

Công trình được hoàn thành tại:
Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải

Người hướng dẫn khoa học:

1. TS. Lý Hải Bằng

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải

2. TS. Nguyễn Minh Khoa

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp Trường
hợp tại Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải
vào hồi ngày tháng năm 2024

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Quốc Gia Việt Nam
- Thư viện Trường Đại học Công nghệ GTVT

MỞ ĐẦU

I. Tính cấp thiết của đề tài

Mặt đường bê tông nhựa (BTN) được sử dụng phổ biến trên thế giới và ở Việt Nam. Tại các dự án, các vị trí thông thường thì BTN chặt sử dụng nhựa thông thường không có phụ gia nhìn chung đáp ứng yêu cầu khai thác. Tuy nhiên, trong những điều kiện khắc nghiệt của môi trường ở Việt Nam hiện nay, trên các tuyến đường ô tô cấp cao có quy mô giao thông lớn thì hỗn hợp BTN không dùng phụ gia dễ xuất hiện các hư hỏng, tuổi thọ khai thác chưa đạt được như mong muốn như thiết kế.

Nhằm nâng cao chất lượng mặt đường BTN, đã có nhiều giải pháp ở Việt Nam và trên thế giới được áp dụng như: Thay đổi thành phần cấp phối hỗn hợp, cải thiện chất lượng nhựa đường, cải thiện chất lượng hỗn hợp BTN bằng cách sử dụng thêm phụ gia,.... 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, 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... Ở Việt Nam đã có một số tác giả nghiên cứu sử dụng sợi thủy tinh, sợi Forta FI, sợi cellulose... cho BTN, tuy nhiên chưa có nghiên cứu nào về việc sử dụng sợi bazan cho hỗn hợp BTN. 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 bê tông nhựa là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

II. Mục đích nghiên cứu

- 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 bê tông nhựa 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.

III. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Hỗn hợp bê tông nhựa với cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5mm sử dụng sợi bazan các hàm lượng sợi khác nhau làm lớp mặt cho KCAĐM.
- Phân tích tổng quan tình hình sử dụng sợi gia cường và sợi bazan sử dụng cho hỗn hợp BTN ở Việt Nam và trên thế giới;

- Nghiên cứu thí nghiệm trong phòng, xác định các chỉ tiêu kỹ thuật của hỗn BTN 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.

IV. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

- 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.
- 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 khi thiết kế KCMĐ theo tiêu chuẩn TCCS38:2022 và phương pháp cơ học – thực nghiệm (M-E);
- Đề xuất một số KCAĐ 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

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

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 khi uốn, tăng tuổi thọ mỏi dưới tác dụng của tải trọng trùng phục cũng như cải thiện đặc tính lún vết bánh xe.

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...

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

1.2.2. Tính chất của sợi bazan và các ứng dụng

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, khi so sánh tính chất của các sợi thương phẩm phổ biến, 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. Một số nghiên cứu đã có những đánh giá 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



Hình 1.2. Quy trình sản xuất sợi bazan.

1.2.3. Các nghiên cứu thiết kế thành phần bê tông nhựa sử dụng sợi bazan

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. 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. 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.

- 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.
- Phương pháp trộn khô: sợi được trộn cùng cốt liệu trước, sau đó trộn với chất kết dính. 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.
- Phương pháp kết hợp trộn khô và trộn ướt: cốt liệu và chất kết dính được trộn với nhau trước, sau đó sợi được thêm vào.

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

Các nghiên cứu thế giới 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.

Ngoài ra, các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của BTN khi sử dụng sợi bazan đã được đánh giá như các thông số Marshall, lún vệt bánh xe và độ ổn định động, sức kháng ẩm, mô đun đàn hồi. Tuy nhiên vẫn còn nhiều các chỉ tiêu quan trọng của BTN chưa được nghiên cứu.

Hiện nay, tại Việt Nam chưa có công bố nào về BTN sử dụng sợi bazan.

1.4. Nghiên cứu sử dụng học máy dự báo các đặc trưng bê tông nhựa

Trong những năm gần đây, với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ 4.0, cùng với tính đơn giản, tự động, hiệu quả và ứng dụng cao, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc sử dụng học máy (Machine learning - ML) dựa trên các kết quả thử nghiệm. Kỹ thuật này đang trở nên phổ biến và được sử dụng trong nhiều lĩnh vực đặc biệt là ngành xây dựng và giao thông vận tải.

1.5. Đánh giá các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước

Dựa vào các kết quả tổng hợp về các loại sợi gia cường và sợi bazan sử dụng cho hỗn hợp BTN ở Việt Nam và 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.

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

- 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. 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.

1.7. Phương pháp nghiên cứu

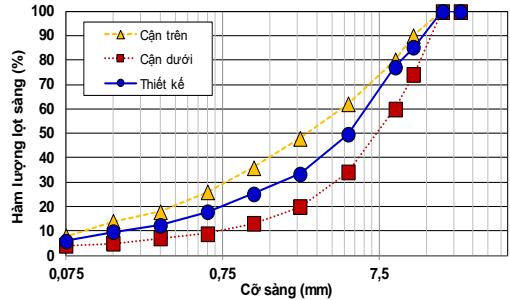
Luận án sử dụng tổng hợp các phương pháp nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm, xác suất thống kê, mô hình hóa, và học máy.

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 xây dựng chương trình thực nghiệm và xác định hàm lượng 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

- Phương pháp thiết kế: Marshall;
- Loại BTN: BTNC 12,5;
- Cốt liệu: Lấy tại mỏ đá Sunway, Quốc Oai, Hà Nội;
- Bột khoáng lấy từ mỏ đá Kiện Khê, Hà Nam;
- Chất kết dính: Nhựa đường 60/70 do Công ty TNHH Nhựa đường Petrolimex - Việt Nam cung cấp;



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

- Sợi: Sợi bazan được sử dụng trong nghiên cứu có nguồn gốc từ Trung Quốc, có màu nâu vàng, chiều dài sợi 12 mm;
- Hàm lượng sợi 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;
- Lựa chọn phương pháp trộn: trộn khô. 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;

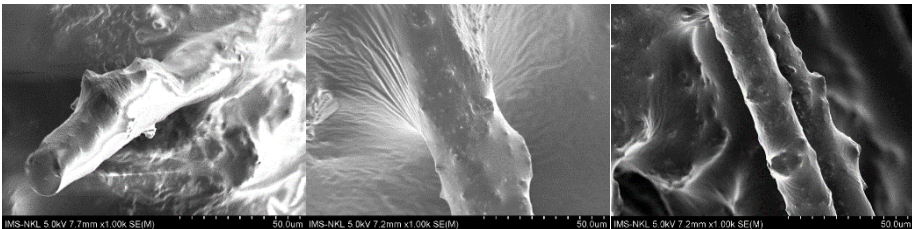
2.2. Phân tích liên kết và phân bố sợi bazan trong hỗn hợp bê tông nhựa

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

Nghiên cứu sử dụng phương pháp nghiên cứu hình thái vật chất bằng kính hiển vi điện tử quét SEM để chụp ảnh, phân tích hình thái sợi bazan, sợi bazan đã trộn trong BTN;

2.2.2. Kết quả thí nghiệm phân tích hình thái SEM của các vật liệu

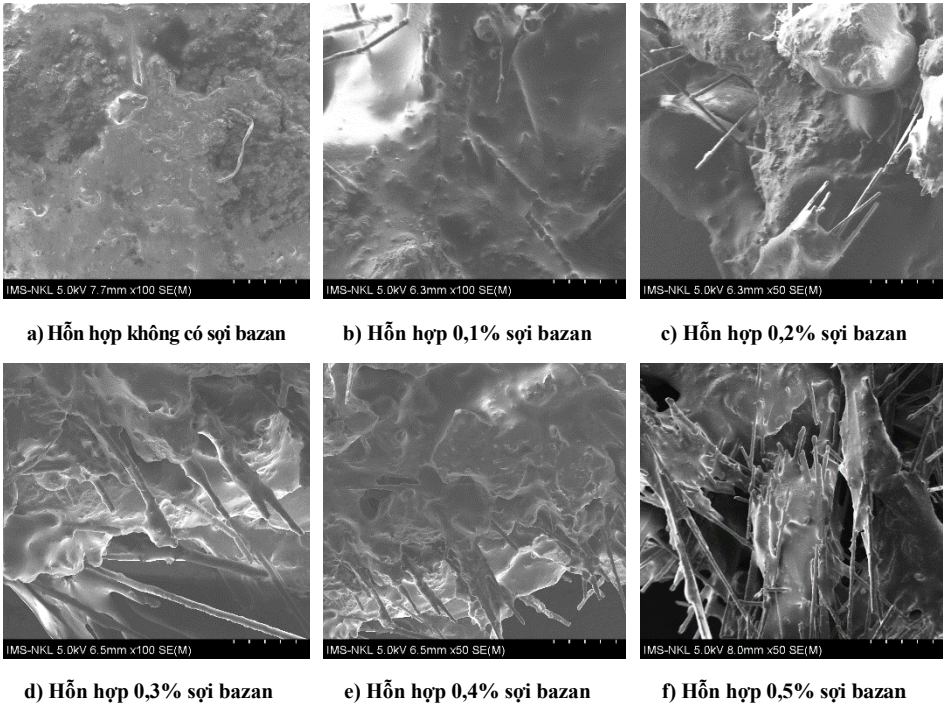
2.2.2.1. Liên kết và sự phân bố giữa sợi bazan và nhựa đường



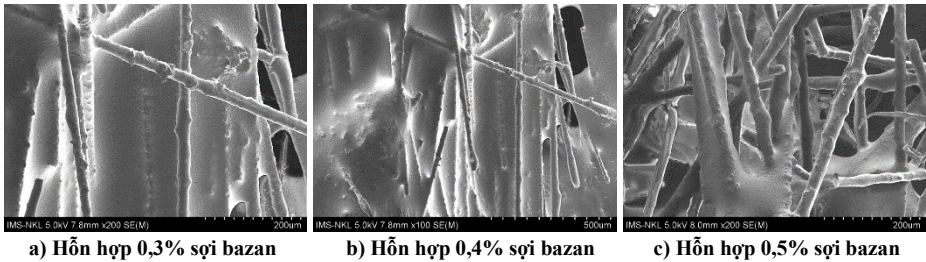
Hình 2.6. Liên kết giữa sợi bazan và chất kết dính.

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 thâm thấu bề mặt, lý thuyết về lớp chuyển tiếp và lý thuyết về liên kết hóa học. Với các lý thuyết này, 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.

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



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



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

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 2.7 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 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 bố, tác dụng của sợi sẽ không được phát huy tối đa.

2.3. Ứng dụng học máy trong hỗ trợ thiết kế thành phần BTN 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 này xây dựng hai bộ dữ liệu cho tham số 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

- Mô hình độ dốc tăng cường cấp cao Extreme Gradient Boosting;
- Thuật toán tối ưu hóa Sailfish Optimizer;
- Thuật toán tối ưu hóa Aquila Optimizer;
- Kỹ thuật xác thực chéo;
- Các chỉ tiêu đánh giá năng lực dự báo của mô hình: hệ số xác định (R^2), 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).

2.3.3. Quy trình xây dựng công cụ hỗ trợ thiết kế thành phần bê tông nhựa 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 gồm:

- Chuẩn bị cơ sở dữ liệu cho bài toán dự báo;
- Xây dựng mô hình dự báo và tối ưu hoá siêu tham số của mô hình;
- Đánh giá mô hình được tối ưu hoá và xác định mô hình tốt nhất;
- 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.

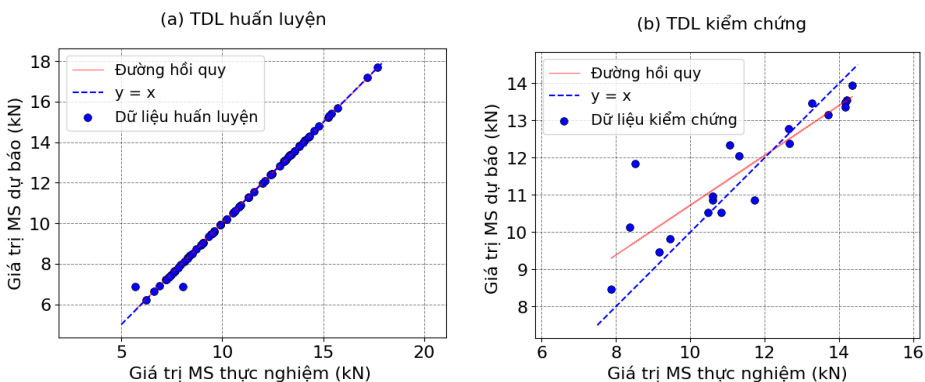
2.3.4. Xây dựng cơ sở dữ liệu

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 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.

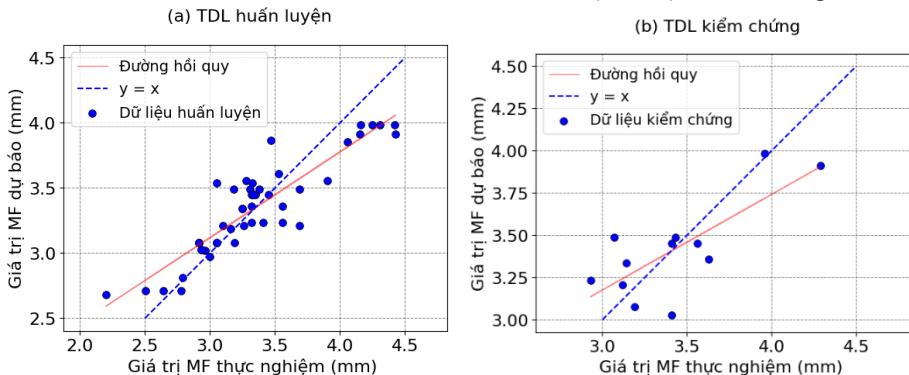
2.3.5. Điều chỉnh siêu tham số của mô hình XGB

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.

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



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

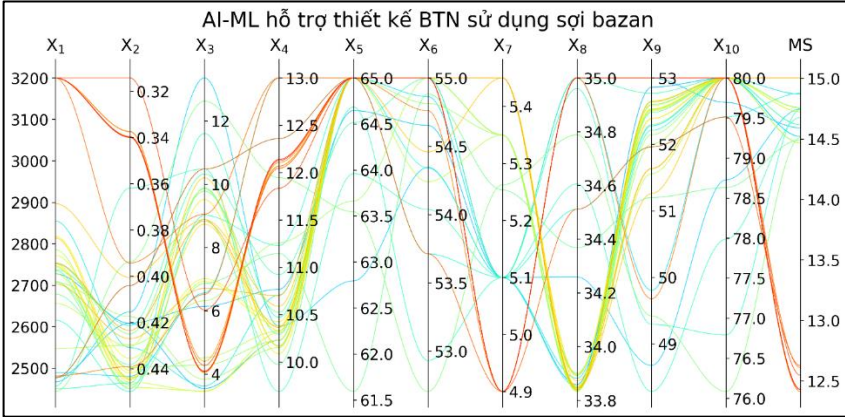


Hình 2.11. Phân tích hồi quy trong dự đoán MF dữ liệu đào tạo và kiểm chứng

- 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. 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 $MAPE = 0,033$. 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.
- 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. 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 $MAPE = 0,036$. 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.

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

Phần này trình bày 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. 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 (Hình 2.12).

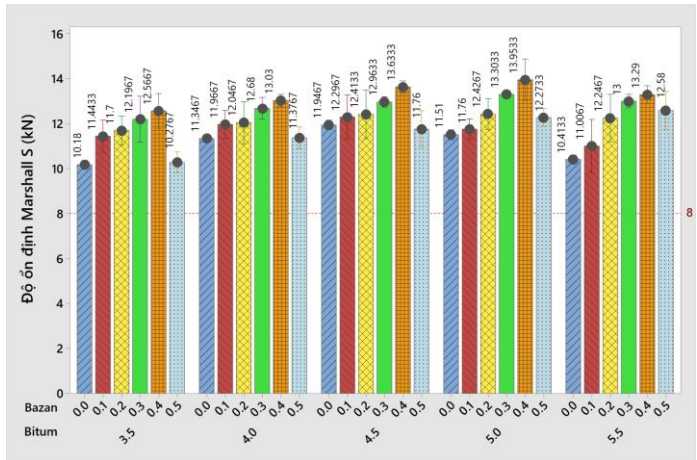


Hình 2.12. 40 mẫu BTN được đề xuất bởi mô hình XGB_SFO_40

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

2.4.1. Phân tích độ ổn định Marshall (MS)

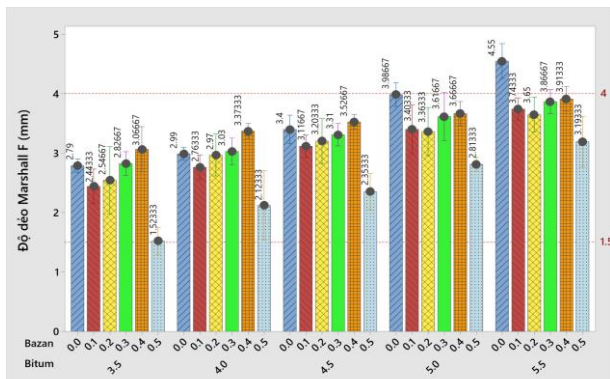
MS đạt giá trị cao nhất ở tất cả các hàm lượng nhựa đường khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4%. Khi không sử dụng sợi bazan thì MS đạt giá trị thấp nhất khi sử dụng hàm lượng nhựa đường là 3,5%; 4,0%; 5,0% và 5,5%. Khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,5% thì MS đạt giá trị thấp nhất với hàm lượng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



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

2.4.2. Phân tích độ dẻo Marshall (MF)

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 và TCVN 13567:2022, MF của hỗn hợp BTN nằm trong khoảng 1,5 đến 4,0 mm. 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.



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

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

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

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

Hàm lượng/ Ký hiệu	BTN_ Bazan 0,0	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

2.5. Kết luận chương 2

- 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;
- 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 các chỉ tiêu trong nghiên cứu

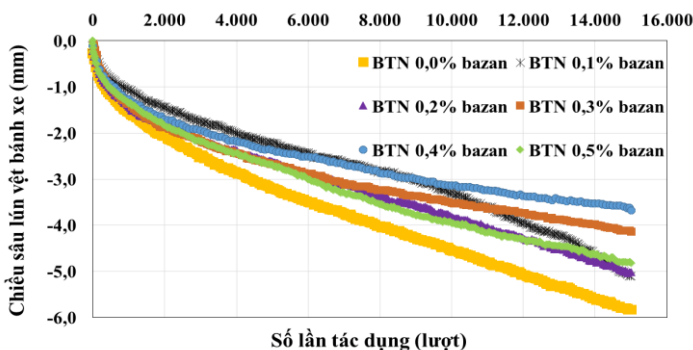
Các chỉ tiêu đánh giá hỗn hợp BTN trong nghiên cứu được đề xuất dựa trên các đặc tính của hỗn hợp BTN, đồng thời phục vụ tính toán thiết kế kết cấu áo đường mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN, gồm các chỉ tiêu sau:

1. Thí nghiệm đánh giá chiều sâu lún vệt bánh xe (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%.

3.2. Thí nghiệm đánh giá lún vệt bánh xe

Trong nghiên cứu này, việc đánh giá LVBX được thực hiện theo phương pháp A theo quyết định 1617/QĐ-BGTVT. Kết quả thu được là chiều sâu LVBX trong môi trường nước và điểm bong màng nhựa (nếu có). Kết quả thí nghiệm chiều sâu LVBX của BTN_{60/70} và BTN sợi bazan được thể hiện chi tiết ở Hình 3.4.



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

Kết quả thử nghiệm cho thấy, sau 15.000 lượt chạy trong môi trường nước ở 50°C, chiều sâu LVBX của tất cả 6 loại BTN đều nhỏ hơn giá trị cho phép (12,5 mm) theo yêu cầu của Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT. 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.

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 và kết quả đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá.

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn thể hiện ở 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).

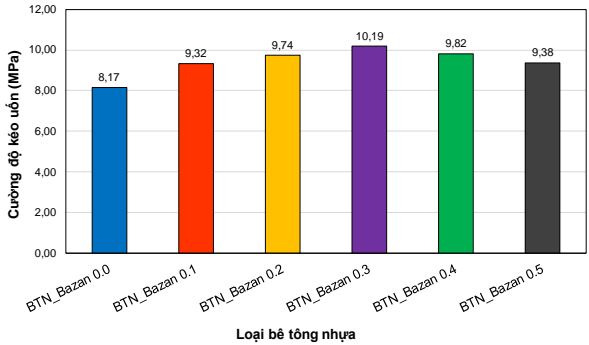
BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng tăng dần từ 0,1% lên 0,3% thì cường độ kéo uốn tăng dần, mức độ tăng so với BTN đối chứng lần lượt là 14%, 19% và 25%. Khi tiếp tục tăng hàm lượng sợi lên 0,4% và 0,5%, thì giá trị cường độ kéo uốn bắt đầu giảm, tuy nhiên vẫn tăng so với BTN đối chứng tương ứng là 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.

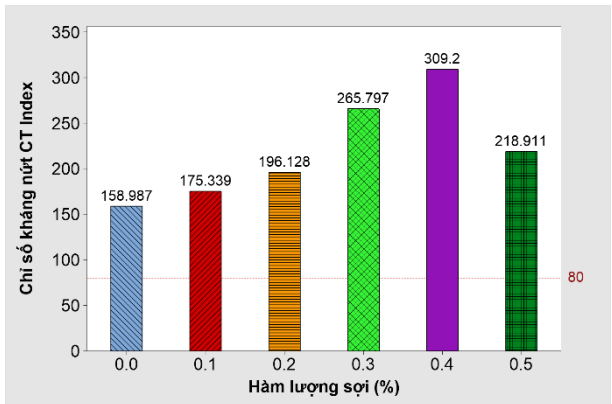
3.4. Thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của hỗn hợp BTN

Thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt tiến hành theo tiêu chuẩn ASTM D8225-19.

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



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



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.

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%.

3.5. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh

Mô đun đàn hồi tĩnh (E tĩnh) được thí nghiệm theo mô hình thí nghiệm nền từ biến tĩnh và tham khảo theo phụ lục C của tiêu chuẩn TCCS 38:2022. 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.

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. Kết quả 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).

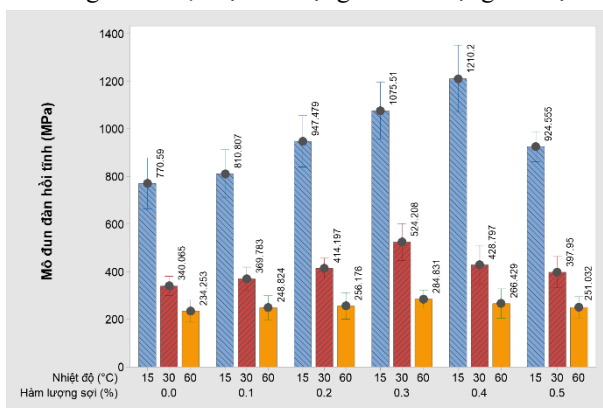
Ở nhiệt độ 15°C, mô đun đàn hồi tĩnh của BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4% đạt giá trị lớn nhất (1.210,20 MPa), cao hơn so với BTN đối chứng là 57%. Tiếp theo là BTN sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,3%, 0,2%, 0,5% và 0,1%.

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

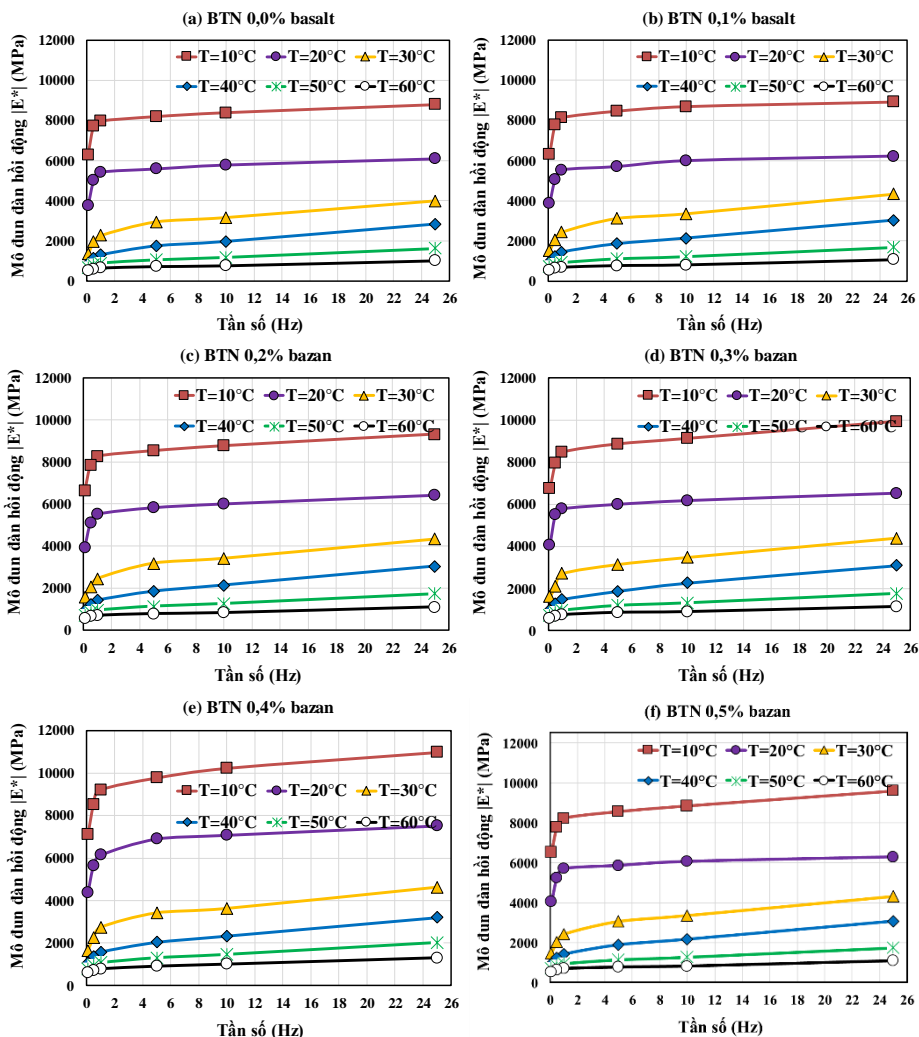
Thí nghiệm mô đun đàn hồi động được thực hiện trong phòng thí nghiệm theo hướng dẫn của tiêu chuẩn AASHTO TP 62.



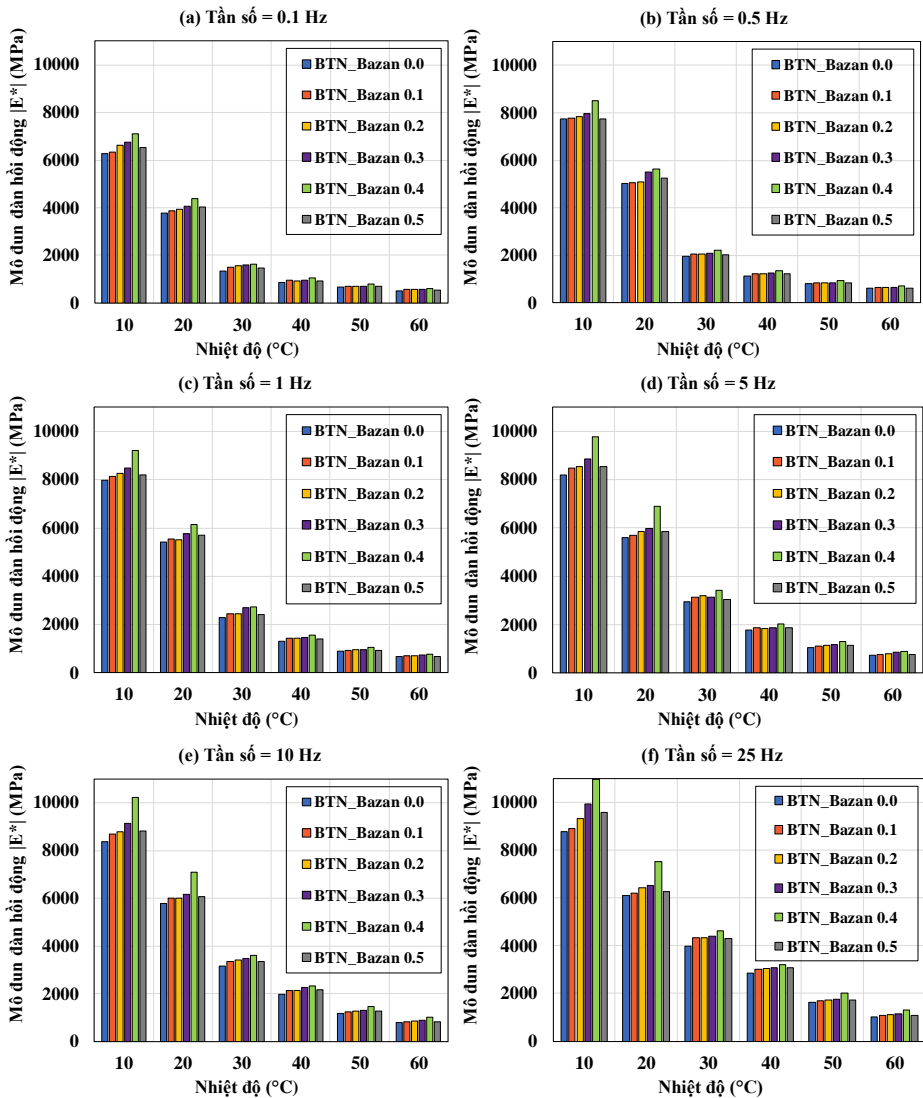
Hình 3.20. Mô đun đàn hồi tĩnh của 6 loại BTN.

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). 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), đảm bảo mẫu được đầm sao cho đạt được độ rỗng dư $V_a = 7 \pm 0.5\%$.

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.

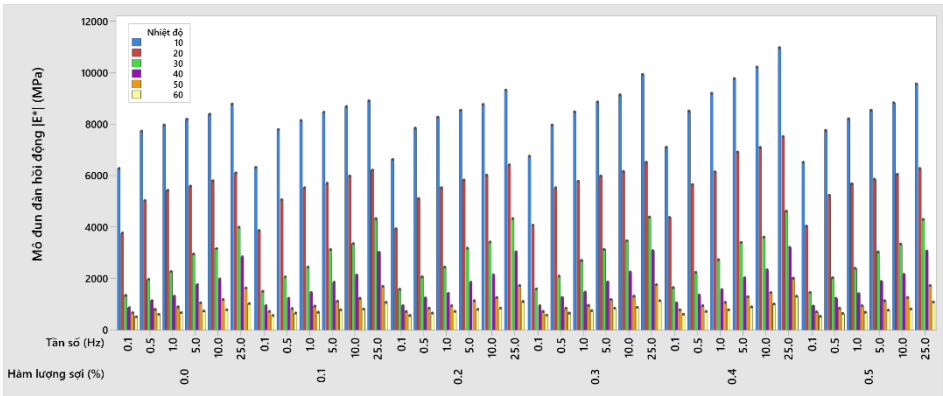


Hình 3.25. Ảnh hưởng của tần số đến $|E^*|$ của 6 loại BTN.



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 .



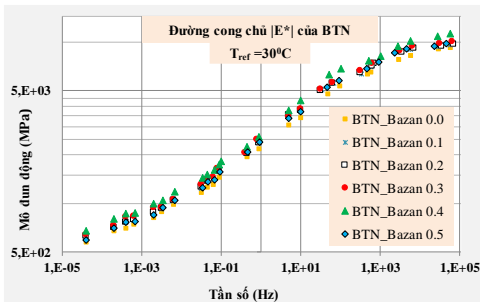
Hình 3.27. Mô đun đàn hồi động $|E^*|$ của các hỗn hợp BTN ứng với 6 tần số và 6 mức nhiệt độ.

3.6.1. Xây dựng đường cong chủ mô đun động

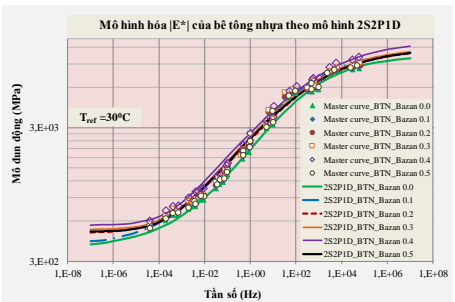
Đường cong chủ $|E^*|$ là đường cong đặc trưng cho tính chất đàn nhớt của BTN trong một vùng rộng của tần số và nhiệt độ. Đường cong chủ được xây dựng từ quy tắc tương quan tần số - nhiệt độ. Để xây dựng đường cong chủ $|E^*|$, các kết quả thí nghiệm được tập hợp để có dữ liệu về $|E^*|$ trong một dải 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 (xem Hình 3.29).

3.6.2. Mô hình hóa mô đun động

Việc mô phỏng các số liệu thực nghiệm $|E^*|$ của BTN được thực hiện bởi mô hình 2S2PID. Mô hình 2S2PID 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). Mô hình sử dụng 7 thông số đầu vào để mô hình hóa đặc tính đàn nhớt tuyến tính của BTN được trình bày ở Bảng 3.17. Kết quả mô hình hóa đường cong chủ $|E^*|$ của BTN được thể hiện ở Hình 3.32.



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



Hình 3.32. Mô hình hóa đường cong chủ $|E^*|$ của BTN theo mô hình 2S2PID.

Bảng 3.17. 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
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

Bảng 3.18. 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

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). Kết quả xác định hệ số xác định R^2 và S_e/S_y thể hiện ở Bảng 3.18. 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

- 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).
- 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).
- 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 CTIndex đạt giá trị lớn nhất (309,20) khi sử dụng sợi bazan với hàm lượng 0,4%.
- 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%.
- 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.

- 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.
- 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 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

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.

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.

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

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. 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.

4.1.4. Xây dựng giao diện GUI dự báo MS của BTN 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).

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

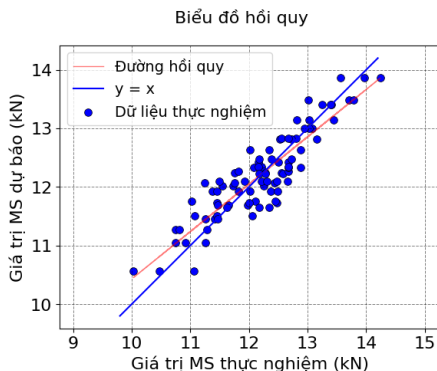
Thực tế cho thấy các tuyến quốc lộ (QL) ở Việt Nam hiện nay như QL 1, QL 5, QL 18, QL 3 và một số QL khác đang khai thác đều có lưu lượng giao thông rất lớn và lớn với số lượng xe có tải trọng trục lớn, xe nhiều trục chiếm tỷ lệ tương đối cao. Hiện tượng LVBX xảy ra nhiều trên các tuyến QL đã chứng minh 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, các tuyến đường quốc lộ (QL) thường được sử dụng kết cấu áo đường mềm (KCAĐM) điển hình:

- Tầng mặt: Được cấu tạo từ $1 \div 2$ lớp BTNC rải nóng, có hoặc không có lớp BTN chức năng trên cùng, chiều dày tầng mặt thông thường từ $12 \div 14$ cm.
- Tầng móng: Được chia thành lớp móng trên và móng dưới. Lớp móng trên thường dùng CPĐĐ loại 1 có hoặc không gia cố xi măng. Lớp móng dưới có thể dùng CPĐĐ loại 1, CPĐĐ loại 2, cấp phối đôi, cấp phối sỏi cuội, và cát gia cố xi măng.

Lớp đáy áo đường thường sử dụng đất đồi chọn lọc hoặc cát có chiều dày $30 \div 50$ cm đạt độ chặt $K \geq 0,98$



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.

The image shows a software interface for predicting the compressive strength (MS) of fiber-reinforced concrete. It consists of ten sliders, each representing a different material property, and a text input field for the final MS value.

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 (mu.m)	11
Độ kim lún (0,1 mm)	65
Điểm hóa mềm (oC)	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

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.

4.2.3. Đề xuất KCAĐ mềm ứng dụng BTN sử dụng sợi bazan làm lớp mặt trong KCAĐ ô tô 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 như Bảng 4.3.

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

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 BTNC12.5 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 đôi chúng thì mô đun đàn hồi chung của kết cấu có sử dụng sợi cao hơn kết cấu đối chứng.

Bảng 4.3. Các KCAĐ 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	CPĐĐ loại 1	15	15	15
5	CPĐĐ loại 2	30	30	30
6	CP thiên nhiên	30	30	30
	Tổng	87	86	87

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

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 trưng 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. Kết quả phân tích KCAĐ theo M-E sau

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 môi 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 môi 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

15, 16 năm sử dụng được thể hiện ở Bảng 4.9 và Bảng 4.10. Từ các kết quả này có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Khi thời gian khai thác là 15 năm, KC2 sử dụng BTN chứa 0,4% sợi bazan làm lớp mặt trên có chiều dày giảm 20% so với KC1 nhưng vẫn đảm bảo các đặc tính khai thác tương đương với KC1.

- Khi thời gian khai thác là 16 năm, KC3 thỏa mãn tất cả các đặc tính khai thác, trong khi KC1 và KC2 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

Bảng dự toán sơ bộ chi phí xây dựng KCAĐ được trình bày chi tiết ở Bảng 4.11.

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

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 môi 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 môi 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

Bảng 4.11. Tổng hợp chi phí xây dựng các KCAĐ.

STT	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/ m ²	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
	Tươi nhựa thấm bảm TCN 1 kg/m ²	đ/ m ²	23,725	23,725	23,725
	Tươi nhựa dính bảm TCN 0,5 kg/ m ²	đ/ m ²	13,050	13,050	13,050

trong thị trường 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 dựng với khối lượng lớn thì chắc chắn giá thành sợi bazan sẽ được giảm đáng kể.

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

Nhìn chung, việc sản xuất BTN sợi 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 các bước chính trong quá trình sản xuất BTN_Bazan ngoài trạm trộn như sau:

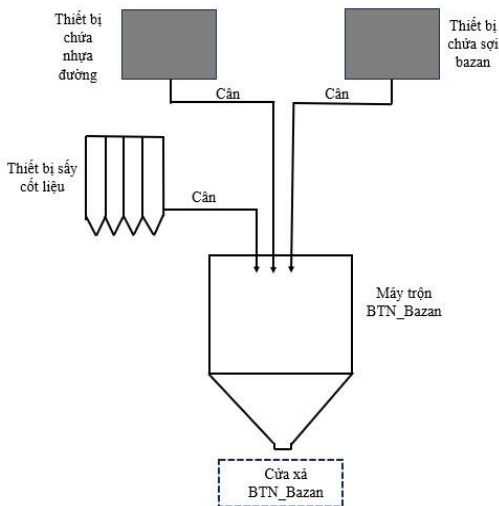
- Cốt liệu lớn, nhỏ, bột khoáng sau khi được sấy nóng ở nhiệt độ (khoảng 165 – 170°C) được cân đo từng loại theo thiết kế rồi đưa vào máy trộn BTN.
- Sợi bazan được đựng trong thùng kín cũng được cân đo theo đúng hàm lượng thiết kế và cho vào máy trộn và trộn cùng cốt liệu trong khoảng thời gian 2 phút.
- 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 ($150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$).

Cần lưu ý rằng lựa chọn thời gian trộn là 4 phút tạm thời là một sự lựa chọn an toàn, 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.

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. Mô hình ML được 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 cùng chiều dày không đạt LVBX toàn kết cấu;



Hình 4.7. Quy trình sản xuất BTN_bazan ở trạm trộn

- Kết quả xác định 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

- 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 Đề xuất tính toán, 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.
- 4 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.
- 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

- 1 Các nghiên cứu của Luận án mới thực hiện ở trong phòng thí nghiệm mà chưa có điều kiện thử nghiệm ở hiện trường;
- 2 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, các loại cốt liệu, 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 tìm hiểu ảnh hưởng của sợi bazan tới 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.