

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

HOÀNG THỊ HƯƠNG GIANG

**NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT CẢI THIỆN TÍNH CHẤT
CƠ LÝ BÊ TÔNG NHỰA TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM**

**Ngành : Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông
Mã số : 9580205**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – 2023

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

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. Nguyễn Hoàng Long

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải

2. TS. Lý Hải Bằng

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải

Phản biện 1: GS.TSKH. Nguyễn Xuân Trục

Phản biện 2: GS.TS. Bùi Xuân Cậy

Phản biện 3: PGS.TS. Trần Thị Kim Đăng

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 8 giờ 30 ngày 22 tháng 11 năm 2023

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

Trên thế giới và ở Việt Nam, bê tông nhựa (BTN) là một loại vật liệu phổ biến và quan trọng trong đường bộ bởi các ưu điểm. Chất lượng của BTN phụ thuộc nhiều vào chất kết dính. Ở Việt Nam, việc nhập khẩu nhựa đường phụ thuộc phần lớn vào các thị trường nước ngoài, khó kiểm soát chất lượng nhựa. Nhựa đường 60/70 tuy đã và đang được sử dụng nhiều trong nước nhưng vẫn bộc lộ nhiều điểm hạn chế về tính chất cơ lý. Trong quá trình khai thác, dưới tác dụng của tải trọng xe chạy và điều kiện thời tiết, mặt đường BTN sử dụng nhựa đường 60/70 thường xuất hiện các hư hỏng như lún vệt bánh xe, nứt mỏi dẫn đến phá hoại. Do vậy, việc nghiên cứu cải thiện chất lượng mặt đường BTN đã và đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu trong suốt nhiều năm qua.

Để nâng cao chất lượng BTN, hiện nay trên thế giới thường đi theo các hướng như sử dụng phụ gia cải thiện nhựa đường; điều chỉnh cấp phối phù hợp với mục đích sử dụng và sử dụng vật liệu chất lượng cao; cải thiện thành phần hỗn hợp BTN bằng vật liệu gia cường. Trong đó, việc sử dụng phụ gia cải thiện nhựa đường để nâng cao chất lượng BTN đang là hướng nghiên cứu được quan tâm và ngày càng phát triển. Ngày nay, với trình độ khoa học kỹ thuật ngày càng phát triển, việc sử dụng công nghệ và vật liệu nano ngày càng phổ biến trong cải thiện nhựa đường. Một trong những vật liệu nano được đưa vào nghiên cứu gần đây thuộc họ các bon là graphene oxide (GO) và bước đầu đạt được những kết quả khả quan. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung ở một số nước tiên tiến, đặc biệt là Trung Quốc. Ở Việt Nam, đây là loại vật liệu mới cần có những nghiên cứu để dần từng bước áp dụng, góp phần nâng cao chất lượng xây dựng và khai thác mặt đường. Chính vì vậy, đề tài “*Nghiên cứu sử dụng graphen oxit cải thiện tính chất cơ lý bê tông nhựa trong điều kiện Việt Nam*” mang tính thời sự, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

II. Mục đích nghiên cứu

- Nghiên cứu hình thái, thành phần hóa học, tính chất cơ lý của nhựa đường sử dụng GO (N_GO), từ đó đề xuất hàm lượng GO dùng trong BTN;
- Thiết kế hỗn hợp BTN sử dụng GO (BTN_GO), so sánh đánh giá BTN_GO với BTN đối chứng thông qua các chỉ tiêu cơ lý của BTN;
- Ứng dụng mô hình học máy để dự báo tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO, ứng dụng BTN_GO trong kết cấu áo đường mềm (KCAĐM) cho một số tuyến đường ô tô tại Việt Nam;

III. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu: nhựa đường 60/70 có phụ gia GO và BTN chặt với cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm (BTNC 12,5) sử dụng phụ gia GO; vật liệu đối chứng là nhựa đường 60/70 và BTNC 12,5 không sử dụng GO dùng trong KCAĐM.
- Phạm vi nghiên cứu bao gồm các nghiên cứu thực nghiệm trong phòng thí nghiệm mà không nghiên cứu ngoài hiện trường; đánh giá ảnh hưởng của một loại GO đối với một loại nhựa đường, một loại cấp phối và một loại cốt liệu; nghiên cứu ứng xử của BTN_GO khi sử dụng làm lớp mặt của KCAĐ mềm trên một số tuyến đường cấp cao ở Việt Nam.

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

- Phân tích, làm rõ cơ sở khoa học việc sử dụng GO trong BTN. Phân tích thành phần và cấu trúc của N_GO và BTN_GO. Phân tích ưu nhược điểm và phạm vi áp dụng của loại vật liệu mới này với những điều kiện Việt Nam;
- Đề xuất tỷ lệ GO hợp lý trong hỗn hợp, cấp phối hỗn hợp, các yêu cầu vật liệu, các chỉ tiêu cơ lý và phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN_GO ở Việt Nam.
- Xác định được các chỉ tiêu kỹ thuật của BTN GO khi thiết kế kết cấu mặt đường theo tiêu chuẩn TCCS38:2022/TCĐBVN và phương pháp cơ học-thực nghiệm;
- Ứng dụng mô hình học máy xây dựng được công cụ dự báo nhanh một số đặc tính cơ lý của N_GO và BTN_GO
- Đề xuất một số kết cấu áo đường mềm cấp cao sử dụng lớp BTN GO ở Việt Nam.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ GRAPHEN OXIT VÀ BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT

1.1. Tổng quan các vật liệu nano cải thiện nhựa đường

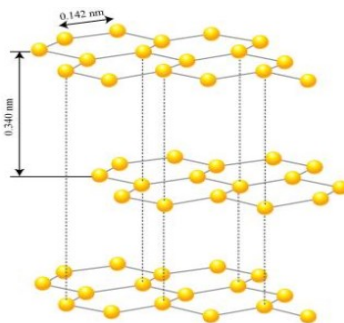
Vật liệu nano là loại vật liệu mà trong cấu trúc phải có ít nhất một chiều ở kích thước nanomet. Chúng bao gồm các dạng hạt, sợi, tấm, bản hoặc ống. Vật liệu nano thể hiện những tính năng đặc biệt mà những vật liệu truyền thống không có được do việc thu nhỏ kích thước và tăng diện tích tiếp xúc pha của chúng. Trong suốt thập kỷ qua, với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ nano, vật liệu nano ngày càng được sử dụng nhiều hơn trong cải thiện nhựa đường, chẳng hạn như nano khoáng sét, nano kim loại (ZnO , Al_2O_3 , Fe_2O_3), sợi nano, nano-silica, và ống nano các bon.

GO là vật liệu nano thuộc họ các bon, được biết đến khoảng 150 năm trước. Các nghiên cứu về GO trong cải thiện nhựa đường mới chỉ phát triển khoảng vài năm trở lại đây với số lượng nghiên cứu còn khá khiêm tốn. Do vậy, việc sử dụng GO cải thiện nhựa đường hiện nay đang là hướng nghiên cứu còn khá mới mẻ và hứa hẹn sẽ đem lại những kết quả khả quan.

1.2. Tổng quan về graphene oxit

1.2.1. Nguồn gốc graphene oxit

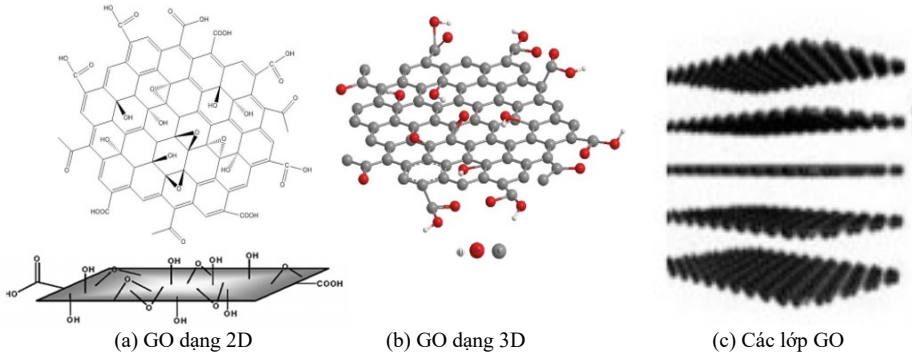
GO có nguồn gốc từ graphite (than chì) với thành phần chủ yếu là các bon. Đây là một nguyên tố có độ linh hoạt nhất trong bảng tuần hoàn các nguyên tố hóa học. Các nguyên tử này có khả năng hình thành các loại liên kết không chỉ với chính nó mà còn với nhiều nguyên tử khác như hydro, oxy, nitơ và lưu huỳnh. Nguyên tử các bon liên kết với chính nó bằng các liên kết đơn, đôi hoặc ba tạo thành nhiều loại chuỗi, vòng, và lưới ba chiều (3D). Do vậy, graphite có kiến trúc lớp, các lớp liên kết với nhau bằng lực Van der Waals với khoảng cách 0,34 nm (Hình 1.1).



Hình 1.1. Cấu trúc graphite.

1.2.2. Cấu trúc của graphene oxit

Với cấu tạo phân lớp đơn nguyên tử, GO có nhiều nhóm chức chứa oxy phân cực bề mặt, có ít nhất 4 nhóm chức được tìm thấy bao gồm hydroxyl (C-OH), epoxy (C-O-C) cacboxylic (COOH) và cacbonyl (C=O) (Hình 1.3). Các nhóm chức này làm tăng khả năng phản ứng của GO, đồng thời làm tăng khoảng cách giữa các lớp GO.



Hình 1.3. Cấu trúc hóa học của GO.

1.2.3. Một số đặc tính của graphene oxit

- Tính hút ẩm;
- Khả năng phân tán;
- Cộng hóa trị và không cộng hóa trị.

1.2.4. Các phương pháp điều chế graphene oxit

GO được tạo ra bằng cách xử lý graphite với các chất oxy hóa mạnh như HNO_3 , H_2SO_4 , KMnO_4 , H_3PO_4 , KClO_3 . Quá trình oxy hóa graphite thành GO với nhiều phương pháp khác nhau, bao gồm: phương pháp Brodie (1859), Staudenmaier (1898), Offenman (1937), Hummers (1958), Hummers sửa đổi và Tour (2010), và phương pháp điện hóa.

1.2.5. Các dạng graphene oxit trên thị trường

Hiện nay thị trường thế giới có nhiều loại GO khác nhau và tạm chia thành 2 dạng:

- Dạng 1: Điều chế trong phòng thí nghiệm. GO dạng này thường ở dạng dung dịch, dạng đặc, hoặc dạng bột, có cấu trúc một vài lớp, tỷ diện bề mặt rất lớn có thể lên tới $2600 \text{ m}^2/\text{g}$, độ tinh khiết đạt 99%.
- Dạng 2: Sản xuất theo quy mô công nghiệp. GO dạng này thường là bột màu đen hoặc nâu, có cấu trúc 5-10 lớp, tỷ diện bề mặt $50\text{-}450 \text{ m}^2/\text{g}$, độ tinh khiết $\geq 95\%$.

1.3. Cơ chế tương tác giữa graphene oxit và nhựa đường

Cơ chế tương tác giữa GO và nhựa đường là một chủ đề nghiên cứu phức tạp và đang tiếp tục được khám phá. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng GO có thể tương tác với các phân tử nhựa đường thông qua các cơ chế: Tương tác Van der Waals, tương tác tĩnh điện, tương tác hóa học

1.4. Tổng quan các nghiên cứu về nhựa đường và bê tông nhựa sử dụng graphen oxit trên thế giới và ở Việt Nam

1.4.1. Tình hình nghiên cứu nhựa đường sử dụng graphen oxit trên thế giới

Các nghiên cứu về sử dụng GO làm phụ gia cho nhựa đường mới chỉ bắt đầu từ năm 2015 trở lại đây với số lượng còn khá hạn chế (khoảng 20 nghiên cứu). Các nghiên cứu chủ yếu tập trung ở các nước Châu Á như Trung Quốc (10-15 nghiên cứu), Malaysia (2-3 nghiên cứu), Ấn Độ (2-3 nghiên cứu). Nhiều loại nhựa đường (nhựa 80/100, A70, A90, AC30, SBS, PG58-34), loại GO (đơn lớp, đa lớp) và các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường đã được đánh giá. Tuy nhiên, các nghiên cứu vẫn còn tồn tại một số hạn chế như: (1) Thiếu các đánh giá cụ thể về ảnh hưởng của hóa già trong quá trình khuấy trộn N_GO khi mà các thông số khuấy trộn khá cao; (2) Chưa xây dựng mối quan hệ nhiệt độ – độ nhớt của N_GO để xác định khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của hỗn hợp BTN_GO; (3) Số lượng các chỉ tiêu trong mỗi nghiên cứu còn hạn chế nên việc đánh giá ảnh hưởng của GO đến nhựa đường chưa thực sự đầy đủ.

1.4.2. Tình hình nghiên cứu bê tông nhựa sử dụng graphen oxit trên thế giới

Các nghiên cứu về BTN sử dụng GO trên thế giới bắt đầu từ năm 2019 trở lại đây với số lượng khoảng 5-7 nghiên cứu. Các nghiên cứu mới chỉ tập trung vào BTNC 13,2 và BTNC 9,5 rải nóng (cấp phối theo tiêu chuẩn của Trung Quốc JTG F40-2004).

Nhìn chung, các nghiên cứu về BTN sử dụng GO còn tồn tại một số hạn chế. Thứ nhất, số lượng các chỉ tiêu nghiên cứu chưa nhiều, nhiều chỉ tiêu quan trọng liên quan đến đặc tính làm việc của BTN chưa được đánh giá như khả năng kháng LVBX trong môi trường nước, khả năng kháng nứt thông qua chỉ số kháng nứt (Cracking Tolerance Index – CTindex), mô đun động, v.v.... Thứ hai, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung ở một số nước châu Á đặc biệt là Trung Quốc, nơi có khí hậu ôn đới gió mùa, khác biệt với khí hậu nhiệt đới với lượng mưa dồi dào và độ ẩm cao như Việt Nam. Thứ ba, chưa có nghiên cứu đối với BTNC 12,5, đây là loại sử dụng phổ biến làm lớp mặt trên trong KCAĐ mềm ở Việt Nam. Cuối cùng, các nghiên cứu mới tập trung vào các thí nghiệm trong phòng, chưa có phân tích ứng xử của BTN_GO làm lớp mặt trong KCAĐ ô tô nhằm khẳng định khả năng làm việc của vật liệu này.

1.4.3. Tình hình nghiên cứu nhựa đường và bê tông nhựa sử dụng GO tại Việt Nam

Hiện nay, Việt Nam chưa có các nghiên cứu về GO trong lĩnh vực xây dựng mặt đường nói chung và mặt đường BTN nói riêng.

1.5. Nghiên cứu sử dụng học máy dự báo các đặc trưng của nhựa đường và 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 trong đó có mặt đường mềm:

- Dự báo chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường có phụ gia;
- Dự báo đặc tính cơ học BTN như các thông số Marshall, mô đun động, khả năng kháng lún, tuổi thọ môi;
- Dự báo các chỉ tiêu khai thác của mặt đường BTN như nứt, ổ gà, IRI.

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

- Đề xuất quy trình chế tạo chất kết dính N_GO được tạo thành từ GO đa lớp và nhựa đường 60/70 gốc dầu mỏ.
- Nghiên cứu hình thái, thành phần hóa học, các chỉ tiêu cơ lý của N_GO, qua đó xác định nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN_GO.
- Nghiên cứu các chỉ tiêu cơ lý của BTN_GO nhằm phục vụ cho thiết kế KCAĐ mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN và phương pháp cơ học thực nghiệm. Từ đó đánh giá khả năng ứng dụng của BTN_GO 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 N_GO và BTN_GO. 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 MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA NHỰA ĐƯỜNG SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT

Từ các mục tiêu nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu và các nội dung đã được kết luận ở Chương 1, Chương 2 tiến hành nghiên cứu thực nghiệm hình thái, thành phần hóa học để xác định tương tác giữa GO và nhựa đường; xác định các chỉ tiêu cơ lý của chất kết dính N_GO với mục đích lựa chọn được hàm lượng GO sử dụng trong BTN, lựa chọn nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN_GO. Chương này cũng bao gồm các thí nghiệm đối chứng để đánh giá ưu điểm và nhược điểm của N_GO so với nhựa đường 60/70 đang được sử dụng phổ biến tại Việt Nam.

2.1. Xác định thành phần và công tác chế tạo nhựa đường sử dụng graphen oxit

2.1.1. Lựa chọn nhựa đường sử dụng trong nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng nhựa đường 60/70, được cung cấp bởi Công ty trách nhiệm hữu hạn (TNHH) nhựa đường Petrolimex.

2.1.2. Lựa chọn loại và hàm lượng graphen oxit

GO sử dụng trong nghiên cứu là GO đa lớp (5-10 lớp) được cung cấp bởi Công ty TNHH Tandem Graphene, Tô Châu, Trung Quốc, có dạng bột, màu đen. Hàm lượng GO được lựa chọn là 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 3% theo khối lượng nhựa đường.

2.1.3. Lựa chọn nhiệt độ trộn, thời gian trộn và tốc độ trộn

Căn cứ vào nghiên cứu tổng quan cũng như điều kiện phòng thí nghiệm, loại nhựa đường, nghiên cứu lựa chọn các thông số khuấy trộn khi đưa GO vào nhựa đường: Thời gian trộn 20 phút; vận tốc trộn 2000 vòng/phút, nhiệt độ trộn 150°C.

2.2. Nghiên cứu thực nghiệm hình thái, thành phần hóa học của nhựa đường sử dụng graphen oxit

2.2.1. Các phương pháp phân tích xác định hình thái, cấu trúc hóa học của vật liệu

- Phương pháp quang phổ hồng ngoại xác định cấu trúc hóa học

- Phương pháp nghiên cứu hình thái vật chất bằng kính hiển vi điện tử quét

2.2.2. Kế hoạch thí nghiệm

Trong phần này, hình thái, thành phần hóa học của nhựa đường 60/70, GO và chất kết dính N_GO được nghiên cứu. Để thấy rõ sự ảnh hưởng của GO đến hình thái, thành phần hóa học lên nhựa đường, chỉ các hàm lượng 1%, 2% và 3% GO được khảo sát.

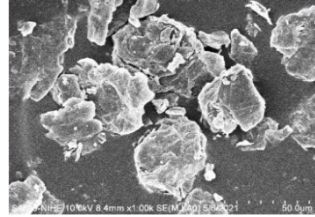
2.2.3. Kết quả thí nghiệm

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

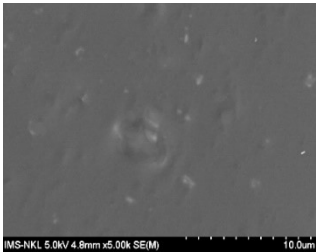
Ảnh SEM của GO (Hình 2.5) cho thấy, các hạt GO chủ yếu là các trạng thái độc lập, nhiều lớp. Quá trình cắt trộn với vận tốc cao, lực cắt sẽ phá vỡ và tách GO từ đa lớp về các đơn lớp, làm tăng tỷ diện bề mặt, giúp dễ dàng phân tán vào trong nhựa đường.

Ảnh SEM của N_GO (Hình 2.7) cho thấy:

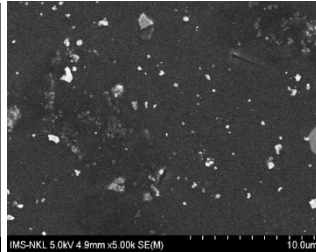
- Hàm lượng 2% GO cho phân tán đồng đều trong nhựa đường
- Hàm lượng GO tăng lên 3%, độ phân tán GO trong nhựa đường giảm
- Hàm lượng GO tăng, độ nhám bề mặt được cải thiện.



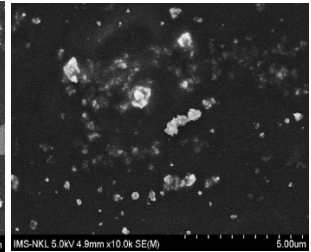
Hình 2.5. Hình ảnh SEM của GO.



Mẫu N_GO_1%



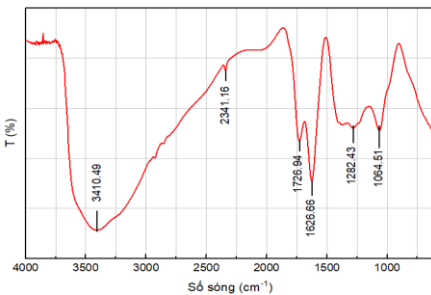
Mẫu N_GO_2%



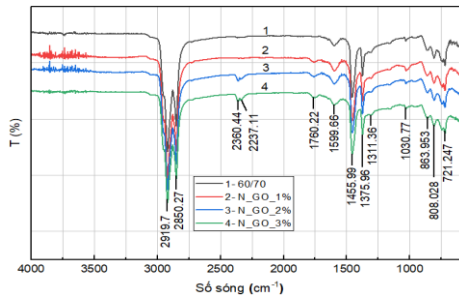
Mẫu N_GO_3%

Hình 2.7. Hình ảnh SEM của chất kết dính N_GO.

2.2.3.2. Kết quả thí nghiệm phân tích cấu trúc hóa học của các vật liệu



Hình 2.8. Phổ FTIR của GO.



Hình 2.9. Phổ FTIR của N_GO.

Phổ FTIR của GO trong Hình 2.8 cho thấy, GO chứa nhóm chức oxy góp phần tạo nên tính ưa nước mạnh. Do đó, GO là một vật liệu ổn định và có thể tăng cường các đặc tính lưu biến cho nhựa đường. Hình 2.9 cho thấy sự phát triển của đỉnh mới ở bước sóng

$1760,22\text{ cm}^{-1}$ của các mẫu N_GO có thể là một dấu hiệu của phản ứng đã xảy ra giữa GO và nhựa đường 60/70.

2.3. Nghiên cứu thực nghiệm chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường sử dụng graphene oxit

2.3.1. Lựa chọn chỉ tiêu thí nghiệm

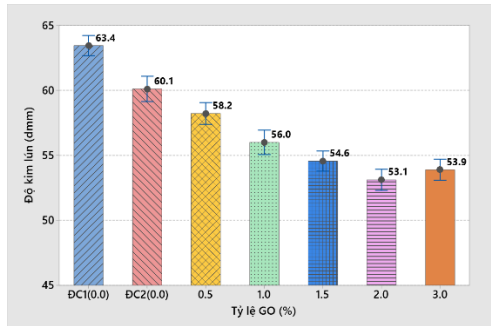
Luân án tiến hành thí nghiệm một số chỉ tiêu cơ bản và các chỉ tiêu khác theo quy định của tiêu chuẩn TCVN 7493:2005 của N_GO với 5 hàm lượng GO là 0,5%, 1%, 1,5%, 2% và 3%. Vật liệu đối chứng là nhựa đường 60/70 không sử dụng GO (ĐC1). Ngoài ra, để đánh giá ảnh hưởng của hóa già trong quá trình sản xuất chất kết dính N_GO, nghiên cứu sử dụng thêm vật liệu đối chứng 2 (ĐC2) là nhựa đường 60/70 được khuấy với các thông số về thời gian, vận tốc và nhiệt độ như các mẫu N_GO đối với chỉ tiêu độ kim lún và điểm hóa mềm.

2.3.2. Độ kim lún của nhựa đường sử dụng graphene oxit

Tiêu chuẩn thí nghiệm độ kim lún theo TCVN 7495:2005 (hoặc theo ASTM D5). Việc đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM C670 với giới hạn chấp nhận được quy định theo tiêu chuẩn TCVN 7495:2005 và ASTM D5. Kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá. Sử dụng phần mềm Minitab 19, thiết kế thực nghiệm DOE (Design of Experiments) theo General Full Factorial (GFF). Phân tích phương sai ANOVA với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$, phân tích hậu định theo phương pháp Tukey nhằm phát hiện sai khác các cặp so sánh. Kết quả phân tích ANOVA với hệ số p-value $\ll 0,05$, hệ số xác định điều chỉnh $R_{đc}^2 = 90,83\%$ cho thấy tỷ lệ GO ảnh hưởng đến độ kim lún có ý nghĩa thống kê ở mức độ tin cậy cao.

Hình 2.13 cho thấy ảnh hưởng của việc bổ sung các hàm lượng GO khác nhau đến độ kim lún của nhựa đường. Một số kết luận được rút ra:

- Độ kim lún của mẫu ĐC2 thấp hơn ĐC1 do ảnh hưởng hóa già trong quá trình khuấy nhưng sự ảnh hưởng này không đáng kể.
- Độ kim lún N_GO giảm dần khi hàm lượng GO tăng và thấp hơn nhựa 60/70, điều này cho thấy GO làm tăng độ cứng của nhựa đường
- N_GO 2% có độ kim lún thấp nhất (53,1dmm) cho thấy sự cải thiện tốt hơn khi so sánh với các hàm lượng GO khác.

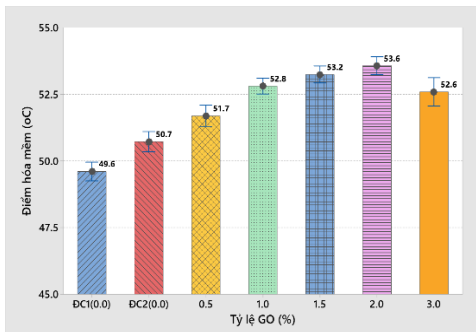


Hình 2.13. Độ kim lún của N_GO.

2.3.3. Điểm hóa mềm của nhựa đường sử dụng graphene oxit

Tiêu chuẩn xác định điểm hóa mềm của nhựa đường theo TCVN 7497-2005. Việc đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM C670 với giới hạn chấp nhận được quy định theo tiêu chuẩn TCVN 7497:2005. Phân tích độ chụm cho thấy, kết quả

thí nghiệm đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá. Hình 2.15 trình bày kết quả thí nghiệm điểm hóa mềm của N_GO ở các hàm lượng GO khác nhau. Dễ dàng nhận thấy, điểm hóa mềm tăng khi hàm lượng GO tăng và cao hơn so với các mẫu đối chứng. N_GO_2% có điểm hóa mềm cao nhất là 53,6°C. Điểm hóa mềm của N_GO_3% thấp hơn so với N_GO_2% điều này càng khẳng định khả phân tán của N_GO_2% tốt hơn N_GO_3%. Do đó, việc bổ sung GO vượt quá hàm lượng tối ưu sẽ làm giảm hiệu suất cải thiện nhựa đường.



Hình 2.15. Điểm hóa mềm của N_GO.

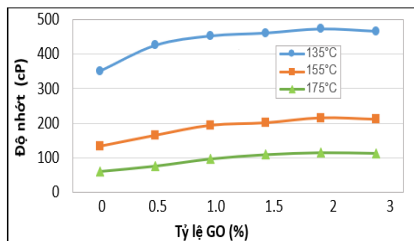
2.3.4. Độ nhớt của nhựa đường sử dụng graphen oxit

Trong nghiên cứu này, nhớt kế Brookfield được sử dụng để đo độ nhớt nhựa đường ở ba nhiệt độ từ thấp tới cao là 135°C, 155°C và 175°C. Tiêu chuẩn thí nghiệm xác định độ nhớt bằng nhớt kế Brookfield theo TCVN 11196:2017. Kết quả thí nghiệm độ nhớt Brookfield N_GO đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá.

Ảnh hưởng của GO đến độ nhớt của N_GO ở nhiệt độ từ 135°C đến 175°C được hiển thị ở Hình 2.18. Một số nhận xét được rút ra:

- Độ nhớt giảm khi nhiệt độ tăng
- Độ nhớt tăng khi hàm lượng GO tăng.

N_GO_2% có độ nhớt cao nhất ở các nhiệt độ, và cao hơn 34,76%; 60,45% và 88,52% so với nhựa 60/70 ở 135°C, 155°C và 175°C.



Hình 2.18. Độ nhớt của N_GO ở các nhiệt độ

Thiết lập phương trình hồi quy quan hệ giữa độ nhớt của N_GO với tỷ lệ GO (từ 0 – 3%)

và nhiệt độ thử nghiệm (T) trong phạm vi nghiên cứu này như sau:

$$\text{Độ nhớt} = 1535 + 25,67 \times \text{GO} - 8,576 \times T \text{ (cP)} \quad (2.1)$$

Từ phương trình hồi quy độ nhớt của N_GO, xác định khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của các loại BTN theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM 2493. Theo tiêu chuẩn này, khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của các loại BTN được xác định tương ứng với khoảng độ nhớt 170 ± 20 cP và 280 ± 30 cP. Kết quả xác định khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của BTN sử dụng chất kết dính N_GO được trình bày chi tiết trong Bảng 2.5.

Bảng 2.5. Khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của BTN_GO.

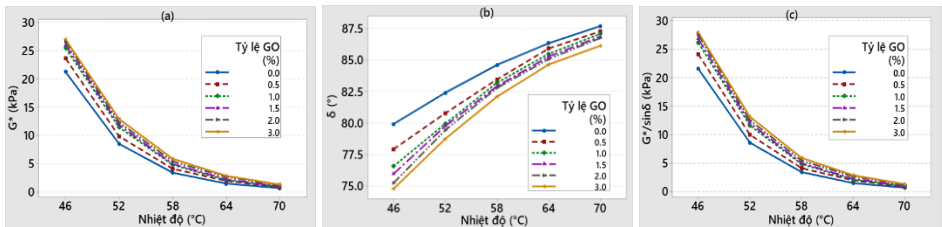
Khoảng nhiệt độ	Chất kết dính					
	Nhựa 60/70	N_GO_0,5%	N_GO_1%	N_GO_1,5%	N_GO_2%	N_GO_3%
Trộn mẫu	148 ÷ 152	152 ÷ 155	154 ÷ 158	155 ÷ 159	156 ÷ 160	156 ÷ 160
Đầm mẫu	137 ÷ 142	142 ÷ 147	144 ÷ 149	145 ÷ 150	146 ÷ 151	146 ÷ 151

Nhìn chung, GO làm tăng nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN_GO so với BTNC 12,5 từ 5÷8°C. Việc bổ sung các chất phụ gia dùng trong BTN ẩm như Sasobit và WCO có thể giảm nhiệt độ trộn và đầm nén của hỗn hợp BTN sử dụng chất kết dính N_GO.

2.3.5. Kết quả thí nghiệm cắt động lưu biến của nhựa đường sử dụng graphen oxit

Tiêu chuẩn thí nghiệm mô đun cắt động và góc trễ pha của N_GO được thực hiện theo AASHTO T315. Kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá.

Từ biểu đồ Hình 2.20 cho thấy, khi GO tăng, hệ số giảm lún $G^*/\sin\delta$ tăng nên khả năng chống lún lún trong môi trường nhiệt độ cao của N_GO tốt hơn nhựa đường 60/70. Chất kết dính N_GO_2% và N_GO_3% có đặc tính khai thác tương đương PG70, trong khi các N_GO còn lại tương đương với PG64.



Hình 2.20. Mô đun cắt động (a), góc trễ pha (b), và $G^*/\sin\delta$ (c) của N_GO chưa hóa già.

Thiết lập phương trình hồi quy quan hệ giữa $G^*/\sin\delta$ của N_GO với tỷ lệ GO (từ 0 – 3%) và nhiệt độ thử nghiệm (T) trong phạm vi nghiên cứu này như sau:

$$G^*/\sin\delta = 64,3 + 0,99 \times GO - 0,9758 \times T \text{ (kPa)} \quad (2.2)$$

Phương trình đảm bảo độ tin cậy với hệ số xác định điều chỉnh $R_{dc}^2 = 85\%$, hệ số p-value của tham số đều nhỏ hơn 0,05.

Thí nghiệm mô đun cắt động theo chuẩn PG của mẫu nhựa hóa già sau RTFOT cũng được thực hiện. Một số kết luận được rút ra:

- Cấp đặc tính khai thác theo PG sau RTFOT của các CKD vẫn giữ được cấp nhựa như khi chưa hóa già
- Sự thay đổi $G^*/\sin\delta$ của N_GO nhỏ hơn so với nhựa đường 60/70, điều này cho thấy rằng GO không chỉ cải thiện độ ổn định nhiệt độ cao của nhựa đường mà còn làm giảm bớt ảnh hưởng của quá trình hóa già đến các đặc tính lưu biến của nhựa đường.

2.3.6. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu khác của nhựa đường sử dụng graphen oxit

Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu còn lại của N_GO được trình bày trong Bảng 2.7.

Bảng 2.7. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu còn lại của N_GO.

TT	Chỉ tiêu kỹ thuật	Tiêu chuẩn thí nghiệm	Chất kết dính N_GO						Tiêu chuẩn
			0%	0,5%	1%	1,5%	2%	3%	
1	Độ kéo dài 25°C, cm	TCVN 7496:2005	140	131	121	115	108	102	Mín 100
2	Nhiệt độ bắt lửa, °C	TCVN 7498:2005	310	301	295	291	287	280	Mín 232
3	Độ dính bám với đá	TCVN 7504:2005	Cấp 3	Cấp 3	Cấp 3	Cấp 4	Cấp 4	Cấp 4	Cấp 3

TT	Chỉ tiêu kỹ thuật	Tiêu chuẩn thí nghiệm	Chất kết dính N_GO						Tiêu chuẩn
			0%	0,5%	1%	1,5%	2%	3%	
4	KL riêng, g/cm ³	TCVN 7501:2005	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032	1,00-1,05
5	Tôn thất sau gia nhiệt 5h 163°C	ASTM D1754	0,250	0,245	0,241	0,235	0,231	0,230	Max 0,8

Kết quả thí nghiệm cho thấy, các loại chất kết dính N_GO đã thử nghiệm đều thỏa mãn quy định các chỉ tiêu chất lượng của nhựa đường dầu mỡ mức 60/70 sử dụng trong xây dựng theo tiêu chuẩn TCVN 7493:2005. Đáng chú ý, việc bổ sung GO làm tăng độ dính bám với đá của chất kết dính N_GO_1,5%, N_GO_2%, và N_GO_3% từ cấp 3 lên cấp 4. Kết quả này cho thấy, GO có thể cải thiện khả năng dính bám giữa chất kết dính và cốt liệu, điều này dự báo GO làm giảm tính nhạy ẩm của BTN_GO.

2.4. Kết luận chương 2

- Quá trình cắt trộn với vận tốc cao, lực cắt sẽ phá vỡ GO thành các đơn lớp giúp phân tán tốt vào nhựa đường. Hàm lượng 2% GO cho độ phân tán tối ưu trong nhựa đường.
- Có ít nhất 4 nhóm chức chứa oxy được tìm thấy trên bề mặt tấm GO. Sự phát triển của đỉnh mới ở bước sóng 1760,22 cm⁻¹ có thể là một dấu hiệu của phản ứng đã xảy ra giữa GO và nhựa 60/70.
- Ảnh hưởng của quá trình khuấy trộn (sự hóa già khi trộn) khi đưa GO vào nhựa đường 60/70 ở 150°C trong 20 phút và vận tốc 2000 vòng/phút là không đáng kể.
- Việc bổ sung GO sẽ làm tăng nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN_GO so với BTN đối chứng từ 5 - 8°C.
- GO cải thiện hiệu suất làm việc ở nhiệt độ cao của nhựa đường. Cấp đặc tính khai thác của N_GO_2% và N_GO_3% khi chưa hóa già và sau hóa già RTFOT tương đương với PG70, với các tỷ lệ GO còn lại tương đương với PG64. GO làm giảm bớt ảnh hưởng của quá trình hóa già đến các đặc tính lưu biến của nhựa đường.
- GO làm tăng độ dính bám với đá của chất kết dính từ cấp 3 lên cấp 4 ở hàm lượng 1,5%, 2% và 3% GO. Điều này dự báo GO làm giảm tính nhạy ẩm của BTN_GO.

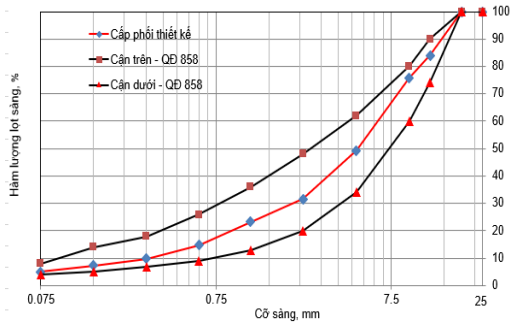
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT

Từ kết quả nghiên cứu các chỉ tiêu cơ lý của N_GO ở Chương 2, Chương 3 tập trung nghiên cứu các nội dung sau: (1) Đề xuất phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp của BTN_GO; (2) Nghiên cứu thực nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của BTN_GO bao gồm độ ổn định và độ dẻo Marshall, mô đun đàn hồi tĩnh, cường độ kéo khi ép chế, khả năng kháng lún vết bánh xe, khả năng kháng nứt, và mô đun động; (3) Xây dựng đường cong chủ mô đun động và mô hình hóa đường cong chủ mô đun động của BTN_GO để xác định mô đun động ở nhiệt độ và tần số bất kỳ.

3.1. Thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng graphene oxit

- 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: Theo kết quả nghiên cứu ở Chương 2, tỷ lệ 2% GO cho hiệu quả cải thiện nhựa đường tối ưu nên đây là tỷ lệ lớn nhất được sử dụng để thử nghiệm cho BTN_GO. Ngoài ra, GO là phụ gia mới trong BTN nên để có đánh giá chính xác hơn thì nghiên cứu tiến hành thêm các thử nghiệm cho hỗn hợp BTN_GO với chất kết dính N_GO_1%, N_GO_1,5%;
- Nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN: Căn cứ vào Bảng 2.5, nghiên cứu lựa chọn nhiệt độ trộn và đầm nén đối với hỗn hợp BTN_60/70 tương ứng là 150°C và 140°C, với BTN_GO các giá trị này lần lượt là 155°C và 145°C;
- Hàm lượng chất kết dính tối ưu cho BTN_60/70 và BTN_GO được chọn là 4,6%, tương ứng V_a nằm trong khoảng 4,5 ÷ 5%, là khoảng giá trị được khuyến nghị trong quyết định 858/QĐ-BGTVT.



Hình 3.2. Đường cong cấp phối các loại BTN_GO.

3.2. Lựa chọn các chỉ tiêu trong nghiên cứu

(1) Các chỉ tiêu cơ lý đánh giá BTN theo yêu cầu của QĐ 858 bao gồm:

- Độ ổn định, độ dẻo Marshall;
- Độ ổn định còn lại;
- Khả năng kháng lún vết bánh xe.

(2) Các chỉ tiêu phục vụ cho bài toán thiết kế kết cấu áo đường mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN và phương pháp cơ học – thực nghiệm:

- Mô đun đàn hồi tĩnh của BTN_GO ở 3 nhiệt độ: 15°C, 30°C và 60°C;
- Cường độ kéo khi ép chệch của BTN_GO ở 15°C (gián tiếp xác định cường độ kéo uốn thông qua công thức);
- Mô đun động của BTN_GO

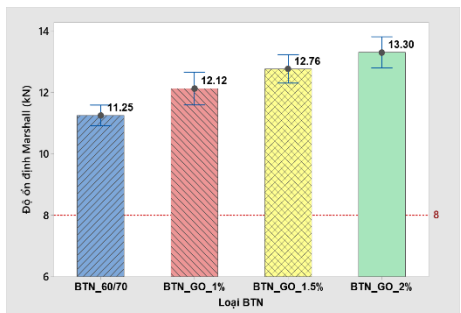
(3) Nghiên cứu khả năng kháng nứt thông qua chỉ số kháng nứt CT_{index} .

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

3.3.1. Độ ổn định và độ dẻo Marshall

Kết quả thí nghiệm độ ổn định, độ dẻo Marshall được đánh giá độ chụm theo tiêu chuẩn ASTM D6927-15 và hệ số biến sai ứng với số mẫu quy định trong ASTM C670.

Kết quả thí nghiệm cho thấy, độ ổn định Marshall của các loại BTN đều $\geq 8,0$ kN. BTN_GO có độ ổn định Marshall đều tăng so với BTN_60/70, tỷ lệ GO càng cao thì mức tăng



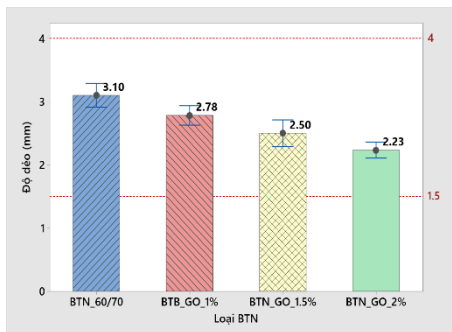
Hình 3.4. Độ ổn định Marshall của BTN_GO.

càng nhiều. BTN_GO_2% cho độ ổn định cao nhất, tăng 18,22% so với BTN_60/70 (Hình 3.4). Nguyên nhân là do GO tăng cường độ cứng của chất kết dính, dẫn đến tăng độ ổn định cho BTN_GO. Tỷ lệ GO càng tăng thì độ cứng chất kết dính càng lớn nên độ ổn định càng cao.

Thiết lập phương trình hồi quy quan hệ giữa độ ổn định Marshall với tỷ lệ GO (0 – 2%) trong phạm vi nghiên cứu này như sau:

$$MS = 11,2 + 1,03 \times GO \text{ (kN)} \quad (3.1)$$

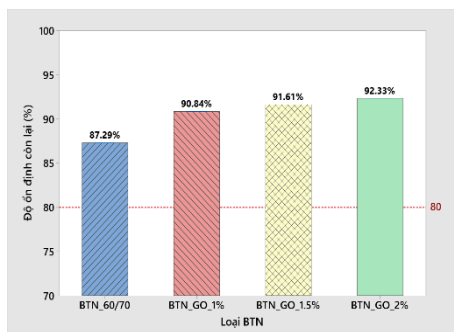
Hình 3.5 là biểu đồ tổng hợp độ dẻo Marshall theo hàm lượng GO. Độ dẻo của các mẫu đều nằm trong khoảng yêu cầu theo quy định của Quyết định 858/QĐ-BGTVT (1,5÷4 mm). Ngoài ra, độ dẻo Marshall của BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2% giảm từ 10,32%, 19,35% và 28,06% so với BTN_60/70.



Hình 3.5. Độ dẻo Marshall của BTN_GO.

3.3.2. Độ ổn định còn lại

Việc sử dụng GO cải thiện đáng kể độ ổn định còn lại của BTN_GO. Các mẫu BTN_GO có độ ổn định còn lại cao hơn BTN_60/70, tỷ lệ GO tăng thì độ ổn định còn lại càng lớn. Mẫu BTN_GO_2% có độ ổn định còn lại lớn nhất với RS = 92,33% (Hình 3.7). Điều này cho thấy khả năng chống ẩm của BTN đã được tăng cường sau khi bổ sung GO. Nguyên nhân là do các nhóm hydroxyl, epoxy và cacboxyl trên bề mặt các lớp GO làm cho nó rất ưa nước. Các phân tử nước bị hấp phụ có xu hướng hiện diện trong các khoảng trống giữa các lớp, một mạng lưới hydro hình thành giữa các phân tử nước và các nhóm oxy trên GO, từ đó tăng cường độ ổn định nước của BTN_GO.



Hình 3.7. Độ ổn định còn lại của BTN_GO.

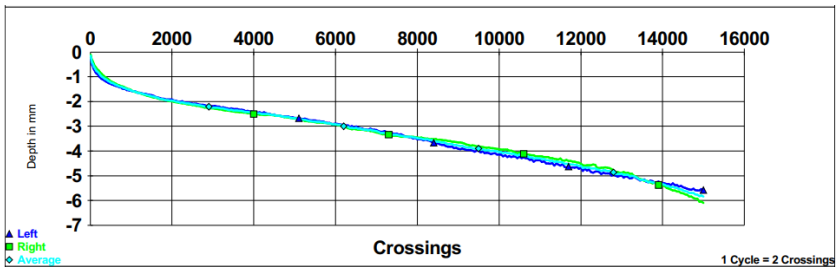
3.4. Khả năng kháng lún vết bánh xe

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_GO được thể hiện chi tiết ở Bảng 3.10 và Hình 3.9.

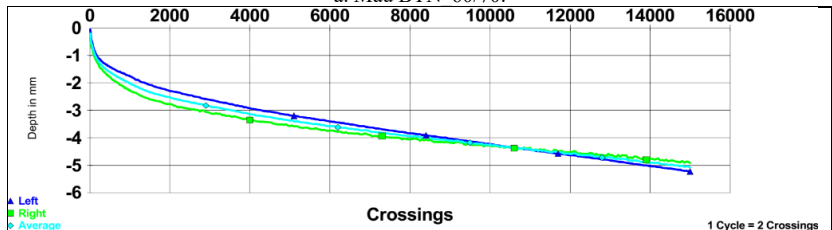
Bảng 3.10. Kết quả thí nghiệm LVBX của BTN_60/70 và BTN_GO.

TT	Chỉ tiêu	Mẫu	BTN_60/70	BTN_GO_1%	BTN_GO_1,5%	BTN_GO_2%
1	Chiều sâu lún vết bánh xe, mm	Trái	5,60	5,20	4,20	4,00
		Phải	6,07	4,90	3,85	3,47
		TB	5,84	5,05	4,03	3,74

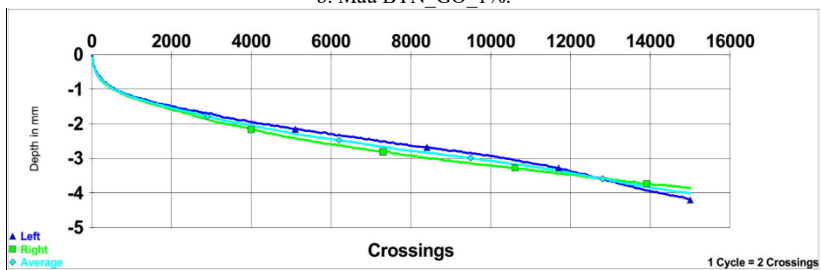
TT	Chỉ tiêu	Mẫu	BTN 60/70	BTN_GO 1%	BTN_GO 1,5%	BTN_GO 2%
2	Khoảng chênh lệch R max-min	mm	0,47	0,30	0,35	0,53
3	Khoảng chấp nhận cho phép, d2s	%	30	30	30	30
4	Giá trị độ lệch cho phép: TB*(3)	mm	1,75	1,52	1,21	1,12
5	Đánh giá: so sánh (2) và (4)	-	Đạt	Đạt	Đạt	Đạt



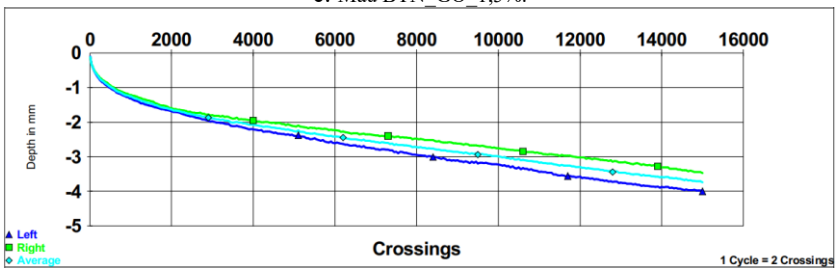
a. Mẫu BTN 60/70.



b. Mẫu BTN_GO 1%.



c. Mẫu BTN_GO 1,5%.



d. Mẫu BTN_GO 2%.

Hình 3.9. Kết quả thí nghiệm chiều sâu lún vết bánh xe.

Kết quả thử nghiệm cho thấy, sau 15.000 lượt chạy trong môi trường nước ở 50°C, chiều sâu LVBX của mẫu BTN_60/70 và BTN_GO ở các tỷ lệ GO khác nhau đều nhỏ hơn giá trị cho phép (12,5 mm) theo yêu cầu của Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT. Ngoài ra, biến dạng vĩnh viễn của BTN về cơ bản giảm đáng kể khi hàm lượng GO tăng. Việc sử dụng 1%, 1,5% và 2% GO theo khối lượng nhựa đường có hiệu quả trong việc làm giảm LVBX, giá trị này giảm lần lượt là 13,53%, 30,99% và 35,96% so với BTN_60/70. Điều này chứng tỏ, tác động làm cứng của GO lên chất kết dính đã được cải thiện, làm tăng hiệu suất kháng lún ở nhiệt độ cao của BTN_GO.

3.5. Mô đun đàn hồi tĩnh

Thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh BTN_60/70 và BTN_GO theo tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN và kết quả đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá.

Việc sử dụng chất kết dính N_GO trong BTN đã làm tăng đáng kể mô đun đàn hồi ở cả ba nhiệt độ thử nghiệm. Tuy nhiên, ảnh hưởng của GO đến mô đun đàn hồi tĩnh ở 15°C là lớn nhất, tiếp theo là 30°C và cuối cùng là 60°C. BTN_GO_2% thể hiện hiệu suất cải thiện cao nhất ở cả ba nhiệt độ so với các tỷ lệ GO khác.

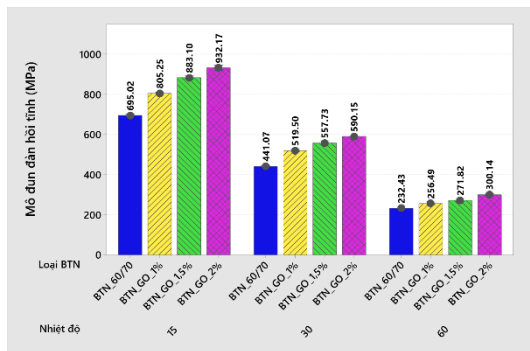
Cụ thể, giá trị mô đun đàn hồi của BTN_GO_2% tăng 34,12%, 33,80%, và 29,13% tương ứng ở các nhiệt độ 15°C, 30°C, và 60°C so với BTN_60/70 (Hình 3.14).

Thiết lập phương trình hồi quy quan hệ mô đun đàn hồi tĩnh với nhiệt độ thử nghiệm (T) và tỷ lệ GO (từ 0 – 2%) trong phạm vi nghiên cứu này như sau:

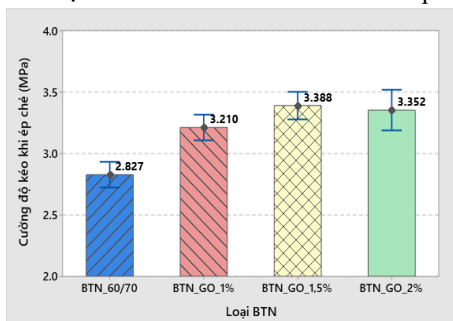
$$E_{\text{tĩnh}} = 836,9 + 106,86 \times \text{GO} - 210,48 \times T - 28,54 \times \text{GO} \times T \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

3.6. Cường độ kéo khi ép chèn

Cường độ kéo khi ép chèn của BTN_GO được xác định theo TCVN 8862:2011. Kết quả xác định cường độ kéo khi ép chèn (Hình 3.17) cho thấy, GO cải thiện cường độ kéo khi ép chèn ở 15°C. So sánh với BTN_60/70, các giá trị R_{ke} của BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2% tăng lần lượt 13,55%, 19,84% và 18,57%. Hiệu quả này có thể là do sự phân tán đồng đều của GO trong nhựa đường, làm tăng sự liên kết giữa các hạt cốt liệu và chất kết dính N_GO. BTN_GO_1,5% cho hiệu suất cải thiện cường độ kéo khi ép chèn tốt nhất so với các tỷ lệ GO khác.



Hình 3.14. Mô đun đàn hồi tĩnh của BTN_GO.



Hình 3.17. Cường độ kéo khi ép chèn BTN_GO.

Thiết lập phương trình hồi quy quan hệ giữa cường độ kéo khi ép chế với tỷ lệ GO (từ 0 – 2%) trong phạm vi nghiên cứu này như sau:

$$R_{ke} = 2,874 + 0,285 \times GO \text{ (kN)} \quad (3.8)$$

Cường độ kéo uốn được xác định gần đúng theo công thức: $R_{ku} = K_n \cdot R_{ke}$ và được tổng hợp ở Bảng 3.14, với $K_n = 2$.

3.7. Khả năng kháng nứt

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

Kết quả thử nghiệm được hiển thị trong Hình 3.22 cho thấy giá trị CT_{index} của BTN_60/70 và BTN_GO đều lớn hơn giá trị tham khảo của Bang Oklahoma ($CT_{index} \geq 80$). Ngoài ra, việc bổ sung GO không cải thiện khả năng kháng nứt của BTN mà có xu hướng giảm nhẹ chỉ số

kháng nứt CT_{index} . So sánh với BTN_60/70, các giá trị CT_{index} của BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2% giảm lần lượt 5,87%, 7,59% và 8,61%. Tuy nhiên, đây là kết quả nghiên cứu ban đầu trên BTNC 12,5 sử dụng nhựa đường 60/70, để có đánh giá tổng quát hơn cần có thêm các nghiên cứu trên nhiều loại BTN và nhựa đường khác nhau.

3.8. Mô đun động của BTN_GO

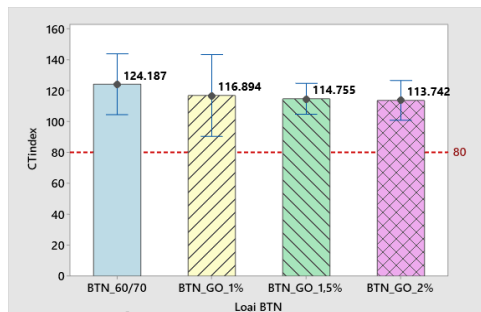
3.8.1. Kết quả thí nghiệm và phân tích

Thử nghiệm được tiến hành ở 4 nhiệt độ 4°C, 21°C, 37°C và 54°C, với 6 mức tần số 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz và 25 Hz. Từ kết quả thí nghiệm có thể rút ra một số nhận xét sau:

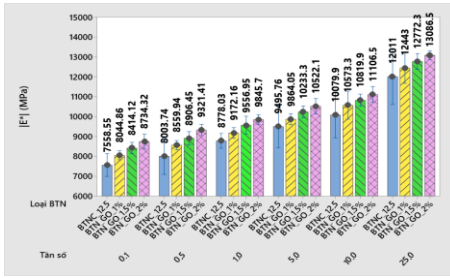
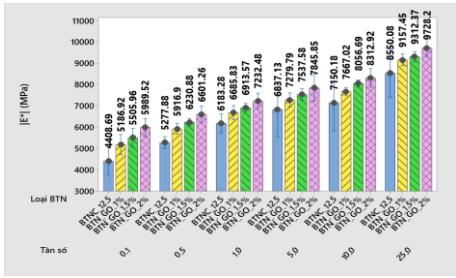
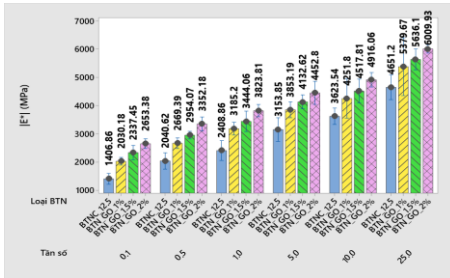
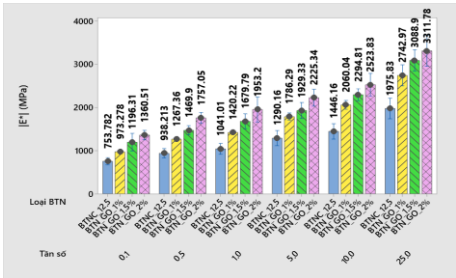
- Ở cùng một tần số, khi nhiệt độ tăng thì $|E^*|$ giảm rất nhanh; trong khi ở cùng một nhiệt độ, tần số tăng thì $|E^*|$ tăng. Điều này giải thích tính đàn nhớt của BTN_60/70 và BTN_GO.
- Trong cùng điều kiện thí nghiệm, việc bổ sung GO làm tăng $|E^*|$ của BTN_GO so với BTN_60/70 và hàm lượng GO càng cao thì $|E^*|$ càng lớn. Tuy nhiên, sự gia tăng này không giống nhau ở nhiệt độ và tần số thí nghiệm khác nhau, nhiệt độ càng cao, sự chênh lệch giá trị $|E^*|$ giữa BTN_GO và BTN_60/70 càng lớn. Cụ thể: $|E^*|$ của BTN_GO_1% cao gấp $1,03 \div 1,08$ lần ở 4°C và gấp $1,29 \div 1,42$ lần ở 54°C so với BTN_60/70. Trong khi đó, $|E^*|$ của BTN_GO_2% gấp $1,09 \div 1,16$ lần ở 4°C và gấp $1,67 \div 1,87$ lần ở 54°C so với BTN_60/70.

Bảng 3.14. Cường độ kéo uốn của BTN_GO.

Loại BTN	R_{ke}^{tb} (MPa)	R_{ku}^{tb} (MPa)
BTN_60/70	2,827	5,653
BTN_GO_1%	3,210	6,421
BTN_GO_1,5%	3,388	6,777
BTN_GO_2%	3,352	6,705



Hình 3.22. Kết quả thử nghiệm CT_{index} của BTN_GO.

Hình 3.24. Biểu đồ $|E^*|$ của BTN_GO ở 4°C.Hình 3.25. Biểu đồ $|E^*|$ của BTN_GO ở 21°C.Hình 3.26. Biểu đồ $|E^*|$ của BTN_GO ở 37°C.Hình 3.27. Biểu đồ $|E^*|$ của BTN_GO ở 54°C.

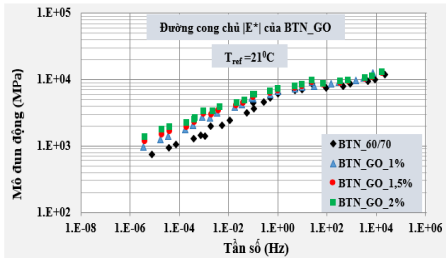
3.8.2. Xây dựng đường cong chủ mô đun động

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 này được xây dựng từ quy tắc tương quan tần số - nhiệt độ, được sử dụng để dự báo $|E^*|$ của BTN ở tần số và nhiệt độ khác nhau. Chọn nhiệt độ tham chiếu là 21°C. Các đường cong đẳng nhiệt tương ứng với nhiệt độ lớn hơn 21°C sẽ được di chuyển sang trái, trong khi các đường cong tương ứng với nhiệt độ thấp hơn 21°C sẽ dịch chuyển sang phải bằng các hệ số dịch chuyển a_T (Hình 3.29).

3.8.3. Mô hình hóa mô đun động

Việc mô phỏng các số liệu thực nghiệm $|E^*|$ của BTN_GO được thực hiện bởi mô hình 2S2P1D. Đây là 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 để mô hình hóa đặc tính đàn nhớt tuyến tính của BTN_GO và được trình bày trong Bảng 3.18. Kết quả mô hình hóa $|E^*|$ của các loại BTN được thể hiện ở Hình 3.32.

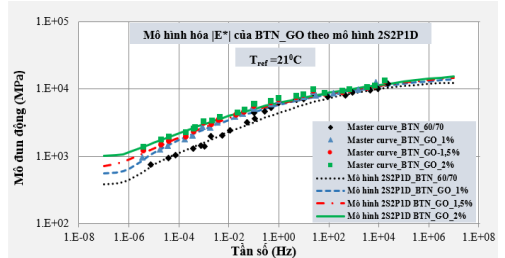
Để đánh giá sự phù hợp của mô hình 2S2P1D với kết quả thí nghiệm, nghiên cứu sử dụng phương pháp mức độ phù hợp (Goodness of Fit). Kết quả xác định hệ số xác định R^2 và S_e/S_y thể hiện ở Bảng 3.19. Từ kết quả bảng trên cho thấy, mô hình 2S2P1D phù hợp để mô phỏng đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_GO và BTN đối chứng.



Hình 3.29. Đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_GO.

Bảng 3.18. 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_60/70	380	19500	0,17	0,30	3,5	0,65	2000
BTN_GO_1%	550	27000	0,10	0,31	3,5	0,50	3000
BTN_GO_1,5%	700	30000	0,10	0,35	4,5	1,00	3500
BTN_GO_2%	1000	32000	0,10	0,35	5,0	1,00	2000



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

Bảng 3.19. Đánh giá kết quả dự báo $|E^*|$ của BTN_GO bằng mô hình 2S2P1D.

Loại BTN	R^2	S_e/S_y	Đánh giá
BTN_60/70	0,9739	0,186	Rất tốt
BTN_GO_1%	0,9910	0,110	Rất tốt
BTN_GO_1,5%	0,9891	0,120	Rất tốt
BTN_GO_2%	0,9876	0,128	Rất tốt

3.9. Kết luận chương 3

- Việc bổ sung GO làm tăng độ ổn định Marshall của BTN_GO so với BTN_60/70, hàm lượng GO càng cao thì mức tăng càng nhiều. BTN_GO_2% cho độ ổn định cao nhất, tăng 18,22% so với BTN_60/70. Ngoài ra, GO cũng làm tăng độ ổn định còn lại cho BTN_GO, BTN_GO_2% có độ ổn định còn lại lớn nhất với $RS = 92,33\%$, trong khi BTN_60/70 có độ ổn định còn lại nhỏ nhất với $RS = 87,29\%$.
- GO làm tăng đáng kể mô đun đàn hồi tĩnh của BTN_GO so với BTN_60/70 ở cả ba nhiệt độ thử nghiệm. BTN_GO_2% đạt hiệu suất cải thiện mô đun đàn hồi tĩnh cao nhất ở cả ba nhiệt độ với mức tăng từ 29,13% đến 34,12% so với BTN_60/70.
- Cường độ kéo khi ép chệch của BTN được cải thiện sau khi bổ sung GO. BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2% có cường độ kéo khi ép chệch tăng lần lượt 13,55%, 19,84%, 18,57% so với BTN_60/70.
- Khả năng kháng LVBX trong môi trường nước của BTN_GO đều tốt hơn BTN_60/70, chiều sâu LVBX của BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5%, BTN_GO_2% giảm lần lượt là 13,53%, 30,99% và 35,96% so với BTN_60/70. Điều này dự báo khả năng cải thiện chất lượng khai thác của KCAĐ có sử dụng lớp BTN_GO làm lớp mặt thông qua chỉ tiêu LVBX.
- Khả năng kháng nứt của BTN_GO thông qua chỉ số CT_{index} thấp hơn không đáng kể so với BTN_60/70, giảm từ 5,87% đến 8,61%, hàm lượng GO tăng thì khả năng kháng nứt của BTN_GO giảm.
- Các đường cong chủ $|E^*|$ của BTN ở nhiệt độ tham chiếu 21°C được xây dựng cho thấy $|E^*|$ của BTN_GO đều cao hơn BTN_60/70 ở các nhiệt độ và tần số khác nhau. $|E^*|$ của BTN_GO_2% đạt giá trị lớn nhất, tiếp theo là BTN_GO_1,5% và BTN_GO_1%, cuối cùng là BTN_60/70.
- Mô hình 2S2P1D được xây dựng phù hợp để mô hình hóa $|E^*|$ của các loại BTN và dùng để xác định mô đun động của BTN_GO ở nhiệt độ và tần số bất kỳ.

Tổng hợp kết quả nghiên cứu các chỉ tiêu cho thấy, GO có khả năng cải thiện một số tính chất cơ lý của BTN, trong đó BTN_GO_2% có nhiều đặc tính cơ lý vượt trội so với BTN_60/70, cao hơn BTN_GO_1% và BTN_GO_1,5%. Do vậy, BTN_GO_2% 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 GRAPHEN OXIT TRONG KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG

Chương 4 ứng dụng ML để xây dựng công cụ dự báo một số tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO nhằm định hướng cho các nghiên cứu về sau. Ngoài ra, một số KCAĐM 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_GO_2% với chiều dày theo thiết kế 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).

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

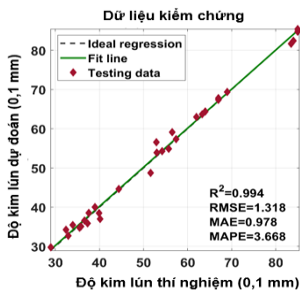
4.1.1. Ứng dụng học máy trong dự báo tính chất cơ lý của nhựa đường sử dụng GO

Với các số liệu thu thập được từ các nghiên cứu trên thế giới và số liệu thực nghiệm ở chương 2, nghiên cứu xây dựng các bộ dữ liệu để dự báo các chỉ tiêu độ kim lún, điểm hóa mềm, độ kéo dài, độ nhớt, và $G^*/\sin\delta$. Các biến đầu vào cho các bộ dữ liệu là hàm lượng GO (X_1), số lớp GO (X_2), chiều dày tấm GO (X_3), kích thước trung bình của tấm GO (X_4), nhiệt độ trộn (X_5), vận tốc trộn - RPM (X_6), thời gian trộn (X_7), loại hóa giả (X_8), và chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường ban đầu ứng với từng bộ dữ liệu (X_9). Riêng đối với bộ dữ liệu độ kéo dài, độ nhớt và $G^*/\sin\delta$ có thêm biến nhiệt độ thí nghiệm (X_{10}). Biến đầu ra là các chỉ tiêu cơ lý được dự báo.

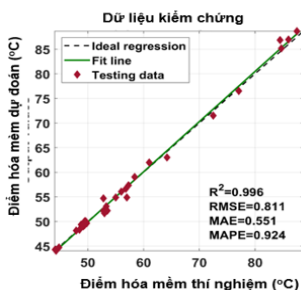
- Bộ dữ liệu độ kim lún được xây dựng từ 122 dữ liệu thí nghiệm của 11 nghiên cứu. Nghiên cứu sử dụng thuật toán ANN và xác thực chéo 10 lần trong quá trình đào tạo, xác thực và kiểm chứng mô hình. Sau quá trình thử và sai, mô hình ANN được đào tạo bởi thuật toán traingdx với cấu trúc 9-5-1 (ANN-GDX-9-5-1) là mô hình tốt nhất để dự báo độ kim lún của N_GO với R^2 là 0,994. (Hình 4.1).
- Bộ dữ liệu điểm hóa mềm được xây dựng từ 130 kết quả thí nghiệm của 11 nghiên cứu. Với thuật toán ANN và kỹ thuật xác thực chéo 10 lần, mô hình ANN được đào tạo bởi thuật toán trainrp có cấu trúc ANN-RP-9-10-1 là mô hình tốt nhất để dự báo điểm hóa mềm của N_GO với R^2 là 0,996 (Hình 4.2).
- Bộ dữ liệu độ kéo dài được xây dựng từ 104 kết quả thí nghiệm của 11 nghiên cứu. Mô hình ANN được đào tạo bởi thuật toán traingdx với cấu trúc ANN-RP-10-9-1 là mô hình tốt nhất để dự báo độ nhớt của N_GO với R^2 là 0,999 (Hình 4.3).
- Bộ dữ liệu độ nhớt được xây dựng từ 164 kết quả thí nghiệm của 7 nghiên cứu. Mô hình ANN được đào tạo bởi thuật toán traingdx với cấu trúc ANN-GDX-10-13-1 là mô hình tốt nhất để dự báo độ nhớt N_GO với R^2 là 0,983 (Hình 4.4).
- Bộ dữ liệu $G^*/\sin\delta$ được xây dựng từ 433 dữ liệu của 8 nghiên cứu. Nghiên cứu sử dụng thuật toán CGB và kỹ thuật xác thực chéo 5 lần, mô hình CGB đại diện đạt độ chính xác cao với giá trị r_s là 0,983 (Hình 4.5).

4.1.2. Ứng dụng ML trong dự báo độ ổn định Marshall của bê tông nhựa sử dụng graphene oxit

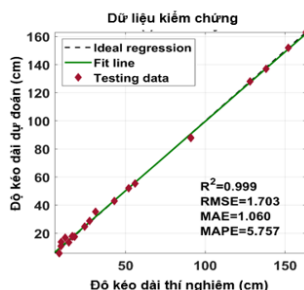
Nghiên cứu sử dụng 11 biến đầu vào để dự báo MS của BTN_GO, bao gồm tỷ lệ GO (X_1), số lớp trung bình GO (X_2), số lớp tối đa GO (X_3), chiều dày tấm GO (X_4) và đường kính trung bình tấm GO (X_5), độ kim lún của nhựa đường ban đầu (X_6), hàm lượng nhựa đường tối ưu (OAC, ký hiệu là X_8), phần trăm khối lượng cốt liệu lọt qua các cỡ sàng 2,36 mm (X_9), lọt qua sàng 4,75 mm (X_{10}), lọt qua sàng 9,5 mm (X_{11}), và lọt qua sàng $\geq 12,5$ mm (X_{12}). Để dự báo MS của BTN_GO, nghiên cứu sử dụng thuật toán CGB. Biểu đồ Hình 4.6 minh họa mối quan hệ giữa giá trị dự báo và giá trị thí nghiệm của MS. Có thể thấy rằng, mô hình CGB thể hiện độ chính xác dự báo cao với $R = 0,975$.



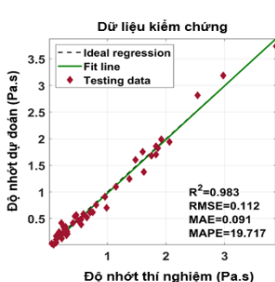
Hình 4.1. Đồ thị hồi quy bộ dữ liệu độ kim lún



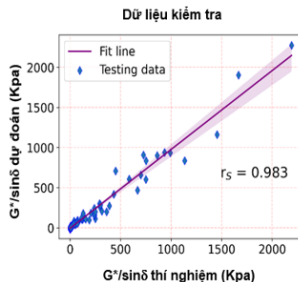
Hình 4.2. Đồ thị hồi quy bộ dữ liệu bảo điểm hóa mềm



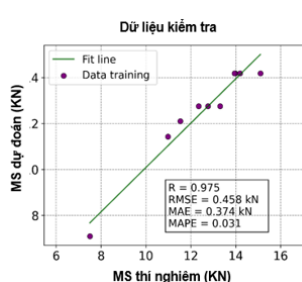
Hình 4.3. Đồ thị hồi quy bộ dữ liệu độ kéo dài



Hình 4.4. Đồ thị hồi quy bộ dữ liệu độ nhớt



Hình 4.5. Đồ thị hồi quy bộ dữ liệu $G^*/\sin\delta$



Hình 4.6. Đồ thị hồi quy bộ dữ liệu MS

Cuối cùng, để thuận tiện cho các kỹ sư vật liệu và thí nghiệm viên trước khi làm thí nghiệm trong việc lựa chọn các tham số đầu vào, so sánh kết quả thí nghiệm với kết quả dự báo, nghiên cứu xây dựng giao diện GUI (Graphical User Interface) nhằm dự báo nhanh và chính xác tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO. Đây là một giao diện đồ họa được tạo ra để tương tác với hệ thống dự báo, cung cấp một cách trực quan và dễ sử dụng để người dùng nhập dữ liệu và nhận kết quả dự báo mà không cần code. Minh họa cho giao diện GUI trong dự báo tính chất cơ lý của BTN_GO hiển thị lần lượt ở Hình 4.10.

Hàm lượng GO (%)	1
Số lớp GO trung bình	5.18
Số lớp GO lớn nhất	8.25
Chiều dày lớp GO (mm)	2.45
Đường kính bên trung bình (mm)	17.8
Độ kim lún (0.1mm)	61
Hàm lượng nhựa tối ưu (OAC) (%)	4.87
% lọt sàng 2.36 mm (%)	34.1
% lọt sàng 4.75mm (%)	39.2
% lọt sàng 9.5mm (%)	73.7
% lọt sàng $\geq 12.5\text{mm}$ (%)	93.4

Độ ổn định Marshall (kN)

Hình 4.10. Giao diện GUI trong dự báo nhanh MS của BTN_GO.

4.2. Ứng dụng bê tông nhựa sử dụng GO làm lớp mặt trong kết cấu áo đường mềm

4.2.1. Kết cấu áo đường mềm điển hình trên các tuyến đường quốc lộ 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 đồi, 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 ÷ 50 cm đạt độ chặt K ≥ 0,98.

4.2.2. Đề xuất kết cấu áo đường mềm ứng dụng BTN_GO làm lớp mặt

Để so sánh và đánh giá BTN_GO khi ứng dụng làm lớp mặt, nghiên cứu lựa chọn KCAĐ của QL6 như Bảng 4.3.

4.3. Kiểm toán kết cấu áo đường mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN

Kết quả kiểm toán hai KCAĐ mềm theo TCCS 38:2022 cho thấy, khi sử dụng lớp BTN_GO_2% thay thế cho lớp BTN_60/70 làm lớp mặt trên các tuyến đường QL có Eyc ≥ 140 Mpa, chiều dày lớp mặt trên giảm 20% (từ 5 cm xuống 4 cm), trong khi vẫn đảm bảo các điều kiện về độ võng đàn hồi, cường độ kéo uốn và khả năng chống cắt trượt theo tiêu chuẩn.

4.4. Phân tích kết cấu áo đường mềm theo phương pháp cơ học thực nghiệm

Sử dụng phần mềm Darwin-ME với các số liệu về khí hậu và đặc trưng của các lớp vật liệu để phân tích KC1 và KC2 với các số liệu về giao thông theo M-E. Kết quả phân tích KCAĐ theo M-E sau 15 năm sử dụng được thể hiện từ Bảng 4.9 đến Bảng 4.11.

Bảng 4.9. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E với lưu lượng xe năm đầu 686 xe/nd.

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC2	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	3,5	2,28	Đạt	2,29	Đạt
2	Tổng chiều sâu LVBX toàn KCAĐ (mm)	25,0	20,23	Đạt	19,81	Đạt
3	Nứt môi từ đáy lên của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	25,0	1,93	Đạt	2,10	Đạt
4	Nứt do nhiệt của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	190	5,15	Đạt	5,15	Đạt
5	Nứt môi từ trên xuống của BTNC 12,5 (m/km)	380	220,43	Đạt	207,54	Đạt
6	Chiều sâu LVBX ở các lớp BTN (mm)	12,5	6,26	Đạt	5,92	Đạt

Bảng 4.10. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E với lưu lượng xe năm đầu 1.000 xe/nd.

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC2	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	3,5	2,33	Đạt	2,34	Đạt
2	Tổng chiều sâu LVBX toàn KCAĐ (mm)	25,0	21,96	Đạt	20,99	Đạt
3	Nứt môi từ đáy lên của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	25,0	2,30	Đạt	3,13	Đạt
4	Nứt do nhiệt của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	190	5,15	Đạt	5,15	Đạt
5	Nứt môi từ trên xuống của BTNC 12,5 (m/km)	380	266,22	Đạt	251,64	Đạt
6	Chiều sâu LVBX ở các lớp BTN (mm)	12,5	7,41	Đạt	7,01	Đạt

Bảng 4.3. KCAĐ sử dụng BTN_GO và BTN_60/70

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp KCAĐ của QL6, cm (KC1)	Chiều dày các lớp của KCAĐ sử dụng BTN_GO_2%, cm (KC2)
1	BTN_60/70	5	-
2	BTN_GO_2%	-	Thiết kế
3	BTNC 19	7	7
4	CPĐĐ loại 1	15	15
5	CPĐĐ loại 2	25	25
6	CP thiên nhiên	30	30
	Tổng	82	Thiết kế

Bảng 4.11. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E với lưu lượng xe năm đầu 2000 xe/nd.

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC2	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề mặt đường IRI cuối cùng (m/km)	3,5	2,45	Đạt	2,45	Đạt
2	Tổng chiều sâu LVBX toàn KCAĐ (mm)	25,0	25,74	Không đạt	24,86	Đạt
3	Nứt môi từ đáy lên của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	25,0	10,31	Đạt	17,48	Đạt
4	Nứt do nhiệt của BTNC 19, BTNC 12,5 (m/km)	190	5,15	Đạt	5,15	Đạt
5	Nứt môi từ trên xuống của BTNC 12,5 (m/km)	380	364,97	Đạt	347,67	Đạt
6	Chiều sâu LVBX ở các lớp BTN (mm)	12,5	10,11	Đạt	9,57	Đạt

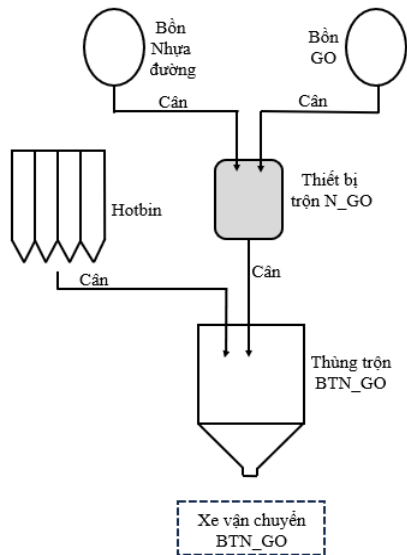
Từ kết quả này có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Với cùng điều kiện thời tiết khí hậu, lưu lượng xe, lớp mặt dưới và các lớp móng, KC2 sử dụng BTN_GO 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. Đáng chú ý, tổng chiều sâu LVBX toàn KCAĐ và chiều sâu LVBX trong các lớp BTN vào cuối thời kỳ khai thác của KC2 thấp hơn KC1 ở các lưu lượng xe được khảo sát.
- Với lưu lượng xe năm đầu $N_0 = 2000$ xe/ngày đêm, KC2 thỏa mãn tất cả các đặc tính khai thác, trong khi KC1 không đạt tổng chiều sâu LVBX toàn kết cấu.

4.5. Đề xuất hướng chế tạo bê tông nhựa sử dụng GO ở trạm trộn ngoài thực tế

Nhìn chung, việc sản xuất BTN_GO tại trạm trộn cũng gần giống như BTN thông thường, chỉ khác ở khâu sản xuất chất kết dính. Căn cứ vào kết quả nghiên cứu thông số trộn N_GO ở chương 2, nghiên cứu đề xuất một số nội dung chính trong sản xuất N_GO và BTN_GO ở trạm trộn ngoài thực tế như sau:

- Thiết bị trộn N_GO cần được trang bị cánh khuấy bằng kim loại có thiết kế dạng dao cắt đặt lệch nhau để tạo luồng khuấy xuống đáy thùng trộn, giúp sự phân tán các hạt GO trong nhựa đường được đồng đều và liên tục. Thiết bị trộn cần gắn mô tơ có công suất được tính toán sao cho cánh khuấy đạt được vận tốc trên 2000 vòng/phút. Ngoài ra, thiết bị trộn cần bố trí cửa riêng biệt để cấp GO vào, có thiết bị gia nhiệt và cảm biến nhiệt độ để duy trì nhiệt độ N_GO ổn định theo thiết kế trong suốt thời gian khuấy trộn.

**Hình 4.11. Hướng chế tạo BTN_GO ở trạm trộn**

- GO được cấp bằng thiết bị tự động có định lượng sẵn, đồng bộ với hoạt động của trạm trộn tạo thành một dây chuyền khép kín.

- Tại thiết bị trộn N_GO, GO được đưa vào nhựa đường đã được làm nóng ở 150°C. Quá trình chế tạo N_GO tại đây diễn ra với các thông số khuấy trộn nêu trên. Thời điểm cốt liệu xả từ Hotbin xuống thùng trộn phải được tính toán sao cho N_GO sau khi sản xuất xong được bơm vào thùng trộn và trộn với cốt liệu trong khoảng 1 – 2 phút. Trong quá trình sản xuất BTN_GO, nhiệt độ trộn luôn được kiểm soát chặt chẽ ($155^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) để tạo ra hỗn hợp đảm bảo chất lượng. Khối lượng N_GO cần tính toán để một lần khuấy trộn có thể dùng cho nhiều mẻ sản xuất BTN_GO trong một ca thi công. Việc xác định thời gian tối đa để lưu trữ, bảo quản N_GO trong thiết bị khuấy trộn và hỗn hợp BTN_GO trong thùng trộn cần có những nghiên cứu tiếp theo.

4.6. 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 một số đặc tính cơ học của N_GO như độ kim lún, điểm hóa mềm, độ nhớt, độ kéo dài, $G^*/\sin\delta$, và độ ổn định MS của BTN_GO. Điều này cung cấp thông tin hữu ích và định hướng cho các kỹ sư vật liệu trong các thí nghiệm về sau.
- Tính toán thiết kế KCAĐ mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN cho thấy có thể giảm chiều dày lớp mặt trên bằng BTN_GO so với phương án sử dụng BTNC 12,5. Cụ thể, khi sử dụng BTN_GO_2% thay thế BTNC 12,5 cho các tuyến đường cấp cao A1 có $E_{yc} \geq 140$ MPa, chiều dày lớp mặt sẽ giảm xuống 20%.
- Phân tích KCAĐ mềm theo phương pháp M-E cho thấy ưu điểm về khả năng kháng lún trong KCAĐ mềm có lớp mặt trên là BTN_GO so với phương án sử dụng BTNC 12,5. KCAĐ mềm có sử dụng BTN_GO_2% dày 4 cm có thể đáp ứng tuyến đường có tổng số xe nặng tích lũy cao hơn khi sử dụng BTNC 12,5 dày 5 cm.
- Thông qua đề xuất hướng chế tạo BTN_GO ở trạm trộn cho thấy tính khả thi của công nghệ sản xuất BTN_GO ngoài thực tế.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. KẾT LUẬN VÀ NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

1. Đề xuất được tỷ lệ GO hợp lý (từ 1 – 2%) theo khối lượng nhựa đường để đảm bảo sự phân tán tốt GO trong nhựa đường nhằm cải thiện một số tính chất cơ lý của N_GO, và một số tính chất cơ lý của BTN_GO như độ ổn định Marshall, mô đun đàn hồi tĩnh, cường độ kéo khi ép chế, khả năng kháng lún vệt bánh xe, và mô đun động phù hợp với điều kiện Việt Nam và các vật liệu đầu vào trong phạm vi nghiên cứu. Đồng thời, nghiên cứu cũng đề xuất phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp BTN_GO và chỉ ra rằng, BTN_GO có nhiệt độ trộn và đầm nén cao hơn BTN thông thường từ $5 \div 8^{\circ}\text{C}$.
2. Xây dựng được một số phương trình hồi quy quan hệ giữa hàm độ nhớt, $G^*/\sin\delta$, độ ổn định Marshall, mô đun đàn hồi tĩnh, cường độ kéo khi ép chế với hàm lượng GO và nhiệt độ thử nghiệm. Xây dựng được đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_GO ở nhiệt độ tham chiếu 21°C và bước đầu chỉ ra khả năng ứng dụng mô hình lưu biến 2S2P1D để mô hình hóa mô đun động $|E^*|$ của BTN_GO.

3. Đề xuất áp dụng, tính toán, mô phỏng, kiểm toán và đánh giá KCAĐ mềm cấp cao với lớp mặt sử dụng BTN_GO và 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 được các công cụ dự báo dựa trên mô hình học máy một số đặc tính cơ lý của N_GO và BTN_GO. Xây dựng giao diện GUI để giúp các kỹ sư không cần code mà vẫn có thể sử dụng trong dự báo các chỉ tiêu cơ lý của N_GO và BTN_GO.

II. NHỮNG HẠN CHẾ

1. Nghiên cứu mới thực hiện các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm và sử dụng các mô hình dự báo mà chưa có điều kiện thực nghiệm ngoài hiện trường.
2. Nghiên cứu mới chỉ thực nghiệm với một loại BTNC 12,5 sử dụng một loại GO, một loại nhựa đường 60/70, một loại cấp phối và một loại cốt liệu có nguồn gốc từ mỏ đá Sunway, Quốc Oai – Hà Nội, chưa phổ quát cho điều kiện Việt Nam.

III. KIẾN NGHỊ

1. Từ các kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm và phân tích M-E các KCAĐ, kiến nghị tiếp tục nghiên cứu ứng dụng hỗn hợp BTN_GO ngoài hiện trường.
2. Tiếp tục đánh giá tính khả thi của BTN_GO khi sử dụng các loại cấp phối khác nhau, cốt liệu có nguồn gốc khác nhau, nhựa đường và loại GO khác nhau.

IV. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Nghiên cứu về khả năng kháng nứt mỏi sử dụng các chỉ tiêu và mô hình thí nghiệm khác nhau. Nghiên cứu đánh giá kinh tế - kỹ thuật của giải pháp cải thiện tính chất cơ lý BTN bằng GO;
2. Nghiên cứu về giải pháp sử dụng nguồn GO được sản xuất trong nước, nghiên cứu thời gian lưu trữ N_GO, BTN_GO ở trạm trộn và công nghệ thi công BTN_GO ngoài hiện trường;
3. Nghiên cứu sử dụng kết hợp GO với các phụ gia hỗn hợp ẩm nhằm giảm nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN, tăng hiệu quả cải thiện các đặc tính cơ lý BTN;
4. Nghiên cứu xây dựng dự báo dựa trên học máy các chỉ tiêu cơ lý của BTN sử dụng trong tính toán kết cấu áo đường mềm.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Hoang Thi Huong Giang**, Nguyen Hoang Long, Le Thanh Hai, Le Nho Thien, Vu The Thuan (2021), *Phương pháp tiếp cận trí tuệ nhân tạo để dự báo độ kim lún và điểm hóa mềm của nhựa đường biến tính graphen oxit*, Tạp chí điện tử Khoa học và Công nghệ Giao thông, số 1 năm 2021 pp 41-53.
2. **Hoàng Thị Hương Giang**, Lê Nho Thiện, Vũ Thế Thuần (2022), *Nghiên cứu dự báo độ nhớt của nhựa đường biến tính graphen oxit bằng thuật toán Gradient tăng cường*, Tạp chí GTVT Số tháng 11 năm 2022, trang 46-50.
3. **Huong-Giang Thi Hoang**, Hoang-Long Nguyen, Hai-Bang Ly, Thuy-Anh Nguyen, (2022), *Neural network approach for GO-modified asphalt properties estimation*, Case Studies in Construction Materials, 11/2022 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01617>.
4. **Hoàng Thị Hương Giang**, Nguyễn Hoàng Long, Lý Hải Bằng (2023), *Nghiên cứu hình thái và thành phần hóa học của nhựa đường biến tính graphene oxit sử dụng kính hiển vi điện tử quét và quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier*, Tạp chí Giao Thông Vận Tải, số tháng 3 năm 2023, trang 76-79.
5. **Hoàng Thị Hương Giang**, Nguyễn Hoàng Long, Lý Hải Bằng (2023), *Nghiên cứu một số chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường biến tính graphene oxit*, Tạp chí GTVT số tháng 4 năm 2023, Trang 59-62.
6. **Huong-Giang Thi Hoang**, Hoang-Long Nguyen, Hai-Bang Ly, Ngoc Hung Tran, (2023), *Evaluation of the Influence of Graphene Oxide on Asphalt Binder Physical and Rheological Properties*, Journal of Materials: Design and Applications, 6/2023, DOI: 10.1177/14644207231186610).
7. **Huong-Giang Thi Hoang**, Hoang Long Nguyen, Hai-Bang Ly, Hai-Van Thi Mai (2023), *Application of Extreme Gradient Boosting in Predicting the Viscoelastic Characteristics of Graphene Oxide Modified Asphalt at Medium and High Temperatures*, Frontiers of Structural and Civil Engineering (accepted May, 2023).
8. **Hoàng Thị Hương Giang**, Nguyễn Hoàng Long, Lý Hải Bằng (2023), *Nghiên cứu thực nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh và cường độ kéo uốn của bê tông nhựa sử dụng nhựa đường biến tính graphen oxit*, Tạp chí GTVT số tháng 9 năm 2023, Trang 117-120.