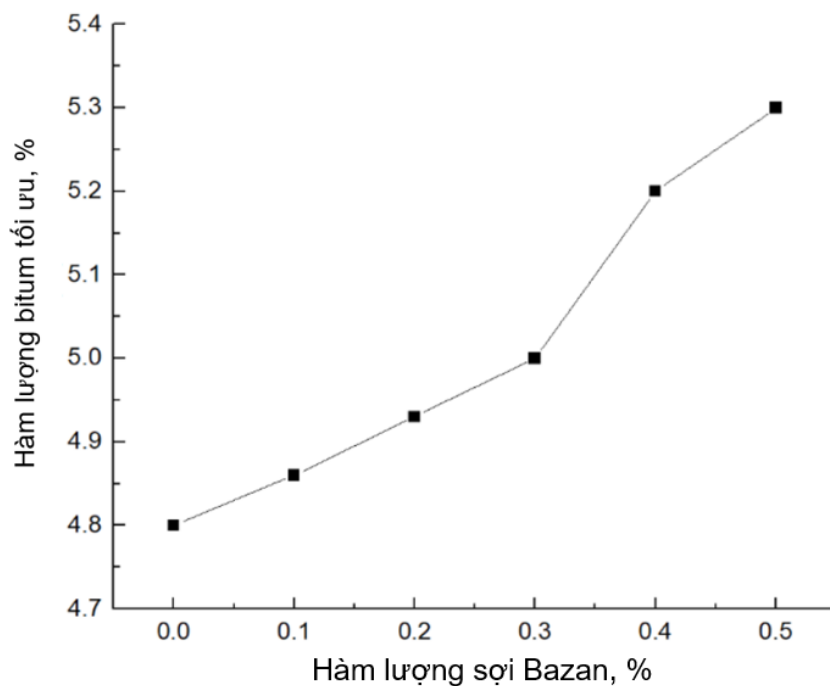
Năm 2018, Celauro và Pratico [35] đã đánh giá hiệu quả của sợi bazan sử dụng trong hỗn hợp BTN cho lớp mặt đường, đặc biệt là sử dụng trong các khu vực đô thị và các làn đường dành riêng cho xe buýt. Hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3% khối lượng hỗn hợp, nhiệt độ nóng chảy 1350°C, mô đun đàn hồi 84 GPa. Nhựa đường sử dụng trong nghiên cứu là nhựa đường 50/70. Kết quả thí nghiệm LVBX theo tiêu chuẩn EN 12697-22 (phương pháp B) cho thấy, hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan có chiều sâu LVBX thấp nhất so với 02 mẫu đối chứng không sử dụng sợi bazan.

Năm 2020, Zhao và các cộng sự [121] đã nghiên cứu các tính năng của hỗn hợp BTN sử dụng hàm lượng sợi bazan khác nhau, có đối chứng với sợi polyester và sợi lignin (xem Bảng 1.7), được đánh giá qua các thí nghiệm: MS, độ dẻo Marshall (MF); LVBX; uốn dầm 3 điểm; khả năng kháng ẩm. Các kết quả thí nghiệm đã cho thấy, hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan giúp tăng cường đáng kể các đặc tính cơ học, các tính năng ở nhiệt độ thấp, nhiệt độ cao và độ nhạy ẩm. Hàm lượng nhựa đường tối ưu (OAC) của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan với tỉ lệ 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% và 0,5% lần lượt là 4,87%, 4,98%, 5,00%, 5,20% và 5,30% (xem Hình 1.4). Như vậy có thể thấy, khi hàm

lượng sợi bazan tăng lên, giá trị hàm lượng nhựa đường tối ưu tăng lên đáng kể. Sợi bazan có diện tích bề mặt riêng lớn, dẫn đến việc hấp thụ nhiều nhựa hơn. Do đó, hàm lượng nhựa đường tối ưu sẽ tăng lên sau khi thêm sợi bazan. Kết hợp các yếu tố về kinh tế và tính năng, thì hàm lượng sợi bazan phù hợp sử dụng cho hỗn hợp BTN là 0,3%.

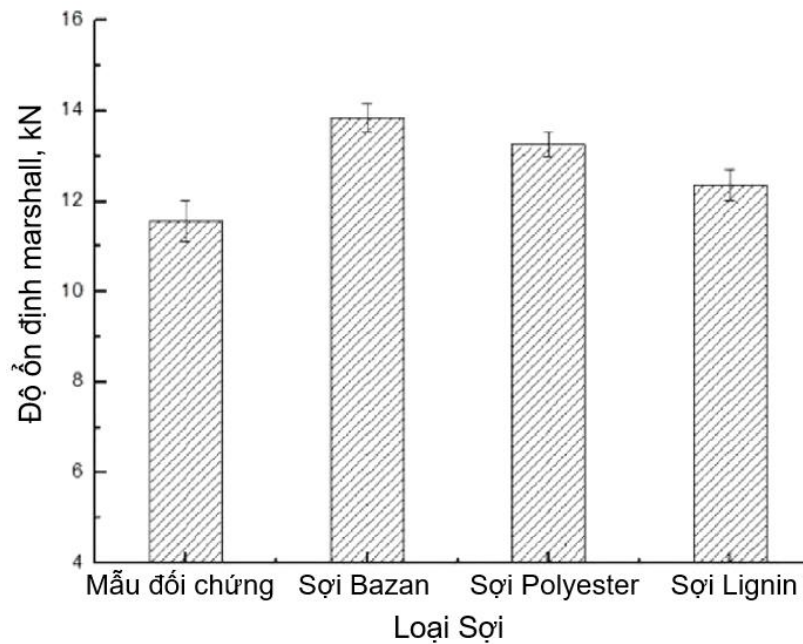
Bảng 1.7. Tính chất cơ lý của các loại sợi [121]

Loại sợi	Đường kính (μm)	Chiều dài (mm)	Khối lượng riêng tương đối ở 25 °C	Cường độ chịu kéo (MPa)	Nhiệt độ nóng chảy (°C)
Bazan	11-13	1.5	2,416	>2000	1500-1600
Polyester	20	6	1,317	570	260
Lignin	45	1,1	0,830	110	>1000



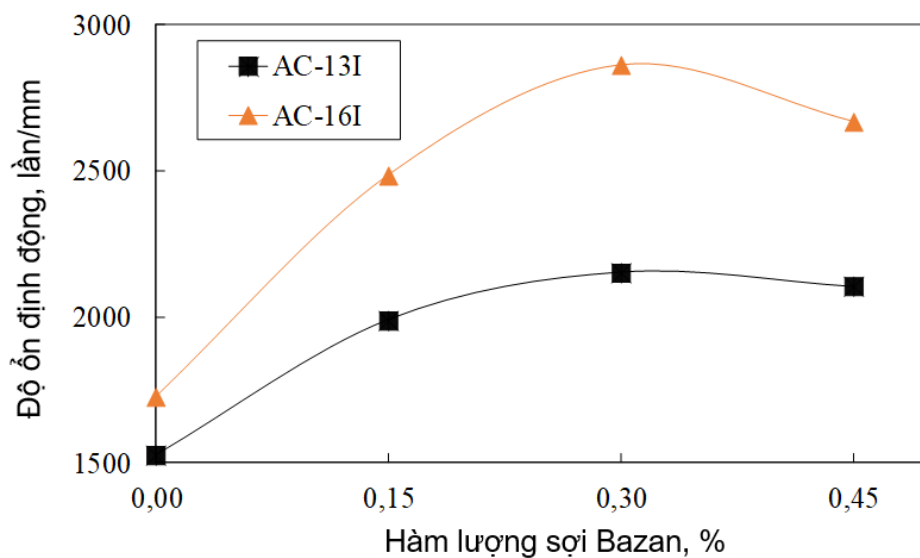
Hình 1.4. Hàm lượng nhựa đường tối ưu với hàm lượng sợi bazan khác nhau

Năm 2020, Zhao và các cộng sự [121] cũng tiến hành các thí nghiệm so sánh tính năng của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan, sợi polyester và sợi lignin. Hàm lượng tối ưu của mỗi loại sợi đã được thêm vào trong hỗn hợp BTN như sau: sợi bazan là 0,3%, sợi polyester là 0,4% và sợi lignin là 0,35%. Sau khi thêm sợi bazan, sợi polyester và sợi lignin, MS của hỗn hợp BTN lần lượt tăng 19,6%, 14,5% và 6,8% so với mẫu đối chứng (không sử dụng sợi). Hình 1.5 cũng cho thấy giá trị MS của hỗn hợp BTN có chứa sợi bazan cao hơn các loại sợi khác.

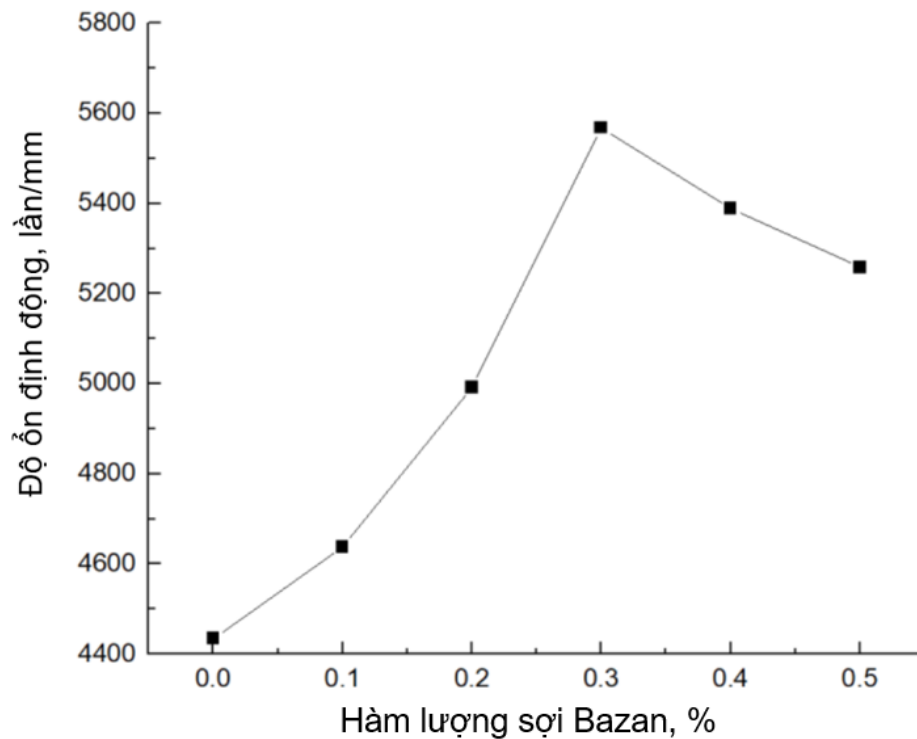


Hình 1.5. Độ ổn định Marshall của hỗn hợp BTN gia cường các loại sợi

Năm 2014, Zheng và các cộng sự [122] đã công bố nghiên cứu hai loại hỗn hợp BTN AC-16I and AC-13I sử dụng sợi bazan. Kết quả cho thấy, hỗn hợp BTN AC-13I sử dụng sợi bazan có độ ổn định động DS lớn gấp từ 1,30 đến 1,41 lần so với hỗn hợp đối chứng. Hỗn hợp BTN AC-16I sử dụng sợi bazan có độ ổn định động DS lớn gấp từ 1,44 đến 1,66 lần so với hỗn hợp đối chứng (xem Hình 1.6).



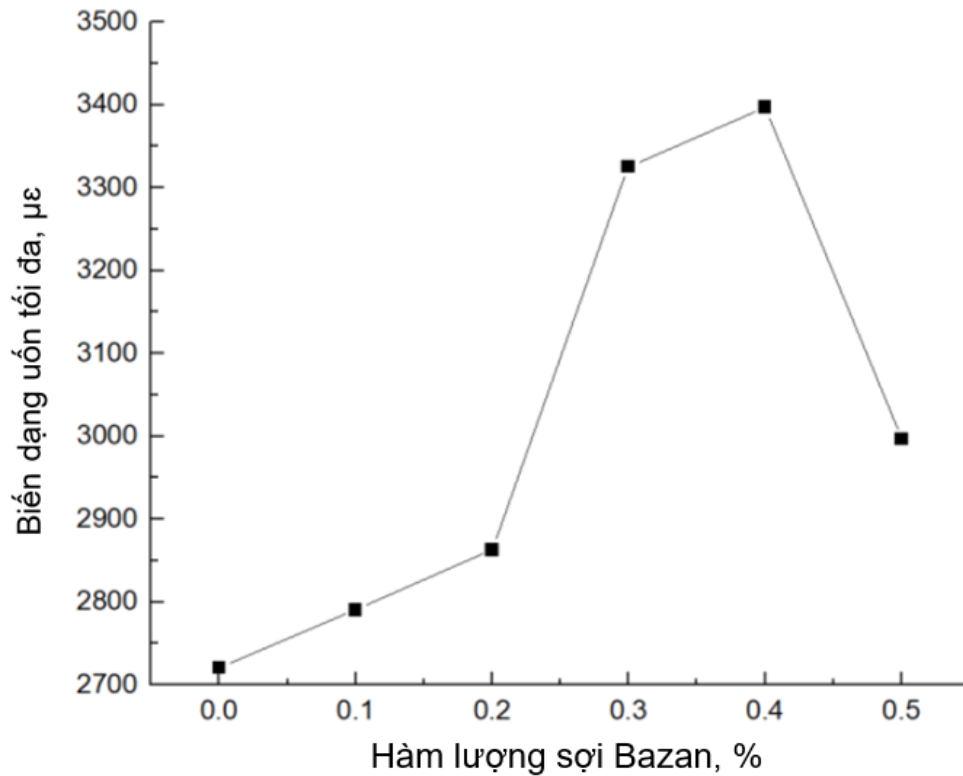
Hình 1.6. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến độ ổn định động của hỗn hợp BTN



Hình 1.7. Độ ổn định động của hỗn hợp BTN với các hàm lượng sợi bazan [121]

Hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3% có độ ổn định động DS lớn nhất là 5568 lượt/mm, và lớn hơn 1,25 lần so với hỗn hợp BTN không sử dụng sợi bazan (xem Hình 1.7). Kết quả thí nghiệm đã chứng minh rằng, tính năng của hỗn hợp BTN ở nhiệt độ cao (60°C) có thể được cải thiện đáng kể khi gia cường bằng sợi bazan. Sợi bazan làm tăng độ nhớt của vữa nhựa, do đó cường độ liên kết giữa nhựa đường và cốt liệu được tăng lên. Không những vậy, độ bền liên kết cũng được tăng lên nhờ hiệu ứng cầu nối giữa các sợi [121].

Thí nghiệm uốn ở nhiệt độ thấp (-10°C) cũng được Zhao và các cộng sự [121] thực hiện, kết quả cho thấy phát triển đặc tính của BTN ở nhiệt độ thấp cũng tương tự như độ ổn định động (DS) ở nhiệt độ cao với sự gia tăng của hàm lượng sợi bazan. Khi hàm lượng sợi đạt 0,4%, biến dạng phá hoại đạt giá trị lớn nhất. Điều đáng chú ý là biến dạng uốn tối đa của hỗn hợp BTN chứa 0,4% sợi bazan chỉ cao hơn 2% so với hỗn hợp bê BTN chứa 0,3% sợi bazan. Biến dạng uốn tối đa của hỗn hợp BTN khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% tăng lên 24,8% so với hỗn hợp BTN không sử dụng sợi bazan (xem Hình 1.8). Kết quả thử nghiệm đã chứng minh rằng, đặc tính cơ lý của hỗn hợp BTN ở nhiệt độ thấp có thể được tăng cường đáng kể bằng cách bổ sung sợi bazan.



Hình 1.8. Biến dạng uốn tối đa của hỗn hợp BTN với các hàm lượng sợi bazan khác nhau [121]

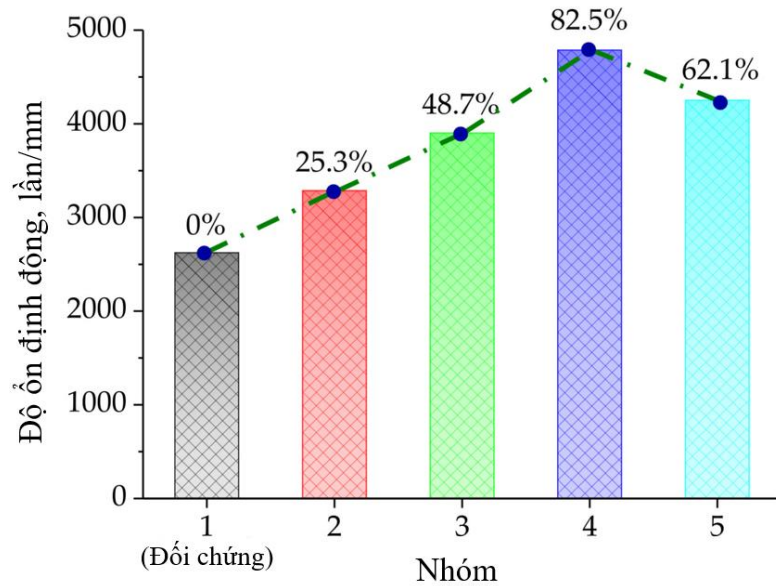
Năm 2018, để tăng cường các tính năng của hỗn hợp BTN AC-13, Cheng và các cộng sự (2018) [38] đã sử dụng sợi bazan với chiều dài sợi 6mm. Các tính chất cơ lý của sợi bazan đã được thử nghiệm (xem Bảng 1.8).

Bảng 1.8. Tính chất cơ lý của sợi bazan có nguồn gốc ở Trung Quốc [38]

Tính chất	Màu sắc	Chiều dài (mm)	Đường kính (μm)	Khối lượng riêng (g/cm^3)	Cường độ chịu kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Độ giãn dài giới hạn (%)
Giá trị	Nâu vàng	6	13	2,56	3200	> 40	3,2

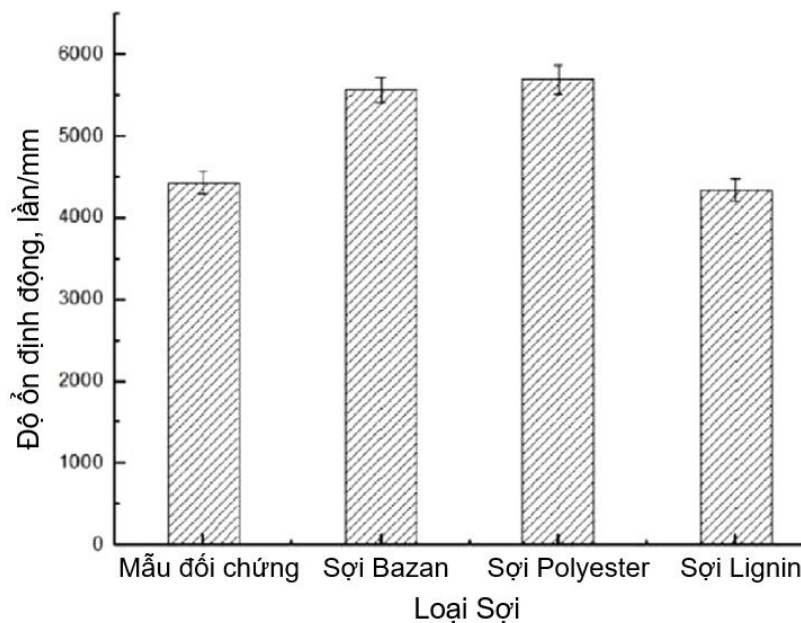
Cheng (2018) [38] đã thí nghiệm đánh giá khả năng kháng LVBX ở nhiệt độ cao (60°C) với 5 nhóm mẫu ở các giá trị hàm lượng nhựa đường tối ưu tương ứng. Hình 1.9 thể hiện kết quả DS ở nhiệt độ cao của 5 nhóm. Kết quả cho thấy DS có xu hướng tăng khi hàm lượng sợi bazan tăng dần từ 0% đến 0,4%. Khi hàm lượng sợi tiếp tục tăng lên 0,5%, DS giảm dần. Hơn nữa, DS đạt giá trị lớn nhất ở hàm lượng sợi bazan là 0,4%. So với nhóm đối chứng, giá trị DS của các nhóm thử nghiệm được cải thiện lần lượt là 25,3%, 48,7%, 82,5% và 62,1%. Giá trị DS lớn hơn có nghĩa là khả năng chống LVBX

tốt hơn. Như vậy, kết quả thí nghiệm đã chứng minh khả năng kháng LVBX rất tốt của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan so với hỗn hợp BTN không sử dụng sợi.



Hình 1.9. Kết quả thí nghiệm độ ổn định động ở nhiệt độ cao với hàm lượng sợi bazan khác nhau [38]

Zhao và các cộng sự [121] cho thấy giá trị độ ổn định động của hỗn hợp BTN gia cường sợi bazan và hỗn hợp BTN sử dụng sợi polyeste cao hơn hỗn hợp BTN sử dụng sợi lignin (xem Hình 1.10). Từ Bảng 1.7 có thể thấy sợi bazan và sợi polyester có tính chất cơ học tốt hơn sợi lignin, có lợi cho việc cải thiện khả năng chống LVBX và khả năng cắt của hỗn hợp BTN.



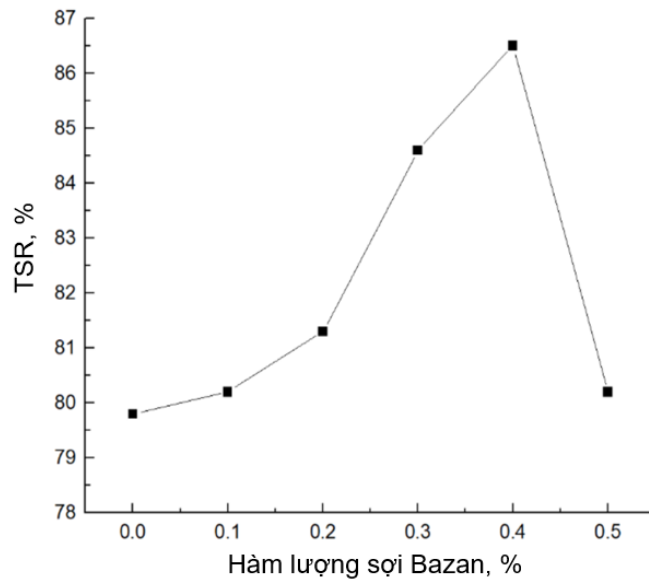
Hình 1.10. Độ ổn định động của hỗn hợp BTN gia cường các loại sợi khác nhau

1.3.4. Nghiên cứu khả năng kháng ẩm

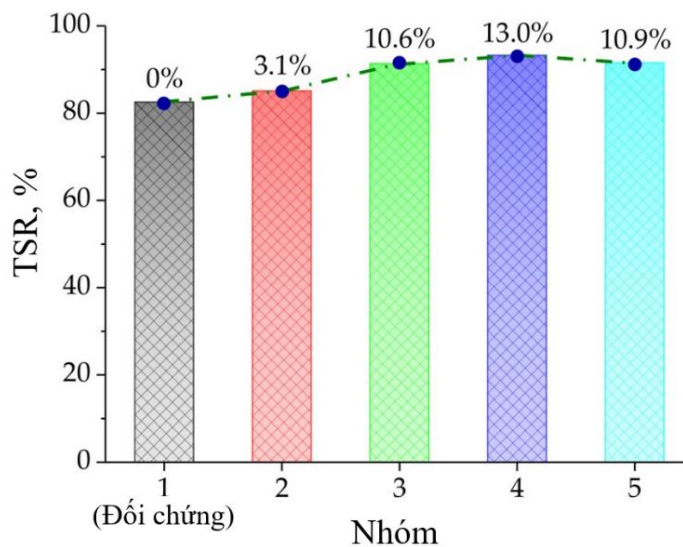
Thí nghiệm khả năng kháng ẩm của hỗn hợp BTN thể hiện qua hệ số cường độ chịu kéo (TSR) được Zhao và các cộng sự [121] thực hiện đã cho thấy khi hàm lượng sợi bazan nhỏ hơn 0,4%, tăng hàm lượng sợi thì giá trị TSR tăng lên. Khi hàm lượng sợi bazan là 0,4%, TSR đạt giá trị lớn nhất. So với mẫu đối chứng, giá trị TSR của hỗn hợp BTN chứa 0,4% sợi bazan tăng 8,3%. Nguyên nhân chính của hiện tượng này là do bề mặt của sợi bazan và nhựa đường có tính kiềm và axit tương ứng. Ngoài ra, diện tích bề mặt riêng của sợi bazan là tương đối lớn. Sợi bazan hấp thụ các thành phần nhẹ trong nhựa đường, làm tăng độ dày của màng nhựa và cải thiện độ bền liên kết giữa nhựa đường và cốt liệu, điều này giúp ngăn hơi ẩm xâm nhập bề mặt giữa nhựa đường và cốt liệu [35].

Khi hàm lượng sợi bazan tăng lên 0,5%, giá trị TSR giảm đáng kể (thể hiện ở đường dốc đứng trên Hình 1.11). Nguyên nhân có thể là do hàm lượng chất xơ quá nhiều dẫn đến sự phân tán sợi không đồng đều và độ xốp quá mức của hỗn hợp, làm giảm độ ổn định nước của hỗn hợp BTN. Như vậy, kết quả thí nghiệm đã chỉ ra rằng, hàm lượng tối ưu của sợi bazan với khả năng kháng ẩm của hỗn hợp BTN là 0,4%.

Song song với thí nghiệm DS và thí nghiệm kéo gián tiếp ở nhiệt độ thấp, Cheng và các cộng sự (2018) [38] cũng tiến hành thí nghiệm xác định khả năng kháng ẩm của hỗn hợp BTN ở nhiệt độ 25°C sử dụng các loại sợi bazan khác nhau thông qua TSR. Các giá trị TSR thể hiện xu hướng biến thiên gần giống với DS và thí nghiệm kéo gián tiếp ở nhiệt độ thấp (xem Hình 1.12). Giá trị TSR của các nhóm thử nghiệm đã được cải thiện 3,1%, 10,6%, 13,0% và 10,9%, so với với nhóm đối chứng và nhóm thử nghiệm 4 với hàm lượng sợi bazan là 0,4% cho giá trị TSR cao nhất. Điều này có thể được lý giải là do ảnh hưởng hấp thụ giữa nhựa đường và sợi bazan, khả năng kết dính giữa nhựa đường và cốt liệu đã được cải thiện đáng kể, do đó quá trình bong tróc của cốt liệu dưới tác dụng của nước sẽ được ngăn chặn. Đồng thời, sợi bazan với môđun và cường độ cao đã hình thành cấu trúc mạng không gian trong hỗn hợp BTN, đóng vai trò gia cường và tạo độ cứng cho toàn thể cấu trúc.



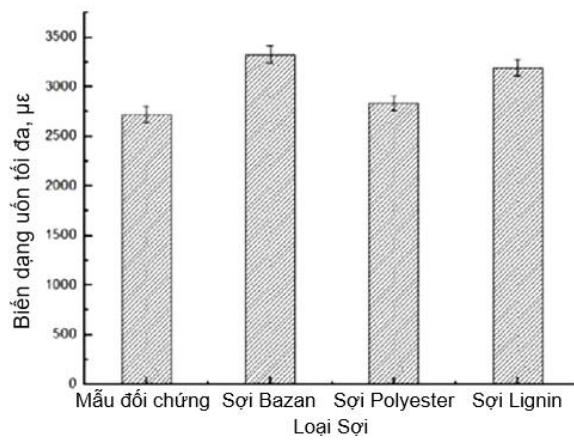
Hình 1.11. TSR của BTN với hàm lượng sợi bazan khác nhau [121]



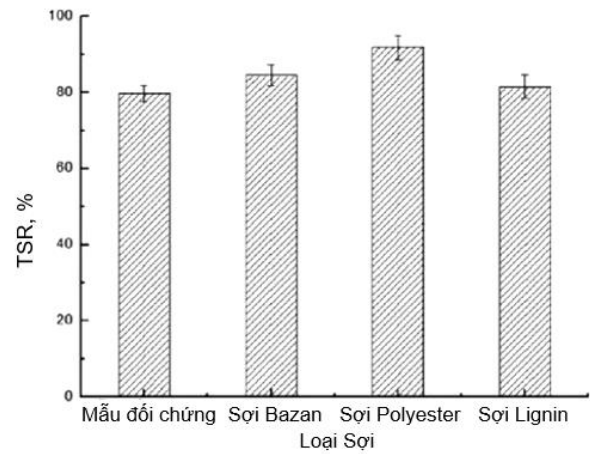
Hình 1.12. TSR của BTN ở nhiệt độ 25°C với hàm lượng sợi bazan khác nhau

Hình 1.13a thể hiện cường độ uốn tối đa của hỗn hợp BTN chứa các loại sợi khác nhau. Có thể thấy, cường độ uốn tối đa của hỗn hợp BTN gia cường sợi bazan cao hơn so với hỗn hợp BTN gia cường sợi lignin, sợi polyester. Sợi bazan với độ bền kéo cao hơn sẽ làm chậm sự hình thành và phát triển vết nứt của hỗn hợp BTN. Đây có thể là lý do tại sao hỗn hợp BTN sợi bazan có đặc tính chống nứt tốt hơn ở nhiệt độ thấp.

Hình 1.13b cho thấy giá trị TSR của hỗn hợp BTN có chứa ba loại sợi và mẫu đối chứng. Giá trị TSR của hỗn hợp BTN có chứa sợi bazan thấp hơn hỗn hợp BTN có chứa sợi polyester. Tuy nhiên, giá trị này cao hơn hỗn hợp BTN sử dụng sợi lignin và mẫu đối chứng (không sử dụng sợi).



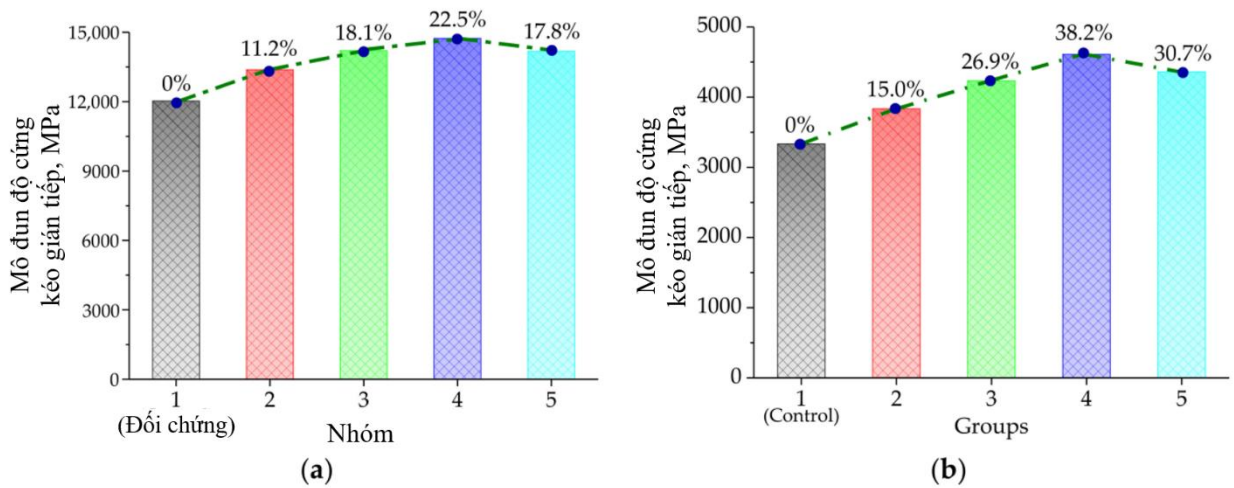
(a) Biên dạng uốn tối đa



(b) Khả năng kháng ẩm

Hình 1.13. Tính năng của hỗn hợp BTN gia cường các loại sợi khác nhau**1.3.5. Nghiên cứu mô đun đàn hồi**

Thí nghiệm kéo gián tiếp (IDT) để xác định mô đun đàn hồi và hệ số poát xông ở nhiệt độ thấp (5°C và 20°C) được Cheng và các cộng sự (2018) [38] thực hiện. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng, khi hàm lượng sợi bazan tăng, các giá trị mô đun độ cứng kéo gián tiếp có xu hướng tăng và sau đó giảm dần. Mô đun độ cứng kéo gián tiếp là một chỉ số để đánh giá khả năng chống nứt ở nhiệt độ thấp của hỗn hợp BTN, giá trị mô đun độ cứng kéo gián tiếp lớn hơn thì khả năng chống nứt hỗn hợp BTN sẽ tốt hơn. Như thể hiện ở Hình 1.14, hiệu suất chống nứt ở nhiệt độ thấp đã được cải thiện khi bổ sung thêm sợi bazan. Đối với nhóm đối chứng, giá trị mô đun độ cứng kéo gián tiếp tăng 11,2%, 18,1%, 22,5% và 17,8% ở 5°C và 15,0%, 26,9%, 38,2% và 30,7% ở 20°C , khi thêm sợi bazan với hàm lượng 0,2%, 0,3%, 0,4% và 0,5%. Không những vậy, có thể thấy giá trị mô đun độ cứng kéo gián tiếp có ảnh hưởng đáng kể nhất khi hàm lượng sợi bazan là 0,4%. Xu hướng biến đổi này có thể là do cấu trúc mạng không gian của sợi bazan trong hỗn hợp nhựa đường. Sự hấp thụ giữa nhựa đường và sợi bazan dẫn đến tỷ lệ cao hơn cấu trúc nhựa đường, giúp tăng cường độ bền liên kết bề mặt. Đồng thời, việc bổ sung sợi bazan cũng có thể ngăn sự mở rộng thêm của vết nứt. Trong khi đó, giá trị mô đun độ cứng kéo gián tiếp giảm cũng có thể là do sự phân tán không đồng đều của sợi bazan trong nhựa đường.



Hình 1.14. Kết quả thí nghiệm mô đun độ cứng kéo gián tiếp ở nhiệt độ thấp của hỗn hợp BTN sử dụng các hàm lượng sợi bazan khác nhau: (a) ở 5°C, (b) ở 20°C

1.4. Nghiên cứu sử dụng các mô hình học máy dự báo tính chất của bê tông nhựa

1.4.1. Tổng quan về học máy (ML)

Học máy (ML) là một lĩnh vực của trí tuệ nhân tạo (AI) tập trung vào việc phát triển các hệ thống và thuật toán có khả năng tự học hỏi từ dữ liệu để thực hiện các nhiệm vụ mà không cần sự can thiệp của con người. Được xem là một trong những phát triển quan trọng nhất của thế kỷ XXI, ML đã có ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, từ công nghiệp đến y tế, tài chính, giáo dục và nhiều lĩnh vực khác.

Cơ bản, ML là quá trình dạy cho máy tính biết cách tự điều chỉnh và tối ưu hóa các mô hình dự đoán hoặc quyết định dựa trên dữ liệu. Các thuật toán ML chia thành ba loại chính:

- Học giám sát: Máy tính học từ dữ liệu đào tạo, trong đó mỗi mẫu dữ liệu đi kèm với một nhãn hoặc kết quả mong muốn. Mục tiêu là xây dựng mô hình có khả năng dự đoán nhãn cho các dữ liệu mới.

- Học không giám sát: Trong trường hợp này, không có dữ liệu đào tạo với các nhãn đã biết trước. Mục tiêu là tìm hiểu cấu trúc hoặc mô hình ẩn trong dữ liệu, ví dụ như phân cụm hoặc giảm chiều dữ liệu.

- Học tăng cường: Máy tính học thông qua việc tương tác với môi trường và nhận phản hồi sau mỗi hành động. Mục tiêu là tối ưu hóa các hành động để đạt được mục tiêu cụ thể.

ML đã có những đóng góp quan trọng trong nhiều lĩnh vực. Ví dụ, trong y tế, ML có thể giúp chẩn đoán bệnh, dự đoán tử vong, và phát triển phương pháp điều trị tốt hơn. Trong tài chính, ML được sử dụng để dự đoán thị trường, phân tích rủi ro và quản

lý danh mục đầu tư. Trong công nghiệp, nó có thể cải thiện quá trình sản xuất và dự đoán bảo trì thiết bị. ML và AI đang được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng và giao thông vận tải [117]. Cụ thể:

- Dự đoán và quản lý nguồn lực: ML có thể được sử dụng để dự đoán nhu cầu về nguồn lực như vật liệu, lao động và thiết bị trong các dự án xây dựng. Điều này giúp tối ưu hóa quản lý và lập kế hoạch, từ đó giảm thiểu lãng phí và tăng hiệu suất.

- Quản lý dự án: Các hệ thống ML có thể giúp theo dõi tiến độ dự án xây dựng và dự đoán các vấn đề tiềm ẩn dự án, giúp quản lý thực hiện các điều chỉnh cần thiết để đảm bảo dự án được hoàn thành đúng hạn và trong ngân sách.

- Giám sát và bảo trì hạ tầng giao thông: ML và AI có thể được sử dụng để theo dõi và duyệt mạng giao thông, phát hiện sự cố trên đường, như tai nạn hoặc kẹt xe, và thông báo kịp thời cho các cơ quan chức năng để cải thiện quản lý giao thông và đảm bảo an toàn cho người tham gia giao thông.

- Tối ưu hóa giao thông: ML có thể giúp dự đoán và tối ưu hóa luồng giao thông, giúp giảm thiểu ùn tắc giao thông, tiết kiệm nhiên liệu và giảm tiếng ồn. Các hệ thống thông minh có thể điều phối các tín hiệu giao thông, tạo đề xuất về lộ trình tối ưu cho người lái xe và tối ưu hóa dự án đầu tư cơ sở hạ tầng giao thông.

- Xây dựng tự động và robot hậu cần: ML có thể được sử dụng để điều khiển các máy móc xây dựng tự động, như máy đào, máy xúc, và máy nạo vét. Các robot xây dựng có khả năng thực hiện các nhiệm vụ phức tạp trên công trình, giảm thiểu nguy cơ tai nạn lao động và tăng hiệu suất công việc.

1.4.2. Các mô hình ML phổ biến và ứng dụng dự báo tính chất bê tông nhựa

- Mạng Nơ-ron Nhân tạo (Artificial Neural Network - ANN) [29] là một dạng phổ biến của mô hình học máy lấy cảm hứng từ cấu trúc và hoạt động của hệ thống nơ-ron trong não người. ANN là một mô hình ML được sử dụng từ rất lâu và rộng rãi trong nhiều ứng dụng. Cấu trúc ANN bao gồm một hoặc nhiều lớp nơ-ron (hoặc nút) được kết nối với nhau. Lớp đầu tiên được gọi là lớp đầu vào (input layer), lớp cuối cùng là lớp đầu ra (output layer), và các lớp ở giữa được gọi là các lớp ẩn (hidden layers). Các kết nối giữa các nơ-ron được biểu diễn bằng trọng số (weights) và độ lệch (bias). Mỗi nơ-ron trong ANN nhận các tín hiệu đầu vào, tính toán tổng trọng số của chúng, áp dụng một hàm kích hoạt (activation function), và sau đó chuyển tín hiệu đầu ra tới các nơ-ron ở lớp tiếp theo. Quá trình này lặp lại qua từng lớp cho đến khi đạt được lớp đầu ra. ANN học từ dữ liệu thông qua quá trình gọi là "học tập". Quá trình này bao gồm cải

thiện các trọng số của kết nối giữa các nơ-ron để tối ưu hóa khả năng dự đoán hoặc phân loại.

- Các mô hình ML dựa trên thuật toán cây cũng là một lớp mô hình phổ biến trong lĩnh vực học máy [29]. Chúng sử dụng cấu trúc cây để thực hiện dự đoán hoặc phân loại dữ liệu. Các mô hình ML dựa trên thuật toán cây phổ biến được biết đến như:

- Cây quyết định (Decision Trees - DT) [29]: DT là một cấu trúc cây có nút gốc và các nút lá, mỗi nút đại diện cho một quyết định hoặc một quy tắc quyết định. Trong quá trình học tập, cây được xây dựng bằng cách chọn các thuộc tính quan trọng để phân chia dữ liệu thành các phân lớp hoặc nhóm. Cây quyết định có khả năng giải thích mô hình một cách dễ dàng, nhưng có thể dễ bị quá khớp dữ liệu đào tạo.

- Rừng ngẫu nhiên (Random Forests - RF) [29]: RF là một phương pháp kết hợp nhiều cây quyết định (DT) để cải thiện tính tổng quát và giảm thiểu hiện tượng quá khớp. RF hoạt động bằng cách xây dựng nhiều cây quyết định độc lập trên dữ liệu đào tạo và sau đó kết hợp kết quả dự đoán từ các cây con lại.

- Thuật toán tăng cường độ dốc (Gradient Boosting - GB) [92]: GB là một phương pháp kết hợp nhiều cây quyết định để tạo ra một mô hình mạnh hơn. GB hoạt động bằng cách xây dựng các cây con theo từng bước, sử dụng các cây con trước đó để điều chỉnh lỗi của mô hình và tạo ra một mô hình tổng hợp mạnh mẽ hơn.

- XGBoost và LightGBM [92]: XGBoost (XGB) và LightGBM (LGB) là các thư viện và mô hình GB hiệu suất cao, được sử dụng rộng rãi trong các cuộc thi và ứng dụng thực tế. Các mô hình này cải thiện tốc độ và hiệu suất của GB thông thường bằng cách sử dụng các tối ưu hóa và kỹ thuật sắp xếp dữ liệu tiên tiến.

- ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) - hệ thống suy luận mờ thần kinh thích ứng, là một mô hình học máy sử dụng ANN để tự động học các quy tắc suy luận mờ từ dữ liệu đầu vào và đầu ra. Đây là một phương pháp học máy kết hợp giữa mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) và hệ thống suy luận mờ (Fuzzy Inference System). ANFIS nhận các giá trị đầu vào và chuyển chúng qua một lớp đầu vào. Sau đó, sử dụng hệ thống suy luận mờ, ANFIS biểu diễn mối quan hệ giữa các đầu vào và đầu ra dưới dạng quy tắc mờ. ANFIS sử dụng thuật toán lan truyền ngược của ANN để điều chỉnh các trọng số và tối ưu hóa quy tắc suy luận mờ dựa trên dữ liệu đào tạo. Sau khi học tập, ANFIS có khả năng dự đoán đầu ra dựa trên các đầu vào mới.

1.4.3. Các nghiên cứu áp dụng ML dự báo tính chất bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

Các nghiên cứu áp dụng ML để dự báo tính chất của BTN hiện nay còn rất hạn chế trên thế giới và ở Việt Nam. Cho tới thời điểm hiện tại, tồn tại duy nhất một nghiên cứu của Morova và cộng sự [82] về áp dụng ANFIS để dự đoán Độ ổn định Marshall của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan. Nhóm tác giả sử dụng dữ liệu thí nghiệm được và áp dụng giải bài toán mô phỏng bằng ANFIS. Kết quả cho thấy phương pháp này rất tiềm năng để dự đoán nhanh các giá trị độ ổn định dựa trên các đầu vào mà không cần tiến hành thực hiện thí nghiệm.

1.5. Đánh giá các kết quả nghiên cứu về bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

1.5.1. Đánh giá các kết quả nghiên cứu ngoài nước

Dựa vào các kết quả tổng hợp về các loại sợi gia cường và sợi bazan sử dụng cho hỗn hợp BTN trên thế giới, có thể thấy rằng sử dụng sợi nói chung và sợi bazan nói riêng, giúp tăng cường một số đặc tính cơ lý của hỗn hợp BTN, đặc biệt là khả năng kháng LVBX và cải thiện DS.

Trong các loại sợi được sử dụng để gia cường cho hỗn hợp BTN, sợi bazan có các tính năng cơ lý tốt hơn hoặc tương đương các loại sợi khác về độ cứng, khả năng chịu kéo rất cao, bền với hóa chất, nhiệt độ, thân thiện với môi trường, mô đun đàn hồi cao, chịu nhiệt độ cao, tính cách âm và chống rung rất tốt.... Về mặt giá thành, sợi bazan có giá tương đối hợp lý so với các loại sợi khác đang được sử dụng phổ biến trên thế giới như sợi thủy tinh, sợi cellulose, sợi carbon. Nhìn chung, một trong những lợi ích lớn của sợi bazan trong BTN là khả năng cải thiện tính chất cơ học của BTN. Sợi bazan tạo ra một mạng lưới trong ma trận BTN, giúp nâng cao độ cứng và độ bền chịu tải. Điều này giúp BTN chịu được tải trọng lớn hơn và kéo dài tuổi thọ của công trình xây dựng. Ngoài ra, sợi bazan cũng giúp tăng khả năng chống nứt của BTN. Những sợi này hỗ trợ trong việc ngăn ngừa và kiểm soát sự hình thành của vết nứt, đặc biệt là do tác động của những yếu tố như nhiệt độ, tải trọng và co ngót. Không chỉ có tính chất cơ học, sợi bazan còn có khả năng cải thiện tính năng kháng nước và khả năng chống thấm cho BTN. Điều này làm cho nó trở thành một giải pháp lý tưởng cho các ứng dụng cần sự bền vững và kháng nước, như đường cao tốc, cầu đường, và sân bay.

1.5.2. Đánh giá các kết quả nghiên cứu ở Việt Nam

Năm 2018, L.V.Hùng và các cộng sự [12] đã nghiên cứu ảnh hưởng của sợi bazan đến một số tính chất của bê tông chất lượng siêu cao. Nghiên cứu đã chứng minh

rằng, cốt sợi bazan phân tán có thể được sử dụng trong chế tạo bê tông chất lượng siêu cao với các tính chất đạt được: tính công tác rất tốt thể hiện qua độ chảy loang cao, cường độ nén của bê tông đạt trên 120 MPa, cường độ uốn trên 10 MPa. Trong đó cấp phối bê tông sử dụng 1,5% hàm lượng sợi sẽ cho giá trị cường độ nén và cường độ uốn cao nhất: $R_n^{28}=145,6$ MPa; $R_u^{28}=22$ MPa, giá trị này tăng 12,2% so với mẫu đối chứng không sử dụng sợi.

Hiện nay, tại Việt Nam chưa có công bố nào về BTN sử dụng sợi bazan. Chính vì vậy, nghiên cứu sâu hơn về BTN sử dụng sợi bazan là rất quan trọng vì nó có thể mang lại nhiều lợi ích cho ngành GTVT Việt Nam. Điều này xuất phát từ việc hiện tại, các tính năng của BTN sử dụng sợi bazan chưa được nghiên cứu và áp dụng rộng rãi tại nước ngoài, đặc biệt là các chỉ tiêu như kháng nứt, mô đun đàn hồi tĩnh, mô đun đàn hồi động, độ bền kéo uốn, và thí nghiệm LVBX Hamburg Wheel Tracking. Việc nghiên cứu các chỉ tiêu kỹ thuật cụ thể cho BTN sử dụng sợi bazan trong điều kiện Việt Nam là rất cần thiết để nâng cao chất lượng và hiệu suất của các công trình giao thông Việt Nam, giúp giảm thiểu những vấn đề thường gặp như nứt, sụt lún, và hao mòn do tác động của thời tiết và tải trọng. Ngoài ra, BTN sử dụng sợi bazan cần được kiểm tra và đối chiếu với tiêu chuẩn ngành mới ban hành (TCCS 38: 2022/TCĐBVN về Áo đường mềm - Các yêu cầu chỉ dẫn thiết kế). Điều này có thể giúp đảm bảo rằng các công trình xây dựng nếu áp dụng BTN sử dụng sợi bazan sẽ đạt được chất lượng và độ bền tối ưu, đồng thời giảm thiểu sự tiêu tốn về nguyên liệu và tài nguyên.

Đặc biệt, các nghiên cứu và công bố về ứng dụng ML trong dự báo các tính chất cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan còn rất hạn chế, ngay cả trên thế giới. Điều này mang lại tiềm năng rất lớn cho hướng nghiên cứu này, vì nếu phát triển thành công các công cụ ML sẽ giúp ích rất nhiều cho các kỹ sư và các đơn vị trong việc triển khai áp dụng loại vật liệu mới này trong thực tế.

Với hệ thống trang thiết bị hiện có ở Việt Nam, đặc biệt tại các Phòng thí nghiệm trọng điểm, phòng LAS-XD, trường đại học (Đại học GTVT, Đại học Xây dựng, Đại học Công nghệ GTVT), viện nghiên cứu (Viện KH&CN GTVT)..., thì việc chế tạo, thử nghiệm các tính năng cơ lý hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan hoàn toàn có khả năng thực hiện.

1.6. Xác định các vấn đề nghiên cứu của luận án

Từ các phân tích tổng quan bên trên, đề tài “ Nghiên cứu bê tông nhựa mặt đường sử dụng phụ gia sợi bazan trong điều kiện Việt Nam” tập trung vào việc nghiên

cứu các vấn đề theo hướng kế thừa và phát triển các nghiên cứu trên thế giới nhằm đáp ứng và phù hợp với điều kiện Việt Nam:

- Nghiên cứu nghiên cứu hình thái, phân bố sợi, cấu trúc BTN sử dụng sợi bazan với các hàm lượng sợi bazan.

- Đề xuất quy trình chế tạo BTN sử dụng sợi bazan và nhựa đường 60/70 gốc dầu mỏ, xác định nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN.

- Nghiên cứu thực nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan nhằm phục vụ cho thiết kế KCAĐ mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN và phương pháp cơ học thực nghiệm (M-E). Qua đó đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu BTN sử dụng sợi bazan trong xây dựng mặt đường BTN.

- Ứng dụng các thuật toán ML để xây dựng các công cụ dự báo nhanh và chính xác một số đặc tính cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan. Điều này hữu ích cho các kỹ sư vật liệu, giúp tiết kiệm thời gian và chi phí trong các nghiên cứu về sau.

Như vậy, luận án tập trung nghiên cứu về thành phần và đặc tính cơ học vật liệu, khả năng ứng dụng của BTN sử dụng sợi bazan xây dựng mặt đường, đề xuất hướng chế tạo BTN sử dụng sợi bazan ngoài trạm trộn mà chưa nghiên cứu xây dựng quy trình thi công BTN sử dụng sợi bazan ngoài hiện trường.

1.7. Phương pháp nghiên cứu

Các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án bao gồm:

- Phương pháp lý thuyết: Tổng quan các nghiên cứu về BTN sử dụng sợi bazan trên thế giới và trong nước, các phương pháp thiết kế KCAĐ;

- Phương pháp thực nghiệm: nghiên cứu hình thái, cấu trúc, tính chất cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan;

- Phương pháp xác suất thống kê: Thiết kế thực nghiệm, xử lý số liệu, đánh giá độ chụm và kết quả thí nghiệm;

- Phương pháp mô hình hóa: Mô hình hóa KCAĐ, phân tích, đánh giá, đề xuất các KCAĐ điển hình dùng BTN sử dụng sợi bazan trên một số tuyến đường tại Việt Nam;

- Phương pháp học máy: Dự báo một số chỉ tiêu cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan.

Chương 2. NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ, CHẾ TẠO HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG SỢI BAZAN VỚI TỶ LỆ HỢP LÝ

Chương 2 của luận án tập trung vào nghiên cứu và phân tích về sợi bazan trong hỗn hợp BTN. Mục tiêu của chương này là xây dựng cơ sở lý thuyết và thực tiễn để hiểu rõ hơn về nguyên lý sợi bazan cải thiện tính chất của BTN, qua đó thiết kế, xây dựng chương trình thực nghiệm và xác định hàm lượng sợi, nhựa tối ưu cho hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan.

2.1. Xây dựng chương trình thực nghiệm hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

2.1.1. Lựa chọn vật liệu

2.1.1.1. Lựa chọn loại bê tông nhựa sử dụng trong nghiên cứu

Trong phạm vi luận án, tác giả tập trung nghiên cứu cho BTNC 12,5 theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT năm 2014 [7] (tương ứng BTNC 16 theo TCVN 13567:2022). Hỗn hợp BTN có thành phần cấp phối tuân thủ theo Hướng dẫn ban hành kèm theo Quyết định số 858. Đây là loại BTN đang được sử dụng phổ biến làm lớp mặt trên trong KCAĐ mềm tại Việt Nam.

2.1.1.2. Lựa chọn cốt liệu thô, cốt liệu mịn và bột khoáng

Cốt liệu thô và cốt liệu mịn sử dụng được nghiền từ đá bazan mỏ đá Sunway, huyện Quốc Oai, Hà Nội. Bột khoáng lấy từ mỏ đá Kiện Khê, tỉnh Hà Nam. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu và bột khoáng đáp ứng yêu cầu sử dụng cho BTN theo TCVN 8820:2011 [2] và Quyết định số 858/QĐ-BGTVT [7]. Các thông số kỹ thuật của cốt liệu và bột khoáng được trình bày ở Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Dmax 19	Dmax 12,5	Dmax 5	Bột khoáng	Tiêu chuẩn
Tỷ trọng khối	-	2,781	2,835	2,859	2,705	AASHTO T85
Độ hao mòn Los Angeles	%	9,3	18,3	-		TCVN 7572-12
Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	7,47	5,85	-		TCVN 7572-13
Hàm lượng chung bùn, bụi, sét	%	0,278	0,780	3,255		TCVN 7572-8

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Dmax 19	Dmax 12,5	Dmax 5	Bột khoáng	Tiêu chuẩn
Mô đun độ lớn M_k	-	-	-	3,5		TCVN 7572-2
Độ góc cạnh của cát	%	-	-	50,9		TCVN 8860-7

2.1.1.3. Lựa chọn chất kết dính

Chất kết dính được sử dụng trong nghiên cứu là nhựa đường 60/70 do Công ty TNHH Nhựa đường Petrolimex - Việt Nam cung cấp. Kết quả thử nghiệm các chỉ tiêu cơ bản của nhựa đường 60/70 đáp ứng theo yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn [1], [6] được trình bày ở Bảng 2.2.

Bảng 2.2. Kết quả thử nghiệm các chỉ tiêu cơ bản của nhựa đường 60/70

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả
1	Độ kim lún ở 25°C	0,1mm	65,6
2	Điểm hoá mềm	°C	48
3	Điểm chớp cháy	°C	262
4	Khối lượng riêng	g/cm ³	1,031
5	Độ dính bám đối với đá	Cấp	Cấp 3
6	Độ kéo dài ở 25°C, 5cm/phút	cm	> 100

2.1.1.4. Lựa chọn loại sợi bazan



Hình 2.1. Sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu

Sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu có nguồn gốc từ Trung Quốc, được thêm vào hỗn hợp BTN trong quá trình trộn khô với hàm lượng thay đổi từ 0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5% theo khối lượng hỗn hợp. Sợi bazan sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện ở Hình 2.1. Một số tính chất của sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu được trình bày ở Bảng 2.3.

Bảng 2.3. Một số tính chất của sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu

TT	Tính chất	Thông số
1	Màu sắc	Nâu vàng
2	Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,6
3	Ứng suất phá hủy (GPa)	2,2
4	Độ dẫn dài khi đứt (%)	4,1
5	Mô đun đàn hồi (GPa)	85
6	Đường kính (μm)	11
7	Chiều dài (mm)	12
8	Khối lượng riêng ở 25°C	2.416
9	Cường độ chịu kéo (MPa)	2800
10	Nhiệt độ nóng chảy ($^\circ\text{C}$)	1450

2.1.2. Lựa chọn phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan

2.1.2.1. Lựa chọn phương pháp thiết kế

Marshall là phương pháp phổ biến cho hỗn hợp BTN nóng ở Việt Nam và trên thế giới, thiết bị đầm theo phương pháp Marshall có hầu hết ở các phòng thí nghiệm xây dựng công trình giao thông tại Việt Nam, vận hành thiết bị đơn giản. Phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN theo Superpave, sử dụng thiết bị đầm xoay - là thiết bị có giá thành khá cao (so với thiết bị Marshall), yêu cầu người sử dụng phải có tay nghề và kinh nghiệm tốt. Hiện nay ở Việt Nam, số lượng các đơn vị có thiết bị đầm xoay chưa phổ biến, do vậy, trong nghiên cứu, phương pháp Marshall được lựa chọn để thiết kế hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan.

Nhiều tác giả trên thế giới cũng sử dụng phương pháp thiết kế Marshall để xác định hàm lượng nhựa đường tối ưu tương ứng với từng hàm lượng sợi như: Zheng [122]; Zhao [121]; Cheng [38]; Xiong (2015) [112], Chen (2010) [40]; Celauro và Pratico [35].

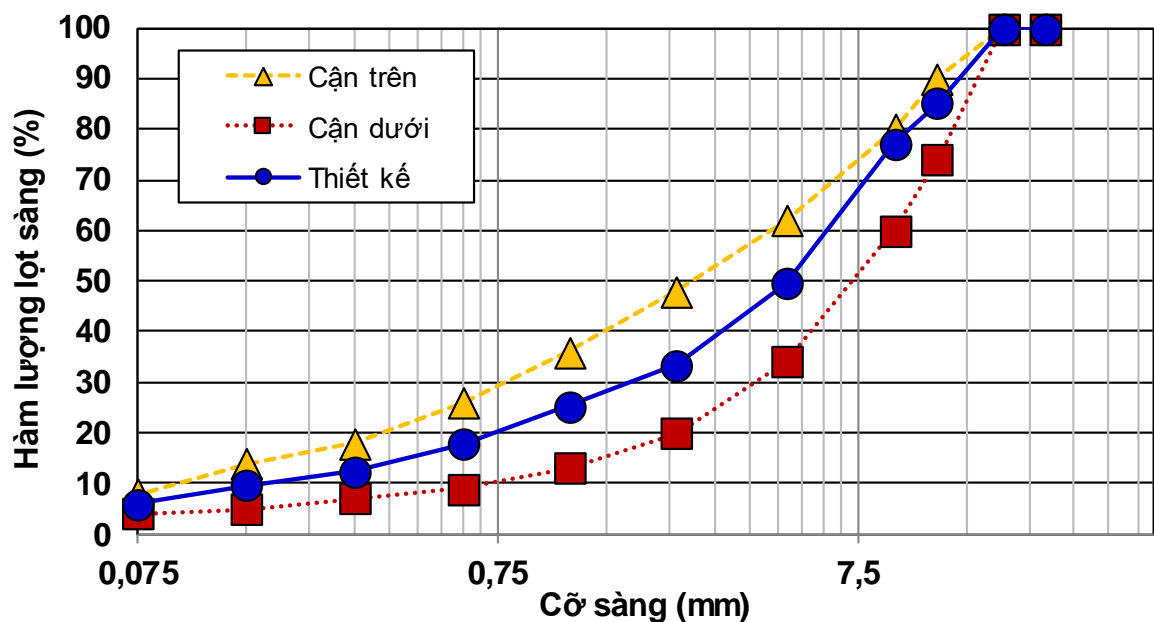
ChunliWu [104]; Bangwei Wu [102], Bangwei Wu [103], Arash Davar [46], Wang [98], Chen (2017) [42].

2.1.2.2. Thiết kế thành phần cấp phối các loại BTN sử dụng trong nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu được lựa chọn là hỗn hợp BTN có kích cỡ hạt lớn nhất danh định bằng 12,5 mm (BTNC 12,5). Tiêu chuẩn về cấp phối cốt liệu được lựa chọn thiết kế theo QĐ 858 [7]. Các giá trị cụ thể của thành phần cấp phối được thể hiện ở Bảng 2.4. Đường cong cấp phối thiết kế hỗn hợp BTN sau khi phối trộn được thể hiện ở Hình 2.2.

Bảng 2.4. Thành phần cấp phối lựa chọn để thiết kế hỗn hợp BTN

Loại cốt liệu		Lượng lọt qua sàng, %									
		19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Đá 10x19		19,9	5,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Đá 5x10		33,0	33,0	30,0	3,8	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0
Đá 0x5		42,0	42,0	42,0	40,7	28,1	19,9	12,5	7,4	5,0	2,1
Bột khoáng		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,7	4,4	4,0
Cấp phối hỗn hợp, %		100	85,1	77,2	49,5	33,5	25,2	17,8	12,4	9,6	6,1
Yêu cầu kỹ thuật	Trên	100	90	80	62	48	36	26	18	14	8
	Dưới	100	74	60	34	20	13	9	7	5	4



Hình 2.2. Đường cong cấp phối thiết kế hỗn hợp BTN sau khi phối trộn

2.1.2.3. Phương pháp thí nghiệm



Hình 2.3. Quá trình đúc mẫu và thí nghiệm Marshall

Thí nghiệm sử dụng phương pháp Marshall với mẫu hình trụ tiêu chuẩn có chiều cao 63,5mm, đường kính 101,6mm, số chày đầm là 75 chày/1 mặt. Sử dụng thiết bị đầm Marshall tự động do hãng Mastest - Italia sản xuất. Quá trình đúc mẫu Marshall được thể hiện ở Hình 2.3.

2.1.2.4. Lựa chọn phương pháp trộn sợi bazan trong hỗn hợp bê tông nhựa

Tham khảo các kết quả nghiên cứu đã trình bày ở phần tổng quan và một số tác giả trên thế giới khác như: Bangwei Wu [102], Bangwei Wu [103], Arash Davar [46], Wang [98], Chen (2017) [42], Blazejowski [70]..., Nghiên cứu sinh lựa chọn phương pháp trộn khô để trộn sợi bazan vào hỗn hợp BTN. Cụ thể như sau:

- + Bước 1: Trộn cốt liệu và bột khoáng;
- + Bước 2: Sợi bazan được đưa vào trộn trong thời gian 2 phút;
- + Bước 3: Cho nhựa đường vào trộn trong thời gian 2 phút.

Thời gian trộn sợi bazan và nhựa đường được chọn là 2 phút, dựa trên đa số kết quả thực nghiệm ở các nghiên cứu trước đó sử dụng thời gian trộn trong khoảng 90 giây đến 2 phút.

2.1.3. Công tác chế bị mẫu

Công tác chế bị mẫu BTN thông thường được tiến hành theo các bước sau:

- Xác định chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu;
- Xác định chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường;
- Phối trộn cốt liệu theo cấp phối thiết kế;
- Chuẩn bị cốt liệu từng loại và bột khoáng để đúc mẫu. Khối lượng mỗi mẫu khoảng 1200g. Cốt liệu và bột khoáng được đưa vào tủ sấy và gia nhiệt đến nhiệt độ cao hơn nhiệt độ trộn khoảng 15°C trong ít nhất 2 giờ;
- Nhựa đường 60/70 được gia nhiệt đến 145°C;
- Trộn cốt liệu với nhựa đường 60/70 trong thời gian khoảng 2-3 phút;
- Đầm mẫu Marshall;
- Tiến hành thí nghiệm và tính toán các đặc tính thể tích của các mẫu BTN;
- Thí nghiệm độ ổn định và độ dẻo của BTN theo TCVN 8860-1:2011 [3];
- Vẽ đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa các đặc tính thể tích, MS, MF với các hàm lượng chất kết dính. Căn cứ vào các yêu cầu kỹ thuật của BTN thông thường được quy định tại quyết định số 858/QĐ-BGTVT [7], xác định khoảng hàm lượng chất kết

dính tối ưu cho từng chỉ tiêu, từ đó xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu cho BTN thông thường.

Đối với BTN sử dụng sợi bazan, công tác chế bị mẫu hoàn toàn tương tự như đối với BTN thông thường, chỉ thêm quá trình trộn khô để trộn sợi bazan vào hỗn hợp BTN.

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

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 $\alpha=5\%$.

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 là 5%. Phân tích hậu định (post-hoc) được sử dụng để xem có sự khác biệt cụ thể giữa các nhóm về một vấn đề nào đó có ý nghĩa thống kê không. Trong khuôn khổ luận án của nghiên cứu sinh với số mẫu nhỏ lựa chọn sử dụng phương pháp của Tukey.

Việc lựa chọn đánh giá số mẫu trong tổ mẫu số mẫu trong tổ mẫu rất quan trọng. Các tiêu chuẩn thí nghiệm đều quy định thường là 3, hoặc 2 tổ mẫu, kết quả thí nghiệm được đánh giá đảm bảo độ chụm. Số mẫu trong 1 tổ mẫu chọn là 3, kết quả thí nghiệm được đánh giá độ chụm theo các tiêu chuẩn tương ứng. Sử dụng phần mềm thống kê Minitab 19 đánh giá lại số mẫu với tiêu chuẩn t-test, power=0,75 (hệ số β bằng 1-0,75=0,25) và mức ý nghĩa $\alpha=0,05$.

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 nghiên cứu.

Sau khi có kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu, đánh giá loại bỏ số liệu ngoại lai (outlier) theo ASTM E177 [27] và ASTM E178 [26], đánh giá độ chụm theo ASTM C670 [24] 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 [4] và ISO 5725:1-6 [63]. Đối với mỗi tiêu chuẩn thí nghiệm đều quy định độ chụm

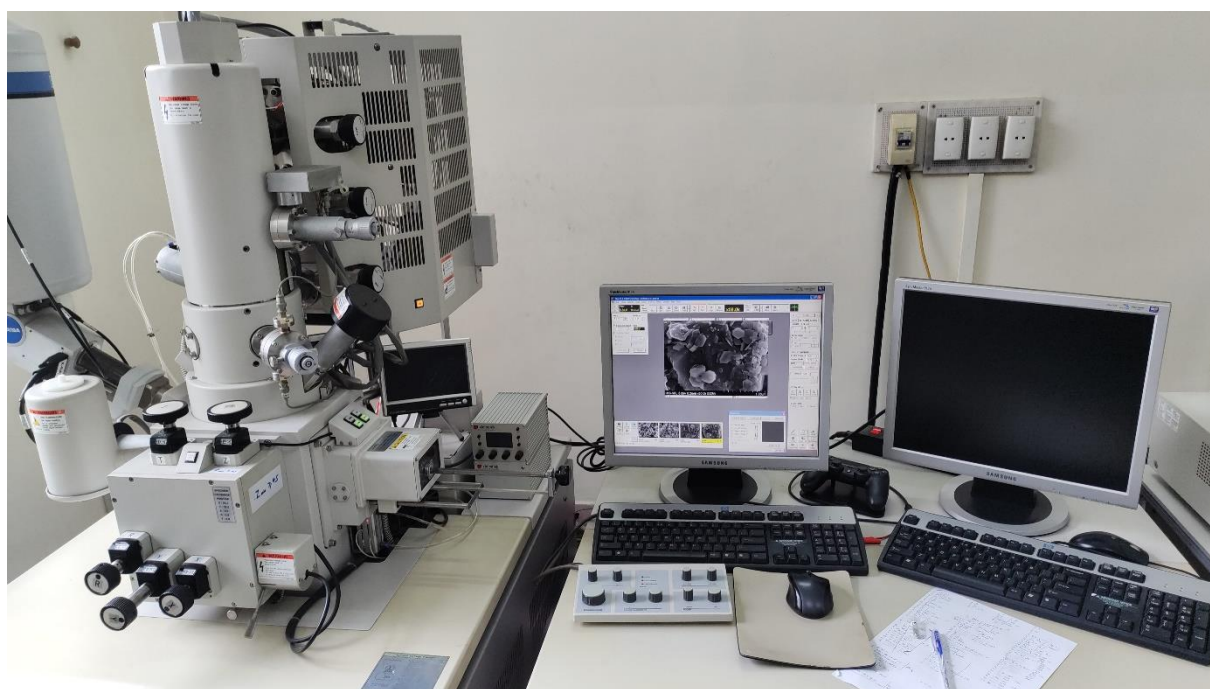
tương ứng. Nếu tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành chưa có chuẩn đánh giá độ chụm nên sử dụng các tiêu chuẩn AASHTO và ASTM.

Tiêu chuẩn ASTM D6927-15 [25] và AASHTO T245-15 [15] đều quy định đánh giá độ chụm của thí nghiệm Marshall. Đối với thí nghiệm xác định MS thì hệ số biến sai cho phép $C_v = 6\%$; Khoảng chấp nhận cho phép so với giá trị trung bình là 16%. Đối với thí nghiệm xác định MF thì hệ số biến sai cho phép $C_v = 9\%$; Khoảng chấp nhận cho phép so với giá trị trung bình là 26%.

2.2. Phân tích liên kết và phân bố sợi bazan trong hỗn hợp bê tông nhựa

2.2.1. Phương pháp nghiên cứu hình thái vật chất bằng kính hiển vi điện tử quét SEM

Kính hiển vi điện tử quét - SEM là một loại kính hiển vi điện tử có thể tạo ra ảnh với độ phân giải cao của bề mặt mẫu vật bằng cách sử dụng chùm điện tử (electron) hẹp quét trên mặt mẫu. SEM được sử dụng để nghiên cứu bề mặt, kích thước, hình dạng vi tinh thể do khả năng phóng đại và tạo ảnh rõ nét, chi tiết. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, sử dụng kính hiển vi điện tử quét S-4800 do hãng Hitachi (Nhật Bản) sản xuất để chụp ảnh, phân tích hình thái của sợi bazan, sợi bazan đã trộn trong hỗn hợp BTN. Thí nghiệm được thực hiện tại Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.



Hình 2.4. Thiết bị chụp hiển vi điện tử SEM

2.2.2. Công tác chuẩn bị mẫu thí nghiệm SEM

Để chuẩn bị các mẫu thí nghiệm BTN sử dụng sợi bazan cho chụp ảnh SEM, quy trình chuẩn bị mẫu được thực hiện theo các bước sau:

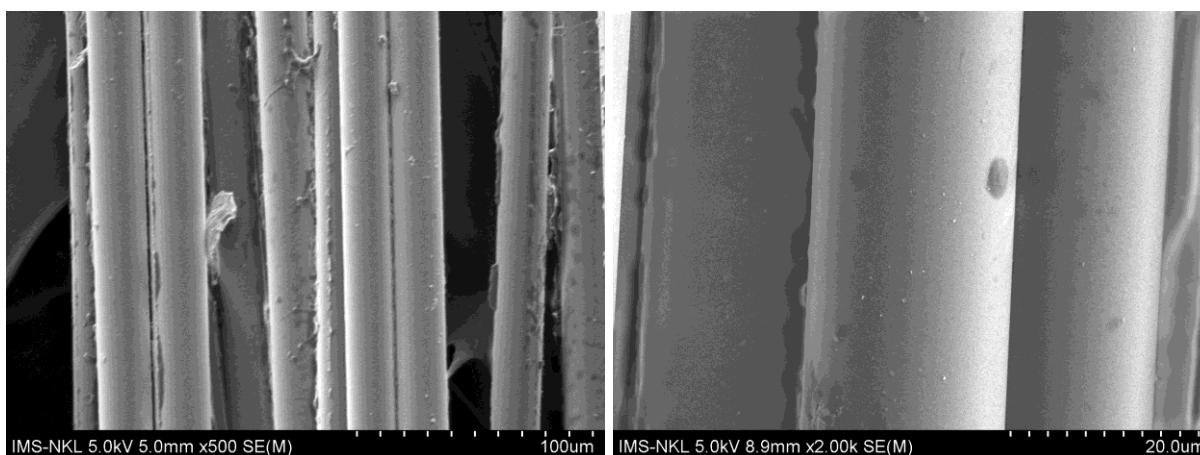
- Lựa chọn mẫu: Chọn mẫu cần kiểm tra và đảm bảo rằng nó đã được chuẩn bị theo đúng quy trình và có độ bền đủ để chịu được quá trình làm sạch và chụp SEM;
- Gia công mẫu: (i) Cắt mẫu: Mẫu được cắt thành các mảnh nhỏ để phù hợp với kích thước của máy SEM (khoảng dưới 1cm x 1cm tiết diện); (ii) Làm sạch mẫu bằng sơn màng bảo vệ, hoặc sử dụng các dung dịch làm sạch để loại bỏ bụi bẩn trên mặt mẫu;
- Tiền xử lý mẫu bằng phương pháp mạ để tạo một lớp màng mỏng và dẻo bao phủ mẫu, tăng khả năng dẫn điện, mẫu có thể được mạ vàng hoặc mạ kim loại khác;
- Gắn mẫu: Mẫu cần được gắn lên một nền màng dẻo chắc chắn để đảm bảo ổn định trong quá trình chụp;
- Tiến hành chụp SEM: Đặt mẫu lên máy SEM và thiết lập các tham số chụp như độ phóng đại, năng lượng tia electron, và độ phân giải. Sau đó, thực hiện quá trình chụp ảnh bằng máy SEM;
- Xử lý ảnh: Sau khi chụp SEM, sử dụng phần mềm xử lý và thu thập ảnh để tạo ra hình ảnh cuối cùng với độ phân giải cao và chi tiết rõ ràng.

2.2.3. Kết quả thí nghiệm phân tích hình thái SEM

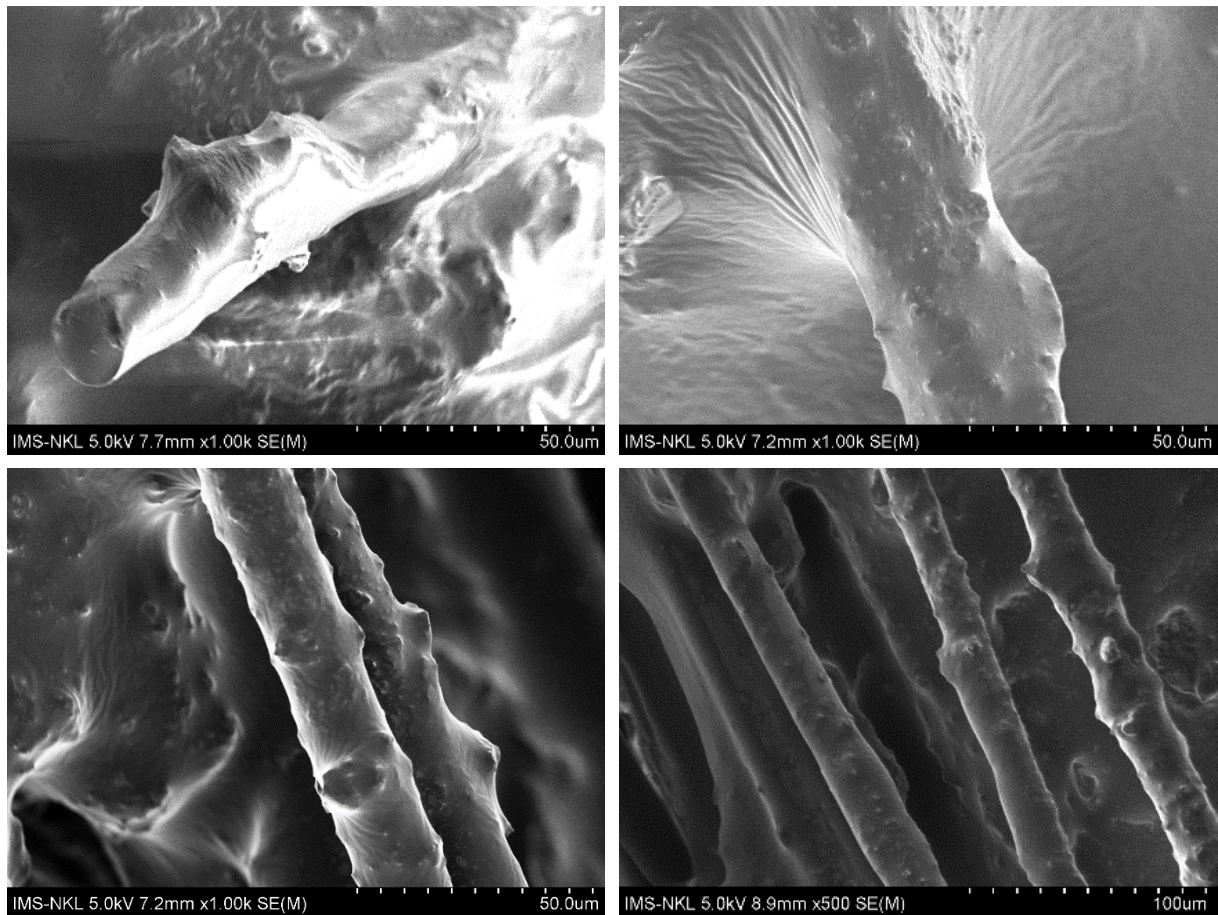
Từ kết quả chụp kính hiển vi điện tử quét (SEM) của các hỗn hợp BTN với các hàm lượng sợi bazan khác nhau bằng thiết bị SEM S-4800, có thể nhận thấy như sau:

2.2.3.1. Liên kết và sự phân bố giữa sợi bazan và nhựa đường

Hình ảnh sợi bazan qua kính hiển vi điện tử quét được thể hiện ở Hình 2.5. Tình trạng liên kết giữa sợi bazan và chất kết dính được thể hiện ở Hình 2.6.



Hình 2.5. Hình ảnh chụp SEM của sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu



Hình 2.6. Liên kết giữa sợi bazan và chất kết dính

Các hình ảnh chụp SEM thu được cho thấy sự liên kết giữa sợi bazan và nhựa đường rất tốt. Khi phóng to sợi bazan có thể thấy bề mặt sợi không bằng phẳng (Hình 2.5). Hình 2.6 cho thấy không chỉ bề mặt sợi được phủ nhựa đường, sự kết dính giữa rễ các sợi bazan vào nhựa đường cũng rất tốt. Kết quả của hình ảnh SEM có thể được giải thích dựa trên ba lý thuyết, đó là lý thuyết về thẩm thấu bề mặt, lý thuyết về lớp chuyển tiếp và lý thuyết về liên kết hóa học [55].

Lý thuyết thẩm thấu cho rằng phương thức kết nối chính giữa hai pha là liên kết cơ học và hấp phụ làm ướt. Ở góc độ vĩ mô, bề mặt sợi bazan nhẵn nhưng ở góc độ vi mô thì không đồng đều. Điều này có thể được nhìn thấy trong ảnh chụp SEM, pha nhựa đường kéo dài đến miệng hố của bề mặt pha sợi, hình thành nên sự tích hợp chặt chẽ hơn và tạo ra hiệu ứng của neo cơ học tương đương. Sự liên kết giữa pha nhựa đường và pha sợi như vậy không chỉ ở một số điểm mà còn có bề mặt tiếp xúc lớn, chứng tỏ khả năng thẩm thấu của pha nhựa đường vào pha sợi là rất tốt. Thẩm thấu tốt hoặc hoàn toàn có thể làm cho cường độ liên kết bề mặt cao hơn so với chính pha nhựa đường, cải thiện cường độ liên kết và tăng hiệu suất của BTN.

Đối với BTN, lớp chuyển tiếp là lớp nhựa đường. Theo quan điểm của lý thuyết về lớp chuyển tiếp, khi đường kính sợi nhỏ hơn 20, chiều dài sợi là 6 mm thì diện tích bề mặt riêng của mỗi 10 gram sợi sẽ lớn hơn 1 m². Điều này cho thấy các sợi có diện tích bề mặt riêng lớn sẽ tạo thành một lượng lớn lớp chuyển tiếp trong ma trận BTN. Dưới tác dụng của ngoại lực, lớp chuyển tiếp đóng vai trò quan trọng trong việc truyền và phân tán ứng suất trong BTN. Xét về hiệu suất vĩ mô, sau khi thêm sợi bazan, hiệu suất biến dạng BTN sẽ được cải thiện, ứng suất tích lũy trở nên nhỏ hơn và độ cứng giảm. Đồng thời, sử dụng sợi cũng sẽ cải thiện hiệu suất mỏi và độ dẻo dai của BTN.

Lý thuyết về liên kết hóa học cũng được sử dụng để giải thích độ bền liên kết bề mặt từ năng lượng liên kết giữa pha sợi và pha nhựa đường. Hai bề mặt của hai pha này có thể chứa các nhóm chức và các nhóm chức đó có thể xảy ra phản ứng hóa học hoặc các liên kết hóa học. Nó cũng có thể thông qua chức năng của môi trường xung quanh để hình thành liên kết. Môi trường này sẽ phản ứng với hai pha, tuy nhiên phản ứng hóa học trực tiếp sẽ không xảy ra giữa hai pha. Thông thường sự hình thành hấp phụ giữa nhựa đường và cốt liệu là hấp phụ vật lý, nó cũng sẽ là hấp phụ vật lý nếu không có môi trường giữa nhựa đường và sợi bazan, vì nguyên liệu thô của sợi bazan là đá bazan tự nhiên. Tuy nhiên, trong quá trình chế tạo ra sợi bazan, bề mặt các sợi sẽ được xử lý và các chất xử lý thường được sử dụng là chất liên kết silan. Nó có thể đóng vai trò là chất trung gian, tạo thành một bề mặt liên kết được kết hợp bởi các liên kết hóa học giữa sợi và nhựa đường. Liên kết này có thể làm giảm hiệu quả khả năng thay nước của màng nhựa đường. Đồng thời, chất liên kết silan cũng là một loại chất làm ướt, nó có thể cải thiện hiệu suất thấm của nhựa đường vào sợi bazan. Vai trò của môi trường và chất làm ướt của chất liên kết silan vừa có thể làm tăng cường độ liên kết giao diện, vừa cải thiện hiệu suất của BTN sử dụng sợi bazan.

Qua phân tích trên, với việc bổ sung sợi bazan vào trong BTN, hiệu ứng giao thoa của các pha trong hỗn hợp nhựa đường về cơ bản đã thay đổi, giúp nâng cao hiệu suất vĩ mô của BTN.

2.2.3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi bazan trong hỗn hợp BTN

Kế hoạch thí nghiệm hình thái của sợi bazan (với hàm lượng sợi khác nhau) trong hỗn hợp BTN được thể hiện trong Bảng 2.5.

Bảng 2.5. Kế hoạch thí nghiệm hình thái của sợi bazan

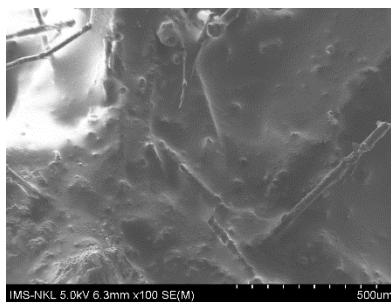
Hỗn hợp	Không sử dụng sợi bazan	Hàm lượng sợi bazan 0,1%	Hàm lượng sợi bazan 0,2%	Hàm lượng sợi bazan 0,3%	Hàm lượng sợi bazan 0,4%	Hàm lượng sợi bazan 0,5%
Kính hiển vi điện tử quét SEM	03 mẫu	03 mẫu	03 mẫu	03 mẫu	03 mẫu	03 mẫu
Tổng số	18 mẫu					

Từ Hình 2.7 b, c có thể thấy, khi hàm lượng sợi bazan thấp (0,1%; 0,2%), trong hỗn hợp sợi được phân bố đều, tuy nhiên do hàm lượng sợi bazan ít, vì vậy chưa đủ để hình thành kết cấu mạng lưới không gian, liên kết giữa sợi với sợi kém.

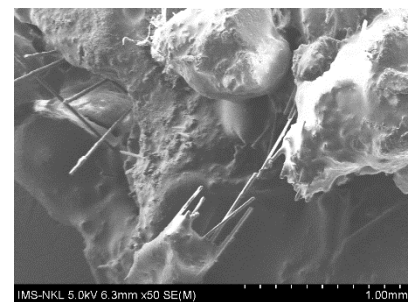
Khi hàm lượng sợi bazan đạt giá trị 0,3% và 0,4%, sợi bazan được phân bố đều trong hỗn hợp (Hình 2.7 d, e), sợi đan chéo dọc ngang, hình thành kết cấu mạng không gian (Hình 2.8 a, b). Mạng không gian được tạo ra giữa các sợi vừa có tác dụng phân tán tải trọng, vừa có khả năng khắc phục hiện tượng trượt trơn giữa các hạt, liên kết hỗn hợp thành một khối thống nhất, đồng thời làm chậm, và giảm tốc độ phát triển của vết nứt. Khi hàm lượng sợi bazan hợp lý, sự phân bố của sợi trong hỗn hợp tương đối đều và có thể phát huy hết tác dụng, làm cải thiện rõ rệt tính năng của hỗn hợp.



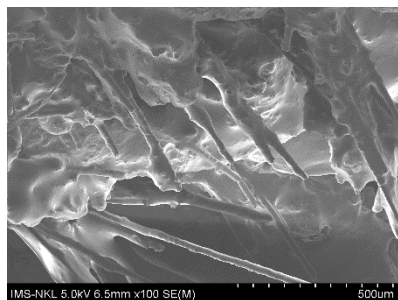
a) Hỗn hợp không có sợi bazan



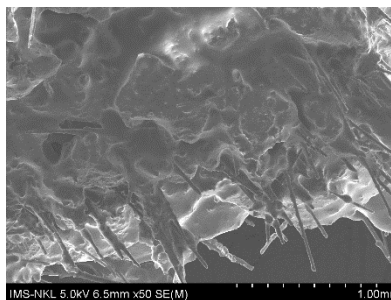
b) Hỗn hợp 0,1% sợi bazan



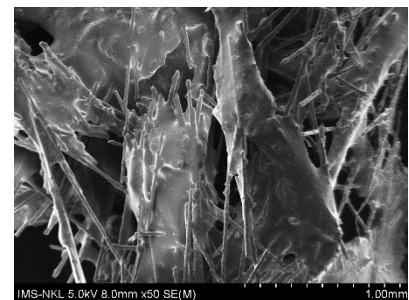
c) Hỗn hợp 0,2% sợi bazan



d) Hỗn hợp 0,3% sợi bazan



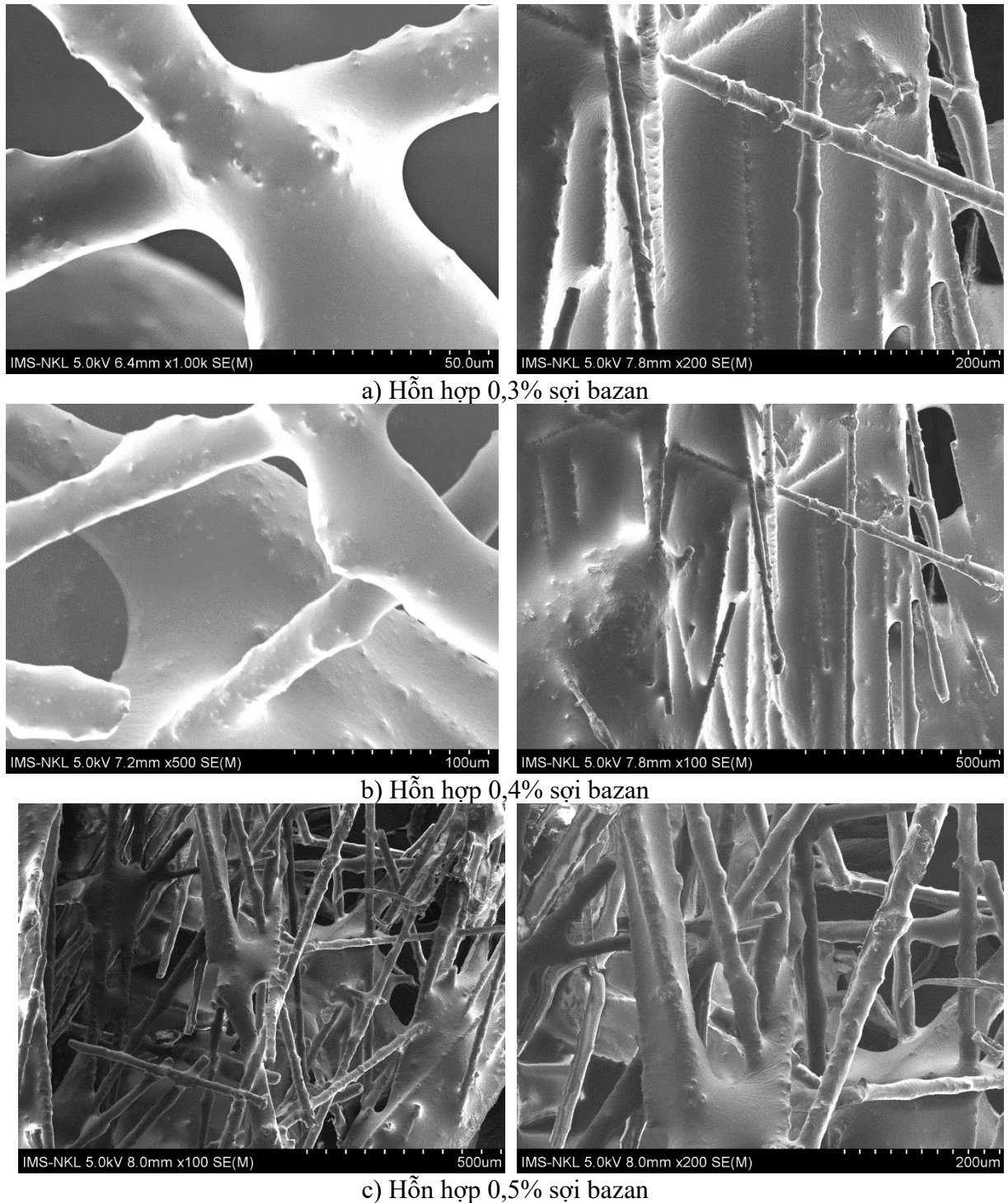
e) Hỗn hợp 0,4% sợi bazan



f) Hỗn hợp 0,5% sợi bazan

Hình 2.7. Phân bố của sợi bazan với các hàm lượng khác nhau

Khi hàm lượng sợi lớn, đạt giá trị 0,5% (Hình 2.7 f, Hình 2.8 c), sợi sẽ phân bố không đều dẫn đến hiện tượng kết bó, tác dụng của sợi sẽ không được phát huy tối đa.



Hình 2.8. Liên kết giữa các sợi bazan với nhau trong hỗn hợp BTN

Nhìn chung, sợi bazan trong nhựa đường tạo thành một mạng lưới không gian, có khoảng trống lớn. Kết hợp với bề mặt sợi không bằng phẳng tạo ra hiệu ứng neo cơ học tương đương, sợi bazan phân tán trong BTN có chức năng cốt, làm tăng cường khả năng chịu kéo và chống nứt của BTN. Tuy nhiên, cấu trúc mạng lưới này nếu quá dày đặc sẽ cản trở khả năng của sợi hấp thụ và cố định nhựa đường trong các khoảng trống

[43]. Sợi bazan nếu vượt quá một tỉ lệ nhất định sẽ làm giảm khả năng hấp thụ nhựa đường. Ngược lại, nếu được sử dụng ở một tỉ lệ tối ưu, mạng lưới sẽ tồn tại ít lỗ rỗng hơn, cho phép có nhiều không gian để hấp thụ nhựa đường, giúp các lớp nhựa chồng lên nhau, qua đó tăng khả năng cố định nhựa đường trong mạng lưới không gian.

2.3. Ứng dụng học máy trong hỗ trợ thiết kế thành phần bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

2.3.1. Ứng dụng học máy trong dự báo tính chất cơ lý của vật liệu

Nội dung phần này trình bày ứng dụng các thuật toán học máy (ML) để xây dựng mô hình dự báo MS và MF của BTN sử dụng sợi bazan. Để xây dựng tương quan giữa các thông số thí nghiệm với các chỉ tiêu dự báo, nghiên cứu xây dựng các bộ dữ liệu cho MS và MF. Các dữ liệu được sử dụng cho quá trình đào tạo xác thực và kiểm chứng được thu thập từ các nghiên cứu đã công bố trên thế giới.

2.3.2. Một số thuật toán và các kỹ thuật được sử dụng

Việc giới thiệu một số thuật toán ML và các kỹ thuật sử dụng trong nghiên cứu đóng vai trò quan trọng và cần thiết cho nghiên cứu bởi một số lý do sau:

- Mỗi thuật toán ML có quá trình học khác nhau và phù hợp với từng vấn đề khác nhau. Việc giới thiệu các thuật toán ML giúp đánh giá và so sánh hiệu suất của chúng trong dự báo các tính chất cơ lý của vật liệu. Điều này giúp nghiên cứu lựa chọn được thuật toán phù hợp và mang lại kết quả tốt nhất;
- Giúp nghiên cứu giải thích quy trình và phương pháp thực hiện. Việc sử dụng ML để phân tích dữ liệu và xây dựng mô hình dự báo tính chất cơ lý vật liệu được chứng minh tính khả thi cao và đáng tin cậy. Đây là cơ sở lý thuyết vững chắc được cung cấp cho quá trình thực hiện và phân tích kết quả.

Sau đây là một số thuật toán và kỹ thuật trong ML được sử dụng trong nghiên cứu này:

2.3.2.1. Mô hình độ dốc tăng cường cấp cao Extreme Gradient Boosting

Mô hình độ dốc tăng cường cấp cao Extreme Gradient Boosting (XGB) là một thuật toán học máy tập hợp dựa trên cây quyết định được phát triển bởi Chen và Guestrin vào năm 2016. XGB là một kỹ thuật học có giám sát và sử dụng mô hình cây làm mô hình dự đoán. Một cấu trúc cây bao gồm các nút bên trong, nhánh và lá. Các nút bên trong đại diện cho các biến đầu vào của tập dữ liệu. Các nhánh và các lá tương

ứng biểu diễn các luật quyết định và các biến đầu ra. XGB là một trong những kỹ thuật mạnh mẽ nhất để xây dựng các mô hình dự đoán và có thể được hiểu là một thuật toán tối ưu hóa trên một hàm mục tiêu phù hợp [41].

2.3.2.2. Thuật toán tối ưu hóa Sailfish Optimizer

Thuật toán tối ưu hóa Sailfish Optimizer (SFO) là một thuật toán metaheuristic (phương pháp tìm kiếm một phần cao cấp) dựa trên dân số. SFO lấy cảm hứng từ cách mà cá buồm sử dụng chiến lược tập trung vào mồi để săn mồi hiệu quả. Thuật toán này sử dụng các yếu tố như tốc độ, vị trí và hướng di chuyển của cá buồm để tối ưu hóa hàm mục tiêu. SFO kết hợp hai pha chính trong quá trình tối ưu hóa - khám phá không gian tìm kiếm và khai thác cải thiện giải pháp tìm thấy trong giai đoạn trước. SFO sử dụng một biểu đồ dự phòng để dự đoán giải pháp tiềm năng trong không gian tìm kiếm. SFO được thiết kế để hoạt động hiệu quả trên nhiều loại hàm mục tiêu và có khả năng thích ứng với các đặc điểm cụ thể của bài toán tối ưu hóa [91].

2.3.2.3. Thuật toán tối ưu hóa Aquila Optimizer

Aquila Optimizer (AO) là một thuật toán được đề xuất mô phỏng hành vi của đại bàng (Aquila) trong quá trình đi săn, trong đó hiển thị hành động của từng bước săn. Việc tối ưu hóa bắt đầu quy trình cải tiến bằng cách tạo ra một tập hợp ngẫu nhiên các giải pháp ứng cử viên được xác định trước, được gọi là dân số. Thông qua quỹ đạo lặp lại, các chiến lược tìm kiếm của AO khám phá các vị trí hợp lý của giải pháp gần tối ưu hoặc giải pháp thu được tốt nhất. Mỗi giải pháp cập nhật vị trí của nó theo giải pháp tốt nhất thu được bằng các quy trình tối ưu hóa. Để nhấn mạnh sự cân bằng giữa các chiến lược tìm kiếm của AO, bốn chiến lược tìm kiếm khác nhau cho thăm dò và khai thác được đề xuất. Cuối cùng, quá trình tìm kiếm của AO kết thúc khi tiêu chí cuối cùng được đáp ứng [19].

2.3.2.4. Kỹ thuật xác thực chéo

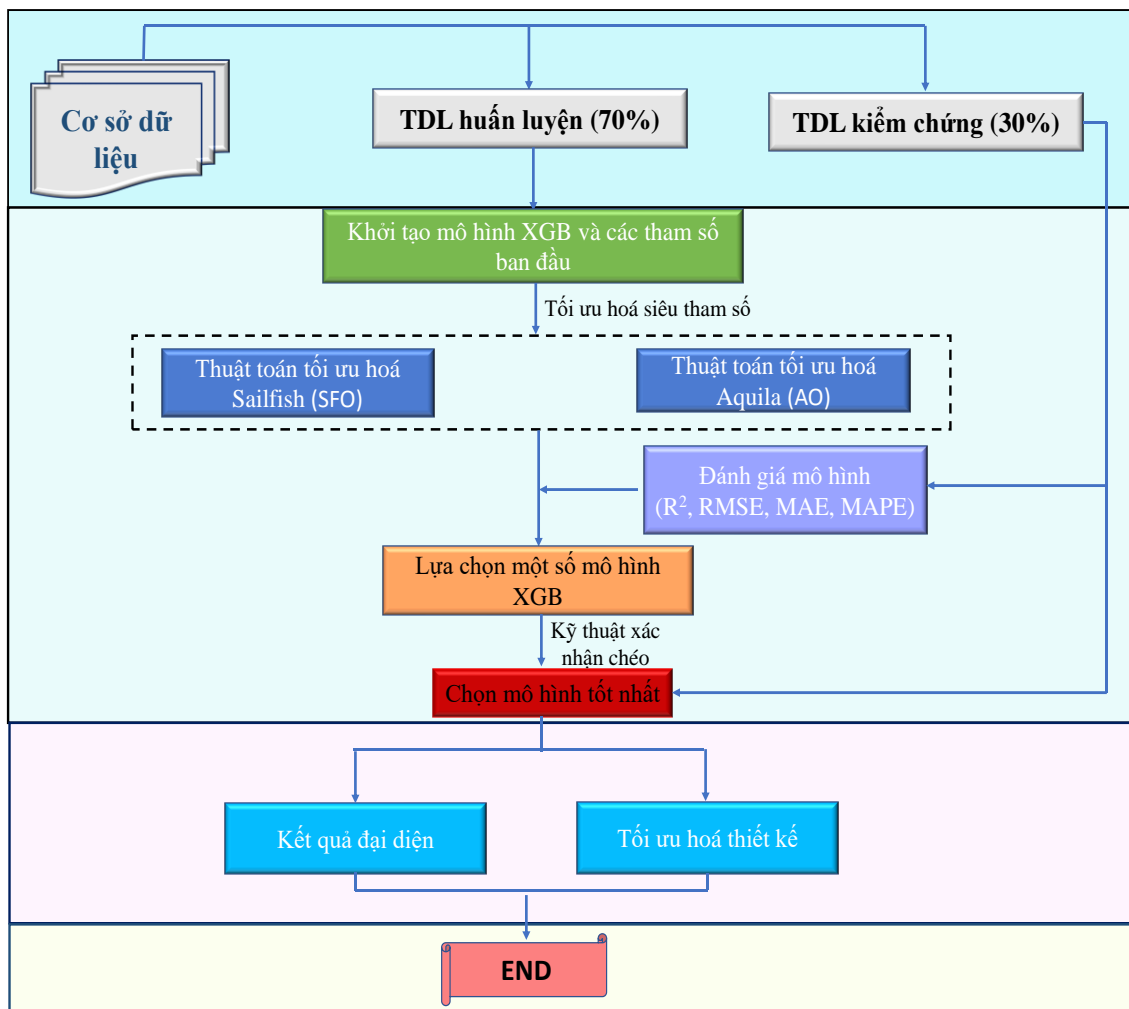
Trong ML, quá trình đào tạo mạng có thể dẫn đến hiện tượng quá khớp (overfitting). Vấn đề quá khớp là nguy hiểm vì nó cho kết quả dự báo trên dữ liệu đào tạo rất cao nhưng kết quả kiểm chứng lại rất thấp, dẫn tới khả năng tổng quát hóa của mô hình không cao. Kỹ thuật xác thực chéo (Cross Validation - CV) là một phương pháp phổ biến để ngăn chặn quá khớp. Cụ thể, tập dữ liệu được chia thành hai phần là dữ liệu đào tạo và kiểm chứng. Xác thực chéo bao gồm hai bước chính, chia nhỏ tập dữ liệu đào tạo thành các tập con (k phần),

sau đó đào tạo và xác thực luân phiên. Khi tìm được các giá trị tối ưu, mô hình được kiểm chứng lần nữa dựa vào tập dữ liệu kiểm chứng [84].

2.3.2.5. Các chỉ tiêu đánh giá năng lực dự báo của mô hình

Đánh giá hiệu suất dự đoán của mô hình là giai đoạn quan trọng nhất sau khi xây dựng mô hình. Điều này ảnh hưởng đến tính khả dụng và độ tin cậy của mô hình. Các tiêu chí được sử dụng trong nghiên cứu để đánh giá kết quả dự báo do các mô hình ML đưa ra bao gồm hệ số xác định (R^2), hệ số tương quan Pearson (R), căn của sai số toàn phương trung bình (RMSE), sai số tuyệt đối trung bình (MAE), và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE). Thông thường, khi R^2 tiến tới 1 và các sai số RMSE, MAE và MAPE nhỏ (tiến tới 0) thì mô hình có hiệu suất dự báo tốt [85].

2.3.3. Quy trình xây dựng công cụ hỗ trợ thiết kế thành phần bê tông nhựa sử dụng sợi bazan



Hình 2.9. Sơ đồ quy trình ứng dụng ML dự báo MS của BTN sử dụng sợi bazan

Luận án nghiên cứu đưa ra công cụ hỗ trợ dự báo một số chỉ tiêu cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan, bao gồm MS và MF. Quy trình được thực hiện thông qua các bước chính như Hình 2.9 và gồm:

- (1) Chuẩn bị cơ sở dữ liệu cho bài toán dự báo;
- (2) Xây dựng mô hình dự báo và tối ưu hoá siêu tham số của mô hình;
- (3) Đánh giá mô hình được tối ưu hoá và xác định mô hình tốt nhất;
- (4) Xây dựng công cụ hỗ trợ thiết kế thành phần BTN.

Chi tiết về các bước này được trình bày ở các bước tiếp theo.

2.3.4. Xây dựng cơ sở dữ liệu

Để dự đoán MS và MF của BTN sợi bazan, hai cơ sở dữ liệu đã được thu thập từ 18 nghiên cứu thực nghiệm, bao gồm Zheng và cộng sự [122], Zhao và cộng sự [121], Cheng và cộng sự [38], Wang và cộng sự [98], Cheng và cộng sự [114], Wang và cộng sự [106], Fan và cộng sự [49], Tan và cộng sự [56], Fan và cộng sự [107], Chai và cộng sự [37], Cheng và cộng sự [115], Wang và cộng sự [108], Zheng và cộng sự [116], Zhao và cộng sự [120], Wu và cộng sự [104], Liu và cộng sự [74], Huang và cộng sự [60], Morova [83].

Trong đó cơ sở dữ liệu MS gồm 99 mẫu thí nghiệm, cơ sở dữ liệu MF gồm 59 mẫu thí nghiệm. Hai cơ sở dữ liệu này có 10 thông số đầu vào, bao gồm: độ bền kéo sợi (X_1), hàm lượng sợi (X_2), chiều dài sợi (X_3), đường kính sợi (X_4), độ kim lún (X_5), điểm hóa mềm (X_6), hàm lượng chất kết dính (X_7), cốt liệu 2,36 mm (X_8), cốt liệu 4,75 mm (X_9) và cốt liệu 9,5 mm (X_{10}). Cần lưu ý rằng, ở đây, các đầu vào như X_8 , X_9 và X_{10} biểu thị lượng cốt liệu (% trọng lượng) lọt qua các kích thước sàng khác nhau lần lượt là 2,36, 4,75, và 9,5 mm.

Phân tích thống kê chi tiết tất cả các tham số đầu vào và đầu ra tương ứng với hai cơ sở dữ liệu bao gồm ký hiệu, vai trò, đơn vị, min, max, mean, các phần tư vị và độ lệch chuẩn (StD). Lưu ý rằng, phạm vi của các tham số đầu vào dự kiến của cả hai cơ sở dữ liệu có giá trị gần như giống nhau, chỉ có hai tham số có sự khác biệt đôi chút (hàm lượng sợi và độ xuyên thấu của chất kết dính). Bảng 2.6, Bảng 2.7 trình bày kết quả phân tích thống kê các thông số đầu vào và đầu ra của bộ dữ liệu MS, MF.

Bảng 2.6. Phân tích thống kê các thông số đầu vào và đầu ra của bộ dữ liệu MS

Thông số	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Nhỏ nhất	Phần tư vị thứ nhất	Trung vị	Phần tư vị thứ ba	Lớn nhất
Biến đầu vào							
Độ bền kéo của sợi-X ₁ (MPa)	2718,0	1173,3	0,0	2320,0	2500,0	3920,0	4425,0
Hàm lượng sợi-X ₂ (%)	0,4	0,3	0,0	0,2	0,3	0,4	2,0
Chiều dài sợi-X ₃ (mm)	6,0	3,2	0,0	6,0	6,0	6,0	12,0
Đường kính sợi-X ₄ (μm)	12,3	4,5	0,0	11,5	13,0	15,0	17,0
Độ kim lún-X ₅ (0,1mm)	73,8	12,7	55,0	65,0	71,0	86,0	92,3
Điểm hóa mềm-X ₆ (°C)	55,6	10,3	44,5	46,9	49,0	64,4	81,0
Hàm lượng CKD-X ₇ (%)	5,3	0,7	4,0	5,0	5,2	5,7	6,8
Cốt liệu 2,36mm-X ₈ (%)	30,6	9,4	14,9	19,6	33,8	37,0	45,0
Cốt liệu 4,75mm-X ₉ (%)	43,1	12,5	20,1	29,5	50,0	53,0	58,0
Cốt liệu 9,5 mm-X ₁₀ (%)	70,5	7,8	50,0	64,6	70,1	76,5	80,9
Biến đầu ra							
Độ ổn định - MS (kN)	11,1	2,7	5,7	9,0	10,8	13,3	17,7

Bảng 2.7. Phân tích thống kê các thông số đầu vào và đầu ra của bộ dữ liệu MF

Thông số	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Nhỏ nhất	Phần tư vị thứ nhất	Trung vị	Phần tư vị thứ ba	Lớn nhất
Biến đầu vào							
Độ bền kéo của sợi-X ₁ (MPa)	2955,7	1223,8	0,0	2320,0	3100,0	3920,0	4425,0
Hàm lượng sợi-X ₂ (%)	0,3	0,2	0,0	0,3	0,3	0,400	0,56
Chiều dài sợi-X ₃ (mm)	6,4	3,4	0,0	6,0	6,0	7,5	12,0
Đường kính sợi-X ₄ (μm)	12,6	4,5	0,0	13,0	13,0	15,0	17,0
Độ kim lún-X ₅ (0,1mm)	68,8	9,9	55,0	57,9	65,2	75,0	86,0
Điểm hóa mềm-X ₆ (°C)	58,1	9,5	44,5	49,0	64,2	64,4	81,0
Hàm lượng CKD-X ₇ (%)	5,5	0,8	4,0	4,8	5,3	6,4	6,8
Cốt liệu 2,36 mm-X ₈ (%)	28,2	13,1	14,9	18,6	20,6	42,0	58,6
Cốt liệu 4,75 mm-X ₉ (%)	38,4	13,9	20,1	27,7	29,5	54,9	58,0
Cốt liệu 9,5 mm-X ₁₀ (%)	69,7	8,5	50,0	64,6	70,1	79,0	80,9
Biến đầu ra							
Độ dẻo – MF (mm)	3,4	0,5	2,2	3,1	3,3	3,6	4,4

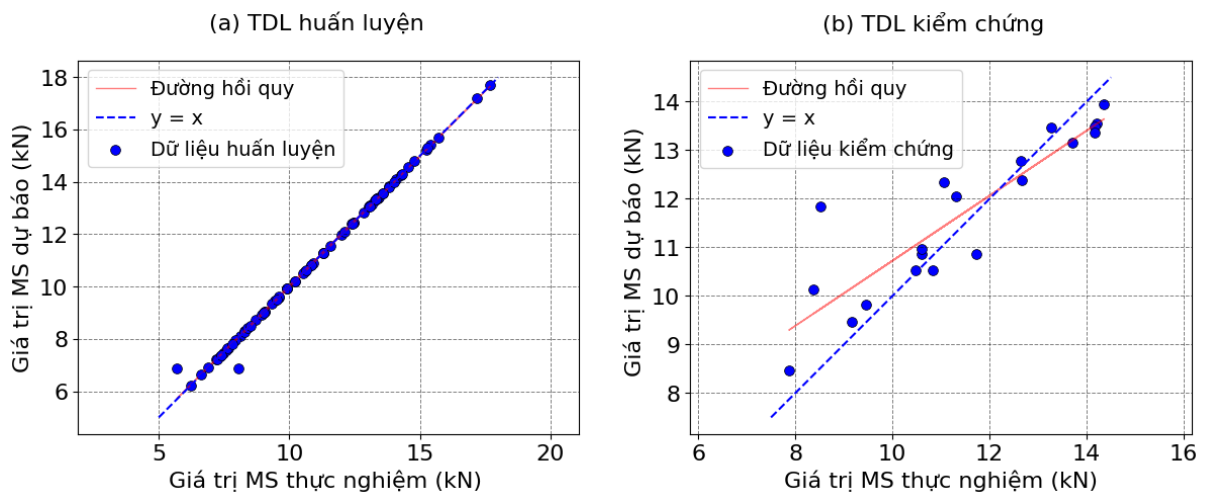
2.3.5. Điều chỉnh siêu tham số của mô hình XGB

Trong phần này, hai thuật toán AO và SFO được sử dụng để điều chỉnh siêu tham số của mô hình XGB. Trong thuật toán AO và SFO, các tham số quan trọng cần hiệu chỉnh là kích thước dân số (n_p) và số lần lặp để tìm kiếm tối ưu. Trong nghiên cứu này, n_p được khảo sát ở 4 giá trị khác nhau là 10, 20, 30, 40 và số lần lặp được cố định là 1000 để đảm bảo khả năng hội tụ cũng như cân bằng giữa thời gian mô phỏng và kết quả tối ưu.

Về mục tiêu tối ưu hóa, hiệu suất của mô hình XGB để dự đoán MS và MF của BTN sử dụng sợi bazan được đánh giá qua giá trị R của bộ dữ liệu xác thực và kiểm chứng. Tổng hợp quá trình tìm kiếm hai tham số này cho bộ dữ liệu MS và MF được trình bày ở Phụ lục 9. Dựa trên hiệu suất dự báo trên 2 bộ dữ liệu MS và MF, hai mô hình XGB_SFO_40 (XGB tối ưu hóa bằng thuật toán SFO với $n_p = 40$) và XGB_SFO_30 (XGB tối ưu hóa bằng thuật toán SFO với $n_p = 30$) được lựa chọn để thực hiện dự báo. Chi tiết các siêu tham số của hai mô hình này được trình bày trong Phụ lục 9.

2.3.6. Kết quả xây dựng mô hình dự báo XGB cho MS và MF

2.3.6.1. Kết quả dự đoán MS



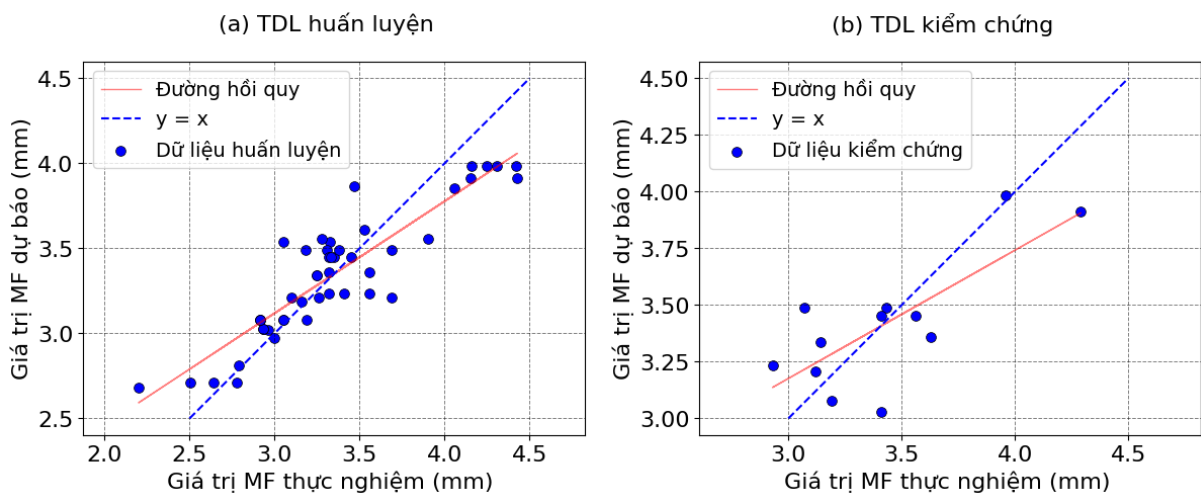
Hình 2.10. Phân tích hồi quy trong dự đoán MS dữ liệu đào tạo và kiểm chứng

Hình 2.10 cho thấy mối quan hệ giữa các giá trị MS thử nghiệm và các giá trị được tạo ra từ mô hình XGB_SFO_40 cho cả tập dữ liệu huấn luyện và tập dữ liệu kiểm chứng. Quan sát thấy rằng các giá trị MS của BTN sợi bazan, được tính toán bằng mô hình XGB tối ưu, khá gần với giá trị thực nghiệm. Mô hình XGB_SFO_40 có hiệu

suất $R = 0,998$, $RMSE = 0,189$ kN, $MAE = 0,036$ kN và $MAPE = 0,005$ cho dữ liệu đào tạo. Đối với dữ liệu kiểm chứng, các giá trị này lần lượt là $R = 0,976$, $RMSE = 0,451$ kN, $MAE = 0,367$ kN và $MAPE = 0,033$. Tính toán dựa trên toàn bộ dữ liệu, mô hình này cho $R = 0,995$, $RMSE = 0,264$ kN, $MAE = 0,103$ kN và $MAPE = 0,011$. Có thể thấy khả năng dự đoán của mô hình XGB_SFO_40 đối với bài toán dự đoán MS của BTN sợi bazan là tốt.

2.3.6.2. Kết quả dự đoán MF

Hình 2.11 hiển thị mối quan hệ giữa giá trị MF thực tế và giá trị MF dự đoán được đưa ra dưới dạng biểu đồ hồi quy. Bên cạnh đó, các giá trị định lượng của ba tiêu chí đánh giá hiệu suất mô hình cũng được tính toán. Dựa trên tính toán, mô hình XGB_SFO_30 đưa ra sai số $R = 0,927$, $RMSE = 0,185$ mm, $MAE = 0,144$ mm và $MAPE = 0,043$ cho dữ liệu đào tạo. Đối với dữ liệu kiểm chứng, các giá trị này lần lượt là $R = 0,909$, $RMSE = 0,1572$ mm, $MAE = 0,125$ mm và $MAPE = 0,036$. Trên toàn bộ dữ liệu, mô hình cho $R = 0,925$, $RMSE = 0,179$ mm, $MAE = 0,140$ mm và $MAPE = 0,041$. Với kết quả dự đoán như trên của mô hình cho thấy, mô hình XGB_SFO_30 cho dự đoán MF của BTN sử dụng sợi bazan có khả năng dự đoán mạnh.



Hình 2.11. Phân tích hồi quy trong dự đoán MF dữ liệu đào tạo và kiểm chứng

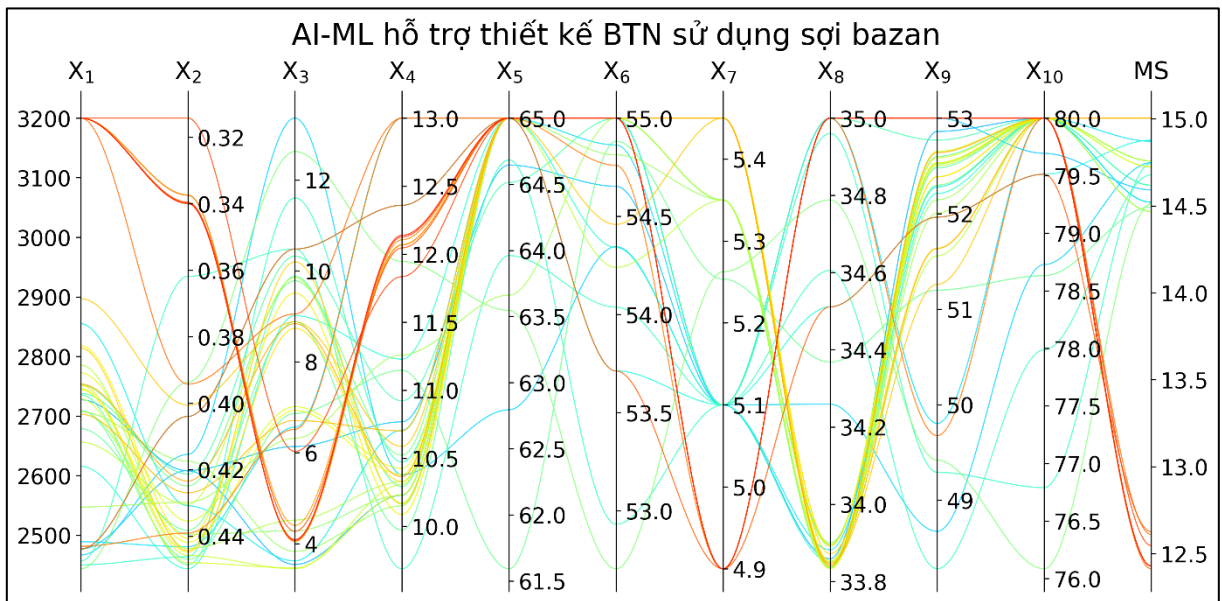
Như vậy, có thể dự báo các đặc tính cơ học của BTN sử dụng sợi với độ chính xác cao bằng cách sử dụng mô hình XGB, do đó tiết kiệm thời gian và chi phí thử nghiệm.

2.3.7. Xây dựng công cụ hỗ trợ thiết kế thành phần bê tông nhựa

Thiết kế BTN là một quá trình phức tạp, trong đó có nhiều thành phần khác nhau cần phải được cân nhắc và tối ưu hóa. Mối quan hệ giữa các thành phần BTN rất

phức tạp và việc xác định mối quan hệ từ nguyên nhân (thành phần BTN) đến kết quả (tính chất cơ lý cần được xác định) là rất khó khăn. Ứng xử của BTN bị chi phối bởi mối quan hệ tương hỗ đa biến, phi tuyến tính, trong đó các tính chất cơ lý của BTN phụ thuộc vào tất cả các thành phần cấu thành của nó, cũng như các điều kiện ngoại vi. Do đó, để BTN có thể đạt được các tính chất cơ lý mong muốn, quá trình tối ưu hóa thiết kế là một bước rất quan trọng.

Trong quá trình tối ưu hóa thiết kế thành phần BTN, mô hình XGB_SFO_40 được sử dụng để tìm ra các giá trị của các biến đầu vào (X_1 - X_{10}) sao cho giá trị MS của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan đạt giá trị cao nhất. Các giá trị của các biến liên quan đến đường cong cấp phối được lấy theo khoảng $\pm 10\%$ giá trị thực nghiệm đã được ghi nhận, trong khi giá trị của nhựa đường được lấy theo khoảng $\pm 10\%$ loại nhựa đường được lựa chọn. Về sợi bazan, phạm vi tìm kiếm được mở rộng hơn để tìm kiếm các giá trị tối ưu tiềm ẩn có thể. Cụ thể, cường độ chịu kéo sợi bazan được tìm kiếm trong khoảng từ 2400 đến 3400 MPa thay vì 2800 MPa như được sử dụng trong nghiên cứu. Đường kính sợi được tìm kiếm trong khoảng từ 9 đến 13 μm thay vì 11 μm như được sử dụng trước đó. Cuối cùng, chiều dài sợi được tìm kiếm trong khoảng từ 3 đến 15 mm thay vì 12 mm như mô tả. Mục đích của việc mở rộng phạm vi tìm kiếm này là để tìm xem liệu có những giá trị tối ưu khác mà mô hình có thể đề xuất hay không, từ đó cung cấp thêm các lựa chọn thiết kế tiềm năng cho các ứng dụng khác nhau.



Hình 2.12. 40 mẫu BTN được đề xuất bởi mô hình XGB_SFO_40

Mô hình XGB_SFO_40, mô phỏng với thời gian 3 tiếng, đã đề xuất ra 40 mẫu BTN, được thể hiện trong Hình 2.12. Phân tích kết quả cho thấy trong khoảng tìm kiếm được đề xuất, MS có thể đạt giá trị từ 12,5 đến 15 kN. Về cường độ chịu kéo của sợi bazan, xu hướng chung cho thấy rằng cường độ dưới 2900 MPa sẽ cho giá trị MS cao hơn. Hàm lượng sợi bazan tập trung chủ yếu trong khoảng từ 0,32 đến 0,44%. Chiều dài sợi nếu trên 9 mm và đường kính sợi dao động trong khoảng 10-11 μm sẽ cho MS giá trị tốt hơn. Về nhựa đường, khi độ kim lún lớn hơn 62 và điểm hóa mềm lớn hơn 53 là những mẫu có tần suất xuất hiện cao. Cuối cùng, về thiết kế cấp phối, mắt sàng 2,36 mm chủ yếu được thiết kế với lượng lọt sàng từ 33,8% đến 34%, mắt sàng 4,75 là trên 48% trong khi mắt sàng 9,5 là từ 76% đến 80%. Đặc biệt, hàm lượng nhựa được đề xuất nằm trong khoảng từ 4,9 tới 5,4%, tương ứng với hàm lượng sợi từ 0,32 đến 0,45%.

2.3.8. Đánh giá kết quả thiết kế thành phần bê tông nhựa của phương pháp ML và định hướng nghiên cứu thực nghiệm

Những xu thế được tìm ra ở 40 mẫu BTN sử dụng AIML là những chỉ dẫn tốt để tiến hành thực nghiệm trong luận án. Đáng chú ý, mô hình AIML được đề xuất không hề sử dụng dữ liệu thực nghiệm của NCS mà hoàn toàn được sử dụng dựa trên các công bố về BTN sử dụng sợi bazan thu thập được.

Với cấp phối được lựa chọn, các thí nghiệm thực tế trong Luận án sẽ tiến hành nghiên cứu BTN sử dụng nhựa đường và sợi bazan với những đặc tính như sau:

- Sợi bazan với chiều dài trong khoảng 4-12 cm, tập trung vào các sợi có chiều dài trên 8 cm để đạt được MS tối ưu; Đường kính sợi từ 10-13 μm , tập trung những sợi có đường kính từ 10-11 μm vì những giá trị này cho giá trị MS lớn;
- Với nguồn cung cấp nhựa đường 60/70 được sử dụng trong Luận án, NCS sẽ tiến hành thử nghiệm tập trung trong khoảng hàm lượng nhựa từ 4,9-5,5 %, và tập trung nghiên cứu hàm lượng nhựa đường trong khoảng 5,1-5,4% ứng với hàm lượng sợi từ 0,32-0,45%;

Cần nhấn mạnh rằng, việc áp dụng phương pháp học máy thiết kế thành phần BTN dựa chủ yếu vào dữ liệu thử nghiệm tại các công bố quốc tế. Do đó, để đảm bảo tính ứng dụng hiệu quả trong điều kiện Việt Nam, việc thực hiện thí nghiệm với các giá trị hàm lượng nhựa và sợi bên ngoài những khoảng nêu trên là cần thiết. Điều này sẽ

giúp kết quả đạt được có tính phổ quát cao hơn và sát thực tế hơn, giúp ích cho việc áp dụng phương pháp này trong các nghiên cứu về BTN tại Việt Nam.

2.4. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu cho hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

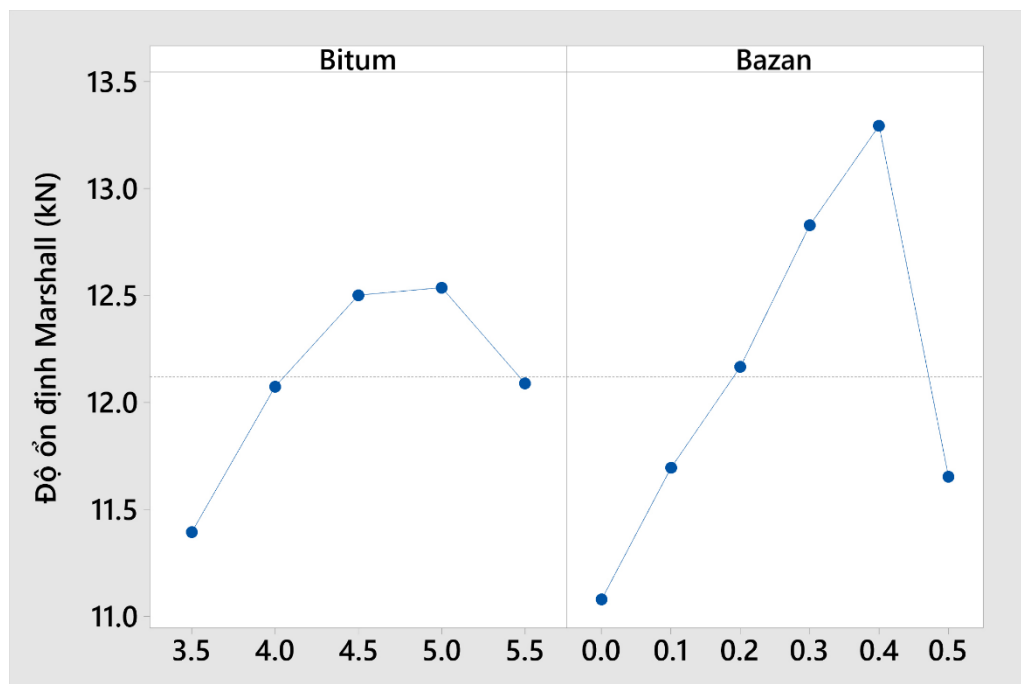
Sử dụng phần mềm Minitab 19 thiết kế thí nghiệm tổng quát (**General full factorial design**). Số lần lặp thí nghiệm 3. Phân tích phương sai ANOVA và phân tích hậu định phát hiện sai khác theo chuẩn Tukey. Dựa vào hỗ trợ thiết kế của mô hình AIML và dựa vào nguồn cung cấp đá, nhựa và sợi bazan, các biến đầu vào của thiết kế thực nghiệm sẽ bao gồm 2 biến:

- Hàm lượng nhựa đường: có 5 tỷ lệ là: 3,5%; 4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5%.
- Hàm lượng sợi bazan: có 6 tỷ lệ là: 0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4%; 0,5%.
- Các hàm kết quả và phân tích: có 2 hàm là độ ổn định Marshall (MS, kN); độ dẻo (MF, mm).

Số kết quả thí nghiệm là 5 Hàm lượng nhựa đường x 6 Hàm lượng sợi bazan x 3 mẫu marshall = 90 kết quả. Kết quả chạy phần mềm Minitab 19 được thể hiện ở Phụ lục 1 để tiến hành phân tích thống kê tổng hợp.

2.4.1. Phân tích độ ổn định Marshall (MS)

Hình 2.13 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến MS. Nhận thấy cả 2 yếu tố hàm lượng nhựa đường và hàm lượng sợi bazan đều có ảnh hưởng nhiều đến chỉ số MS.

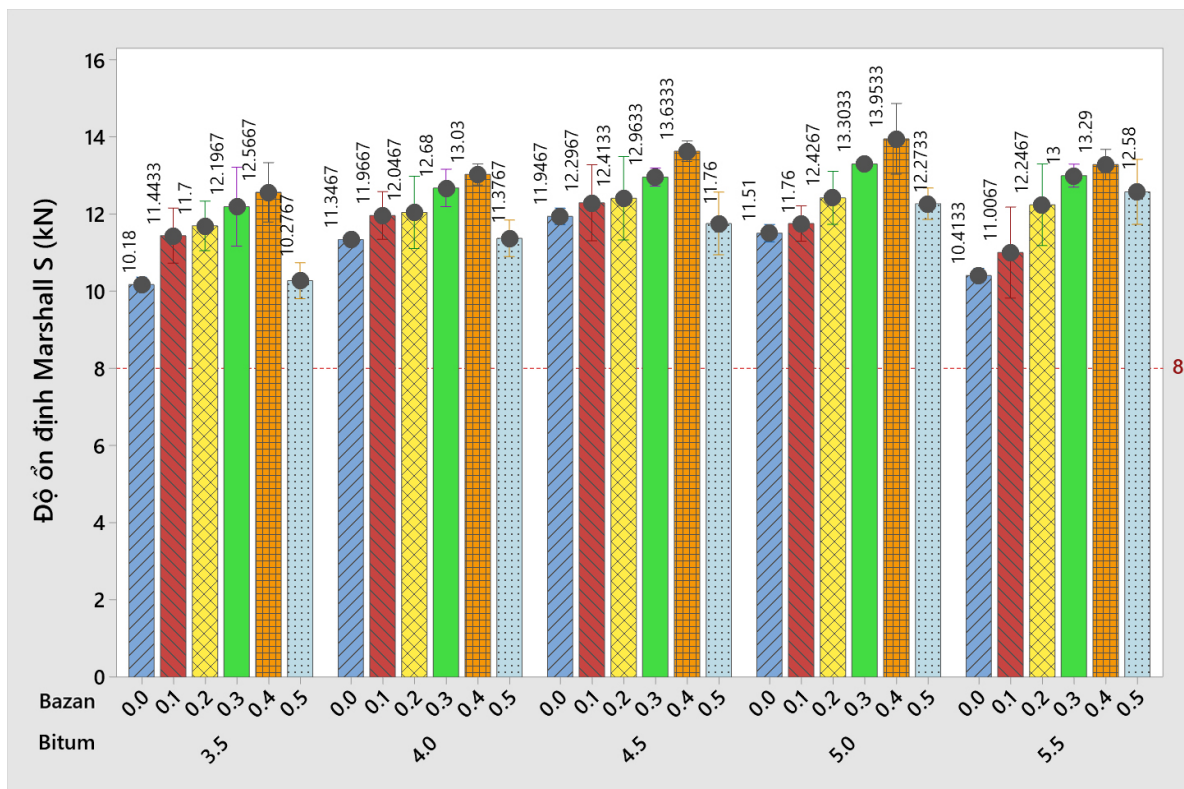


Hình 2.13. Ảnh hưởng các yếu tố nhựa đường, sợi bazan đến độ ổn định Marshall

- **Ảnh hưởng của hàm lượng nhựa đường:** MS tăng rất nhanh khi hàm lượng nhựa đường tăng từ 3,5% đến 4,0%. Tiếp tục tăng hàm lượng nhựa đường đến 4,0%, MS vẫn tiếp tăng nhanh. Khi hàm lượng nhựa đường tăng lên 5,0%, thì MS tăng chậm lại và đạt giá trị lớn nhất. Tiếp tục tăng hàm lượng nhựa đường lên 5,5% thì MS bắt đầu giảm. Biểu đồ ảnh hưởng hàm lượng nhựa đường đến độ ổn định không là dạng tuyến tính mà là bậc 2 hoặc hàm logarit.

- **Ảnh hưởng của hàm lượng sợi bazan:** Khi chưa sử dụng sợi bazan thì MS rất thấp, khi tăng hàm lượng sợi bazan từ 0% đến 0,4% thì MS tăng đáng kể (thể hiện bằng đường dốc gần thẳng đứng). Hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan có MS lớn nhất khi hàm lượng sợi bazan là 0,4%. Khi hàm lượng sợi bazan tăng lên 0,5%, giá trị MS giảm đáng kể (thể hiện ở đường dốc đứng). Nguyên nhân có thể là do hàm lượng sợi quá nhiều dẫn đến sự phân tán sợi không đồng đều và độ xốp quá mức của hỗn hợp, làm giảm độ ổn định của hỗn hợp BTN. Như vậy, kết quả thí nghiệm đã chỉ ra rằng, hàm lượng tối ưu của sợi bazan với MS của hỗn hợp BTN là 0,4%.

Hình 2.14 là biểu đồ tổng hợp MS của hỗn hợp BTN theo hàm lượng nhựa đường và hàm lượng sợi bazan. Tham khảo yêu cầu kỹ thuật theo QĐ 858 [7] và TCVN 13567:2022 [5], MS của hỗn hợp BTN $\geq 8,0$ kN. Như vậy, tất cả các hỗn hợp BTN đều thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật về MS.



Hình 2.14. Biểu đồ tổng hợp độ ổn định Marshall (MS) của hỗn hợp BTN

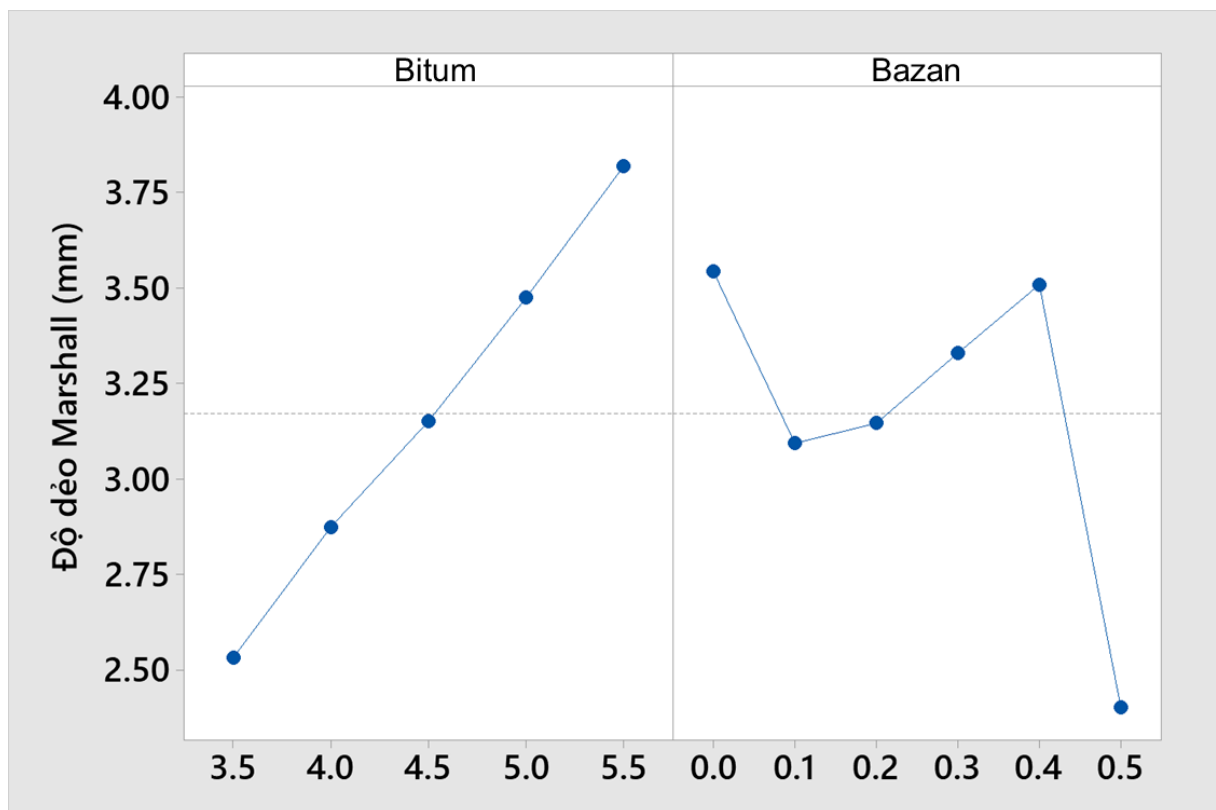
MS đạt giá trị cao nhất ở tất cả các hàm lượng nhựa đường khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4%. Khi không sử dụng sợi bazan thì MS đạt giá trị thấp nhất khi sử dụng hàm lượng nhựa đường là 3,5%; 4,0%; 5,0% và 5,5%. Khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,5% thì MS đạt giá trị thấp nhất với hàm lượng nhựa đường sử dụng là 4,5%.

2.4.2. Phân tích độ dẻo Marshall (MF)

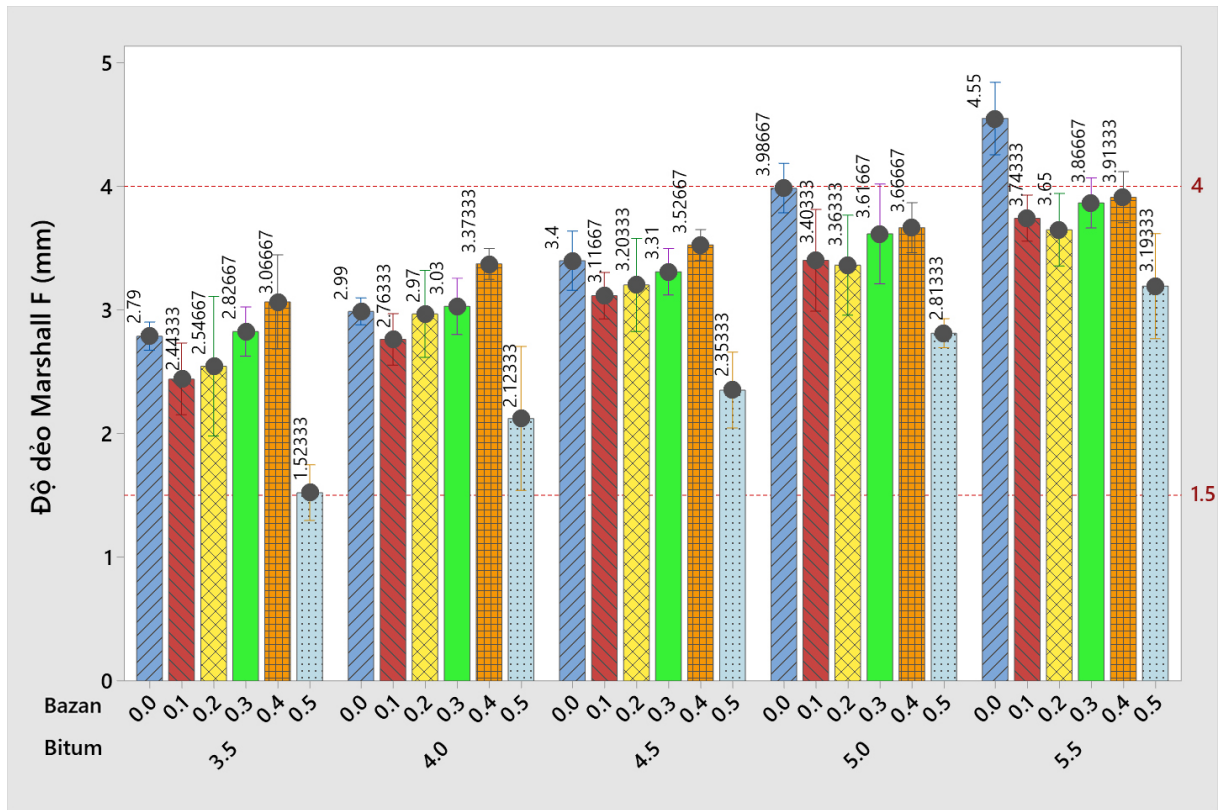
Hình 2.15 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến MF. Có thể thấy cả 2 yếu tố hàm lượng nhựa và hàm lượng sợi bazan đều ảnh hưởng đáng kể đến chỉ số MF.

- **Ảnh hưởng của hàm lượng nhựa đường:** Khi hàm lượng nhựa đường tăng từ 3,5% đến 5,5% thì MF tăng nhanh, (thể hiện bằng đường dốc gần thẳng đứng) và đạt giá trị lớn nhất khi hàm lượng nhựa đường là 5,5%. Điều này cho thấy sử dụng càng nhiều lượng nhựa đường trong hỗn hợp BTN thì giá trị MF càng tăng.

- **Ảnh hưởng của hàm lượng sợi bazan:** Khi không sử dụng sợi bazan, MF là lớn nhất, khi tăng hàm lượng sợi từ 0% đến 0,1%, MF giảm nhanh. Khi hàm lượng sợi bazan tăng từ 0,1% đến 0,4% thì MF tăng dần và đạt giá trị gần bằng giá trị MF khi không sử dụng sợi bazan. Tiếp tục tăng hàm lượng sợi lên 0,5%, thì MF giảm mạnh và đạt giá trị nhỏ nhất, thể hiện bằng đường dốc gần như thẳng đứng.



Hình 2.15. Ảnh hưởng các yếu tố nhựa, sợi bazan đến độ dẻo Marshall



Hình 2.16. Biểu đồ tổng hợp độ dẻo Marshall của hỗn hợp BTN

Hình 2.16 là biểu đồ tổng hợp MF của hỗn hợp BTN theo hàm lượng nhựa đường và hàm lượng bazan. Tham khảo yêu cầu kỹ thuật theo QĐ 858 [7] và TCVN 13567:2022 [5], MF của hỗn hợp BTN nằm trong khoảng 1,5 đến 4,0mm. Như vậy, ngoại trừ hỗn hợp BTN không sử dụng sợi bazan với hàm lượng nhựa đường 5,5%, thì tất cả các hỗn hợp BTN còn lại đều thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật về MF.

2.4.3. Xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu của hỗn hợp BTN với các hàm lượng sợi bazan khác nhau

2.4.3.1. Lập kế hoạch thí nghiệm

Với cấp phối thiết kế, chất kết dính và loại sợi đã 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 2.8.

Chuẩn bị các mẫu thí nghiệm: Chuẩn bị 5 tổ mẫu có hàm lượng nhựa đường chênh lệch nhau 0,5%. Các hàm lượng nhựa đường được lựa chọn để đúc mẫu là: 3,5%; 4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5%. Các hàm lượng sợi bazan được lựa chọn: 0,0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5%.

Bảng 2.8. Số lượng mẫu thí nghiệm xác định hàm lượng nhựa tối ưu

TT	Hàm lượng nhựa	Hàm lượng sợi bazan						Tổng số mẫu
		0 %	0,1 %	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,5 %	
1	3,5	3	3	3	3	3	3	18
2	4	3	3	3	3	3	3	18
3	4,5	3	3	3	3	3	3	18
4	5	3	3	3	3	3	3	18
5	5,5	3	3	3	3	3	3	18
	Tổng số mẫu	15	15	15	15	15	15	90

2.4.3.2. Kết quả thí nghiệm xác định hàm lượng nhựa tối ưu

Các kết quả thiết kế lựa chọn hàm lượng nhựa với các hàm lượng sợi: 0,0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5% được thể hiện dưới đây:

Bảng 2.9. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0% sợi bazan)

TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ ổn định (kN)	Độ dẻo (mm)	Độ rỗng dư V_a (%)
1	3,5	10,18	2,79	7,59
2	4	11,35	2,99	6,33
3	4,5	11,95	3,40	4,96
4	5	11,51	3,99	3,73
5	5,5	10,41	4,55	2,77
Yêu cầu kỹ thuật		$\geq 8,0$	$1,5 \div 4$	$4 \div 6$
Hàm lượng nhựa thiết kế: 4,6%				

Bảng 2.10. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,1% sợi bazan)

TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ ổn định (kN)	Độ dẻo (mm)	Độ rỗng dư V_a (%)
1	3,5	11,44	2,44	7,92
2	4	11,97	2,76	6,49
3	4,5	12,30	3,12	5,25
4	5	11,76	3,40	4,02
5	5,5	11,01	3,74	3,15
Yêu cầu kỹ thuật		$\geq 8,0$	$1,5 \div 4$	$4 \div 6$
Hàm lượng nhựa thiết kế: 4,7%				

Bảng 2.11. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,2% sợi bazan)

TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ ổn định (kN)	Độ dẻo (mm)	Độ rỗng dư V_a (%)
1	3,5	11,70	2,55	7,92
2	4	12,05	2,97	6,50
3	4,5	12,41	3,20	5,29
4	5	12,43	3,36	4,08
5	5,5	12,25	3,65	3,17
Yêu cầu kỹ thuật		$\geq 8,0$	$1,5 \div 4$	$4 \div 6$
Hàm lượng nhựa thiết kế: 4,9%				

Bảng 2.12. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,3% sợi bazan)

TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ ổn định (kN)	Độ dẻo (mm)	Độ rỗng dư V_a (%)
1	3,5	12,20	2,83	9,22
2	4	12,68	3,03	7,52
3	4,5	12,96	3,31	6,05
4	5	13,30	3,62	4,51
5	5,5	13,00	3,87	3,96
Yêu cầu kỹ thuật		$\geq 8,0$	$1,5 \div 4$	$4 \div 6$
Hàm lượng nhựa thiết kế: 5,1%				

Bảng 2.13. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,4% sợi bazan)

TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ ổn định (kN)	Độ dẻo (mm)	Độ rỗng dư V_a (%)
1	3,5	12,57	3,07	9,40
2	4	13,03	3,37	8,31
3	4,5	13,63	3,53	6,78
4	5	13,95	3,67	4,82
5	5,5	13,29	3,91	4,31
Yêu cầu kỹ thuật		$\geq 8,0$	$1,5 \div 4$	$4 \div 6$
Hàm lượng nhựa thiết kế: 5,3%				

Bảng 2.14. Kết quả lựa chọn hàm lượng nhựa thiết kế (0,5% sợi bazan)

TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ ổn định (kN)	Độ dẻo (mm)	Độ rỗng dư V_a (%)
1	3,5	10,28	1,52	8,58
2	4	11,38	2,12	7,57

TT	Hàm lượng nhựa (%)	Độ ổn định (kN)	Độ dẻo (mm)	Độ rỗng dư V_a (%)
3	4,5	11,76	2,35	6,99
4	5	12,27	2,81	5,79
5	5,5	12,58	3,19	4,34
Yêu cầu kỹ thuật		$\geq 8,0$	$1,5 \div 4$	$4 \div 6$
Hàm lượng nhựa thiết kế: 5,4%				

Các kết quả chi tiết thiết kế lựa chọn hàm lượng nhựa đường với các hàm lượng sợi: 0,0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5% được thể hiện ở Phụ lục 1. Kết quả thiết kế lựa chọn hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với các hàm lượng sợi bazan: 0,0% (đối chứng); 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5% được thể hiện ở Bảng 2.15.

Bảng 2.15. Hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với từng hàm lượng sợi

Hàm lượng/ Ký hiệu	BTN đối chứng	BTN_ Bazan 0,1	BTN_ Bazan 0,2	BTN_ Bazan 0,3	BTN_ Bazan 0,4	BTN_ Bazan 0,5
Hàm lượng sợi bazan	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Hàm lượng nhựa tối ưu	4,6	4,7	4,9	5,1	5,3	5,4

Nội dung nghiên cứu hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với từng hàm lượng sợi đã cho thấy những vấn đề sau:

- Thiết kế BTN theo phương pháp Marshall đưa ra hàm lượng nhựa đường tối ưu là 5,3% khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4%. Tuy nhiên, thí nghiệm các chỉ tiêu theo phương pháp Marshall chỉ là một khía cạnh nêu lên hiệu suất của BTN mà không phản ánh chính xác khả năng làm việc của hỗn hợp BTN ngoài thực tế;

- Mục tiêu cuối cùng của việc nghiên cứu BTN không chỉ là đạt được độ ổn định tối ưu trong phòng thí nghiệm, mà còn là sử dụng vật liệu này ngoài thực tế. Các thực nghiệm liên quan tới thay đổi tỷ lệ sợi và ảnh hưởng tới các chỉ tiêu cơ lý của hỗn hợp BTN như khả năng chống nứt, độ bền, khả năng chịu kéo khi uốn, LVBX và các tính chất khác vẫn cần được thực hiện. Có những thông tin đầy đủ về khả năng làm việc của BTN sẽ giúp ích cho việc ứng dụng loại vật liệu mới này trong điều kiện Việt Nam.

2.5. Kết luận Chương 2

Nội dung nghiên cứu ở Chương 2 đã cho thấy được những vấn đề sau:

- Phương pháp trộn khô được lựa chọn để đưa sợi bazan vào hỗn hợp BTN, và đã xác định được đường cong cấp phối thiết kế hỗn hợp BTN sau khi phối trộn;
- Dựa theo phân tích hình ảnh SEM, hàm lượng sợi bazan là 0,3% và 0,4% giúp sợi phân bố đều trong hỗn hợp BTN hơn so với các hàm lượng sợi còn lại;
- Dựa trên các nghiên cứu trên thế giới, đã xây dựng được công cụ mô phỏng số cho hai chỉ tiêu MS và MF, qua đó sử dụng công cụ ML để mô phỏng tối ưu hóa thiết kế BTN sử dụng sợi bazan và tìm được các khoảng giá trị về hàm lượng cốt liệu, nhựa, sợi bazan cần được quan tâm khi tiến hành nghiên cứu thực nghiệm;
- BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% sẽ được sử dụng để tiến hành các thí nghiệm chỉ tiêu cơ lý ở các chương tiếp theo của LATS. Ngoài ra, các mẫu BTN với các hàm lượng sợi khác (0; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,5%) cũng sẽ được sử dụng để đánh giá và so sánh các chỉ tiêu cơ lý.

Chương 3. NGHIÊN CỨU THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC CHỈ TIÊU CƠ HỌC CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG SỢI BAZAN

Chương 3 tiến hành lựa chọn các chỉ tiêu đánh giá hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan, sau đó tiến hành nghiên cứu thí nghiệm và đánh giá các kết quả thu được.

3.1. Lựa chọn chỉ tiêu nghiên cứu và kế hoạch thí nghiệm

3.1.1. Lựa chọn chỉ tiêu cơ học của BTN trong nghiên cứu thí nghiệm

Các chỉ tiêu đánh giá hỗn hợp BTN trong nghiên cứu được đề xuất dựa trên các đặc tính của hỗn hợp BTN, đồng thời phục vụ tính toán thiết kế kết cấu áo đường mềm theo TCCS 38:2022 [9], gồm các chỉ tiêu sau:

1. Thí nghiệm đánh giá chiều sâu LVBX;
2. Cường độ kéo uốn ở 15°C.
3. Thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của vật liệu BTN - theo tiêu chuẩn ASTM D8225-19 thông qua chỉ số CT_{Index} .

4. Mô đun đàn hồi tĩnh ở các nhiệt độ 15°C, 30°C, 60°C;

5. Thí nghiệm đánh giá mô đun đàn hồi động theo tiêu chuẩn AASHTO TP62;

Tổng cộng 05 chỉ tiêu cơ học được thí nghiệm cho 06 loại BTN với hàm lượng sợi bazan khác nhau: 0,0% (đối chứng); 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5%.

3.1.2. Kế hoạch thí nghiệm

Với cấp phối thiết kế, chất kết dính và loại sợi đã chọn, cùng hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với các hàm lượng sợi bazan: 0,0% (đối chứng); 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5% đã được xác định ở Chương 2, tiếp tục tiến hành thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan với 5 hàm lượng sợi khác nhau trong điều kiện Việt Nam.

Số lượng mẫu thí nghiệm các chỉ tiêu của hỗn hợp BTN thể hiện ở Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Số lượng thí nghiệm đánh giá tính năng của các loại hỗn hợp

TT	Chỉ tiêu	Số lượng mẫu thử						Tổng số mẫu thử
		BTN (0% sợi bazan)	BTN (0,1% sợi bazan)	BTN (0,2% sợi bazan)	BTN (0,3% sợi bazan)	BTN (0,4% sợi bazan)	BTN (0,5% sợi bazan)	
1	Lún vệt bánh xe	2	2	2	2	2	2	12

TT	Chỉ tiêu	Số lượng mẫu thử						Tổng số mẫu thử
		BTN (0% sợi bazan)	BTN (0,1% sợi bazan)	BTN (0,2% sợi bazan)	BTN (0,3% sợi bazan)	BTN (0,4% sợi bazan)	BTN (0,5% sợi bazan)	
2	Cường độ kéo uốn	4	4	4	4	4	4	24
3	Khả năng kháng nứt	6	6	6	6	6	6	36
4	Mô đun đàn hồi tĩnh	9	9	9	9	9	9	54
5	Mô đun đàn hồi động	108	108	108	108	108	108	648
	Tổng số							774

3.2. Thí nghiệm đánh giá LVBX

3.2.1. Phương pháp thí nghiệm đánh giá LVBX

Phương pháp thí nghiệm LVBX (Hamburg Wheel Tracking) được nghiên cứu và phát triển đầu tiên tại Đức, sau đó được áp dụng khá phổ biến tại châu Âu, Mỹ và nhiều nước châu Á. Hiện nay, Việt Nam cũng sử dụng phương pháp này để đánh giá LVBX cho BTN theo Quyết định 1617/QĐ-BGTVT [8]. Nguyên lý cơ bản của phương pháp: Dưới tác dụng của tải trọng lặp của bánh xe bằng thép với số lần gia tải quy định, mẫu BTN bị LVBX, thông qua giá trị chiều sâu LVBX để đánh giá khả năng kháng LVBX của mẫu BTN.

Trong thử nghiệm này, tiến hành thí nghiệm độ sâu LVBX theo Phương pháp A quy định tại QĐ 1617/QĐ-BGTVT ngày 29/4/2014 [8] và tiêu chuẩn AASHTO T324 [16]. Thử nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm LAS XD72 - Trường Đại học Công nghệ GTVT. Thử nghiệm sử dụng thiết bị Hamburg Wheel Tracker, do hãng Infratest - Mỹ sản xuất. Mẫu thí nghiệm được đặt trong môi trường nước ở nhiệt độ 50°C, chạy 15.000 lượt. Mẫu dạng tấm hình chữ nhật được chế bị bằng cách sử dụng thiết bị đầm lăn (Roller Compaction, do công ty Daiwakenko, Nhật Bản sản xuất) có kích thước quy định như sau: (Chiều dài) x (Chiều rộng) x (Chiều dày) = (320 mm) x (260 mm) x (50 mm). Sử dụng bánh xe thép; Tần số tác dụng tải $(25 \pm 2,5)$ chu kỳ / 1 phút (tương đương (50 ± 5) lần / 1 phút).

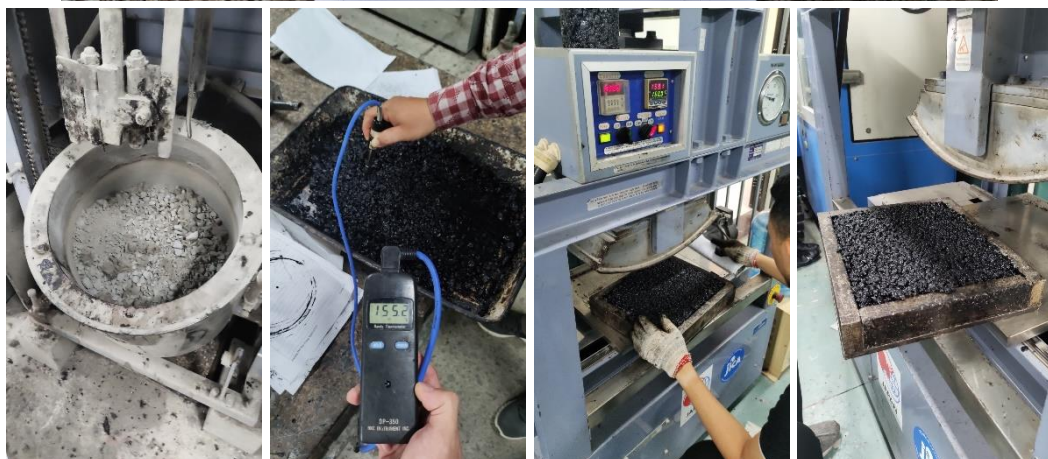
3.2.2. Kế hoạch thí nghiệm LVBX

Kế hoạch thí nghiệm LVBX được trình bày ở Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Số lượng mẫu thí nghiệm LVBX cho các loại BTN

Loại BTN	Hàm lượng nhựa (%)	Số lượng mẫu
BTN_Bazan 0,0	4,6	2
BTN_Bazan 0,1	4,7	2
BTN_Bazan 0,2	4,9	2
BTN_Bazan 0,3	5,1	2
BTN_Bazan 0,4	5,3	2
BTN_Bazan 0,5	5,4	2
Tổng số		12

Dưới đây là các hình ảnh quá trình chế tạo mẫu và thí nghiệm LVBX các loại hỗn hợp BTN sử dụng hàm lượng sợi bazan khác nhau.

**Hình 3.1. Chế tạo mẫu BTN thí nghiệm LVBX**



Mẫu sau khi đầm lặn



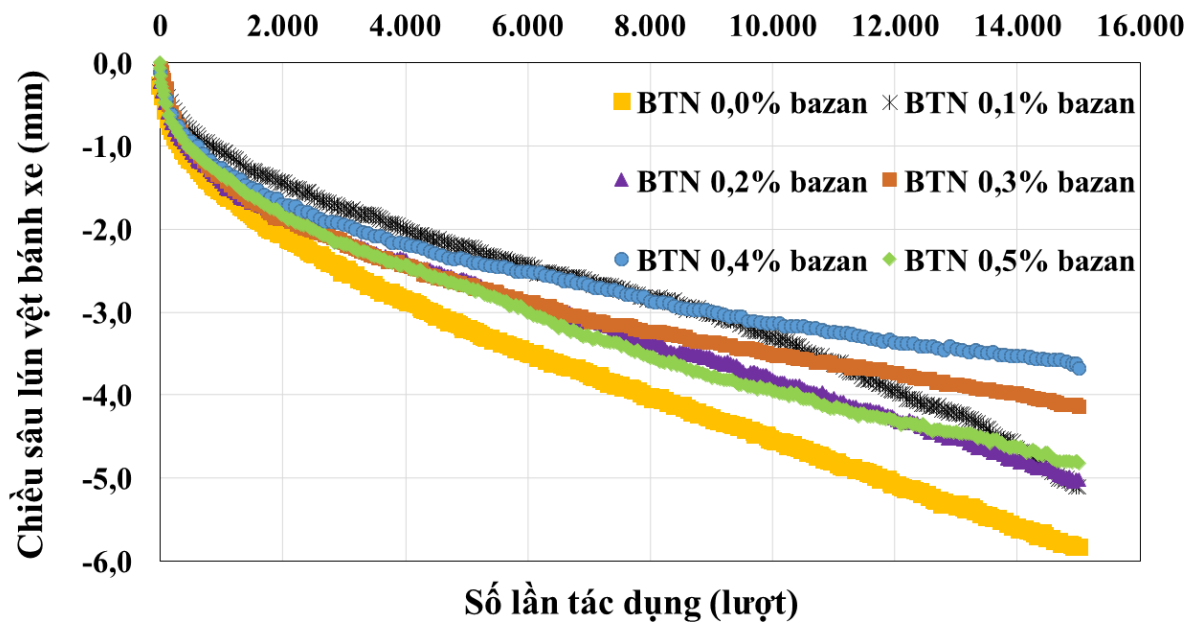
Chạy mẫu trên thiết bị wheel - tracking

Hình 3.2. Quá trình chạy LVBX**Hình 3.3. Mẫu BTN sau quá trình chạy LVBX****3.2.3. Kết quả thí nghiệm LVBX**

Sau 15.000 lượt chạy trong môi trường nước ở nhiệt độ 50°C, chiều sâu LVBX của tất cả 6 loại BTN đều nhỏ hơn 12,5 mm và đáp ứng theo quy định tại Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT [8]. Kết quả thí nghiệm được trình bày ở Hình 3.4 và Phụ lục 2.

BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% có chiều sâu LVBX nhỏ nhất (3,67 mm), tiếp theo là BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3% (4,18 mm); BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,5% (4,81 mm), BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,2% (4,99 mm), BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,1% (5,13 mm). Hỗn hợp BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan có chiều sâu LVBX lớn nhất (5,83 mm), xem Hình 3.4. Như vậy, việc sử dụng sợi bazan cho BTN với hàm lượng sợi 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% và 0,5% có hiệu quả trong việc giảm chiều sâu LVBX, các giá trị giảm tương ứng là 12%; 14%; 28%; 37%; và 17% so với mẫu đối chứng. Kết quả thí nghiệm đã cho thấy khả năng kháng LVBX tốt của hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan so với hỗn hợp BTN thông thường không sử dụng sợi. Có thể lý giải như sau: sợi bazan được phân tán đồng đều trong hỗn hợp BTN đã giúp hình thành một cấu trúc mạng không gian. Trong khi

đó, sợi bazan có thể hấp thụ một số thành phần nhẹ của nhựa đường để cải thiện độ nhớt của nó. Do vậy, khả năng kháng LVBX của hỗn hợp BTN có thể được tăng cường khi bổ sung sợi bazan. Tuy nhiên, cần lưu ý sử dụng sợi bazan với hàm lượng hợp lý để có thể phát huy tốt nhất khả năng kháng LVBX của hỗn hợp BTN. Từ kết quả thí nghiệm có thể thấy BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% có khả năng kháng LVBX tốt hơn 5 loại BTN còn lại trong nghiên cứu. Các nghiên cứu tương đồng trên thế giới cũng đã được công bố bởi các tác giả như: Fan năm 2010 [49], Gu năm 2014 [59], Zheng năm 2014 [122], Celauro và Pratico năm 2018 [35] và Zhao năm 2020 [121].



Hình 3.4. Biểu đồ chiều sâu LVBX của các loại BTN sử dụng hàm lượng sợi bazan khác nhau

3.3. Thí nghiệm cường độ kéo uốn

Cường độ kéo uốn là thông số quan trọng thể hiện khả năng chịu lực của hỗn hợp BTN được sử dụng trong tính toán thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo tiêu chuẩn TCCS 38:2022 [9].

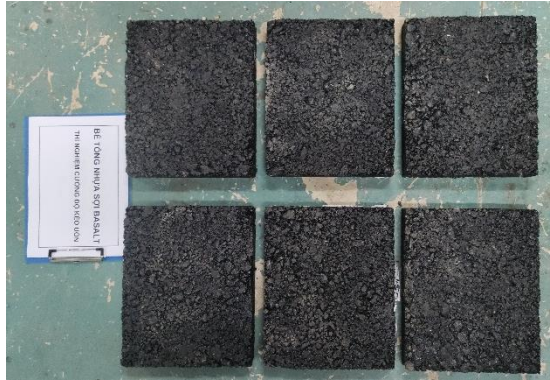
3.3.1. Phương pháp thí nghiệm cường độ kéo uốn

Cường độ kéo uốn của BTN được xác định theo phụ lục C của tiêu chuẩn TCCS 38:2022 [9]. Thực hiện trên mẫu kiểu dầm kích thước 50×50×250 mm.

Các hỗn hợp được đúc trên thiết bị đầm lặn (Daiwakenko, Nhật Bản sản xuất) kích thước 320×260×50mm. Sau đó tiến hành cắt mẫu bằng thiết bị cắt chuyên dụng để

đạt kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm (xem Hình 3.5). Quá trình đúc và cắt mẫu được thực hiện tại phòng thí nghiệm LAS-XD72 - Trường Đại học Công nghệ GTVT.

Mẫu được bảo ôn ở 15°C trong thời gian 120 phút. Sau đó, lấy mẫu đặt lên bộ gá có 2 gối tựa cách nhau 200mm (xem Hình 3.6). Thí nghiệm nén được tiến hành ở phòng thí nghiệm Trường Đại học GTVT, thực hiện trên máy nén Marshall với tốc độ gia tải 50,8 mm/phút cho đến khi phá hoại.



(a) Mẫu sau khi đầm



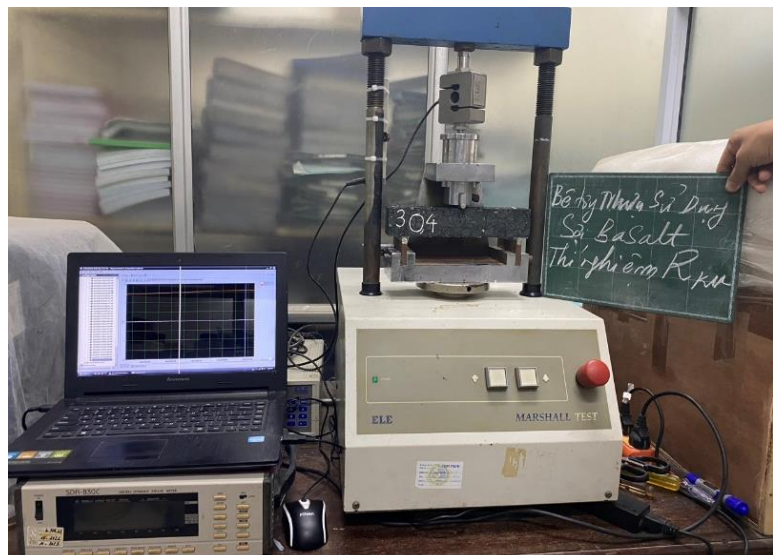
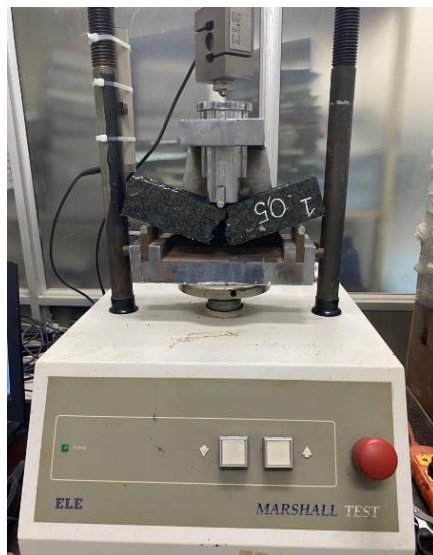
(b) Cắt mẫu



(c) Mẫu sau khi cắt



Hình 3.5. Mẫu sau khi đầm và cắt mẫu



Hình 3.6. Thí nghiệm kéo uốn mẫu

3.3.2. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo uốn

Kế hoạch thí nghiệm xác định cường độ kéo uốn được thể hiện ở Bảng 3.3.

Bảng 3.3. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo uốn

Loại BTN	Hàm lượng nhựa (%)	Hàm lượng sợi bazan (%)	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Tổng số mẫu
BTN_Bazan 0,0	4,6	0	15	4
BTN_Bazan 0,1	4,7	0,1	15	4
BTN_Bazan 0,2	4,9	0,2	15	4
BTN_Bazan 0,3	5,1	0,3	15	4
BTN_Bazan 0,4	5,3	0,4	15	4
BTN_Bazan 0,5	5,4	0,5	15	4
Tổng số thí nghiệm cần thực hiện				24

3.3.3. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn

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

$$R_{ku} = \frac{3.P.L}{2b.h^2} \quad (3.1)$$

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.

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn ở 15°C cho các tổ mẫu được thể hiện ở Bảng 3.4 và Phụ lục 3.

Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn

Hỗn hợp	TT	Khoảng cách giữa 2 gối L (cm)	Chiều rộng mẫu b (cm)	Chiều cao mẫu h (cm)	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Lực nén phá hoại mẫu P (kN)	Cường độ kéo uốn R_{ku} (MPa)	Cường độ chịu kéo – uốn trung bình R_{ku} (MPa)	Độ lệch chuẩn (MPa)
BTN_Bazan 0,0	1	20	5	5	15	3,610	8,663	8,168	0,35
	2	20	5	5	15	3,403	8,168		
	3	20	5	5	15	3,311	7,947		
	4	20	5	5	15	3,288	7,892		

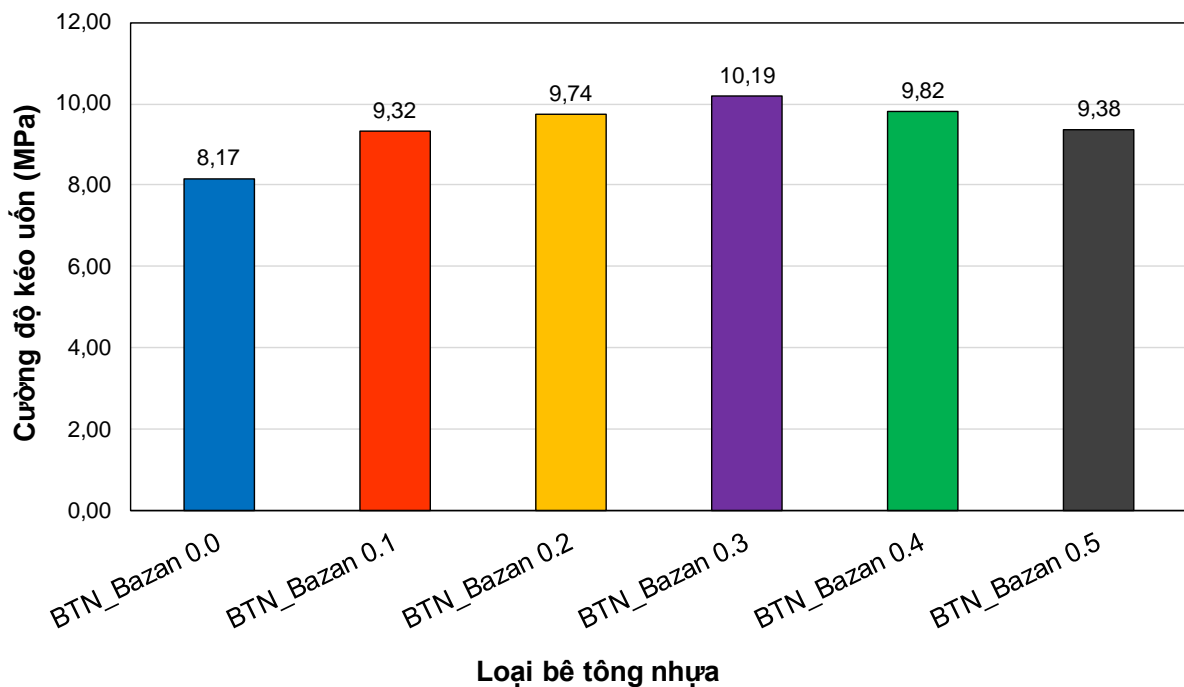
Hỗn hợp	TT	Khoảng cách giữa 2 gối L (cm)	Chiều rộng mẫu b (cm)	Chiều cao mẫu h (cm)	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Lực nén phá hoại mẫu P (kN)	Cường độ kéo uốn R_{ku} (MPa)	Cường độ chịu kéo – uốn trung bình R_{ku} (MPa)	Độ lệch chuẩn (MPa)
BTN_ Bazan 0,1	1	20	5	5	15	3,655	8,773	9,323	0,46
	2	20	5	5	15	3,931	9,433		
	3	20	5	5	15	3,839	9,213		
	4	20	5	5	15	4,114	9,874		
BTN_ Bazan 0,2	1	20	5	5	15	4,297	10,314	9,736	0,45
	2	20	5	5	15	3,976	9,543		
	3	20	5	5	15	4,091	9,819		
	4	20	5	5	15	3,862	9,268		
BTN_ Bazan 0,3	1	20	5	5	15	4,114	9,874	10,190	0,47
	2	20	5	5	15	4,435	10,644		
	3	20	5	5	15	4,389	10,534		
	4	20	5	5	15	4,045	9,709		
BTN_ Bazan 0,4	1	20	5	5	15	4,343	10,424	9,819	0,50
	2	20	5	5	15	4,160	9,984		
	3	20	5	5	15	3,862	9,268		
	4	20	5	5	15	3,999	9,599		
BTN_ Bazan 0,5	1	20	5	5	15	3,541	8,498	9,378	0,59
	2	20	5	5	15	4,045	9,709		
	3	20	5	5	15	4,022	9,654		
	4	20	5	5	15	4,022	9,654		

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn thể hiện ở Bảng 3.4 và Hình 3.7 cho thấy, so với BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan, sử dụng sợi bazan đã cải thiện đáng kể cường độ kéo uốn của BTN. Khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3%, cường độ kéo uốn đạt giá trị lớn nhất (10,19 MPa). BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% có cường độ kéo uốn đạt giá trị lớn thứ hai (9,819MPa). BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan, cường độ kéo uốn đạt giá trị nhỏ nhất (8,168 MPa).

BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng tăng dần từ 0,1% lên 0,3% thì cường độ kéo uốn tăng dần, mức độ tăng so với BTN đối chứng lần lượt là 14%, 19% và 25%.

Khi tiếp tục tăng hàm lượng sợi lên 0,4% và 0,5%, thì giá trị cường độ kéo uốn bắt đầu giảm, tuy nhiên vẫn tăng so với BTN đối chứng tương ứng là 20% và 15%.

Có thể thấy, việc bổ sung sợi bazan đã làm tăng độ bền kéo uốn của hỗn hợp BTN. Sợi bazan giúp làm tăng tính linh hoạt của hỗn hợp nhựa đường, hoạt động như một chất gia cường và nâng cao khả năng chống nứt của hỗn hợp nhựa đường ở nhiệt độ thấp. Sợi bazan bám vào nhựa đường, giúp làm cứng các sợi, hiệu ứng làm cứng này đã tránh sự hình thành các vết nứt, hấp thụ một phần ứng suất và tăng khả năng chống lại các vết nứt của vật liệu ở nhiệt độ thấp.



Hình 3.7. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn của các loại BTN với hàm lượng sợi khác nhau

3.4. Thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN

3.4.1. Phương pháp thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN

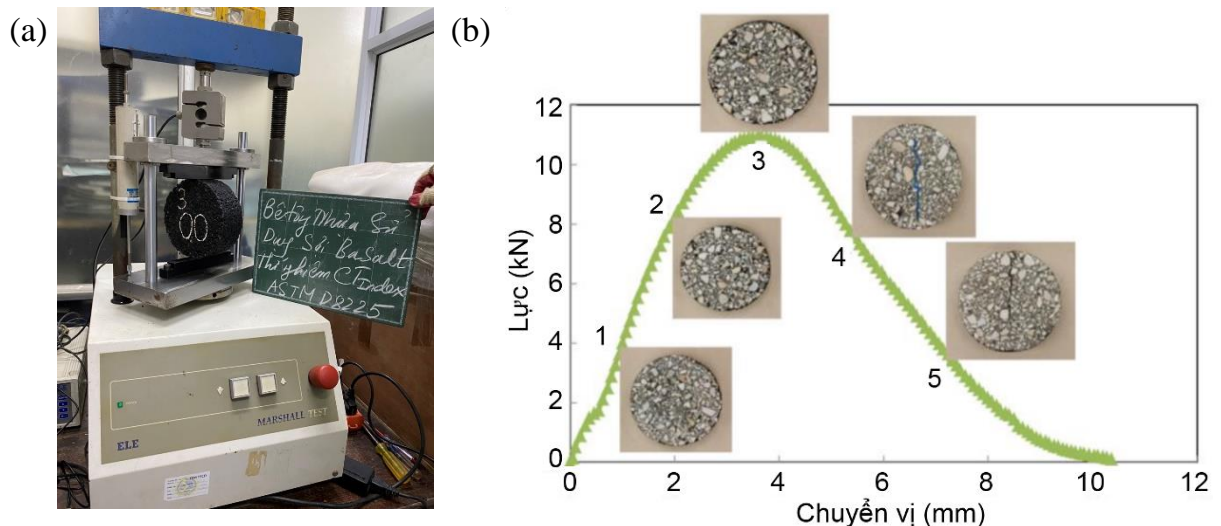
Trong thử nghiệm này, mẫu được đầm trên thiết bị đầm xoay (Gyratory Testing machines) do hãng Daiwa Kenko, Nhật Bản sản xuất tại Phòng thí nghiệm LAS XD72 của Trường Đại học Công nghệ GTVT. Quá trình nén mẫu thí nghiệm xác định chỉ số CT_{Index} được thực hiện ở phòng thí nghiệm Trường Đại học GTVT theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM D8225 [28].

Mẫu thử nghiệm được đặt trong buồng ổn nhiệt ở nhiệt độ thử nghiệm là $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ trong thời gian 2 giờ \pm 10 phút, sau đó được mang ra nén.

3.4.1.1. Mô tả thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của vật liệu BTN (IDEAL-CT)

Thí nghiệm IDEAL-CT_{Index} được sử dụng để xác định khả năng chống nứt của hỗn hợp BTN ở nhiệt độ trung gian 25°C. Mẫu thí nghiệm hình trụ được chế tạo bằng thiết bị đầm xoay Superpave có đường kính 150 ± 2 mm và chiều cao 62 ± 1 mm đối với hỗn hợp có cỡ hạt lớn nhất danh định của cốt liệu (NMAS) ≤ 19 mm. Với hỗn hợp có NMAS ≥ 25 mm, mẫu sẽ có đường kính 150 ± 2 mm và chiều cao 95 ± 1 mm. Mẫu được chế tạo với độ rỗng dư $V_a = 7 \pm 0,5\%$. Số lượng mẫu thử tối thiểu là 03 mẫu theo ASTM D8225 [28]. Hình 3.8a thể hiện thiết bị thí nghiệm IDEAL-CT điển hình. Nhiệt độ thí nghiệm mẫu quy định là 25°C, tốc độ gia tải 50mm/phút. Mẫu hình trụ, không cắt, không khía, xẻ rãnh. Hình 3.8b thể hiện đường cong lực - chuyển vị điển hình quá trình nén mẫu bằng phương pháp thí nghiệm IDEAL-CT.

Bộ thiết bị thí nghiệm được sử dụng trong nghiên cứu là thiết bị nén Marshall gắn bộ LVDT tự động ghi dữ liệu và vẽ biểu đồ đường cong lực - chuyển vị. Mẫu được gắn vào bộ gá, đảm bảo mẫu được đặt ở trung tâm và tiếp xúc đồng đều trên giá đỡ. Gia tải cho mẫu với tốc độ không đổi $50 \pm 2,0$ mm/phút trong suốt thời gian thử nghiệm đồng thời kiểm soát đường chuyển vị tải trọng. Mẫu sẽ được nén đến khi lực nén giảm xuống còn khoảng 0,1 kN thì dừng lại.



Hình 3.8. Thiết bị thí nghiệm và đường cong chuyển vị - tải trọng sau khi nén mẫu bằng phương pháp thí nghiệm IDEAL-CT

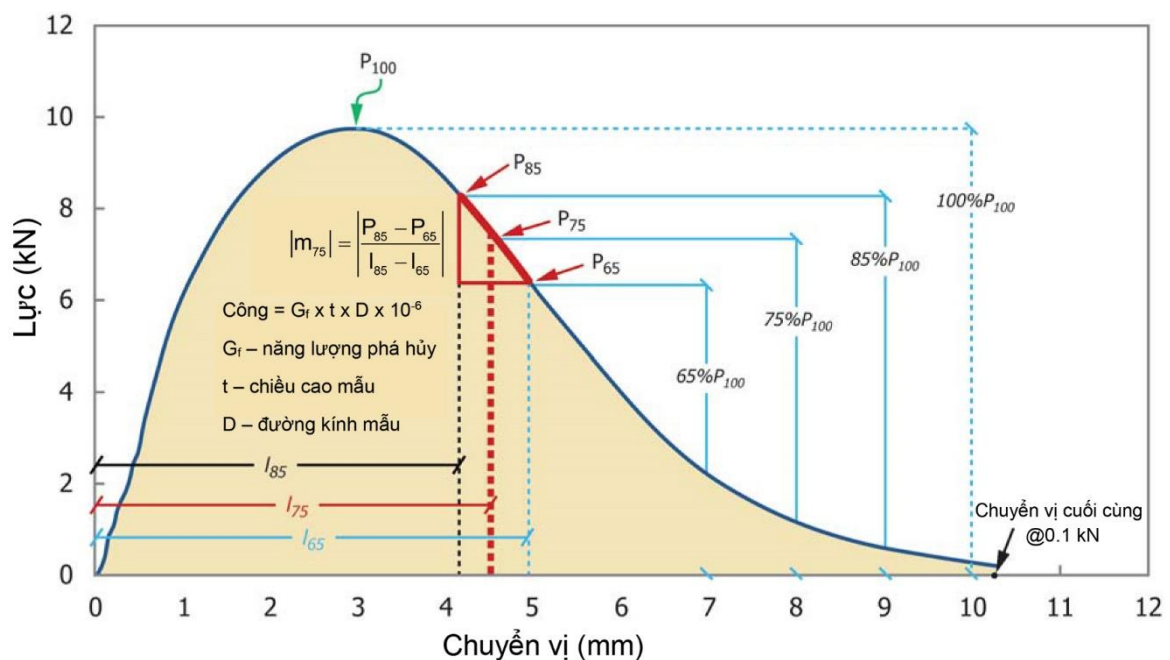
Đường cong lực - chuyển vị của IDEAL-CT (Hình 3.8b) có thể được chia thành hai phân đoạn tại tải trọng lớn nhất: trước tải lớn nhất và sau tải lớn nhất. Fujie Zhou [54] đã kiểm tra đường cong chuyển vị - tải trọng điển hình và các điều kiện mẫu thử

liên quan tại các giai đoạn khác nhau. Có bảy giai đoạn liên quan đến các điều kiện mẫu thử khác nhau, như được ghi trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5. Bảy giai đoạn của đường cong chuyển vị tải trọng

Phân đoạn	Giai đoạn	Vùng tải trọng và đặc tính	Tình trạng mẫu
Trước tải lớn nhất	1	0–1/3 tải lớn nhất; tải trọng tăng	Không có vết nứt nhìn thấy được
	2	1/3–2/3 tải lớn nhất; tải trọng tăng	
	3	2/3– tải lớn nhất; tải trọng tăng	
Tải trọng lớn nhất	4	Tải trọng đạt giá trị lớn nhất; đỉnh tải trọng	
Sau tải lớn nhất	5	Tải trọng đạt giá trị lớn nhất – 2/3 tải lớn nhất; tải trọng giảm	Bắt đầu thấy vết nứt vĩ mô
	6	2/3–1/3 tải lớn nhất; tải trọng giảm	Vết nứt lan truyền nhanh chóng và dễ nhìn thấy hơn
	7	1/3 tải lớn nhất – tải trọng = 0; tải trọng giảm	Mẫu bị tách thành 2 hoặc nhiều mảnh

Xem xét các đặc điểm của phân đoạn sau tải lớn nhất, Fujie Zhou thấy rằng giá trị tuyệt đối ($|m|$) của độ dốc của đường cong chuyển vị - tải trọng thay đổi từ nhỏ tại ngay sau điểm đạt tải trọng lớn nhất đến lớn ở giữa đường cong và sau đó lại nhỏ lại. Vì vậy, một lựa chọn hợp lý là sử dụng điểm uốn, trong đó giá trị $|m|$ là lớn nhất trong toàn bộ phân đoạn sau khi đạt tải lớn nhất. Fujie Zhou đã đề xuất sử dụng điểm sau khi đạt tải lớn nhất (PPP_{75}) nơi mà tải trọng được giảm đến 75 phần trăm tải trọng lớn nhất (xem Hình 3.9) [54]. Cơ sở lý luận cho việc lựa chọn PPP_{75} được đưa ra dưới đây:



Hình 3.9. Minh họa về điểm PPP_{75} và độ dốc $|m_{75}|$

Fujie Zhou và các cộng sự [54] đã phân tích hơn 200 đường cong chuyển vị - tải trọng IDEAL-CT được tạo ra từ các loại hỗn hợp BTN khác nhau, và xác định hầu hết các điểm uốn của những đường cong này. Ngoại trừ một vài đường cong, các điểm uốn đều được xác định. Người ta nhận thấy rằng giá trị trung bình sau khi đạt tải trọng lớn nhất tại các điểm uốn là 75% giá trị trung bình của tải trọng lớn nhất của các đường cong đó với độ lệch chuẩn $\sigma=5$. Hơn nữa, điểm PPP_{75} luôn có thể được xác định dễ dàng mà không cần một chương trình hay phần mềm phức tạp nào [54]. Cả hai tham số, P/l (hoặc $|m| = |\Delta P|/|\Delta l|$) và l/D tại PPP_{75} , rất ổn định và nhất quán, do đó, điểm PPP_{75} đã được chọn làm điểm quan trọng quyết định để tính toán CT_{Index} .

3.4.1.2. Công thức tính CT_{Index}

Các công thức để xác định chỉ số CT_{Index} là:

$$W_f = \sum_{i=1}^{n-1} \left((l_{i+1} - l_i) \times P_i + \frac{1}{2} \times (l_{i+1} - l_i) \times (P_{i+1} - P_i) \right)$$

$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6; \quad |m_{75}| = \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \quad (3.2)$$

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

trong đó:

W_f - công phá hủy, J; G_f - năng lượng phá hủy, J/m²;

D - đường kính mẫu, mm; t - chiều cao mẫu, mm;

l_{65} - chuyển vị tương ứng với 65% tải trọng lớn nhất ở giai đoạn sau tải trọng lớn nhất, mm;

l_{75} - chuyển vị tương ứng với 75% tải trọng lớn nhất ở giai đoạn sau tải trọng lớn nhất, mm;

l_{85} - chuyển vị tương ứng với 85% tải trọng lớn nhất ở giai đoạn sau tải trọng lớn nhất, mm;

P_{65} - 65% tải trọng lớn nhất ở giai đoạn sau tải trọng lớn nhất, kN;

P_{75} - 75% tải trọng lớn nhất ở giai đoạn sau tải trọng lớn nhất, kN;

P_{85} - 85% tải trọng lớn nhất ở giai đoạn sau tải trọng lớn nhất, kN.

Từ công thức xác định chỉ số CT_{Index} cho thấy, với cùng lực tác dụng, khi CT_{Index} có giá trị nhỏ, đồng nghĩa với góc dốc có giá trị lớn, thể hiện loại vật liệu có tính giòn

cứng, dễ bị nứt vỡ, sức kháng nứt thấp. Ngược lại, khi CT_{Index} có giá trị lớn, góc dốc có giá trị nhỏ, thể hiện vật liệu có tính bền, dai, nên khả năng kháng nứt sẽ cao hơn.

3.4.2. Kế hoạch thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN

Kế hoạch thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN - theo tiêu chuẩn ASTM D8225-19 thông qua chỉ số CT_{Index} của các mẫu BTN sử dụng hàm lượng sợi bazan là 0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4%; 0,5% được thể hiện ở Bảng 3.6 và Phụ lục 4.

Bảng 3.6. Kế hoạch thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN - theo tiêu chuẩn ASTM D8225

Loại BTN	Hàm lượng nhựa (%)	Hàm lượng sợi bazan (%)	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Tổng số mẫu
BTN_Bazan 0,0	4,6	0	25	6
BTN_Bazan 0,1	4,7	0,1	25	6
BTN_Bazan 0,2	4,9	0,2	25	6
BTN_Bazan 0,3	5,1	0,3	25	6
BTN_Bazan 0,4	5,3	0,4	25	6
BTN_Bazan 0,5	5,4	0,5	25	6
Tổng số thí nghiệm cần thực hiện				36

3.4.3. Kết quả thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN

Trong thử nghiệm này, mẫu được đặt trên thiết bị đầm xoay (Gyratory Testing machines) do hãng Daiwa Kenko, Nhật Bản sản xuất tại Phòng thí nghiệm LAS XD72 của Trường Đại học Công nghệ GTVT. Quá trình nén mẫu thí nghiệm xác định chỉ số CT_{Index} được thực hiện ở phòng thí nghiệm Trường Đại học GTVT theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM D8225 [28].

Mẫu thử nghiệm được đặt trong buồng ổn nhiệt ở nhiệt độ thử nghiệm là $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ trong thời gian 2 giờ \pm 10 phút, sau đó được mang ra nén. Các mẫu trước và sau khi nén được thể hiện ở Hình 3.10b và Hình 3.11. Quá trình thí nghiệm được thể hiện ở Hình 3.12.

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh ở chỉ số kháng nứt CT_{Index} của 6 loại BTN và các chỉ số khác được thể hiện trong Bảng 3.7 và Phụ lục 4.



(a) Máy đầm xoay

(b) Mẫu sau khi đúc

Hình 3.10. Mẫu thí nghiệm sau khi đúc bằng máy đầm xoay**Hình 3.11. Mẫu thí nghiệm sau khi phá hoại****Hình 3.12. Quá trình thí nghiệm xác định chỉ số kháng nứt CT_{Index}**

Bảng 3.7. Giá trị của chỉ số kháng nứt CT_{Index}

TT	Mục/ Loại BTN	BTN_ Bazan 0,0	BTN_ Bazan 0,1	BTN_ Bazan 0,2	BTN_ Bazan 0,3	BTN_ Bazan 0,4	BTN_ Bazan 0,5
1	Chỉ số kháng nứt CT _{Index}	143,31	175,40	194,80	266,95	309,36	227,52
		175,35	158,07	194,88	244,24	325,79	218,16
		165,08	175,63	195,17	285,92	303,92	222,35
		159,12	182,69	188,74	282,06	307,27	200,05
		150,03	177,40	209,35	247,32	303,99	220,20
		178,57	182,86	193,84	274,29	304,86	225,19
	Trung bình	161,91	175,34	196,13	266,80	309,20	218,91
2	Khoảng chênh lệch R: max - min	35,25	24,79	20,62	41,68	21,87	27,47
3	Độ lệch chuẩn cho phép, 1s	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
4	Giá trị độ lệch cho phép: 4x1s	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55	44,55
5	Đánh giá: So sánh (2) và (4)	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt

Theo tiêu chuẩn ASTM D8225-19, Độ lệch chuẩn cho phép, 1s quy định là 13,5. Kết quả phân tích độ chụm của các tổ mẫu thể hiện ở Bảng 3.7 đạt yêu cầu theo tiêu chuẩn ASTM C670.

Có thể sử dụng phương pháp tính toán giá trị đặc trưng để xác định giới hạn của chỉ số kháng nứt CT_{Index} theo công thức sau:

$$K_{dt} = \bar{K} - \frac{t_{\alpha} \cdot S}{\sqrt{n}}, \quad (3.3)$$

trong đó:

K_{dt} - Giá trị đặc trưng, là khoảng tin cậy 1 phía (phía phải) trong phân phối student; \bar{K} - Giá trị trung bình tính theo công thức:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (3.4)$$

n - Tổng số liệu các giá trị thí nghiệm;

s - Độ lệch chuẩn của các giá trị thí nghiệm;

t_{α} - Hệ số được xác định tùy theo suất đảm bảo và số liệu kiểm tra N nhiều hay ít; chọn $R = 95\%$.

Sau khi tính toán, làm tròn, đề xuất giá trị giới hạn tối thiểu chỉ số kháng nứt CT_{Index} đối với các hỗn hợp BTN như sau:

Bảng 3.8. Giá trị trung bình đặc trưng kháng nứt CT_{Index}

TT	Thông số	BTN_ Bazan 0,0	BTN_ Bazan 0,1	BTN_ Bazan 0,2	BTN_ Bazan 0,3	BTN_ Bazan 0,4	BTN_ Bazan 0,5
1	\bar{K}	161,91	175,34	196,13	266,80	309,20	218,91
2	Độ lệch chuẩn	12,67	8,30	6,31	16,04	7,67	8,98
3	K_{dt}	151,49	168,51	190,94	253,61	302,89	211,53
	Giá trị giới hạn tối thiểu	151,00	169,00	191,00	254,00	303,00	212,00

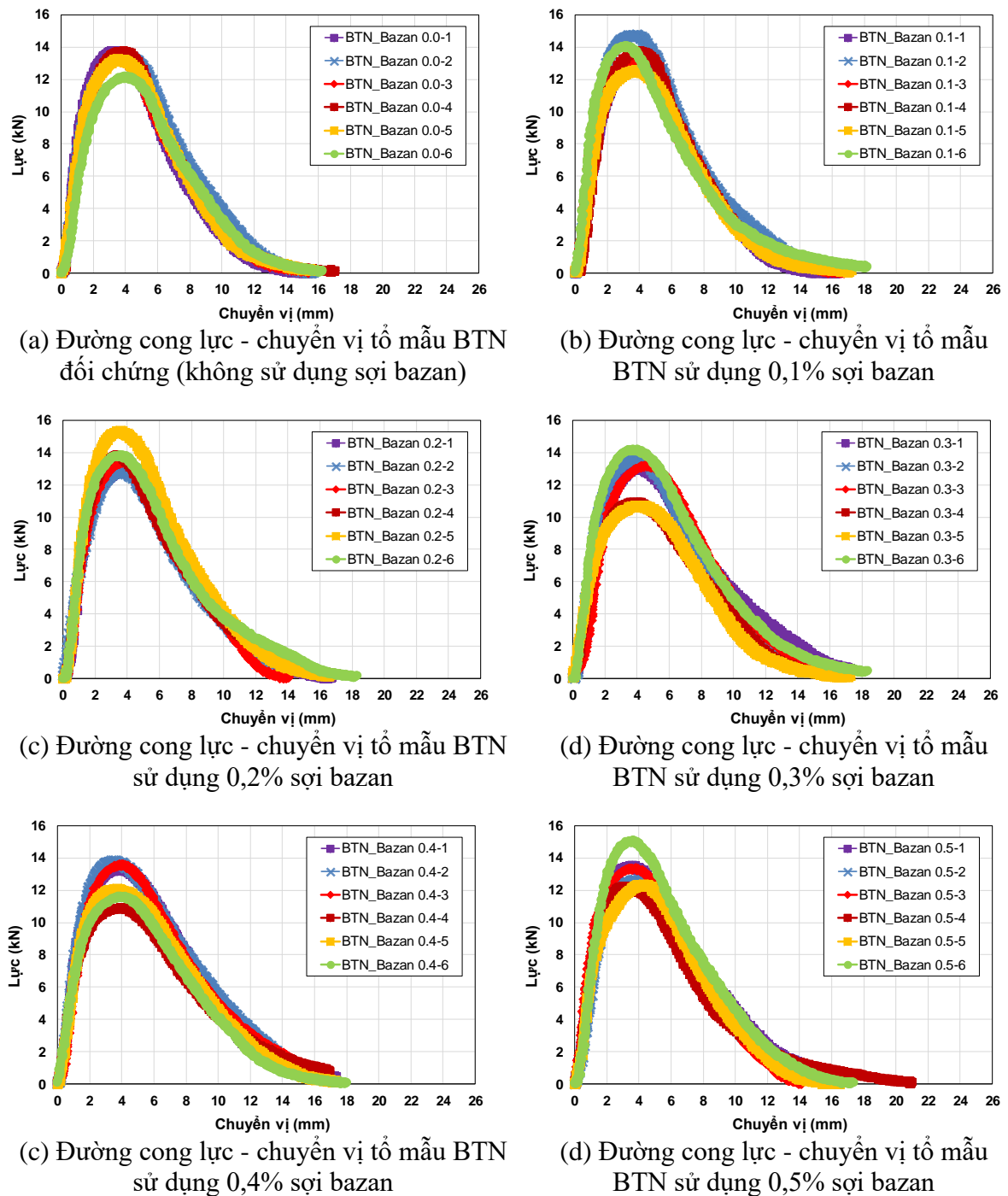
Bảng 3.9 và Bảng 3.10 thể hiện giá trị độ dốc và góc dốc của đường cong chuyển vị - tải trọng của 6 loại BTN.

Bảng 3.9. Giá trị độ dốc $|m_{75}|$ của đường cong chuyển vị - tải trọng

Hỗn hợp	Độ dốc $ m_{75} $ (kN/mm)						Trung bình	Độ lệch chuẩn
	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5	Mẫu 6		
BTN_ Bazan 0,0	2,53	2,54	2,74	2,37	2,63	2,13	2,49	0,196
BTN_ Bazan 0,1	2,29	2,25	2,09	2,11	2,23	2,06	2,17	0,087
BTN_ Bazan 0,2	2,10	2,01	2,17	2,04	2,27	2,20	2,13	0,092
BTN_ Bazan 0,3	1,90	2,03	1,88	1,46	1,69	1,97	1,82	0,195
BTN_ Bazan 0,4	1,69	1,65	1,74	1,51	1,58	1,45	1,60	0,098
BTN_ Bazan 0,5	1,99	1,91	1,89	1,99	1,97	2,10	1,98	0,067

Bảng 3.10. Giá trị góc dốc của đường cong chuyển vị - tải trọng

Hỗn hợp	Góc dốc (°)						Trung bình (°)	Độ lệch chuẩn
	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5	Mẫu 6		
BTN_ Bazan 0,0	68,46	68,51	69,94	67,13	69,18	64,82	68,01	1,658
BTN_ Bazan 0,1	66,37	66,06	64,46	64,62	65,86	64,14	65,25	0,873
BTN_ Bazan 0,2	64,54	63,52	65,23	63,89	66,26	65,57	64,84	0,952
BTN_ Bazan 0,3	62,25	63,83	62,02	55,52	59,37	63,09	61,01	2,819
BTN_ Bazan 0,4	59,31	58,72	60,06	56,52	57,74	55,49	57,97	1,585
BTN_ Bazan 0,5	63,35	62,37	62,14	63,36	63,10	64,51	63,14	0,772

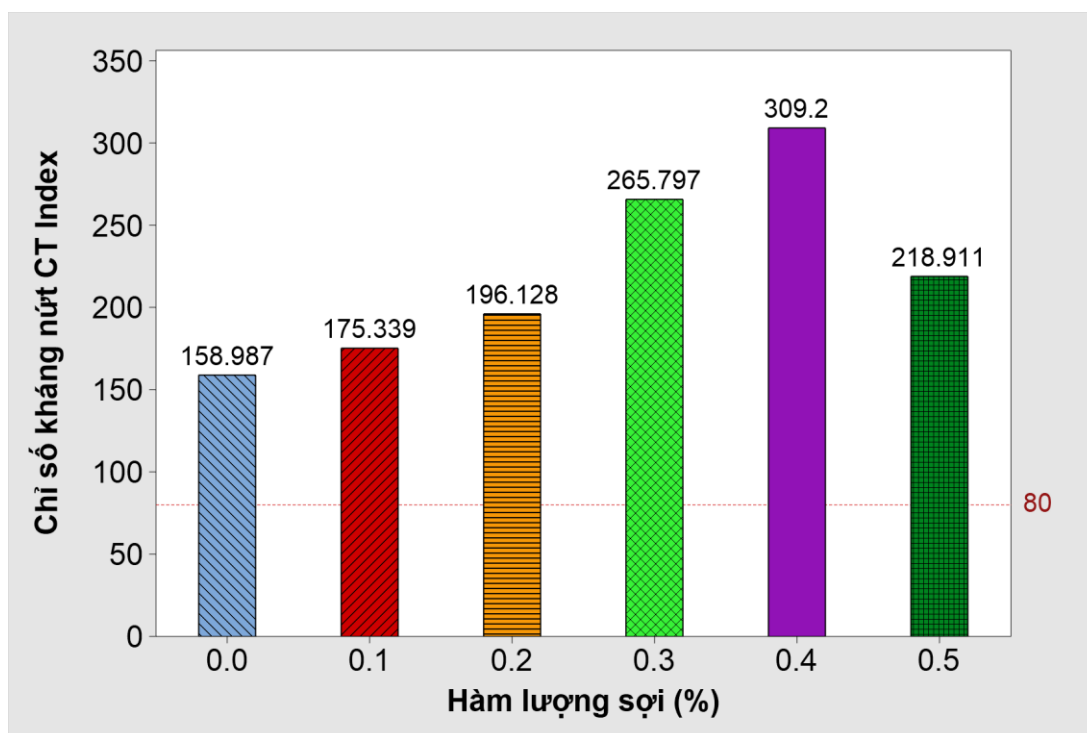


Hình 3.13. Đường cong lực - chuyển vị của 6 hỗn hợp BTN sử dụng các hàm lượng sợi bazan khác nhau

Từ biểu đồ đường cong lực - chuyển vị của các loại hỗn hợp BTN có thể thấy đường cong lực - chuyển vị ở giai đoạn sau khi phá hoại của hỗn hợp BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan có độ dốc lớn trong khi với hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan thì đường cong thoải hơn, điều này được thể hiện rõ qua giá trị độ dốc $|m_{75}|$ và góc dốc ở Bảng 3.9 và Bảng 3.10. Độ dốc $|m_{75}|$ của BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% đạt giá trị nhỏ nhất (1,6 kN/mm), tiếp theo là BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng từ

0,3% (1,82 kN/mm); 0,5% (1,98 kN/mm); 0,2% (2,13 kN/mm); 0,1% (2,17 kN/mm). BTN không sử dụng sợi bazan có độ dốc $|m_{75}|$ đạt giá trị lớn nhất (2,49 kN/mm). Giá trị độ dốc $|m_{75}|$ cũng tương ứng với góc dốc đường cong lực - chuyển vị ở giai đoạn sau khi phá hoại của 6 loại BTN. Góc dốc của BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% đạt giá trị nhỏ nhất ($57,97^\circ$), góc dốc của BTN không sử dụng sợi bazan đạt giá trị lớn nhất ($68,01^\circ$).

Có thể nhận thấy rằng, khi góc dốc và độ dốc $|m_{75}|$ có giá trị lớn thì tương ứng chỉ số kháng nứt CT_{Index} sẽ có giá trị thấp và ngược lại, khi góc dốc và độ dốc $|m_{75}|$ có giá trị nhỏ thì chỉ số kháng nứt CT_{Index} sẽ đạt giá trị cao.



Hình 3.14. Kết quả thí nghiệm chỉ số kháng nứt CT_{Index} của các loại bê tông nhựa với hàm lượng sợi khác nhau

Kết quả chỉ số kháng nứt CT_{Index} thể hiện ở Hình 3.14 cho thấy cả 6 loại BTN trong nghiên cứu đều lớn hơn giá trị tối thiểu ($CT_{Index} \geq 80$) của Bang Oklahoma đưa ra. So với BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan, BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng từ 0,1% lên 0,4% có chỉ số CT_{Index} tăng cao hơn đáng kể, mức tăng tương ứng lần lượt với mức tăng hàm lượng sợi 0,1%, 0,2%, 0,3% và 0,4% là 8,29%; 21,13%; 64,78%; 90,97%. Chỉ số CT_{Index} đạt giá trị lớn nhất (309,20) là hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4%. Tuy nhiên, khi hàm lượng sợi bazan sử dụng cho BTN lên đến 0,5% thì chỉ số CT_{Index} bắt đầu giảm chỉ còn 218,91. Điều này cho thấy tỷ lệ nhựa đường

trong hỗn hợp BTN và tác dụng của sợi bazan đã ảnh hưởng lớn đến chỉ số kháng nứt CT_{Index} . Sử dụng sợi bazan giúp cải thiện đáng kể khả năng kháng nứt của BTN, BTN có chỉ số kháng nứt CT_{Index} đạt giá trị lớn nhất khi sử dụng hàm lượng sợi 0,4%.

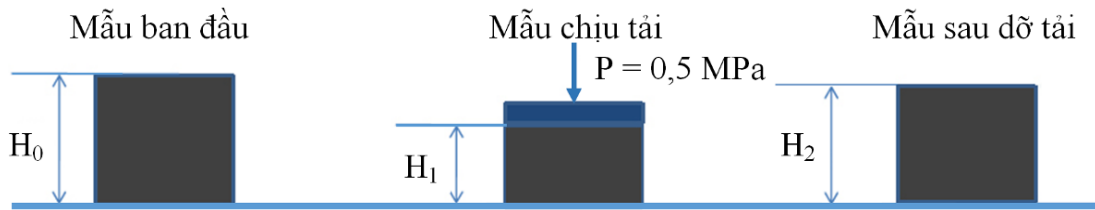
Khả năng kháng nứt tốt của BTN sử dụng sợi bazan so với BTN thông thường có thể được lý giải nhờ sự liên kết giữa sợi bazan với nhựa đường (từ hình ảnh chụp SEM ở Hình 2.6, Chương 2). Sợi bazan bám vào nhựa đường, giúp làm cứng các sợi, hiệu ứng này giúp hỗn hợp hấp thụ một phần ứng suất, tăng đáng kể khả năng chống lại các vết nứt của vật liệu, đồng thời làm chậm quá trình giãn nở vết nứt, kéo dài thời gian nứt của hỗn hợp và tiêu tốn nhiều năng lượng hơn trong quá trình nứt để đạt được mục đích tăng cường khả năng chống nứt. Các kết quả nghiên cứu tương đồng về khả năng kháng nứt tốt của BTN sử dụng sợi bazan so với BTN thông thường (không sử dụng sợi bazan) cũng đã được Lou [77] công bố năm 2021, Li [72] và Bo [31] công bố năm 2023.

3.5. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh

3.5.1. Phương pháp thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Mô đun đàn hồi tĩnh (E tĩnh) được thí nghiệm theo mô hình thí nghiệm nén từ biến tĩnh và tham khảo theo phụ lục C của tiêu chuẩn TCCS 38:2022 [9]. Mẫu BTN được chế bị dạng hình trụ có đường kính và chiều cao bằng 100mm, chịu tác dụng của tải trọng dài hạn đáp ứng ứng suất nén trong mẫu BTN đạt mức 0,5 MPa.

Thí nghiệm sử dụng thiết bị đầm xoay (Gyratory Testing machines) do hãng Daiwa Kenko, Nhật Bản sản xuất. Quá trình nén mẫu sử dụng thiết bị UTM do hãng Cooper, Vương quốc Anh sản xuất. Thiết bị có buồng bảo ôn để đảm bảo duy trì nhiệt độ trong suốt quá trình thí nghiệm. Trước khi thí nghiệm, mẫu được đặt trong buồng bảo ôn có nhiệt độ bằng nhiệt độ thí nghiệm tối thiểu 2 giờ. Sau đó tiến hành nén mẫu theo từng mức nhiệt độ. Gia tải cho mẫu và theo dõi biến dạng phát triển theo thời gian đến khi ổn định (tốc độ tăng biến dạng không vượt quá 0,01 mm/phút) ghi nhận biến dạng của mẫu H_1 . Dỡ tải, mẫu phục hồi biến dạng, quá trình phục hồi xảy ra theo thời gian cho đến khi ổn định (tốc độ tăng biến dạng không quá 0,01 mm/phút), ghi nhận biến dạng mẫu sau dỡ tải H_2 (Hình 3.15).



Hình 3.15. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh

Biến dạng đàn hồi tương đối được tính theo công thức sau:

$$\varepsilon_{dh} = \frac{H_2 - H_1}{H_0} \quad (3.5)$$

trong đó:

H_0 - chiều cao ban đầu của mẫu thí nghiệm.

H_1 - chiều cao của mẫu thí nghiệm khi chịu tải.

H_2 - chiều cao của mẫu thí nghiệm khi dỡ tải.

Mô đun đàn hồi của BTN theo 22 TCN 211-06 được tính theo công thức:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

trong đó: σ - ứng suất nén thử nghiệm, $\sigma=0,5$ MPa.

3.5.2. Kế hoạch thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Số lượng mẫu thí nghiệm trong phòng để xác định mô đun đàn hồi tĩnh thể hiện ở Bảng 3.11.

Bảng 3.11. Số lượng thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Loại BTN	Hàm lượng nhựa (%)	Hàm lượng sợi bazan (%)	Số mẫu thí nghiệm ở nhiệt độ			Tổng số mẫu
			15°C	30°C	60°C	
BTN_Bazan 0,0	4,6	0	3	3	3	9
BTN_Bazan 0,1	4,7	0,1	3	3	3	9
BTN_Bazan 0,2	4,9	0,2	3	3	3	9
BTN_Bazan 0,3	5,1	0,3	3	3	3	9
BTN_Bazan 0,4	5,3	0,4	3	3	3	9
BTN_Bazan 0,5	5,4	0,5	3	3	3	9
Tổng số thí nghiệm cần thực hiện			18	18	18	54

Hình 3.16 trình bày mẫu và quá trình thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh ở nhiệt độ 15°C, 30°C và 60°C.



(a) Đúc mẫu thí nghiệm



(b) Mẫu sau khi đúc



(c) Nén mẫu ở nhiệt độ 15°C, 30°C và 60°C

Hình 3.16. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh**3.5.3. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh**

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh ở 3 mức nhiệt độ 15°C, 30°C và 60°C của 6 loại BTN được kiểm tra độ chụm đảm bảo theo tiêu chuẩn đánh giá, được thể hiện ở Bảng 3.12 và Phụ lục 5.

Bảng 3.12. Mô đun đàn hồi tĩnh của các hỗn hợp BTN ở 15°C, 30°C và 60°C

Hỗn hợp	Mô đun đàn hồi tĩnh, MPa		
	15°C	30°C	60°C
BTN_Bazan 0,0	770,59	340,06	234,25
BTN_Bazan 0,1	810,81	369,78	248,82
BTN_Bazan 0,2	947,48	414,20	256,18
BTN_Bazan 0,3	1075,51	524,20	284,83
BTN_Bazan 0,4	1210,20	428,80	266,43
BTN_Bazan 0,5	924,56	397,95	251,03

Từ các số liệu kết quả thí nghiệm E tĩnh, sử dụng phần mềm Minitab 19 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 thí nghiệm gồm 2 biến:

- Hàm lượng sợi bazan: có 6 tỷ lệ là: 0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4%; 0,5%.
- Nhiệt độ thí nghiệm: có 3 mức: 15°C, 30°C, 60°C.
- Các hàm phân tích: Mô đun đàn hồi tĩnh - E tĩnh (MPa).

Số kết quả thí nghiệm: 6 Hàm lượng sợi bazan \times 3 Nhiệt độ thí nghiệm \times 3 mẫu = 54 kết quả.

Phân tích phương sai ANOVA

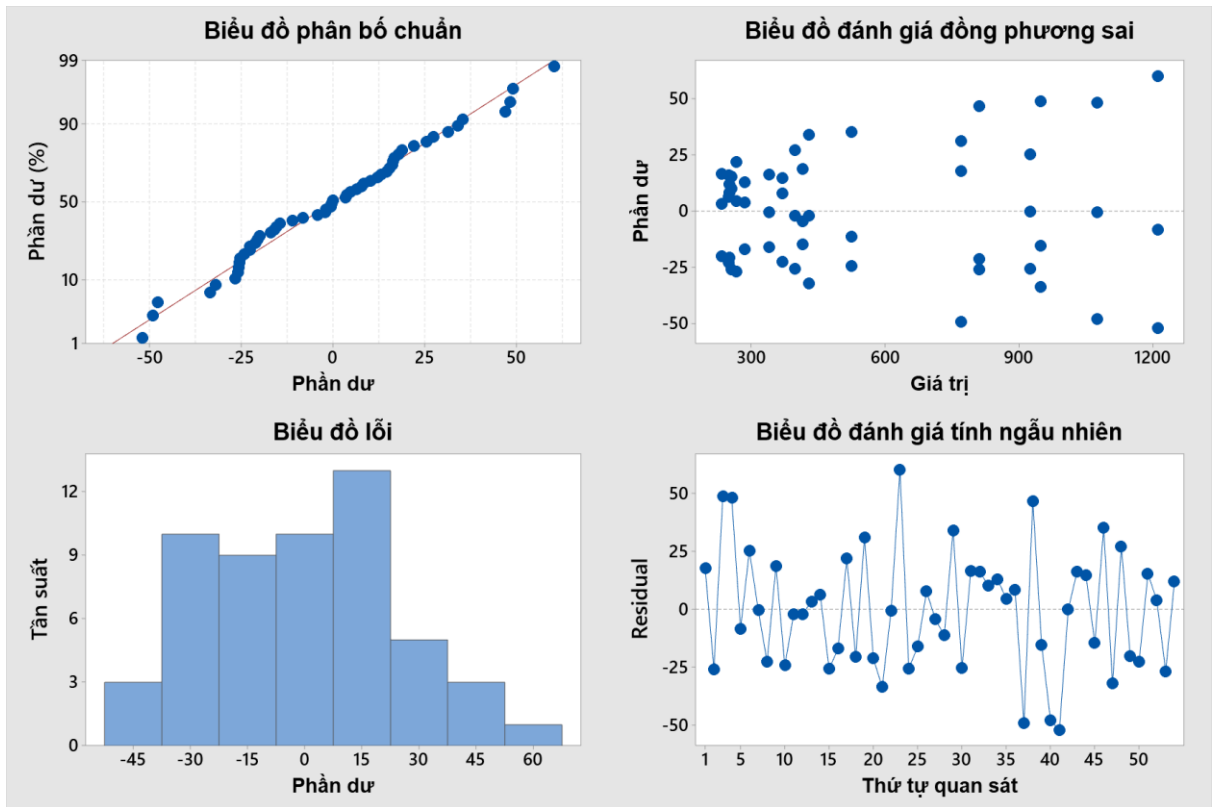
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	5328423	313437	249.39	0.000
Linear	7	5123033	731862	582.33	0.000
Nhiệt độ (°C)	2	4857629	2428815	1932.55	0.000
Hàm lượng sợi (%)	5	265404	53081	42.24	0.000
2-Way Interactions	10	205390	20539	16.34	0.000
Nhiệt độ (°C)*Hàm lượng sợi (%)	10	205390	20539	16.34	0.000
Total	53	5373668			

Kết quả

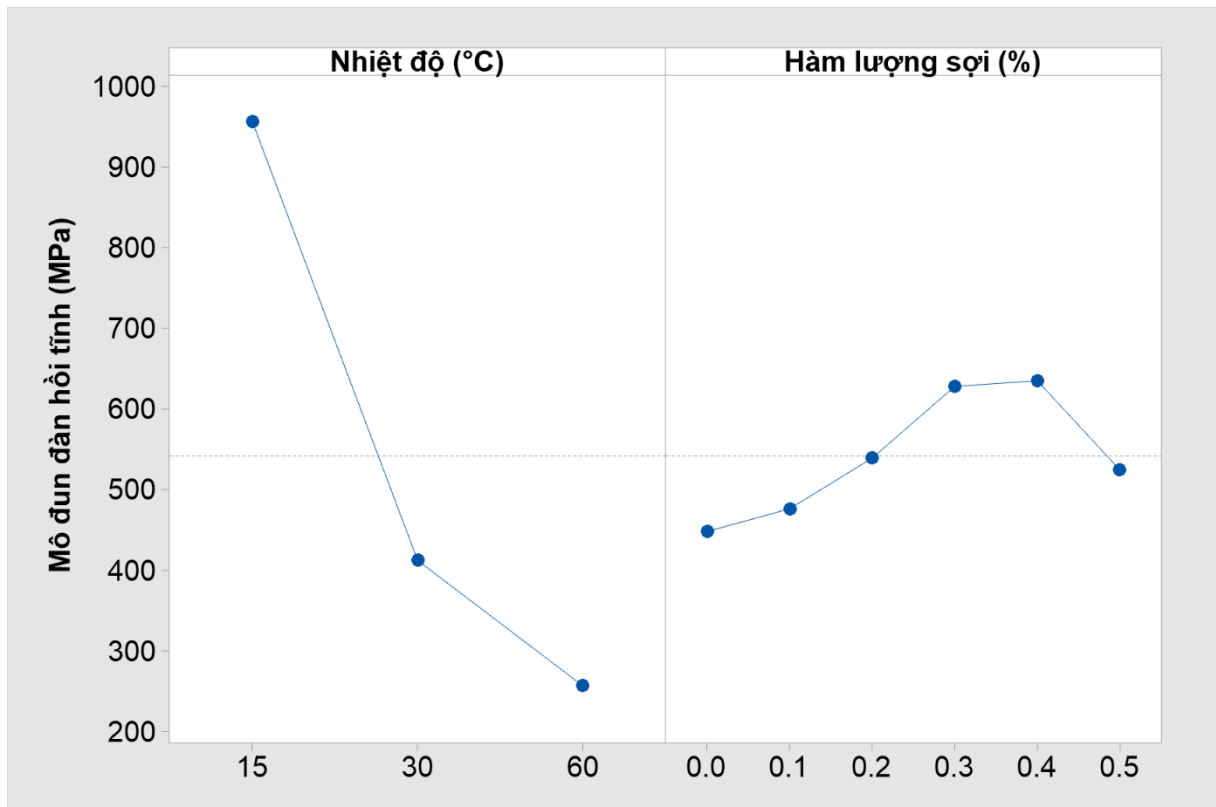
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
35.4512	99.16%	98.76%	98.11%

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy: Các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$; Hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc}=98,76\%$. Như vậy kết quả thực nghiệm các yếu tố đầu vào và tích tương tác của chúng đều ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi tĩnh có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao.

Hình 3.17 là biểu đồ phân dư cho thấy phân 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.



Hình 3.17. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê cho mô đun đàn hồi tĩnh



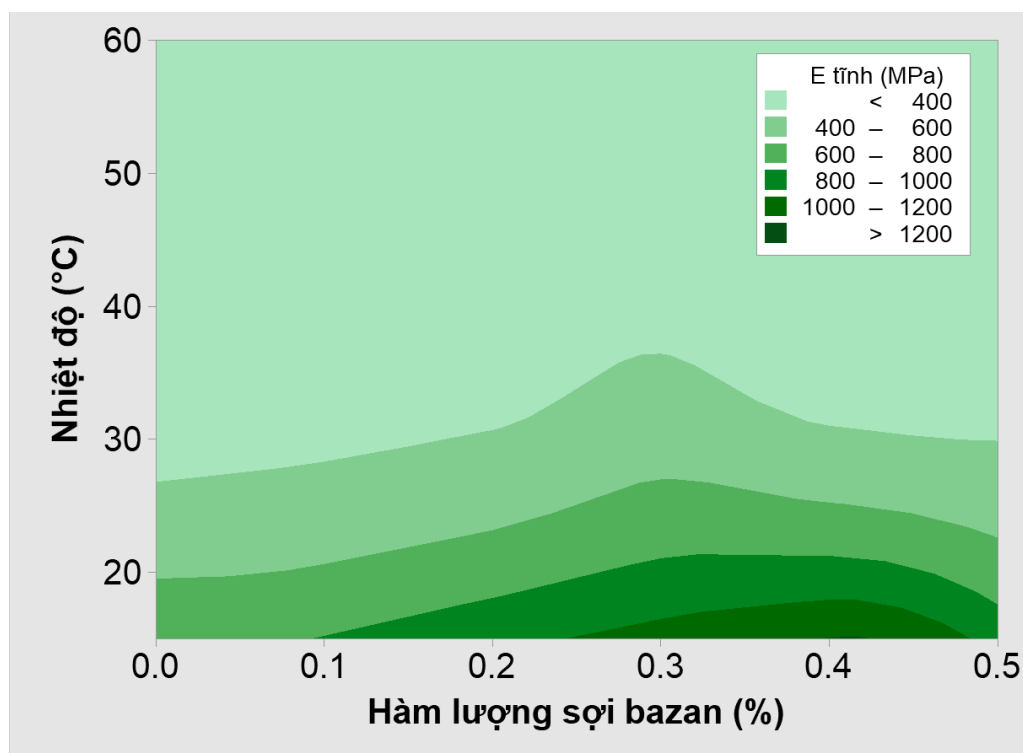
Hình 3.18. Ảnh hưởng các yếu tố nhiệt độ và hàm lượng sợi bazan đến mô đun đàn hồi tĩnh

Hình 3.18 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi tĩnh. Nhận thấy cả 2 yếu tố nhiệt độ và hàm lượng sợi bazan đều ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi tĩnh của BTN.

- **Ảnh hưởng của nhiệt độ:** Khi nhiệt độ tăng dần thì E tĩnh giảm dần. Ở 15°C, E tĩnh cao nhất, ở 60°C, E tĩnh nhỏ nhất. Đặc biệt, khi nhiệt độ tăng từ 15°C lên 30°C thì E tĩnh giảm mạnh (thể hiện bằng độ dốc đứng của đoạn thẳng). Khi nhiệt độ tăng từ 30°C lên 60°C, E tĩnh có giảm nhưng không quá nhiều.

- **Ảnh hưởng của hàm lượng sợi bazan:** Khi chưa sử dụng sợi bazan thì E tĩnh đạt giá trị nhỏ nhất, khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng tăng dần từ 0,1% đến 0,4% thì E tĩnh đạt giá trị lớn nhất, tiếp tục tăng hàm lượng sợi bazan từ 0,4% lên đến 0,5% thì E tĩnh giảm dần.

Biểu đồ đường đồng mức (Hình 3.19) cho thấy rõ hơn ảnh hưởng của hai yếu tố nhiệt độ và hàm lượng sợi bazan đến mô đun đàn hồi tĩnh của BTN. Có thể nhận thấy khi nhiệt độ càng thấp thì E tĩnh đạt giá trị càng lớn và ngược lại. Hàm lượng sợi bazan nằm trong khoảng 0,3% đến 0,5% thì E tĩnh đạt giá trị cao hơn hẳn giá trị E tĩnh khi không sử dụng sợi bazan hoặc sử dụng sợi bazan với hàm lượng nhỏ (0,1% và 0,2%).

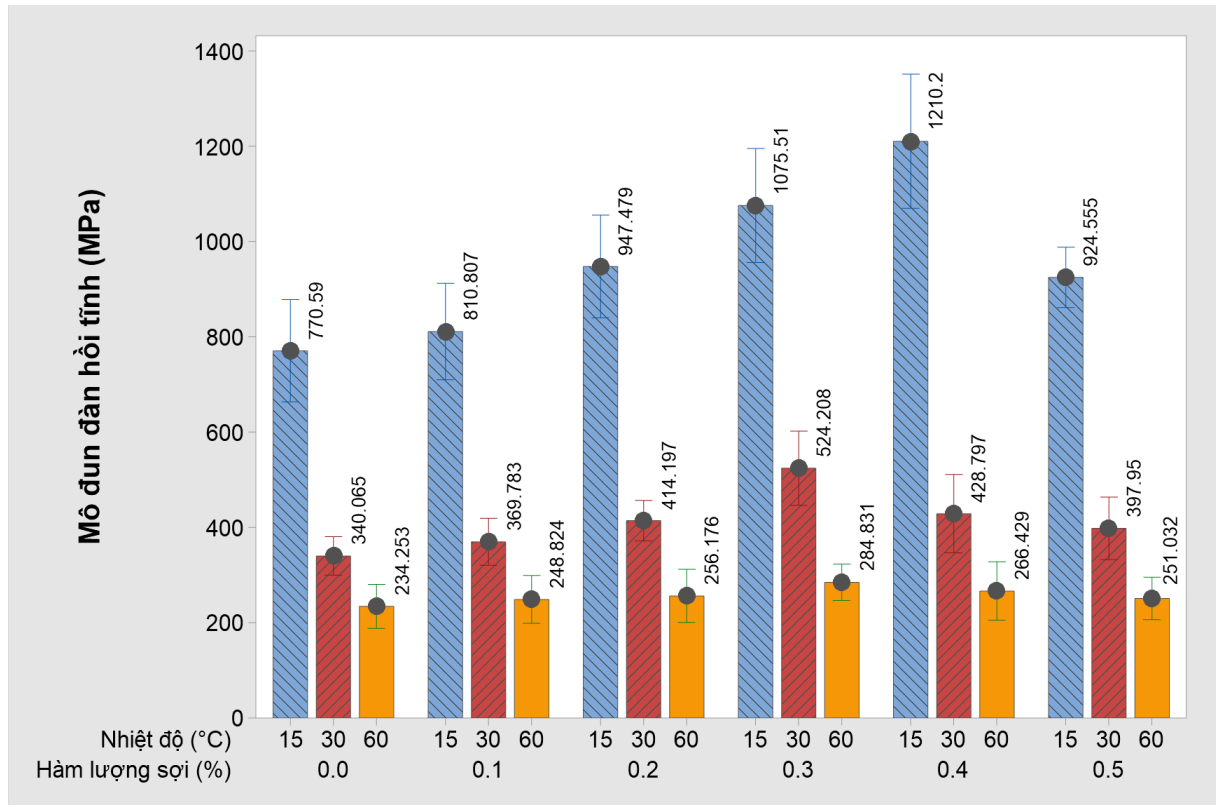


Hình 3.19. Biểu đồ đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của hàm lượng sợi và nhiệt độ đến mô đun đàn hồi tĩnh của BTN

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh ở 15°C, 30°C và 60°C của 6 loại hỗn hợp được thể hiện ở Hình 3.20. Biểu đồ Hình 3.20 cho thấy, ở cả 3 mức nhiệt độ thí

nghiệm 15°C, 30°C và 60°C, mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sử dụng sợi bazan (ở tất cả 5 hàm lượng sợi) đều cao hơn mô đun đàn hồi tĩnh của BTN đối chứng (không sử dụng sợi bazan).

Ở nhiệt độ 15°C, khi hàm lượng sợi bazan tăng từ 0,1% lên 0,4%, giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của BTN tăng lên, mức tăng lần lượt là 4%, 23%, 40% và 57%. Tuy nhiên, khi hàm lượng sợi bazan sử dụng lên đến 0,5%, thì giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của BTN bắt đầu giảm chỉ còn 924,55 MPa.



Hình 3.20. Mô đun đàn hồi tĩnh của 6 loại BTN

Xu hướng gần tương tự diễn ra ở 2 mức nhiệt độ 30°C và 60°C. Khi hàm lượng sợi bazan tăng từ 0,1% lên 0,3%, giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của BTN tăng dần, mức tăng tương ứng lần lượt là 9%, 22% và 54% (ở nhiệt độ 30°C) và 6%, 9% và 22% (ở nhiệt độ 60°C). Tuy vậy, khi tiếp tục tăng hàm lượng sử dụng sợi bazan trong BTN lên đến 0,4% và 0,5%, thì giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của BTN bắt đầu giảm dần.

Có thể giải thích xu hướng này như sau: sợi bazan làm tăng độ nhớt của vữa nhựa, do đó cường độ liên kết giữa nhựa đường và cốt liệu được tăng lên. Không những vậy, độ bền liên kết cũng được cải thiện nhờ hiệu ứng cầu nối giữa các sợi bazan trong hỗn hợp. Sợi bazan phân bố ngẫu nhiên trong không gian ba chiều của hỗn hợp BTN, giúp phân tán ứng suất và tránh ứng suất quá mức, vì vậy tăng giá trị mô đun đàn hồi

tính của BTN. Tuy nhiên, khi sử dụng hàm lượng sợi bazan quá cao, dẫn đến sự phân tán sợi không đồng đều và độ xốp quá mức của hỗn hợp, điều này sẽ làm giảm trị mô đun đàn hồi tĩnh của BTN.

Ở nhiệt độ 15°C, mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% đạt giá trị lớn nhất (1.210,20 MPa), cao hơn so với BTN đối chứng là 57%. Tiếp theo là BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3%, 0,2%, 0,5% và 0,1%.

Ở nhiệt độ 30°C và 60°C, mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3% đạt giá trị lớn nhất (524,21 MPa và 284,83 MPa), cao hơn so với BTN đối chứng tương ứng là 54% và 22%.

Sợi bazan có thể hấp thụ một số thành phần nhẹ của nhựa đường để cải thiện độ nhớt của nó, đồng thời sợi bazan phân bố ngẫu nhiên trong không gian ba chiều của hỗn hợp BTN, giúp phân tán ứng suất và tránh ứng suất quá mức. Vì vậy, mô đun đàn hồi tĩnh của BTN có thể được tăng cường khi bổ sung sợi bazan. Tuy nhiên, cần lưu ý sử dụng sợi bazan với hàm lượng hợp lý để có thể phát huy hiệu quả tốt nhất. Bởi vì khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng cao, có thể dẫn đến hiện tượng sợi bị vón cục hoặc sự phân bố không đồng đều trong BTN.

3.6. Thí nghiệm đánh giá mô đun đàn hồi động

Mô đun động $|E^*|$ có thể coi là một thông số sử dụng cho việc dự báo đồng thời cả đặc tính lún và nứt mỏi của hỗn hợp BTN. Ngoài ra, $|E^*|$ còn là một thông số quan trọng được sử dụng trong phương pháp thiết kế mặt đường theo cơ học - thực nghiệm [111].

3.6.1. Phương pháp thí nghiệm mô đun đàn hồi động

Thí nghiệm mô đun đàn hồi động được thực hiện trong phòng thí nghiệm theo hướng dẫn của tiêu chuẩn AASHTO TP 62 [17]. Mẫu được đặt trên thiết bị đầm xoay (Gyratory Testing machines) do hãng Daiwa Kenko, Nhật Bản sản xuất tại Phòng thí nghiệm LAS XD72 của Trường Đại học Công nghệ GTVT. Quá trình nén mẫu thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi động $|E^*|$ được thực hiện ở phòng thí nghiệm Trường Đại học GTVT. Tham khảo nghiên cứu của Randy West [100], Bonaquist [30], đảm bảo mẫu được đầm sao cho đạt được độ rỗng dư $V_a = 7 \pm 0,5 \%$.

Tất cả các mẫu được đặt trong buồng ổn định nhiệt để có thể duy trì nhiệt độ ổn định. Thử nghiệm được tiến hành trên thiết bị CRT NU-14 (của hãng Cooper - Anh sản xuất), xem Hình 3.21c. Vùng nhiệt độ thí nghiệm nằm trong khoảng từ 10°C-

60°C. Thí nghiệm $|E^*|$ cho các mẫu BTN sử dụng hàm lượng sợi bazan là 0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4%; 0,5% được tiến hành ở 6 mức tần số từ 0,1 Hz đến 10 Hz (0,1 Hz; 0,5 Hz; 1 Hz; 5 Hz; 10 Hz và 25 Hz) và 6 mức nhiệt độ từ 10°C-60°C (10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C).



(a) Đúc mẫu thí nghiệm

(b) Mẫu sau khi đúc

(c) Nén mẫu

Hình 3.21. Quá trình thí nghiệm mô đun đàn hồi động

3.6.2. Kế hoạch thí nghiệm mô đun đàn hồi động

Kế hoạch thí nghiệm mô đun đàn hồi động được trình bày trong Bảng 3.13.

Bảng 3.13. Số lượng thí nghiệm mô đun đàn hồi động

Loại BTN	Hàm lượng nhựa (%)	Hàm lượng sợi bazan (%)	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Tần số thí nghiệm (°C)	Số kết quả thí nghiệm
BTN_Bazan 0,0	4,6	0	10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C	0,1Hz, 0,5Hz, 1Hz, 5Hz, 10Hz và 25Hz	108
BTN_Bazan 0,1	4,7	0,1			108
BTN_Bazan 0,2	4,9	0,2			108
BTN_Bazan 0,3	5,1	0,3			108
BTN_Bazan 0,4	5,3	0,4			108
BTN_Bazan 0,5	5,4	0,5			108
Tổng số					648

3.6.3. Kết quả thí nghiệm mô đun động

Các kết quả thí nghiệm $|E^*|$ cho các mẫu ở dải tần số từ 0,1-10 Hz và vùng nhiệt độ từ 10°C-60°C được trình bày trong phần này, kèm theo trong Phụ lục 6.

Từ các số liệu kết quả thí nghiệm $|E^*|$, sử dụng phần mềm Minitab 19 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 thí nghiệm: 3 biến

- Hàm lượng sợi bazan: có 6 mức 0%; 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4%; 0,5%.
- Nhiệt độ thí nghiệm: có 6 mức 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C;
- Tần số thí nghiệm: có 6 mức: 0,1Hz, 0,5Hz, 1Hz, 5Hz, 10Hz và 25Hz.

Tổng số kết quả thí nghiệm là: $3 \times 6 \times 6 \times 6 = 648$ kết quả.

Phân tích phương sai ANOVA

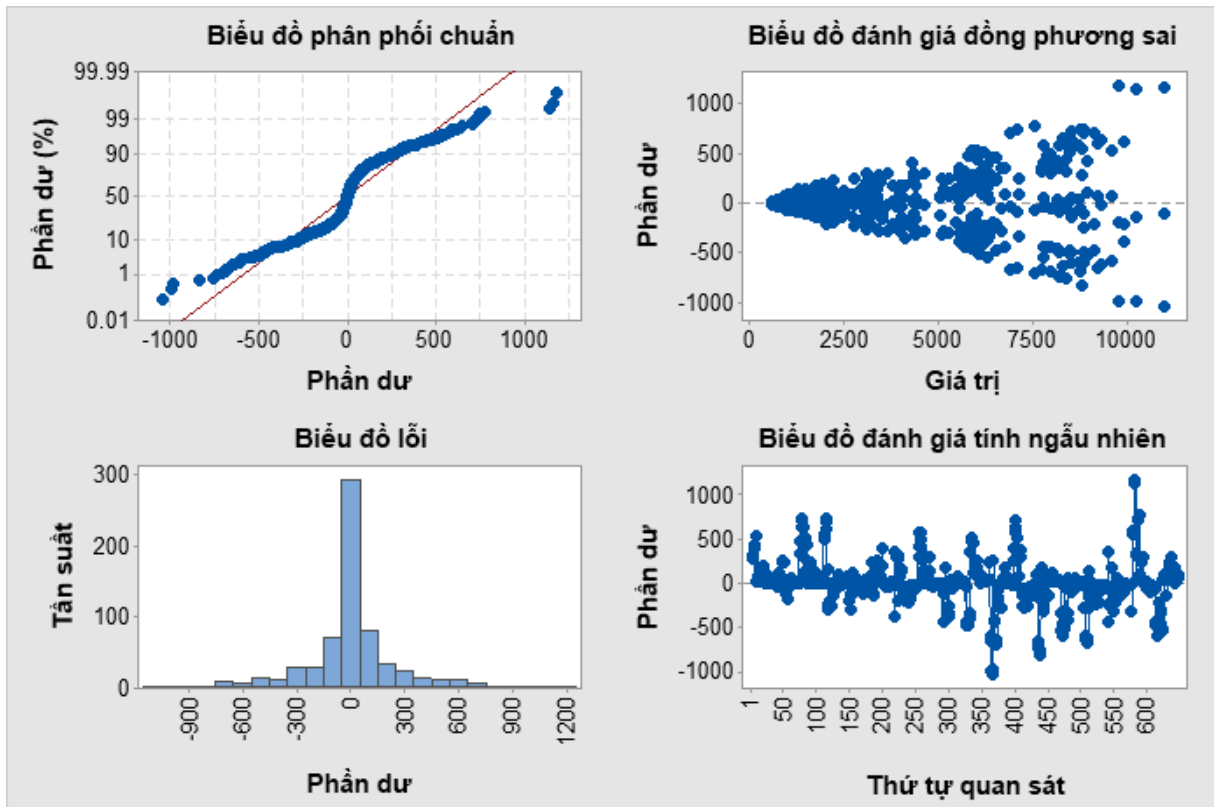
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	215	5182315946	24103795	252.78	0.000
Linear	15	5092945098	339529673	3560.65	0.000
Hàm lượng sợi (%)	5	21618270	4323654	45.34	0.000
Nhiệt độ (°C)	5	4814300069	962860014	10097.51	0.000
Tần số (Hz)	5	257026759	51405352	539.09	0.000
2-Way Interactions	75	86099067	1147988	12.04	0.000
Hàm lượng sợi (%)*Nhiệt độ (°C)	25	15637031	625481	6.56	0.000
Nhiệt độ (°C)*Tần số (Hz)	25	67916543	2716662	28.49	0.000
Total	647	5223509815			

Kết quả

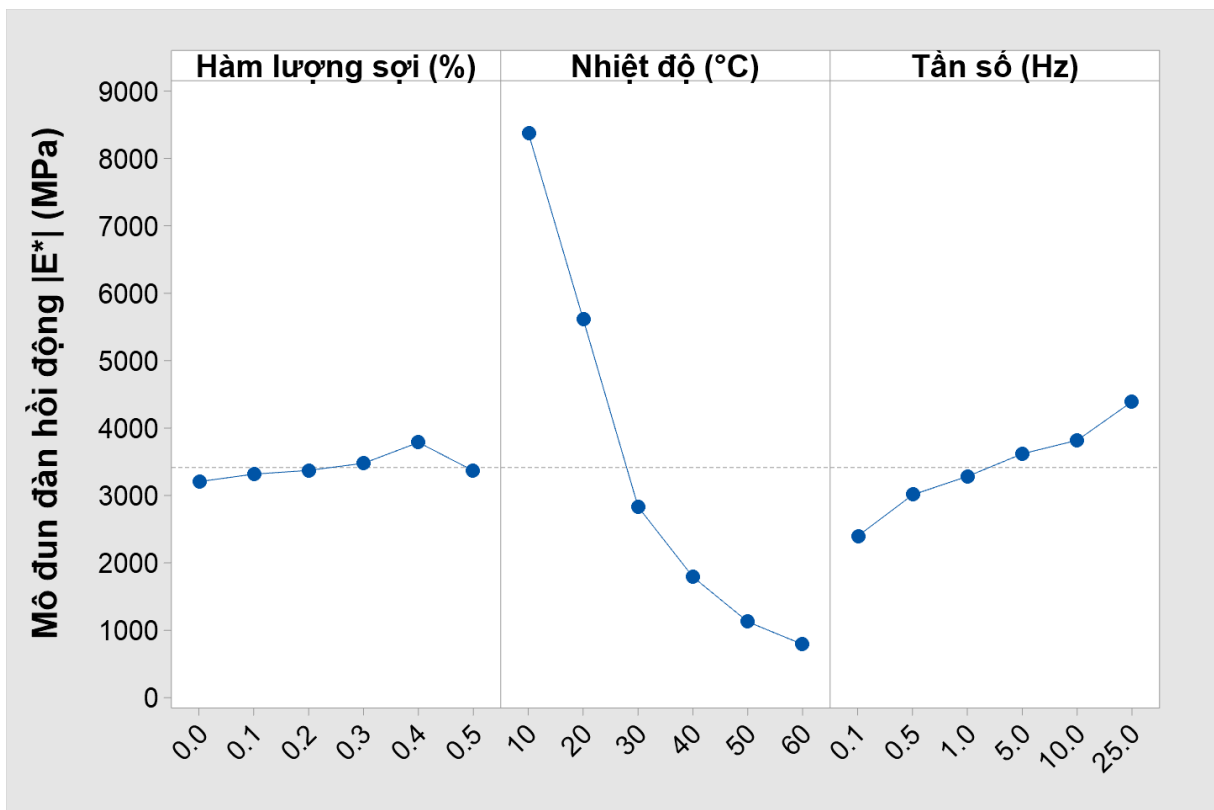
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
308.798	99.21%	98.82%	98.23%

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy: Các biến đều có hệ số p-value $\ll 0,05$; Hệ số xác định điều chỉnh $R^2_{đc}=98,82\%$. Như vậy kết quả thực nghiệm các yếu tố đầu vào và tích tương tác của chúng đều ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi tĩnh có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao.

Hình 3.22 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.



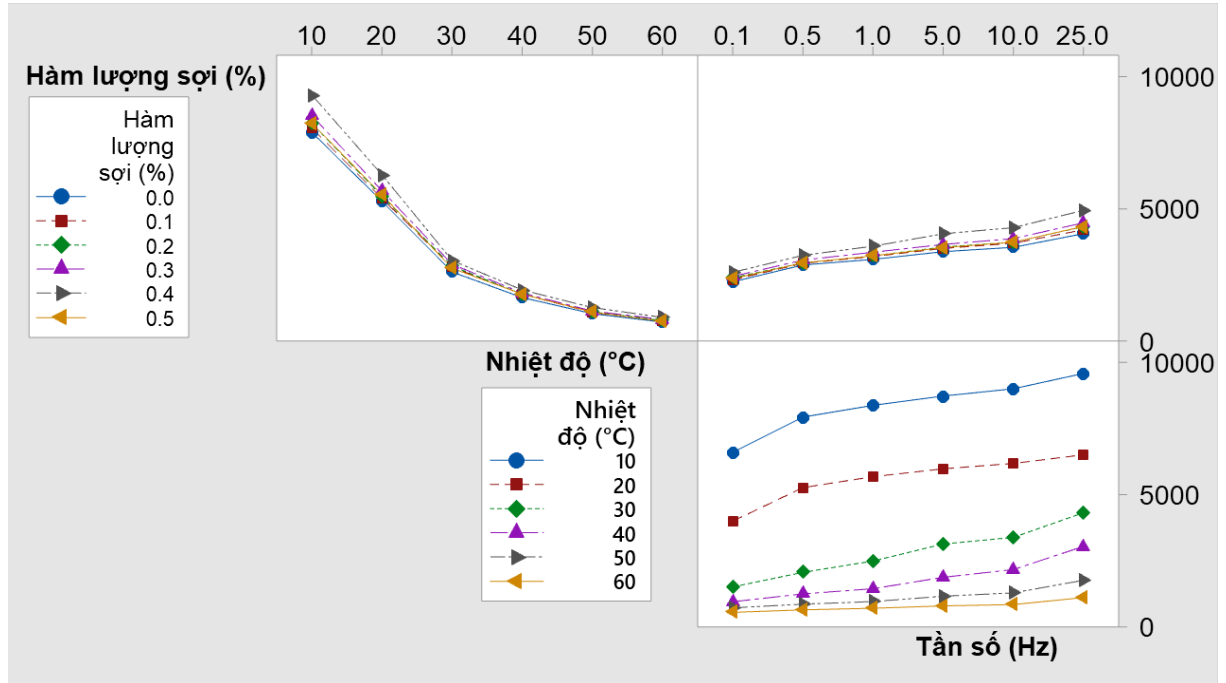
Hình 3.22. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê cho mô đun đàn hồi động $|E^*|$



Hình 3.23. Mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến $|E^*|$

So sánh mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến $|E^*|$ thể hiện ở Hình 3.23 cho thấy, nhiệt độ là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất với độ dốc đường quan hệ giữa yếu tố nhiệt độ với $|E^*|$ lớn nhất, tiếp theo lần lượt là yếu tố tần số thí nghiệm, và hàm lượng sợi. Ở cùng một tần số, khi nhiệt độ tăng thì $|E^*|$ giảm. Nếu cùng nhiệt độ thí nghiệm, khi tăng tần số thì $|E^*|$ tăng lên.

Sự ảnh hưởng lẫn nhau giữa các yếu tố đến mô đun đàn hồi động $|E^*|$ được thể hiện ở Hình 3.24.

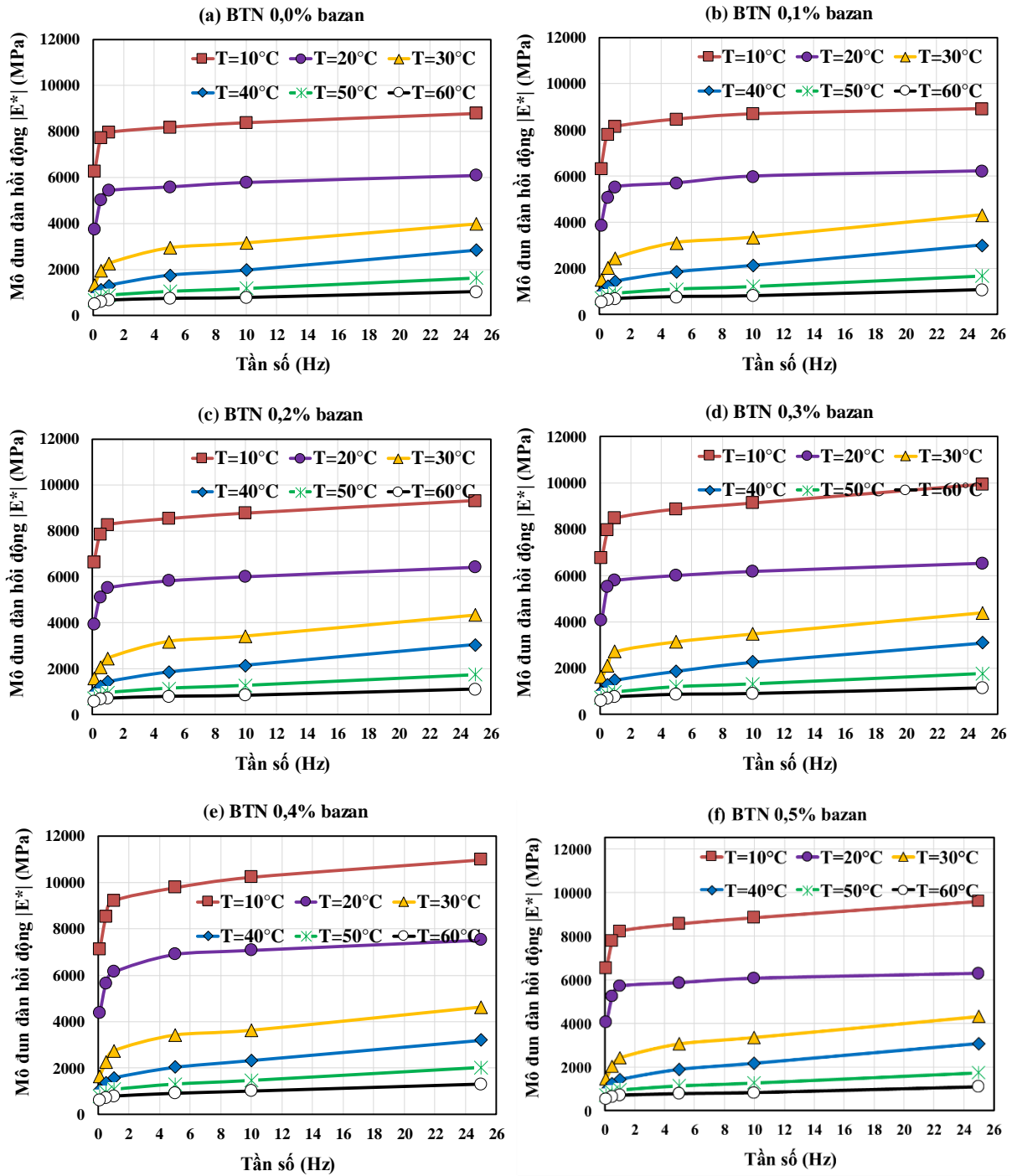


Hình 3.24. Biểu đồ ảnh hưởng giữa các yếu tố đến $|E^*|$

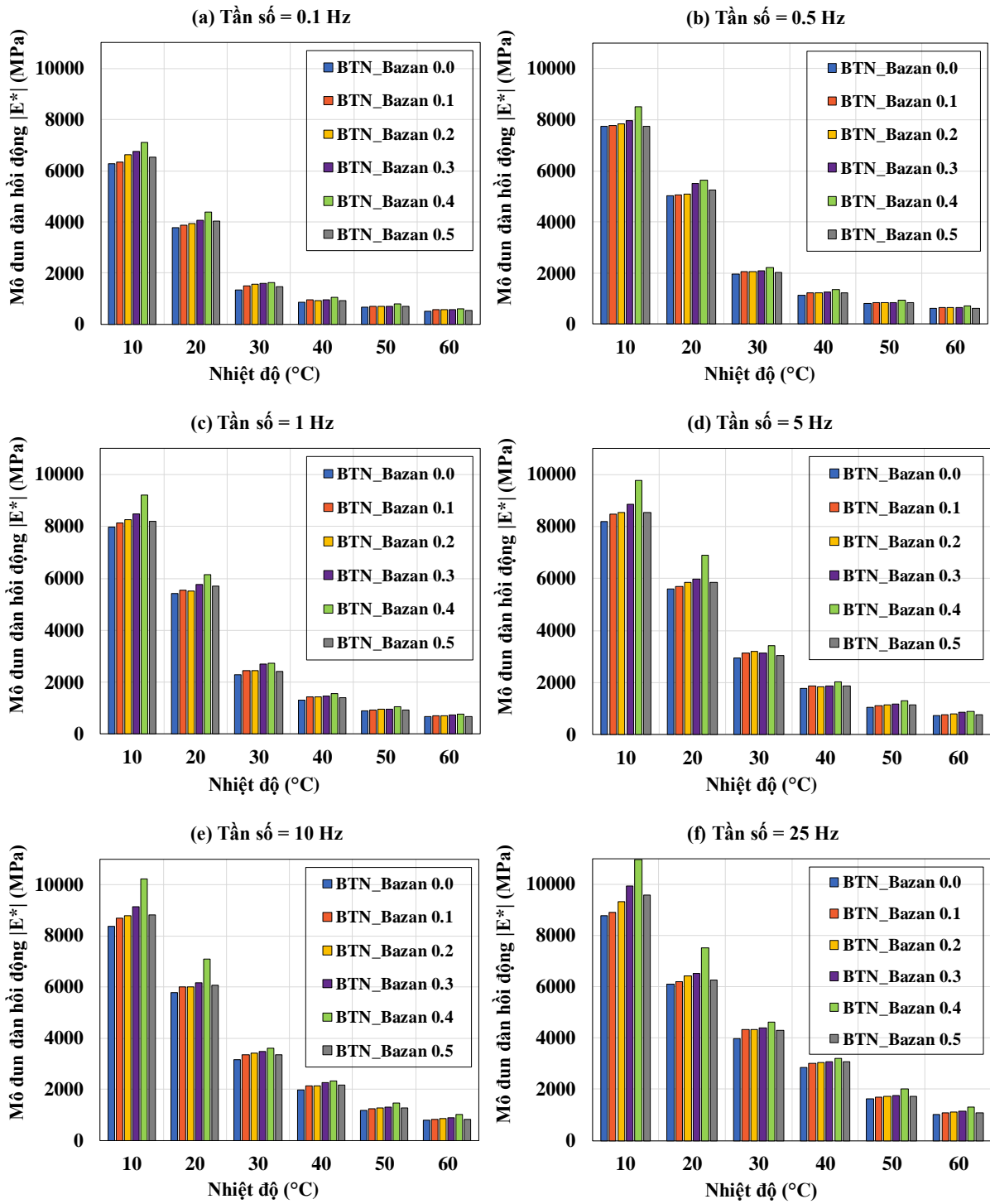
Mức độ ảnh hưởng của tần số và nhiệt độ đến $|E^*|$ được thể hiện rõ ràng hơn ở Hình 3.25, Hình 3.26. Ở nhiệt độ 10°C và tần số 25 Hz, $|E^*|$ có giá trị lớn nhất đối với tất cả 6 loại hỗn hợp BTN; Ở nhiệt độ 60°C và tần số 0,1 Hz, $|E^*|$ có giá trị nhỏ nhất đối với tất cả 6 loại hỗn hợp BTN.

Biểu đồ Hình 3.26 cho thấy BTN sử dụng sợi bazan có mô đun đàn hồi $|E^*|$ cao hơn BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan ở tất cả các nhiệt độ và tần số.

BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% có mô đun đàn hồi $|E^*|$ cao nhất ở tất cả các nhiệt độ và tần số, tiếp theo đó là BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng từ 0,3%; 0,5%, 0,2%, 0,1%. BTN không sử dụng sợi bazan có mô đun đàn hồi $|E^*|$ thấp nhất.

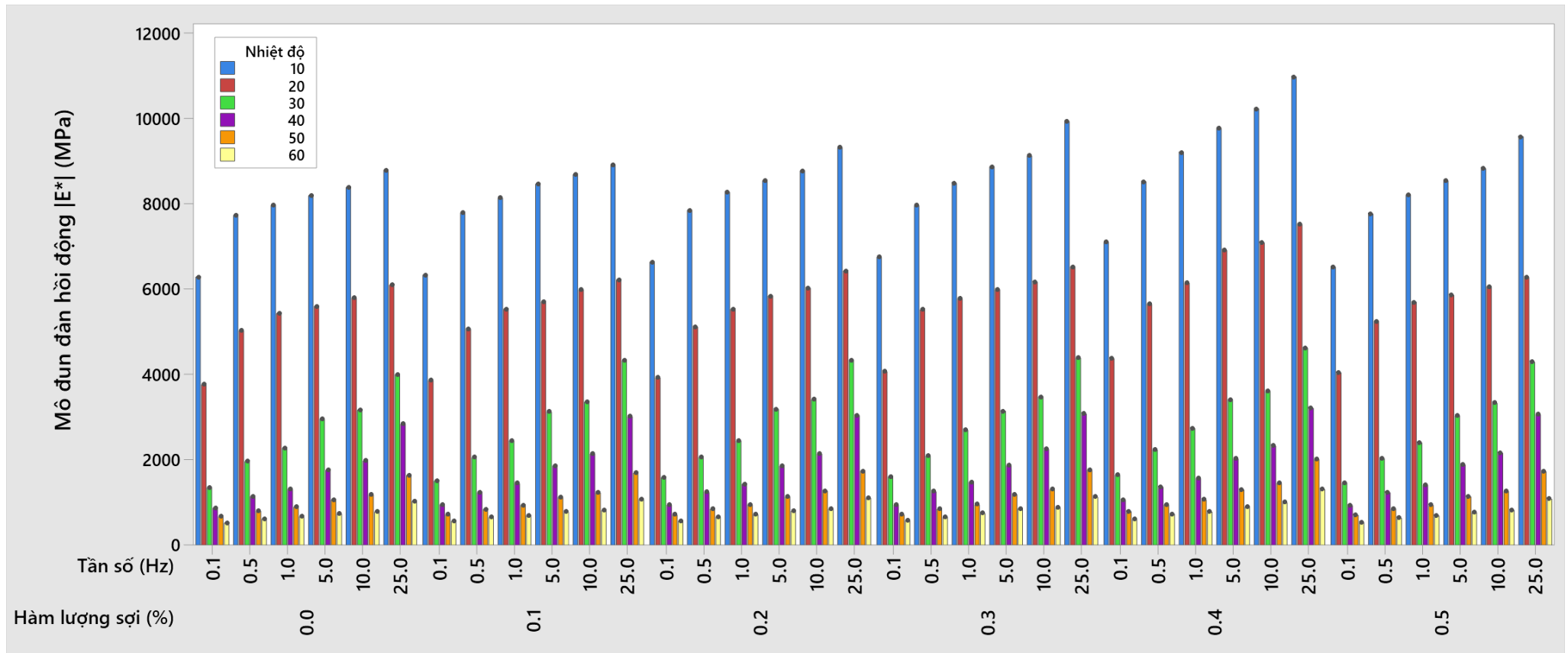


Hình 3.25. Ảnh hưởng của tần số đến $|E^*|$ của 6 loại BTN



Hình 3.26. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến $|E^*|$ của 6 loại BTN

Sự thay đổi mô đun đàn hồi động của các hỗn hợp ứng với tần số và nhiệt độ được thể hiện ở Hình 3.27. Kết quả thí nghiệm ở tất cả các hỗn hợp cho thấy, $|E^*|$ đều giảm xuống khi nhiệt độ thí nghiệm tăng từ 10°C lên 60°C .

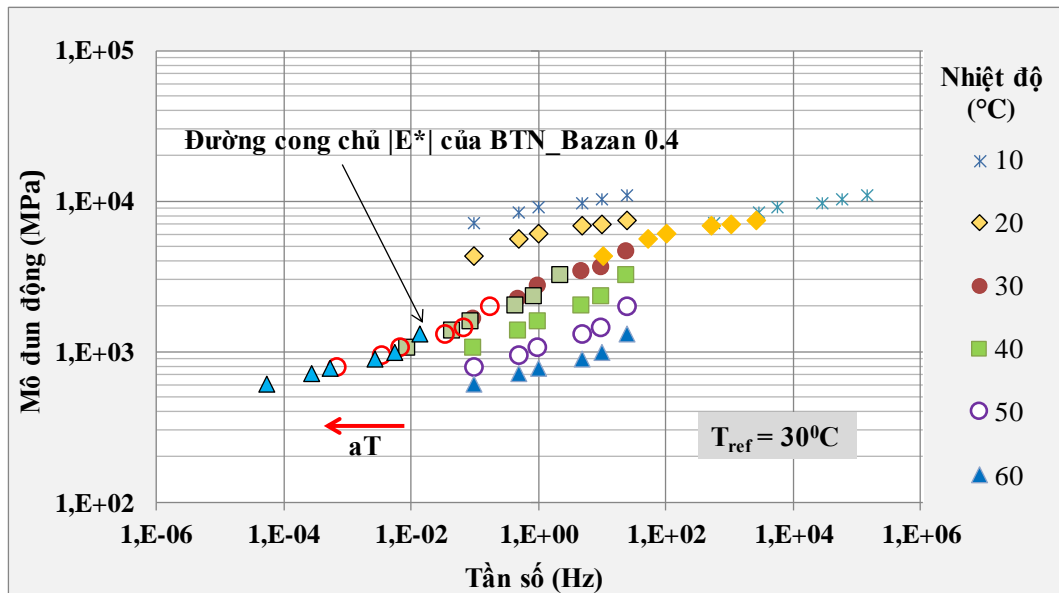


Hình 3.27. Mô đun đàn hồi động $|E^*|$ của các hỗn hợp BTN ứng với 6 tần số và 6 mức nhiệt độ

3.6.4. Xây dựng đường cong chủ mô đun động

Đường cong chủ $|E^*|$ là đường cong đặc trưng cho tính chất đàn nhớt của BTN trong một vùng rộng của tần số và nhiệt độ. Đường cong chủ được xây dựng từ quy tắc tương quan tần số - nhiệt độ. Để xây dựng đường cong chủ $|E^*|$, các kết quả thí nghiệm được tập hợp để có dữ liệu về $|E^*|$ trong một dải nhiệt độ và tần số. Chọn nhiệt độ tham chiếu là 30°C . Các đường cong đẳng nhiệt tương ứng với nhiệt độ lớn hơn 30°C sẽ được dịch chuyển sang trái, trong khi các đường cong tương ứng với nhiệt độ thấp hơn 30°C sẽ được dịch chuyển sang phải bằng các hệ số dịch chuyển a_T . Quá trình dịch chuyển này được lặp lại cho đến khi các đường cong hòa vào nhau tạo ra một đường cong trơn liên tục [11].

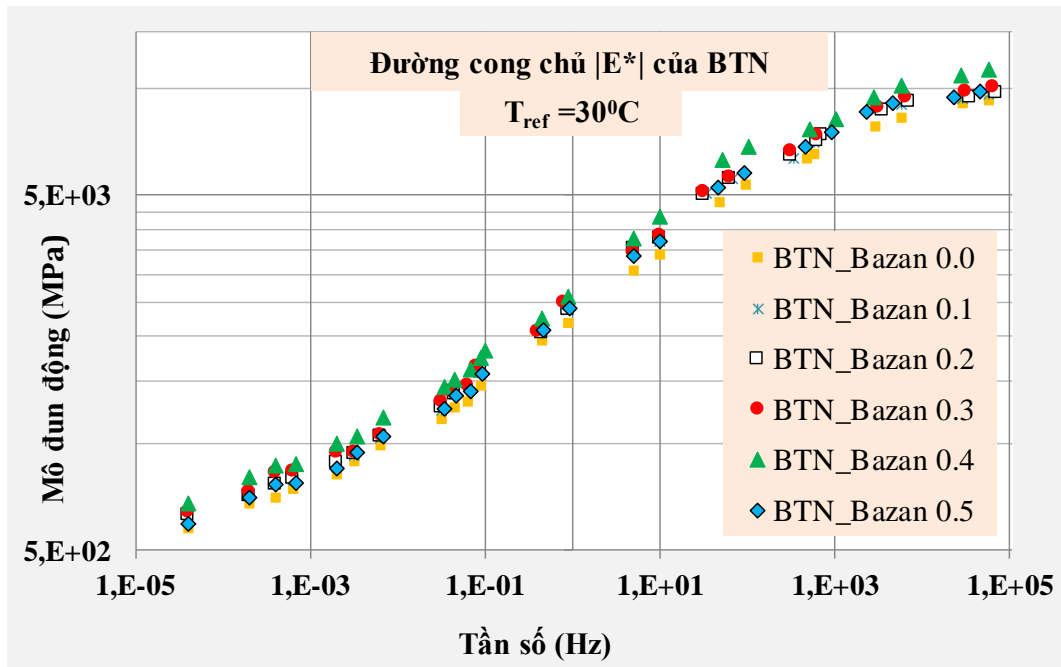
Từ kết quả thí nghiệm $|E^*|$ ở 6 nhiệt độ và 6 tần số của từng loại BTN, tiến hành xây dựng đường cong chủ $|E^*|$. Ví dụ về phương pháp xây dựng đường cong chủ của BTN_Bazan 0.4 ở nhiệt độ tham chiếu 30°C được minh họa trên Hình 3.28.



Hình 3.28. Đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_Bazan 0.4 ở nhiệt độ tham chiếu 30°C

Đường cong chủ của 6 loại BTN (BTN_Bazan 0.0; BTN_Bazan 0.1; BTN_Bazan 0.2; BTN_Bazan 0.3; BTN_Bazan 0.4 và BTN_Bazan 0.5) được thể hiện ở Hình 3.29.

Biểu đồ Hình 3.29 cho thấy ở nhiệt độ tham chiếu 30°C , đường cong chủ $|E^*|$ của 5 loại BTN sử dụng sợi bazan đều nằm phía trên so với bê tông nhựa đối chứng không sử dụng sợi bazan trong phạm vi nhiệt độ và tần số thử nghiệm.



Hình 3.29. Đường cong chủ $|E^*|$ của 6 loại BTN ở nhiệt độ tham chiếu 30°C

Quan hệ giữa hệ số dịch chuyển a_T và nhiệt độ thí nghiệm được mô hình hóa theo công thức (3.7) của Williams, Landel và Ferry (WLF) [11].

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{\text{ref}})}{C_2 + T - T_{\text{ref}}} \quad (3.7)$$

Trong đó:

- C_1, C_2 - Hệ số hồi quy của phương trình WLF. Các hệ số C_1, C_2 và hệ số dịch chuyển a_T được sử dụng để chuyển dữ liệu mô đun động ở các nhiệt độ thử nghiệm khác nhau sang nhiệt độ tham chiếu 30°C. Việc tối ưu hóa theo phương pháp bình phương nhỏ nhất bằng cách sử dụng hàm “Solver” trong Microsoft Excel có thể xác định các hệ số này;

- T_{ref} - Nhiệt độ tham chiếu;

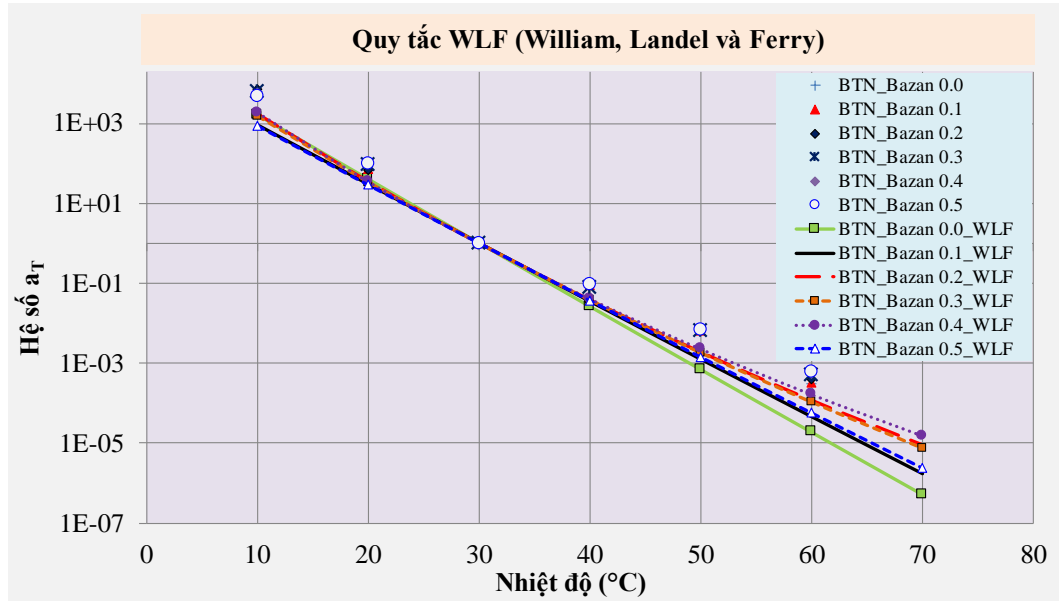
- T - Nhiệt độ thí nghiệm.

Kết quả xác định các hệ số C_1, C_2 theo quy tắc WLF của các loại BTN được trình bày trong Bảng 3.14 và Hình 3.30.

Bảng 3.14. Kết quả xác định các hệ số của quy tắc WLF

Loại BTN	C_1	C_2
BTN_Bazan 0.0	521,36	3280,57
BTN_Bazan 0.1	367,23	2506,58
BTN_Bazan 0.2	34,29	231,95

Loại BTN	C_1	C_2
BTN_Bazan 0.3	39,54	268,28
BTN_Bazan 0.4	27,15	185,67
BTN_Bazan 0.5	205,73	1425,48



Hình 3.30. Biểu đồ quan hệ giữa a_T thực và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ

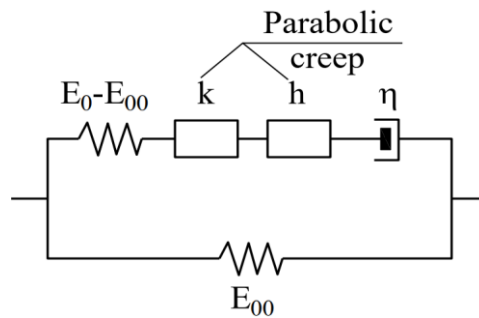
3.6.5. Mô hình hóa mô đun động

3.6.5.1. Lựa chọn và xây dựng mô hình

Việc mô phỏng các số liệu thực nghiệm $|E^*|$ của nhựa đường và BTN có thể được thực hiện với nhiều mô hình khác nhau như mô hình Huet, Huet-Sayegh, và 2S2P1D [11], mô hình Huet được đánh giá là phù hợp khi mô phỏng giá trị thực nghiệm $|E^*|$ của nhựa đường ở dải tần số và nhiệt độ khác nhau, nhưng lại không phù hợp cho BTN ở tần số thấp, nhiệt độ cao. Mô hình Huet-Sayegh mô tả 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 nhựa đường ở dải tần số thấp. Trong khi đó, mô hình 2S2P1D (được đề xuất bởi Olard, F., & Di Benedetto) có thể khắc phục được nhược điểm của 2 mô hình nêu trên. Mô hình này có thể mô phỏng đặc tính đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và BTN trong miền biến dạng nhỏ với dải nhiệt độ và tần số bất kỳ. Do vậy trong phạm vi luận án, nghiên cứu ứng dụng mô hình 2S2P1D để mô hình hóa các đường cong chủ $|E^*|$ của các loại bê tông nhựa.

Mô hình 2S2P1D là một mô hình tổng quát xây dựng dựa trên sự kết hợp các thành phần vật lý, bao gồm 2 lò xo (2 Springs), 2 thành phần hỗn hợp (2 Parabolic

elements), và 1 thành phần nhớt (1 Dashpot) [11]. Mô hình sử dụng 7 thông số đầu vào (E_{00} , E_0 , δ , β , τ , k và h) để mô hình hóa đặc tính đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và BTN. Sơ đồ miêu tả mô hình 2S2P1D được minh họa ở Hình 3.31.



Hình 3.31. Biểu đồ quan hệ giữa a_T thực và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ

Theo mô hình 2S2P1D, $|E^*|$ được tính theo công thức (3.8):

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (3.8)$$

Trong đó:

ω - Vận tốc góc, $\omega = 2\pi f$, với f là tần số;

δ - Hằng số; k , h là hệ số có khoảng từ 0 đến 1;

i - Đơn vị ảo, $i^2 = -1$;

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

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

η - Hệ số nhớt, được xác định theo công thức $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta\tau$;

τ - Thời gian đặc trưng phụ thuộc nhiệt độ. Thông số này là hàm 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} .

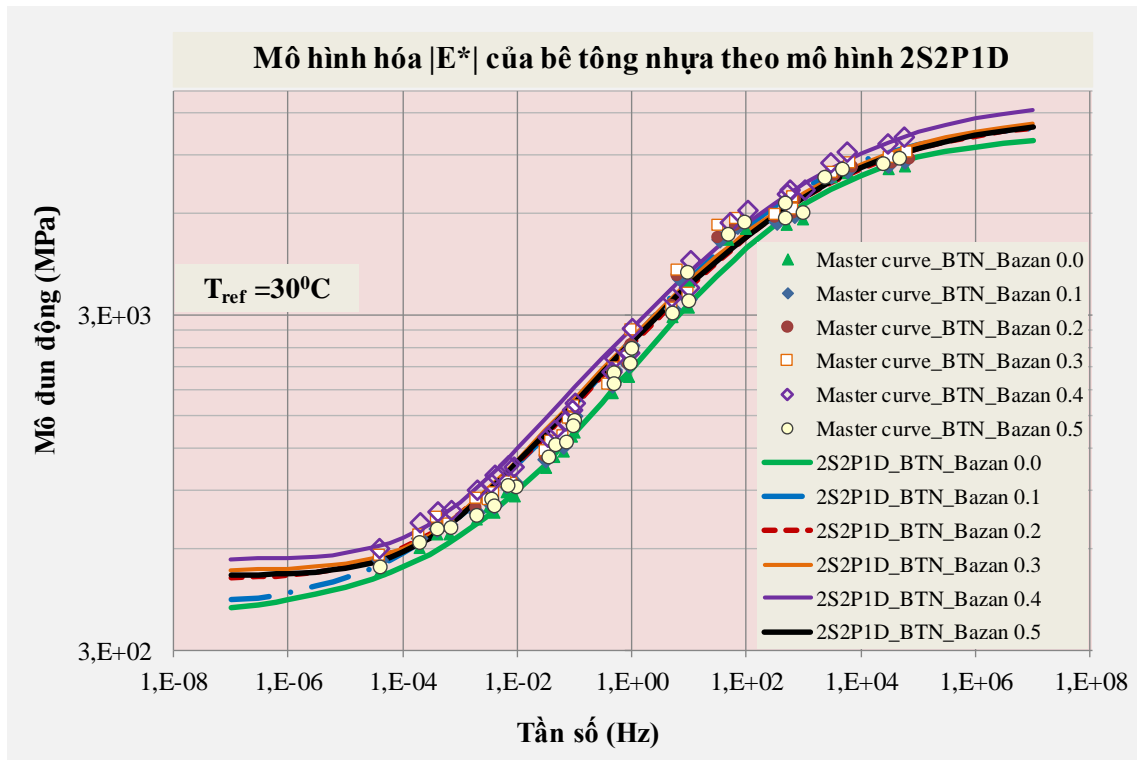
Với mục đích tối thiểu hóa sai số giữa thực nghiệm và mô hình, các thông số của mô hình 2S2P1D xác định bằng cách thử dần. Bảng 3.15 là kết quả xác định các thông số của mô hình 2S2P1D, trong đó hai thông số E_{00} , E_0 của mô hình tham khảo tài liệu [11].

Bảng 3.15. 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
BTN_Bazan 0.0	400	14 600	0,280	0,35	9,25	0,63	2 100
BTN_Bazan 0.1	420	16 000	0,260	0,41	6,90	0,45	2 800
BTN_Bazan 0.2	490	16 500	0,240	0,51	7,85	0,45	3 050

Loại BTN	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β
BTN_Bazan 0.3	520	17 000	0,239	0,58	8,27	0,55	3 200
BTN_Bazan 0.4	560	19 000	0,233	0,59	8,72	0,55	3 300
BTN_Bazan 0.5	500	16 600	0,238	0,57	8,21	0,55	3 100

Kết quả mô phỏng cho thấy, các giá trị k , h , δ , τ , và β đều nằm trong khoảng giá trị tham khảo của tài liệu [11]. Kết quả mô hình hóa $|E^*|$ của các loại BTN được thể hiện ở Hình 3.32.



Hình 3.32. Mô hình hóa đường cong chủ $|E^*|$ của BTN theo mô hình 2S2P1D

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

Để đánh giá sự phù hợp của mô hình 2S2P1D với kết quả thí nghiệm, nghiên cứu sử dụng phương pháp mức độ phù hợp (Goodness of Fit) [11]. Trong phương pháp này, sai số tiêu chuẩn của ước lượng (S_e) và độ lệch chuẩn (S_y) được định nghĩa như sau:

$$S_e = \left[\frac{1}{(n-p-1)} \sum_{i=1}^n \left(\log \left| \hat{E}^* \right|_i - \log |E^*|_i \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3.9)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\log |E^*|_i - \overline{\log |E^*|} \right)^2}{n-1}} \quad (3.10)$$

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 $|E^*|$ 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 có thể xác định theo công thức sau:

$$R^2 = 1 - \frac{(n-p-1)S_e^2}{(n-1)S_y^2} \quad (3.11)$$

Mô hình 2S2P1D được đánh giá là phù hợp với số liệu thí nghiệm khi hệ số xác định thỏa mãn $R > 0,9$ và $S_e/S_y < 0,35$ [11].

Kết quả xác định hệ số xác định R^2 và S_e/S_y thể hiện ở Bảng 3.19.

Bảng 3.16. Đánh giá kết quả dự báo $|E^*|$ của BTN bằng mô hình 2S2P1D

Loại BTN	R^2	S_e/S_y	Đánh giá
BTN_Bazan 0.0	0,9875	0,129	Rất tốt
BTN_Bazan 0.1	0,9621	0,223	Rất tốt
BTN_Bazan 0.2	0,9773	0,173	Rất tốt
BTN_Bazan 0.3	0,9770	0,1743	Rất tốt
BTN_Bazan 0.4	0,9801	0,1621	Rất tốt
BTN_Bazan 0.5	0,9726	0,1901	Rất tốt

Từ kết quả bảng trên cho thấy, mô hình 2S2P1D phù hợp để mô phỏng đường cong chủ $|E^*|$ của BTN sử dụng sợi bazan và BTN đối chứng.

3.7. Kết luận Chương 3

Chương 3 đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm trong phòng để đánh giá chất lượng các hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan so với BTN hiện có tại Việt Nam không sử dụng sợi bazan. Một số kết luận được rút ra từ chương này như sau:

1. BTN sử dụng sợi bazan có khả năng kháng LVBX trong môi trường nước tốt hơn so với hỗn hợp BTN thông thường không sử dụng sợi bazan. BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% có chiều sâu LVBX nhỏ nhất (3,67 mm), hỗn hợp BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan có chiều sâu LVBX lớn nhất (5,83 mm).

2. Cường độ kéo uốn của BTN khi sử dụng sợi bazan được cải thiện đáng kể. Khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3%, cường độ kéo uốn đạt giá trị lớn nhất (10,19 MPa). BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% có cường độ kéo uốn đạt giá trị lớn thứ hai (9,819MPa). BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan, cường độ kéo uốn đạt giá trị nhỏ nhất (8,168 MPa).

3. Sử dụng sợi bazan giúp cải thiện khả năng kháng nứt của BTN ở tất cả các hàm lượng sợi từ 0,1% lên 0,5%. Chỉ số kháng nứt CT_{Index} đạt giá trị lớn nhất (309,20) khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4%.

4. Mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sử dụng sợi bazan ở tất cả 5 hàm lượng sợi và ở 3 mức nhiệt độ thí nghiệm 15°C, 30°C và 60°C đều cao hơn mô đun đàn hồi tĩnh của BTN đối chứng (không sử dụng sợi bazan). Ở nhiệt độ 15°C, mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% đạt giá trị lớn nhất, cao hơn so với BTN đối chứng là 57%. Ở nhiệt độ 30°C và 60°C, mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3% đạt giá trị lớn nhất cao hơn so với BTN đối chứng tương ứng là 54% và 22%.

5. BTN sử dụng sợi bazan có mô đun đàn hồi $|E^*|$ cao hơn BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan ở tất cả các nhiệt độ và tần số. BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% có mô đun đàn hồi $|E^*|$ cao nhất ở tất cả các nhiệt độ và tần số, tiếp theo đó là BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng từ 0,3%; 0,5%, 0,2%, 0,1%. BTN không sử dụng sợi bazan có mô đun đàn hồi $|E^*|$ thấp nhất.

6. Các đường cong chủ của $|E^*|$ ở nhiệt độ tham chiếu 30°C được xây dựng cho thấy $|E^*|$ của BTN sử dụng sợi bazan đều cao hơn BTN đối chứng không sử dụng sợi bazan ở các nhiệt độ và tần số khác nhau.

7. Mô hình 2S2P1D được xây dựng phù hợp để mô hình hóa $|E^*|$ của các loại BTN (sử dụng sợi bazan, BTN đối chứng) và dùng để xác định mô đun động của BTN sử dụng sợi bazan ở nhiệt độ và tần số bất kỳ.

Tổng hợp các kết quả nghiên cứu ở Chương 3 cho thấy, hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan có các tính chất cơ học tốt hơn hỗn hợp BTN không sử dụng sợi bazan. Trong đó, BTN sử dụng 0,4% sợi bazan có nhiều đặc tính cơ học tốt hơn BTN thông thường và BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,5%. Do vậy, BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% được sử dụng để nghiên cứu ở chương tiếp theo.

Chương 4. NGHIÊN CỨU DỰ BÁO TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA VẬT LIỆU THEO HỌC MÁY VÀ ỨNG DỤNG BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG SỢI BAZAN TRONG KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG

Chương 4 ứng dụng Machine Learning - Học máy để xây dựng công cụ dự báo ổn định Marshall của BTN sử dụng sợi bazan nhằm định hướng cho các nghiên cứu về sau. Ngoài ra, từ các kết quả thực nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của BTN sử dụng sợi bazan như mô đun đàn hồi tĩnh, cường độ kéo uốn và mô đun động ở Chương 3, chương này sử dụng BTN sợi bazan với hàm lượng 0,4% làm lớp mặt trong kết cấu áo đường ô tô. Một số kết cấu áo đường mềm điển hình trên tuyến quốc lộ ở Việt Nam sử dụng lớp mặt BTNC 12,5 được chọn, sau đó thay thế BTNC 12,5 bằng BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% với chiều dày theo tính toán để phân tích, so sánh và đánh giá theo tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN và phương pháp thiết kế cơ học thực nghiệm (M-E). Cuối cùng, Chương 4 tính toán chi phí xây dựng kết cấu áo đường khi sử dụng sợi bazan và đề xuất hướng chế tạo BTN sử dụng sợi bazan ngoài trạm trộn.

4.1. Ứng dụng học máy trong dự báo độ ổn định Marshall

4.1.1. Xây dựng cơ sở dữ liệu các mẫu thí nghiệm độ ổn định Marshall

Trong chương 4, cơ sở dữ liệu các mẫu thí nghiệm MS được tập hợp từ các công bố quốc tế (bao gồm 99 mẫu) và các mẫu BTN do NCS thí nghiệm tại Chương 2 (bao gồm 90 mẫu). Bộ cơ sở dữ liệu thí nghiệm MS được tập hợp bao gồm tổng 189 mẫu và 10 biến đầu vào như đã giới thiệu ở Chương 2. Phân tích thống kê các thông số của bộ dữ liệu MS được trình bày tại Bảng 4.1.

So sánh phân tích thống kê đối chiếu bộ dữ liệu 99 mẫu được tập hợp ở Chương 2 và 189 mẫu ở Chương 4 có thể nhận thấy những mẫu được thí nghiệm đều có những biến đầu vào nằm trong khoảng giá trị của bộ số liệu 99 mẫu tập hợp từ các công bố quốc tế. Điều này có thể nói lên, nếu mô hình ML được xây dựng với 10 biến đầu vào là hợp lý thì mô hình đó sẽ có khả năng dự báo chính xác các mẫu thí nghiệm mà không cần điều chỉnh miền không gian biến đầu vào.

Bảng 4.1. Phân tích thống kê các thông số của bộ dữ liệu MS

	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Nhỏ nhất	Phần tư vị thứ nhất	Trung vị	Phần tư vị thứ ba	Lớn nhất
X₁	2757,06	848,13	0,00	2500,00	2800,00	2800,00	4425,00
X₂	0,30	0,23	0,00	0,20	0,30	0,40	2,00
X₃	8,83	3,82	0,00	6,00	12,00	12,00	12,00
X₄	11,65	3,30	0,00	11,00	11,00	13,00	17,00
X₅	69,88	10,02	55,00	65,60	65,60	75,00	92,30
X₆	51,96	8,34	44,50	48,00	48,00	49,40	81,00
X₇	5,18	0,60	4,00	4,70	5,09	5,50	6,80
X₈	31,76	6,92	14,90	32,20	33,00	33,83	45,00
X₉	46,39	9,67	20,08	49,30	50,00	50,00	58,00
X₁₀	73,59	6,48	50,00	70,10	77,00	77,00	80,91
MS	11,62	2,09	5,69	10,60	12,09	12,88	17,70

4.1.2. Các công cụ ML và mô hình tính toán độ ổn định Marshall

Tương tự như tại Chương 2, mô hình XGB được sử dụng để dự báo MS của BTN sử dụng sợi bazan tại Chương 4. Quá trình tối ưu hóa tham số của mô hình XGB được thực hiện tương tự tại Chương 2 với hai thuật toán tối ưu hóa là AO và SFO.

Các tham số là kích thước dân số (n_p) và số lần lặp để tìm kiếm tối ưu vẫn được sử dụng để khảo sát số và tìm được mô hình XGB tốt nhất cho bộ dữ liệu 189 mẫu MS. Ở phần này, n_p được khảo sát ở 4 giá trị khác nhau là 10, 20, 30, 40 và số lần lặp vẫn được lấy là 1000 để đảm bảo khả năng hội tụ. Về mục tiêu tối ưu hóa, hiệu suất của mô hình XGB để dự đoán MS của BTN sử dụng sợi bazan được đánh giá qua giá trị R của bộ dữ liệu xác thực và kiểm chứng. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình XGB_SFO_40 đưa ra được bộ tham số cho XGB đạt giá trị tốt nhất. Chi tiết các siêu tham số của mô hình XGB được trình bày tại Bảng 4.2. Có thể nhận thấy rằng các siêu tham số của mô hình XGB được tìm thấy là tương tự như với bộ dữ liệu 99 mẫu tại Chương 2. Một vài điều chỉnh nhỏ để đạt hiệu suất dự báo tốt hơn với 189 mẫu mới là ở tốc độ học và chiều sâu cây.

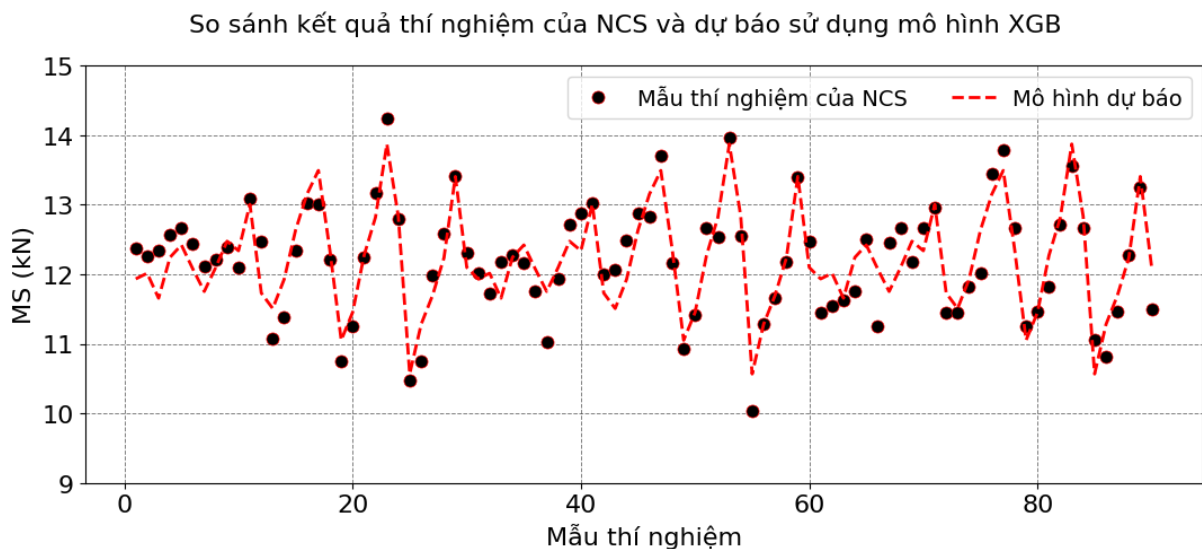
Bảng 4.2. Siêu tham số của mô hình XGB trong dự báo MS

	Biến đầu ra	Số lượng cây	Tốc độ học	Chiều sâu cây	Trọng số chia nhánh	Số lá lớn nhất
XGB_SFO_40	MS	219	0,3	6	2	36

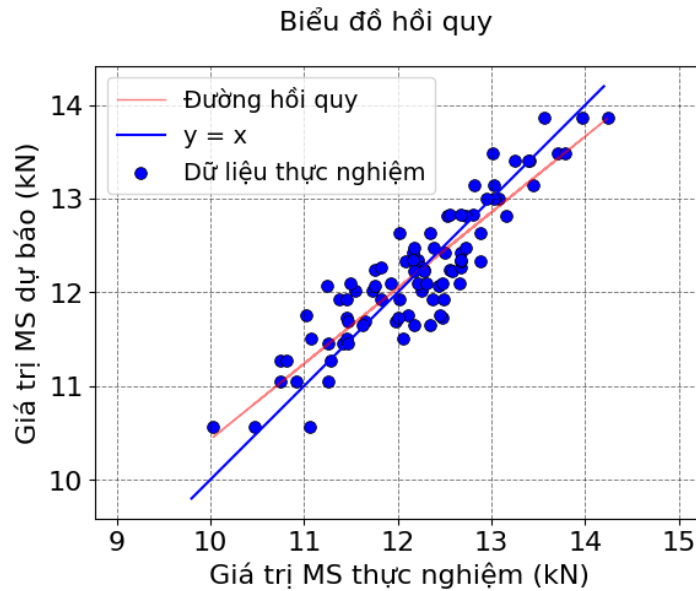
4.1.3. Xây dựng mô hình ML dự báo độ ổn định Marshall của BTN sử dụng sợi bazan

Hình 4.1 cho thấy mối quan hệ giữa giá trị MS của các mẫu thử nghiệm trong luận án và các giá trị được tính toán từ mô hình XGB_SFO_40. Quan sát thấy rằng các giá trị MS của BTN sử dụng sợi bazan được tính toán bằng mô hình XGB tối ưu rất gần với giá trị thực nghiệm. Mô hình XGB_SFO_40 có hiệu suất $R = 0,901$, $RMSE = 0,352$ kN, $MAE = 0,290$ kN và $MAPE = 0,024$. Có thể thấy khả năng dự đoán của mô hình XGB_SFO_40 đối với bài toán dự đoán MS của BTN sợi bazan là tốt.

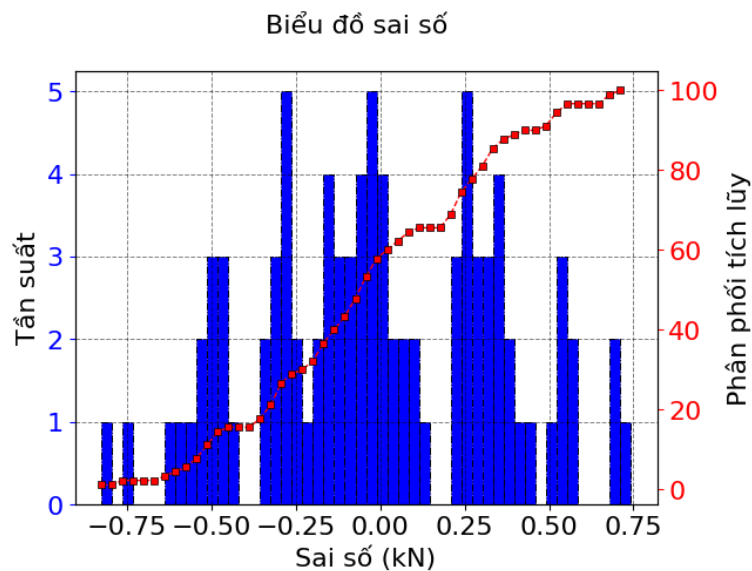
Biểu đồ hồi quy của thí nghiệm và mô phỏng XGB được thể hiện ở Hình 4.2. Có thể quan sát thấy rằng các giá trị thực nghiệm và dự báo bởi XGB đều nằm gần đường hồi quy và đường chéo của biểu đồ. Điều này chứng tỏ dự báo của XGB cho các mẫu thí nghiệm là tốt và có sai số tương đối thấp. Cụ thể, Hình 4.3 thể hiện sai số giữa các giá trị này kèm theo đường phân phối tích lũy. Có thể nhận thấy rằng sai số lớn nhất giữa giá trị MS dự báo và thực nghiệm có giá trị khoảng 0,75 kN, và chỉ có 4 mẫu (trên 90 mẫu) có sai số có giá trị như trên. Các sai số còn lại phần lớn tập trung ở trong khoảng $\pm 0,25$ kN, bao gồm khoảng 70% số mẫu (dựa vào phân phối tích lũy). Các mẫu còn lại nằm trong khoảng sai số $\pm 0,5$ kN. Như vậy, mô hình XGB có thể là một công cụ hữu ích để các kỹ sư vật liệu có thể ước tính trước được giá trị MS của các mẫu BTN sử dụng sợi bazan.



Hình 4.1. So sánh kết quả thí nghiệm MS và các giá trị được tính toán bởi mô hình XGB



Hình 4.2. Biểu đồ hồi quy so sánh kết quả thí nghiệm MS và các giá trị được tính toán bởi mô hình XGB



Hình 4.3. Biểu đồ sai số giữa kết quả thí nghiệm MS và các giá trị được tính toán bởi mô hình XGB

Với hiệu suất của mô hình XGB là $R = 0,9$, có thể miền tham số đầu vào của mô hình này cần được hiệu chỉnh để nâng cao khả năng dự báo. Như đã phân tích ở phần trước, có 99 mẫu BTN được lấy từ các số liệu thực nghiệm quốc tế, và 90 mẫu được thí nghiệm trong luận án. Miền tham số đầu vào chỉ xét hàm lượng lọt sàng ở các mắt sàng có thể là một hạn chế của mô hình XGB được đề xuất trong luận án này. Hiện nay trên thế giới, việc nâng cao hiệu suất mô hình dự báo đã bắt đầu được thực hiện bằng cách đưa thêm các tham số khác của cốt liệu, nhựa đường, ví dụ như các tính chất cơ lý,

cường độ cốt liệu... Điều này có thể sẽ giúp mô hình ML hiểu rõ hơn và phân biệt rõ hơn cốt liệu của vùng nào và ảnh hưởng của các loại cốt liệu đó tới tính chất cơ lý của BTN nói chung, và của MS nói riêng. Việc cải thiện miền tham số đầu vào có thể là hướng đi tiếp theo của đề tài trong tương lai gần, qua đó giúp nâng cao hiệu suất dự báo và cải thiện độ phổ quát của mô hình ML.

4.1.4. Xây dựng giao diện GUI dự báo MS của BTN sử dụng sợi bazan

The GUI displays the following parameters and their current values:

Parameter	Value
Độ bền kéo sợi bazan (MPa)	2800
Hàm lượng sợi bazan (%)	0.4
Chiều dài sợi bazan (mm)	12
Đường kính sợi bazan (mm)	11
Độ kim lún (0,1 mm)	65
Điểm hóa mềm (°C)	55
Hàm lượng nhựa (%)	5.3
Cốt liệu 2,36 mm (%)	33
Cốt liệu 4,75 mm (%)	50
Cốt liệu 9,5 mm (%)	77

Buttons: Clear, Submit

Output: Giá trị MS dự báo sử dụng XGB (kN) [13.916428]

Hình 4.4. Giao diện GUI để dự báo MS của bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

Phần này trình bày công cụ GUI được thiết lập để dự báo MS của BTN sử dụng sợi bazan. Đây là một ứng dụng phần mềm tiên tiến, cung cấp giao diện người dùng đồ họa trực quan. Nó cho phép người dùng nhập dữ liệu, điều chỉnh các tham số, và xem kết quả dự báo MS dựa trên mô hình hóa, qua đó phân tích dữ liệu về sự tương tác và hiệu suất của sợi bazan trong BTN. Đây là công cụ đặc biệt hữu ích cho các kỹ sư và nhà nghiên cứu trong việc đánh giá và cải tiến chất lượng BTN. Hình 4.4 thể hiện giao diện GUI được thiết lập thông qua Gradio, một thư viện số trong nền tảng Python, cho phép người dùng kéo các giá trị hoặc nhập nhanh các giá trị từ X_1 đến X_{10} . Sau khi nhập các thông số cần thiết, người dùng chỉ cần ấn 'Submit' để hệ thống xử lý và đưa ra dự báo MS cho BTN sử dụng sợi bazan. Quá trình GUI chạy là dưới 1 giây, cho phép các kỹ sư vật liệu có thể nhanh chóng xác định được ảnh hưởng của từng tham số tới kết quả dự báo MS, từ đó định hướng các thí nghiệm về sau. Chi tiết hướng dẫn sử dụng và cài đặt của GUI được trình bày tại Phụ lục 10.

4.2. Thực trạng giao thông trên các tuyến đường cấp cao ở Việt Nam và đề xuất cấu tạo kết cấu áo đường mềm

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

Theo quyết định số 858/QĐ-BGTVT của Bộ GTVT [7], tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn được hiểu là “*các tuyến đường có lưu lượng xe lớn và/hoặc có nhiều xe khách lớn, xe tải lớn lưu thông, cụ thể là các tuyến đường có tổng số trục xe tích lũy trong thời hạn thiết kế $N_e \geq 5, 10^6$ 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*”.

Thực tế cho thấy các tuyến quốc lộ (QL) ở Việt Nam hiện nay như QL 1, QL 5, QL 18, QL 3 và một số QL khác đang khai thác đều có lưu lượng giao thông rất lớn và lớn với số lượng xe có tải trọng trục lớn, xe nhiều trục chiếm tỷ lệ tương đối cao. Hiện tượng LVBX xảy ra nhiều trên các tuyến QL đã chứng minh các tuyến đường đang phải chịu tải trọng cũng như lưu lượng lớn, và đây là nguyên nhân chính dẫn đến hư hỏng.

4.2.2. Một số kết cấu áo đường điển hình trên các tuyến đường QL ở Việt Nam

Ở Việt Nam, hầu hết các tuyến đường ô tô cấp cao hiện nay đều sử dụng kết cấu áo đường (KCAĐ) mềm. KCAĐ của các tuyến QL ở nước ta thường gặp một số dạng như sau [10]:

- ✓ Dự án tăng cường ATGT trên các tuyến QL phía Bắc Việt Nam, QL3 đoạn qua tỉnh Thái Nguyên: Kết cấu áo đường mới Eyc $\geq 171,6$ MPa, gồm các lớp như sau:

- Lớp BTN hạt mịn: 5 cm
- Lớp BTN hạt trung: 7 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 1: 32 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 2: 36 cm

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

- ✓ Dự án nâng cấp mở rộng QL1A đoạn qua thành phố Thanh Hóa – Nghi Sơn: Kết cấu mặt đường mới có Eyc ≥ 160 MPa.

- Lớp BTN hạt mịn: 7 cm
- Lớp BTN hạt trung: 8 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 1: 25 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 2: 30 cm

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

- ✓ Dự án nâng cấp mở rộng QL14 đoạn qua Đăk Nông, Đăk Lawk, Bình Phước: KCAĐ làm mới có Eyc ≥ 155 Mpa, bao gồm các lớp như sau:

- Lớp BTN hạt mịn: 5 cm
- Lớp BTN hạt trung: 7 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 1: 15 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 2: 30 cm

Giữa các lớp BTN tưới nhựa dính bám: 0,5 kg/m²; Tưới nhựa thấm bám 1,0 kg/m² trên lớp CPĐĐ loại 1

- ✓ Kết cấu mặt đường QL32 đoạn từ Km14 đến Km17+100: KCAĐ mới hoàn chỉnh có Eyc ≥ 140 Mpa, bao gồm các lớp sau:

- Lớp BTN hạt mịn: 5 cm
- Lớp BTN hạt trung: 7 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 1: 15 cm
- Lớp cấp phối đá dăm loại 2: 30 cm

Giữa các lớp BTN tưới nhựa dính bám: 0,5 kg/m²; Tưới nhựa thấm bám 1,5 kg/m² trên lớp CPĐĐ loại 1

Qua nghiên cứu các hồ sơ thiết kế KCAĐ mềm được sử dụng phổ biến tại một số dự án ở nước ta trong thời gian qua cho thấy, cấu tạo của KCAĐ mềm được áp dụng đối với cả các tuyến đường xây dựng mới hoặc các tuyến đường cải tạo nâng cấp trên phạm vi toàn quốc là tương tự nhau. Cụ thể như sau:

- ✓ Tầng mặt: Bao gồm 1-2 lớp bê tông asphalt rải nóng, có hoặc không có lớp BTN chức năng tạo nhám, giảm tiếng ồn và thoát nước; Thông thường chiều dày 2 lớp BTN chỉ dao động trong khoảng 12-14 cm.
- ✓ Tầng móng bao gồm lớp móng trên và lớp móng dưới:
 - Lớp móng trên: Cấp phối đá dăm (CPĐĐ) loại 1 có gia cố hoặc không gia cố xi măng; lớp ATB (Asphalt Treated Base) lớp cấp phối đá gia cố nhựa;
 - Lớp móng dưới: CPĐĐ loại 1, CPĐĐ loại 2; cấp phối đồi; cấp phối sỏi cuội; đất, cát gia cố xi măng;
- ✓ Lớp đáy áo đường thường sử dụng lớp cấp phối đồi chọn lọc, hoặc cát đắp có chiều dày 30 - 50 cm đầm chặt $K \geq 0,98$. Tuy nhiên về số lớp và chiều dày mỗi lớp trên các dự án xây dựng có khác nhau nhưng không nhiều tùy theo lưu lượng xe, điều kiện địa chất, nguồn vật liệu xây dựng.

4.2.3. Đề xuất KCAĐ mềm ứng dụng BTN sử dụng sợi bazan làm lớp mặt trong KCAĐ ô tô ở Việt Nam

Trên cơ sở phân tích KCAĐ điển hình ở một số tuyến đường QL ở Việt Nam, để so sánh và đánh giá BTN sử dụng sợi bazan khi ứng dụng làm lớp mặt, nghiên cứu lựa chọn KCAĐ của QL32 đoạn từ Km14 đến Km17+100 với một số điều chỉnh như sau:

- Tầng mặt: Kết cấu đối chứng (Kết cấu 1) gồm lớp trên là BTNC 12,5 dày 5 cm, lớp dưới là BTNC 19 dày 7cm; Kết cấu thay thế thứ nhất (Kết cấu 2) gồm lớp trên là BTN sử dụng 0,4% sợi bazan có chiều dày 4 cm, lớp dưới là BTNC 19

chiều dày 7cm; Kết cấu thay thế thứ hai (Kết cấu 3) gồm lớp trên là BTN sử dụng 0,4% sợi bazan có chiều dày 5 cm, lớp dưới là BTNC 19 chiều dày 7cm;

- Tầng móng: Cả ba kết cấu có tầng móng giống nhau gồm móng trên là CPĐD loại 1 dày 15 cm, móng dưới là CPĐD loại 2 dày 30cm, lớp đáy móng là cấp phối thiên nhiên dày 30 cm.

Chi tiết 3 kết cấu đề xuất được trình bày trong Bảng 4.3.

Bảng 4.3. Các kết cấu áo đường sử dụng trong nghiên cứu

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp Kết cấu 1 (cm)	Chiều dày các lớp Kết cấu 2 (cm)	Chiều dày các lớp Kết cấu 3 (cm)
1	BTNC 12,5	5	-	-
2	BTN_Bazan 0,4	-	4	5
3	BTNC 19	7	7	7
4	CPĐD loại 1	15	15	15
5	CPĐD loại 2	30	30	30
6	CP thiên nhiên	30	30	30
	Tổng	87	86	87

4.3. Phân tích kết cấu áo đường mềm theo tiêu TCCS 38:2022/TCĐBVN

Nghiên cứu sử dụng tiêu chuẩn TCCS 38:2022 để phân tích, đánh giá khi đưa BTN_Bazan 0,4 vào KCAĐ thay thế vật liệu BTNC 12,5 như được đề xuất ở Bảng 4.3. Đây là một phương pháp thiết kế dựa trên lý thuyết cơ học, việc tính toán dựa theo kết quả phân tích trạng thái ứng suất – biến dạng của áo đường, từ đó kiểm toán các trạng thái giới hạn của áo đường. Thông số đặc trưng của các lớp vật liệu được thể hiện ở Bảng 4.4. Các thông số về mô đun đàn hồi tĩnh và cường độ kéo uốn của BTN_Bazan 0,4 và BTNC 12,5 được lấy theo kết quả nghiên cứu ở Chương 3. Các thông số cần thiết của đất nền, lớp móng CPĐD như mô đun đàn hồi M_r tham khảo ở tiêu chuẩn 22TCN 274-01 và nghiên cứu [11].

Bảng 4.4. Các thông số đặc trưng của vật liệu

TT	Vật liệu	E (MPa)			R _{ku} (MPa)	C (MPa)	φ (°)
		Kéo uốn	Võng đàn hồi	Trượt			
1	BTNC 12,5	770,59	349,06	234,25	8,168		
2	BTN_Bazan 0,4	1210,20	428,80	266,43	9,819		
3	BTNC 19	799,08	379,33	255,67	3,050		
4	CPĐĐ loại 1	300,00	300,00	300,00			
5	CPĐĐ loại 2	250,00	250,00	250,00			
6	CP thiên nhiên	200,00	200,00	200,00			
7	Nền đất (á cát nhẹ)	50				0,02	30

QL32 có $E_{yc} = 140\text{MPa}$, chọn hệ số độ tin cậy 95%, hệ số an toàn về cường độ $K_{cd}^{dv} = 1,17$, xác định được $E_{yc} * K_{cd}^{dv} = 163,80\text{ MPa}$ Kết quả kiểm toán hai kết cấu áo đường được thể hiện chi tiết ở Bảng 4.5 và Phụ lục 7.

Bảng 4.5. Kết quả kiểm toán KCAD theo TCCS 38:2022

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp KCAD, cm		
		Kết cấu 1	Kết cấu 2	Kết cấu 3
1	BTNC 12,5	5	-	-
2	BTN_Bazan 0,4	-	4	5
3	BTNC 19	7	7	7
4	CPĐĐ loại 1	15	15	15
5	CPĐĐ loại 2	30	30	30
6	Cấp phối thiên nhiên	30	30	30
TT	Nội dung kiểm toán	KC1	KC2	KC3
1	Kiểm toán theo tiêu chuẩn độ võng đàn hồi	Đạt	Đạt	Đạt
	$E_{yc} * K_{cd}^{dv}$ (MPa)	163,80	163,80	163,80
	E_{ch} (MPa)	190,84	191,74	193,85
2	Kiểm toán theo tiêu chuẩn cắt trượt trong nền đất	Đạt	Đạt	Đạt
	C_{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)	0,0144	0,0144	0,0144
	$T_{ax} + T_{av}$ (MPa)	0,0010	0,001	0,0011
3	Kiểm toán theo tiêu chuẩn kéo uốn trong các lớp BTN	Đạt	Đạt	Đạt
	a. Lớp BTNC 12,5 dày 5cm			

	R_{ku}^{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)	4,4742		
	σ_{ku} (MPa)	0,6885		
	<i>b. Lớp BTN_Bazan 0,4 dày 4cm</i>			
	R_{ku}^{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)		5,3786	
	σ_{ku} (MPa)		0,8262	
	<i>c. Lớp BTN_Bazan 0,4 dày 5cm</i>			
	R_{ku}^{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)			5,3786
	σ_{ku} (MPa)			0,8262
	<i>c. Lớp BTNC 19 dày 7cm</i>			
	R_{ku}^{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)	1,6707	1,6707	1,6707
	σ_{ku} (MPa)	0,6579	0,6630	0,6630

Kết quả kiểm toán KCAĐ theo TCCS 38:2022 cho thấy ưu điểm của BTN_Bazan 0,4 khi được sử dụng làm lớp mặt trên của kết cấu áo đường mềm. Cụ thể, có thể sử dụng BTN_Bazan 0,4 dày 4cm thay thế cho lớp BTNC 12,5 dày 5cm nhưng vẫn đảm bảo các điều kiện về độ võng đàn hồi, cường độ kéo uốn và khả năng chống cắt trượt tương đương nhau. Trường hợp sử dụng BTN_Bazan 0,4 có chiều dày tương đương BTN đối chứng thì mô đun đàn hồi chung của kết cấu có sử dụng sợi cao hơn kết cấu đối chứng.

Như vậy, việc tính toán KCAĐ theo phương pháp lý thuyết cơ học có ưu điểm là đơn giản, nhanh chóng. Tuy nhiên, phương pháp này còn tồn tại những hạn chế nhất định như các tính toán, kiểm toán chưa phù hợp với điều kiện làm việc thực tế của mặt đường, chưa xác định được các chỉ tiêu khai thác mặt đường trong quá trình sử dụng. Đây là những lý do chính khiến phương pháp này đang dần bị thay thế bởi phương pháp hiện đại hơn ở một số nước tiên tiến trên thế giới.

4.4. Phân tích KCAĐ mềm sử dụng BTN sợi bazan theo phương pháp cơ học thực nghiệm

4.4.1. Một số vấn đề chung về thiết kế áo đường theo cơ học thực nghiệm

Hiện nay, phương pháp cơ học thực nghiệm (M-E) là phương pháp tiên tiến nhất trên thế giới trong thiết kế, phân tích KCAĐ và được áp dụng ở nhiều bang nước Mỹ, Canada. Thiết kế KCAĐ mềm theo phương pháp M-E là quá trình mô phỏng sự tác động của tải trọng và khí hậu sát nhất với điều kiện thực tế lên KCAĐ lựa chọn, thông qua quá trình phân tích trạng thái ứng xử của kết cấu áo đường, tính toán được

các ứng suất, biến dạng, chuyển vị tương ứng. Từ kết quả phân tích KCAĐ, xây dựng các hàm dự báo các loại hình hư hỏng của kết cấu áo đường và độ êm thuận của mặt đường thông qua chỉ số độ gồ ghề quốc tế (International Roughness Index - IRI). Các hàm dự báo này được hiệu chỉnh với cơ sở dữ liệu thu thập về tình trạng mặt đường khai thác thực tế (Long Term Pavement Performance - LTPP) nên có độ tin cậy cao.

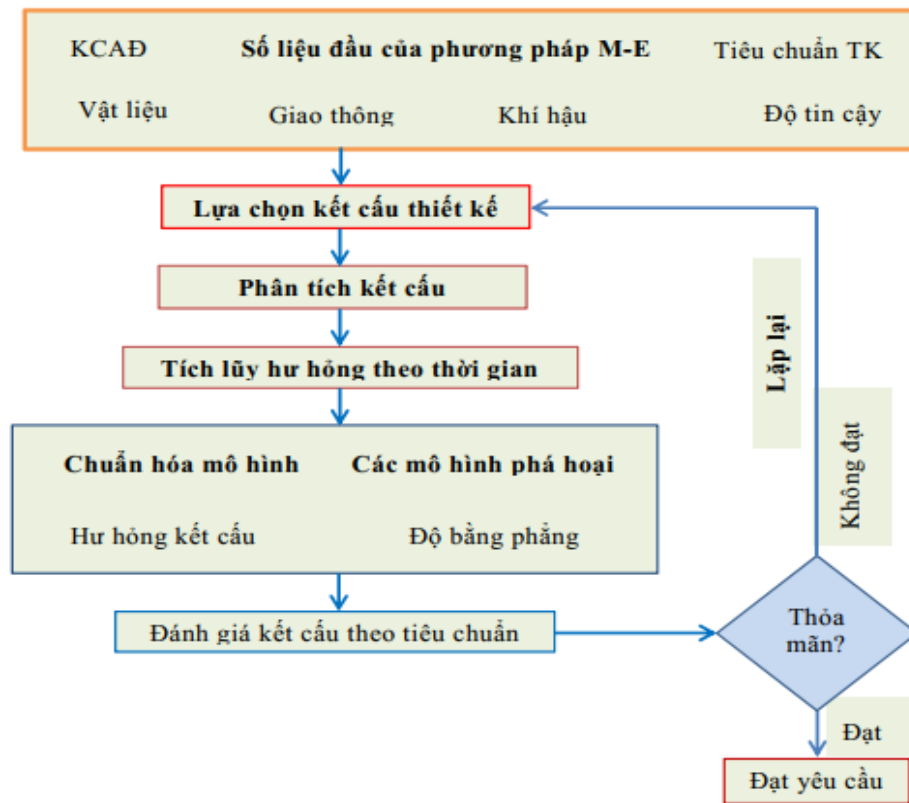
Thiết kế KCAĐ mềm theo phương pháp cơ học thực nghiệm (M-E) bao gồm việc xem xét nhiều yếu tố như lưu lượng xe tải, tải trọng và phân bố của tải trọng trục, tính chất của các lớp BTN và các lớp vật liệu trong kết cấu cùng với khả năng hỗ trợ của nền đường. Phương pháp thiết kế M-E gồm các bước chính sau:

- 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 mặt 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 mặt 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: Độ tin cậy về bản chất là một hệ số an toàn được tính toán cho sự sai khác trong xây dựng của vật liệu, giao thông, khí hậu và các dữ liệu đầu vào thiết kế khác. Độ tin cậy được lựa chọn 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 cho thiết kế áo đường để đánh giá gồm các tính chất của nền đường, các lớp móng và mặt đường BTN, 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 mặt đường trong thời hạn thiết kế. Các bước chính bao gồm:

- (1) 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.
- (2) 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.

- (3) Tính toán hư hỏng tích lũy ở cuối mỗi giai đoạn phân tích trong toàn bộ thời hạn thiết kế.
- (4) 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.
- (5) Dự đoán IRI từ IRI ban đầu và các hư hỏng mặt đường tích lũy trong toàn bộ thời hạn thiết kế.

Trình tự các bước chính khi thiết kế KCAĐ theo phương pháp M-E được trình bày ở Hình 4.5.



Hình 4.5. Trình tự thiết kế KCAĐ theo phương pháp M-E [33]

Như vậy, so với các phương pháp tính toán áo đường theo lý thuyết cơ học, phương pháp M-E có nhiều ưu điểm như: (i) Các thông số đầu vào của chương trình thiết kế phù hợp với điều kiện làm việc của KCAĐ do có xét đến các yếu tố tải trọng, chế độ thủy nhiệt của đường, thông số cơ học của vật liệu áo đường; và (ii) Dự báo ứng xử của KCAĐ mềm trong quá trình khai thác theo thời gian phục vụ thông qua các chỉ tiêu như chỉ số IRI, nứt, LVBX.

4.4.2. Ứng dụng phương pháp M-E phân tích các KCAĐ

Sử dụng phần mềm Darwin-ME 2.3.1 để phân tích một số KCAĐ mềm theo phương pháp M-E. Trong đó, các số liệu về giao thông được khảo sát và lựa chọn đặc

trung quy mô giao thông trên các tuyến đường QL ở Việt Nam; Số liệu về khí hậu thu thập đặc trưng cho Hà Nội; Các số liệu của các lớp vật liệu được thí nghiệm trong phòng.

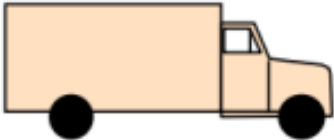
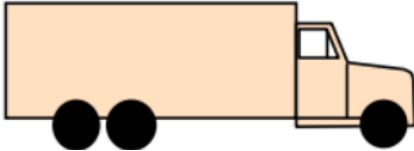
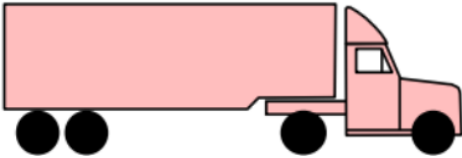
4.4.2.1. Các số liệu khí hậu

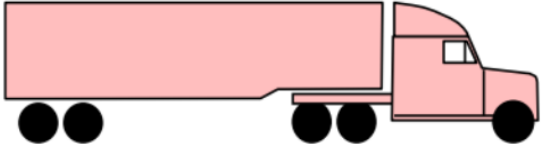
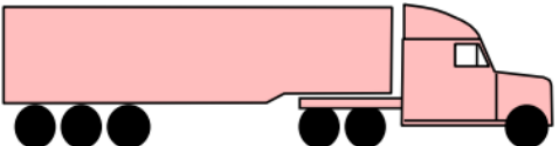
Dữ liệu thu thập được trích xuất từ kho dữ liệu Phân tích hồi cứu thời Hiện đại cho Nghiên cứu và ứng dụng, phiên bản 2 (MERRA-2) từ một số vệ tinh của NASA cho khu vực thành phố Hà Nội bao gồm nhiệt độ, lượng mưa, tốc độ gió, phần trăm ánh nắng mặt trời và độ ẩm tương đối. Thông tin này được xây dựng thành tệp dữ liệu thời tiết để nhập vào phần mềm Darwin-ME để dự đoán nhiệt độ và độ ẩm trong KCAĐ thiết kế.

4.4.2.2. Các số liệu về giao thông

Phương pháp M-E sử dụng số liệu lưu lượng xe tải trung bình ngày đêm cho năm đầu tiên cũng như tỉ lệ của từng loại xe trong các phân tích kết cấu [33]. Từ các kết quả khảo sát giao thông trên một số tuyến quốc lộ điển hình ở Việt Nam, 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 MEPDG là loại 5, loại 6, loại 8, loại 9 và loại 10 [33] và được trình bày chi tiết ở Hình 4.6.

Hình 4.6. 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 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>Mooc kéo theo:</i> Trục sau kép, bánh kép

Nhóm xe	Hình vẽ mô tả	Đặc điểm xe
N9		Xe container 5 trục <i>Đầu kéo:</i> Trục trước đơn, bánh đơn Trục sau kép, bánh kép <i>Moóc 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>Moóc kéo theo:</i> Trục sau ba, bánh kép

Xét tuyến đường thiết kế theo tiêu chuẩn đường cấp III đồng bằng với 4 làn xe theo 2 chiều xe chạy. Lưu lượng giao thông dự báo năm đầu và hệ số tăng trưởng được thể hiện trong Bảng 4.6. Thời hạn thiết kế là 15 năm và 16 năm.

Bảng 4.6. Lưu lượng xe dự báo năm đầu và hệ số tăng trưởng xe.

Loại xe	Phân nhóm	Lưu lượng xe năm đầu (xe/nđ)	Tỉ lệ (%)	Hệ số tăng trưởng (%)
Xe khách nhỏ	N5	154	72,03	5
Xe khách lớn		144		5
Xe tải nhẹ 2 trục		101		5
Xe tải trung 2 trục		96		5
Xe tải nặng 3 trục	N6	101	14,69	5
Xe tải nặng 4 trục	N8	53	7,69	5
Xe container 5 trục	N9	17	2,52	5
Xe container 6 trục	N10	21	3,08	5
Tổng		686	100	

Từ các số liệu về lưu lượng xe và hệ số tăng trưởng xe của các loại xe, nghiên cứu tính toán được tổng số xe các loại tích lũy cuối mỗi giai đoạn đánh giá và thể hiện ở Bảng 4.7.

Bảng 4.7. Số liệu giao thông tính toán trong phân tích M-E

Thời gian	Số xe nặng tích lũy (xe)
2025 (năm đầu)	686
2040 (15 năm)	2.224.840
2041 (16 năm)	2.413.770

4.4.2.3. Xác định các thông số của vật liệu trong phân tích M-E

Các thông số cần thiết như M_R của đất nền, lớp móng CPĐĐ loại 1, CPĐĐ loại 2, CP thiên nhiên tham khảo ở tiêu chuẩn 22TCN 274-01 và nghiên cứu [11].

Các thông số $|E^*|$ của BTNC 12,5, BTN sử dụng 0,4% sợi bazan được tính toán từ các đường cong chủ tương ứng ở các tần số và nhiệt độ yêu cầu ở Chương 3. Thông số $|E^*|$ của BTNC 19 tham khảo kết quả thực nghiệm nghiên cứu [11].

4.4.2.4. Tiêu chuẩn giới hạn

Các tiêu chuẩn giới hạn thiết kế tham khảo đề xuất cho đường QL, đường cấp III-ĐB trong nghiên cứu [13], độ tin cậy $R = 90\%$, các giá trị cụ thể được trình bày trong Bảng 4.8.

Bảng 4.8. 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)	4	90
2	Tổng chiều sâu LVBX toàn KCAĐ (mm)	25	90
3	Nứt mới từ đáy lên của lớp BTN (% diện tích)	25	90
4	Nứt do nhiệt của lớp BTN (m/km)	190	90
5	Nứt mới từ trên xuống của lớp BTN (m/km)	380	90
6	Chiều sâu LVBX trong các lớp BTN (mm)	12,5	90

4.4.2.5. Kết quả phân tích kết cấu mặt đường theo M-E**Bảng 4.9. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E sau 15 năm sử dụng**

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	Kết cấu 1		Kết cấu 2		Kết cấu 3	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	4	3,64	Đạt	3,64	Đạt	3,63	Đạt

2	Tổng chiều sâu LVBX toàn KCAĐ (mm)	25,0	24,45	Đạt	24,49	Đạt	24,05	Đạt
3	Nứt mỗi từ đáy lên của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	25,0	1,82	Đạt	1,91	Đạt	1,81	Đạt
4	Nứt do nhiệt của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	190	5,15	Đạt	5,15	Đạt	5,15	Đạt
5	Nứt mỗi từ trên xuống của BTNC 12,5 (m/km)	380	117,33	Đạt	116,44	Đạt	113,14	Đạt
6	Chiều sâu LVBX trong các lớp BTN (mm)	12,5	11,36	Đạt	11,13	Đạt	11,08	Đạt

Bảng 4.10. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E sau 16 năm sử dụng

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	Kết cấu 1		Kết cấu 2		Kết cấu 3	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	4	3,68	Đạt	3,68	Đạt	3,67	Đạt
2	Tổng chiều sâu LVBX toàn KCAĐ (mm)	25,0	25,0	Không đạt	25,04	Không đạt	24,59	Đạt
3	Nứt mỗi từ đáy lên của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	25,0	1,87	Đạt	1,97	Đạt	1,85	Đạt
4	Nứt do nhiệt của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	190	5,15	Đạt	5,15	Đạt	5,15	Đạt
5	Nứt mỗi từ trên xuống của BTNC 12,5 (m/km)	380	124,75	Đạt	123,32	Đạt	119,83	Đạt
6	Chiều sâu LVBX trong các lớp BTN (mm)	12,5	11,73	Đạt	11,50	Đạt	11,44	Đạt

Chi tiết kết quả phân tích kết cấu áo đường mềm theo phương pháp M-E được trình bày ở Phụ lục 11. Từ các kết quả này có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Khi thời gian khai thác là 15 năm, với cùng điều kiện thời tiết khí hậu, lưu lượng xe, lớp mặt dưới và các lớp móng, kết cấu 2 sử dụng BTN chứa 0,4% sợi bazan làm lớp mặt trên có chiều dày giảm 20% so với kết cấu 1 nhưng vẫn đảm bảo các đặc tính khai thác tương đương với kết cấu 1.

- Khi thời gian khai thác là 16 năm, kết cấu 3 thỏa mãn tất cả các đặc tính khai thác, trong khi kết cấu 1 và kết cấu 2 không đạt tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu.

Như vậy, với kết quả phân tích KCAĐ phương pháp M-E khi thời gian sử dụng 15 năm và 16 năm cho thấy, BTN sử dụng 0,4% sợi bazan khi được ứng dụng làm lớp mặt trên của KCAĐ mềm sẽ đem lại những lợi ích nhất định về mặt kinh tế và kỹ thuật so với BTN không sử dụng sợi bazan.

4.5. Xác định sơ bộ chi phí xây dựng kết cấu áo đường khi sử dụng sợi bazan

4.5.1. Các căn cứ lập chi phí xây dựng kết cấu áo đường

Nghị định 10/2021/NĐ-CP ngày 09/2/2021 về quản lý chi phí đầu tư xây dựng;

Nghị định số 90/2019/NĐ-CP ngày 15/11/2019 của Thủ tướng Chính phủ quy định mức lương tối thiểu vùng đối với người lao động làm việc theo hợp đồng lao động;

Thông tư 11/2021/TT-BXD ngày 31/08/2021 về hướng dẫn xác định và quản lý chi phí đầu tư xây dựng;

Thông tư 12/2021/TT-BXD ngày 31/08/2021 về ban hành định mức xây dựng;

Thông tư 13/2021/TT-BXD ngày 31/08/2021 về hướng dẫn phương pháp xác định các chỉ tiêu kinh tế kỹ thuật và đo bóc khối lượng công trình;

Một số nghị định, thông tư, văn bản liên quan khác đang có hiệu lực;

Đơn giá vật liệu được lấy theo thông báo giá số 03/2023/CBGVL-SXD ngày 01/03/2023 của Sở Xây dựng Hà Nội. Giá nhựa đường lấy theo thông báo giá của nhà sản xuất Petrolimex tháng 7/2023. Giá sợi bazan lấy theo thông báo giá của nhà cung cấp;

Đơn giá ca máy lấy theo quyết định số 935/QĐ-SXD ngày 30/12/2022 UBND thành phố Hà Nội;

Đơn giá nhân công lấy theo quyết định số 934/QĐ-SXD ngày 30/12/2022 UBND thành phố Hà Nội;

4.5.2. Kết quả sơ bộ xác định các chi phí xây dựng kết cấu áo đường

Bảng dự toán sơ bộ chi phí xây dựng kết cấu áo đường được trình bày chi tiết ở Phụ lục 8 và được tổng hợp ở Bảng 4.11.

Bảng 4.11. Tổng hợp sơ bộ chi phí xây dựng các KCAD

ST T	NỘI DUNG CHI PHÍ	ĐƠN VỊ	LOẠI KẾT CẤU		
			KC1	KC2	KC3
I	CHI PHÍ SẢN XUẤT				
	BTN 12,5	đ/T	1,056,671		
	BTN_Bazan 0,4	đ/T		1,701,670	1,701,670
II	CHI PHÍ XÂY DỰNG	đ/ m²	818,530	860,680	910,419
	BTN 12,5 dày 5cm	đ/ m ²	183,758	-	-
	BTN_Bazan 0,4	đ/ m ²	-	225,909	275,648
	BTN 19 dày 7cm	đ/ m ²	201,876	201,876	201,876
	Cấp phối đá dăm loại 1 dày 15 cm	đ/ m ²	82,192	82,192	82,192
	Cấp phối đá dăm loại 2 dày 30 cm	đ/ m ²	158,887	158,887	158,887
	Cấp phối thiên nhiên dày 30 cm	đ/ m ²	155,041	155,041	155,041
	Tưới nhựa thấm bảm TCN 1 kg/m ²	đ/ m ²	23,725	23,725	23,725
	Tưới nhựa dính bảm TCN 0,5 kg/ m ²	đ/ m ²	13,050	13,050	13,050

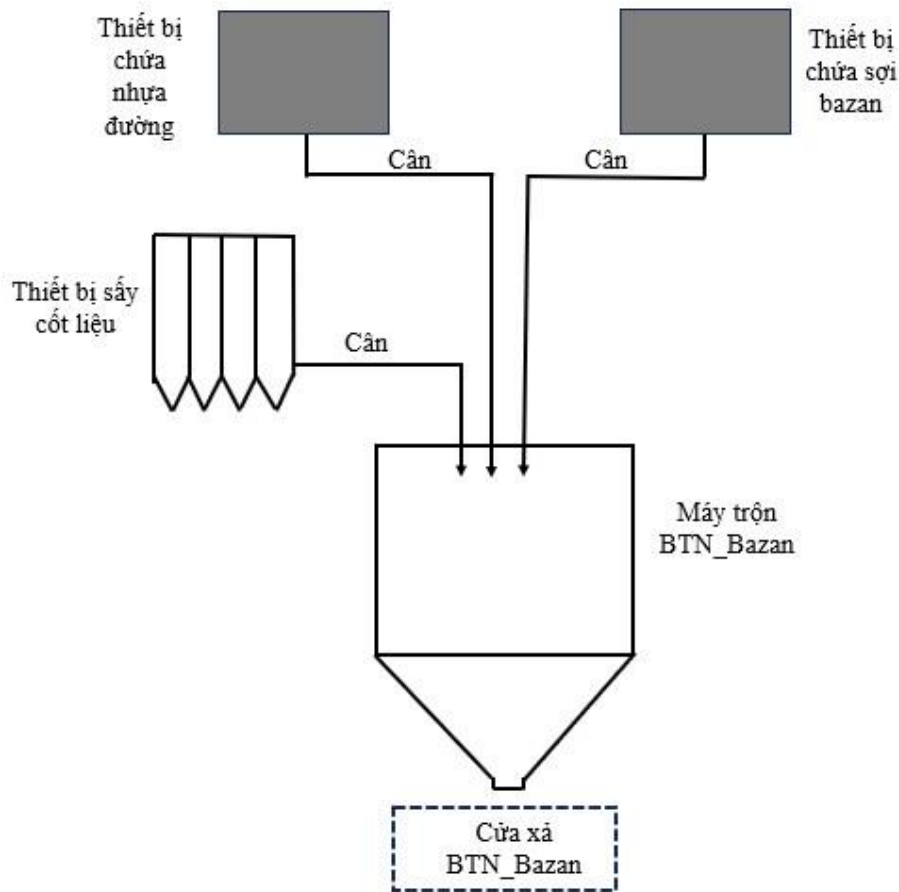
Kết quả tính toán sơ bộ các chi phí cho thấy, mặc dù chi phí sản xuất BTN_Bazan 0,4 cao hơn BTN đối chứng 1,6 lần nhưng tổng chi phí xây dựng kết cấu áo đường khi sử dụng BTN_Bazan 0,4 dày 4cm và 5cm làm lớp mặt trên cao hơn 1,05 và 1,11 lần nếu thay thế BTNC 12,5 dày 5cm. Tuy nhiên, dự toán sơ bộ đang sử dụng báo giá sợi bazan trên thị trường trong bối cảnh tính ứng dụng thực tế của nó chưa cao, khối lượng sử dụng ít nên giá thành chưa có tính cạnh tranh cao. Trong tương lai, khi sợi bazan được ứng dụng rộng rãi trong xây mặt với khối lượng lớn thì chắc chắn giá thành sợi bazan sẽ được giảm đáng kể. Do vậy, việc ứng dụng sợi bazan trong xây dựng KCAD cho các công trình giao thông hứa hẹn sẽ mang lại nhiều lợi ích về kinh tế xã hội, góp phần vào sự phát triển bền vững nói chung.

4.6. Đề xuất sơ bộ hướng chế tạo bê tông nhựa sử dụng sợi bazan ngoài trạm trộn

Trạm trộn BTN nóng là một hệ thống phức tạp dùng để trộn và gia nhiệt các loại cốt liệu với nhau và nhựa đường theo một tỷ lệ nhất định để tạo ra hỗn hợp BTN nóng đồng nhất có nhiệt độ thích hợp. Toàn bộ quá trình phức tạp này được thực hiện thông qua một trung tâm điều khiển. Hiện nay, công nghệ chế tạo BTN_Bazan ngoài thực tế chưa được ban hành thành tiêu chuẩn, mới đang trong giai đoạn nghiên cứu kỹ thuật. Nhìn chung, việc sản xuất BTN_Bazan tại trạm trộn cũng gần giống như BTN thông thường, cần lưu ý khi cho sợi vào hỗn hợp BTN không bị vón cục và đảm bảo tối đa sự phân tán đồng đều. Muốn vậy, sợi phải được đựng trong thùng chứa sạch, kín, chống ẩm tốt và cần có thiết bị phân tán trong quá trình đưa sợi vào máy trộn. Với việc sử dụng phương pháp trộn khô như đã đề cập ở chương 2, nghiên cứu đề xuất sơ bộ các bước trong quá trình sản xuất BTN_Bazan ngoài trạm trộn như sau:

- Cốt liệu lớn, nhỏ, bột khoáng sau khi được sấy nóng ở nhiệt độ cao (khoảng $165 - 170^{\circ}\text{C}$) được cân đo từng loại theo thiết kế rồi đưa vào máy trộn BTN;
- Sợi bazan được đựng trong thùng kín cũng được cân đo theo đúng hàm lượng thiết kế và cho vào máy trộn và trộn cùng cốt liệu trong khoảng thời gian 2 phút;
- Nhựa đường sau khi được làm nóng đến nhiệt độ đủ lỏng được cân đo theo đúng tỷ lệ và cho vào máy trộn. Tại đây, tiếp tục trộn hỗn hợp trong khoảng thời gian 2 phút. Quá trình sản xuất BTN_Bazan luôn được kiểm soát tốt nhiệt độ ($150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$).

Quy trình sản xuất BTN_Bazan ở trạm trộn được thể hiện ở Hình 4.7. Cần lưu ý rằng đây chỉ là đề xuất sơ bộ và vẫn tồn tại hạn chế. Thời gian trộn hỗn hợp BTN là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến quy trình sản xuất và các chỉ tiêu kinh tế. Việc sử dụng thời gian trộn tương đối dài có thể dẫn đến gia tăng giá thành sản xuất. Tuy nhiên, việc lựa chọn thời gian trộn là 4 phút tạm thời là một sự lựa chọn an toàn. Nó giúp giảm thiểu các sai số trong quá trình thí nghiệm và đảm bảo sợi bazan được trộn đều trong hỗn hợp BTN. Để có thể có thời gian trộn hợp lý hơn, cần tiến hành các thử nghiệm khác để xem xét ảnh hưởng của thời gian trộn tới các chỉ tiêu cơ lý của BTN. Qua đó, có thể giảm thiểu tối đa thời gian trộn mà vẫn đảm bảo hiệu suất làm việc của BTN.



Hình 4.7. Quy trình sản xuất BTN_Bazan ở trạm trộn

4.7. Kết luận chương 4

Từ các kết quả nghiên cứu ở chương 4, có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Có thể ứng dụng các thuật toán ML để xây dựng các công cụ dự báo nhanh và chính xác độ ổn định MS của BTN sử dụng sợi bazan. Đánh giá mô hình ML xây dựng đã so sánh và kiểm chứng với các kết quả thí nghiệm trong luận án và cho thấy hiệu suất dự báo tốt;
- Kết quả kiểm toán KCAĐ theo TCCS 38:2022 của 3 kết cấu đề xuất (kết cấu đối chứng BTNC 12,5 và kết cấu sử dụng sợi bazan) đều đạt;
- Phân tích KCAĐ mềm theo phương pháp M-E cho thấy ưu điểm của BTN sử dụng 0,4% sợi bazan khi được sử dụng làm lớp mặt trên của KCAĐ mềm so với phương án sử dụng BTNC 12,5. Với thời hạn thiết kế 15 năm, KCAĐ mềm có sử dụng BTN sợi bazan 0,4% dày 4 cm (giảm 20% chiều dày lớp mặt trên) có thể đáp ứng tuyến đường có tổng số xe nặng tích lũy tương đương khi sử dụng BTNC 12,5 dày 5 cm. Khi thời hạn thiết kế 16 năm, BTN sợi bazan 0,4% dày 5cm thỏa mãn tất cả các đặc tính khai thác, trong khi BTNC 12,5 có cùng chiều dày không đạt LVBX toàn kết cấu;

- Kết quả xác định sơ bộ các chi phí xây dựng kết cấu áo đường cho thấy tổng chi phí xây dựng kết cấu áo đường khi sử dụng BTN_Bazan 0,4% dày 4cm và 5cm làm lớp mặt trên cao hơn 1,05 và 1,11 lần nếu thay thế BTNC 12,5 dày 5cm;
- Đã đề xuất được sơ bộ hướng chế tạo BTN sử dụng sợi bazan ngoài trạm trộn.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. KẾT LUẬN

1. Những kết quả đạt được

Bằng các phương pháp nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng và thí nghiệm trong phòng thí nghiệm, luận án đã có một số đóng góp về mặt khoa học và thực tiễn như sau:

1. Có thể chế tạo BTN sử dụng sợi bazan trong điều kiện Việt Nam đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật của vật liệu xây dựng mặt đường theo tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam. Xác định được hàm lượng nhựa tối ưu của các hỗn hợp BTN tương ứng với các hàm lượng sợi bazan 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5% khối lượng hỗn hợp;

2. Đề xuất được hàm lượng sợi bazan (0,4% khối lượng hỗn hợp) để chế tạo BTN nhằm cải thiện một số chỉ tiêu cơ lý của BTN như MS, khả năng kháng LVBX, khả năng kháng nứt, cường độ kéo uốn R_{ku} , mô đun đàn hồi tĩnh và mô đun đàn hồi động phù hợp với điều kiện Việt Nam và các vật liệu đầu vào trong nghiên cứu.

3. Xây dựng các đường cong chủ $|E^*|$ của BTN sử dụng sợi bazan với các hàm lượng 0,1%; 0,2%; 0,3%; 0,4% và 0,5% khối lượng hỗn hợp ở nhiệt độ tham chiếu 30°C cho phép xác định mô đun động $|E^*|$ của các loại BTN sử dụng sợi bazan ở nhiệt độ, tần số xác định. Bước đầu chỉ ra khả năng ứng dụng mô hình lưu biến 2S2P1D để mô hình hóa mô đun động $|E^*|$ của BTN sử dụng sợi bazan.

4. Đề xuất tính toán, áp dụng, mô phỏng, kiểm toán và đánh giá KCAĐ mềm với lớp mặt sử dụng BTN sợi bazan với hàm lượng 0,4%. Bước đầu cho thấy đây là một giải pháp hiệu quả để giảm chiều dày cũng như nâng cao chất lượng khai thác của KCAĐ.

5. Xây dựng được công cụ GUI để dự báo MS của BTN sử dụng sợi bazan. Đây là một phần mềm cung cấp giao diện người dùng đồ họa trực quan, cho phép người dùng nhập dữ liệu, điều chỉnh các tham số, qua đó phân tích dữ liệu về sự tương tác và hiệu suất của sợi bazan trong BTN.

2. Những hạn chế

- Các nghiên cứu của Luận án mới thực hiện ở trong phòng thí nghiệm mà chưa có điều kiện thử nghiệm ở hiện trường;

- Nghiên cứu mới chỉ thực hiện với một loại sợi bazan có nguồn gốc ở Trung Quốc, với chiều dài sợi 12mm, chưa có điều kiện thử nghiệm sợi bazan với chiều dài sợi khác như: 3mm, 6mm, 9mm, 18mm và 24mm.

II. KIẾN NGHỊ

Từ kết quả nghiên cứu trong phòng kiến nghị có thể ứng dụng thử nghiệm tại hiện trường hỗn hợp BTN sử dụng sợi bazan, trên các đoạn đường ô tô cấp cao có quy mô giao thông lớn trong điều kiện Việt Nam.

III. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Nghiên cứu thực nghiệm cho các loại BTN khác, các loại cốt liệu khác sử dụng đá vôi, sử dụng nhựa đường khác, tiến tới những số liệu thí nghiệm phổ quát hơn cho điều kiện Việt Nam;

2. Nghiên cứu thử nghiệm với các loại cốt sợi bazan khác (chiều dài, đường kính sợi thay đổi) để có đánh giá tổng quan hơn về ảnh hưởng của sợi bazan tới những đặc tính cơ lý của BTN;

3. Tiến hành phân tích và so sánh chi tiết hơn về kỹ thuật và kinh tế đối với KCAĐM có sử dụng BTN sợi bazan phân tán, qua đó tiến hành đề xuất công nghệ trộn tại trạm trộn và thực hiện thí nghiệm ngoài hiện trường.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Ba-Nhan Phung**, Thanh-Hai Le, Thuy-Anh Nguyen, Huong-Giang Thi Hoang, Hai-Bang Ly (2023), *Novel approaches to predict the Marshall parameters of basalt fiber asphalt concrete*, Construction and Building Materials, Accepted 1 August 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132847>.
2. **Ba Nhan Phung**, Thanh-Hai Le, Minh-Khoa Nguyen, Thuy-Anh Nguyen, Hai-Bang Ly (2023), *Practical Numerical Tool for Marshall Stability Prediction Based On Machine Learning: An Application for Asphalt Concrete Containing Basalt Fiber*, Journal of Science and Transport Technology, Accepted 29/9/2023, <https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.en.3.3.27-45>.
3. **Ba Nhan Phung**, Thanh-Hai Le, Hai-Van Thi Mai, Thuy-Anh Nguyen, Hai-Bang Ly (2023), *Advancing basalt fiber asphalt concrete design: A novel approach using gradient boosting and metaheuristic algorithms*, Case Studies in Construction Materials, Accepted 2 October 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02528>.
4. **ThS. Phùng Bá Nhân**, TS. Nguyễn Minh Khoa, TS. Lý Hải Bằng, TS. Lê Thanh Hải (2023), *Nghiên cứu đánh giá mô đun đàn hồi tĩnh của hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng sợi basalt*, Tạp chí Giao Thông Vận Tải, số tháng 10 năm 2023, trang 75-78.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

A. TIẾNG VIỆT

- [1] Bộ Khoa học công nghệ - TCVN 7493 (2005), *Bitum – Yêu cầu kỹ thuật*.
- [2] Bộ Khoa học và công nghệ - TCVN 8820 (2011), *Hỗn hợp bê tông nhựa nóng - Thiết kế theo phương pháp Marshall*.
- [3] Bộ Khoa học và công nghệ - TCVN 8860-1 (2011), *Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 1: Xác định độ ổn định, độ dẻo Marshall*.
- [4] Bộ Khoa học và công nghệ - TCVN 6910:1-6 (2001), *Độ chính xác (độ đúng và độ chụm) của phương pháp đo và kết quả đo*.
- [5] Bộ Khoa học và công nghệ - TCVN 13567:2022, *Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu*.
- [6] Bộ Giao thông vận tải (2014), *Thông tư 27/2014/TT-BGTVT, Quy định về quản lý chất lượng vật liệu nhựa đường sử dụng trong xây dựng công trình giao thông*.
- [7] Bộ GTVT (2014), *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, ban hành cùng Quyết định số 858/QĐ-BGTVT, ngày 26/3/2014*.
- [8] Bộ GTVT (2014), *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, ban hành cùng Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT, ngày 29/4/2014*.
- [9] Bộ GTVT (2022), *TCCS 38:2022/TCĐBVN, Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế*.
- [10] 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*.
- [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 Đại học GTVT, Hà Nội*.
- [12] Lương Văn Hùng (2018), *Nghiên cứu ảnh hưởng của sợi Bazalt đến một số tính chất của bê tông chất lượng siêu cao, Tạp chí Xây dựng Việt Nam*.
- [13] 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*.
- [14] Vũ Phương Thảo (2015), *Nghiên cứu ảnh hưởng cốt sợi thủy tinh phân tán đến khả năng chống mỏi và chống lún vết bánh xe của bê tông asphalt trong điều kiện Việt Nam, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học GTVT*.

B. TIẾNG ANH

- [15] AASHTO T245-15 (2015), *Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus*.
- [16] AASHTO-T324 (2014), *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

- [17] AASHTO TP62-03 (2001), *Determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [18] Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). *Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review*. Construction and Building Materials, 24(6), 871-877.
- [19] Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A. A., Al-Qaness, M. A., & Gandomi, A. H. (2021). Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm. Computers & Industrial Engineering, 157, 107250.
- [20] Alfalah, A., Offenbacher, D., Ali, A., Mehta, Y., Elshaer, M., & Decarlo, C. (2021). *Evaluating the impact of fiber type and dosage rate on laboratory performance of Fiber-Reinforced asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 310, 125217.
- [21] Ameri, M., Nemati, M., & Shaker, H. (2019). *Experimental and numerical investigation of the properties of the Hot Mix Asphalt Concrete with basalt and glass fiber*. Frattura ed Integrità Strutturale, 13(50), 149-162.
- [22] Amuthakkannan, P., Manikandan, V., Jappes, J. W., & Uthayakumar, M. (2013). *Effect of fibre length and fibre content on mechanical properties of short basalt fibre reinforced polymer matrix composites*. Materials Physics and Mechanics, 16(2), 107-117.
- [23] Arabani, M., & Shabani, A. (2019). *Evaluation of the ceramic fiber modified asphalt binder*. Construction and Building Materials, 205, 377-386.
- [24] ASTM C670-15 (2015), Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials.
- [25] ASTM D6927-15 (2015), *Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures*.
- [26] ASTM E178-15 (2015), Standard Practice for Dealing With Outlying Observations.
- [27] ASTM E177-13 (2013), Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods.
- [28] ASTM D8225-19 (2019), *Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [29] Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., ... & Mendis, P. (2022). *Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications*. Automation in Construction, 141, 104440.
- [30] Bonaquist, R. F. (2011), *Precision of the dynamic modulus and flow number tests conducted with the asphalt mixture performance tester* (Vol. 702). Transportation Research Board.
- [31] Bo Li., Zhou, Y., Wu, Z., Kang, A., Wu, B., & Luo, C. (2023). *Influence of Basalt Fiber on Performance of Thin Overlayer Asphalt Mixtures Based on Multiple Experimental Methods*. Frontiers in Energy Research, 11, 1328676.
- [32] Busching, H. W., & Antrim, J. D. (1968), *Fiber reinforcement of bituminous mixtures*, In Assoc Asphalt Paving Technol Proc.
- [33] CDOT (2018), M-E pavement design manual, USA.

- [34] Campione, G., La Mendola, L., Monaco, A., Valenza, A., & Fiore, V. (2015). *Behavior in compression of concrete cylinders externally wrapped with basalt fibers*. Composites Part B: Engineering, 69, 576-586.
- [35] Celauro, C., & Praticò, F. G. (2018). *Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses*. Construction and Building Materials, 170, 245-253.
- [36] Cetin, A., Evirgen, B., Karslioglu, A., & Tuncan, A. (2021). *The effect of basalt fiber on the performance of stone mastic asphalt*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 65(1), pp. 299–308, 2021.
- [37] C. Chai, Y. Cheng, Y. Zhang, B. Zhu, H. Liu, *Mechanical properties of crumb rubber and basalt fiber composite modified porous asphalt concrete with steel slag as aggregate*, Polymers. 12 (2020) 2552.
- [38] Cheng, Y., Wang, W., Gong, Y., Wang, S., Yang, S., & Sun, X. (2018). *Comparative study on the damage characteristics of asphalt mixtures reinforced with an eco-friendly basalt fiber under freeze-thaw cycles*. Materials, 11(12), 2488.
- [39] Chen, H., Xu, Q., Chen, S., & Zhang, Z. (2009). *Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures*. Materials & Design, 30(7), 2595-2603.
- [40] Chen, H., & Xu, Q. (2010). *Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder*. Fuel, 89(7), 1616-1622.
- [41] Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). *Xgboost: A scalable tree boosting system*. In Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining (pp. 785-794).
- [42] Chen, X., Zhang, Y., Huo, H., & Wu, Z. (2017). *Improving the tensile strength of continuous basalt fiber by mixing basalts*. Fibers and Polymers, 18, 1796-1803.
- [43] Chen, L., Li, W., Chen, M., Qian, Z., Chen, X., & Zheng, Z. (2023). *Bleeding mechanism and mitigation technique of basalt fiber-reinforced asphalt mixture*. Case Studies in Construction Materials, 19, e02442.
- [44] Chikhradze, N. M., Japaridze, L. A., & Abashidze, G. S. (2012). *Properties of basalt plastics and of composites reinforced by hybrid fibers in operating conditions*. In Composites and their applications (Vol. 1, pp. 223-246). Rijeka: InTech.
- [45] Cross, S.A and Brown, E.R., (1992), *Selection of Aggregate Properties to Minimize Rutting of Heavy Duty Pavement*, Effects of Aggregates of Mineral Fillers on Asphalt Mixtures Performance, ASTM STP1147, Richard C. Meininger, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1992.
- [46] Davar, A., Tanzadeh, J., & Fadaee, O. (2017). *Experimental evaluation of the basalt fibers and diatomite powder compound on enhanced fatigue life and tensile strength of hot mix asphalt at low temperatures*. Construction and Building Materials, 153, 238-246.
- [47] Dang Van Thanh, Cheng Pei Feng (2013), *Study on Marshall and Rutting test of SMA at abnormally high temperature*, Construction and Building Materials, Volume 47, Pages 1337-1341.
- [48] Dehghan, Z., & Modarres, A. (2017). *Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test*. Construction and Building Materials, 139, 384-393.
- [49] Fan, W. X., Kang, H. G., & Zheng, Y. X. (2010). *Experimental study of pavement performance of basalt fiber-modified asphalt mixture*. Journal of southeast university (english edition), 26(4), 614-617.

- [50] Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., & Valenza, A. (2015). *A review on basalt fibre and its composites*. Composites Part B: Engineering, 74, 74-94.
- [51] Freeman, R. D., Burati, J. L., Amirkhanian, S. N., & Bridges, W. C. (1989). *Polyester fibers in asphalt paving mixtures*. In Association of Asphalt Paving Technologists Proc (Vol. 58).
- [52] Fu, L., Jiao, Y., & Chen, X. (2022). *Reinforcement evaluation of different fibers on fracture resistance of asphalt mixture based on acoustic emission technique*. Construction and Building Materials, 314, 125606.
- [53] Fu, Z., Tang, Y., Ma, F., Wang, Y., Shi, K., Dai, J., ... & Li, J. (2022). *Rheological properties of asphalt binder modified by nano-TiO₂/ZnO and basalt fiber*. Construction and Building Materials, 320, 126323.
- [54] Fujie Zhou, Soohyok Im, Lijun Sun & Tom Scullion (2017). *Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design and QC/QA*. Journal Road Materials and Pavement Design, Volume 18, 2017 - Issue 4, Pages 405-427.
- [55] Gao, C., & Wu, W. (2018). *Using ESEM to analyze the microscopic property of basalt fiber reinforced asphalt concrete*. International Journal of Pavement Research and Technology, 11(4), 374-380.
- [56] G. Tan, W. Wang, Y. Cheng, Y. Wang, Z. Zhu, *Master curve establishment and complex modulus evaluation of SBS-modified asphalt mixture reinforced with basalt fiber based on generalized sigmoidal model*, Polymers. 12 (2020) 1586.
- [57] Guo, Q., Chen, Z., Liu, P., Li, Y., Hu, J., Gao, Y., & Li, X. (2021). *Influence of basalt fiber on mode I and II fracture properties of asphalt mixture at medium and low temperatures*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 112, 102884.
- [58] Guo, Q., Wang, H., Gao, Y., Jiao, Y., Liu, F., & Dong, Z. (2020). *Investigation of the low-temperature properties and cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete using the DIC technique*. Engineering Fracture Mechanics, 229, 106951.
- [59] Gu, X., Xu, T., & Ni, F. (2014). *Rheological behavior of basalt fiber reinforced asphalt mastic*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 29(5), 950-955.
- [60] Huang. T, J. Chen, M. Li, Y. Tang, S. Lv, H. Yu, H. Liu, W. Yan, *Investigation on three-dimensional failure criterion of asphalt mixture considering the effect of stiffness*, Construction and Building Materials. 285 (2021) 122431.
- [61] Huang, Y., Liu, Z., Liu, L., Zhang, Y., & Xu, Q. (2020). *Hybrid modification of stone mastic asphalt with cellulose and basalt fiber*. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 1-11.
- [62] Hui, Y., Men, G., Xiao, P., Tang, Q., Han, F., Kang, A., & Wu, Z. (2022). *Recent advances in basalt fiber reinforced asphalt mixture for pavement applications*. Materials, 15(19), 6826.
- [63] ISO 5725:1-6 (1994), Accuracy (trueness and precision) of measurement.
- [64] Kietzman, J. H. (1960). *Effect of short asbestos fibers on basic physical properties of asphalt pavement mixes*. Highway Research Board Bulletin, (270).
- [65] Jahromi, S. G., & Khodaii, A. (2008). *Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete*. Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV), 33.
- [66] Jahromi, S. G. (2015). *Effect of carbon nanofiber on mechanical behavior of asphalt concrete*. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 6(2), 57-66

- [67] Jiang, Y., & McDaniel, R. S. (1993). *Application of cracking and seating and use of fibers to control reflective cracking*. Transportation Research Record, 150-150.
- [68] Jiao, Y., Zhang, L., Guo, Q., Guo, M., & Zhang, Y. (2020). *Acoustic emission-based reinforcement evaluation of basalt and steel fibers on low-temperature fracture resistance of asphalt concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(5), 04020104.
- [69] Kong, L., Lu, Z., He, Z., Shen, Z., Xu, H., Yang, K., & Yu, L. (2022). *Characterization of crack resistance mechanism of fiber modified emulsified asphalt cold recycling mixture based on acoustic emission parameters*. Construction and Building Materials, 327, 126939.
- [70] Krzysztof Blazejowski (2011), *Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [71] Li, Z., Shen, A., Wang, H., Guo, Y., & Wu, H. (2020). *Effect of basalt fiber on the low-temperature performance of an asphalt mixture in a heavily frozen area*. Construction and Building Materials, 253, 119080.
- [72] Li, B., Liu, M., Kang, A., Zhang, Y., & Zheng, Z. (2023). *Effect of Basalt Fiber Diameter on the Properties of Asphalt Mastic and Asphalt Mixture*. Materials, 16(20), 6711.
- [73] Liu, L., Liu, Z., & Liu, J. (2020). *Effects of silane-coupling agent pretreatment on basalt fibers: analyzing the impact on interfacial properties and road performance*. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(4), 04020041.
- [74] Liu, F., Dong, A., Liu, C., & Wu, W. (2018). *Mix design of asphalt mixture used for the waterproof and anti-cracking layer in the rainy area of South China*. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 16(1_suppl), 112-118..
- [75] Lou, K., Xiao, P., Kang, A., Wu, Z., Li, B., & Lu, P. (2021). *Performance evaluation and adaptability optimization of hot mix asphalt reinforced by mixed lengths basalt fibers*. Construction and Building Materials, 292, 123373.
- [76] Lou, K., Kang, A., Xiao, P., Wu, Z., Li, B., & Wang, X. (2021). *Effects of basalt fiber coated with different sizing agents on performance and microstructures of asphalt mixture*. Construction and Building Materials, 266, 121155.
- [77] Lou, K., Wu, X., Xiao, P., Kang, A., Wu, Z., & Xia, Y. (2021). *Comprehensive study about effect of basalt fiber, gradation, nominal maximum aggregate size and asphalt on the anti-cracking ability of asphalt mixtures*. Applied Sciences, 11(5), 2289.
- [78] Luo, Y., Zhang, K., Xie, X., & Yao, X. (2019). *Performance evaluation and material optimization of Micro-surfacing based on cracking and rutting resistance*. Construction and building materials, 206, 193-200.
- [79] Mahrez, A., & Karim, M. R. (2010). *Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass*. International Journal of the Physical Sciences, 5(12), 1840-1847.
- [80] McDaniel, R. S. (2015). *Fiber additives in asphalt mixtures* (No. Project 20-05 (Topic 45-15)).
- [81] Moghadas Nejad, F., Vadood, M., & Baeetabar, S. (2014). *Investigating the mechanical properties of carbon fibre-reinforced asphalt concrete*. Road materials and pavement design, 15(2), 465-475.
- [82] Morova, N., Eriskin, E., Terzi, S., Karahancer, S., Serin, S., Saltan, M., & Usta, P. (2017). *Modelling Marshall Stability of fiber reinforced asphalt mixtures with ANFIS*.

2017 IEEE International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), 174-179.

- [83] N. Morova, *Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete*, Construction and Building Materials. 47 (2013) 175–180.
- [84] Nguyen, M. H., Trinh, S. H., & Ly, H. B. (2023). *Toward improved prediction of recycled brick aggregate concrete compressive strength by designing ensemble machine learning models*. Construction and Building Materials, 369, 130613.
- [85] Nguyen, M. H., & Ly, H. B. (2023). *Development of machine learning methods to predict the compressive strength of fiber-reinforced self-compacting concrete and sensitivity analysis*. Construction and Building Materials, 367, 130339.
- [86] Parnas, R., Shaw, M. T., & Liu, Q. (2007). *Basalt fiber reinforced polymer composites* (No. NETCR63).
- [87] Pirmohammad, S., Amani, B., & Shokorlou, Y. M. (2020). *The effect of basalt fibres on fracture toughness of asphalt mixture*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 43(7), 1446-1460.
- [88] Qin, X., Shen, A., Guo, Y., Li, Z., & Lv, Z. (2018). *Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers*. Construction and Building Materials, 159, 508-516.
- [89] Radziszewski, P., Sarnowski, M., Plewa, A., & Pokorski, P. (2018). *Properties of asphalt concrete with basalt-polymer fibers*. Archives of Civil Engineering, 64(4/I).
- [90] Ross, A. (2006). *Basalt fibers: alternative to glass?*. Composites Technology, 12(4).
- [91] Shadravan, S., Naji, H. R., & Bardsiri, V. K. (2019). *The Sailfish Optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for solving constrained engineering optimization problems*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 80, 20-34.
- [92] Shehadeh, A., Alshboul, O., Al Mamlook, R. E., & Hamedat, O. (2021). *Machine learning models for predicting the residual value of heavy construction equipment: An evaluation of modified decision tree, LightGBM, and XGBoost regression*. Automation in Construction, 129, 103827
- [93] Slebi-Acevedo, C. J., Lastra-González, P., Pascual-Muñoz, P., & Castro-Fresno, D. (2019). *Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review*. Construction and Building Materials, 200, 756-769.
- [94] Speer, T. L., & Kietzman, J. H. (1962). *Control of asphalt pavement rutting with asbestos fiber*. Highway Research Board Bulletin, (329).
- [95] Sun, X., Qin, X., Chen, Q., & Ma, Q. (2018). *Investigation of enhancing effect and mechanism of basalt fiber on toughness of asphalt material*. Petroleum Science and Technology, 36(20), 1710-1717.
- [96] Tanzadeh, R., Tanzadeh, J., & Tahami, S. A. (2019). *Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nano-silica*. Construction and building materials, 212, 467-475.
- [97] Wang, D., Wang, L., Gu, X., & Zhou, G. (2013). *Effect of basalt fiber on the asphalt binder and mastic at low temperature*. Journal of materials in civil engineering, 25(3), 355-364.
- [98] Wang, W., Cheng, Y., & Tan, G. (2018). *Design optimization of SBS-modified asphalt mixture reinforced with eco-friendly basalt fiber based on response surface methodology*. Materials, 11(8), 1311.
- [99] Wang, S., Kang, A., Xiao, P., Li, B., & Fu, W. (2019). *Investigating the effects of*

- chopped basalt fiber on the performance of porous asphalt mixture*. Advances in Materials Science and Engineering, 2019.
- [100] West, R., Kvasnak, A., Tran, N., Powell, B., & Turner, P. (2009), *Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes: Laboratory and Accelerated Field Performance Testing at the National Center for Asphalt Technology Test Track*. Transportation Research Record, 2126(1), 100–108. <https://doi.org/10.3141/2126-12>.
- [101] Wiljanen, B. R. (2003). *The pavement performance and life-cycle cost impacts of carbon fiber modified hot mix asphalt* (Doctoral dissertation, Michigan Technological University).
- [102] Wu, B., Pei, Z., Luo, C., Xia, J., Chen, C., & Kang, A. (2022). *Effect of different basalt fibers on the rheological behavior of asphalt mastic*. Construction and Building Materials, 318, 125718.
- [103] Wu, B., Meng, W., Xia, J., & Xiao, P. (2022). *Influence of basalt fibers on the crack resistance of asphalt mixtures and mechanism analysis*. Materials, 15(3), 744.
- [104] Wu, C., Li, L., Cheng, Y., Gu, Z., Lv, Z., Wang, R., & Guan, B. (2020). *Effect of Diatomite and Basalt Fibers on Pavement Performance and Vibration Attenuation of Waste Tires Rubber-Modified Asphalt Mixtures*. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 1-13.
- [105] Wu, B., Meng, W., Xia, J., & Xiao, P. (2022). *Influence of basalt fibers on the crack resistance of asphalt mixtures and mechanism analysis*. Materials, 15(3), 744.
- [106] W. Wang, Y. Cheng, P. Zhou, G. Tan, H. Wang, H. Liu, *Performance evaluation of styrene-butadiene-styrene-modified stone mastic asphalt with basalt fiber using different compaction methods*, Polymers. 11 (2019) 1006.
- [107] W.X. Fan, S.F. Zhang, L.Q. Liu, *Laboratory study of marshall of basalt fiber-modified asphalt mixture*, in: Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, 2013: pp. 1851–1857.
- [108] W. Wang, Y. Cheng, H. Chen, G. Tan, Z. Lv, Y. Bai, *Study on the performances of waste crumb rubber modified asphalt mixture with eco-friendly diatomite and basalt fiber*, Sustainability. 11 (2019) 5282.
- [109] Wu, J., Hong, R., & Gu, C. (2018). *Influence of fiber type on low-temperature fracture performance of presawed asphalt mixture beams*. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 1-7.
- [110] Xiang, Y., Xie, Y., & Long, G. (2018). *Effect of basalt fiber surface silane coupling agent coating on fiber-reinforced asphalt: From macro-mechanical performance to micro-interfacial mechanism*. Construction and Building Materials, 179, 107-116.
- [111] 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).
- [112] Xiong, R., Fang, J., Xu, A., Guan, B., & Liu, Z. (2015). *Laboratory investigation on the brucite fiber reinforced asphalt binder and asphalt concrete*. Construction and Building Materials, 83, 44-52.
- [113] Yang, K., He, Z., Li, D., Xu, H., & Kong, L. (2021). *Experimental study on basalt fiber crack resistance of asphalt concrete based on acoustic emission*. Materials, 14(15), 4096.

- [114] Y. Cheng, L. Li, P. Zhou, Y. Zhang, H. Liu, *Multi-objective optimization design and test of compound diatomite and basalt fiber asphalt mixture*, Materials. 12 (2019) 1461.
- [115] Y. Cheng, C. Chai, Y. Zhang, Y. Chen, B. Zhu, *A new eco-friendly porous asphalt mixture modified by crumb rubber and basalt fiber*, Sustainability. 11 (2019) 5754.
- [116] Y.X. Zheng, Y.C. Cai, Y.M. Zhang, *Laboratory study of pavement performance of basalt fiber-modified asphalt mixture*, in: Advanced Materials Research, Trans Tech Publ, 2011: pp. 175–179.
- [117] Zantalis, F., Koulouras, G., Karabetsos, S., & Kandris, D. (2019). *A review of machine learning and IoT in smart transportation*. Future Internet, 11(4), 94.
- [118] Zhang, X., & Liu, J. (2020). *Viscoelastic creep properties and mesostructure modeling of basalt fiber-reinforced asphalt concrete*. Construction and Building Materials, 259, 119680.
- [119] Zhang, J., Huang, W., Zhang, Y., Lv, Q., & Yan, C. (2020). *Evaluating four typical fibers used for OGFC mixture modification regarding drainage, raveling, rutting and fatigue resistance*. Construction and Building Materials, 253, 119131.
- [120] Zhao, L, J. Chen, S. Wang, *Using mineral fibers to improve asphalt and asphalt mixture behavior*, in: Traffic and Transportation Studies 2010, 2010: pp. 1352–1360.
- [121] Zhao, H., Guan, B., Xiong, R., & Zhang, A. (2020). *Investigation of the performance of basalt fiber reinforced asphalt mixture*. Applied Sciences, 10(5), 1561.
- [122] Zheng, Y., Cai, Y., Zhang, G., & Fang, H. (2014). *Fatigue property of basalt fiber-modified asphalt mixture under complicated environment*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 29(5), 996-1004.
- [123] Zuehlke, G. H. (1963). *Marshall and flexural properties of bituminous pavement mixtures containing short asbestos fibers*. Highway Research Record, (24).