

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**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – 2023

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ GIAO THÔNG VẬN TẢI

BỘ 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**

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. PGS. TS. NGUYỄN HOÀNG LONG**
- 2. TS. LÝ HẢI BẰNG**

HÀ NỘI – 2023

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Nguyễn Hoàng Long và TS. Lý Hải Bằng. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả luận án

Hoàng Thị Hương Giang

LỜI CẢM ƠN

Sau thời gian học tập và nỗ lực nghiên cứu tại Trường Đại học Công nghệ GTVT, với sự giúp đỡ nhiệt tình của các thầy cô, đồng nghiệp, bạn bè, gia đình và người thân, NCS đã hoàn thành luận án *“Nghiên cứu sử dụng graphen oxit cải thiện tính chất cơ lý bê tông nhựa trong điều kiện Việt Nam”*.

Để hoàn thành luận án này, NCS xin gửi lời biết ơn sâu sắc đến hai Thầy hướng dẫn PGS.TS. Nguyễn Hoàng Long và TS. Lý Hải Bằng đã định hướng và tận tình hướng dẫn NCS trong suốt quá trình thực hiện luận án

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

NCS cũng xin gửi lời cảm ơn đến các Thầy Cô trong và ngoài trường, bạn bè đồng nghiệp đã luôn nhiệt tình hỗ trợ, cung cấp những tài liệu khoa học hết sức quý giá để NCS thực hiện đề tài nghiên cứu này.

Bên cạnh đó, NCS xin gửi lời cảm ơn đến Phòng thí nghiệm XD-LAS 1721 – Công ty Kinh doanh nhựa đường ICT, Trung tâm phân tích, thí nghiệm công nghệ cao Trường Đại học Mỏ địa chất, Phòng thí nghiệm trọng điểm – Viện khoa học vật liệu thuộc Viện hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Phòng thí nghiệm vật liệu xây dựng – Bộ môn Vật liệu xây dựng – Trường Đại học GTVT đã giúp NCS hoàn thành một số thí nghiệm trong phạm vi nghiên cứu của luận án.

Cuối cùng, NCS xin cảm ơn gia đình, người thân đã luôn động viên, ủng hộ, giúp đỡ về tinh thần, vật chất trong suốt quá trình NCS làm luận án.

Trân trọng cảm ơn!

Nghiên cứu sinh

Hoàng Thị Hương Giang

MỤC LỤC

MỤC LỤC	i
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	vii
DANH MỤC BẢNG SỐ LIỆU.....	viii
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	x
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ GRAPHEN OXIT VÀ BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT	5
1.1. Tổng quan các vật liệu nano cải thiện nhựa đường.....	5
1.2. Tổng quan về graphen oxit	8
<i>1.2.1. Nguồn gốc graphen oxit.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2. Cấu trúc của graphen oxit</i>	<i>10</i>
<i>1.2.3. Một số đặc tính của graphen oxit</i>	<i>11</i>
<i>1.2.3.1. Tính hút ẩm</i>	<i>11</i>
<i>1.2.3.2. Khả năng phân tán.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.3.3. Cộng hóa trị</i>	<i>12</i>
<i>1.2.3.4. Không cộng hóa trị</i>	<i>12</i>
<i>1.2.4. Các phương pháp điều chế graphen oxit</i>	<i>12</i>
<i>1.2.5. Các dạng graphen oxit trên thị trường.....</i>	<i>13</i>
1.3. Cơ chế tương tác giữa graphen oxit và nhựa đường	14
<i>1.3.1. Thành phần của nhựa đường.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.2. Cơ chế tương tác giữa graphen oxit và nhựa đường.....</i>	<i>15</i>
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.....	16
<i>1.4.1. Tình hình nghiên cứu nhựa đường sử dụng graphen oxit trên thế giới</i>	<i>16</i>
<i>1.4.2. Tình hình nghiên cứu bê tông nhựa sử dụng graphen oxit trên thế giới</i>	<i>20</i>
<i>1.4.3. Tình hình nghiên cứu nhựa đường và bê tông nhựa sử dụng GO tại Việt Nam</i>	<i>25</i>
1.5. Nghiên cứu sử dụng học máy dự báo các đặc trưng của nhựa đường và bê tông nhựa	26
<i>1.5.1. Những vấn đề chung về học máy.....</i>	<i>26</i>
<i>1.5.1.1. Học có giám sát (Supervised learning).....</i>	<i>27</i>
<i>1.5.1.2. Học không giám sát (Unsupervised learning)</i>	<i>27</i>

1.5.1.3. Học bán giám sát (Semi-supervised learning).....	28
1.5.1.4. Học củng cố (Reinforcement learning).....	28
1.5.2. Ứng dụng học máy dự báo chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường có phụ gia	28
1.5.3. Ứng dụng học máy xác định một số đặc tính cơ học mặt đường bê tông nhựa	30
1.5.3.1. Thông số Marshall	30
1.5.3.2. Mô đun động	30
1.5.3.3. Khả năng kháng lún vết bánh xe	30
1.5.3.4. Tuổi thọ mỏi	31
1.6. Xác định các vấn đề nghiên cứu của luận án	31
1.7. Phương pháp nghiên cứu	32
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA NHỰA ĐƯỜNG SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT	33
2.1. Xác định thành phần và công tác chế tạo nhựa đường sử dụng graphen oxit.....	33
2.1.1. Lựa chọn nhựa đường sử dụng trong nghiên cứu	33
2.1.2. Lựa chọn loại và hàm lượng graphen oxit.....	34
2.1.3. Lựa chọn nhiệt độ trộn, thời gian trộn và tốc độ trộn	35
2.1.4. Quy trình chế tạo mẫu nhựa đường sử dụng graphen oxit	36
2.2. Nghiên cứu thực nghiệm hình thái, thành phần hóa học của nhựa đường sử dụng graphen oxit	37
2.2.1. Các phương pháp phân tích xác định hình thái, cấu trúc hóa học của vật liệu.....	37
2.2.1.1. Phương pháp quang phổ hồng ngoại xác định cấu trúc hóa học ..	37
2.2.1.2. Phương pháp nghiên cứu hình thái vật chất bằng kính hiển vi điện tử quét	38
2.2.2. Kế hoạch thí nghiệm	39
2.2.3. Kết quả thí nghiệm	39
2.2.3.1. Kết quả nghiệm phân tích hình thái SEM của các vật liệu	39
2.2.3.2. Kết quả thí nghiệm phân tích cấu trúc hóa học của các vật liệu....	42
2.3. Nghiên cứu thực nghiệm chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường sử dụng graphen oxit.....	44
2.3.1. Lựa chọn chỉ tiêu, kế hoạch thí nghiệm và trình tự đánh giá	44
2.3.1.1. Lựa chọn chỉ tiêu đánh giá	44
2.3.1.2. Kế hoạch thí nghiệm	44
2.3.1.3. Trình tự thí nghiệm và xử lý kết quả	45

2.3.2. Độ kim lún của nhựa đường sử dụng GO	46
2.3.2.1. Thí nghiệm độ kim lún.....	46
2.3.2.2. Kết quả thí nghiệm độ kim lún	47
2.3.3. Điểm hóa mềm của nhựa đường sử dụng graphen oxit.....	49
2.3.3.1. Thí nghiệm điểm hóa mềm	49
2.3.3.2. Kết quả thí nghiệm điểm hóa mềm.....	50
2.3.4. Độ nhớt của nhựa đường sử dụng graphen oxit	51
2.3.4.1. Thí nghiệm độ nhớt	51
2.3.4.2. Kết quả thí nghiệm độ nhớt Brookfield.....	52
2.3.5. Mô đun cắt động và góc trễ pha của nhựa đường sử dụng graphen oxit	55
2.3.5.1. Thí nghiệm cắt động lưu biến trên máy DSR.....	55
2.3.5.2. Kết quả thí nghiệm của các mẫu N_GO chưa hóa già	56
2.3.5.3. Kết quả thí nghiệm của nhựa đường sử dụng graphen oxit sau hóa già RTFOT	57
2.3.6. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu khác của nhựa đường sử dụng graphen oxit.....	59
2.4. Kết luận chương 2	60
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT	61
3.1. Thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng graphen oxit.....	61
3.1.1. Lựa chọn phương pháp thiết kế thành phần bê tông nhựa sử dụng graphen oxit.....	61
3.1.2. Lựa chọn loại bê tông nhựa sử dụng trong nghiên cứu	62
3.1.3. Lựa chọn và yêu cầu kỹ thuật của cốt liệu, bột khoáng	62
3.1.4. Lựa chọn chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu	63
3.1.5. Lựa chọn nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp bê tông nhựa.....	64
3.1.6. Thiết kế thành phần cấp phối bê tông nhựa sử dụng graphen oxit....	64
3.1.7. Lựa chọn hàm lượng chất kết dính tối ưu	65
3.1.7.1. Kế hoạch thí nghiệm	66
3.1.7.2. Chế bị mẫu	66
3.1.7.3. Kết quả xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu.....	67
3.2. Lựa chọn các chỉ tiêu trong nghiên cứu.....	63
3.3. Độ ổn định, độ dẻo Marshall và độ ổn định còn lại.....	68
3.3.1. Kế hoạch thí nghiệm	68
3.3.2. Kết quả nghiên cứu	69
3.3.2.1. Đặc tính thể tích.....	69

3.3.2.2. Độ ổn định và độ dẻo Marshall	70
3.3.2.3. Độ ổn định còn lại.....	71
3.4. Khả năng kháng lún vết bánh xe.....	73
3.4.1. Phương pháp và kế hoạch thí nghiệm.....	73
3.4.2. Kết quả nghiên cứu	74
3.5. Mô đun đàn hồi tĩnh	76
3.5.1. Phương pháp thí nghiệm	77
3.5.2. Kế hoạch thí nghiệm	78
3.5.3. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh	78
3.5.4. Mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng.....	80
3.6. Cường độ kéo khi ép chẻ	81
3.6.1. Thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ	81
3.6.2. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ.....	82
3.6.3. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ.....	82
3.6.4. Xác định cường độ kéo uốn đặc trưng	84
3.7. Khả năng kháng nứt.....	84
3.7.1. Các phương pháp thí nghiệm kháng nứt.....	84
3.7.2. Phương pháp thí nghiệm xác định chỉ số kháng nứt CT_{Index}	86
3.7.3. Kế hoạch thí nghiệm	87
3.7.4. Kết quả thí nghiệm	88
3.8. Mô đun động.....	89
3.8.1. Phương pháp thí nghiệm	89
3.8.2. Kế hoạch thí nghiệm	90
3.8.3. Kết quả thí nghiệm	90
3.8.4. Xây dựng đường cong chủ mô đun động.....	92
3.8.5. Mô hình hóa mô đun động.....	95
3.8.5.1. Lựa chọn và xây dựng mô hình.....	95
3.8.5.2. Đánh giá sự phù hợp của mô hình 2S2P1D với kết quả thí nghiệm	97
3.9. Kết luận chương 3.....	98
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	100
4.1. Ứng dụng học máy trong dự báo tính chất cơ lý của vật liệu.....	100
4.1.1. Một số thuật toán học máy và các kỹ thuật được sử dụng trong nghiên cứu	100

4.1.1.1. Thuật toán ANN	101
4.1.1.2. Thuật toán Gradient Boosting (CGB).....	101
4.1.1.3. Kỹ thuật xác thực chéo.....	101
4.1.1.4. Các tiêu chí đánh giá năng lực dự báo của mô hình.....	102
4.1.2. Ứng dụng học máy trong dự báo tính chất cơ lý của nhựa đường sử dụng GO.....	102
4.1.2.1. Xây dựng cơ sở dữ liệu	102
4.1.2.2. Dự báo độ kim lún.....	104
4.1.2.3. Dự báo điểm hóa mềm	105
4.1.2.4. Dự báo độ kéo dài.....	106
4.1.2.5. Dự báo độ nhớt	106
4.1.2.6. Dự báo $G^*/\sin\delta$	107
4.1.3. Ứng dụng học máy dự báo tính chất cơ lý của bê tông nhựa sử dụng GO.....	107
4.1.3.1. Điều chỉnh siêu tham số của mô hình	109
4.1.3.2. Kết quả dự báo của mô hình CGB tốt nhất.....	110
4.1.3.3. Phân tích độ nhạy	111
4.1.4. So sánh kết quả dự báo theo học máy với kết quả thí nghiệm.....	112
4.1.5. Lợi ích của học máy trong dự báo tính chất cơ lý vật liệu	115
4.2. Ứng dụng bê tông nhựa sử dụng GO làm lớp mặt trong kết cấu áo đường mềm....	116
4.2.1. Kết cấu áo đường mềm điển hình trên các tuyến đường quốc lộ ở Việt Nam.....	116
4.2.1.1. KCAĐ trên các tuyến quốc lộ có $E_{yc} \geq 140-155$ MPa	116
4.2.1.2. KCAĐ trên các tuyến quốc lộ có $E_{yc} \geq 160 \div 180$ MPa [9]	117
4.2.2. Đề xuất kết cấu áo đường mềm có bê tông nhựa sử dụng GO làm lớp mặt.....	118
4.3. Kiểm toán kết cấu áo đường mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN	119
4.4. Phân tích kết cấu áo đường mềm theo phương pháp cơ học thực nghiệm	121
4.4.1. Các số liệu về giao thông.....	122
4.4.2. Các số liệu về khí hậu:	124
4.4.3. Lựa chọn các kết cấu áo đường.....	124
4.4.4. Các thông số của vật liệu	124
4.4.5. Kết quả phân tích kết cấu áo đường theo phương pháp cơ học thực nghiệm	124

4.5. Đề xuất hướng chế tạo bê tông nhựa sử dụng graphen oxit ở ngoài trạm trộn.....	126
4.6. Kết luận chương 4.....	128
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	129
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ	131
TÀI LIỆU THAM KHẢO	132
A. TIẾNG VIỆT	132
B. TIẾNG ANH	134
C. TIẾNG NGÀ.....	137
D. TÀI LIỆU TRÊN INTERNET.....	137

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

AASHTO	American Association of State Highway Transportation Officials – Hiệp hội các viên chức đường cao tốc và vận tải của Mỹ
ANOVA	Analysis Of Variance – Phân tích phương sai
ANN	Artificial Neural Network – Mạng nơ-ron nhân tạo
ASTM	American Society of Testing Materials – Hiệp hội Vật liệu thử nghiệm Mỹ
BGTVT	Bộ Giao thông Vận tải
BTN	Bê tông nhựa
BTNC	Bê tông nhựa chặt
BTN_GO	Bê tông nhựa sử dụng graphen oxit
CGB	Gradient Boosting – Tăng cường độ dốc
CV	Cross Validation – Xác thực chéo
CNT	Carbon Nanotube – Ống nano các bon
DSR	Dynamic Shear Rheometer – Cắt động lưu biến
FTIR	Fourier Transform Infra-Red – Chuyển đổi hồng ngoại
GO	Graphen oxit
GTVT	Giao thông vận tải
IRI	International Roughness Index – Chỉ số độ gồ ghề quốc tế
KCAD	Kết cấu áo đường
KCADM	Kết cấu áo đường mềm
MAE	Mean Absolute Error - Sai số tuyệt đối trung bình
MAPE	Mean Absolute Percentage Error - Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình
M-E	Mechanistic Empirical – Cơ học thực nghiệm
ML	Machine Learning – Học máy
MSE	Mean Square Error – Sai số toàn phương trung bình
MS	Marshall Stability – Độ ổn định Marshall
N_GO	Nhựa đường sử dụng graphen oxit
PG	Performance Graded – Đặc tính khai thác
QĐ	Quyết định
QL	Quốc lộ
R	Correlation Coefficients – Hệ số tương quan
R^2	Coefficient of Determination – Hệ số xác định
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test – Thí nghiệm màng mỏng xoay
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
TFOT	Thin Film Oven Test – Thí nghiệm màng mỏng
TT	Thông tư
SEM	Scanning Electron Microscope – Kính hiển vi điện tử quét
V_a	Air Voids – Độ rỗng dư
VFA	Voids Filled with Asphalt – Độ rỗng lấp đầy bitum
VMA	Voids in the Mineral Aggregate – Độ rỗng cốt liệu

DANH MỤC BẢNG SỐ LIỆU

Bảng 1.1. Một số vật liệu nano dùng trong cải thiện nhựa đường [76].	5
Bảng 2.1. Các tiêu chuẩn kỹ thuật của nhựa đường 60/70.	33
Bảng 2.2. Các đặc tính của GO được sử dụng trong nghiên cứu.	34
Bảng 2.3. Kế hoạch thí nghiệm hình thái, thành phần hóa học của vật liệu.	39
Bảng 2.4. Kế hoạch thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật của chất kết dính N_GO.	45
Bảng 2.5. Kết quả xác định khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén BTN sử dụng chất kết dính N_GO.	54
Bảng 2.6. Kết quả thí nghiệm mô đun cắt động theo chuẩn PG của N_GO sau RTFOT.	58
Bảng 2.7. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu còn lại của N_GO.	59
Bảng 3.1. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu.	59
Bảng 3.2. Các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của nhựa đường 60/70 và N_GO.	63
Bảng 3.3. Phối trộn tỉ lệ thành phần cốt liệu.	64
Bảng 3.4. Kế hoạch thí nghiệm xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu các loại BTN.	66
Bảng 3.5. Khoảng hàm lượng nhựa tối ưu của các loại BTN.	67
Bảng 3.6. Số lượng mẫu thí nghiệm Marshall của BTN_GO.	69
Bảng 3.7. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN_60/70 và BTN_GO.	69
Bảng 3.8. Độ ổn định còn lại của BTN_60/70 và BTN_GO.	72
Bảng 3.9. Số lượng mẫu thí nghiệm LVBX cho các loại BTN.	74
Bảng 3.10. Kết quả thí nghiệm LVBX của BTN_60/70 và BTN_GO.	75
Bảng 3.11. Số lượng mẫu thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh của BTN_GO.	78
Bảng 3.12. Mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng của BTN_GO.	80
Bảng 3.13. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ BTN_GO.	82
Bảng 3.14. Cường độ kéo uốn đặc trưng của BTN_GO.	84
Bảng 3.15. Kế hoạch thí nghiệm chỉ số kháng nứt của BTN_GO.	87
Bảng 3.16. Kế hoạch thí nghiệm mô đun động BTN_GO.	90
Bảng 3.17. Kết quả xác định các hệ số của quy tắc WLF.	94
Bảng 3.18. Các thông số của mô hình 2S2P1D mô phỏng đường cong chủ $ E^* $.	96
Bảng 3.19. Đánh giá kết quả dự báo $ E^* $ của BTN_GO bằng mô hình 2S2P1D.	98
Bảng 4.1. Các biến đầu vào và đầu ra được sử dụng trong quá trình phát triển mô hình.	109

Bảng 4.2. Hiệu suất dự báo của thuật toán ARO và SFO với np khác nhau.	110
Bảng 4.3. Kết cấu áo đường sử dụng BTN_GO và kết cấu đối chứng.	119
Bảng 4.4. Thông số đặc trưng của các lớp vật liệu của 2 kết cấu.	120
Bảng 4.5. Kết quả kiểm toán KCAĐ theo TCCS 38:2022.	120
Bảng 4.6. Phân loại xe trong phương pháp M-E ở Việt Nam [19].	121
Bảng 4.7. Tỷ lệ thành phần các dòng xe và hệ số tăng trưởng xe hàng năm.	123
Bảng 4.8. Số xe nặng tích lũy trong phân tích M-E.	124
Bảng 4.9. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E với $N_0 = 686$ xe/nd.	125
Bảng 4.10. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E với $N_0 = 1.000$ xe/nd.	125
Bảng 4.11. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E với $N_0 = 2000$ xe/nd.	125

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Cấu trúc graphit [22].	9
Hình 1.2. Lò nung để sản xuất graphit từ than cốc [61].	10
Hình 1.3. Cấu trúc hóa học của GO [55].	11
Hình 1.4. Quy trình điều chế GO từ graphit bằng oxi hóa khử [46].	13
Hình 1.5. Các dạng GO trên thị trường.	14
Hình 1.6. Cấu trúc các nhóm chất chính của nhựa đường [15].	15
Hình 1.7. Kết quả kiểm tra mô đun đàn hồi [33].	22
Hình 1.8. Kết quả kiểm tra biến dạng vĩnh viễn [33].	23
Hình 1.9. Kết quả thử nghiệm Marshall [33].	24
Hình 1.10. Giá trị đứt gãy giới hạn (J_c) của BTN_GO [33].	24
Hình 2.1. Graphen oxit được sử dụng trong nghiên cứu này.	34
Hình 2.2. Các thiết bị sử dụng trong quá trình tạo chất kết dính N_GO.	36
Hình 2.3. Thiết bị quang phổ hồng ngoại được sử dụng trong nghiên cứu.	38
Hình 2.4. Thiết bị chụp hiển vi điện tử quét phân giải cao SEM.	39
Hình 2.5. Hình ảnh chụp SEM của GO sử dụng trong nghiên cứu.	40
Hình 2.6. Hình ảnh chụp SEM của nhựa đường 60/70.	41
Hình 2.7. Hình ảnh SEM của chất kết dính N_GO.	41
Hình 2.8. Phổ FTIR của GO.	42
Hình 2.9. Phổ FTIR của nhựa đường 60/70 và N_GO.	43
Hình 2.10. Thiết bị đo và mẫu thí nghiệm độ kim lún.	47
Hình 2.11. Phân tích hậu định độ kim lún của các mẫu N_GO.	48
Hình 2.12. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê độ kim lún.	49
Hình 2.13. Ảnh hưởng của GO đến độ kim lún của N_GO.	49
Hình 2.14. Thiết bị đo và mẫu thí nghiệm điểm hóa mềm.	50
Hình 2.15. Ảnh hưởng của GO đến điểm hóa mềm của N_GO.	51
Hình 2.16. Thiết bị đo và nguyên lý hoạt động của nhớt kế Brookfield.	52
Hình 2.17. Ảnh hưởng của các yếu tố đến độ nhớt N_GO.	53
Hình 2.18. Ảnh hưởng của GO đến độ nhớt nhựa đường ở các nhiệt độ.	53
Hình 2.19. Thiết bị đo DSR.	55
Hình 2.20. Mô đun cắt động (a), góc trễ pha (b), và $G^*/\sin\delta$ (c) của N_GO chưa hóa già.	57

Hình 2.21. Một số hình ảnh thí nghiệm các chỉ tiêu còn lại của N_GO.	59
Hình 3.1. Một số hình ảnh kiểm tra chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu.	63
Hình 3.2. Đường cong cấp phối của hỗn hợp BTN_60/70 và BTN_GO.	65
Hình 3.3. Một số hình ảnh thí nghiệm Marshall.	67
Hình 3.4. Đồ thị khoảng giá trị độ ổn định Marshall của BTN_GO.	71
Hình 3.5. Đồ thị khoảng giá trị độ dẻo Marshall của BTN_GO.	71
Hình 3.6. Thí nghiệm độ ổn định còn lại BTN_GO.	72
Hình 3.7. Độ ổn định còn lại của BTN_60/70 và BTN_GO.	73
Hình 3.8. Một số hình ảnh thí nghiệm xác định LVBX.	74
Hình 3.9. Biểu đồ quan hệ chiều sâu LVBX và số lần chạy của các mẫu BTN.	76
Hình 3.10. Mẫu BTN_60/70 và BTN_GO sau khi chạy LVBX.	76
Hình 3.11. Mô phỏng mẫu thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh.	77
Hình 3.12. Biến dạng đàn hồi của mẫu BTN theo thời gian gia tải và dỡ tải.	77
Hình 3.13. Một số hình ảnh thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh.	78
Hình 3.14. E tĩnh ở các nhiệt độ khác nhau của các loại BTN (độ tin cậy 95%).	79
Hình 3.15. Mô hình thí nghiệm ép chẻ theo TCVN 8862:2011.	81
Hình 3.16. Thí nghiệm kéo khi ép chẻ các mẫu BTN_GO.	81
Hình 3.17. Cường độ kéo khi ép chẻ của BTN_GO.	83
Hình 3.18. Đường cong lực và chuyển vị trong thí nghiệm IDEAL-CT _{Index}	85
Hình 3.19. Công tác chế bị mẫu CT _{index} của BTN_GO	86
Hình 3.20. Thí nghiệm xác định chỉ số kháng nứt BTN_GO.	86
Hình 3.21. Đường cong lực – chuyển vị của các tổ mẫu BTN.	88
Hình 3.22. Kết quả thử nghiệm CT _{Index} của BTN_GO (độ tin cậy 95%).	89
Hình 3.23. Một số hình ảnh thí nghiệm mô đun động.	90
Hình 3.24. Biểu đồ mô đun động $ E^* $ của các loại BTN ở 4°C.	91
Hình 3.25. Biểu đồ mô đun động $ E^* $ của các loại BTN ở 21°C.	91
Hình 3.26. Biểu đồ mô đun động $ E^* $ của các loại BTN ở 37°C.	92
Hình 3.27. Hình: Biểu đồ mô đun động $ E^* $ của các loại BTN ở 54°C.	92
Hình 3.28. Đường cong chủ $ E^* $ của BTN_GO_1% ở nhiệt độ tham chiếu 21°C.	93
Hình 3.29. Đường cong chủ $ E^* $ của BTN_GO ở nhiệt độ tham chiếu 21°C.	93
Hình 3.30. Biểu đồ quan hệ giữa a_T và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ.	95
Hình 3.31. Sơ đồ mô tả mô hình 2S2P1D.	96
Hình 3.32. Mô hình hóa đường cong chủ $ E^* $ của BTN_GO theo mô hình 2S2P1D.	97

Hình 4.1. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo độ kim lún bằng mô hình ANN.	105
Hình 4.2. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo điểm hóa mềm bằng mô hình ANN.	105
Hình 4.3. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo độ kéo dài bằng mô hình ANN.	106
Hình 4.4. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo độ nhớt bằng mô hình ANN.	107
Hình 4.5. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo $G^*/\sin\delta$ bằng mô hình CGB.	107
Hình 4.6. Tương quan giá trị thử nghiệm và giá trị dự báo MS bằng mô hình CGB.	111
Hình 4.7. Biểu đồ SHAP trong phân tích độ nhạy MS.	111
Hình 4.8. So sánh kết quả dự báo theo ML với kết quả thí nghiệm.	112
Hình 4.9. Giao diện GUI trong dự báo nhanh $G^*/\sin\delta$ của N_GO.	113
Hình 4.10. Giao diện GUI trong dự báo nhanh MS của BTN_GO.	114
Hình 4.11. Hướng chế tạo BTN_GO ở trạm trộn.	127

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, thường được sử dụng ở các lớp mặt của mặt đường mềm cấp cao, đường đô thị, đường sân bay, và lớp phủ mặt cầu bởi các ưu điểm như giá thành không cao, bằng phẳng, êm thuận, thi công xong có thể thông xe luôn, và ít gây tiếng ồn. Tuy nhiên, chất lượng của BTN phụ thuộc nhiều vào chất kết dính (nhựa đường). 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. Cụ thể, 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 chảy nhựa, lún vệt bánh xe, nứt mối, và bong tróc vật liệu. Đây là những hạn chế trong khai thác của mặt đường BTN sử dụng nhựa đường thông thường ở Việt Nam nói riêng và trên thế giới nói chung trong điều kiện nhiệt độ môi trường cao, lưu lượng giao thông lớn và tải trọng trục xe nặng [58]. 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 [67], [71]. 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. Ở Việt Nam, nhiều công trình nghiên cứu đã đưa các phụ gia khác nhau vào nhựa đường nhằm cải thiện tính chất cơ lý của chất kết dính, có thể kể đến một số loại phụ gia như vôi hydrat, Zycotherm, Toughfix Hyper của Vũ Ngọc Phương [24], keo epoxy của Trần Thị Cẩm Hà [11], lưu huỳnh từ nhà máy lọc dầu Dung Quất của Nguyễn Thu Trang [27], phế thải nhựa của Nguyễn Hồng Quân [25], v.v.

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. Nhiều công trình nghiên

cứ được thực hiện để đưa vật liệu nano vào nhựa đường nhằm mục đích cải thiện các đặc tính của nó theo hướng tốt hơn, từ đó nâng cao chất lượng và tăng hiệu quả sử dụng của BTN trong các ứng dụng xây dựng. 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 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. Số lượng các chỉ tiêu ở các nghiên cứu còn khá hạn chế nên việc đánh giá khả năng sử dụng GO trong cải thiện các tính chất cơ lý của BTN còn chưa xuyên suốt và tổng quát.

Việc nắm bắt kịp thời các nghiên cứu mới của thế giới cũng như nghiên cứu áp dụng vào thực tiễn sản xuất của Việt Nam luôn là các nhiệm vụ quan trọng của các nhà khoa học trong nước. Cho đến nay, Việt Nam chưa có nghiên cứu nào về sử dụng GO trong cải thiện tính chất cơ lý của nhựa đường và BTN. 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*” là đề tài cần thiết và phù hợp với tình hình thực tiễn.

II. Mục đích nghiên cứu

Với mục đích nghiên cứu ảnh hưởng của GO đến các tính chất cơ lý của BTN khai thác trong điều kiện Việt Nam, luận án tập trung nghiên cứu các nội dung sau:

- 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 của luận án là nhựa đường 60/70 và bê tông nhựa 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 kết cấu áo đường mềm.

Phạm vi nghiên cứu của luận án 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 trong một số tuyến đường cấp cao ở Việt Nam.

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

1. Ý nghĩa khoa học

- Phân tích, làm rõ cơ sở khoa học việc sử dụng GO trong nhựa đường và BTN. Phân tích thành phần và cấu trúc của hỗn hợp 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.

2. Ý nghĩa thực tiễn

- Xác định được các chỉ tiêu kỹ thuật của BTN_GO khi thiết kế kết cấu áo đường theo TCCS 38:2022/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.

V. Bố cục của luận án

Luận án được sắp xếp theo bố cục gồm các phần chính sau:

Mở đầu: Trình bày tính cấp thiết, lý do chọn đề tài, mục đích, nội dung, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án.

Chương 1: Tổng quan về graphen oxit và bê tông nhựa sử dụng graphen oxit.

Chương 2: Nghiên cứu một số tính chất cơ lý của chất kết dính nhựa đường sử dụng graphen oxit.

Chương 3: Nghiên cứu thực nghiệm xác định các tính chất cơ lý của bê tông nhựa sử dụng graphen oxit.

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.

Kết luận và kiến nghị: Tổng hợp các đóng góp mới của luận án, những hạn chế, đề xuất một số kiến nghị và hướng nghiên cứu tiếp theo đối với luận án.

Danh mục các công trình đã công bố.

Tài liệu tham khảo.

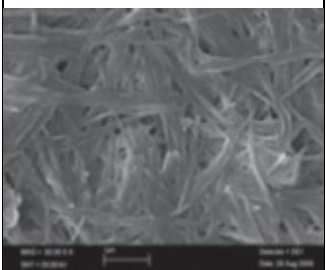
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ GRAPHEN OXIT VÀ BÊ TÔNG NHỰA SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT

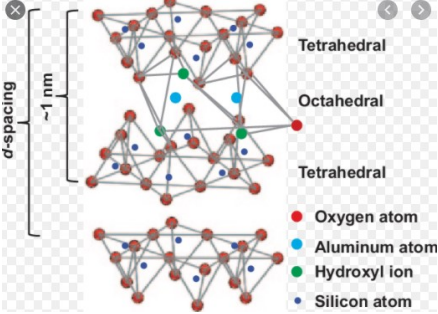
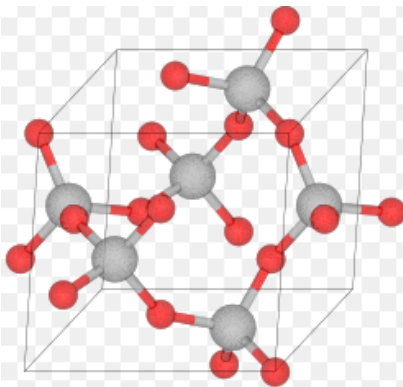
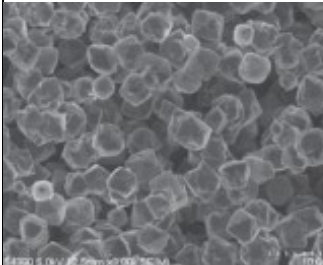
Việc nghiên cứu và ứng dụng các vật liệu nano trong cải thiện chất lượng BTN đang là một xu hướng phát triển mới của ngành xây dựng trên toàn thế giới. Ở Việt Nam, các nghiên cứu này mới đang ở giai đoạn đầu nhưng cũng có một số kết quả nhất định. Công nghệ nano nói chung và GO nói riêng chưa được nghiên cứu và ứng dụng nhiều ở Việt Nam trong xây dựng mặt đường ô tô. Vì vậy, nội dung chương 1 tập trung phân tích tổng quan về vật liệu GO trong cải thiện nhựa đường và BTN trên thế giới và ở Việt Nam, từ đó lựa chọn loại GO và tỷ lệ GO làm cơ sở nghiên cứu thực nghiệm ở các chương tiếp theo.

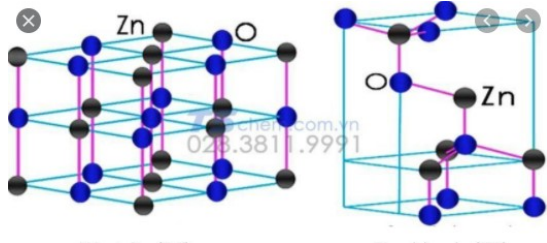
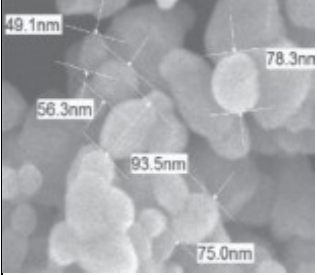
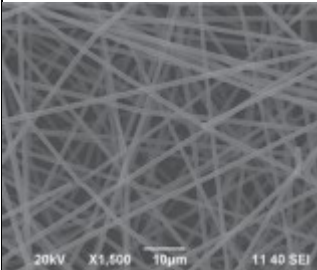
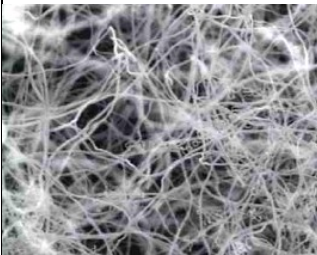
1.1. Tổng quan các vật liệu nano cải thiện nhựa đường

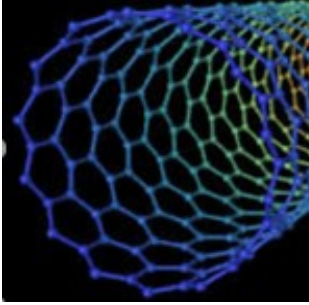
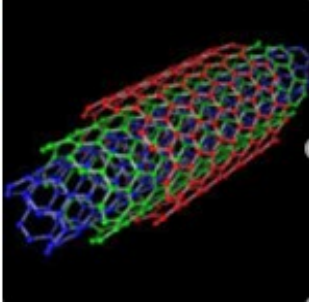
Vật liệu nano là loại vật liệu mà trong cấu trúc phải có ít nhất một chiều ở kích thước nanomet. Chúng bao gồm các dạng hạt, sợi, tấm, bản hoặc ống. Vật liệu nano thể hiện những tính năng đặc biệt mà những vật liệu truyền thống không có được do việc thu nhỏ kích thước và tăng diện tích tiếp xúc pha của chúng [20]. 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, Al₂O₃, Fe₂O₃), sợi nano, nano-silica, và ống nano các bon. Đặc điểm của các loại vật liệu nano này được tổng hợp chi tiết tại Bảng 1.1 [76].

Bảng 1.1. Một số vật liệu nano dùng trong cải thiện nhựa đường [76].

TT	Loại vật liệu nano/đặc điểm	Hình thái vật liệu
1	Nano khoáng sét  Nano khoáng sét - Màu trắng.	 Độ phóng đại 50.000

TT	Loại vật liệu nano/đặc điểm	Hình thái vật liệu
	- Gồm nhiều lớp alumino-silicat dày ~ 1nm. - Phân tán trong polime tạo thành tổ hợp nano polime.  Cấu trúc của Nano khoáng sét	
2	Nano-silica  Bột Nano-silica - Màu trắng, siêu mịn. - Kích thước nhỏ, hấp phụ mạnh mẽ. - Năng lượng bề mặt cao. - Phân tán tốt, chịu nhiệt cao.  Cấu trúc Nano-silica	 Độ phóng đại 3000 lần
3	Nano kim loại (ZnO, Fe₂O₃, và Al₂O₃) Ví dụ: Nano ZnO	

TT	Loại vật liệu nano/đặc điểm	Hình thái vật liệu
	 Bột Nano ZnO - Dạng bột, màu trắng. - Đường kính hạt nhỏ hơn 100 nanomet. - Diện tích bề mặt lớn.  Cấu trúc Nano ZnO	 Nano ZnO
4	Sợi nano  Sợi nano - Đường kính sợi trong phạm vi nanomet. - Được tạo ra từ các polime khác nhau, do đó có các tính chất vật lý và tiềm năng ứng dụng khác nhau.	 Độ phóng đại 1500 lần
5	Ống nano các bon (Carbon nanotube - CNT) - Là những tấm than chì mỏng một nguyên tử tạo thành hình trụ rỗng. - Gồm 2 loại: ống nano đơn, ống nano nhiều vách.	

TT	Loại vật liệu nano/đặc điểm	Hình thái vật liệu
	  Ống nano đơn Ống nano nhiều lớp - Đường kính ống từ vài nm đến vài chục nm. - Có nhiều tính chất siêu việt như độ cứng siêu việt, tính mềm dẻo khi bị uốn cong, độ dẫn nhiệt cực tốt và tính chịu nhiệt cao trong chân không.	

Nhìn chung, những vật liệu nano này đã có ảnh hưởng tích cực đến khả năng gia tăng độ cứng và độ nhớt, từ đó nâng cao khả năng chống lún ở nhiệt độ cao, khả năng chống nứt do mỏi và khả năng chống hư hỏng do nước trong bối cảnh gia tăng tải trọng giao thông và điều kiện môi trường [76]. Hơn nữa, thành phần nhựa đường rất phức tạp và bao gồm nhiều phân tử hữu cơ, có thể phản ứng với nhiều chất phụ gia khác nhau. Việc nghiên cứu tác động và cơ chế biến đổi của các loại vật liệu nano mới trong nhựa đường không ngừng phát triển và luôn nhận được sự quan tâm lớn của các nhà khoa học.

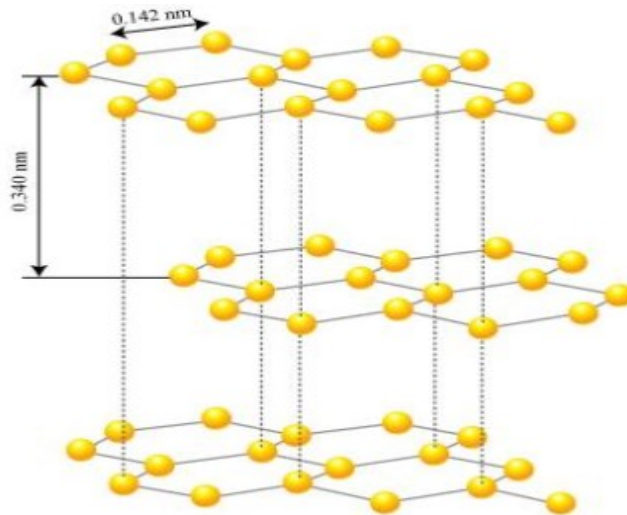
GO là vật liệu nano thuộc họ các bon, được biết đến khoảng 150 năm trước [74]. Các nghiên cứu về GO trong cải thiện nhựa đường mới chỉ phát triển khoảng vài năm trở lại đây với số lượng nghiên cứu còn hạn chế. Do vậy, việc sử dụng GO cải thiện nhựa đường hiện nay đang là hướng nghiên cứu khá mới mẻ và hứa hẹn sẽ đem lại những kết quả khả quan.

1.2. Tổng quan về graphen oxit

1.2.1. Nguồn gốc graphen oxit

GO có nguồn gốc từ graphit (than chì) với thành phần chủ yếu là các bon. Các bon được biết đến 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, graphit được cấu tạo từ các lớp với mỗi nguyên tử carbon ở trạng thái lai hóa sp^2 , kết hợp hóa trị với ba nguyên tử carbon xung quanh để tạo thành một vòng sáu cạnh [61]. Các vòng này nối với nhau để tạo thành một lớp vô hạn, và các lớp này kết nối với nhau thông qua lực Van der Waals, với khoảng cách khoảng 0,34 nm (Hình 1.1). Sự tác động của lực Van der Waals làm cho graphit có tính chất mềm, trơn, và các lớp có khả năng trượt qua lớp khác và tách ra khi có lực tác dụng.



Hình 1.1. Cấu trúc graphit [22].

Theo nguồn gốc, graphit được chia thành 2 loại: graphit tự nhiên và graphit tổng hợp. Graphit tự nhiên thường được chia thành 3 dạng: dạng vô định hình, dạng vảy (mảnh) và dạng mạch (hoặc dạng cục). Chúng được tìm thấy nhiều tại các mỏ khoáng sản ở Bắc Mỹ, Trung Mỹ, Nam Mỹ, Châu Âu, Châu Phi, Nga, và Trung Quốc. Nhu cầu graphit tự nhiên không đổi cho đến năm 2008, sau đó tăng nhẹ lên với hơn 1 triệu tấn/năm. Trung Quốc là quốc gia dẫn đầu thế giới trong sản xuất graphit tự nhiên, tiếp theo là Ấn Độ, Brazil, và Bắc Triều Tiên. Ngoài ra, Trung Quốc và Canada là những nhà sản xuất graphit dạng vảy hàng đầu, Sri Lanka là nhà cung cấp duy nhất graphit dạng mạch, và Mexico cung cấp graphit dạng vô định hình. Ước tính trên thế giới trữ lượng graphit có thể thu hồi được khoảng 800 triệu tấn [61].

Graphit tổng hợp (nhân tạo) là vật liệu sản xuất, được tạo ra bằng cách đốt nóng một tiền chất các bon trong môi trường khí trơ ở nhiệt độ 2400°C. Nhiệt độ cao là cần thiết để các nguyên tử các bon chuyển động và sắp xếp lại, tạo ra hiệu ứng chuyển pha rắn, dẫn đến sự hình thành các tinh thể graphit. Các nguyên liệu thô để sản xuất ra graphit

có rất nhiều và có thể có nguồn gốc từ dầu mỏ, than đá, các hóa chất hữu cơ tự nhiên hoặc tổng hợp. Tuy nhiên cần lưu ý rằng, không phải tất cả các hợp chất chứa các bon đều có thể chuyển thành graphit ngay cả khi nung chúng ở nhiệt độ cao. Ở Mỹ, vật liệu chính để sản xuất graphit là than cốc, quá trình sản xuất được thực hiện nung ở nhiệt độ 1350°C trong thời gian 1 giờ [61] (Hình 1.2).



Hình 1.2. Lò nung để sản xuất graphit từ than cốc [61].

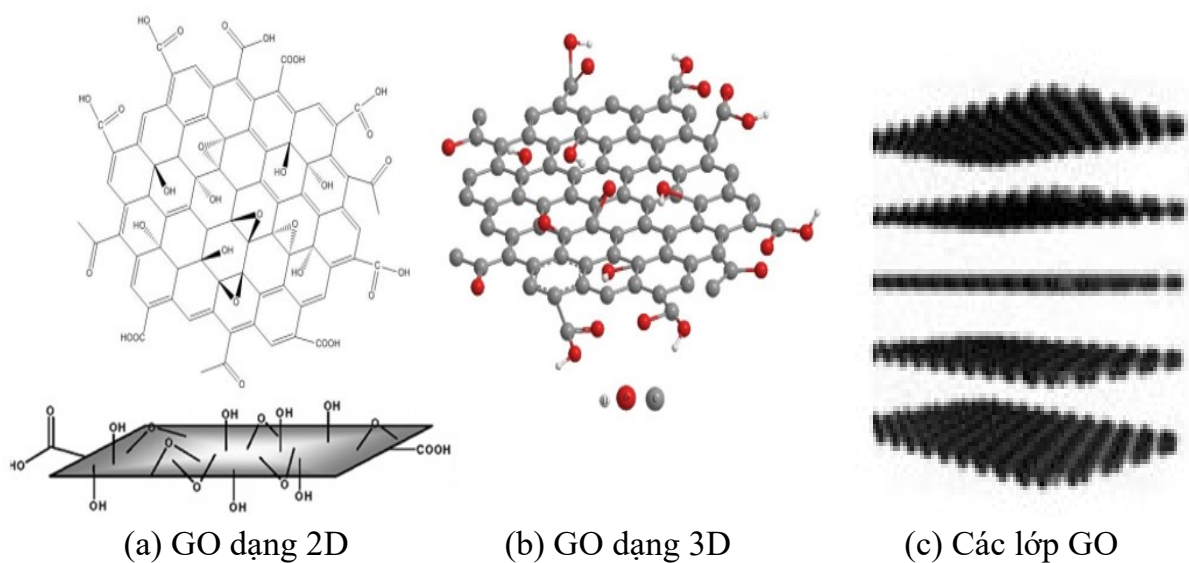
Ở Việt Nam, dự kiến tổng trữ lượng và tài nguyên quặng graphit khoảng 30 triệu tấn so với nhu cầu trong nước và khu vực [21]. Nguồn quặng graphit tập trung chủ yếu ở vùng Tây Bắc với trữ lượng và tài nguyên dự báo khoảng 26 triệu tấn, cũng như khu vực Trung Bộ, ước khoảng 3 triệu tấn. Các mỏ quặng graphit tại Việt Nam nằm chủ yếu trong đoạn đứt gãy Sông Hồng kéo dài từ Yên Bái đến Lào Cai. Hiện tại, chỉ có hai mỏ Cổ Phúc – Yên Bái và Hưng Nhượng – Quảng Ngãi đang khai thác và chế biến graphit. Các sản phẩm graphit hiện nay chủ yếu được cung cấp dưới dạng quặng tinh, chất lượng dao động từ 80-85% C và một số ít quặng tinh có chất lượng khoảng $\sim 92\%$ C [21].

Do cấu trúc độc đáo, graphit được sử dụng gần như trong tất cả các lĩnh vực thương mại và công nghiệp như ứng dụng trong điện cực, luyện kim, vật liệu chịu lửa, công nghiệp xử lý hóa chất, cơ học (chất bôi trơn). Đặc biệt, đây là nguồn vật liệu chính để sản xuất ra GO. Với tiềm năng graphit sẵn có, công nghệ sản xuất ngày càng cải tiến và hoàn thiện, ngành công nghiệp sản xuất GO hứa hẹn sẽ phát triển mạnh trong tương lai gần.

1.2.2. Cấu trúc của graphen 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) và epoxy (C-O-

C) đính ở trên bề mặt, nhóm cacboxylic (COOH) và cacbonyl (C=O) đính ở mép các đơn lớp (Hình 1.3). Các nhóm chức này đã góp phần làm tăng khả năng phản ứng của GO và cũng làm gia tăng khoảng cách giữa các lớp GO. Độ dày của đơn lớp GO được tìm thấy khoảng một vài nanomet, kích thước bên của lớp thay đổi từ vài micromet đến vài chục micromet. Các vòng thơm, các nối đôi và các nhóm epoxy được cho là nằm trên mạng lưới của các nguyên tử các bon gần như phẳng. Trong khi đó, các nguyên tử các bon nối với nhóm –OH lại hơi lệch so với cấu trúc tứ diện, dẫn đến cấu trúc lớp hơi cong. Các nhóm chức này được phát hiện tồn tại cả trên và dưới các lớp của GO. Mỗi lớp chứa các nhóm chức oxy mang điện tích âm, tạo ra lực đẩy giữa các lớp và làm cho GO có tính ưa nước, dễ phân tán và tách lớp trong các dung môi khác nhau, bao gồm cả nhựa đường. Các nhóm chức này cũng tương tác dễ dàng để hình thành liên kết hydro và tương tác điện tử với các hợp chất hữu cơ chứa oxi, lưu huỳnh và nitơ [74].



Hình 1.3. Cấu trúc hóa học của GO [55].

1.2.3. Một số đặc tính của graphen oxit

1.2.3.1. Tính hút ẩm

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, khả năng hút ẩm của GO phụ thuộc nhiều vào độ ẩm môi trường. Khi một lượng lớn nước giữa các lớp có mặt trong các màng GO xếp chồng lên nhau, một mạng lưới các liên kết hydro hình thành giữa các phân tử nước và các nhóm oxy trên GO. Các liên kết này không làm ảnh hưởng đến các đặc tính cấu trúc, cơ học và điện tử của GO [74].

1.2.3.2. Khả năng phân tán

Một trong những ưu điểm của GO là khả năng phân tán dễ dàng trong các dung môi hữu cơ khác nhau, tạo thành dung dịch keo ổn định. Tuy nhiên, do sự hình thành các nhóm chức chứa oxy, một phần liên kết sp^2 trong mạng tinh thể bị suy thoái và chuyển thành liên kết sp^3 . Các điện tích âm từ các nhóm chức này tạo ra lực đẩy tĩnh điện, giúp GO phân tán dễ dàng trong các dung môi phân cực và hình thành các đơn lớp, từ đó gia tăng tỷ diện tích bề mặt của GO [74].

1.2.3.3. Cộng hóa trị

Trong số các nguyên tố chức năng khác nhau, axit cacboxylic hoạt động mạnh nhất, vì nó chủ yếu nằm ở ngoại vi của các tấm GO. Epoxy là một nhóm chức năng chính khác trên GO, các vòng epoxy có thể dễ dàng mở ra trong môi trường axit hoặc bằng cách tấn công nucleophin. Các liên kết cộng hóa trị phát triển mạnh mẽ giữa GO và hóa chất khác, hầu hết chúng xảy ra với nhiều nhóm chức năng trên GO, điều này chứng tỏ GO là một hợp chất rất hoạt động. Tuy nhiên, cũng do môi trường phức tạp trên bề mặt GO đặc biệt là sự tồn tại của các cặp electron dài trên hầu hết các nguyên tử oxy, các phản ứng thực tế rất phức tạp và sự gắn kết cộng hóa trị của các phân tử chức năng với sp^2 các bon vẫn chưa được xác minh.

1.2.3.4. Không cộng hóa trị

Các tương tác không phải cộng hóa trị như liên kết liên kết π - π , liên kết hydro, tương tác cation- π hoặc Van der Waals chủ yếu xảy ra trên các miền các bon bị oxy hóa hoặc sp^2 của GO. Độ bền của liên kết π - π phụ thuộc vào số vòng thơm trong hệ thống điện tử π của các phân tử hấp phụ và độ cong tiếp xúc giữa vùng thơm của phân tử và bề mặt của vật liệu graphit. Năng lượng hoạt hóa của quá trình này được tìm thấy cao hơn năng lượng của quá trình hấp phụ vật lý [74].

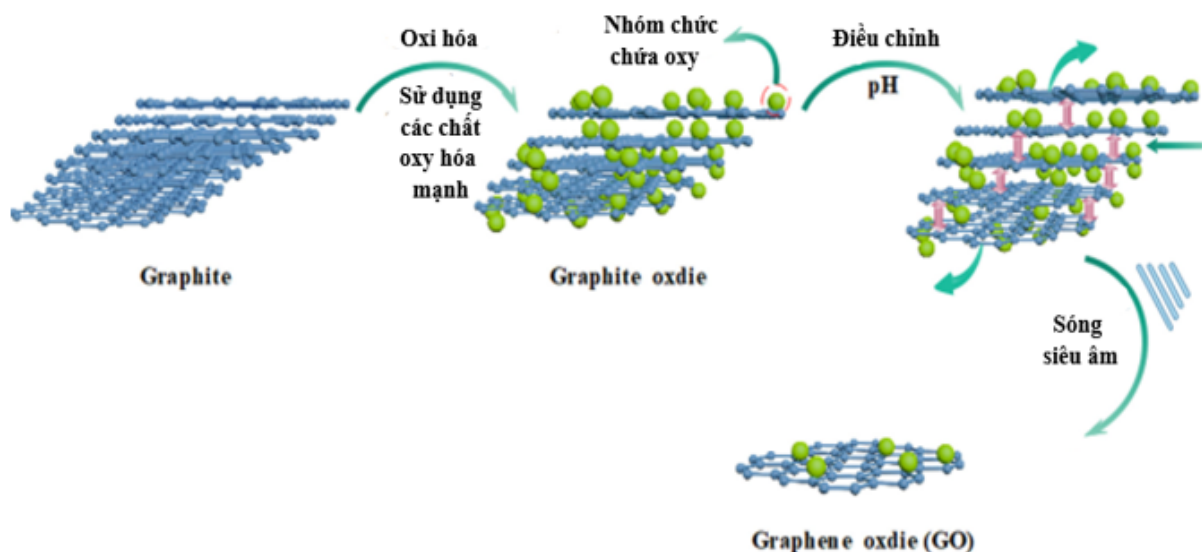
1.2.4. Các phương pháp điều chế graphen oxit

GO được tạo ra bằng cách xử lý graphit với các chất oxy hóa mạnh như HNO_3 , H_2SO_4 , $KMnO_4$, H_3PO_4 , $KClO_3$. Quá trình oxy hóa graphit 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) [74]. Các phương pháp này

mặc dù thu được GO đơn lớp có độ tinh khiết cao, tỷ diện bề mặt lớn nhưng thời gian thí nghiệm kéo dài do quá trình oxi hóa xảy ra trong thời gian dài nên hiệu suất đạt được không cao.

Ngoài ra, phương pháp điện hóa cũng được nghiên cứu để điều chế GO trong phòng thí nghiệm [18]. Ưu điểm của phương pháp này là an toàn, thời gian chế tạo rất nhanh, dễ kiểm soát, thân thiện với môi trường, không bị ô nhiễm kim loại và dễ dàng mở rộng theo quy mô công nghiệp với chi phí thấp. Tuy nhiên, để thực hiện được phương pháp này, yêu cầu graphite phải có dạng khối hoặc tấm.

Nhìn chung, các phương pháp điều chế GO về bản chất là giống nhau, chỉ khác nhau ở việc sử dụng loại chất oxi hóa, nồng độ chất oxi, tỷ lệ giữa các chất oxi hóa và thời gian oxi hóa. Quá trình điều chế GO từ graphite đang không ngừng phát triển và đổi mới để nâng cao chất lượng sản phẩm, giảm thời gian và chi phí sản xuất, có thể sản xuất với quy mô lớn, hàng loạt. Điều này mang lại khả năng sử dụng rộng rãi cho vật liệu đặc biệt này trong lĩnh vực xây dựng nói chung và xây dựng mặt đường BTN nói riêng.



Hình 1.4. Quy trình điều chế GO từ graphite bằng oxi hóa khử [46].

1.2.5. Các dạng graphen oxit trên thị trường

Với các phương pháp điều chế và sản xuất GO như trên, 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, thường có 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

m^2/g , độ tinh khiết đạt 99%. Do đó, chỉ cần một lượng rất nhỏ GO ở mức 0,05% khối lượng nhựa đường đã cải thiện đáng kể các đặc tính của nhựa đường và BTN [79], [82].

- Dạng 2: Sản xuất theo quy mô công nghiệp, thường có dạng 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 $\geq 95\%$. Lượng GO lớn nhất dạng này được sử dụng trong các nghiên cứu có thể lên tới 3% khối lượng nhựa đường [75].

Hiện nay, Công ty Cổ phần Graphene có trụ sở tại Thành Phố Hồ Chí Minh là đơn vị tiên phong sản xuất GO ở Việt Nam nhưng số lượng còn khá khiêm tốn do nhiều yếu tố như nhu cầu sử dụng và công nghệ sản xuất còn hạn chế [85]. Lượng GO trên thị trường chủ yếu là nhập khẩu, trong đó GO nhập khẩu từ Trung Quốc chiếm tỷ lệ lớn.



(a) Dạng dung dịch



(b) Dạng đặc



(c) Dạng bột

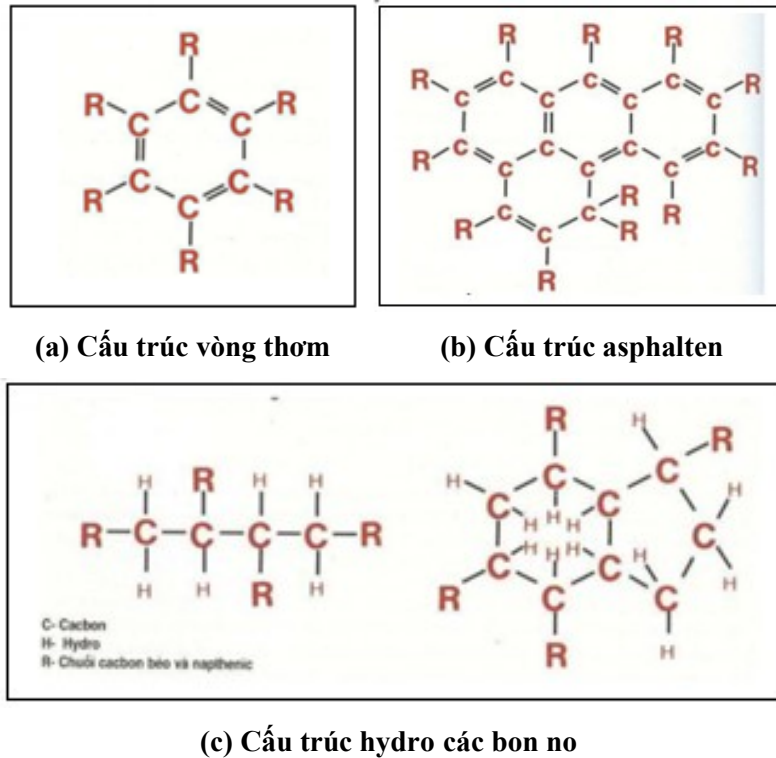
Hình 1.5. Các dạng GO trên thị trường.

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

1.3.1. Thành phần của nhựa đường

Nhựa đường là một hỗn hợp phức tạp của các hợp chất hydro các bon cao phân tử và nhóm chức năng có chứa lưu huỳnh, nitơ và nguyên tử oxy. Đây là sản phẩm của quá trình chưng cất dầu thô. Thành phần hoá học của nhựa đường có nguồn gốc dầu mỏ thường chứa các chất như $\text{C} = 82\text{--}88\%$, $\text{S} = 0\text{--}6\%$, $\text{N} = 0,5\text{--}1\%$, $\text{H} = 8\text{--}11\%$, $\text{O} = 0\text{--}1,5\%$ và có thể chia thành 4 nhóm chính sau: nhóm chất thơm hay còn gọi là chất dầu (Hình 1.6a), nhóm chất nhựa, nhóm asphalten (Hình 1.6b), và nhóm chất bão hòa hay còn gọi là chất no (Hình 1.6c) [15]. Mỗi nhóm chất đóng vai trò khác nhau quyết định tính chất của nhựa đường. Hay nói cách khác, khi tỷ lệ các nhóm chất này thay đổi sẽ

làm thay đổi tính chất cơ lý của nhựa đường. Hình 1.6 minh họa cấu trúc các nhóm chất chính của nhựa đường.



Hình 1.6. Cấu trúc các nhóm chất chính của nhựa đường [15].

1.3.2. 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 sau đây:

- Tương tác Van der Waals: GO và nhựa đường đều có tính chất phân cực, vì vậy tương tác Van der Waals sẽ xảy ra giữa chúng. Các phân tử GO và nhựa đường có thể tương tác với nhau thông qua các lực phân cực, tạo ra liên kết vật lý [75], [81]. Các nguyên tử hydro ở nhánh bão hòa của nhựa đường có thể tạo liên kết hydro với các nguyên tử oxy trên phân tử GO, trong khi đó các nguyên tử oxy trên nhóm este của nhựa đường cũng có thể hình thành liên kết hydro với các nguyên tử hydroxyl trên phân tử GO, điều này làm cho liên kết hydro bền hơn. Ngoài ra, GO có thể tạo thành vòng thơm xếp chồng với các phân tử chất thơm và phân tử chất nhựa của nhựa đường, trong khi phân tử của chất nhựa không dễ gấp nếp và có xu hướng phẳng, nên sự xếp chồng vòng thơm giữa chất nhựa và GO mạnh hơn.

Những tương tác không liên kết này là chìa khóa cho sự phân tán ổn định của GO trong nhựa đường.

- Tương tác tĩnh điện: GO có tính chất tĩnh điện, có thể tương tác với các phân tử nhựa đường thông qua các lực tĩnh điện của liên kết sp^3 . Nhờ có lực tĩnh điện, GO dễ dàng phân tán vào trong dung môi phân cực của nhựa đường để tạo nên các đơn lớp GO, từ đó làm tăng tỷ diện bề mặt của GO. Vì vậy, tương tác tĩnh điện có thể dẫn đến một sự phân tán tốt hơn của GO trong nhựa đường và cải thiện tính chất của vật liệu sau khi trộn [75].
- Tương tác hóa học: GO có thể tạo ra các liên kết hóa học với nhựa đường thông qua các nhóm chức trên bề mặt của GO. Các nhóm chức như hydroxyl (-OH) và carboxyl (-COOH) của GO có thể tạo ra các liên kết hydrogen và liên kết este với các nhóm chức tương ứng trên phân tử nhựa đường, tạo ra một mạng lưới liên kết mạnh mẽ giữa GO và nhựa đường. Trong đó, liên kết chất nhựa-GO là bền nhất, tiếp theo là chất thơm-GO, và liên kết chất bão hòa-GO là yếu nhất. Cấu trúc lớp của các phân tử GO có thể cản trở sự chuyển động của các phân tử bão hòa, dẫn đến cải thiện tính ổn định ở nhiệt độ cao của chất kết dính nhựa đường sử dụng GO (N_GO), các phân tử GO cũng có thể ức chế sự bay hơi của các phân tử bão hòa, do đó cải thiện khả năng chống lão hóa do nhiệt của N_GO [56], [81].

Các cơ chế tương tác này có thể dẫn đến một sự phân tán tốt hơn của GO trong nhựa đường và tăng độ bền, tính đàn hồi và khả năng chống thấm nước, cải thiện tính ổn định ở nhiệt độ cao, và cải thiện khả năng chống hóa già của vật liệu sau khi trộn. Tuy nhiên, cần thêm nhiều nghiên cứu để hiểu rõ hơn về cơ chế tương tác giữa GO và nhựa đường cũng như cách tối ưu hóa hiệu quả của chúng trong việc cải thiện đặc tính của vật liệu.

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

1.4.1. Tình hình nghiên cứu nhựa đường sử dụng graphene 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 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, loại GO và các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường đã được đánh giá. Cụ thể:

Nghiên cứu đầu tiên về sử dụng GO cải thiện nhựa đường được thực hiện bởi Lam [52] vào năm 2015. Nhựa đường với độ kim lún 80/100 sử dụng GO điều chế trong phòng với các hàm lượng khác nhau được đánh giá. Sáu mẫu thí nghiệm được chuẩn bị với các hàm lượng GO là 0%, 0,1125%, 0,15%, 0,225%, 0,3 % và 0,4%. Các thử nghiệm với độ kim lún, điểm hóa mềm và độ kéo dài được phân tích. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng, khi tăng dần hàm lượng GO trong nhựa đường thì giá trị độ kim lún và độ kéo dài giảm dần, nhiệt độ hóa mềm tăng dần so với nhựa đường gốc. Điều này cho thấy GO có thể cải thiện độ bền và giảm biến dạng của N_GO so với nhựa đường ban đầu.

Sau đó, Habib [45] đã tiếp tục phát triển nghiên cứu của Lam để xác định đặc tính lưu biến của N_GO. Nghiên cứu đã sử dụng loại nhựa đường, loại GO và hàm lượng GO tương tự như nghiên cứu [52]. Từ kết quả thí nghiệm có thể kết luận, ngay cả khi sử dụng lượng GO tối thiểu (0,1125%) cũng cho thấy sự thay đổi hữu ích trong cải thiện độ đàn hồi của nhựa đường ở nhiệt độ cao, từ đó cải thiện khả năng chống lún và biến dạng của mặt đường.

Zeng và cộng sự [80] đã lựa chọn GO 5-10 lớp với các hàm lượng 1%, 3% để cải thiện nhựa đường A70 và A90. Một thí nghiệm màng mỏng (Thin Film Oven Test – TFOT) và thí nghiệm bình áp lực (Pressurized Aging Vessel – PAV) để mô phỏng sự hóa già của N_GO. Sau quá trình hóa già nhiệt, các chỉ tiêu cơ bản như độ kim lún, điểm hóa mềm được kiểm tra. Ngoài ra, thí nghiệm cắt động lưu biến (dynamic shear rheometer – DSR) được tiến hành để xác định các đặc tính lưu biến của N_GO. Kết quả thí cho thấy, GO có thể cải thiện đặc tính nhiệt độ cao, thúc đẩy đặc tính nhiệt độ thấp, đồng thời làm tăng đặc tính chống hóa già của nhựa đường gốc. Hàm lượng 3% GO cho hiệu suất cải thiện ở nhiệt độ cao tốt hơn 1% GO, nhưng ở nhiệt độ thấp N_GO chứa 1% GO tốt hơn 3% GO.

Để đánh giá tác động của GO đối với tính năng chống hóa già do tia tử ngoại (UV), Wu [75] đã có thử nghiệm trên nhựa đường 90A và SBS MA (Styrene Butadiene Styrene mix asphalt), GO 5-10 lớp với hàm lượng 1% và 3% được chuẩn bị cho thử nghiệm. Các đặc tính lưu biến của nhựa sau hóa già bằng TFOT và tia UV được đánh giá bằng

máy DSR trong phạm vi nhiệt độ từ -10°C đến 30°C . Các kết quả thử nghiệm cho thấy: (1) Nhựa đường chứa GO trước khi hóa già có $G^*\sin\delta$ (với G^* là mô đun cắt động, δ là góc trễ pha) nhỏ hơn so với nhựa đường đối chứng, điều này thể hiện GO có thể cải thiện hiệu suất chống nứt mỏi của chất kết dính 90A và SBS MA; (2) Theo thử nghiệm lưu biến, trước và sau TFOT, GO có thể cải thiện hiệu suất chống hóa già do nhiệt oxy hóa của 90A và SBS MA, và hiệu suất cải thiện của GO trên 90A tốt hơn SBS MA; (3) Sau khi hóa già bằng tia UV, GO làm giảm mức độ hóa già của nhựa 90A và SBS MA, cải thiện độ ổn định các tính chất cơ lý của nhựa đường. Hiệu quả cải thiện của nhựa đường chứa 3% GO tốt hơn 1% GO.

Trong nghiên cứu của Li và các cộng sự [54], GO nhiều lớp với hàm lượng 1%, 3% được sử dụng để nghiên cứu các tính chất cơ lý của nhựa đường 90A và SBS MA. Ngoài ra, các tính chất lưu biến của nhựa đường được kiểm tra DSR ở dải nhiệt độ từ 10°C đến 80°C và máy đo lưu biến uốn dầm (Bending Beam Rheometer – BBR) ở nhiệt độ thấp (-12°C và -18°C). Kết luận của nghiên cứu cho thấy, GO có thể cải thiện hiệu suất chống lún của 90A và SBS MA trong khoảng nhiệt độ $30^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$, và cải thiện không đáng kể hiệu suất chống mỏi. Phân tích BBR đã chứng minh rằng GO có thể cải thiện hiệu suất chống nứt ở nhiệt độ thấp cho nhựa đường. So với nhựa đường 90A, hiệu quả GO đối với hiệu suất chống nứt ở nhiệt độ thấp của nhựa đường SBS MA rõ ràng hơn. Hàm lượng 3% GO có thể cải thiện độ ổn định nhiệt của nhựa đường 90A và SBS MA, trong khi đó hàm lượng 1% GO cải thiện độ ổn định nhiệt của nhựa đường 90A nhưng làm giảm độ ổn định nhiệt của nhựa đường SBS MA.

Hiệu suất cơ học, cơ chế biến tính và đặc tính nhiệt của nhựa đường SBS MA và nhựa đường PG58-34 (Performance Graded – PG) được cải thiện bởi GO 1 lớp với các hàm lượng 0,02%, 0,05%, 0,1%, và 0,2% đã được Liu và cộng sự [56] nghiên cứu làm sáng tỏ. Kết quả thí nghiệm cho thấy, việc bổ sung GO có thể cải thiện đáng kể đặc tính từ biến/phục hồi và khả năng chống lún của nhựa đường. Hàm lượng tối ưu của GO cho nhựa đường PG58-34 và nhựa đường SBS MA lần lượt là 0,05%, 0,2%. Nghiên cứu cũng cho thấy, cơ chế biến tính của GO bao gồm cả phản ứng hóa học và tương tác vật lý đối với nhựa đường PG, với nhựa đường SBS chỉ có tương tác vật lý.

Wang và cộng sự [72] sử dụng GO với ba hàm lượng 0,5%, 1%, 1,5% thêm vào nhựa đường 70# (tương đương nhựa đường 60/70) để nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình nano hóa đối với hiệu suất hóa già của nhựa đường. Các thí nghiệm khác nhau bao gồm độ kim lún, điểm hóa mềm, độ kéo dài, độ nhớt, và DSR được sử dụng để khảo sát các đặc tính vật lý, trong khi tính chất lưu biến trước và sau khi hóa già của nhựa đường được đánh giá bằng thí nghiệm màng mỏng xoay (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT) và tia UV. Các kết quả thí nghiệm cho thấy, GO có thể cải thiện khả năng chống hóa già ngắn hạn và dài hạn của nhựa đường, hàm lượng 1,5% GO cho hiệu quả chống hóa già tốt nhất. Hơn nữa, sự giảm giá trị $G^*\sin\delta$ ở nhiệt độ trung gian cho thấy GO có lợi thế để cải thiện khả năng chống nứt do mỏi.

Năng lượng tự do bề mặt (Surface Free Energy – SFE) của nhựa đường 70# và SBS MA được cải thiện bởi 0,5%, 1% và 1,5% GO tiếp tục được Wang [73] nghiên cứu. Kết quả trình bày trong nghiên cứu cho thấy, GO có thể cải thiện các đặc tính nhiệt động học của chất kết dính nhựa đường, và hàm lượng GO tăng thì SFE lớn, tính dính bám của N_GO và cốt liệu càng tốt. Sự hóa già do RTFOT có thể thúc đẩy sự gia tăng SFE, trong khi hóa già UV lâu dài ảnh hưởng xấu đến các đặc tính trên và giảm khả năng dính bám theo thời gian.

Trong một nghiên cứu khác của Zhu [83], tính dính bám của nhựa đường 70# và nhựa đường SBS được cải thiện bởi GO đối với ba loại cốt liệu bao gồm đá granite, đá basalt và đá vôi đã được thử nghiệm. Các kết luận chính của nghiên cứu chỉ ra rằng, việc bổ sung 0,05% và 0,2% GO làm tăng khả năng dính bám và chỉ số chống ẩm giữa nhựa đường và cốt liệu, từ đó cải thiện độ dính bám và khả năng kháng ẩm của BTN. Ngoài ra, việc bổ sung GO có thể làm giảm ảnh hưởng của quá trình hóa già đến độ dính bám giữa nhựa đường và cốt liệu.

Cuối cùng, Dharamveer Singh và cộng sự [68] đã có nghiên cứu ảnh hưởng của GO đối với nhựa đường AC30 (tương đương với nhựa đường 40/60) với các hàm lượng 1%, 2%, 3% GO. Ảnh hưởng của GO lên các đặc tính hóa học và lưu biến của nhựa đường AC30 được đánh giá trong điều kiện hóa già ngắn hạn và dài hạn, các kết luận được nêu ra: (1) Việc sử dụng GO làm phụ gia trong nhựa đường AC30 làm thay đổi hàm lượng các nguyên tố C, N, S nhưng không đáng kể; (2) Kiểm tra năng lượng chất kết

đỉnh cho thấy, nhựa đường AC30 với 2% GO được quan sát cho năng lượng chất kết dính cao nhất, và giảm ở hàm lượng 1% và 3% GO; (3) GO cũng cải thiện đặc tính lún và mối cho hỗn hợp. Khả năng kháng mối và kháng lún sẽ không được giải quyết đồng thời vì đây là hai đặc tính trái ngược nhau của nhựa đường. Do đó, hàm lượng GO tối ưu cho mỗi đặc tính là khác nhau, 1% GO để tăng cường khả năng kháng lún, và 2% GO để cải thiện khả năng kháng mối. Dựa trên mức độ ưu tiên trên, hàm lượng GO có thể được lựa chọn tùy vào mục đích của nghiên cứu.

Mặc dù các nghiên cứu trên đã có những đánh giá với nhiều loại nhựa đường, nhiều loại GO và nhiều chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường, tuy nhiên vẫn còn tồn tại một số hạn chế như: 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; Chưa xây dựng mối tương quan nhiệt độ – độ nhớt của N_GO để xác định khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng GO (BTN_GO); 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). Cần chú ý rằng, các hàm lượng GO sử dụng trong các nghiên cứu được tính theo % khối lượng nhựa đường. Cụ thể:

Juncai Zhu và cộng sự [82] đã đánh giá tính năng của hỗn hợp BTNC 13,2 sử dụng nhựa đường AH-70 (tương đương với nhựa đường 60/70) được thêm vào 0,05% GO. Các mẫu BTN_GO và mẫu đối chứng được chuẩn bị trong phòng thí nghiệm. Ảnh hưởng của GO lên các đặc tính của hỗn hợp được phân tích bằng các thử nghiệm như độ nhạy ẩm, độ ổn định ở nhiệt độ cao, khả năng chống nứt ở nhiệt độ thấp, độ bền cơ học và hiệu suất chống hóa già của hỗn hợp.

- Thí nghiệm độ nhạy ẩm cho thấy, GO cải thiện đáng kể độ ổn định Marshall (Marshall Stability – MS) và độ ổn định còn lại (Residual Stability – RS) của BTN. So sánh với BTN đối chứng, giá trị MS và RS của BTN chứa 0,05% GO

tăng lần lượt 39,1% và 39,9%. Các giá trị độ bền kéo của BTN chứa 0,05% GO khi ngâm nước ở 60°C trong 30 phút và 48 giờ tăng 41,4 % và 64,0% so với BTN đối chứng.

- Thí nghiệm xác định khả năng kháng lún vệt bánh xe (LVBX) trong môi trường không khí cho thấy, độ ổn định động (Dynamic Stability – DS) ở 60°C của BTN chứa 0,05% GO cao hơn BTN đối chứng 102,9%. Điều này chứng tỏ BTN_GO có khả năng kháng LVBX rất tốt ở nhiệt độ cao.
- Việc bổ sung GO cải thiện đáng kể mô đun đàn hồi tĩnh và khả năng chống hóa già của BTN, làm suy yếu ảnh hưởng quá trình hóa già đến hiệu suất nhiệt độ thấp và kéo dài tuổi thọ cho mặt đường.
- Kết quả thí nghiệm cũng chỉ ra rằng, GO cải thiện không đáng kể khả năng chống nứt ở nhiệt độ thấp cho BTN, làm tăng nhiệt độ trộn và đầm nén của hỗn hợp BTN. Việc bổ sung các chất phụ gia hỗn hợp ẩm như Sasobit và dầu thái có thể giảm nhiệt độ trộn và đầm nén của hỗn hợp BTN_GO.

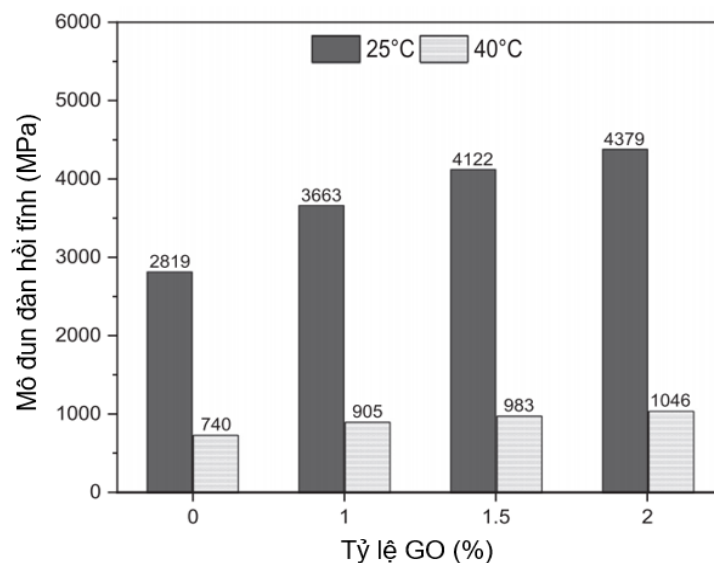
Như vậy, GO có thể cải thiện đáng kể độ ổn định nhiệt độ cao, khả năng kháng LVBX, khả năng chống hóa già, và giảm tính nhạy ẩm của BTN.

Trong nghiên cứu của Mei Lin và các cộng sự [55], GO được thêm vào như một chất cải thiện nhựa đường cao su để tạo ra hỗn hợp BTNC 13,2 (ký hiệu AC-13-GR). Các thí nghiệm được tiến hành để xác định đặc tính của AC-13-GR so với BTN đối chứng chỉ sử dụng nhựa đường cao su (ký hiệu AC-13-R):

- Thí nghiệm xác định khả năng kháng LVBX trong môi trường không khí cho thấy, với cùng hàm lượng GO, giá trị DS của AC-13-GR cao hơn 71,5% so với AC-13-R. Điều này chứng tỏ, GO làm tăng hiệu suất kháng LVBX ở nhiệt độ cao của BTN.
- Kết quả các thí nghiệm ở nhiệt độ thấp bao gồm cường độ kháng uốn, biến dạng uốn, mô đun độ cứng đều cho thấy AC-13-GR đạt hiệu suất làm việc ở nhiệt độ thấp tốt hơn AC-13-R.
- Thí nghiệm đánh giá độ ổn định còn lại chỉ ra rằng, việc bổ sung GO có thể cải thiện đáng kể độ bền của BTN.

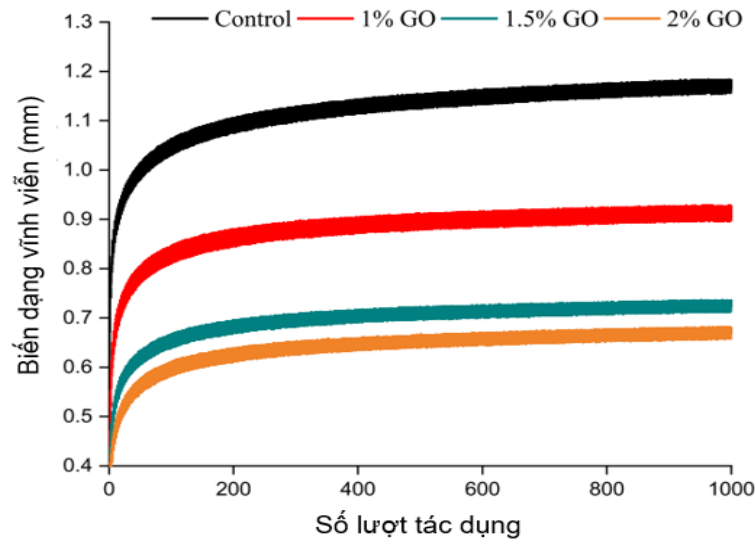
Adnan và các cộng sự [33] đã có nghiên cứu về N_GO để đánh giá ảnh hưởng của nó đối với các đặc tính kỹ thuật của BTNC 9,5. Nhựa đường có độ kim lún 60/70 được trộn với 0,5%, 1%, 1,5% và 2% GO (1-5 lớp) sản xuất theo quy mô công nghiệp. Các thí nghiệm được thực hiện để khảo sát cường độ, khả năng kháng LVBX trong môi trường không khí, và khả năng kháng nứt của BTN_GO so với BTN đối chứng. Những thay đổi đặc tính của BTN_GO được thể hiện cụ thể như sau:

- Thử nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh được thực hiện ở nhiệt độ trung bình và cao tương ứng là 25°C và 40°C để khảo ảnh hưởng của GO đối với BTN liên quan đến nứt do mỏi và LVBX. Kết quả thí nghiệm cho thấy, việc sử dụng GO đã làm tăng đáng kể mô đun đàn hồi ở cả hai nhiệt độ thử nghiệm. Tuy nhiên, tác dụng điều chỉnh của GO ở 25°C có ý nghĩa hơn ở 40°C. BTN chứa 2% GO thể hiện hiệu suất cao nhất ở cả hai nhiệt độ so với các hàm lượng GO khác. Mô đun đàn hồi tĩnh của BTN chứa 2% GO tăng 55% và 41 % ở hai nhiệt độ so với BTN đối chứng.



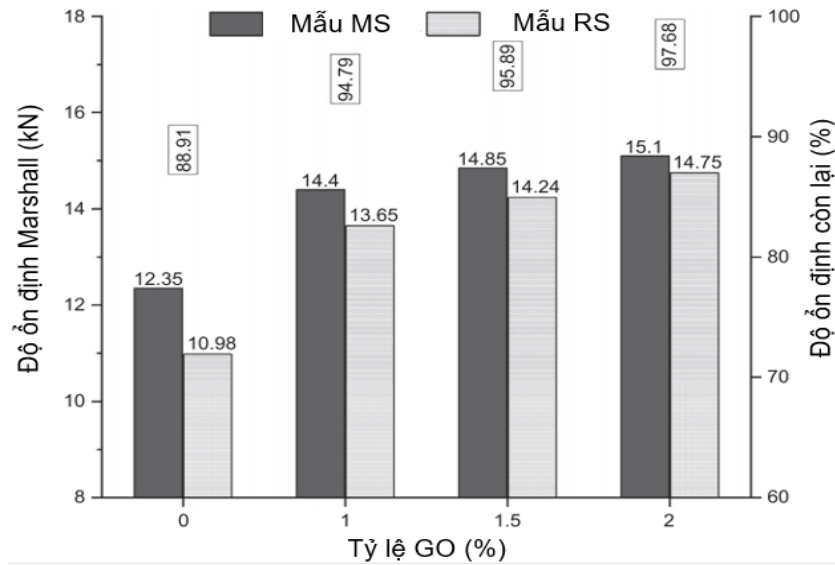
Hình 1.7. Kết quả kiểm tra mô đun đàn hồi [33].

- Thí nghiệm xác định khả năng kháng LVBX trong môi trường không khí được thực hiện ở 40°C cho thấy, 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 có hiệu quả trong việc làm giảm biến dạng vĩnh viễn, giá trị này giảm lần lượt là 31,58%, 57,89% và 64,47% so với BTN đối chứng. Điều này cho thấy tác động làm cứng của GO lên chất kết dính nhựa đường đã được cải thiện (Hình 1.8).

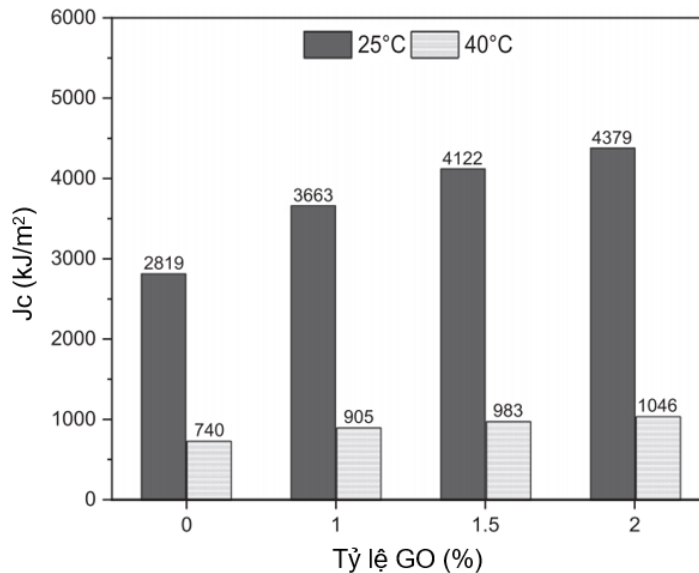


Hình 1.8. Kết quả kiểm tra biến dạng vĩnh viễn [33].

- Thí nghiệm xác định độ ổn định còn lại cho thấy, việc sử dụng GO cải thiện đáng kể độ ổn định của BTN. GO tăng cường độ cứng của chất kết dính, dẫn đến tăng độ ổn định BTN. Các mẫu chứa GO có RS cao hơn so với mẫu đối chứng. Điều này cho thấy khả năng chống ẩm của BTN được tăng cường sau khi bổ sung GO. BTN với hàm lượng 1% và 1,5% GO gần như có ảnh hưởng tương tự về độ ẩm, trong khi BTN chứa 2% GO có độ nhạy ẩm thấp nhất với RS = là 97,68% (Hình 1.9).
- Khả năng chống nứt vỡ của BTN đối chứng và BTN_GO được đánh giá dựa trên J tới hạn (J_c). Nghiên cứu cho thấy, BTN chứa 2% GO có J_c cao nhất (4,65 kJ/m²), tiếp theo là BTN chứa 1,5% GO (3,86 kJ/m²), 1% GO (3,65 kJ/m²) và cuối cùng là BTN đối chứng (2,14 kJ/m²). Điều này cho thấy sự cải thiện đáng kể khả năng chống nứt của BTN khi sử dụng GO làm chất phụ gia. Nguyên nhân là do ảnh hưởng bởi sự kết dính vượt trội của N_GO giúp tăng cường độ dính bám giữa chất kết dính và cốt liệu, do đó ngăn chặn sự lan truyền của đầu vết nứt trong BTN (Hình 1.10).



Hình 1.9. Kết quả thử nghiệm Marshall [33].



Hình 1.10. Giá trị đứt gãy giới hạn (J_c) của BTN_GO [33].

Trong một công bố khác, Adnan và các cộng sự [34] nghiên cứu tính chất vật lý của nhựa đường 60/70 sử dụng GO để cải thiện hiệu suất BTNC 9,5 bằng phương pháp phản ứng bề mặt (Response Surface Methodology – RSM) với các hàm lượng GO là 0,5%, 1%, 1,5%, và 2%. Kết quả nghiên cứu đã chứng minh rằng, hàm lượng GO và nhựa đường có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ và đặc tính thể tích của BTN.

- Hàm lượng GO có tác động đáng kể đến độ rỗng dư (VTM), Giá trị VTM tăng khi hàm lượng GO là 1% và sau đó giảm ở hàm lượng 2% GO. BTN bao gồm 5,5% chất kết dính nhựa đường với hàm lượng GO từ 1-2% đạt giá trị VTM chấp nhận

được trong phạm vi tiêu chuẩn 3 – 5%. Do vậy, nghiên cứu kiến nghị áp dụng GO trong BTN để nâng cao độ bền của mặt đường.

- Hàm lượng GO ảnh hưởng đến độ rỗng cốt liệu (Voids in the Mineral Aggregate – VMA). Ở một hàm lượng nhựa đường cụ thể, VMA tăng lên khi hàm lượng GO tăng lên cho thấy ảnh hưởng đáng kể của GO đối với VMA, hỗ trợ cải thiện các đặc tính BTN, góp phần đáng kể vào việc tăng cường độ hỗn hợp.
- Hàm lượng GO và hàm lượng nhựa đường đều ảnh hưởng đáng kể đến MS của BTN. Đối với BTN chứa GO, khi hàm lượng nhựa đường tăng lên từ 5-6%, giá trị MS ban đầu tăng lên đạt giá trị cực đại và giảm xuống sau đó. Khi hàm lượng nhựa đường vượt quá giá trị đỉnh làm tăng chiều dày màng nhựa, việc cải thiện tính ổn định cho BTN không còn hiệu quả.
- Cuối cùng, GO ảnh hưởng đến độ bền kéo của BTN. Độ bền kéo tăng lên đáng kể khi sử dụng GO với một lượng nhựa đường nhất định. BTN_GO thể hiện khả năng chịu kéo cao hơn ở 25°C so với BTN đối chứng, cho thấy khả năng chống nứt của BTN được cải thiện. Hiệu quả này có thể là do sự phân tán đồng đều của GO trong chất kết dính nhựa đường, làm tăng sự gắn kết giữa các hạt cốt liệu và N_GO.

Qua phân tích tổng quan bên trên có thể thấy, 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, một số 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, 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. Thứ ba, các nghiên cứu 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, lượng mưa dồi dào và độ ẩm cao như 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 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

Ở Việt Nam, việc nghiên cứu chế tạo và ứng dụng GO trong một số lĩnh vực đang bắt đầu được quan tâm. Nhóm tác giả Nguyễn Tường Vy (Trường Đại học Khoa học Tự

nhiên, Đại học quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh) đã nghiên cứu điều chế GO. Sản phẩm GO sau khi điều chế được sử dụng làm vật liệu composite [28]. Phan Thị Thúy Hằng (Đại học Đà Nẵng) đã nghiên cứu chế tạo GO và ứng dụng làm chất phụ gia trong màng sơn epoxy để chống ăn mòn kim loại [12]. Trong lĩnh vực vật liệu xây dựng, việc ứng dụng GO để cải thiện các vật liệu xây dựng còn rất mới mẻ. TS Trần Quốc Tuấn và đồng nghiệp [26] đã có nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của GO đến cường độ chịu nén và độ bền kéo của xi măng composite. GO được điều chế trong phòng, sau đó được trộn ướt với hỗn hợp vữa xi măng pooc lăng mác 30 với hàm lượng 0,01% theo khối lượng. Kết quả nghiên cứu cho thấy, 0,01% GO cải thiện không đáng kể độ bền kéo uốn nhưng làm tăng cường độ nén của vữa xi măng lên 15,5% so với mẫu đối chứng. Tuy nhiên, các nghiên cứu về GO trong lĩnh vực xây dựng mặt đường nói chung và mặt đường BTN nói riêng thì chưa có ở Việt Nam.

1.5. Nghiên cứu sử dụng học máy dự báo các đặc trưng của nhựa đường và bê tông nhựa

Hiện nay, để xác định các đặc trưng của nhựa đường và BTN, phương pháp thực nghiệm đang đóng vai trò chủ đạo, quan trọng bởi tính chính xác, kiểm soát tốt các thông số đầu vào và mối tương quan giữa chúng. Tuy nhiên, phương pháp này cũng tồn tại những hạn chế nhất định như tốn kém về thời gian, chi phí, thiết bị thí nghiệm phải đầy đủ, trình độ tay nghề thí nghiệm viên cao.

Trong những năm gần đây, với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ 4.0 bởi tính đơn giản, tự động, hiệu quả và ứng dụng cao, nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung vào việc sử dụng học máy (Machine learning - ML) dựa trên các kết quả thử nghiệm. Kỹ thuật này trở nên phổ biến và được sử dụng trong nhiều lĩnh vực liên quan đến cơ học tính toán, kết cấu, khoa học vật liệu, môi trường, và khoa học trái đất. Đối với lĩnh vực mặt đường mềm, ML cũng được sử dụng để giải quyết các bài toán phân loại và hồi quy.

1.5.1. Những vấn đề chung về học máy

ML đã được giới thiệu vào cuối những năm 50 của thế kỷ trước, đại diện cho một lĩnh vực nghiên cứu về mô hình thống kê và các thuật toán được máy tính sử dụng trong các nhiệm vụ cụ thể dựa vào dữ liệu và suy luận mà không cần hướng dẫn rõ ràng. ML được xem như một phần của lĩnh vực trí tuệ nhân tạo. Các thuật toán ML xây dựng các

mô hình toán học dựa trên dữ liệu mẫu, được gọi là "dữ liệu đào tạo", từ đó đưa ra dự báo hoặc quyết định để thực hiện nhiệm vụ một cách chính xác mà không cần lập trình. Tùy thuộc vào cách chúng học, các thuật toán ML được phân thành bốn nhóm chính: học có giám sát, học bán giám sát, học không giám sát và học củng cố. Sự khác biệt giữa các nhóm thuật toán này xuất phát từ cách dữ liệu được đưa vào trong quá trình đào tạo mô hình, cách chúng sử dụng dữ liệu và loại vấn đề mà chúng giải quyết.

1.5.1.1. Học có giám sát (Supervised learning)

Học có giám sát sử dụng dữ liệu đầu vào, đầu ra và xây dựng mô hình để đưa ra các dự báo khi sử dụng dữ liệu mới. Nếu mục tiêu là dự báo một biến đầu ra hoặc mục tiêu liên tục thì kỹ thuật ML hồi quy sẽ được sử dụng. Các thuật toán hồi quy phổ biến:

- Mô hình tuyến tính (Linear regression);
- Mô hình phi tuyến (Nonlinear regression);
- Cây quyết định (Decision tree);
- Hệ thống thần kinh mờ thích ứng (ANFIS).;
- Mạng nơ ron nhân tạo (ANN);

Nếu dữ liệu có thể được chia thành các nhóm hoặc lớp, và mục tiêu là dự báo đầu ra phân loại hoặc rời rạc thì kỹ thuật ML phân loại được sử dụng. Các thuật toán phổ biến nhất để phát triển mô hình phân loại bao gồm: cây quyết định (Decision Tree), hồi quy logistic, máy véc tơ hỗ trợ (SVM), K-láng giềng gần nhất (KNN), ANN [51].

1.5.1.2. Học không giám sát (Unsupervised learning)

Học không giám sát được áp dụng để tìm kiếm các mẫu trong tập dữ liệu và rút ra các suy luận từ dữ liệu đầu vào mà không có sẵn nhãn. Phương pháp này thường được sử dụng trong các vấn đề phân cụm như hệ thống khuyến nghị, phân khúc. Khác với học có giám sát, trong loại hình này không có nhãn nào có sẵn. Các thuật toán trong học không giám sát cố gắng xác định các mẫu trong dữ liệu kiểm chứng và phân loại dữ liệu hoặc dự đoán giá trị tương lai [51]. Các thuật toán tiêu chuẩn cho học không giám sát bao gồm: K-means và k-medoids, phân cụm theo thứ bậc, mô hình Markov ẩn, Fuzzy c-means.

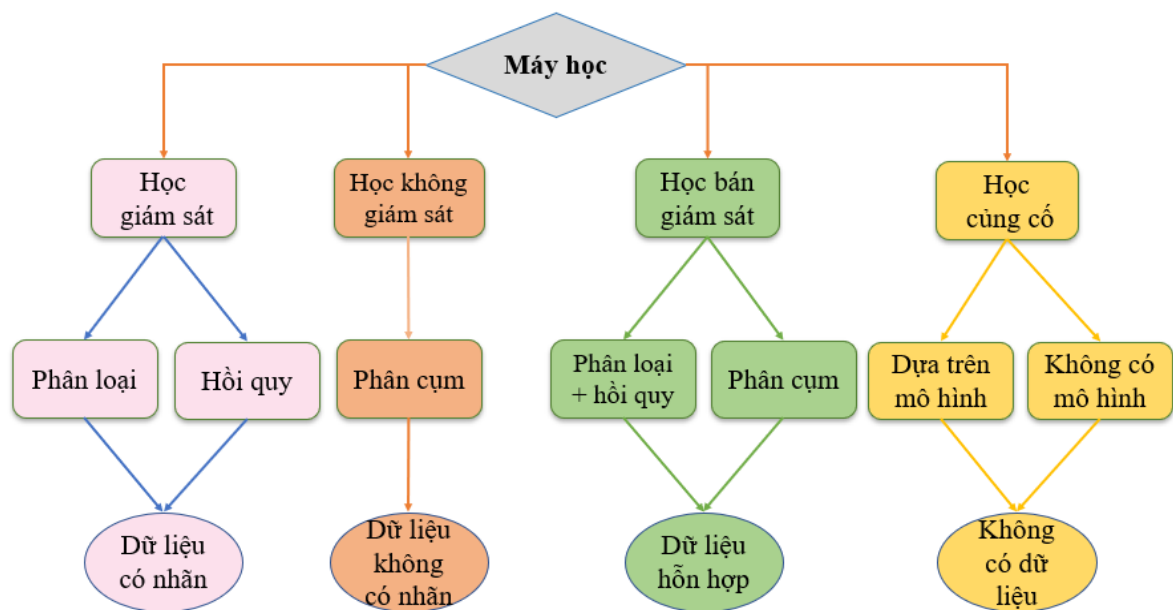
1.5.1.3. Học bán giám sát (Semi-supervised learning)

Đây là sự kết hợp giữa học có giám sát và học không giám sát. Trong kiểu học tập này, dữ liệu đã cho là hỗn hợp của dữ liệu đã phân loại và chưa phân loại. Sự kết hợp giữa dữ liệu được gán nhãn và không được gán nhãn được sử dụng để tạo ra một mô hình thích hợp cho việc phân loại dữ liệu. Trong hầu hết các tình huống, dữ liệu được gán nhãn là khan hiếm và dữ liệu không dán nhãn rất dồi dào [60].

1.5.1.4. Học củng cố (Reinforcement learning)

Học củng cố không giống học có giám sát và không giám sát, thường hoạt động với dữ liệu từ một môi trường năng động. Trong cách học này, các thuật toán tìm cách dự đoán kết quả đầu ra cho một vấn đề dựa trên một tập hợp tham số điều chỉnh. Đầu ra dự đoán sau đó trở thành một tham số đầu vào tiếp theo, và quá trình này lặp lại cho đến khi tìm thấy đầu ra tối ưu. Học củng cố thường được áp dụng trong các lĩnh vực như thu nhận kỹ năng, điều hướng bằng rô-bốt và các quyết định trong thế giới thực [51].

Hình 1.11 trình bày tóm tắt phân loại các nhóm thuật toán ML.



Hình 1.11. Phân loại các nhóm thuật toán ML.

1.5.2. Ứng dụng học máy dự báo chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường có phụ gia

Cho tới nay, các thuật toán ML đã được ứng dụng trong dự báo các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường sử dụng phụ gia, sau đây là một vài công trình tiêu biểu:

Tasdemir [70] đã thành công trong việc lập mô hình nhiệt độ nứt và các đặc tính độ bền của nhựa đường bazơ và polime, đồng thời tìm ra mối quan hệ tuyến tính giữa hàm lượng thực nghiệm và hàm lượng được mô hình hóa. Trong nghiên cứu của tác giả, loại phụ gia, hàm lượng chất kết dính nhựa đường, và mức độ hóa già đã được chọn làm đầu vào của bài toán, trong khi nhiệt độ nứt và cường độ (gây) nứt được chọn làm đầu ra. Bằng cách so sánh ứng dụng của mô hình ANN với mô hình tuyến tính tổng quát (Generalized linear models – GLM) để ước tính nhiệt độ nứt và cường độ nứt, kết quả cho thấy rằng mô hình ANN cho hiệu suất dự báo tốt hơn.

Specht và cộng sự [69] đã sử dụng ANN và mô hình thống kê để mô hình hóa độ nhớt và dự báo ứng xử của nhựa đường cao su. Các thông số khác nhau như kích thước hạt cao su, số lượng hạt, nhiệt độ trộn, và thời gian trộn được chọn làm các biến đầu vào. Việc sử dụng ANN và mô hình thống kê đã thu được một mô hình toán học thỏa đáng cho dự báo độ nhớt của hỗn hợp. Nghiên cứu cho thấy sự kết hợp này là một công cụ tuyệt vời để mô phỏng các hỗn hợp với việc giảm chi phí và thời gian thí nghiệm. Đồng thời, việc mô hình hóa thông qua ANN sẽ đại diện cho dự báo độ nhớt tốt hơn các mô hình thống kê.

Kok và cộng sự [50] đã có nghiên cứu mô hình hóa mô đun phức của nhựa đường có độ kim lún 50/70 được cải thiện bởi bazơ và SBS bằng cách sử dụng ANN và mô hình thống kê. Trong mô hình này, nhiệt độ trộn, tần số, và hàm lượng phụ gia là các tham số đầu vào, trong khi mô đun phức hợp là tham số cho lớp đầu ra. Các thuật toán được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: thuật toán Levenberg – Marquardt (LM), Scaled conjugate gradient (SCG), và Polak-Ribiere conjugate gradient (CGP). Nghiên cứu cho thấy, thuật toán ANN có thể được sử dụng như một công cụ mạnh trong việc đánh giá các yếu tố hiệu quả trên mô đun phức của nhựa đường sau cải thiện với $R^2 = 0,997$, $RMSE = 0,0039$.

Hosseini và cộng sự [47] sử dụng các thuật toán ML khác nhau bao gồm ANN, SVM, cây quyết định, Gaussian, và Ensemble để dự báo G^* và δ của nhựa đường cao su, SBS, và axit polyphosphoric ở nhiệt độ thấp và trung bình. So sánh kết quả của mô hình với dữ liệu thực nghiệm cho thấy hiệu suất cao của các mô hình đề xuất trong nghiên cứu, trong đó mô hình hồi quy Ensemble có hiệu suất dự báo cao nhất.

1.5.3. Ứng dụng học máy xác định một số đặc tính cơ học mặt đường bê tông nhựa

1.5.3.1. Thông số Marshall

Đối với thành phần và đặc tính cơ học của BTN, các phương pháp thực nghiệm hiện đang được sử dụng để thiết kế và tối ưu hóa thành phần. Bất kỳ sự thay đổi nào của thành phần BTN, chất kết dính hoặc hàm lượng chất kết dính đều yêu cầu thực hiện các thử nghiệm mới trong phòng thí nghiệm. Phương pháp ML có thể nhanh chóng xây dựng mô hình dự báo đáng tin cậy về phản ứng của vật liệu, từ đó giảm thời gian và chi phí cho việc thiết kế hỗn hợp. Ví dụ, để dự báo mô đun độ cứng và MS của BTN, Baldo [37] đã phân tích và mô hình hóa dữ liệu thí nghiệm bằng thuật toán ANN. Cơ sở dữ liệu được thu thập từ kết quả thí nghiệm trên 129 mẫu BTN khác nhau. Các tham số đầu vào được chọn bao gồm loại nhựa đường, loại cốt liệu, hàm lượng nhựa, độ rỗng dư, và độ rỗng cốt liệu. Phương pháp tiếp cận mô hình ANN được đặc trưng bởi nhiều lớp ẩn, kỹ thuật xác thực chéo 5 lần và hàm truyền tuyến tính được sử dụng nhằm so sánh hiệu suất của các cấu trúc ANN khác nhau. Từ đó, nghiên cứu lựa chọn được cấu trúc dự báo có độ chính xác tốt nhất. Hiệu quả của cách tiếp cận như vậy đã được kiểm chứng về hệ số tương quan (R). Giá trị R nằm trong khoảng (0,919 - 0,965) trong giai đoạn đào tạo và (0,834 - 0,881) ở giai đoạn kiểm chứng tùy thuộc vào thông số dự báo.

1.5.3.2. Mô đun động

Trong phương pháp thiết kế mặt đường cơ học - thực nghiệm, mô đun động $|E^*|$ là một thông số quan trọng đặc trưng cho độ cứng của hỗn hợp BTN. Để cải thiện độ chính xác dự báo thông số này, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp ML để ước tính $|E^*|$. Gong [44] ước tính $|E^*|$ cho BTN nóng bằng cách sử dụng thuật toán học sâu, Behnood sử dụng ứng dụng của lập trình dựa trên địa lý sinh học (Biogeography-based programming - BBP) và cây mô hình M5P [36], hay Barugahare [35] sử dụng cây đóng bao (Bagged trees ensemble). Các kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng các mô hình ML có khả năng dự báo mạnh mẽ với R^2 nhỏ nhất là 0,918 và R^2 lớn nhất là 0,9781 [36].

1.5.3.3. Khả năng kháng lún vết bánh xe

Trong nghiên cứu của Majidi Fard [59], tác giả đã trình bày một mô hình mới để dự báo chiều sâu LVBX của hỗn hợp BTN bằng cách sử dụng hai kỹ thuật ML được gọi là lập trình gen (Gene Expression Programming – GEP) và ANN. Một cơ sở dữ liệu chứa

các kết quả thử nghiệm Hamburg được sử dụng để phát triển hai mô hình dự báo. Cơ sở dữ liệu gồm 96 kết quả thử nghiệm cho các hỗn hợp BTN khác nhau với 13 tham số đầu vào. Kết quả nghiên cứu cho thấy, giá trị R của mô hình GEP ở bộ dữ liệu đào tạo, kiểm chứng và xác thực lần lượt là 0,98 – 0,93 – 0,85, trong khi ở mô hình ANN các giá trị này là 0,93 – 0,84 – 0,75. Như vậy, hiệu suất dự báo của mô hình GEP vượt trội hơn hẳn mô hình ANN đặc biệt là ở bộ dữ liệu kiểm chứng và xác thực, nên mô hình GEP có thể sử dụng để dự báo khả năng kháng lún của BTN.

1.5.3.4. Tuổi thọ mỏi

Việc dự báo chính xác tuổi thọ mỏi của hỗn hợp BTN luôn là một nhiệm vụ khó khăn do tính chất phức tạp của vật liệu dưới các điều kiện môi trường và tải trọng khác nhau. Xiao [77] đã nghiên cứu sử dụng ANN trong việc dự báo tuổi thọ mỏi của BTN cao su có sử dụng vật liệu mặt đường tái chế (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) và so sánh với phương pháp thống kê truyền thống. Hơn 190 đầm được chế tạo với hai loại cao su khác nhau ở môi trường tự nhiên và môi trường lạnh, hai nguồn RAP khác nhau, bốn hàm lượng cao su và các nhiệt độ thử nghiệm khác nhau là 5°C và 20°C. Dữ liệu được xây dựng với 9 hoặc 10 biến độc lập và một biến phụ thuộc, tuổi thọ mỏi cuối cùng được sử dụng để dự báo đoán tuổi thọ mỏi của các hỗn hợp này. Kết quả nghiên cứu cho thấy, so với dự báo dựa trên thống kê truyền thống, thuật toán ANN đem lại hiệu quả hơn trong việc dự báo tuổi thọ mỏi của các hỗn hợp BTN biến tính với R^2 có thể lên tới 0,91.

Tổng kết lại, các thuật toán ML được sử dụng trong dự báo các chỉ tiêu cơ lý và khai thác của nhựa đường và BTN sử dụng các phụ gia khác nhau. Do vậy, bên cạnh phương pháp thực nghiệm, có thể sử dụng ML để dự báo các tính chất cơ lý của nhựa đường và BTN sử dụng GO.

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

Từ các phân tích tổng quan bên trên, đề tài “*Nghiên cứu sử dụng graphene oxit cải thiện tính chất cơ lý bê tông nhựa trong điều kiện Việt Nam*” tập trung vào việc nghiên cứu các vấn đề theo hướng kế thừa và phát triển các nghiên cứu trên thế giới nhằm đáp ứng và phù hợp với điều kiện trong nước:

- 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 chất kết dính N_GO với các hàm lượng GO khác nhau, qua đó xác định nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN_GO.
- Nghiên cứu thực nghiệm 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. Qua đó đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu 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.

Như vậy, luận án tập trung nghiên cứu về thành phần và đặc tính cơ học vật liệu, khả năng ứng dụng của BTN_GO xây dựng mặt đường, đề xuất hướng chế tạo BTN_GO ngoài trạm trộn mà chưa nghiên cứu xây dựng quy trình thi công BTN_GO ngoài hiện trường, cũng như chưa xét đến bài toán kinh tế khi sử dụng BTN_GO làm vật liệu xây dựng mặt đường.

1.7. Phương pháp nghiên cứu

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

- Phương pháp lý thuyết: Tổng quan các nghiên cứu về N_GO và BTN_GO trên thế giới và trong nước, các phương pháp thiết kế KCAĐ;
- Phương pháp thực nghiệm: nghiên cứu hình thái, thành phần hóa học, tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO;
- Phương pháp xác suất thống kê: Thiết kế thực nghiệm, xử lý số liệu, đánh giá độ chụm và kết quả thí nghiệm;
- Phương pháp mô hình hóa: Mô hình hóa KCAĐ, phân tích, đánh giá, đề xuất các KCAĐ điển hình sử dụng BTN_GO trên một số tuyến đường cấp cao tại Việt Nam;
- Phương pháp học máy: Dự báo một số chỉ tiêu cơ lý của N_GO và BTN_GO.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ LÝ CỦA NHỰA ĐƯỜNG SỬ DỤNG GRAPHEN OXIT

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

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

Hiện nay nước ta đang áp dụng tiêu chuẩn phân cấp nhựa đường thường theo độ kim lún là TCVN 7493:2005 [5]. Sau một thời gian triển khai, tiêu chuẩn này đã cho thấy nhu cầu bổ sung một số chỉ tiêu mới để kiểm soát chất lượng nhựa đường một cách tốt hơn. Đáp ứng điều này, Bộ Giao thông Vận tải (BGTVT) đã ban hành Thông tư 27/2014/TT-BGTVT [1], bổ sung một số chỉ tiêu mới như chỉ số độ kim lún PI (penetration index), tổn thất khi nung TFOT, độ nhớt động ở 60°C, độ kéo dài ở 25°C sau TFOT để kiểm soát chất lượng nhựa đường một cách hiệu quả

Trong nghiên cứu này, nhựa đường 60/70 được sử dụng để xác định ảnh hưởng của GO trong cải thiện nhựa đường, được cung cấp bởi Công ty trách nhiệm hữu hạn (TNHH) nhựa đường Petrolimex. Nhựa đường được lấy mẫu, bảo quản và kiểm tra chất lượng đầu vào đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của các tiêu chuẩn [1], [5]. Các chỉ tiêu cơ bản của nhựa đường 60/70 được tiến hành tại phòng thí nghiệm công trình giao thông LAS-XD72 thuộc Trường Đại học Công nghệ GTVT và được trình bày chi tiết ở Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Các tiêu chuẩn kỹ thuật của nhựa đường 60/70.

TT	Chỉ tiêu TN	Đơn vị	Tiêu chuẩn TN	Kết quả	Yêu cầu KT [1], [5]
1	Độ kim lún ở 25°C	dmm	TCVN 7495:2005	63,4	60 ÷ 70
2	Chỉ số độ kim lún		Thông tư 27/2014/TT-BGTVT	-0,312	-1,5 ÷ 1,0
3	Điểm hóa mềm	°C	TCVN 7497:2005	49,6	Min 46

TT	Chỉ tiêu TN	Đơn vị	Tiêu chuẩn TN	Kết quả	Yêu cầu KT [1], [5]
4	Độ nhớt động lực ở 60 °C	Pa.s	TCVN 8818-5:2011	215,44	Min 180
5	Độ kéo dài ở 25°C	cm	TCVN 7496:2005	140	Min 100
6	Điểm chớp cháy	°C	TCVN 7498:2005	305	Min 232
7	Độ hòa tan trong Tricloetylen	%	TCVN 7500:2005	99,95	Min 99
8	Khối lượng riêng	g/cm ³	TCVN 7501:2005	1,032	1,00 ÷ 1,05
9	Lượng tổn thất sau khi gia nhiệt 5 giờ ở 163 °C	%	ASTM D 1754	0,250	Max 0,8
10	Độ dính bám với đá	Cấp	TCVN 7504:2005	Cấp 3	Min cấp 3

2.1.2. Lựa chọn loại và hàm lượng graphen oxit

GO sử dụng trong nghiên cứu được cung cấp bởi Công ty TNHH Tandem Graphene, Tô Châu, Trung Quốc, có dạng bột, màu đen, được bảo quản trong hộp kín theo tiêu chuẩn của nhà sản xuất như Hình 2.1. Các đặc tính của GO được trình bày trong Bảng 2.2.

Bảng 2.2. Các đặc tính của GO được sử dụng trong nghiên cứu.

STT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Độ sạch	%	> 95
2	Số lớp	lớp	5 ÷ 10
3	Chiều dày lớp	nm	3,4 ÷ 8
4	Đường kính bên trung bình của lớp	μm	10 ÷ 50
5	Tỷ diện bề mặt	m ² /g	100 ÷ 300
6	Khối lượng riêng	g/cm ³	1,035



Hình 2.1. Graphen oxit được sử dụng trong nghiên cứu này.

Trong các nghiên cứu, hàm lượng GO được tính theo tỷ lệ % về khối lượng của nhựa đường. Hàm lượng này phụ thuộc nhiều vào loại GO được sử dụng. Với GO đơn lớp, tỷ

diện bề mặt thường rất lớn, có thể lên đến $2600 \text{ m}^2/\text{g}$. Tỷ diện lớn của GO cũng đóng vai trò quan trọng như một chất kết dính trong nhựa đường. Điều này chỉ ra rằng, tốc độ phân tán của GO đủ lớn để tăng cường liên kết của nhựa đường. Khi đó, nhựa đường có cấu trúc giống như sợi chỉ với các màng siêu mỏng và đồng nhất. Những màng này làm cho liên kết bên trong nhựa đường bền chặt và thậm chí là rất khó rửa sạch bằng nước [41]. Do vậy, chỉ cần một hàm lượng rất nhỏ GO ($< 0,5\%$) có thể cải thiện đáng kể một số tính chất cơ lý của nhựa đường [55], [56].

GO đa lớp có tỷ diện bề mặt dao động khoảng từ $50 \div 450 \text{ m}^2/\text{g}$. Để đạt hiệu suất cải thiện một số đặc tính của nhựa đường, hàm lượng GO đa lớp được tìm thấy trong các nghiên cứu nhỏ nhất là $0,5\%$ [33], [72], [73] và lớn nhất là 3% [68], [75], [80]. Các nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng, khi hàm lượng GO vượt giá trị 3% thì hiệu suất cải thiện các đặc tính nhựa đường giảm [68], [80]. Vì vậy, trong nghiên cứu này, các đặc tính của chất kết dính N_GO sẽ được thử nghiệm với các hàm lượng GO 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

Bước quan trọng nhất trong quá trình chuẩn bị chất kết dính N_GO là phân bố đồng đều các hạt nano vào nhựa đường. Trạng thái phân tán tốt có thể đảm bảo mức độ liên kết chéo tối đa của các hạt nano và nhựa đường, do đó ảnh hưởng đến hiệu suất của chất kết dính N_GO [72]. Hơn nữa, hàm lượng GO trong nhựa đường thường rất nhỏ, chiều dày lớp chỉ tính bằng nanomet. Do vậy, để sự phân tán GO trong nhựa đường được đồng đều và hiệu quả thì nhiệt độ trộn phải phù hợp với nhiệt độ làm việc của nhựa đường, tốc độ trộn đủ lớn, thời gian khuấy đủ lâu nhưng hạn chế sự oxy hóa nhựa đường. Cho đến nay, chưa có quốc gia nào ban hành tiêu chuẩn về quy trình đưa GO vào trong nhựa đường, ngay cả ở Trung Quốc nơi chiếm số lượng nghiên cứu lớn nhất. Do vậy, trong các nghiên cứu, các thông số khuấy trộn khi đưa GO vào nhựa đường thường có khoảng biến thiên khá rộng. Cụ thể, tốc độ khuấy dao động từ 2000 vòng/phút [54], [68], [80] đến 5000 vòng/phút [41], [53], [72], [73], nhiệt độ khuấy dao động từ 120°C [72] đến 170°C [41], [54], [83], thời gian khuấy từ 20 phút [52] đến 45 phút [56], [82], [68]. Ngoài ra, để sự phân tán đồng nhất của các hạt GO trong nhựa đường, các nhà nghiên cứu đã phát triển một số phương pháp trộn, bao gồm trộn cơ

học, trộn lực cắt cao, và trộn siêu âm [72]. Trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu, căn cứ vào điều kiện phòng thí nghiệm cũng như thí nghiệm khảo sát sơ bộ đối với nhựa đường 60/70, nghiên cứu sử dụng phương pháp trộn cơ học (có sử dụng dao cắt) để phân tán GO vào nhựa đường, các thông số trộn được chọn có xét đến hạn chế tối đa ảnh hưởng của hóa già nhưng vẫn đảm bảo sự phân tán và hiệu quả, cụ thể:

- Thời gian trộn 20 phút;
- Vận tốc trộn 2000 vòng/phút (đây là vận tốc lớn nhất của thiết bị khuấy nhựa có trong phòng thí nghiệm);
- Nhiệt độ trộn 150°C (phù hợp với nhiệt độ làm việc của nhựa đường 60/70) .

Để duy trì được nhiệt độ ổn định trong thời gian trộn, bình trộn được đặt trong thiết bị gia nhiệt, bên trong có chứa dung dịch glycerin để gia nhiệt và thiết bị cảm biến nhiệt. Các thiết bị sử dụng cho quá trình chế bị chất kết dính N_GO được thể hiện ở Hình 2.2.



a. Thiết bị gia nhiệt.

b. Máy trộn nhựa đường

c. Bình trộn có nắp đậy

Hình 2.2. Các thiết bị sử dụng trong quá trình tạo chất kết dính N_GO.

2.1.4. Quy trình chế tạo mẫu nhựa đường sử dụng graphen oxit

- Bước 1: Nhựa đường 60/70 được gia nhiệt trong tủ sấy đến nhiệt độ đủ lỏng để có thể rót được. Sau đó cân nhựa đường theo khối lượng tính toán vào bình trộn.
- Bước 2: Bình trộn cho vào thiết bị ổn nhiệt đã được gia nhiệt trước đến nhiệt độ trộn. Tại đây, nhựa đường tiếp tục được làm nóng đến nhiệt độ trộn (bằng nhiệt độ của dung dịch glycerin). Đồng thời dao cắt của máy trộn được đặt sao cho dao ngập sâu vào nhựa đường, sau đó đóng nắp bình trộn để không làm thất thoát nhiệt trong quá trình khuấy trộn.

- Bước 3: Cân GO theo đúng hàm lượng thiết kế. Khi nhựa đường đạt nhiệt độ trộn, cho GO từ từ vào bình trộn chứa nhựa đường (thông qua lỗ nhỏ trên nắp bình), bật máy trộn với vận tốc khoảng 30 vòng/phút trong khoảng 1-2 phút đầu tiên để GO phân tán đều trong nhựa đường. Trong quá trình trộn, nắp bình được đậy kín để không làm thất thoát GO ra bên ngoài và hạn chế quá trình oxi hóa nhựa đường.
- Bước 4: Tăng vận tốc trộn đến tốc độ thiết kế (2000 vòng/phút) trong 20 phút. Sản phẩm thu được là chất kết dính N_GO.
- Bước 5: N_GO được đổ vào các khuôn thí nghiệm tương ứng với các thí nghiệm cần thực hiện. Sau đó, mẫu được lưu giữ ở nhiệt độ phòng (25°C). Khi thí nghiệm, mẫu được lấy ra và tiến hành thí nghiệm theo quy trình đã được xác định.

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

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

Quang phổ hồng ngoại biến đổi (Fourier Transform Infra-Red – FTIR) là một kỹ thuật quang phổ phân tử và phương pháp phân tích hóa học rất đa dạng, được sử dụng để thử nghiệm polime và phân tích được phẩm để có được phổ hồng ngoại hấp thụ, phát xạ hoặc suất quang dẫn. Kỹ thuật này cung cấp thông tin về cấu trúc rung của các phân tử và cấu trúc phân tử của các nhóm chức năng khác nhau [16].

Phổ hồng ngoại là đường cong biểu diễn sự phụ thuộc cường độ hấp thụ bức xạ hồng ngoại của một chất vào số sóng hoặc bước sóng. Trên phổ hồng ngoại, trục hoành biểu diễn số sóng (cm^{-1}) hoặc bước sóng (μm), trong khi trục tung biểu diễn tỷ lệ hấp thụ (%T) hoặc cường độ hấp thụ. Sự dao động của các nguyên tử trong phân tử tạo ra phổ dao động. Vị trí của các đỉnh dọc theo trục số sóng là duy nhất đối với một số liên kết hoá học và các nhóm chức có mặt trong nhựa đường.

Nguyên lý của phương pháp FTIR là năng lượng từ nguồn ánh sáng hồng ngoại với các số sóng (wavenumbers) từ 400 đến 4000 cm^{-1} , được chuyển hóa thành năng lượng dao động trong các phân tử của nhựa đường. Các dạng chuyển động của nguyên tử trong

phân tử chất nghiên cứu phụ thuộc vào số lượng nguyên tử trong cấu tạo phân tử và dạng liên kết cộng hóa trị. Năng lượng rung động này được trình bày thành một loạt các dải hấp phụ được ghi nhận là tỷ lệ hấp thụ (%) hoặc khả năng hấp thụ so với bước sóng (μm) hoặc số sóng (cm^{-1}). Vị trí của các đỉnh dọc theo trục số sóng là duy nhất đối với một số liên kết hoá học và các nhóm chức có mặt trong nhựa đường.

Trong phạm vi luận án, tác giả sử dụng phổ hồng ngoại chuyển đổi FTIR để xác định các nhóm liên kết trong nhựa đường gốc và N_GO. Thí nghiệm sử dụng thiết bị quang phổ hồng ngoại FT/IR-4600 của hãng Jasco – Nhật Bản tại Trung tâm phân tích, thí nghiệm công nghệ cao thuộc Trường Đại học Mở địa chất (Hình 2.3).

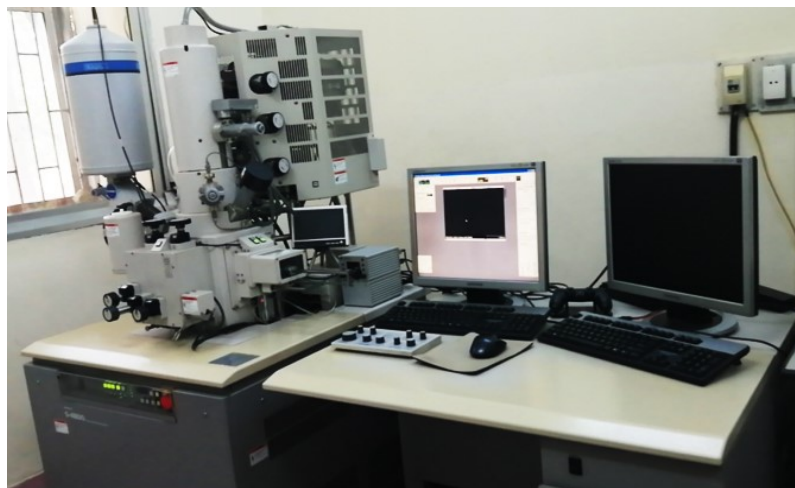


Hình 2.3. Thiết bị quang phổ hồng ngoại được sử dụng trong nghiên cứu.

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

Kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscope – SEM) sử dụng chùm điện tử năng lượng cao hội tụ để tạo ra các tín hiệu khác nhau trên bề mặt của các mẫu vật rắn. Các tín hiệu tiết lộ thông tin về kết cấu, thành phần hóa học, cấu trúc tinh thể và thành phần vật liệu tạo nên mẫu. Các khu vực có chiều rộng từ 1 cm đến 5 μm có thể được quét bằng cách sử dụng các kỹ thuật SEM thông thường với độ phóng đại từ 20 lần đến xấp xỉ 30.000 lần và độ phân giải không gian từ 50 nm đến 100 nm [52]. Ngoài ra, SEM có thể đạt đến độ phân giải 1 nm, độ phóng đại lên đến 100.000 lần khi thực hiện với các vật liệu nano.

Trong nghiên cứu này, thiết bị Hitachi S4800 (Hình 2.4) được sử dụng để xác định hình thái kết cấu bề mặt và độ nhám bề mặt của N_GO. Thí nghiệm thực hiện tại Viện Khoa học vật liệu – Viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam.



Hình 2.4. Thiết bị chụp hiển vi điện tử quét phân giải cao SEM.

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. Kế hoạch thí nghiệm được trình bày chi tiết ở Bảng 2.3.

Bảng 2.3. Kế hoạch thí nghiệm hình thái, thành phần hóa học của vật liệu.

TT	Thí nghiệm	Mẫu vật liệu				
		Nhựa 60/70	GO	N_GO_1%	N_GO_2%	N_GO_3%
1	Quang phổ hồng ngoại FTIR	1	1	1	1	1
2	Kính hiển vi điện tử quét SEM	1	1	1	1	1
	Tổng cộng	2	2	2	2	2

2.2.3. Kết quả thí nghiệm

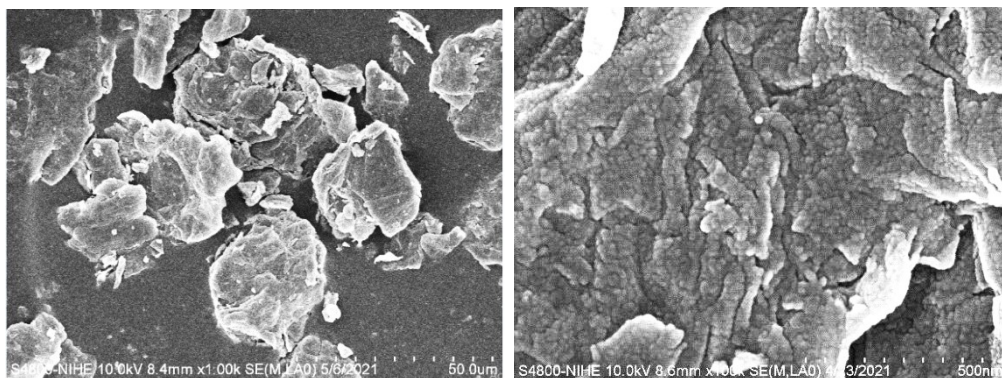
2.2.3.1. Kết quả nghiệm phân tích hình thái SEM của các vật liệu

Thí nghiệm hình thái đối với nhựa đường được kiểm tra bằng kính hiển vi điện tử quét để quan sát hình thái, kết cấu bề mặt cũng như sự phân tán của các hạt GO trong nhựa đường. Hình ảnh SEM của GO, nhựa đường 60/70, chất kết dính N_GO với các hàm lượng 1%, 2% và 3% GO được hiển thị lần lượt ở Hình 2.5, Hình 2.6, và Hình 2.7. Thử nghiệm SEM của GO được thực hiện dưới 1 μm với độ phóng đại 50.000 và 100.000 lần, trong khi SEM của nhựa đường 60/70 và chất kết dính N_GO được thực hiện từ 1 μm đến 10 μm với độ phóng đại lên tới 50.000 lần.

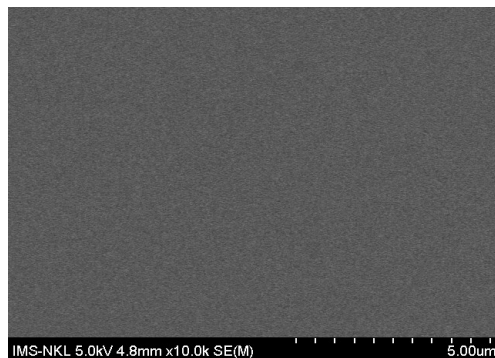
Hình ảnh SEM của GO cho thấy, các hạt GO chủ yếu là các trạng thái độc lập, có nhiều cạnh chung và nhiều lớp. Quá trình cắt trộn với vận tốc cao, lực cắt sẽ phá vỡ và tách GO từ đa lớp về các đơn lớp, làm tăng tỷ diện bề mặt. Khi đó, các hạt GO dễ dàng phân tán vào nhựa đường, làm tăng diện tích tiếp xúc giữa GO và nhựa đường. Hình ảnh SEM của N_GO_1% (Hình 2.7a) và nhựa đường 60/70 được phóng đại ở 5.000 lần cho thấy, bề mặt của N_GO_1% tương đối phù hợp với hình thái bề mặt của nhựa đường 60/70. Nguyên nhân là do GO có màu tối và hàm lượng sử dụng ít nên khó quan sát được các hạt GO phân tán trong nhựa đường.

Khi hàm lượng GO tăng lên 2% (Hình 2.7b), GO phân tán đồng đều trong nhựa đường, và độ phân tán giảm đi khi hàm lượng GO là 3% (Hình 2.7c). Điều này có thể được giải thích rằng, khi hàm lượng GO thấp, nó được bao bọc trong nhựa đường, và dưới sự kết dính của nhựa đường, lớp bề mặt tiếp tục được phân tán. Nhựa đường hoạt động như một pha liên tục, GO là pha phân tán, và pha phân tán được phân tán đồng đều trong pha liên tục. Các nhóm chức chứa oxy cho phép GO phân tán dễ dàng và đồng đều vì chúng làm giảm lực Van der Waals của các phân tử GO, và sự kết tụ của GO hình thành trong nhựa đường không đáng kể. Với hàm lượng GO cao, sự tương tác giữa các phân tử GO tăng lên, khả năng phân tách thành các đơn lớp sẽ khó khăn hơn nên sự phân tán của GO trong nhựa đường cũng bị suy giảm. Điều này cũng đã được thảo luận tại nghiên cứu của Zeng và cộng sự [81].

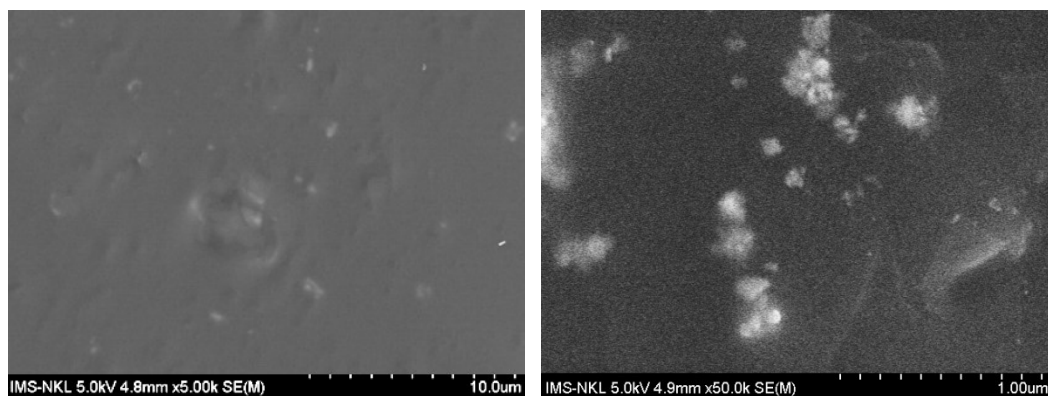
Bên cạnh đó, từ ảnh SEM cho thấy, khi hàm lượng GO tăng lên, độ nhám bề mặt được cải thiện. Việc tăng độ nhám bề mặt sẽ làm tăng tính chất kết dính của nhựa đường, hạn chế các cốt liệu trượt qua nhựa đường gây ra biến dạng. Điều này cho thấy một kết quả tích cực khi sử dụng GO làm phụ gia cho nhựa đường.



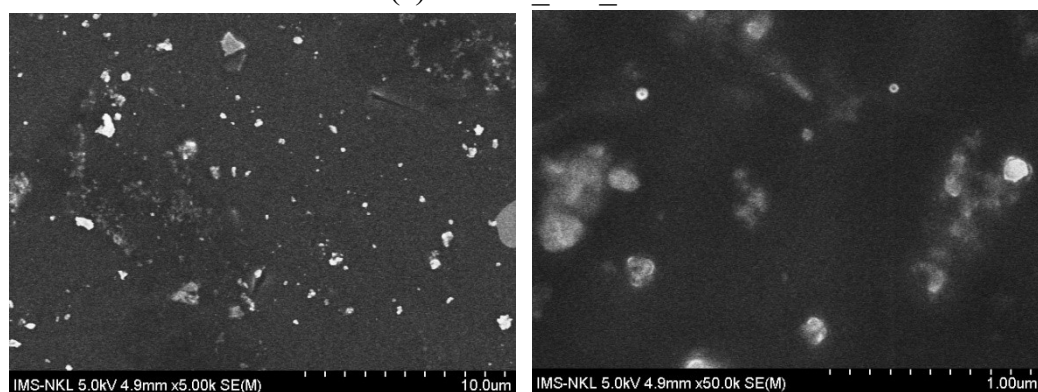
Hình 2.5. Hình ảnh chụp SEM của GO sử dụng trong nghiên cứu.



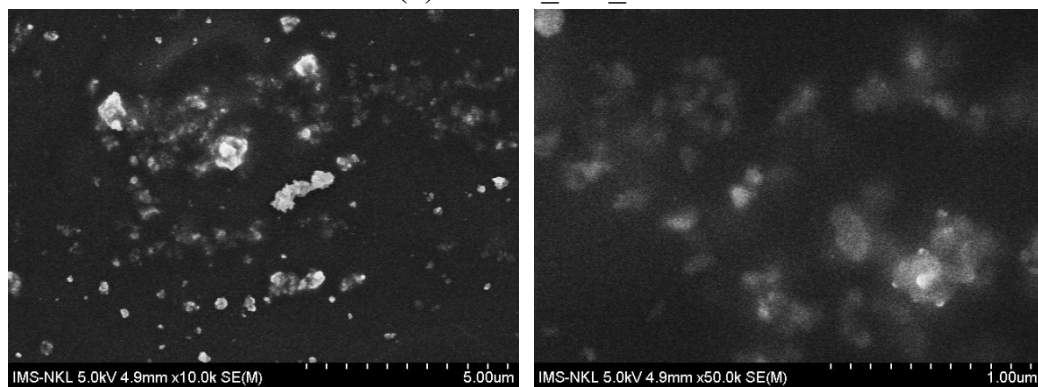
Hình 2.6. Hình ảnh chụp SEM của nhựa đường 60/70.



(a) Mẫu N_GO_1%



(b) Mẫu N_GO_2%

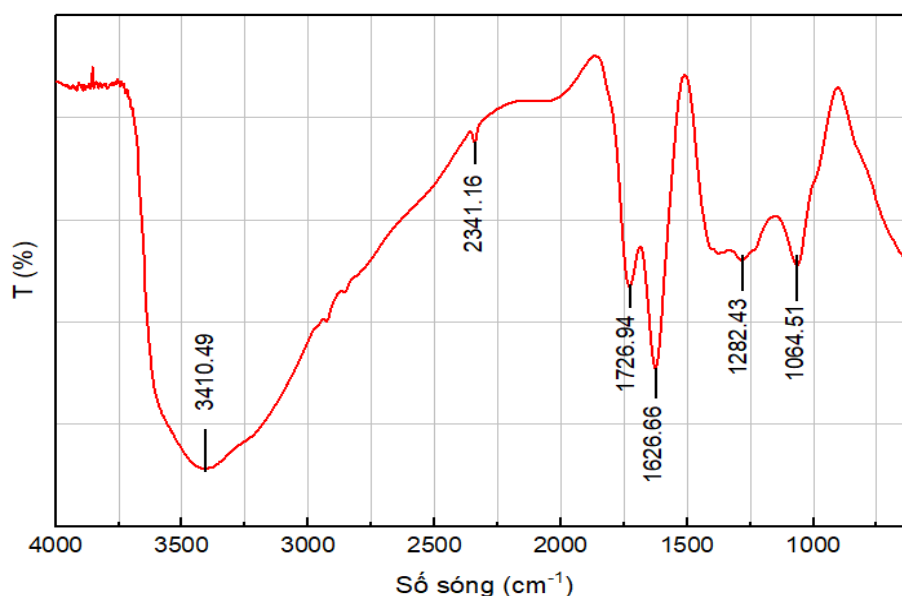


(c) Mẫu N_GO_3%

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

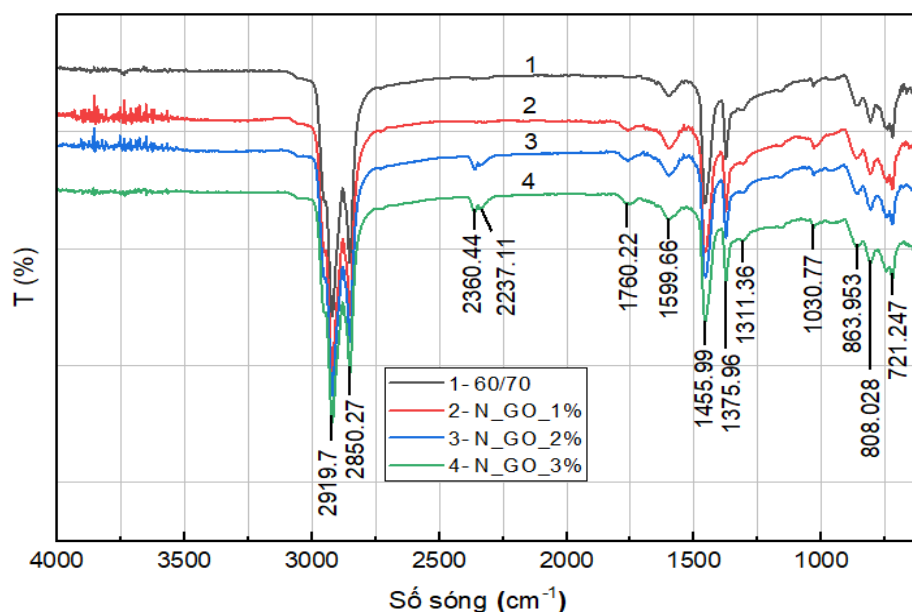
2.2.3.2. Kết quả thí nghiệm phân tích cấu trúc hóa học của các vật liệu

Phổ FTIR của GO trong Hình 2.8 cho thấy, một đỉnh rất rộng từ $2341,16\text{ cm}^{-1}$ đến $3410,49\text{ cm}^{-1}$ chứa các dao động kéo giãn O–H tương ứng với các liên kết C–OH thuộc nhóm chức hydroxyl, và một đỉnh nhọn ở $1626,66\text{ cm}^{-1}$ chỉ ra rằng các nhóm OH của phân tử nước bị hấp phụ trên GO. Ngoài ra, có hai đỉnh nhỏ được tìm thấy từ khoảng 2870 cm^{-1} đến 2920 cm^{-1} thể hiện sự tồn tại của dao động kéo giãn C–H thuộc nhóm chức andehit. Sự hiện diện của đỉnh $1726,94\text{ cm}^{-1}$ chứng tỏ sự tồn tại dao động kéo giãn C=O thuộc nhóm cacboxylic ở các cạnh của GO. Các đỉnh hấp thụ ở $1282,43\text{ cm}^{-1}$ và $1064,51\text{ cm}^{-1}$ đặc trưng cho dao động kéo giãn C=O của nhóm carboxylic và C–O của nhóm epoxy [84]. Từ những phân tích trên cho thấy, GO có chứa các nhóm cacboxylic, cacbonyl, hydroxyl và epoxy góp phần tạo nên bản chất ưa nước mạnh. Do đó, GO là vật liệu ổn định và có thể tăng cường các đặc tính lưu biến cho nhựa đường.



Hình 2.8. Phổ FTIR của GO.

Hình 2.9 mô tả phổ FTIR của nhựa đường 60/70 và các N_GO khác nhau. Đỉnh đặc trưng dao động uốn của nhóm –CH₂ trên hydro các bon bão hòa của nhựa đường 60/70 xuất hiện ở bước sóng $1455,99\text{ cm}^{-1}$ và $1375,96\text{ cm}^{-1}$, và đỉnh đặc trưng dao động kéo của nhóm –CH₂ trên hydro các bon bão hòa ở $2919,7\text{ cm}^{-1}$ và $2850,27\text{ cm}^{-1}$. Các đỉnh đặc trưng xuất hiện ở $1599,66\text{ cm}^{-1}$ là dao động kéo căng C=C trên vòng thơm của nhựa đường, và đỉnh đặc trưng tại $721,25\text{ cm}^{-1}$ là kết quả của dao động uốn cong của nhóm anky [84]. Sau khi nhựa đường gốc được thêm vào GO với các hàm lượng khác nhau, một số thay đổi về phổ hồng ngoại được tìm thấy.



Hình 2.9. Phổ FTIR của nhựa đường 60/70 và N_GO.

Với hàm lượng GO là 2% và 3% (đường số 3 và số 4), các đỉnh hấp thụ mới xuất hiện ở $2360,44\text{ cm}^{-1}$ và $2237,11\text{ cm}^{-1}$. Hai đỉnh này là sự dao động của CO_2 , có thể là nhóm cacboxyl của GO đã bị phân hủy để tạo ra CO_2 trong quá trình khuấy trộn. Nghĩa là, việc giải phóng CO_2 không phải do phản ứng hóa học của GO với nhựa đường tạo ra mà là do sự phân hủy nhóm chức cacboxyl trong quá trình trộn. Hàm lượng GO càng tăng, quá trình này diễn ra mạnh hơn nên các đỉnh trên dễ quan sát hơn. Phát hiện này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Li [54] và Yu [79].

Ngoài ra, các đỉnh đặc trưng của chất kết dính N_GO ở ba hàm lượng GO có sự thay đổi nhỏ so với nhựa đường 60/70. Đỉnh mới ở $1760,22\text{ cm}^{-1}$ được hình thành, đây là dao động kéo dẫn $\text{C}=\text{O}$ trong andehit. Sự phát triển của đỉnh mới này có thể là một dấu hiệu của phản ứng đã xảy ra giữa GO và nhựa đường 60/70. Phần còn lại của các đỉnh hấp thụ đặc trưng không khác biệt nhiều so với mẫu nhựa đường gốc, ngoại trừ sự thay đổi nhẹ tỷ lệ thấp thụ. Trong nghiên cứu của Singh [68], khi nghiên cứu mẫu N_GO ở điều kiện không hóa già, tác giả cũng thấy sự xuất hiện của đỉnh mới ở bước sóng $1741,63\text{ cm}^{-1}$ ứng với dao động kéo dẫn $\text{C}=\text{O}$ của andehit. Điều này cho thấy sự tương đồng giữa nghiên cứu này với nghiên cứu của Singh. Tuy nhiên, N_GO trong nghiên cứu của ông xuất hiện thêm đỉnh thứ hai tại bước sóng $1217,02\text{ cm}^{-1}$ ứng với dao động kéo dài ketone, đây là đỉnh không được tìm thấy khi phân tích FTIR trong nghiên cứu

này. Ngoài ra, Adnan [33] cũng chỉ ra rằng, việc xuất hiện đỉnh mới ở bước sóng 611 cm^{-1} và việc biến mất đỉnh ở bước sóng 2186 cm^{-1} của N_GO chứng tỏ có tồn tại phản ứng hóa học giữa GO và nhựa đường. Trong khi đó, Zeng và cộng sự [81] lại không tìm thấy đỉnh mới khi cho GO vào nhựa đường trong nghiên cứu của họ. Trong nghiên cứu này, nhựa đường không chứa GO được khuấy trộn như N_GO được sử dụng để kiểm chứng. Thông qua phân tích phổ hồng ngoại, mẫu này không xuất hiện đỉnh mới. Điều này cho thấy đỉnh mới ở bước sóng 1760,22 cm^{-1} xuất hiện trong nghiên cứu này được tạo thành khi trộn GO với nhựa đường. Tổng kết cho tới thời điểm này, các nghiên cứu quốc tế cũng như nghiên cứu này đều chưa thể đưa ra một kết luận thống nhất về việc có tương tác hóa học hay không giữa GO và nhựa đường. Do nghiên cứu này chỉ tập trung vào ứng xử vĩ mô của N_GO, nên ứng xử vi mô về vấn đề này sẽ được nghiên cứu sâu hơn ở các nghiên cứu tiếp theo.

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

2.3.1. Lựa chọn chỉ tiêu, kế hoạch thí nghiệm và trình tự đánh giá

2.3.1.1. Lựa chọn chỉ tiêu đánh giá

Theo tài liệu [1] và [5], nhựa đường phân cấp theo độ kim lún bao gồm 11 chỉ tiêu. Ngoài ra, đặc tính lưu biến của chất kết dính nhựa đường gồm G^* và δ cũng là một chỉ tiêu quan trọng để phân loại nhựa đường PG theo tiêu chuẩn AASHTO M320-10 [31]. Theo phân tích ở mục 2.1.2, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm một số chỉ tiêu cơ bản 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 không sử dụng GO nhưng được khuấy với các thông số về thời gian, vận tốc và nhiệt độ như chất kết dính N_GO, và chỉ sử dụng ĐC2 đối với chỉ tiêu độ kim lún và điểm hóa mềm.

2.3.1.2. Kế hoạch thí nghiệm

Việc lựa chọn số mẫu thí nghiệm trong một tổ mẫu đóng vai trò quan trọng. Nếu số mẫu quá nhiều sẽ kéo dài thời gian và làm tăng chi phí thí nghiệm. Ngược lại, nếu số mẫu quá ít sẽ không đánh giá chính xác kết quả thí nghiệm. Thông thường, các tiêu chuẩn thí nghiệm đều quy định số lượng từ 2-3 mẫu/tổ, kết quả thí nghiệm được đánh

giá đảm bảo độ chụm theo các tiêu chuẩn tương ứng. Trên cơ sở đó, kế hoạch thí nghiệm đối với chỉ tiêu của N_GO được trình bày trong Bảng 2.4.

Bảng 2.4. Kế hoạch thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật của chất kết dính N_GO.

TT	Chỉ tiêu kỹ thuật	Số lượng mẫu chất kết dính N_GO							Tổng số mẫu
		ĐC1 0%	ĐC2 0%	0,5%	1%	1,5%	2%	3%	
1	Kim lún ở 25°C	3	3	3	3	3	3	3	21
2	Hóa mềm	3	3	3	3	3	3	3	21
3	Nhớt Brookfield	2	-	2	2	2	2	2	12
4	G* và δ chưa hóa già	2	-	2	2	2	2	2	12
	G* và δ sau RFTOT	2	-	2	2	2	2	2	12
5	Độ kéo dài 25°C, cm	2	-	2	2	2	2	2	12
6	Nhiệt độ bắt lửa, °C	2	-	2	2	2	2	2	12
7	Độ dính bám với đá	2	-	2	2	2	2	2	12
8	KL riêng, g/cm ³	2	-	2	2	2	2	2	12
9	Lượng tổn thất sau khi gia nhiệt 5h ở 163°C	2	-	2	2	2	2	2	12

2.3.1.3. Trình tự thí nghiệm và xử lý kết quả

1. Thiết kế thí nghiệm. Bước này sẽ xác định số lượng và trình tự các thí nghiệm, đồng thời cần chỉ rõ giá trị mỗi biến trong từng thí nghiệm. Kế hoạch thí nghiệm thường được lập thành ma trận hay còn gọi là bảng thí nghiệm. Trong bảng, mỗi cột tương ứng với một biến và mỗi hàng biểu thị tập hợp giá trị của các biến cho mỗi thí nghiệm;
2. Thực hiện thí nghiệm trong phòng. Quá trình thí nghiệm được tiến hành tuần tự, đo đạc chi tiết và chính xác các thông số cũng như kết quả thí nghiệm;
3. Loại bỏ số liệu ngoại lai (nếu có) theo ASTM E178;
4. Đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm. Độ chụm là mức độ gần nhau giữa các kết quả thí nghiệm độc lập trong điều kiện xác định. Việc đánh giá độ chụm là cơ sở quan trọng để đảm bảo chất lượng và tính khoa học của công tác thí nghiệm, từ đó đưa ra những kết luận và kiến nghị có cơ sở cho vấn đề nghiên cứu. Mỗi tiêu chuẩn thí nghiệm đều quy định độ chụm tương ứng. Trình tự đánh giá độ chụm:
 - Tổng hợp các kết quả của tất cả các mẫu thí nghiệm (X_i), xác định $X_{\max}$ và $X_{\min}$;
 - Xác định độ rộng theo công thức $CR = X_{\max} - X_{\min}$;

- Xác định khoảng giới hạn cho phép $CR_{0.95}(n) = f(n).s$ ở độ tin cậy 95% với $f(n)$ là hệ số khoảng giới hạn, tra Bảng 1 của ASTM C670 hoặc TCVN 6910-6;
 - Kiểm tra nếu $CR \leq CR_{0.95}(n)$ thì kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm, kết quả cuối cùng là trung bình số học của các giá trị thí nghiệm;
 - Nếu $CR > CR_{0.95}(n)$ thì kết quả thí nghiệm không đảm bảo độ chụm. Xử lý: thí nghiệm bổ sung thêm mẫu, xác định trung vị, làm lại thí nghiệm.
5. Phân tích thống kê nhằm đánh giá tác động của các biến đầu vào lên biến đầu ra. Sử dụng phần mềm Minitab 19 với mức độ tin cậy 95% và mức ý nghĩa $\alpha = 5\%$, số mẫu được điều chỉnh tùy theo mức độ chính xác để đảm bảo phát hiện sai khác trong thí nghiệm. Phân tích phương sai ANOVA (Analysis Of Variance) được sử dụng để kiểm định giả thuyết về sự bằng nhau của trung bình từ ba nhóm mẫu trở lên với khả năng sai lầm 5%. Phân tích hậu định (post-hoc) được áp dụng để kiểm tra sự khác biệt cụ thể giữa các nhóm mẫu về một chỉ tiêu cụ thể có nghĩa thống kê hay không. Có nhiều phương pháp phân tích hậu định, ví dụ như phương pháp của Tukey, Fisher, Duncan. Trong trường hợp số lượng mẫu thí nghiệm nhỏ, phương pháp của Tukey thường được sử dụng trong phân tích hậu định.
6. Xây dựng phương trình hồi quy cho các chỉ tiêu thí nghiệm (nếu có).

2.3.2. Độ kim lún của nhựa đường sử dụng GO

2.3.2.1. Thí nghiệm độ kim lún

Độ kim lún đặc trưng cho độ đặc quánh và biểu thị sức bền nội tại của nhựa đường. Tính quánh của nhựa đường phụ thuộc vào tỷ lệ các nhóm chất và nhiệt độ môi trường. Ở nhiệt độ trung bình hàng năm, độ kim lún ở 25°C thể hiện độ quánh của nhựa đường cũng như ảnh hưởng của nó đến một số chỉ tiêu khai thác của mặt đường [15]. Độ kim lún tính bằng decimilimet (dmm) của kim tiêu chuẩn xuyên thẳng đứng vào mẫu, trong điều kiện cụ thể về nhiệt độ, tải trọng và thời gian quy định. Độ sâu của chiếc kim xuyên vào mẫu nhựa đường càng lớn thì nhựa đường càng mềm. Hay nói cách khác, nhựa đường có độ kim lún cao đồng nghĩa với độ quánh nhỏ và ngược lại.

Tiêu chuẩn thí nghiệm độ kim lún theo TCVN 7495:2005 (hoặc theo ASTM D5). Thí nghiệm được thực hiện ở Phòng thí nghiệm LAS-XD72 – Trường Đại học Công nghệ GTVT. Hình 2.10 hiển thị thiết bị đo và mẫu kim lún trong thí nghiệm.



Hình 2.10. Thiết bị đo và mẫu thí nghiệm độ kim lún.

2.3.2.2. Kết quả thí nghiệm độ kim lún

Kết quả thí nghiệm độ kim lún và phân tích độ chụm các chất kết dính N_GO được thể hiện trong Phụ lục 2. Việc đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN 7495:2005 và ASTM D5, với giới hạn chấp nhận được được quy định theo tiêu chuẩn ASTM C670. 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.

Đầu vào là tỷ lệ GO với 7 hàm lượng: 0% (ĐC1); 0% (ĐC2); 0,5%; 1%; 1,5%; 2%; 3%.

Hàm phân tích đầu ra là độ kim lún (dmm).

Tổng số kết quả thí nghiệm $9 \times 7 = 63$ kết quả.

Phân tích phương sai ANOVA

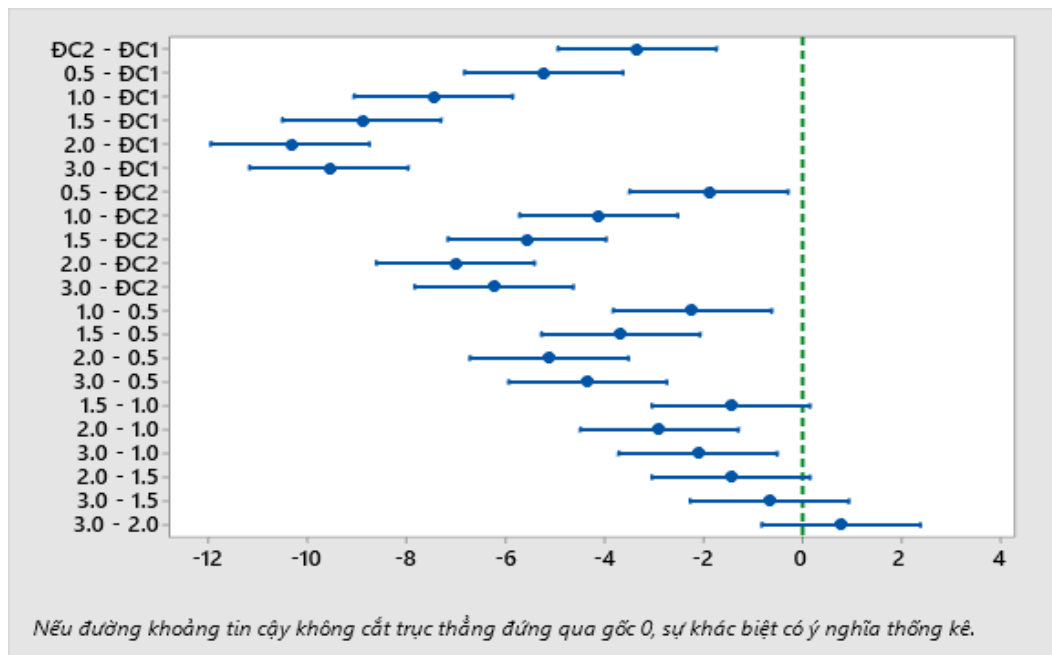
Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tỷ lệ GO	6	760,19	126,698	103,33	0,000
Error	56	68,67	1,226		
Total	62	828,86			

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,10733	91,72%	90,83%	89,51%

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. Phân tích hậu định theo chuẩn Tukey Hình 2.11 cho thấy, 17 cặp trong tổng số

21 cặp so sánh có sự khác biệt (không cắt qua gốc 0) có ý nghĩa thống kê, 4 cặp so sánh còn lại không phát hiện sự khác biệt.

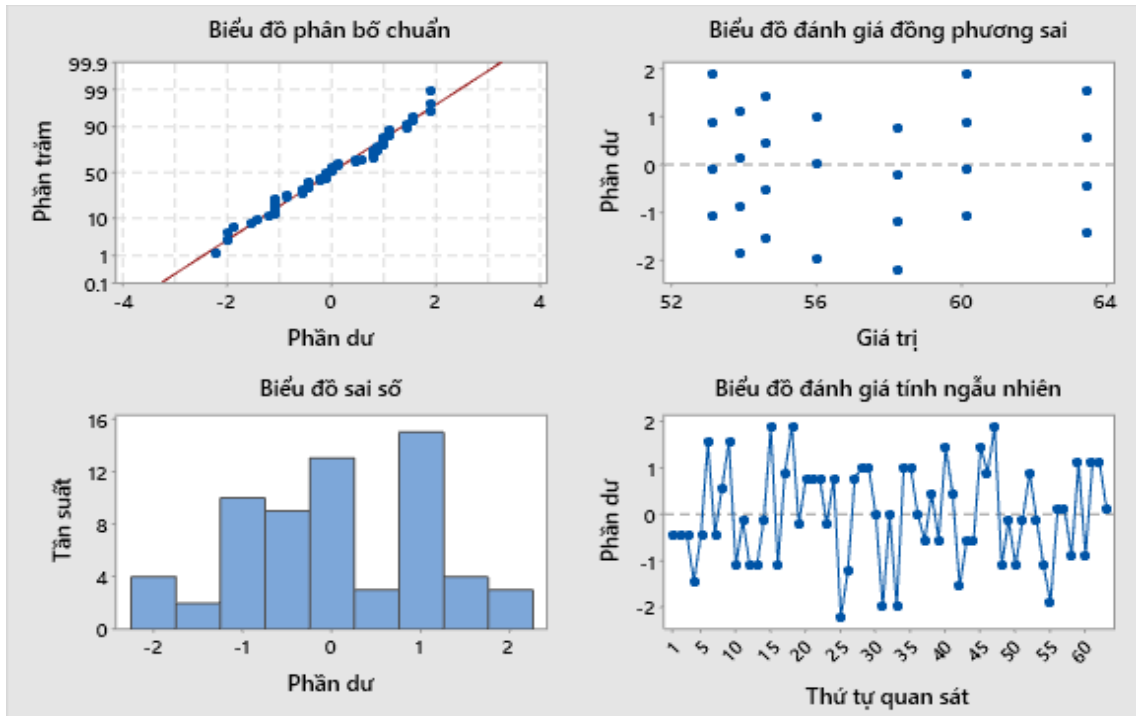


Hình 2.11. Phân tích hậu định độ kim lún của các mẫu N_GO.

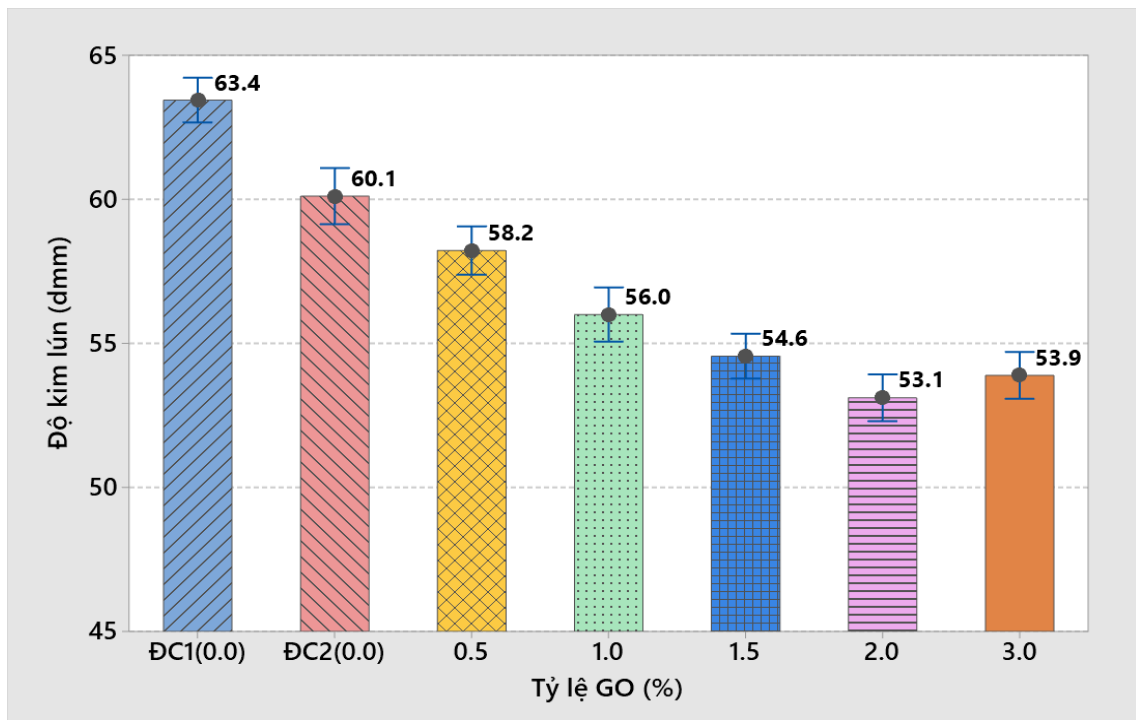
Biểu đồ phần dư Hình 2.12 cho thấy phần dư tuân theo quy luật phân bố chuẩn. Các giá trị là ngẫu nhiên và không theo quy luật cụ thể, được phân bố đều ở cả hai phía của đường “0”. Điều này đáp ứng các điều kiện áp dụng phương pháp thống kê thực nghiệm.

Hình 2.13 cho thấy ảnh hưởng của việc bổ sung các hàm lượng GO khác nhau đến độ kim lún của nhựa đường. Như thể hiện trong hình, độ kim lún ở 25°C của N_GO giảm so với ĐC1 và ĐC2. Với N_GO, độ kim lún giảm dần với sự gia tăng hàm lượng GO, điều này cho thấy sự gia tăng độ cứng của N_GO. Nguyên nhân là do các hạt GO được phân tán nhiều vào trong nhựa đường, làm tăng độ bền cơ học của nhựa đường và khả năng chống biến dạng của mặt đường được cải thiện. Chất kết dính N_GO_2% cho độ phân tán tốt nhất như đã phân tích ở bên trên nên đây là hàm lượng tối ưu để cải thiện độ cứng nhựa đường với độ kim lún là 53,1 dmm.

Ngoài ra, mẫu ĐC2 có độ kim lún thấp hơn mẫu ĐC1 do ảnh hưởng hóa già trong quá trình khuấy trộn nhưng không nhiều. Sự hóa già của nhựa đường chủ yếu là do quá trình oxy hóa, mẫu ĐC2 và N_GO đều bị hóa già trong quá trình khuấy nhựa. Tuy nhiên, GO có thể làm chậm quá trình hóa già của nhựa đường bằng cách giảm tốc độ khuếch tán O₂, làm ức chế quá trình bay hơi của các phân tử bão hòa trong nhựa đường [75].



Hình 2.12. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê độ kim lún.



Hình 2.13. Ảnh hưởng của GO đến độ kim lún của N_GO.

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

2.3.3.1. Thí nghiệm điểm hóa mềm

Nhựa đường là vật liệu không có điểm chảy xác định rõ ràng, mềm dẻo khi nhiệt độ tăng, do đó việc xác định điểm hoá mềm của nhựa đường là cần thiết. Điểm hoá mềm

đóng vai trò quan trọng trong việc phân loại nhựa đường và là một yếu tố thiết lập tính đồng nhất trong nguồn cung cấp và vận chuyển, cũng như cảnh báo khả năng chảy của vật liệu khi nhiệt độ tăng. Thông thường, nhựa đường có độ cứng càng lớn thì điểm hóa mềm càng cao

Tiêu chuẩn xác định điểm hóa mềm của nhựa đường theo TCVN 7497-2005 (hoặc ASTM D36 và AASHTO T53). Thí nghiệm điểm hóa mềm được thực hiện ở Phòng thí nghiệm LAS-XD72 - Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải. Hình 2.14 hiển thị thiết bị đo và mẫu thử nghiệm trong thí nghiệm điểm hóa mềm.



Hình 2.14. Thiết bị đo và mẫu thí nghiệm điểm hóa mềm.

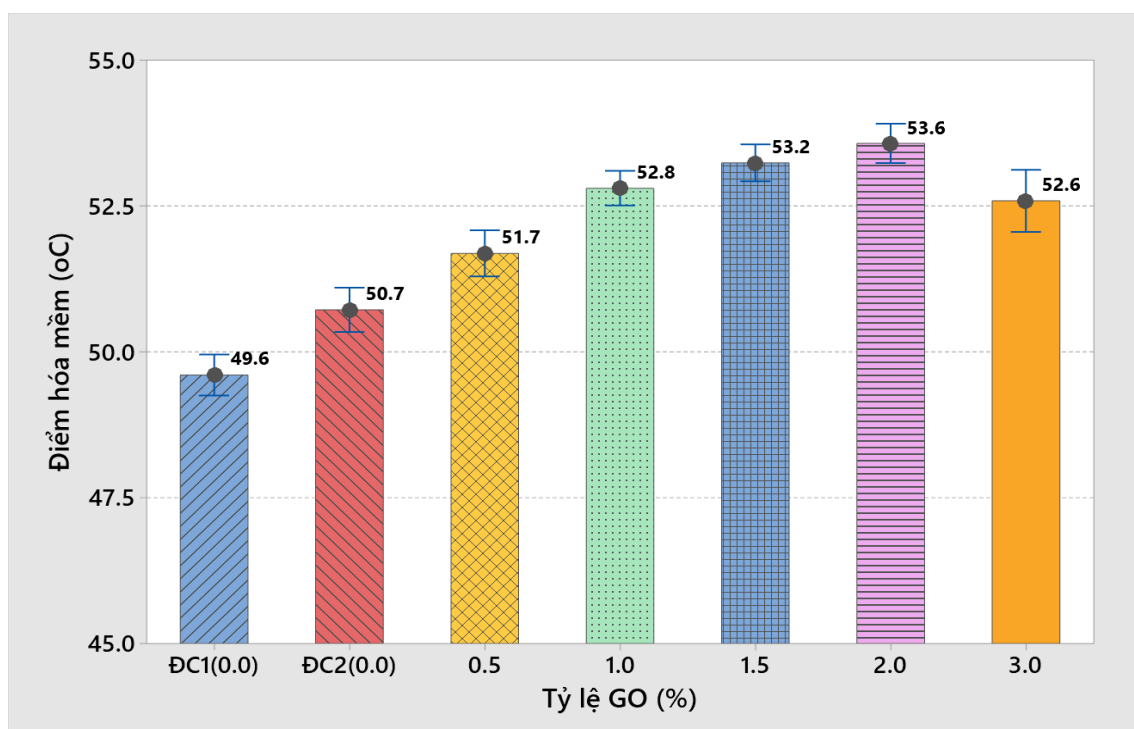
2.3.3.2. Kết quả thí nghiệm điểm hóa mềm

Kết quả thí nghiệm điểm hóa mềm và phân tích độ chụm các chất kết dính N_GO được thể hiện trong Phụ lục 2. Việc đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN 7497:2005, với giới hạn chấp nhận được được quy định theo tiêu chuẩn ASTM C670. Kết quả thí nghiệm đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá.

Thiết kế thực nghiệm và phân tích kết quả thí nghiệm nhiệt độ hóa mềm được trình bày chi tiết ở Phụ lục 2

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. Cơ sở lý thuyết cho sự thay đổi này cũng tương tự như đối với độ kim lún. Như phân tích bên trên, GO làm tăng độ bền và độ cứng của nhựa đường, do đó cần phải có nhiệt độ cao hơn để làm mềm và chảy nhựa, nghĩa là điểm

hóa mềm tăng. Điểm hóa mềm càng cao thì độ ổn định nhiệt độ cao của nhựa đường càng tốt và khả năng kháng lún của mặt đường BTN càng cao. Điểm hóa mềm của N_GO_3% thấp hơn so với N_GO_2% càng khẳng định khả năng phân tán của N_GO_2% tốt hơn N_GO_3% như đã phân tích bên trên. Nói cách khác, lượng GO bổ sung quá nhiều đã không tạo liên kết tốt với nhựa đường do khả năng phân tán GO trong nhựa đường giảm. Điều này cũng được thảo luận tại các nghiên cứu [34], [80]. Do đó, việc bổ sung GO vượt quá hàm lượng tối ưu sẽ làm giảm hiệu suất cải thiện nhựa đường.



Hình 2.15. Ảnh hưởng của GO đến điểm hóa mềm của N_GO.

2.3.4. Độ nhớt của nhựa đường sử dụng graphen oxit

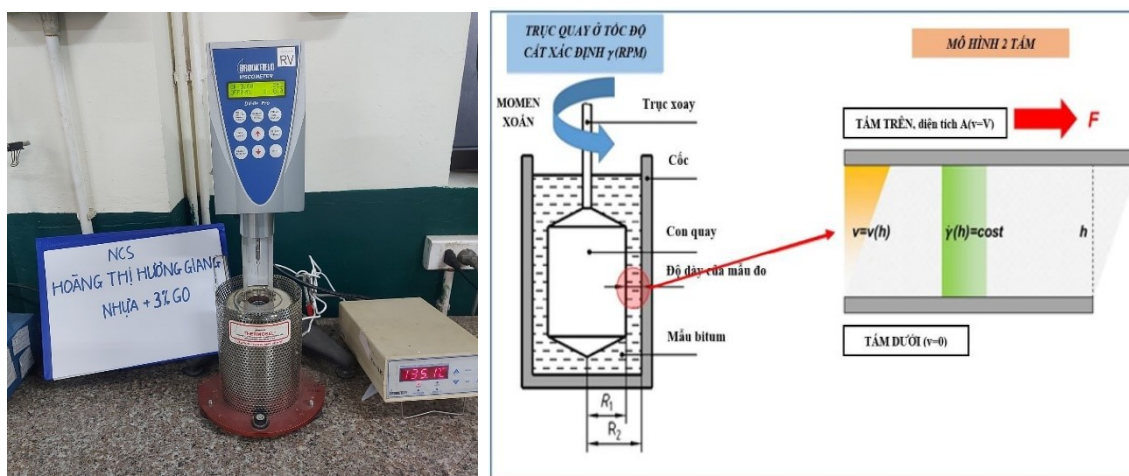
2.3.4.1. Thí nghiệm độ nhớt

Độ nhớt là thước đo sức kháng trong bản thân khối chất lỏng chống lại một biến dạng và được định nghĩa là tỷ số giữa ứng suất cắt và tốc độ cắt. Độ nhớt gồm 2 loại là độ nhớt động học (kinematic viscosity), đơn vị là mm^2/s hoặc cSt- centiStokes, được xác định ở 135°C; độ nhớt động lực (dynamic viscosity), đơn vị là Pas hoặc cP-centiPoise, 1 Pas = 1000 cP, được xác định ở 60°C.

Phương pháp thí nghiệm nhớt kế quay hiện được coi là phương pháp phổ biến nhất để xác định độ nhớt của nhựa đường. Thiết bị cho phép thử nghiệm nhiều loại nhựa đường trên một phạm vi nhiệt độ rộng hơn so với các hệ thống đo độ nhớt khác. Nghiên cứu

này sử dụng nhớt kế Brookfield để đo độ nhớt của nhựa đường ở các nhiệt độ khác nhau. Trong quá trình thí nghiệm, mẫu nhựa đường được đặt trong một ống nhỏ đặc biệt rồi đặt con thoi vào quay với tốc độ quy định. Giá trị mô men xoắn đo được khi con thoi quay là cơ sở xác định độ nhớt của nhựa đường thông qua hệ số quy đổi mô men xoắn sang độ nhớt. Trong nghiên cứu này, độ nhớt nhựa đường được xác định 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. Thí nghiệm thực hiện ở Phòng thí nghiệm LAS-XD72 - Trường Đại học CN GTVT. Hình 2.16 hiển thị thiết bị đo và nguyên lý hoạt động của nhớt kế Brookfield.



Hình 2.16. Thiết bị đo và nguyên lý hoạt động của nhớt kế Brookfield.

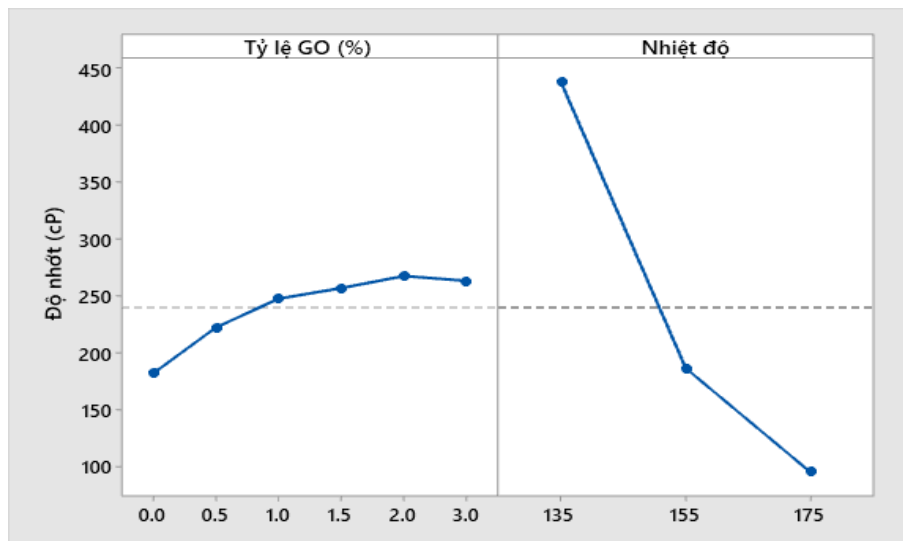
2.3.4.2. Kết quả thí nghiệm độ nhớt Brookfield

Kết quả thí nghiệm độ nhớt Brookfield các mẫu chất kết dính N_GO đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá. Thiết kế thực nghiệm và phân tích kết quả thí nghiệm độ nhớt được trình bày trong Phụ lục 2.

Hình 2.17 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến độ nhớt. Nhận thấy cả hai yếu tố tỷ lệ GO và nhiệt độ thử nghiệm đều có ảnh hưởng đến độ nhớt.

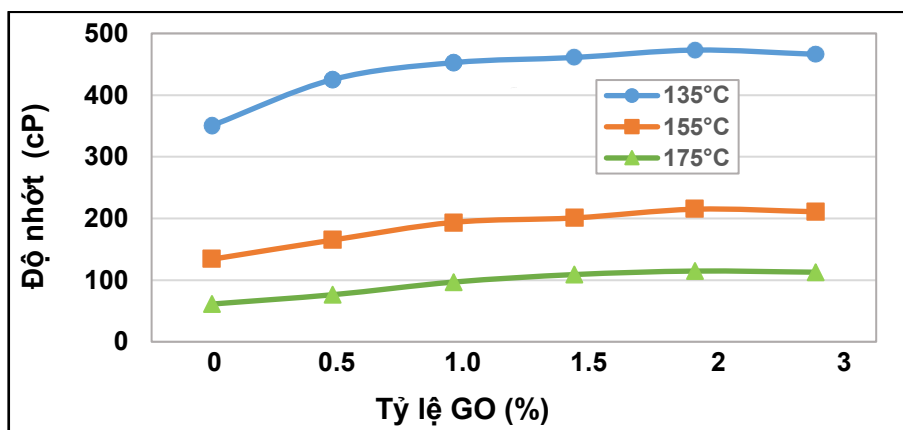
- Ảnh hưởng của tỷ lệ GO: Nhìn chung, độ nhớt tăng theo tỷ lệ tăng của GO. Khi tỷ lệ GO tăng đến 1%, độ nhớt tăng nhanh thể hiện đường ảnh hưởng trong đoạn này có độ dốc lớn. Tốc độ tăng độ nhớt giảm dần khi tỷ lệ GO tăng từ 1% đến 2% (đường ảnh hưởng có độ dốc nhỏ hơn). Nếu tiếp tục tăng tỷ lệ GO lên 3%, độ nhớt giảm giảm so với tỷ lệ 2% GO.

- Ảnh hưởng của nhiệt độ thử nghiệm: Nhiệt độ là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhớt. Khi nhiệt độ tăng, độ nhớt chất kết dính giảm. Đặc biệt, độ nhớt giảm đáng kể trong khoảng nhiệt độ từ 135°C đến 155°C.



Hình 2.17. Ảnh hưởng của các yếu tố đến độ nhớt N_GO.

Ảnh hưởng của các hàm lượng GO khác nhau đến độ nhớt của N_GO ở khoảng nhiệt độ từ 135°C đến 175°C được hiển thị ở Hình 2.18.



Hình 2.18 Ảnh hưởng của GO đến độ nhớt nhựa đường ở các nhiệt độ.

Như đã phân tích phần trên, độ nhớt của nhựa đường giảm khi nhiệt độ tăng. Các mức tăng độ nhớt cao nhất lần lượt là 34,76%; 60,45% và 88,52% tương ứng ở 135°C, 155°C và 175°C. Khi so sánh với mẫu nhựa gốc, mẫu N_GO_2% thể hiện độ nhớt lớn nhất. Bên cạnh đó, tất cả các chất kết dính nhựa đường được khảo sát đều đáp ứng thông số kỹ thuật theo tiêu chuẩn Superpave, quy định rằng độ nhớt ở 135°C của nhựa

đường không được lớn hơn 3 Pa.s. Như vậy, việc áp dụng GO vào nhựa đường cơ bản có thể cải thiện khả năng làm việc của nó ở nhiệt độ cao.

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:

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

Hệ số

Tham số	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Hằng số	1535,0	39,7	38,67	0,000	
GO	25,67	4,18	6,15	0,000	1,00
T	-8,576	0,252	-34,01	0,000	1,00

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
42,7922	91,92%	91,77%	91,50%

Phương trình hồi quy (2.1) có hệ số xác định điều chỉnh $R_{dc}^2 = 91,77\%$, hệ số $p \ll 0,05$ nên đảm bảo độ tin cậy.

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 “Standard Viscosity – Temperature Chart for Asphalt”. Theo tiêu chuẩn này, khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén của các loại BTN được xác định tương ứng với khoảng độ nhớt $0,17 \pm 0,02$ Pa.s (170 ± 20 cP) và $0,28 \pm 0,3$ Pa.s (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 trong Bảng 2.5.

Bảng 2.5. Kết quả xác định khoảng nhiệt độ trộn và đầm nén BTN sử dụng chất kết dính N_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, việc bổ sung GO làm tăng nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN_GO so với hỗn hợp BTNC 12,5 từ $5 \div 8^\circ\text{C}$. 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 [56], [57], [82].

2.3.5. Mô đun cắt động và góc trễ pha của nhựa đường sử dụng graphen oxit

2.3.5.1. Thí nghiệm cắt động lưu biến trên máy DSR

Thiết bị DSR dùng để xác định giá trị mô đun cắt động G^* và góc trễ pha δ . Giá trị G^* là một chỉ tiêu đặc trưng cho độ cứng và khả năng chống biến dạng do tải trọng của nhựa đường. Nó là tỷ số giữa giá trị biên độ ứng suất cắt τ và giá trị biên độ biến dạng γ . Góc δ là góc lệch giữa ứng suất và biến dạng hình sin tác dụng lên mẫu trong thử nghiệm không chế biến dạng. Hai đại lượng này phản ánh khả năng chống lại biến dạng cắt trượt của nhựa đường trong phạm vi làm việc đàn - nhớt tuyến tính và được sử dụng để tính toán các chỉ tiêu kỹ thuật của nhựa theo tiêu chuẩn AASHTO M320.

Tiêu chuẩn yêu cầu mẫu thử đạt giá trị mô đun cắt động trong khoảng từ 100 Pa đến 10 MPa, với nhiệt độ thử nghiệm từ 6°C đến 88°C và tần số thử nghiệm 10 rad/s. Điều này phụ thuộc vào phân cấp, nhiệt độ thử nghiệm và mẫu được hóa già hoặc chưa hóa già trước khi thử nghiệm. Các kết quả đo được tính toán tự động thông qua phần mềm chuyên dụng tích hợp trong thiết bị của nhà sản xuất, giúp thu thập và xử lý số liệu thí nghiệm một cách hiệu quả.

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm thực hiện trên thiết bị MCR-102 tại Phòng thí nghiệm vật liệu của Công ty Cổ phần Đầu tư Xây dựng và Thương mại Quốc tế-ICT (Hình 2.19).



Hình 2.19. Thiết bị đo DSR.

Tiêu chuẩn thí nghiệm DSR theo AASHTO T315 (hoặc theo TCVN 11808–2017) với các điều kiện thí nghiệm:

- Mẫu thử có đường kính 25 mm, dày 1 mm.
- Kiểu tác dụng tải trọng: Không chế biến dạng.
- Thí nghiệm được tiến hành ở nhiệt độ 46°C, 52°C, 58°C, 64°C, 70°C, 76°C và 82°C, tần số 10 rad/s (1,59 Hz) hoặc khi tỷ số $G^*/\sin\delta$ giảm dưới 1 kPa đối với mẫu chưa hóa già, và giảm dưới 2,2 kPa đối với mẫu sau RTFOT.

2.3.5.2. Kết quả thí nghiệm của các mẫu N_GO chưa hóa già

Kết quả thí nghiệm, phân tích độ cụm, thiết kế thực nghiệm, và phân tích kết quả mô đun cắt động theo chuẩn PG của mẫu nhựa chưa hóa già được thể hiện trong Phụ lục 2. Từ biểu đồ Hình 2.20a,b cho thấy G^* tăng dần và δ giảm dần theo tỷ lệ GO tăng dần. G^* tăng thì tỷ lệ thành phần đàn hồi của nhựa đường càng nhiều, hiệu suất làm việc ở nhiệt độ cao tốt hơn nên khả năng kháng lún trong môi trường nhiệt độ cao tốt hơn. Góc δ nhỏ cho thấy khả năng phục hồi biến dạng của nhựa đường tốt hơn. Cuối cùng, $G^*/\sin\delta$ tăng lên khi tỷ lệ GO tăng (Hình 2.20c). Tỷ lệ 2%-3% GO làm tăng PG ở nhiệt độ cao của N_GO so với nhựa 60/70. Chất kết dính N_GO_2% và N_GO_3% có đặc tính khai thác tương đương PG70, trong khi các mẫu N_GO còn lại tương đương PG64. 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:

$$\frac{G^*}{\sin\delta} = 64,3 + 0,997xGO - 0,9758xT \text{ (kPa)} \quad (2.2)$$

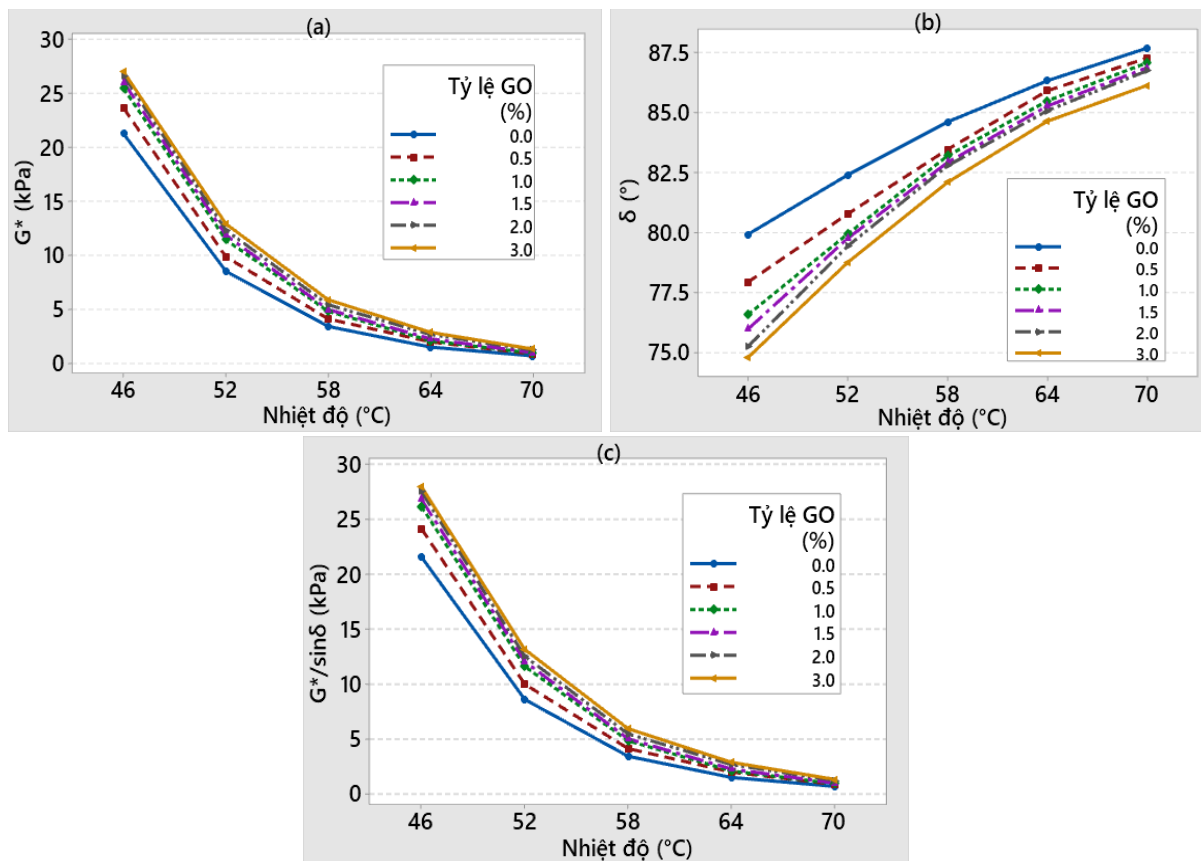
Hệ số

Tham số	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Hằng số	64,30	3,57	18,02	0,000	
GO	0,997	0,514	1,94	0,047	1,00
T	-0,9758	0,0597	-16,34	0,000	1,00

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,92538	85,61%	85,00%	83,55%

Phương trình hồi quy (2.2) có hệ số xác định điều chỉnh $R_{đc}^2 = 85\%$, hệ số $p \ll 0,05$ nên đảm bảo độ tin cậy.



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

2.3.5.3. Kết quả thí nghiệm của nhựa đường sử dụng graphene oxit sau hóa già RTFOT

Kết quả thí nghiệm mô đun cắt động theo chuẩn PG của mẫu nhựa hóa già sau RTFOT được thể hiện trong Bảng 2.6, một số kết luận được rút ra:

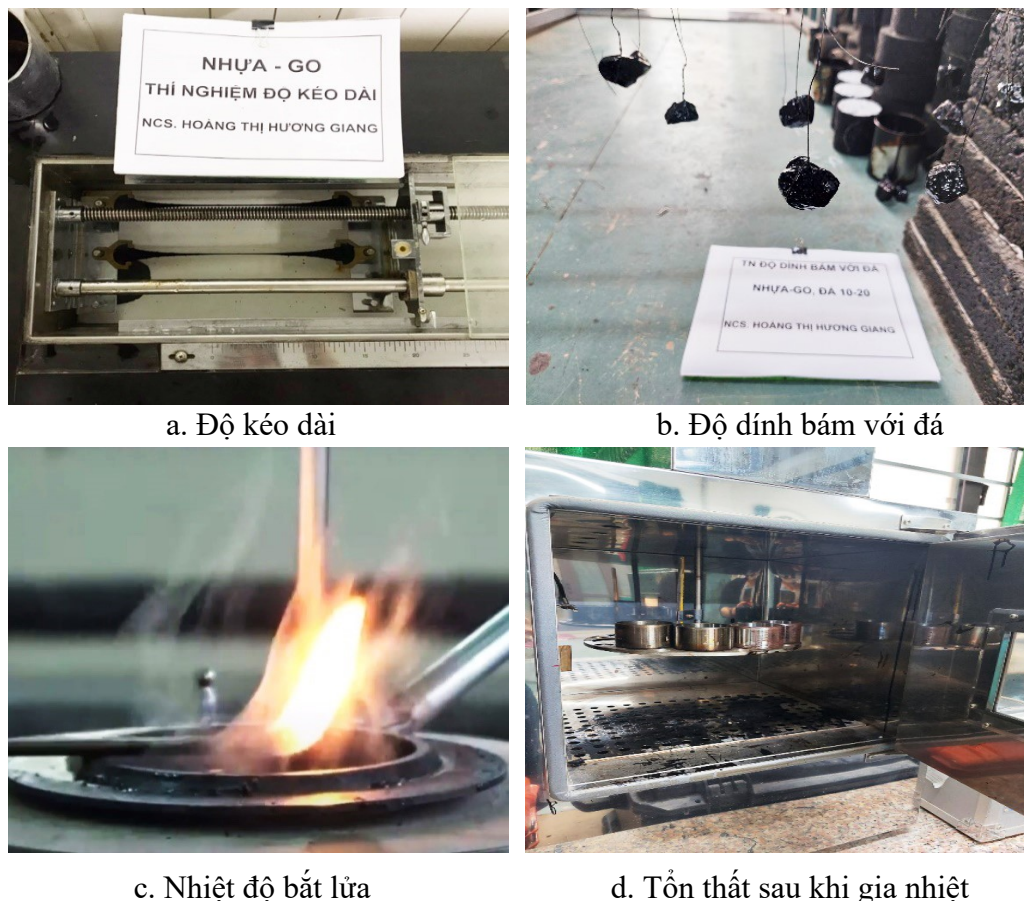
- Cấp đặc tính khai thác theo PG sau RTFOT của nhựa đường 60/70 và N_GO vẫn giữ được cấp nhựa như khi chưa hóa già, cụ thể: nhựa đường 60/70, N_GO_0,5%, N_GO_1% và N_GO_1,5% có đặc tính khai thác tương đương PG64, trong khi N_GO_2% và N_GO_3% tương đương PG70.
- Sự thay đổi $G^*/\sin\delta$ của N_GO nhỏ hơn so với nhựa đường 60/70, điều này cho thấy 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. Với cấu trúc phân tử đặc biệt, việc GO có thể cải thiện tính năng chống hóa già của nhựa đường là do: (a) GO có thể ngăn cản sự tiếp xúc của oxy với nhựa đường, (b) GO có thể làm chậm quá trình bay hơi của các thành phần nhẹ trong nhựa đường. Điều này cũng đã được thảo luận trong nghiên cứu của Li và cộng sự [54].

Bảng 2.6. Kết quả thí nghiệm mô đun cắt động theo chuẩn PG của N_GO sau RTFOT.

Loại chất kết dính	Nhiệt độ TN (°C)	Mô đun cắt động G* và góc lệch pha δ				G*/sinδ						Cấp PG
		Mẫu 1		Mẫu 2		Mẫu 1	Mẫu 2	TB	Đánh giá độ chụm			
		G*	δ	G*	δ				R max-min	AASHTO T315	Đánh giá	
		[kPa]	[°]	[kPa]	[°]				(kPa)	d2s%		
Nhựa đường 60/70	58	5,903	79,22	6,259	78,51	6,009	6,387	6,198	0,378	0,558	Đạt	64
	64	2,318	82,15	2,503	81,67	2,340	2,530	2,435	0,190	0,219	Đạt	
N_GO 0,5%	58	6,006	78,45	6,375	78,02	6,130	6,517	6,324	0,387	0,569	Đạt	64
	64	2,510	80,98	2,704	80,69	2,541	2,740	2,641	0,199	0,238	Đạt	
N_GO 1%	58	6,807	77,62	6,500	77,51	6,969	6,658	6,813	0,311	0,613	Đạt	64
	64	2,504	79,61	2,316	78,55	2,546	2,363	2,454	0,183	0,221	Đạt	
N_GO 1,5%	58	7,105	77,18	7,360	76,92	7,287	7,556	7,421	0,269	0,668	Đạt	64
	64	3,208	79,05	3,422	78,29	3,267	3,495	3,381	0,227	0,304	Đạt	
N_GO 2%	64	4,607	77,38	4,819	76,18	4,721	4,963	4,842	0,242	0,436	Đạt	70
	70	2,167	78,72	2,284	78,82	2,210	2,328	2,269	0,118	0,204	Đạt	
N_GO 3%	64	4,726	77,89	4,686	77,25	4,834	4,804	4,819	0,029	0,434	Đạt	70
	70	2,261	79,55	2,124	79,62	2,299	2,159	2,229	0,140	0,201	Đạt	

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

Hình ảnh và kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu còn lại được dùng để đánh giá nhựa đường theo [1] của chất kết dính N_GO được trình bày trong Hình 2.21 và Bảng 2.7.



Hình 2.21. Một số hình ảnh thí nghiệm các chỉ tiêu còn lại của N_GO.

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	Min 100
2	Nhiệt độ bắt lửa, °C	TCVN 7498:2005	310	301	295	291	287	280	Min 232
3	Độ dính bám với đá	TCVN 7504:2005	Cấp 3	Cấp 3	Cấp 3	Cấp 4	Cấp 4	Cấp 4	Cấp 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	Tồn 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 mủ mác 60/70 sử dụng trong xây dựng theo tiêu chuẩn TCVN 7493:2005 [5]. 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. Nguyên nhân chính là do GO có tỷ diện bề mặt lớn và chứa nhiều nhóm chức giàu oxy, có thể phản ứng hóa lý với nhựa đường để tạo thành cấu trúc phân lớp dày đặc và ổn định hơn. Các cơ chế này làm tăng mật độ liên kết ngang và liên kết với nhựa đường, do đó tăng cường khả năng chống bong tróc giữa nhựa đường và cốt liệu. Kết quả nghiên cứu này hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu của Wang [73] và Zhu [83] khi thử nghiệm trên ba loại cốt liệu bao gồm đá granite, đá basalt, và đá vôi.

2.4. Kết luận chương 2

- GO có cấu tạo đa lớp, trong quá trình cắt trộn với vận tốc cao, lực cắt sẽ phá vỡ GO thành các đơn lớp, giúp GO được 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 các lớp GO. Sự phát triển của đỉnh mới ở bước sóng $1760,22\text{ cm}^{-1}$ có thể là một dấu hiệu của phản ứng đã xảy ra giữa GO và nhựa đường 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.
- Tăng hàm lượng GO làm giảm độ kim lún và góc trễ pha δ , tăng điểm hóa mềm, độ nhớt và $G^*/\sin\delta$ so với nhựa 60/70. Điều này cho thấy GO cải thiện đặc tính lưu biến và độ cứng cho nhựa đường. Việc bổ sung GO sẽ làm tăng nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp BTN_GO so với BTN đối chứng từ $5 \div 8^{\circ}\text{C}$.
- Việc bổ sung GO làm tăng $G^*/\sin\delta$, do đó cải thiện hiệu suất làm việc ở nhiệt độ cao của nhựa đường. Trước khi chưa hóa già và sau hóa già RTFOT, cấp đặc tính khai thác của N_GO_2% và N_GO_3% tương đương với PG70, với các tỷ lệ GO còn lại tương đương với PG64. Ngoài ra, 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: Đề xuất phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp BTN_GO; Nghiên cứu xác định các tính chất 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; Thiết lập đường cong chủ và mô hình hóa đường cong chủ mô đun động của BTN_GO nhằm xác định mô đun động của vật liệu này ở nhiệt độ và tần số bất kỳ. Ngoài ra, các thí nghiệm tương tự cũng được thực hiện cho BTN đối chứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của GO và phục vụ cho phân tích kết cấu mặt đường sử dụng BTN_GO ở chương tiếp theo.

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

3.1.1. Lựa chọn phương pháp thiết kế thành phần bê tông nhựa sử dụng graphen oxit

Việc thiết kế thành phần BTN bản chất là lựa chọn được cấp phối thích hợp và hàm lượng chất kết dính tối ưu nhằm thỏa mãn các yếu tố về đặc tính thể tích và đặc tính cơ học theo yêu cầu của phương pháp thiết kế. Hiện nay trên thế giới có nhiều phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN, có thể kể đến phương pháp Marshall, phương pháp Superpave (Mỹ), phương pháp thiết kế theo cường độ chịu nén lớn nhất (Nga), và phương pháp Hveem. Nhìn chung, các phương pháp này giống nhau ở nguyên lý xác định đặc tính thể tích, chỉ khác nhau ở các chỉ tiêu cơ lý được thể hiện qua các phương pháp xác định.

Trong các phương pháp trên, phương pháp Marshall và Superpave là hai phương pháp đang được áp dụng phổ biến ở nhiều nước trên thế giới do có nhiều ưu điểm. Phương pháp Superpave mặc dù tiên tiến do thiết kế hỗn hợp ở nhiệt độ và tải trọng giao thông khác nhau nhưng chưa được sử dụng phổ biến tại Việt Nam bởi hạn chế về mặt thiết bị thí nghiệm. Phương pháp Marshall tuy chưa mô phỏng hết được quá trình lu lèn thực tế ngoài hiện trường, nhưng phương pháp này cho phép xác định hàm lượng nhựa tối ưu tương ứng với một cấp phối cốt liệu thiết kế trên cơ sở kiểm soát các chỉ tiêu thể tích và các tính chất cơ học của BTN nằm trong giới hạn quy định [10]. Hơn nữa, đây là

phương pháp phổ biến được sử dụng để thiết kế hỗn hợp BTN tại Việt Nam bởi tính đơn giản. Căn cứ vào tình hình thiết bị sẵn có tại phòng thí nghiệm LAS-XD72 của Trường Đại học Công nghệ GTVT, nghiên cứu lựa chọn phương pháp Marshall để thiết kế hỗn hợp BTN_GO và BTN đối chứng trong phạm vi của luận án.

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

Trong phạm vi luận án, tác giả tập trung nghiên cứu cho BTNC 12,5 theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT năm 2014 [2] (tương ứng BTNC 16 theo TCVN 13567:2022). Đây là loại BTN đang được sử dụng phổ biến làm lớp mặt trên trong KCAĐ mềm tại Việt Nam. Hỗn hợp BTNC 12,5 và BTN_GO (cũng là BTNC 12,5 nhưng có sử dụng thêm GO) được thiết kế thành phần theo phương pháp Marshall, có thành phần cấp phối tuân thủ theo Hướng dẫn ban hành kèm theo Quyết định số 858. Yêu cầu kỹ thuật đối với BTNC 12,5 tuân thủ theo tài liệu [2] cũng được áp dụng cho BTN_GO.

3.1.3. Lựa chọn và yêu cầu kỹ thuật của cốt liệu, bột khoáng

Trong nghiên cứu này, đá dăm và cát xay dùng để chế tạo ra hỗn hợp được lấy tại mỏ Sunway, huyện Quốc Oai, Hà Nội. Mỏ đá Sunway thuộc đá Bazan có chất lượng cao ở các tỉnh phía Bắc. Bột khoáng lấy từ mỏ đá Kiện Khê - Hà Nam. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu và bột khoáng được trình bày Bảng 3.1 cho thấy cốt liệu và bột khoáng sử dụng trong nghiên cứu đáp ứng các yêu cầu theo Quyết định 858/QĐ-BGTVT [2] và TCVN 8820:2011 [6].

Bảng 3.1. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu.

Cốt liệu	Tỷ trọng		Cường độ nén của đá gốc	Hàm lượng hạt to hơn 0,075 mm (%)	Hàm lượng chung bụi, bùn, sét (%)	Độ mài mòn LA (%)	Độ hút nước (%)
	Khối	Biểu kiến					
Đá dăm-D _{max} 19	2,914	2,952	134,7	9,3	0,15	9,5	0,442
Đá dăm -D _{max} 12,5	2,902	2,938	134,7	10,5	0,32	9,7	0,64
Cát nghiền-D _{max} 4,75	2,853	2,915	134,7	-	0,41	-	0,75
Bột khoáng	2,733	2,733	105,9	-	-	-	-

Một số hình ảnh thí nghiệm xác định tính chất cơ lý của vật liệu được hiển thị trong Hình 3.1



a. Xác định tỷ trọng cốt liệu b. Xác định hạt thoai dẹt c. Xác định độ hao mòn LA

Hình 3.1. Một số hình ảnh kiểm tra chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu.

3.1.4. Lựa chọn chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu

Theo kết quả nghiên cứu ở Chương 2, nhìn chung việc bổ sung GO vào nhựa đường làm cải thiện một số tính chất cơ lý của chất kết dính N_GO theo hướng có lợi như làm giảm độ kim lún, tăng điểm hóa mềm, tăng $G^*/\sin\delta$. Tăng hàm lượng GO sẽ làm tăng hiệu suất cải thiện nhựa đường, từ đó dự báo nâng cao một số chỉ tiêu cơ lý và đặc tính làm việc ở nhiệt độ cao của BTN. 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%. Các tỷ lệ này cũng được các nghiên cứu [33], [34] sử dụng trong các thử nghiệm BTN_GO. Một số chỉ tiêu cơ lý của các chất kết dính được tổng hợp lại trong Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của nhựa đường 60/70 và N_GO.

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Loại chất kết dính				Tiêu chuẩn thí nghiệm
			Nhựa đường 60/70	N_GO 1%	N_GO 1,5%	N_GO 2%	
1	Kim lún ở 25°C	dmm	63,4	56,0	54,6	53,1	TCVN 7495:2005
2	Điểm hóa mềm	°C	49,6	52,8	53,2	53,6	TCVN 7497:2005
3	Độ kéo dài ở 25°C	cm	140	121	115	108	TCVN 7496:2005
4	Độ nhớt ở 135°C (nhớt kế Brookfield)	Pa.s	0,351	0,453	0,461	0,473	TCVN 11196:2017

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Loại chất kết dính				Tiêu chuẩn thí nghiệm
			Nhựa đường 60/70	N_GO 1%	N_GO 1,5%	N_GO 2%	
5	Nhiệt độ bắt lửa	°C	310	295	291	287	TCVN 7498:2005
6	Độ dính bám với đá	cấp	3	3	4	4	TCVN 7504:2005
7	Khối lượng riêng	g/cm ³	1,032	1,032	1,032	1,032	TCVN 7501:2005
8	Tổn thất sau khi gia nhiệt 5h ở 163°C	%	0,250	0,241	0,235	0,231	ASTM D 1754

3.1.5. Lựa chọn nhiệt độ trộn và đầm nén hỗn hợp bê tông nhựa

Căn cứ vào các kết quả xác định nhiệt độ trộn và đầm nén cho hỗn hợp BTN sử dụng nhựa đường 60/70 và N_GO theo 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, đối với BTN_GO các giá trị này lần lượt là 155°C và 145°C.

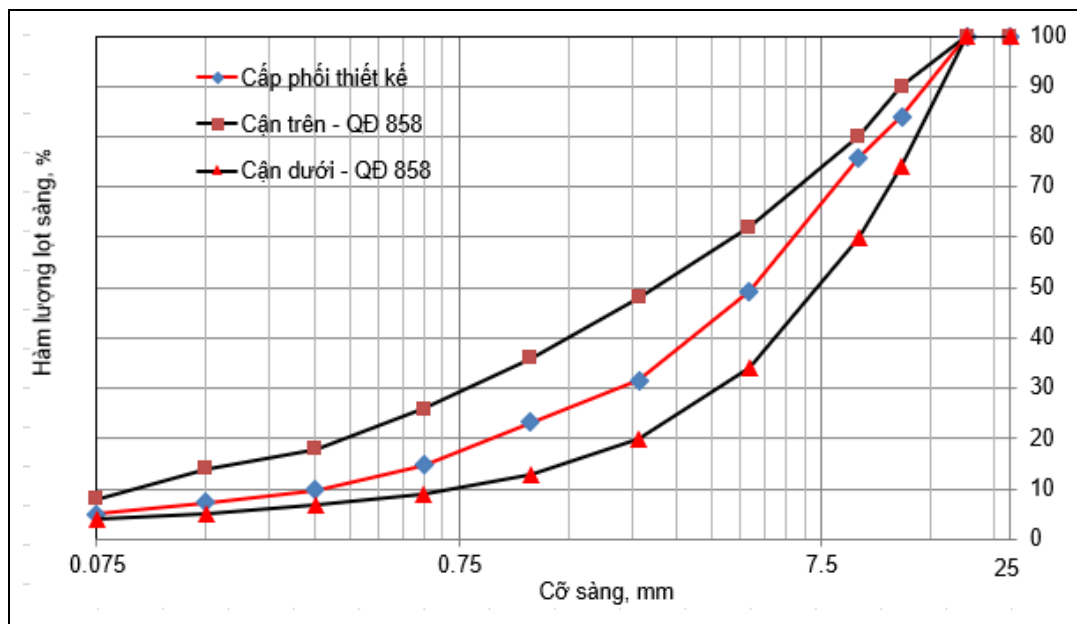
3.1.6. Thiết kế thành phần cấp phối bê tông nhựa sử dụng graphen oxit

Trong nghiên cứu này, 01 tỷ lệ phối trộn được sử dụng cho cả 04 chất kết dính là nhựa đường 60/70, N_GO_1%, N_GO_1,5% và N_GO_2% để tạo ra các hỗn hợp BTN được ký hiệu lần lượt là BTN_60/70, BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2%. Việc thiết kế thành phần cấp phối đảm bảo yêu cầu thành phần hạt về đường cong cấp phối với hàm lượng lọt sàng 2,36 mm nhỏ hơn 38%, và hàm lượng đá dăm (cốt liệu lớn hơn 4,75 mm) trên 50% được thực hiện theo Quyết định số 858/QĐ-BGTVT năm 2014. Trình tự tính toán theo hướng dẫn của TCVN 8820-2011. Kết quả tính toán thành phần cấp phối được thể hiện trong Bảng 3.3 và Hình 3.2.

Bảng 3.3. Phối trộn tỉ lệ thành phần cốt liệu.

Cỡ sàng	Đá dăm D _{max} 19		Đá dăm D _{max} 12,5		Cát nghiền D _{max} 4,75		Bột khoáng		Hàm lượng lọt sàng thiết kế	Hàm lượng lọt sàng theo QĐ 858:2014
	Hàm lượng lọt sàng		Hàm lượng lọt sàng		Hàm lượng lọt sàng		Hàm lượng lọt sàng			
	100%	22%	100%	30%	100%	42%	100%	6%		
(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
25	100,0	22,0	100,0	30,0	100,0	42,0	100,0	6,0	100,0	100 ÷ 100
19	100,0	22,0	100,0	30,0	100,0	42,0	100,0	6,0	100,0	100 ÷ 100
12,5	27,3	6,0	100,0	30,0	100,0	42,0	100,0	6,0	84,0	74 ÷ 90
9,5	1,8	0,4	91,3	27,4	100,0	42,0	100,0	6,0	75,8	60 ÷ 80
4,75	0,4	0,1	8,9	2,7	96,3	40,5	100,0	6,0	49,2	34 ÷ 62
2,36	0,0	0,0	1,7	0,5	59,8	25,1	100,0	6,0	31,6	20 ÷ 48

Cỡ sàng	Đá dăm D _{max} 19		Đá dăm D _{max} 12,5		Cát nghiền D _{max} 4,75		Bột khoáng		Hàm lượng lọt sàng thiết kế	Hàm lượng lọt sàng theo QĐ 858:2014
	Hàm lượng lọt sàng		Hàm lượng lọt sàng		Hàm lượng lọt sàng		Hàm lượng lọt sàng			
	100%	22%	100%	30%	100%	42%	100%	6%		
1,18	0,0	0,0	0,0	0,0	41,3	17,3	100,0	6,0	23,3	13 ÷ 36
0,600	0,0	0,0	0,0	0,0	20,8	8,7	100,0	6,0	14,7	9 ÷ 26
0,300	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6	4,0	95,3	5,7	9,7	7 ÷ 18
0,150	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	1,7	93,3	5,6	7,3	5 ÷ 14
0,075	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	82,6	5,0	5,0	4 ÷ 8
Tỷ lệ	22%		30%		42%		6%		100%	



Hình 3.2. Đường cong cấp phối của hỗn hợp BTN_60/70 và BTN_GO.

3.1.7. Lựa chọn hàm lượng chất kết dính tối ưu

Hàm lượng GO sử dụng trong nghiên cứu là rất nhỏ, chiếm 1%, 1,5% và 2% khối lượng nhựa đường. Trong các nghiên cứu [33], [34], [55], [82], hàm lượng chất kết dính tối ưu các loại BTN_GO không sai khác nhiều so với mẫu đối chứng và đều nằm trong khoảng hàm lượng nhựa tối ưu của mẫu BTN đối chứng. Kế thừa các nghiên cứu cũng như để giảm bớt khối lượng thí nghiệm, nghiên cứu này chỉ xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu của BTN_60/70 (tương ứng với hàm lượng GO nhỏ nhất) và BTN_GO_2% (tương ứng với hàm lượng GO lớn nhất). Nếu hai loại BTN này có chung khoảng hàm lượng nhựa tối ưu thì hàm lượng tối ưu của 4 loại BTN sẽ được chọn trùng nhau.

3.1.7.1. Kế hoạch thí nghiệm

Để xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu cho mỗi loại BTN, cần chế tạo 5 tổ mẫu với 5 giá trị hàm lượng nhựa cách nhau 0,5%. Số lượng mẫu thí nghiệm được lựa chọn theo hướng dẫn của TCVN 8820:2011 [6] và trình bày chi tiết ở Bảng 3.4. Độ chụm của các kết quả thí nghiệm được đánh giá theo yêu cầu về độ biến động theo ASTM D6927 và hệ số ứng với số mẫu quy định theo tiêu chuẩn ASTM C670.

Bảng 3.4. Kế hoạch thí nghiệm xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu các loại BTN.

STT	Hàm lượng nhựa (%)	Số lượng mẫu thí nghiệm			
		BTN 60/70	BTN_GO 1%	BTN_GO 1,5%	BTN_GO 2%
1	3,5	3	-	-	3
2	4,0	3	-	-	3
3	4,5	3	-	-	3
4	5,0	3	-	-	3
5	5,5	3	-	-	3
Tổng số mẫu		15	-	-	15

3.1.7.2. Chế bị mẫu

Công tác chế bị mẫu BTN_60/70 được tiến hành theo các bước sau:

- Xác định các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu (mục 3.1.3);
- Xác định các chỉ tiêu cơ lý của nhựa đường 60/70 (mục 3.1.4);
- Phối trộn các cốt liệu theo cấp phối thiết kế (3.1.6);
- Chuẩn bị cốt liệu từng loại và bột khoáng để đúc mẫu, khối lượng mỗi mẫu khoảng 1200g. Cốt liệu và bột khoáng được đưa vào tủ sấy và gia nhiệt đến nhiệt độ cao hơn nhiệt độ trộn khoảng 15°C trong ít nhất 2 giờ;
- Nhựa đường 60/70 được gia nhiệt đến 145°C;
- Trộn cốt liệu với nhựa đường 60/70 trong thời gian khoảng 2-3 phút;
- Đàm mẫu Marshall;
- Tiến hành thí nghiệm và tính toán các đặc tính thể tích của các mẫu BTN;
- Thí nghiệm độ ổn định và độ dẻo của BTN theo hướng dẫn tại TCVN 8860-1:2011;
- Vẽ đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa các đặc tính thể tích, độ ổn định, độ dẻo Marshall với các hàm lượng chất kết dính. Căn cứ vào các yêu cầu kỹ thuật của

BTN_60/70 được quy định tại quyết định số 858/QĐ-BGTVT, xác định khoảng hàm lượng chất kết dính tối ưu cho từng chỉ tiêu, từ đó xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu cho BTN_60/70.

Đối với BTN_GO_2%, công tác chế bị mẫu hoàn toàn tương tự như BTN_60/70, chỉ khác ở khâu chế tạo chất kết dính (mục 2.1.4), nhiệt độ trộn, và nhiệt độ đầm mẫu.

Một số hình ảnh trong quá trình thử nghiệm Marshall xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu được thể hiện trong Hình 3.3.



a. Đầm mẫu

b. Ngâm mẫu 40 phút ở 60°C

c. Nén mẫu Marshall

Hình 3.3. Một số hình ảnh thí nghiệm Marshall.

3.1.7.3. Kết quả xác định hàm lượng chất kết dính tối ưu

Kết quả thí nghiệm xác định các đặc trưng thể tích, độ ổn định, độ dẻo, hàm lượng nhựa tối ưu cho BTN_60/70 và BTN_GO_2% được trình bày chi tiết ở Phụ lục 3 và được tổng hợp tại Bảng 3.5.

Bảng 3.5. Khoảng hàm lượng nhựa tối ưu của các loại BTN.

TT	Loại chất kết dính	Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính tối ưu (% theo khối lượng hỗn hợp)
1	Nhựa đường 60/70	BTN_60/70	4,30 ÷ 4,70
2	N_GO_2%	BTN_GO_2%	4,35 ÷ 4,80

Căn cứ vào kết quả thí nghiệm theo Bảng 3.5, hàm lượng chất kết dính tối ưu cho hỗn hợp BTN_60/70 và BTN_GO_2% 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. Đây cũng là hàm lượng nhựa tối ưu sử dụng cho hỗn hợp BTN_GO_1% và BTN_GO_1,5%.

3.2. Lựa chọn các chỉ tiêu trong nghiên cứu

Trong phạm vi của luận án, nghiên cứu lựa chọn một số chỉ tiêu điển hình để đánh giá ảnh hưởng của GO đến khả năng làm việc của BTN với 4 hàm lượng GO khác nhau và hàm lượng chất kết dính tối ưu đã được xác định ở phần trên. Các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm được tiến hành theo các yêu cầu kỹ thuật tương ứng:

(1) Các chỉ tiêu cơ lý đánh giá BTN theo yêu cầu của QĐ 858 [2] bao gồm:

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

(2) Để xác định các số liệu đầu vào của BTN_GO phục vụ cho bài toán thiết kế KCAD mềm theo TCCS 38:2022/TCĐBVN [4] và phương pháp cơ học – thực nghiệm, các chỉ tiêu cơ lý sau cũng được nghiên cứu:

- Mô đun đàn hồi tĩnh của BTN_GO ở 3 nhiệt độ: 15°C, 30°C và 60°C;
- Cường độ kéo khi ép chẻ của BTN_GO ở 15°C (gián tiếp xác định cường độ kéo uốn thông qua công thức);
- Mô đun động của BTN_GO ở 4 nhiệt độ: 4°C, 21°C, 37°C, 54°C; và ở 6 tần số: 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz.

(3) Nghiên cứu khả năng kháng nứt thông qua chỉ số kháng nứt CT_{index} của BTN_GO và BTN đối chứng theo tiêu chuẩn ASTM D8225-19.

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

Độ ổn định và độ dẻo Marshall là 2 chỉ tiêu cơ lý chính được sử dụng trong thiết kế Marshall. Hai thông số này thể hiện khả năng chịu lực của BTN ở nhiệt độ cao dưới tác dụng của tải trọng.

Độ ổn định còn lại của BTN là chỉ tiêu được sử dụng trong thiết kế, kiểm soát chất lượng và đánh giá ảnh hưởng của nước đối với BTN.

3.3.1. Kế hoạch thí nghiệm

Với hàm lượng chất kết dính tối ưu 4,6% cho cấp phối thiết kế, các mẫu Marshall của BTN_{60/70} và BTN_GO được chế bị trong phòng thí nghiệm LAS-XD72 thuộc

Trường Đại học Công nghệ GTVT. Thí nghiệm nén Marshall được thực hiện trên thiết bị Marshall tự động Daiwa cho phép tự động thu thập lực nén và biến dạng trong quá trình thí nghiệm. Từ đó xây dựng đồ thị lực nén-biến dạng, làm cơ sở xác định độ ổn định và độ dẻo Marshall theo TCVN 8860-1:2011 [7] (hoặc theo ASTM D6927).

Độ ổn định còn lại (RS) là chỉ tiêu đánh giá ảnh hưởng của nước đối với độ ổn định Marshall của BTN, được xác định theo TCVN 8860-12:2011 [8].

Để xác định được RS, các mẫu Marshall được chia thành hai nhóm và đặt trong bể ổn nhiệt ở 60°C trong 40 phút và 24 giờ. Sau đó, các mẫu được nén trên thiết bị Marshall. Số lượng thí nghiệm Marshall được trình bày trong Bảng 3.6.

Bảng 3.6. Số lượng mẫu thí nghiệm Marshall của BTN_GO.

STT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Loại BTN				Tổng số mẫu
		BTN 60/70	BTN_GO 1%	BTN_GO 1,5%	BTN_GO 2%	
1	Các chỉ tiêu thể tích	6	6	6	6	24
2	Độ ổn định và độ dẻo Marshall					
3	Độ ổn định còn lại	3	3	3	3	12

3.3.2. Kết quả nghiên cứu

3.3.2.1. Đặc tính thể tích

Kết quả thí nghiệm xác định các đặc tính thể tích của BTN_60/70 và BTN_GO được tổng hợp trong Bảng 3.7.

Bảng 3.7. Kết quả thí nghiệm các đặc tính thể tích BTN_60/70 và BTN_GO.

Loại BTN	Giá trị trung bình các đặc trưng thể tích		
	Độ rỗng dư V_a (%)	Độ rỗng cốt liệu VMA (%)	Độ rỗng lấp đầy nhựa VFA (%)
BTN_60/70	4,56	14,32	68,43
BTN_GO_1%	4,54	15,04	69,81
BTN_GO_1,5%	4,53	15,83	71,38
BTN_GO_2%	4,50	16,01	71,89
Giới hạn cho phép theo QĐ 858	4,0 ÷ 6,0	≥ 13,5	65 ÷ 75

Kết quả thí nghiệm cho thấy, các giá trị đặc tính thể tích của BTN_60/70 và BTN_GO với hàm lượng chất kết dính 4,6% đều nằm trong giới hạn cho phép theo quy định của

quyết định số 858/QĐ-BGTVT. Ngoài ra, kết quả thí nghiệm đã chứng minh rằng hàm lượng GO ảnh hưởng đến các đặc tính thể tích của BTN. Các giá trị độ rỗng dư giảm dần, trong khi độ rỗng cốt liệu và độ rỗng lấp đầy nhựa đều tăng dần khi hàm lượng GO tăng. Điều này cho thấy việc sử dụng GO trong BTN góp phần nâng cao độ bền và tăng cường độ cho mặt đường.

3.3.2.2. Độ ổn định và độ dẻo Marshall

Kết quả thí nghiệm độ ổn định, độ dẻo Marshall các loại BTN được thể hiện trong Phụ lục 3. Việc đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM D6927-15 và ASTM C670. Phân tích độ chụm cho thấy, kết quả thí nghiệm độ ổn định và độ dẻo Marshall đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá.

Thiết kế thực nghiệm và phân tích kết quả thí nghiệm độ ổn định và độ dẻo Marshall được trình bày trong Phụ lục 3.

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 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. Kết quả nghiên cứu này cũng phù hợp khi nghiên cứu cho BTNC 9,5 [33] và BTNC 13,2 [82].

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:

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

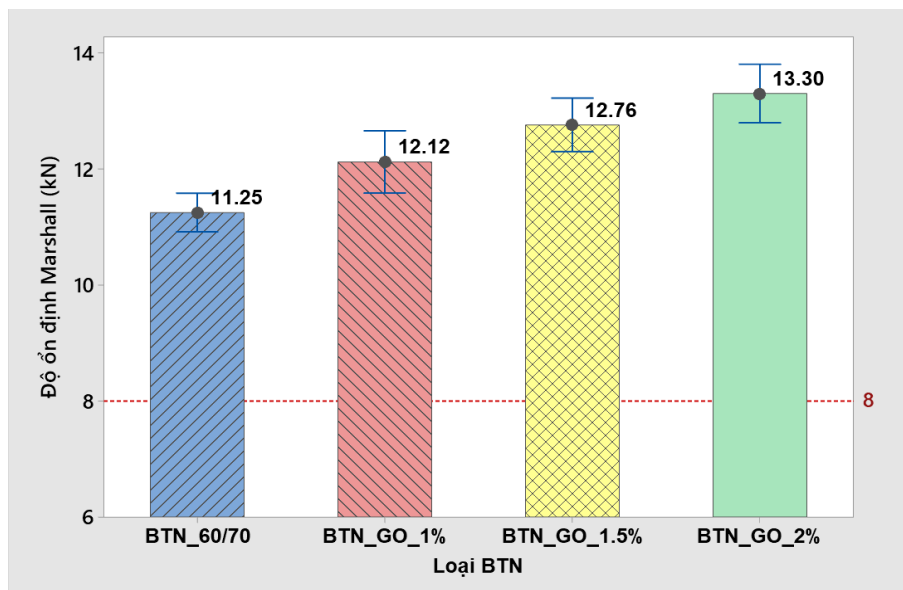
Hệ số

Tham số	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Hằng số	11,200	0,159	70,42	0,000	
GO	1,030	0,118	8,72	0,000	1,00

Kết quả

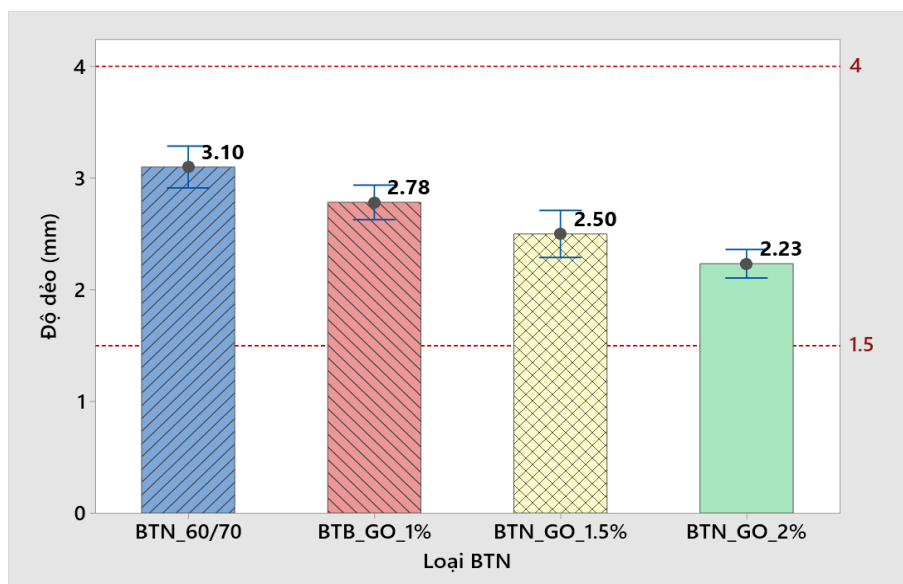
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,428016	77,55%	76,53%	73,71%

Phương trình hồi quy (3.1) có hệ số xác định điều chỉnh $R_{dc}^2 = 76,53\%$, hệ số $p \ll 0,05$ nên đảm bảo độ tin cậy.



Hình 3.4. Đồ thị khoảng giá trị độ ổn định Marshall của BTN_GO.

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. Đồ thị khoảng giá trị độ dẻo Marshall của BTN_GO.

3.3.2.3. Độ ổn định còn lại

Quá trình thí nghiệm độ ổn định còn lại của BTN sau khi ngâm mẫu trong nước ở 60°C trong 24h được hiển thị ở Hình 3.6. Kết quả thí nghiệm và đánh giá độ chụm độ ổn

định Marshall sau khi ngâm nước 24h ở 60°C và độ ổn định còn lại được của BTN_60/70 và BTN_GO được trình bày chi tiết trong Phụ lục 3 và được tổng hợp ở Bảng 3.8.



a. Ngâm mẫu ở 60°C trong 24h

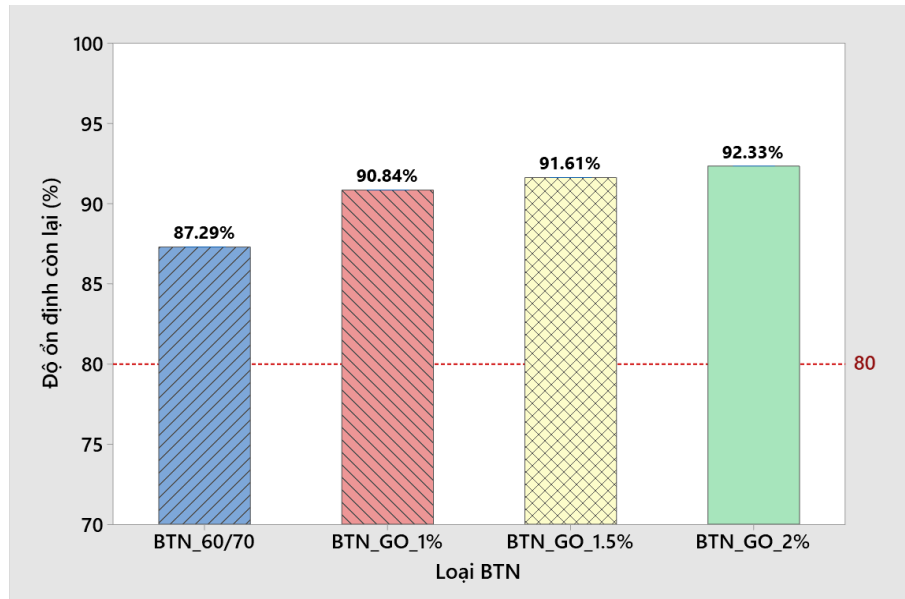
b. Mẫu sau khi nén Marshall

Hình 3.6. Thí nghiệm độ ổn định còn lại BTN_GO.

Bảng 3.8. Độ ổn định còn lại của BTN_60/70 và BTN_GO

STT	Loại BTN	Độ ổn định ngâm nước 40 phút (MS), kN	Độ ổn định ngâm nước 24h (MS _a), kN	Độ ổn định còn lại (RS),%
1	BTN_60/70	11,25	9,82	87,29
2	BTN_GO_1%	12,12	11,01	90,84
3	BTN_GO_1,5%	12,76	11,69	91,61
4	BTN_GO_2%	13,30	12,28	92,33

Thử nghiệm ngâm nước sau 24h cho thấy độ ổn định giảm so với độ ổn định trong điều kiện ngâm nước 40 phút ở tất cả các tỷ lệ GO. 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 so với 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 [74], từ đó tăng cường độ ổn định nước của BTN_GO.



Hình 3.7. Độ ổn định còn lại của BTN_60/70 và BTN_GO.

Như vậy, với hàm lượng chất kết dính 4,6%, BTN_60/70, BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2% đều thỏa mãn các yếu tố về đặc tính thể tích và đặc tính cơ học theo quyết định 858/QĐ-BGTVT.

3.4. Khả năng kháng lún vệt bánh xe

3.4.1. Phương pháp và kế hoạch thí nghiệm

Lún vệt bánh xe (LVBX) là một chỉ tiêu quan trọng đánh giá khả năng chịu nhiệt độ cao của hỗn hợp BTN. Để xác định được chỉ tiêu này, người ta sử dụng thử nghiệm chiều sâu LVBX trong phòng thí nghiệm.

Ở Việt Nam, quy định kỹ thuật về phương pháp LVBX của BTN xác định bằng thiết bị Wheel Tracking ban hành kèm theo quyết định 1617/QĐ-BGTVT ngày 29/4/2014 [3], bao gồm 3 phương pháp A, B và C. Thử nghiệm LVBX được thực hiện trong quá trình thiết kế hỗn hợp BTN theo TCVN 8820:2011 trong giai đoạn thiết kế hoàn thiện.

Trong nghiên cứu này, việc đánh giá LVBX được thực hiện theo phương pháp A. Kết quả thu được là chiều sâu LVBX trong môi trường nước và điểm bong màng nhựa (nếu có). Mẫu thí nghiệm có dạng tấm hình chữ nhật được chế bị bằng cách sử dụng đầm lún theo phụ lục C của tài liệu [3], với độ rỗng dư $V_a = 7 \pm 1\%$, tổng số lần chạy là 15.000 lần. Thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm LAS-XD72 thuộc Trường đại học Công nghệ GTVT trên thiết bị Hamburg Wheel Tracker (Hình 3.8).



a. Cân khối lượng hỗn hợp cho 1 mẫu đầm



b. Đầm mẫu bằng đầm lăn



c. Mẫu BTN_GO trước khi chạy LVBX



d. Quá trình thử nghiệm LVBX

Hình 3.8. Một số hình ảnh thí nghiệm xác định LVBX.

Kế hoạch thí nghiệm xác định LVBX các mẫu BTN_GO thể hiện chi tiết ở Bảng 3.9.

Bảng 3.9. Số lượng mẫu thí nghiệm LVBX cho các loại BTN.

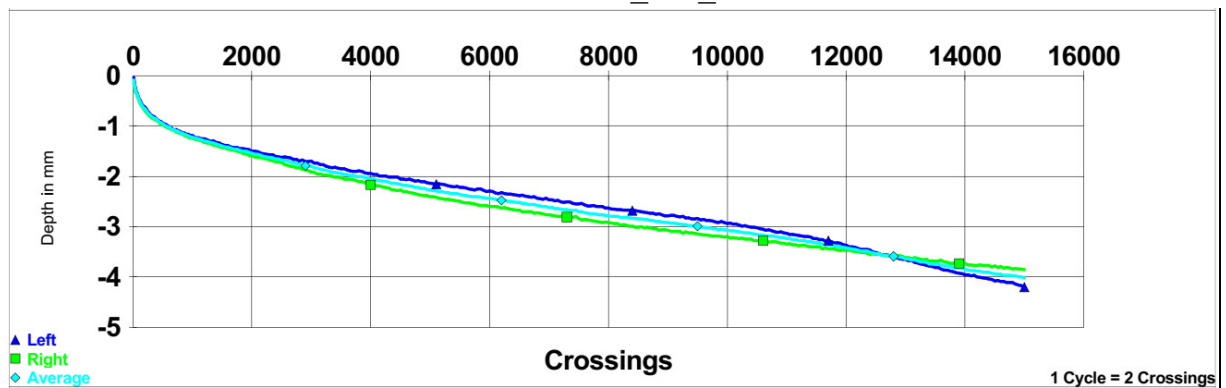
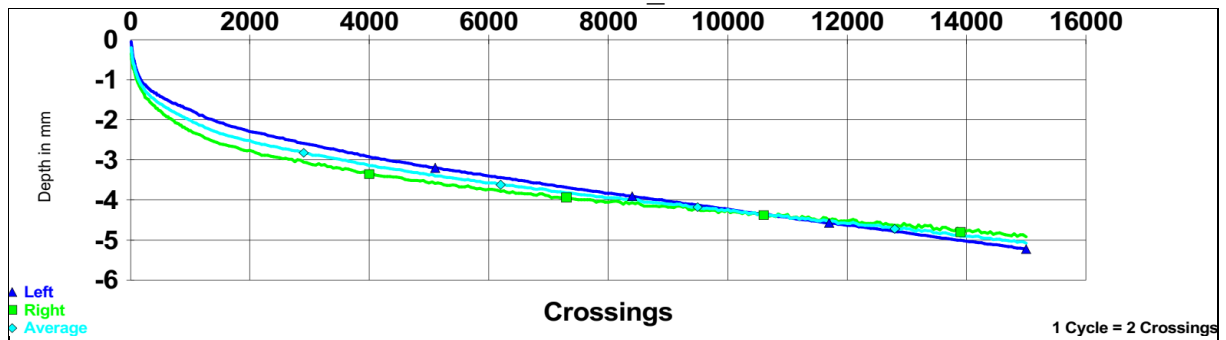
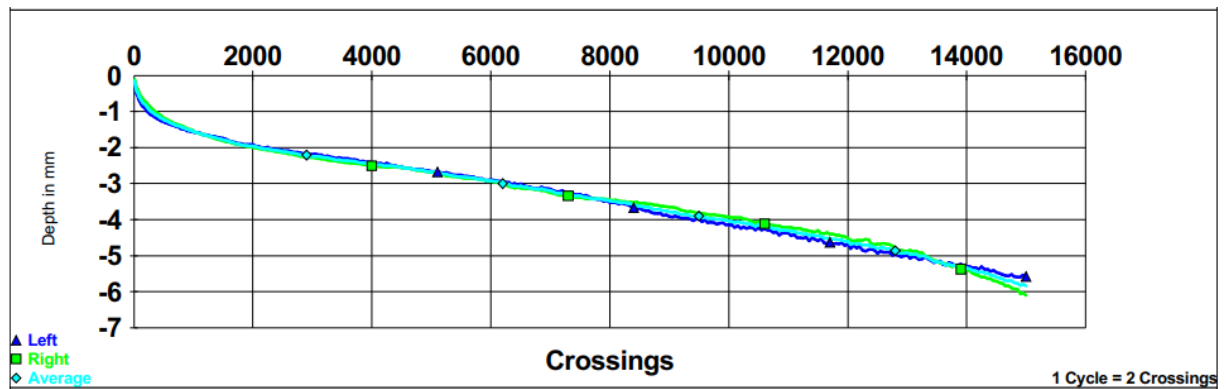
STT	Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính (%)	Số lượng mẫu
1	BTN_60/70	4,6	2
2	BTN_GO_1%	4,6	2
3	BTN_GO_1,5%	4,6	2
4	BTNC_GO_2%	4,6	2
	Tổng số	-	8

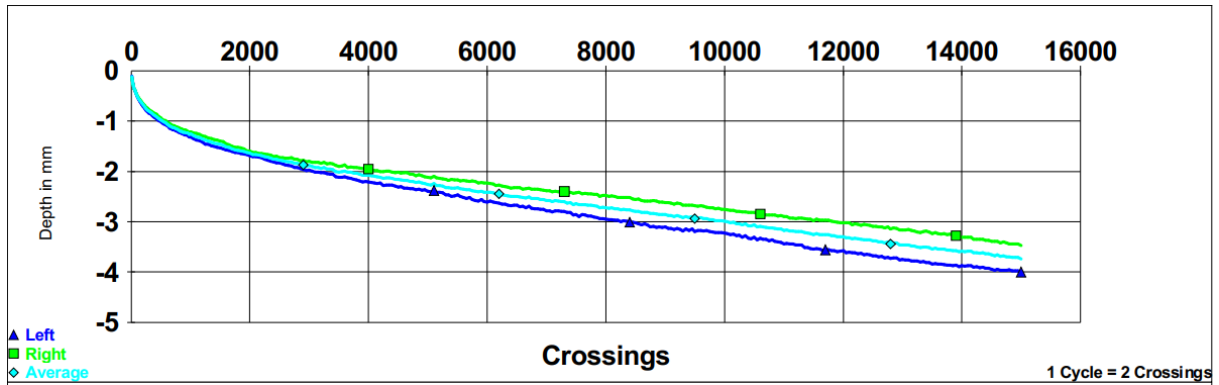
3.4.2. Kết quả nghiên cứu

Do tiêu chuẩn thí nghiệm xác định chiều sâu LVBX chưa đề cập đến độ chụm nên khó đánh giá mức độ phân tán của các kết quả thí nghiệm. Với 2 mẫu/tổ, phần này sử dụng giá trị giới hạn $d_{2s} = 30\%$ cho mẫu đúc theo nghiên cứu [23] để đánh giá độ chụm của kết quả thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm chiều sâu LVBX của BTN_60/70 và BTN_GO được thể hiện chi tiết ở Bảng 3.10, Hình 3.9 và Hình 3.10.

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 vệt 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
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





d. Mẫu BTN_GO_2%.

Hình 3.9. Biểu đồ quan hệ chiều sâu LVBX và số lần chạy của các mẫu BTN.



Hình 3.10. Mẫu BTN_60/70 và BTN_GO sau khi chạy LVBX.

Kết quả thử nghiệm cho thấy, sau 15.000 lượt chạy trong môi trường nước ở 50°C, chiều sâu LVBX của 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. Kết luận này cũng phù hợp với nghiên cứu [33], [55], [82] trong thử nghiệm LVBX ở môi trường không khí.

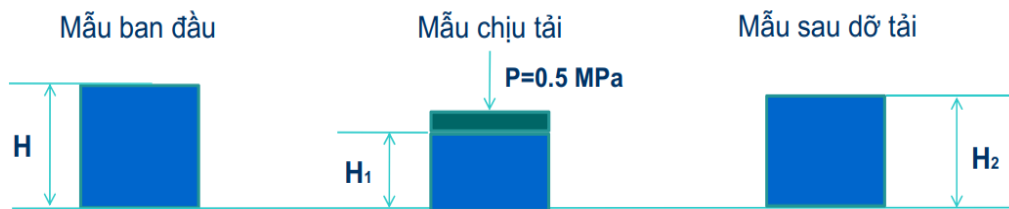
3.5. Mô đun đàn hồi tĩnh

Mô đun đàn hồi tĩnh (E) là một trong các chỉ tiêu cơ lý quan trọng sử dụng trong thiết kế kết cấu áo đường mềm theo tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN [4].

3.5.1. Phương pháp thí nghiệm

Tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN quy định cụ thể quy trình thử nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh của BTN. Mô đun đàn hồi tĩnh được thí nghiệm theo mô hình thí nghiệm nén từ biến tĩnh. Mẫu BTN được chế bị bằng đầm xoay dạng hình trụ có đường kính (D) và chiều cao (H) bằng 100 mm, 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 Cooper có buồng ổn nhiệt để duy trì nhiệt độ thí nghiệm. Mẫu được nén dọc trục nở hông tự do, gia tải bằng tải trọng tĩnh. Gia tải cho mẫu và theo dõi biến dạng phát triển theo thời gian đến khi ổn định, ghi nhận biến dạng của mẫu là H_1 . Dỡ tải, mẫu phục hồi biến dạng, quá trình phục hồi xảy ra theo thời gian cho đến khi ổn định, ghi nhận biến dạng mẫu sau dỡ tải là H_2 (Hình 3.11).

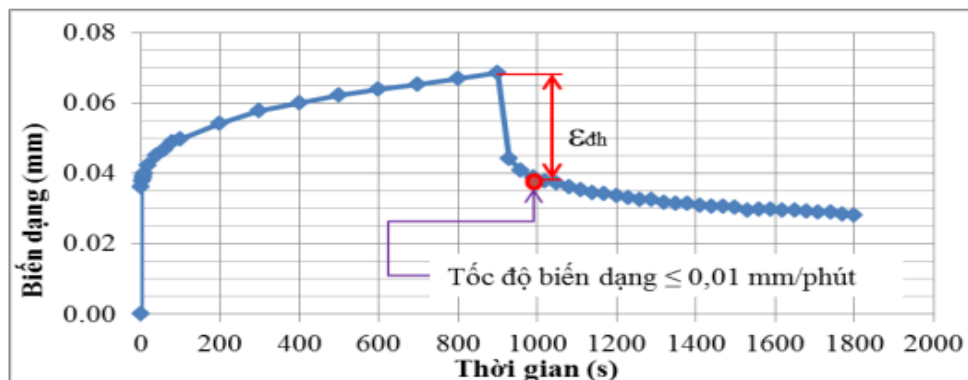


Hình 3.11. Mô phỏng mẫu thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh.

Toàn bộ quá trình ghi nhận biến dạng theo thời gian khi gia tải và dỡ tải được thực hiện bằng phần mềm chuyên dụng. Trên cơ sở đó, mối tương quan giữa biến dạng và thời gian được xây dựng như đồ thị Hình 3.12 nhằm xác định thời điểm biến dạng tương ứng với tốc độ tăng hoặc giảm biến dạng nhỏ hơn 0,01 mm/phút.

Biến dạng đàn hồi tương đối được xác định theo công thức (3.2):

$$\varepsilon_{dh} = \frac{H_2 - H_1}{H} \quad (3.2)$$



Hình 3.12. Biến dạng đàn hồi của mẫu BTN theo thời gian gia tải và dỡ tải.

Mô đun đàn hồi tĩnh của BTN theo [4] được tính theo công thức (3.3):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Với σ là ứng suất nén thí nghiệm, $\sigma = 0,5 \text{ MPa}$.

3.5.2. Kế hoạch thí nghiệm

Thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh của BTN_GO được thực hiện ở 3 nhiệt độ là 15°C, 30°C và 60°C, tương ứng với 3 điều kiện kiểm toán KCAĐ theo tiêu chuẩn [4]. Số lượng mẫu trong các thí nghiệm này được trình bày ở Bảng 3.11.

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

Loại BTN	Hàm lượng chất kết dính, %	Số lượng mẫu thí nghiệm			Số thí nghiệm
		15°C	30°C	60°C	
BTN_60/70	4,6	6	6	6	18
BTN_GO_1%	4,6	6	6	6	18
BTN_GO_1,5%	4,6	6	6	6	18
BTN_GO_2%	4,6	6	6	6	18
Tổng số thí nghiệm					72

Công tác chuẩn bị mẫu và quá trình thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh được thể hiện trong Hình 3.13.



a. Đầm mẫu bằng đầm xoay

b. Mẫu thí nghiệm

c. Quá trình TN E tĩnh

Hình 3.13. Một số hình ảnh thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi tĩnh.

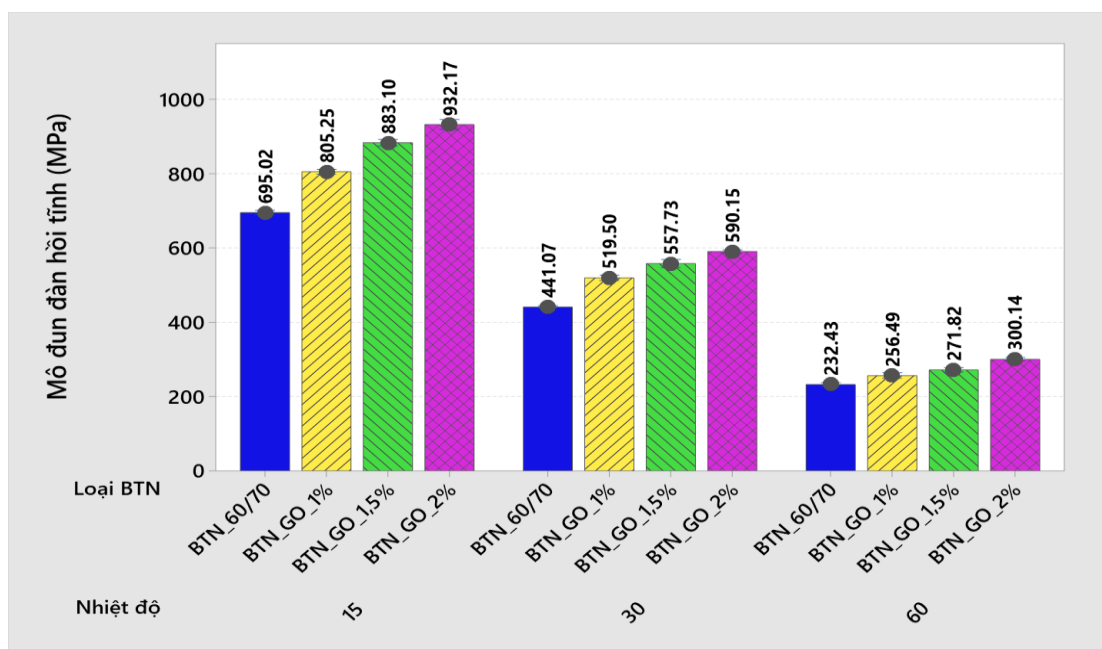
3.5.3. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tĩnh của BTN_60/70 và BTN_GO ở 3 nhiệt độ thử nghiệm được kiểm tra độ chụm, vận dụng tiêu chuẩn đánh giá độ chụm cho thử nghiệm

độ ổn định Marshall ASTM D6927-05 và ASTM C670-10 (do tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN không quy định độ chụm). Phân tích độ chụm được thể hiện chi tiết ở Phụ lục 5 và đảm bảo theo tiêu chuẩn đánh giá.

Sử dụng phần mềm Minitab 19 để thiết kế thực nghiệm DOE theo GFF, phân tích phương sai ANOVA với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$, phân tích hậu định theo phương pháp Tukey. Phân tích thống kê với 2 biến số đầu vào là loại BTN: có 4 loại bao gồm BTN_60/70, BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2%; nhiệt độ thí nghiệm gồm 3 nhiệt độ là 15°C, 30°C và 60°C; 6 mẫu/tổ. Hàm phân tích đầu ra là mô đun đàn hồi tĩnh. Quá trình thiết kế thí nghiệm và phân tích kết quả được trình bày ở Phụ lục 5.

Giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của các loại BTN ở các nhiệt độ thử nghiệm khác nhau được thể hiện trong Hình 3.14. Như vậy, 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. Kết quả này hoàn toàn tương đồng với nghiên cứu [33] khi thử nghiệm ở nhiệt độ 25°C và 40°C.



Hình 3.14. E tĩnh ở các nhiệt độ khác nhau của các loại BTN (độ tin cậy 95%).

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:

$$E_{tinh} = 836,9 + 106,86xGO - 210,48xT - 28,54xGOxT \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

Hệ số

Tham số	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Hằng số	836,9	12,7	65,97	0,000	
GO	106,86	4,63	23,07	0,000	7,00
T	-210,48	5,87	-35,84	0,000	6,00
GO*T	-28,54	2,14	-13,31	0,000	12,00

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
16,6112	99,54%	99,52%	99,50%

Phương trình hồi quy (3.4) với hệ số xác định điều chỉnh $R_{đc}^2 = 99,52\%$, hệ số $p \ll 0,05$ nên đảm bảo độ tin cậy.

3.5.4. Mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng

Từ mô đun đàn hồi tĩnh, nghiên cứu đã xác định mô đun đàn hồi đặc trưng ($E_{đt}$) của BTN_GO theo công thức (3.5) với độ tin cậy $R = 95\%$ và được tổng hợp theo Bảng 3.12.

$$E_{đt} = E_{tb} - k.S \quad (3.5)$$

Trong đó: E_{tb} – Mô đun đàn hồi tĩnh trung bình;

S – Độ lệch chuẩn;

k – Hệ số xác định theo độ tin cậy, với $R = 95\%$ thì $k = 1,645$.

Bảng 3.12. Mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng của BTN_GO.

Loại BTN	Nhiệt độ 15°C			Nhiệt độ 30°C			Nhiệt độ 60°C		
	E_{tb}	S	$E_{đt}$	E_{tb}	S	$E_{đt}$	E_{tb}	S	$E_{đt}$
BTN_60/70	695,02	5,7	685,63	441,07	2,7	436,57	232,43	4,6	224,79
BTN_GO_1%	805,25	6,1	795,16	519,50	6,7	508,44	256,49	7,0	244,96
BTN_GO_1,5%	883,10	8,3	869,39	557,73	10,3	540,77	271,82	5,7	262,50
BTN_GO_2%	932,17	12,8	911,10	590,15	4,0	583,64	300,14	4,8	292,29

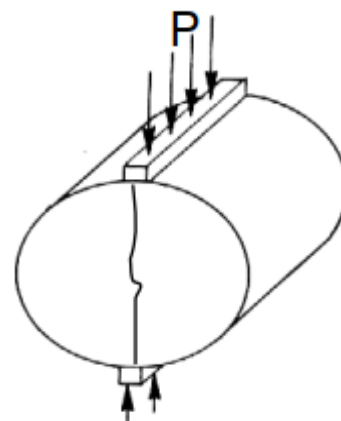
Kết quả trong bảng Bảng 3.12 cho thấy, mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng của các loại BTN_GO đều cao hơn BTN_60/70 ở cả ba nhiệt độ thử nghiệm. Ở nhiệt độ 15°C, 30°C, và 60°C, BTN_GO_2% có mô đun đàn hồi tĩnh đặc trưng cao nhất, tăng 32,88%; 33,68%

và 30,03% so với BTN_60/70, trong khi đó BTN_GO_1% tăng 16%, 15,46% và 8,97% so với BTN_60/70 và đạt giá trị thấp nhất trong ba loại BTN_GO.

3.6. Cường độ kéo khi ép chẻ

3.6.1. Thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ

Cường độ kéo khi ép chẻ (còn gọi là cường độ kéo gián tiếp) là một thông số quan trọng phản ánh khả năng chịu lực của BTN. Thông qua đại lượng này có thể xác định gần đúng cường độ kéo uốn (theo công thức), đây là thông số được sử dụng phục vụ cho thiết kế kết cấu áo đường theo TCCS 38:2022/TCĐBVN [4]. Thử nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ được tiến hành theo TCVN 8862:2011 trên mẫu BTN hình trụ tròn đường kính d và chiều cao h (Hình 3.15).



Hình 3.15. Mô hình thí nghiệm ép chẻ theo TCVN 8862:2011.

Trong nghiên cứu này, các mẫu sau khi được chế bị và bảo quản sẽ được ngâm trong nước ở 15°C trong 2 giờ trước khi làm thí nghiệm. Thí nghiệm được tiến hành trên máy nén Marshall. Lực nén tác dụng lên mẫu với tốc độ 50,8 mm/phút theo phương đường sinh cho đến khi mẫu bị phá hoại. Giá trị độ lớn của lực (P) tại thời điểm mẫu bị phá hoại được sử dụng để tính toán cường độ kéo khi ép chẻ. Tải trọng lớn nhất gây phá hủy từng mẫu thử đều được ghi lại (Hình 3.16). Thời gian thực hiện thí nghiệm từ khi lấy mẫu ra khỏi bể nước ổn nhiệt đến khi nén xong mẫu không quá 2 phút. Thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm LAS-XD72 thuộc Trường Đại học Công nghệ GTVT.



a. Bảo dưỡng mẫu thí nghiệm



b. Thí nghiệm trên máy Marshall

Hình 3.16. Thí nghiệm kéo khi ép chẻ các mẫu BTN_GO.

Cường độ kéo khi ép chẻ của BTN được xác định theo công thức (3.6):

$$R_{ke} = \frac{2P}{\Pi.H.D} \quad (3.6)$$

Trong đó:

R_{ke} – Cường độ kéo khi ép chẻ, MPa;

P – Tải trọng phá hủy mẫu hình trụ, N;

H – Chiều cao mẫu hình trụ, mm;

D – Đường kính mẫu hình trụ, mm;

$\Pi = 3,1416$.

Cường độ kéo uốn được xác định gần đúng theo công thức (3.7):

$$R_{ku} = K_n \cdot R_{ke} \quad (3.7)$$

Trong đó, K_n là hệ số tương quan thực nghiệm giữa hai loại cường độ, $K_n = 2$ với vật liệu có liên kết hữu cơ [4].

3.6.2. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ

Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ được thể hiện ở Bảng 3.13:

Bảng 3.13. Kế hoạch thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ BTN_GO.

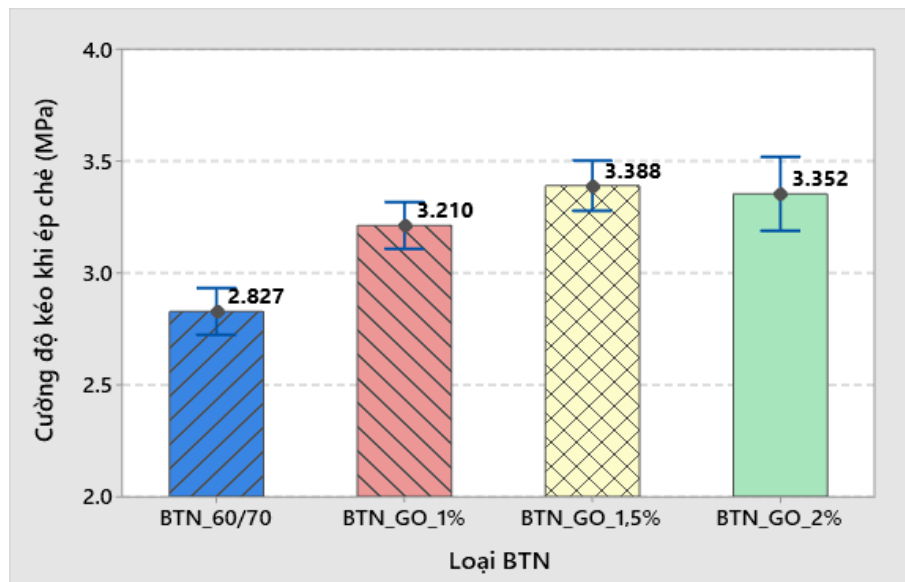
Loại BTN	Hàm lượng nhựa (%)	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Số lượng mẫu thí nghiệm
BTN_60/70	4,6	15	6
BTN_GO_1%	4,6	15	6
BTN_GO_1,5%	4,6	15	6
BTN_GO_2%	4,6	15	6
Tổng số mẫu thí nghiệm			24

3.6.3. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ và cường độ kéo uốn theo công thức (3.7) của BTN_GO được thể hiện chi tiết ở Phụ lục 6 và đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá.

Thiết kế thực nghiệm và phân tích kết quả thí nghiệm được trình bày trong Phụ lục 6.

Kết quả xác định cường độ kéo khi ép chẻ (Hình 3.17) cho thấy, GO cải thiện cường độ kéo khi ép chẻ 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 chẻ tốt nhất so với các tỷ lệ GO khác. Kết quả này cũng được tìm thấy trong nghiên cứu [34], [55], cụ thể các thử nghiệm ở nhiệt độ thấp bao gồm cường độ kéo, cường độ kháng uốn, biến dạng uốn của BTN khi được bổ sung thêm GO đều đạt hiệu suất làm việc tốt hơn so với BTN đối chứng.



Hình 3.17. Cường độ kéo khi ép chẻ của BTN_GO.

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

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

Hệ số

Tham số	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Hằng số	2,8742	0,0504	57,01	0,000	
GO	0,2847	0,0374	7,60	0,000	1,00

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,135663	72,43%	71,18%	66,98%

Phương trình hồi quy (3.8) với hệ số xác định điều chỉnh $R_{đc}^2 = 71,18\%$, hệ số $p < 0,05$ nên đảm bảo độ tin cậy.

3.6.4. Xác định cường độ kéo uốn đặc trưng

Cường độ kéo uốn đặc trưng (R_{ku}^{dt}) của BTN_GO được xác định theo công thức (3.9) với độ tin cậy $R = 95\%$ và được tổng hợp ở Bảng 3.14.

$$R_{ku}^{dt} = R_{ku}^{tb} - k \cdot S \quad (3.9)$$

Trong đó: R_{ku}^{tb} – Cường độ kéo uốn đặc trưng;

S – Độ lệch chuẩn;

k – Hệ số xác định theo độ tin cậy, với $R = 95\%$ thì $k = 1,645$.

Bảng 3.14. Cường độ kéo uốn đặc trưng của BTN_GO.

Loại BTN	R_{ke}^{tb} (MPa)	R_{ku}^{tb} (MPa)	S	R_{ku}^{dt} (MPa)
BTN_60/70	2,827	5,653	0,099	5,490
BTN_GO_1%	3,210	6,421	0,100	6,257
BTN_GO_1,5%	3,388	6,777	0,107	6,601
BTN_GO_2%	3,352	6,705	0,157	6,447

Kết quả trong bảng Bảng 3.14 cho thấy, cường độ kéo uốn đặc trưng của BTN_GO ở nhiệt độ 15°C cao hơn BTN_60/70. Cụ thể, BTN_GO_1%, BTN_GO_1,5% và BTN_GO_2% có cường độ kéo uốn đặc trưng cao hơn BTN_60/70 lần lượt là 13,97%; 20,24% và 17,43%.

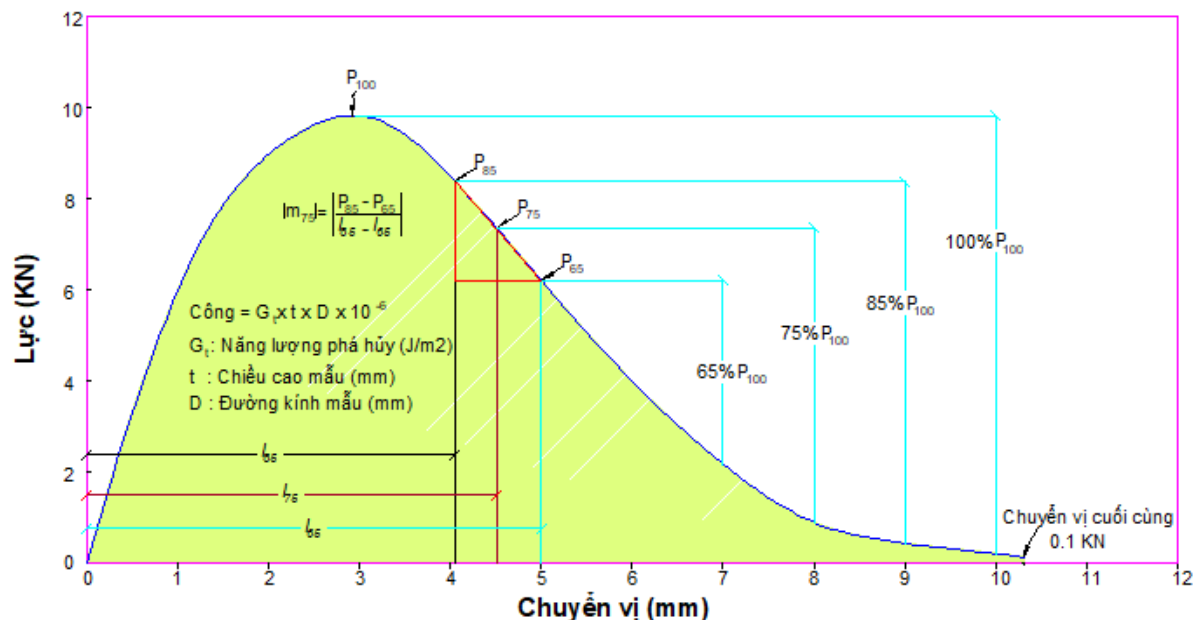
3.7. Khả năng kháng nứt

3.7.1. Các phương pháp thí nghiệm kháng nứt

Đối với mặt đường BTN, LVBX và nứt là hai dạng hư hỏng điển hình ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng khai thác và tuổi thọ của con đường. Do vậy, trong thiết kế hỗn hợp BTN, ngoài LVBX thì nứt cũng là một yếu tố được xem xét để hỗn hợp BTN đảm bảo hai yêu cầu là kháng LVBX và kháng nứt nhằm làm tăng tuổi thọ mặt đường. Tuy nhiên, đây là hai dạng phá hoại đối lập, khắc phục dạng này có thể dẫn đến phát sinh dạng kia. Việc lựa chọn cấp phối thô với hàm lượng cao và nhựa đường với hàm lượng thấp sẽ đem lại khả năng kháng LVBX tốt hơn, nhưng lại làm giảm khả năng chịu kéo và kháng nứt, và ngược lại. Hiện nay, xu hướng thiết kế hỗn hợp BTN đang thu hút nhiều bang tại Mỹ là thiết kế cân bằng giữa các đặc trưng thể tích, độ nhạy ẩm, khả năng kháng LVBX và kháng nứt. Vì vậy, khả năng kháng nứt là một thông số quan trọng cần xem xét khi thiết kế hỗn hợp BTN.

Hiện nay, phương pháp thí nghiệm kháng nứt của BTN được sử dụng rộng rãi toàn cầu bao gồm các thí nghiệm uốn dầm (BBF), thí nghiệm Overlay (OT), thí nghiệm Dis-shaped Compact Tension (DCT), thí nghiệm kiểm tra độ bền và độ bền kéo gián tiếp (IDT-CST), thí nghiệm uốn dầm bán nguyệt (SCB), và thí nghiệm kéo gián tiếp xác định chỉ số kháng nứt (IDEAL-CT). Phương pháp IDEAL-CT là một trong những phương pháp nhạy cảm với thành phần hỗn hợp BTN và đang được thực hiện rộng rãi ở các phòng thí nghiệm của các nhà thầu cũng như Sở GTVT ở Mỹ. Đến năm 2019, phương pháp này được chuẩn hóa và ban hành thành tiêu chuẩn ASTM D8225-19 [32]. Theo tiêu chuẩn này, việc xác định chỉ số kháng nứt CT_{Index} và các thông số liên quan được thực hiện từ đường cong lực - chuyển vị (*load-displacement curve*) như Hình 3.18. Căn cứ vào giá trị CT_{Index} , khả năng kháng nứt của BTN được đánh giá. Ưu điểm của phương pháp này là không cắt, không xẻ rãnh, không khoan, không gắn mẫu, thời gian thực hiện nhanh (khoảng 1 phút) và chi phí thấp [43]. Do vậy, đây là phương pháp đang được áp dụng nhiều tại Viện Khoa học và Công nghệ GTVT và một số phòng thí nghiệm khác ở trong nước.

Vì những ưu điểm trên, nghiên cứu lựa chọn phương pháp thí nghiệm kéo gián tiếp xác định chỉ số kháng nứt CT_{Index} để xác định khả năng kháng nứt của BTN_{GO}.



Hình 3.18. Đường cong lực và chuyển vị trong thí nghiệm IDEAL-CT_{Index}.

3.7.2. Phương pháp thí nghiệm xác định chỉ số kháng nứt CT_{Index}

Thí nghiệm IDEAL- CT_{Index} được thực hiện theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM D8225-19 trên máy Marshall-SDA tại phòng thí nghiệm vật liệu thuộc Trường Đại học GTVT. Mẫu có dạng hình trụ được chế bị bằng thiết bị đầm xoay Gyratory Compactor 4140 (của hãng Troxler - Mỹ) với đường kính khuôn 150 ± 2 mm, chiều cao mẫu 62 ± 1 mm, mẫu được đầm sao cho độ rỗng dư $V_a = 7 \pm 0,5\%$ (Hình 3.19).



a) Đầm mẫu trên thiết bị đầm xoay

b) Mẫu thí nghiệm

Hình 3.19. Công tác chế bị mẫu CT_{index} của BTN_GO

Thiết bị thử nghiệm IDEAL- CT_{Index} bao gồm thiết bị gia tải dọc trục, thiết bị cảm biến lực, dải gia tải, thiết bị đo biến dạng và hệ thống thu thập dữ liệu (Hình 3.20a). Mẫu được đặt chính giữa trong bộ gia tải dọc trục. Đặt tải trọng lên mẫu với tốc độ 50 ± 2 mm/phút trong suốt thời gian thử nghiệm cho đến khi lực nén giảm xuống dưới 0,1 kN thì dừng lại.



a) Quá trình nén mẫu

b) Mẫu sau khi bị nén

Hình 3.20. Thí nghiệm xác định chỉ số kháng nứt BTN_GO.

Trị số CT_{Index} của BTN được tính toán từ năng lượng gây nứt, độ dốc sau đỉnh của đường cong tải trọng-chuyển vị và khả năng chịu biến dạng ở 75% tải trọng tại đỉnh theo công thức (3.10), (3.11) và (3.12):

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times 10^6 \quad (3.10)$$

$$G_f = \frac{W_f}{Dxt} \times 10^6 \quad (3.11)$$

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (3.12)$$

Trong đó:

CT_{Index} – Chỉ số kháng nứt;

W_f – Công gây nứt (J);

G_f – Năng lượng gây nứt (J/m^2);

$|m_{75}|$ – Giá trị tuyệt đối của độ dốc sau nứt m_{75} (N/m);

D, t – Đường kính và chiều cao mẫu (mm);

P_{85}, P_{65} – 85% và 65% lực gây nứt ở giai đoạn sau nứt (kN);

l_{85}, l_{65} – Chuyển vị ứng với 85% và 65% lực gây nứt ở giai đoạn sau nứt (mm).

Nhìn chung, giá trị CT_{Index} càng cao, khả năng kháng nứt của BTN càng tốt, số lượng vết nứt xuất hiện càng ít nên làm nâng cao tuổi thọ mặt đường.

3.7.3. Kế hoạch thí nghiệm

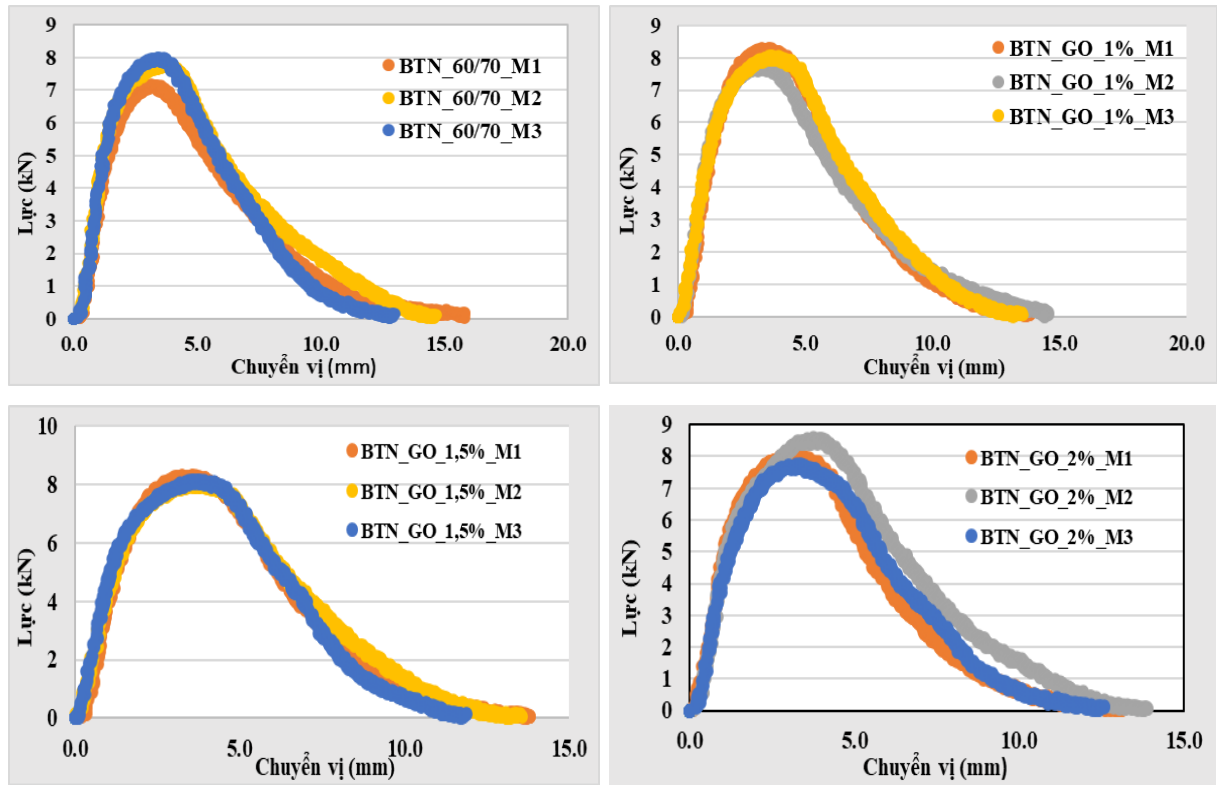
Kế hoạch thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt thông qua chỉ số CT_{Index} của BTN_GO được tiến hành theo tiêu chuẩn ASTM D8225-19 được trình bày ở Bảng 3.15.

Bảng 3.15. Kế hoạch thí nghiệm chỉ số kháng nứt của BTN_GO.

Loại BTN	Hàm lượng nhựa	Nhiệt độ TN	Số mẫu
BTN_60/70	4,6	25	3
BTN_GO_1%	4,6	25	3
BTN_GO_1,5%	4,6	25	3
BTN_GO_2%	4,6	25	3
Tổng số mẫu			12

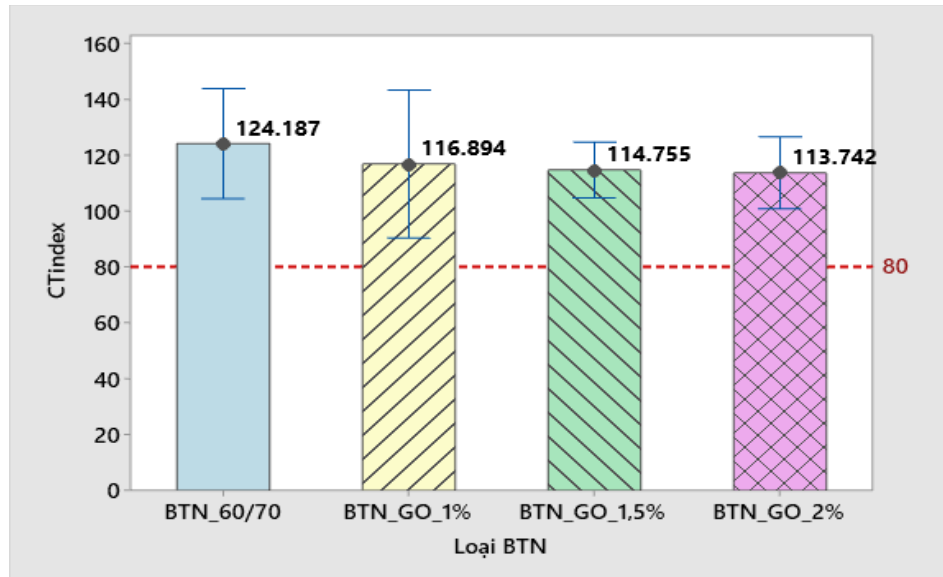
3.7.4. Kết quả thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm chỉ số kháng nứt CT_{Index} của các loại BTN được kiểm tra và đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá và được trình bày ở Phụ lục 7. Hình 3.21 thể hiện đường cong lực – chuyển vị của các tổ mẫu BTN.



Hình 3.21. Đường cong lực – chuyển vị của các tổ mẫu BTN.

Từ số liệu đường cong quan hệ lực – chuyển vị, chỉ số CT_{Index} được tính theo công thức (3.10). Hình 3.22 cho thấy, chỉ số CT_{Index} của BTN_60/70 và BTN_GO đều lớn hơn giá trị tối thiểu ($CT_{Index} \geq 80$) của Bang Oklahoma đưa ra. Ngoài ra, việc bổ sung GO không cải thiện khả năng kháng nứt của BTN mà có xu hướng giảm nhẹ chỉ số 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%. Điều này có thể được giải thích, việc bổ sung GO làm tăng cường độ cứng cho BTN, ở nhiệt độ thấp BTN_GO trở nên cứng giòn nên khả năng kháng nứt giảm nhẹ so với BTN_60/70. Tuy nhiên, đây là kết quả nghiên cứu ban đầu trên BTNC 12,5 sử dụng nhựa đường 60/70, và cũng là nghiên cứu đầu tiên về khả năng kháng nứt của BTN_GO thông qua chỉ số CT_{Index} . Để có đánh giá chính xác và tổng quát hơn cần có thêm các nghiên cứu trên các loại BTN và nhựa đường khác nhau.



Hình 3.22. Kết quả thử nghiệm CT_{Index} của BTN_GO (độ tin cậy 95%).

3.8. Mô đun động

Mô đun động (dynamic modulus - $|E^*|$) của BTN là một thông số đầu vào quan trọng được sử dụng trong phương pháp thiết kế mặt đường theo cơ học – thực nghiệm của Mỹ [38]. Ngoài ra, chỉ tiêu này được dùng trong phân tích dự báo đồng thời cả đặc tính lún và nứt mỏi của kết cấu áo đường mềm [39].

3.8.1. Phương pháp thí nghiệm

Thí nghiệm xác định mô đun động $|E^*|$ được thực hiện tại phòng thí nghiệm của Trường Đại học GTVT theo tiêu chuẩn AASHTO TP62-07 (2009) [29]. Mẫu được chế bị bằng đầm xoay Gyratory Compactor 4140 (của hãng Troxler - Mỹ) với đường kính khuôn 100 mm, áp lực đầm 600 kPa, đảm bảo mẫu đầm có độ rỗng dư $V_a = 7 \pm 0,5\%$. Thử nghiệm được tiến hành trên thiết bị CRT NU-14 (hãng Cooper - Anh) ở 4 nhiệt độ 4°C , 21°C , 37°C và 54°C , với 6 mức tần số từ 0,1 đến 25 Hz (0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz và 25 Hz). Nhiệt độ thí nghiệm bắt đầu từ thấp nhất đến cao nhất. Ứng với một nhiệt độ thử nghiệm nhất định, nên bắt đầu với tần suất tải cao nhất đến thấp nhất. Ngoài ra, những mẫu này được thí nghiệm ở mức ứng suất để đạt được mức biến dạng lớn hơn $50 \mu\epsilon$ ở nhiệt độ thấp và nhỏ hơn $150 \mu\epsilon$ khi thí nghiệm ở nhiệt độ cao nhằm đảm bảo độ chính xác khi thí nghiệm. Do vậy, trong nghiên cứu này áp lực thí nghiệm được lựa chọn tùy thuộc vào nhiệt độ thí nghiệm và loại BTN. Quá trình thí nghiệm mô đun động $|E^*|$ được hiển thị trong Hình 3.23.



(a) Chén bị mẫu (b) Mẫu sau khi chén bị (c) TN mẫu trên CRT-NU-14

Hình 3.23. Một số hình ảnh thí nghiệm mô đun động.

3.8.2. Kế hoạch thí nghiệm

Kế hoạch thí nghiệm mô đun động $|E^*|$ được trình bày chi tiết trong Bảng 3.16.

Bảng 3.16. Kế hoạch thí nghiệm mô đun động BTN_GO.

Loại BTN	Hàm lượng nhựa (%)	Số lượng mẫu	Nhiệt độ TN (°C)	Tần số TN (Hz)	Số kết quả thí nghiệm
BTN_60/70	4,6	3	4, 21, 37, 54	0,1, 0,5, 1, 5, 10, 25	72
BTN_GO_1%	4,6	3			72
BTN_GO_1,5%	4,6	3			72
BTN_GO_2%	4,6	3			72
Tổng số kết quả					288

3.8.3. Kết quả thí nghiệm

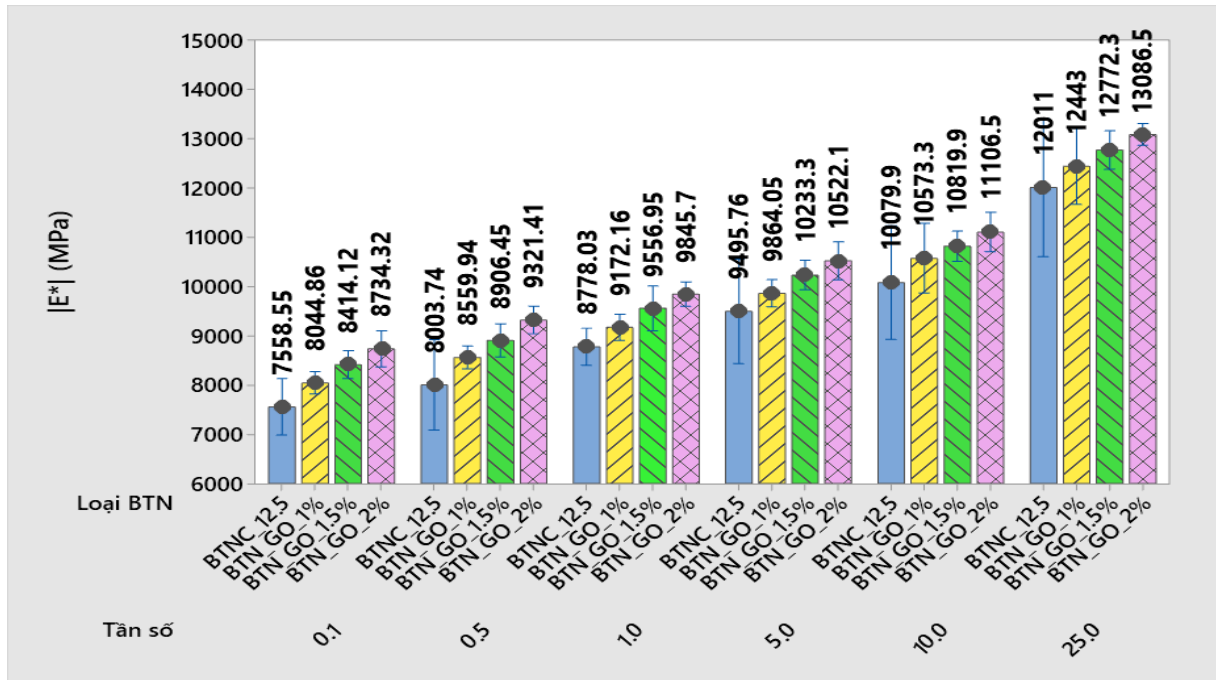
Kết quả thí nghiệm $|E^*|$ ở dải tần số từ 0,1 ÷ 25 Hz, và dải nhiệt độ từ 4°C ÷ 54°C đảm bảo độ chụm theo tiêu chuẩn đánh giá. Quá trình thiết kế thực nghiệm và các phân tích kết quả thí nghiệm được thể hiện chi tiết trong Phụ lục 8.

Kết quả thí nghiệm $|E^*|$ được thể hiện trên biểu đồ từ Hình 3.24 đến Hình 3.27.

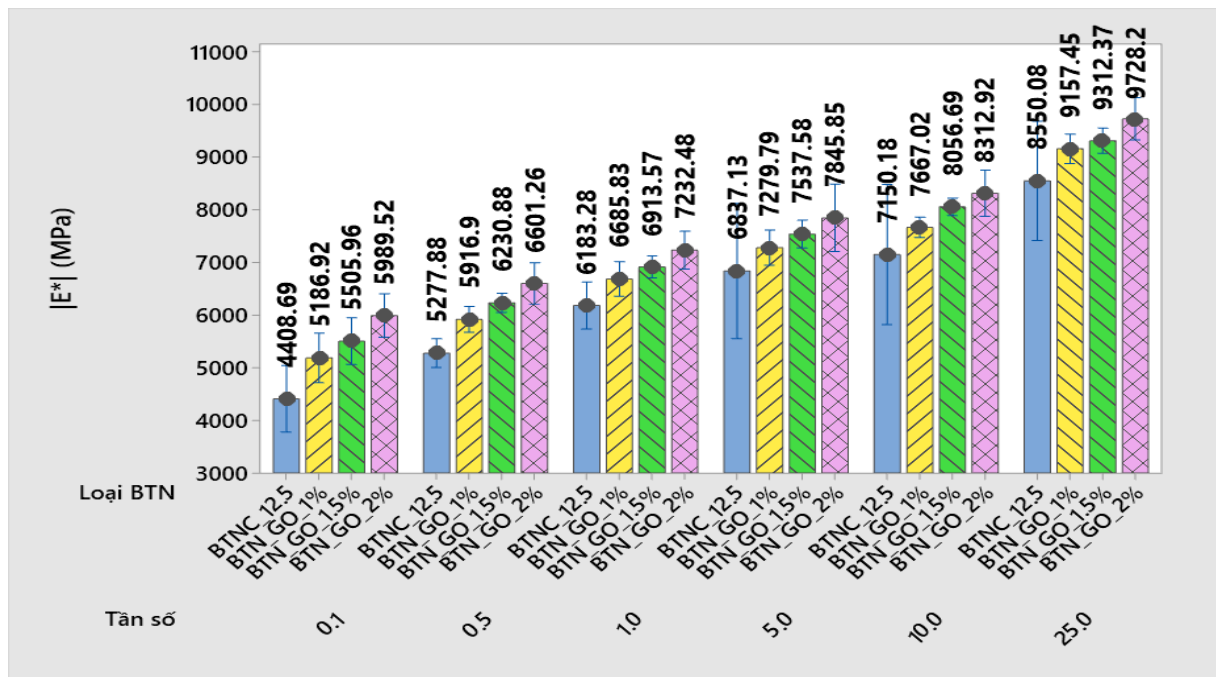
Từ các biểu đồ này có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Các yếu tố nhiệt độ và tần số gia tải ảnh hưởng rất lớn đến mô đun động $|E^*|$ của các loại BTN_GO. Cụ thể, 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 (nhiệt độ và tần số), 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

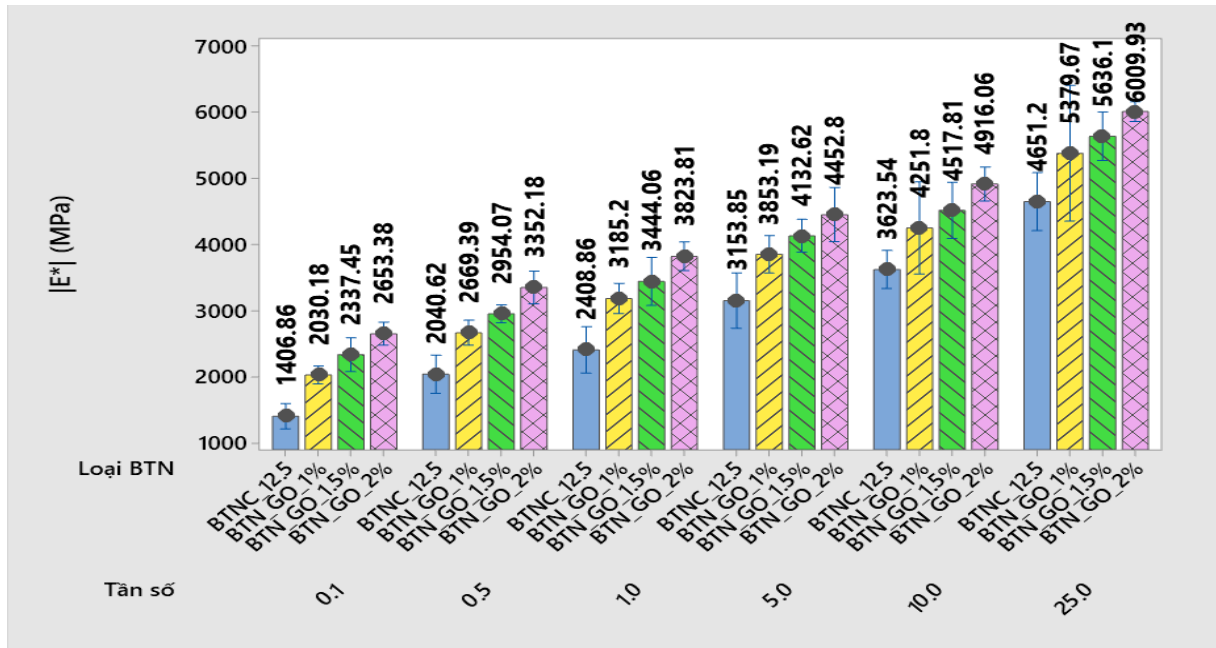
nhien, sự gia tăng này không giống nhau ở nhiệt độ và tần số thí nghiệm khác nhau, nhiệt độ càng cao, sự chênh lệch giá trị $|E^*|$ giữa BTN_GO và BTN_60/70 càng lớn. Cụ thể: $|E^*|$ của BTN_GO_1% cao gấp $1,03 \div 1,08$ lần ở 4°C và gấp $1,29 \div 1,42$ lần ở 54°C so với BTN_60/70. Trong khi đó, $|E^*|$ 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.



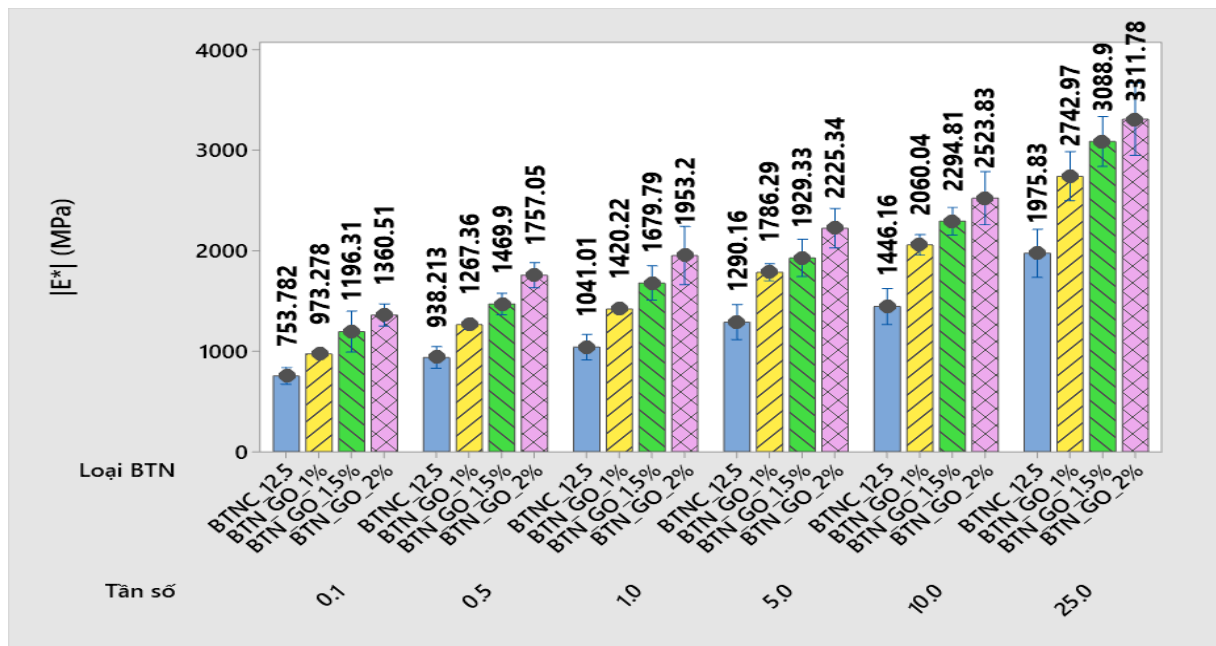
Hình 3.24. Biểu đồ mô đun động $|E^*|$ của các loại BTN ở 4°C .



Hình 3.25. Biểu đồ mô đun động $|E^*|$ của các loại BTN ở 21°C .



Hình 3.26. Biểu đồ mô đun động $|E^*|$ của các loại BTN ở 37°C.



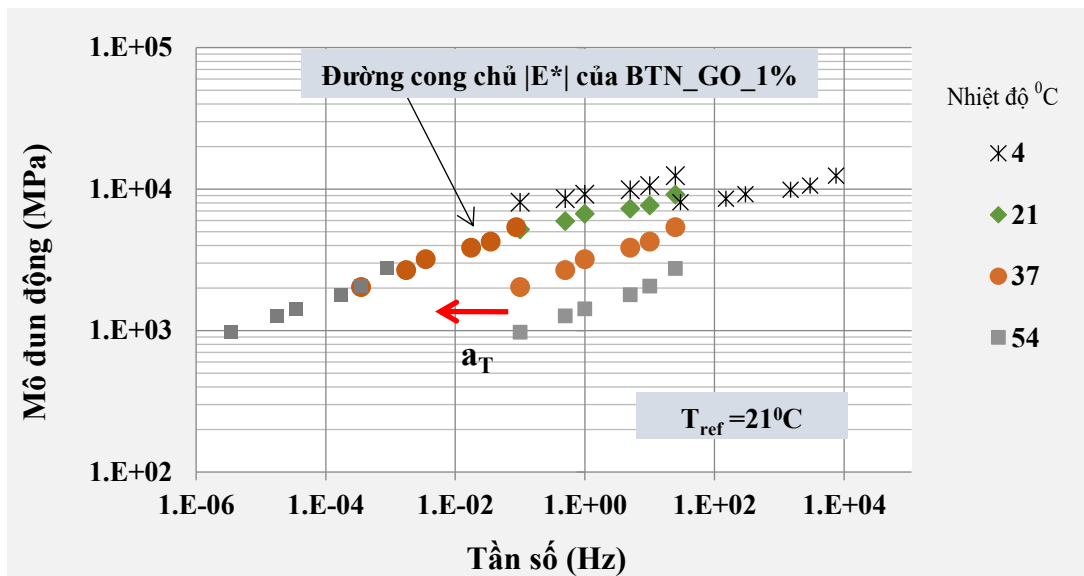
Hình 3.27. Hình: Biểu đồ mô đun động $|E^*|$ của các loại BTN ở 54°C.

3.8.4. Xây dựng đường cong chủ mô đun động

Đường cong chủ $|E^*|$ là đường cong đặc trưng cho tính chất đàn nhớt của BTN trong một vùng rộng của tần số và nhiệt độ. Đường cong này được xây dựng từ quy tắc tương quan tần số - nhiệt độ [62], được sử dụng để dự báo $|E^*|$ của BTN ở tần số và nhiệt độ khác nhau [17], [40], [62]. Để xây dựng đường cong chủ $|E^*|$, các kết quả thí nghiệm được tập hợp lại để có dữ liệu về $|E^*|$ trong một dải nhiệt độ và tần số [17], [30], [40], [66]. Chọn nhiệt độ tham chiếu là 21°C. Các đường cong đẳng nhiệt tương ứng với nhiệt độ

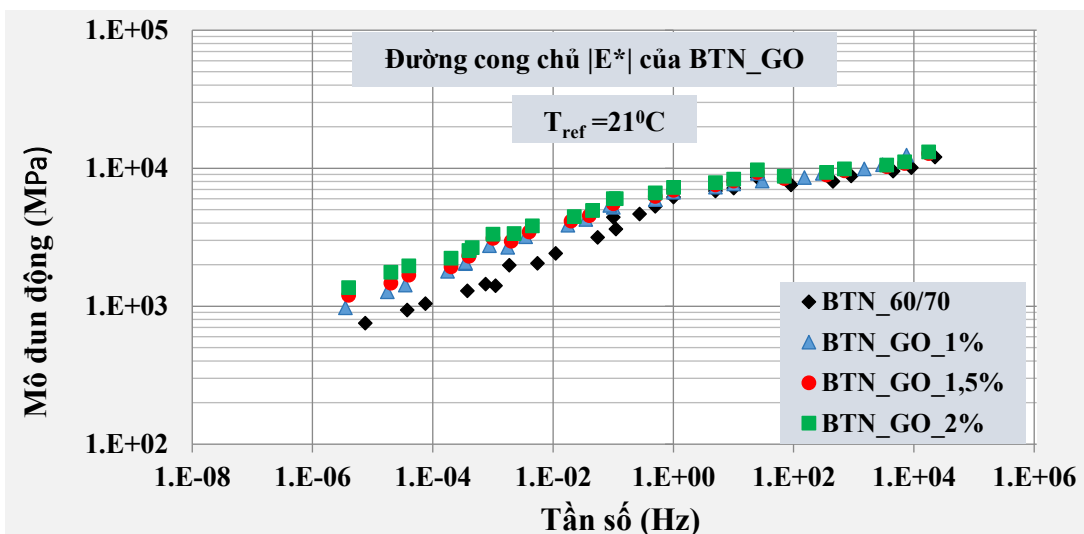
lớn hơn 21°C sẽ được dịch chuyển sang trái, trong khi các đường cong tương ứng với nhiệt độ thấp hơn 21°C sẽ được dịch chuyển sang phải bằng các hệ số dịch chuyển a_T . Quá trình dịch chuyển này được lặp lại cho đến khi các đường cong hòa vào nhau tạo ra một đường cong trơn liên tục [40], [78].

Từ kết quả thí nghiệm $|E^*|$ ở 4 nhiệt độ và 6 tần số của từng loại BTN, tiến hành xây dựng đường cong chủ $|E^*|$. Ví dụ về phương pháp xây dựng đường cong chủ của BTN_GO_1% ở nhiệt độ tham chiếu 21°C được minh họa trên Hình 3.28.



Hình 3.28. Đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_GO_1% ở nhiệt độ tham chiếu 21°C .

Đường cong chủ của BTN_GO_1,5%, BTN_GO_2%, và BTN_60/70 được xây dựng tương tự như BTN_GO_1% và được thể hiện ở Hình 3.29.



Hình 3.29. Đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_GO ở nhiệt độ tham chiếu 21°C .

Biểu đồ Hình 3.29 cho thấy ở nhiệt độ tham chiếu 21°C, đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_GO_2% nằm trên cùng, tiếp theo là BTN_GO_1,5%, BTN_GO_1%, trong khi BTN_60/70 nằm dưới cùng trong phạm vi nhiệt độ và tần số thử nghiệm. Ngoài ra, phía bên trái biểu đồ có sự tách biệt rõ rệt giữa các đường cong chủ $|E^*|$ của BTN_GO với BTN_60/70, điều này cho thấy ở nhiệt độ cao (tần số thấp) có sự khác biệt đáng kể mô đun động giữa BTN_GO và BTN_60/70. Ở nhiệt độ thấp (tần số cao), sự khác biệt $|E^*|$ giữa BTN_GO và BTN_60/70 là không đáng kể, điều này được thể hiện bởi các đường cong chủ nằm sát nhau. Hay nói cách khác, BTN_GO thể hiện đặc tính cao hơn so với BTN_60/70 ở nhiệt độ cao (tần số thấp) trong thử nghiệm mô đun động. Quan hệ giữa hệ số dịch chuyển a_T và nhiệt độ thí nghiệm được mô hình hóa theo công thức (3.13) của Williams, Landel và Ferry (WLF) [62], [65].

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (3.13)$$

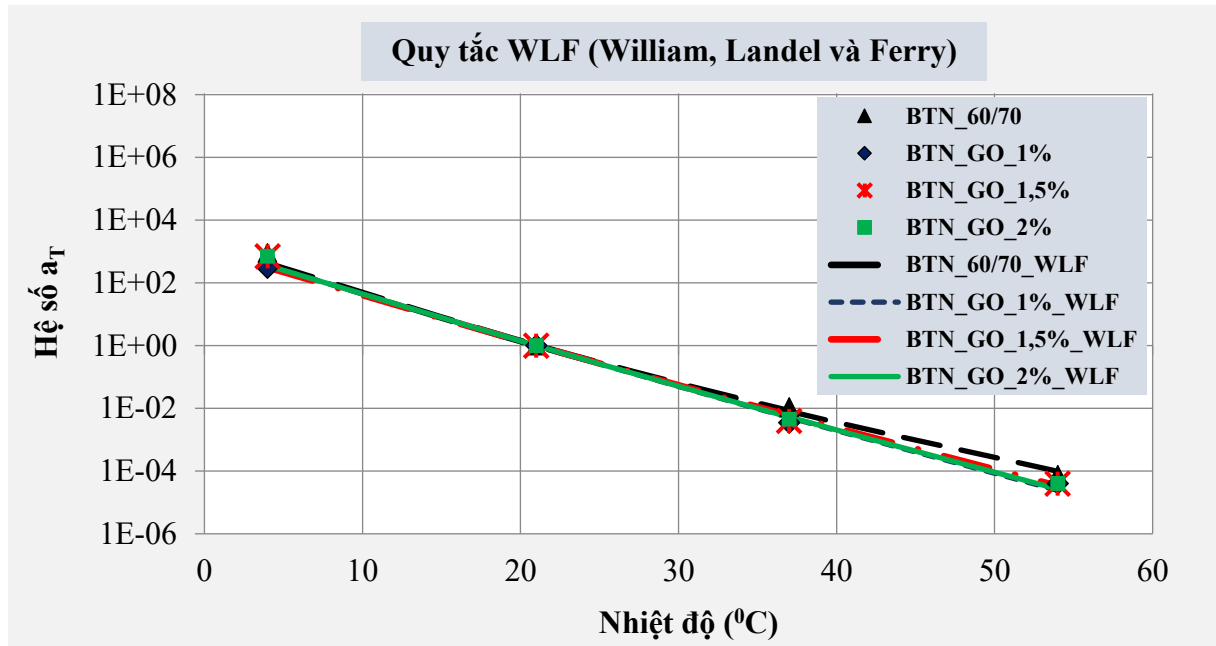
Trong đó:

- C_1, C_2 – Hệ số hồi quy của phương trình WLF. Các hệ số C_1, C_2 và hệ số dịch chuyển a_T được sử dụng để chuyển dữ liệu mô đun động ở các nhiệt độ thử nghiệm khác nhau sang nhiệt độ tham chiếu 21°C. Việc tối ưu hóa theo phương pháp bình phương nhỏ nhất bằng cách sử dụng hàm “Solver” trong Microsoft Excel có thể xác định các hệ số này;
- T_{ref} – Nhiệt độ tham chiếu;
- T – Nhiệt độ thí nghiệm.

Kết quả xác định các hệ số C_1, C_2 theo quy tắc WLF của các loại BTN được trình bày trong Bảng 3.17 và Hình 3.30.

Bảng 3.17. Kết quả xác định các hệ số của quy tắc WLF.

Loại BTN	Nhiệt độ tham chiếu (°C)	C_1	C_2
BTN_60/70	21	29,05	206,16
BTN_GO_1%		101,12	690,25
BTN_GO_1,5%		90,22	632,70
BTN_GO_2%		90,54	620,18



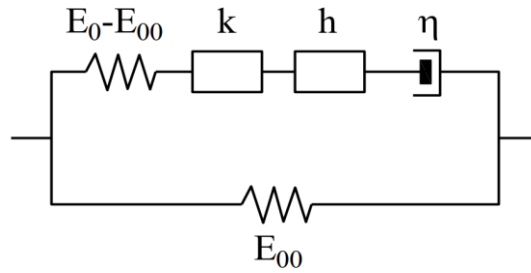
Hình 3.30. Biểu đồ quan hệ giữa a_T và T theo quy tắc WLF với nhiệt độ.

3.8.5. Mô hình hóa mô đun động

3.8.5.1. Lựa chọn và xây dựng mô hình

Việc mô phỏng các số liệu thực nghiệm $|E^*|$ của nhựa đường và BTN có thể được thực hiện với nhiều mô hình khác nhau như mô hình Huet, Huet-Sayegh, và 2S2P1D [48], [64]. Mô hình Huet được đánh giá là phù hợp khi mô phỏng giá trị thực nghiệm $|E^*|$ của nhựa đường ở dải tần số và nhiệt độ khác nhau, nhưng lại không phù hợp cho BTN ở tần số thấp, nhiệt độ cao. Mô hình Huet-Sayegh mô tả chính xác ứng xử đàn nhớt tuyến tính của BTN trong vùng tần số và nhiệt độ bất kỳ, nhưng mô hình này lại không phù hợp cho nhựa đường ở dải tần số thấp. Trong khi đó, mô hình 2S2P1D có thể khắc phục được nhược điểm của 2 mô hình nêu trên. Mô hình này có thể mô phỏng đặc tính đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và BTN trong miền biến dạng nhỏ với dải nhiệt độ và tần số bất kỳ [64]. Vì vậy trong phạm vi luận án, nghiên cứu ứng dụng mô hình 2S2P1D để mô hình hóa các đường cong chủ $|E^*|$ của các loại BTN_GO và BTN_60/70.

Mô hình 2S2P1D là một mô hình tổng quát xây dựng dựa trên sự kết hợp các thành phần vật lý, bao gồm 2 lò xo (2 Springs), 2 thành phần hỗn hợp (2 Parabolic elements), và 1 thành phần nhớt (1 Dashpot) [63], [64]. Mô hình sử dụng 7 thông số đầu vào (E_{00} , E_0 , δ , β , τ , k và h) để mô hình hóa đặc tính đàn nhớt tuyến tính của nhựa đường và BTN. Sơ đồ miêu tả mô hình 2S2P1D được minh họa ở Hình 3.31.



Hình 3.31. Sơ đồ mô tả mô hình 2S2P1D.

Theo mô hình 2S2P1D, $|E^*|$ được tính theo công thức (3.14):

$$E^*(\omega) = E_{oo} + \frac{E_o - E_{oo}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (3.14)$$

Trong đó:

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

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

i – Đơn vị ảo, $i^2 = -1$;

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

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

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

τ – Thời gian đặc trưng phụ thuộc nhiệt độ. Thông số này là hàm của

$a_T(T)$, $\tau(T) = a_T(T)\tau_0$, trong đó τ_0 được xác định ở nhiệt độ tham chiếu T_{ref} .

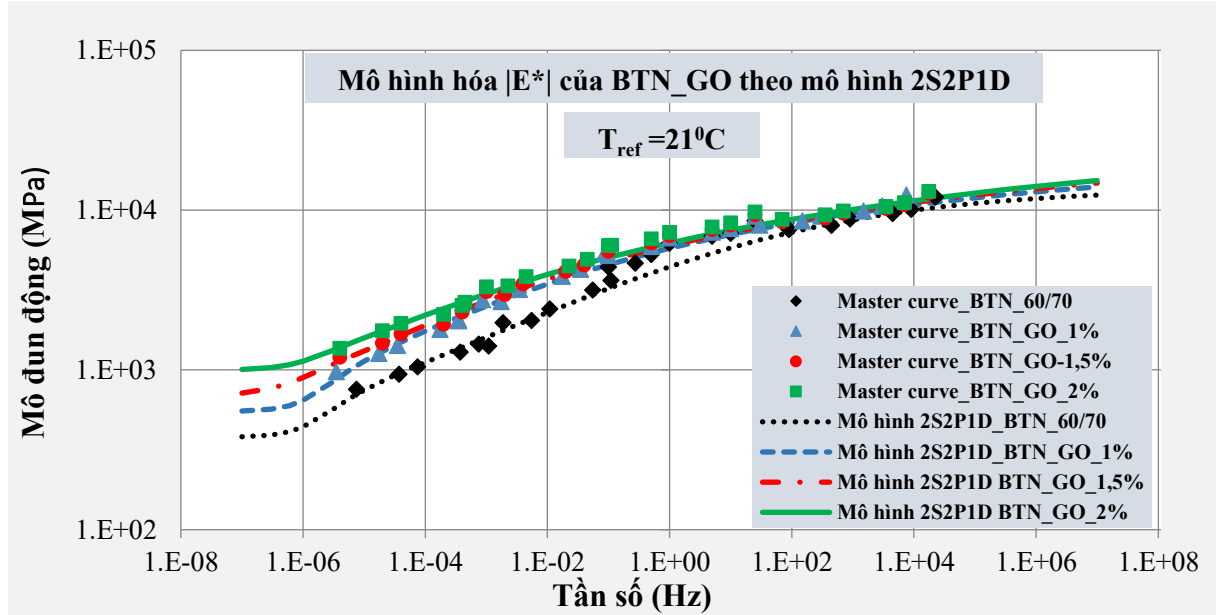
Các thông số của mô hình 2S2P1D xác định bằng cách thử đúng dần để tối thiểu hóa sai số giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dựa đoán của mô hình, trong đó thông số E_o và E_{oo} của mô hình tham khảo theo tài liệu [64], [66] và được trình bày trong Bảng 3.18.

Bảng 3.18. Các thông số của mô hình 2S2P1D mô phỏng đường cong chủ $|E^*|$.

Loại BTN	E_{oo} (MPa)	E_o (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

Kết quả mô phỏng cho thấy, các giá trị k , h , δ , τ , và β đều nằm trong khoảng giá trị tham khảo của tài liệu [64], [66].

Kết quả mô hình hóa $|E^*|$ của các loại BTN được thể hiện ở Hình 3.32.



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

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

Để đánh giá sự phù hợp của mô hình 2S2P1D với kết quả thí nghiệm, nghiên cứu sử dụng phương pháp mức độ phù hợp (Goodness of Fit) [30], [66]. Trong phương pháp này, sai số tiêu chuẩn của ước lượng (S_e) và độ lệch chuẩn (S_y) được định nghĩa như sau:

$$S_e = \left[\frac{1}{(n - p - 1)} \sum_1^n \left(\log|\hat{E}^*|_i - \log|E^*|_i \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3.15)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\log|E^*|_i - \overline{\log|E^*|} \right)^2}{n - 1}} \quad (3.16)$$

Trong đó:

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

p – Số lượng thông số của mô hình;

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

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

$\overline{\log|E^*|}$ – Trung bình của logarit cơ số 10 của $|E^*|$ thí nghiệm;

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

$$R^2 = 1 - \frac{(n - p - 1)S_e^2}{(n - 1)S_y^2} \quad (3.17)$$

Mô hình 2S2P1D được đánh giá là phù hợp với số liệu thí nghiệm khi hệ số xác định thỏa mãn $R^2 > 0,9$ và $S_e/S_y < 0,35$ [29], [66].

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

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

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.

3.9. Kết luận chương 3

Chương 3 tập trung nghiên cứu thực nghiệm trong phòng về BTN_GO và BTN_60/70 với thành phần thiết kế lựa chọn. Một số kết luận được rút ra từ chương này:

- 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, trong đó mức tăng ở 15°C là lớn nhất, tiếp theo là 30°C và cuối cùng là 60°C . 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 chế 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 chế 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, từ các kết quả thực nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của BTN_GO như mô đun đàn hồi tĩnh, cường độ kéo uốn và mô đun động ở Chương 3, chương này sử dụng BTN_GO_2% 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_GO_2% 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). Các kết quả phân tích giúp khẳng định ưu điểm và khả năng sử dụng BTN_GO làm lớp mặt cho kết cấu áo đường ở Việt Nam.

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

Phần này trình bày ứng dụng các thuật toán ML để dự báo một số tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO. Để xây dựng tương quan giữa các thông số thí nghiệm với các chỉ tiêu dự báo, nghiên cứu xây dựng các bộ dữ liệu cho các chỉ tiêu. 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, trong khi các dữ liệu thí nghiệm của nghiên cứu này được sử dụng để kiểm chứng tính đúng đắn của mô hình dự báo. Ngoài ra, nghiên cứu sử dụng nhiều thuật toán ML cùng với kỹ thuật xác thực chéo để phát triển và đào tạo mô hình.

4.1.1. Một số thuật toán học máy và các kỹ thuật được sử dụng trong nghiên cứu

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

- Mỗi thuật toán ML có quá trình học khác nhau và phù hợp với từng vấn đề khác nhau. Việc giới thiệu các thuật toán ML giúp đánh giá và so sánh hiệu suất của chúng trong dự báo các tính chất cơ lý của vật liệu. Điều này giúp nghiên cứu lựa chọn được thuật toán phù hợp và mang lại kết quả tốt nhất.

- Giúp nghiên cứu giải thích quy trình và phương pháp thực hiện. Việc sử dụng ML để phân tích dữ liệu và xây dựng mô hình dự báo tính chất cơ lý vật liệu được chứng minh tính khả thi cao và đáng tin cậy. Đây là cơ sở lý thuyết vững chắc được cung cấp cho quá trình thực hiện và phân tích kết quả.

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

4.1.1.1. Thuật toán ANN

ANN là một trong những thuật toán lâu đời và phổ biến của ML. Trong thuật toán ANN, nhiều nơ-ron được liên kết với nhau bằng trọng số liên kết, và toàn bộ mạng hoạt động cùng nhau để giải quyết một số nhiệm vụ nhất định sau khi được đào tạo trên các mẫu. ANN có cấu trúc gồm 3 lớp: một lớp đầu vào để tiếp nhận các tín hiệu đầu vào, một lớp đầu ra để tạo ra tín hiệu đầu ra, các lớp nằm giữa lớp đầu vào và đầu ra được gọi là lớp ẩn. Các lớp ẩn này bao gồm các nơ-ron ẩn, các giá trị đầu ra trung gian được tính toán bởi mạng nơ-ron. Mô hình ANN được coi là công cụ mạnh để giải quyết các vấn đề phức tạp, phi tuyến nhờ khả năng tự học và điều chỉnh các trọng số để các giá trị tính toán phù hợp với giá trị thực tế mà không phụ thuộc vào các phương trình toán học.

4.1.1.2. Thuật toán Gradient Boosting (CGB)

CGB là một thuật toán ML thuộc lớp thuật toán tăng cường. Thuật toán này tạo ra các dự báo bằng cách "thúc đẩy" một tập hợp các mô hình dự báo yếu, thường là các cây quyết định, để tạo ra một mô hình mạnh mẽ hơn. Ngoài ra, việc tích hợp các yếu tố dự báo khác nhau từ mỗi lần lặp lại có thể cải thiện hiệu suất của mô hình. Nó hỗ trợ giảm thiểu lỗi mô hình tổng thể và giảm thiểu mất mát mô hình. Kết quả là, việc khớp quá mức của thuật toán CGB có thể được giảm bớt. Tuy nhiên, CGB có một số nhược điểm như yêu cầu bộ nhớ lớn, dễ bị quá khớp nếu số lần lặp quá nhiều hoặc mô hình quá phức tạp. Do đó, việc điều chỉnh đúng các siêu tham số của thuật toán để giảm thiểu việc trang bị quá mức và đạt được hiệu suất tối ưu là rất quan trọng.

4.1.1.3. Kỹ thuật xác thực chéo

Trong ML, quá trình đào tạo mạng có thể dẫn đến hiện tượng quá khớp (overfitting). Vấn đề quá khớp là rất nguy hiểm vì nó có thể cho kết quả quá khác với giá trị mong muốn, điều này cũng chứng tỏ rằng khả năng tổng quát hóa của mô hình không cao. Kỹ

thuật xác thực chéo (Cross Validation – CV) là một phương pháp phổ biến để ngăn chặn các vấn đề quá khớp. Thông thường, một bộ dữ liệu được chia thành ba tập: tập dữ liệu đào tạo, tập dữ liệu xác thực, và tập dữ liệu kiểm chứng với các chức năng tương ứng là đào tạo mô hình, xác thực đào tạo và kiểm chứng mô hình. Nếu tập dữ liệu được chia thành hai phần, cụ thể là tập dữ liệu đào tạo và kiểm chứng, thì xác thực chéo cũng có thể là một biện pháp để ngăn chặn hiện tượng quá khớp. Trong trường hợp này, xác thực chéo bao gồm hai bước chính, bao gồm chia nhỏ tập dữ liệu đào tạo thành các tập con (k phần), sau đó đào tạo và xác thực luân phiên. Như vậy, có k lần đào tạo, và mỗi lần đào tạo chọn 1 phần làm dữ liệu xác thực, $k-1$ phần còn lại làm dữ liệu đào tạo. Tập dữ liệu kiểm chứng cuối cùng được sử dụng để đánh giá mô hình khi gặp phải dữ liệu không được học. Kết quả đánh giá mô hình cuối cùng là giá trị trung bình của các kết quả đánh giá của n lần đào tạo. Giá trị của k thường chọn 5 hoặc 10 tùy thuộc vào kích thước và độ phức tạp của tập dữ liệu. Giá trị k lớn dẫn đến ước tính chính xác hơn về hiệu suất của mô hình, nhưng cũng làm tăng thời gian tính toán.

4.1.1.4. Các tiêu chí đánh giá năng lực dự báo của mô hình

Các tiêu chí được sử dụng trong nghiên cứu để đánh giá kết quả dự báo do các mô hình ML đưa ra bao gồm hệ số xác định (R^2), căn của sai số toàn phương trung bình (RMSE), sai số tuyệt đối trung bình (MAE), và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE). Thông thường, khi R^2 tiến tới 1 và các sai số nhỏ (tiến tới 0) thì mô hình có hiệu suất dự báo tốt.

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

4.1.2.1. Xây dựng cơ sở dữ liệu

Trong việc giải quyết các vấn đề của thế giới thực bằng các thuật toán ML, cơ sở dữ liệu rất quan trọng và là điều kiện tiên quyết cho sự thành công của mô hình. Do vậy, cơ sở dữ liệu phải chính xác và đáng tin cậy. Quy trình xây dựng cơ sở dữ liệu cho N_GO cũng như xác định các biến đầu vào quan trọng tuân theo một số nguyên tắc cơ bản sau:

- Trước tiên, cần phải nói rằng đây là cơ sở dữ liệu đầu tiên trên thế giới về N_GO, được xây dựng thông qua việc thu thập dữ liệu thử nghiệm từ các công trình đã công bố trên thế giới, kết hợp với dữ liệu thử nghiệm trong nghiên cứu này.

- Thứ hai, GO là vật liệu nano có cấu trúc phân lớp hai chiều, bao gồm một hoặc nhiều tấm nano xếp chồng lên nhau. Các đặc tính đặc trưng cho GO như số lớp, chiều dày tấm và kích thước bên trung bình của tấm thường được xem xét làm các biến đầu vào.
- Thứ ba, trên thực tế tất cả các loại nhựa đường được biết đến trong các nghiên cứu bao gồm nhựa đường phân loại theo độ kim lún, độ nhớt và PG đều đã được đưa vào cơ sở dữ liệu trong nghiên cứu này. Ngoài ra, nhựa đường cải tiến SBS cũng được thu thập. Các nhựa đường khác nhau có tính chất cơ lý và nhiệt độ làm việc hiệu quả khác nhau. Kết quả là, các tính chất cơ lý ban đầu của nhựa đường gốc hoặc nhựa đường cải tiến SBS đều được sử dụng làm thông số đầu vào trong cơ sở dữ liệu.
- Thứ tư, GO là vật liệu nano có tỷ diện bề mặt lớn, hàm lượng GO trong nhựa đường ở mức rất nhỏ, để có được sự phân tán đồng đều của hỗn hợp thì thời gian trộn phải đủ lâu, tốc độ trộn phải đủ lớn và nhiệt độ trộn phù hợp với nhiệt độ làm việc của từng loại nhựa đường, nhưng phải hạn chế tối đa quá trình oxy hóa của nó. Vì những lý do trên, các thông số liên quan đến quá trình trộn để chế tạo N_GO cũng được xem xét làm biến đầu vào trong nghiên cứu này.
- Thứ năm, các tính chất cơ lý của N_GO đã được thử nghiệm trong các điều kiện khác nhau, cụ thể là chưa hóa già, hóa già TFOT, RTFOT, PAV và UV theo ngày tuổi. Trên thực tế, việc xác định các tính chất cơ lý của nhựa đường sau hóa già là rất quan trọng đối với các ứng dụng thực tế. Tuy nhiên, không có nguyên tắc quy đổi chung của các hình thức hóa già này thành thời gian làm việc của nhựa đường ngoài thực tế. Nói cách khác, vì các thử nghiệm này được sử dụng cho các mục đích khác nhau, chúng không thể được biểu diễn dưới dạng các biến liên tục trong cơ sở dữ liệu của nghiên cứu này. Do đó, các dạng hóa già được chọn làm biến phân loại.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu chọn ra 4 nhóm biến đầu vào. Nhóm đầu tiên liên quan đến các đặc điểm của GO bao gồm hàm lượng GO, số lớp GO, chiều dày tấm GO, và kích thước bên trung bình của tấm GO. Nhóm thứ hai bao gồm 3 thông số liên quan đến quá trình trộn để đưa GO vào nhựa đường, đó là nhiệt độ trộn, thời gian trộn, và vận tốc

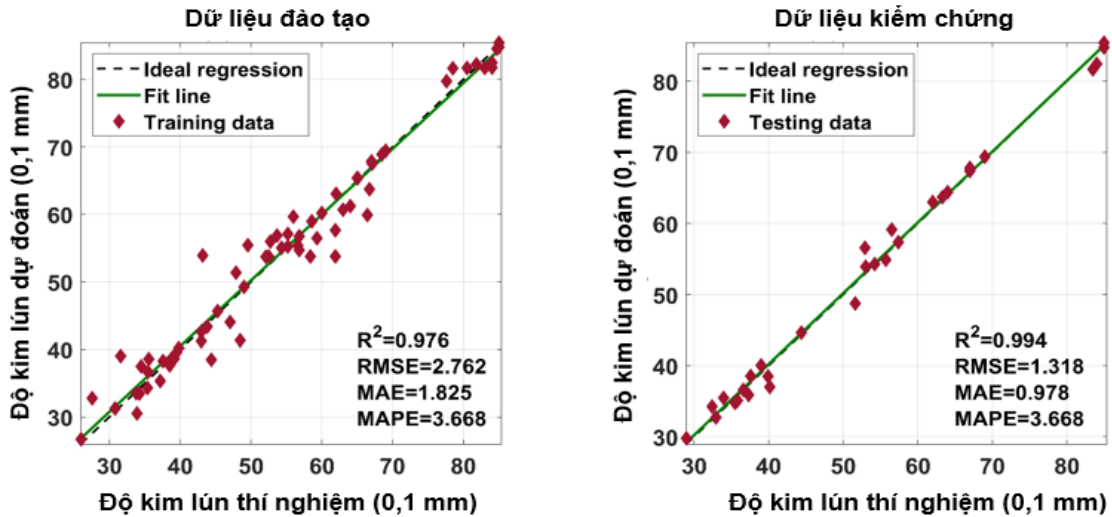
trộn. Nhóm thứ ba là loại hóa già như đã giải thích rõ ở phần trên. Nhóm cuối cùng đại diện cho các tính chất cơ lý của nhựa đường ban đầu.

Với các số liệu thu thập được từ các nghiên cứu trên thế giới và số liệu thực nghiệm ở chương 2, nghiên cứu này xây dựng các bộ dữ liệu để dự báo các chỉ tiêu độ kim lún, điểm hóa mềm, độ kéo dài, độ nhớt, và $G^*/\sin\delta$. Trong đó, kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu này được sử dụng để kiểm chứng tính đúng đắn của mô hình. 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 bên 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 già (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. Cuối cùng, bộ dữ liệu được chia thành 2 phần, 70% dữ liệu được sử dụng để đào tạo mô hình, 30% dữ liệu còn lại dùng để kiểm chứng mô hình.

4.1.2.2. Dự báo độ kim lún

Bộ dữ liệu độ kim lún được xây dựng từ 122 dữ liệu thí nghiệm trong các nghiên cứu [34], [41], [52], [53], [54], [72], [79], [80], [81], [82], [83]. 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}.

Kết quả dự báo đại diện cho cấu trúc ANN được đánh giá và hiển thị ở Hình 4.1. Dễ dàng nhận thấy, ở cả hai tập dữ liệu đào tạo và kiểm chứng, các đường hồi quy tuyến tính rất gần với các đường chéo, điều này khẳng định mối tương quan chặt chẽ giữa các giá trị dự báo và thực nghiệm của biến đầu ra. Các giá trị được tính toán của hệ số xác định R^2 cho bộ dữ liệu đào tạo và kiểm chứng lần lượt là 0,976 và 0,994, trong khi các giá trị RMSE, MAE và MAPE đều rất nhỏ. Kết quả cho thấy cấu trúc ANN-GDX-9-5-1 đề xuất có khả năng dự báo tốt độ kim lún của N_{GO}.

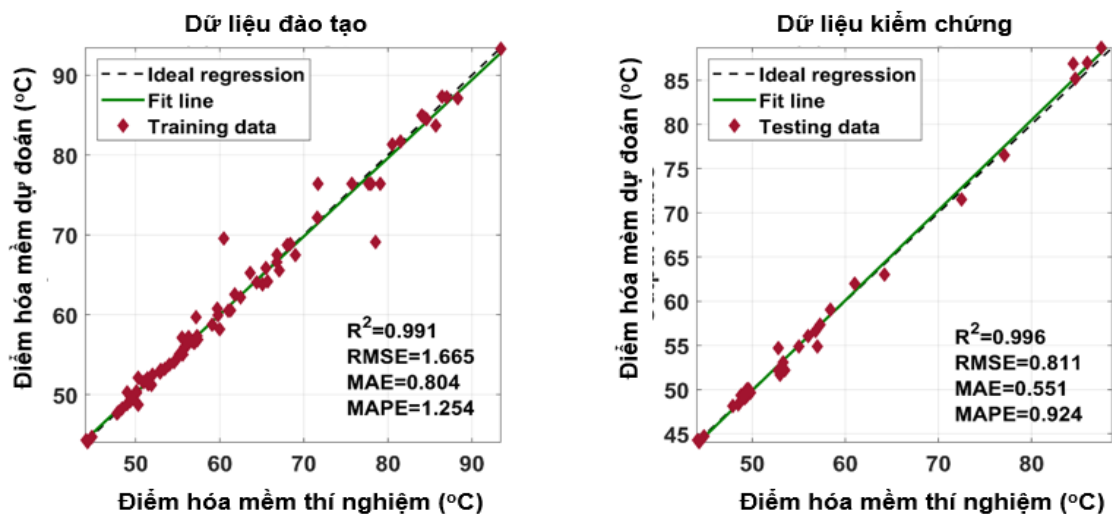


Hình 4.1. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo độ kim lún bằng mô hình ANN.

4.1.2.3. Dự báo điểm hóa mềm

Bộ dữ liệu điểm hóa mềm được xây dựng từ 130 kết quả thí nghiệm từ các nghiên cứu [34], [41], [52], [53], [54], [72], [79], [80], [81], [82], [83]. 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}.

Kết quả dự báo đại diện cấu trúc ANN được đánh giá và hiển thị ở Hình 4.2. Các giá trị được tính toán của hệ số xác định R^2 cho bộ dữ liệu đào tạo và kiểm chứng lần lượt là 0,991 và 0,996, các giá trị RMSE, MAE và MAPE đều rất nhỏ. Kết quả cho thấy mô hình ANN-RP-9-10-1 được đề xuất có khả năng dự báo tốt điểm hóa mềm của N_{GO}.

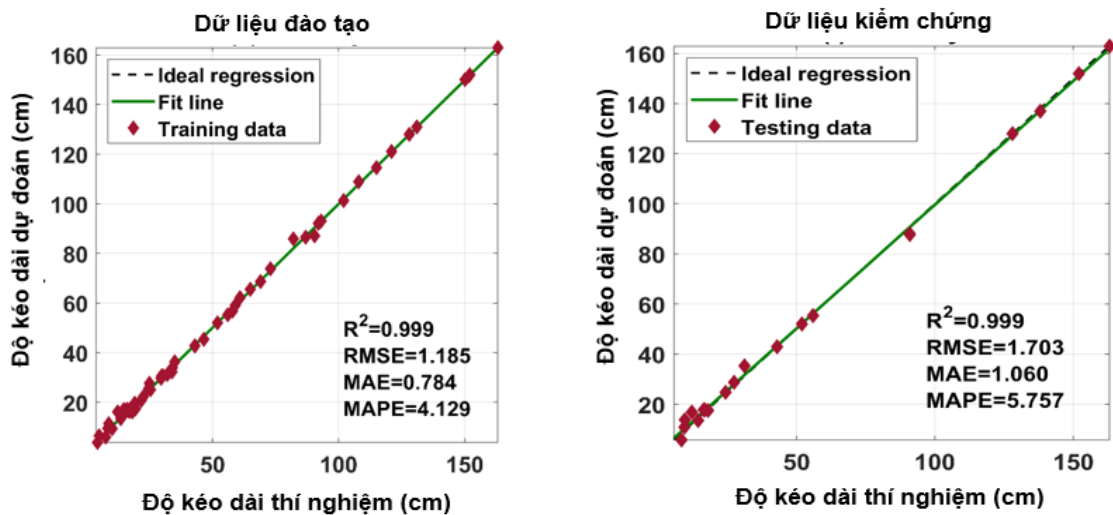


Hình 4.2. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo điểm hóa mềm bằng mô hình ANN.

4.1.2.4. Dự báo độ kéo dài

Bộ dữ liệu độ kéo dài được xây dựng từ 104 kết quả thí nghiệm từ các nghiên cứu [34], [41], [52], [53], [54], [72], [79], [80], [81], [82], [83]. Mô hình ANN được đào tạo bởi thuật toán traingdx với cấu trúc ANN-RP-10-9-1 (với 10-9-1 tương ứng là số nơ ron lớp đầu vào, lớp ẩn, và lớp đầu ra) là mô hình tốt nhất để dự báo độ nhớt của N₂ GO.

Hình 4.3 hiển thị kết quả dự báo đại diện của mô hình tốt nhất. Các giá trị thống kê R^2 , RMSE, MAE, MAPE lần lượt là 0,999; 1,703; 1,060 và 5,757 đối với dữ liệu kiểm chứng cho thấy mô hình ANN-RP-10-9-1 được đề xuất có khả năng dự báo tốt độ kéo dài của N₂ GO.

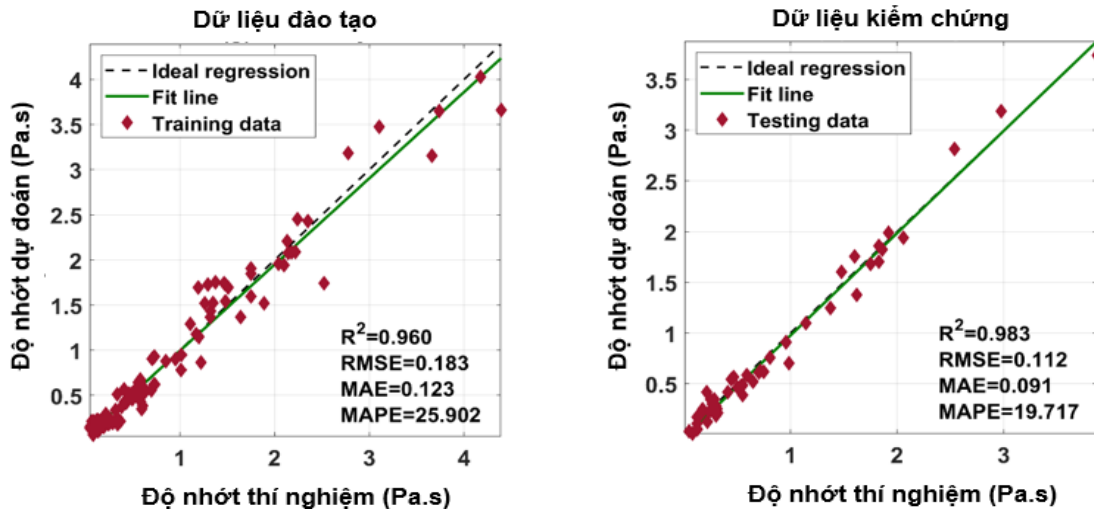


Hình 4.3 Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo độ kéo dài bằng mô hình ANN.

4.1.2.5. Dự báo độ nhớt

Bộ dữ liệu độ nhớt được xây dựng từ 164 kết quả thí nghiệm từ các nghiên cứu [34], [54], [56], [57], [68], [81], [82]. 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 N₂ GO.

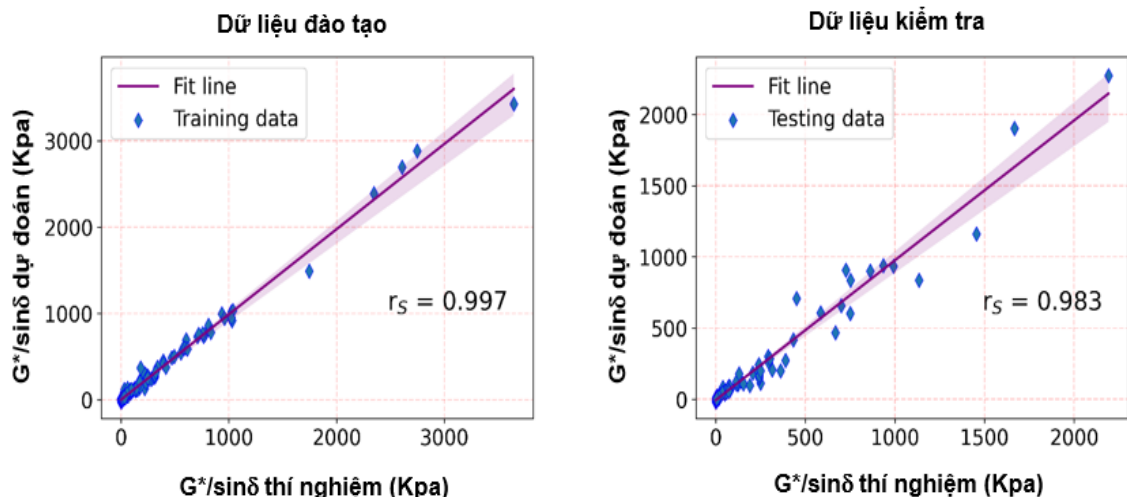
Đồ thị hồi quy của tập dữ liệu đào tạo và kiểm chứng được hiển thị ở Hình 4.4. Khả năng dự báo mạnh mẽ của mô hình ANN-GDX-10-13-1 được chứng minh qua các chỉ tiêu thống kê R^2 , RMSE, MAE, MAPE của dữ liệu kiểm chứng, các giá trị này lần lượt là 0,983; 0,112; 0,091 và 19,717. Do đó, độ nhớt của N₂ GO được dự báo bởi mô hình và độ nhớt thí nghiệm có mối quan hệ tuyến tính chặt chẽ.



Hình 4.4. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo độ nhớt bằng mô hình ANN.

4.1.2.6. Dự báo $G^*/\sin\delta$

Bộ dữ liệu $G^*/\sin\delta$ được xây dựng từ 433 dữ liệu từ các công bố [41], [53], [54] [56], [57], [72], [75], [80]. Nghiên cứu sử dụng thuật toán CGB cùng kỹ thuật xác thực chéo 5 lần trong quá trình đào tạo, xác thực và kiểm chứng mô hình. Sau quá trình tìm kiếm các siêu tham số, mô hình CGB đại diện đạt độ chính xác cao trong giai đoạn đào tạo và kiểm chứng với giá trị r_s lần lượt là 0,997 và 0,983 (Hình 4.5). Như vậy, mô hình CGB đề xuất có khả năng dự báo chính xác $G^*/\sin\delta$ của N_GO .



Hình 4.5. Tương quan giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo $G^*/\sin\delta$ bằng mô hình CGB.

4.1.3. Ứng dụng học máy dự báo tính chất cơ lý của bê tông nhựa sử dụng GO

Với số lượng các nghiên cứu về sử dụng GO trong BTN trên thế giới chưa nhiều nên các chỉ tiêu và số lượng mẫu thí nghiệm còn hạn chế. Căn cứ vào số lượng dữ liệu thu thập được, phần này tiến hành xây dựng một công cụ dự báo MS của BTN_GO, giúp

định hướng cho các nghiên cứu về sau. Đây cũng là chỉ tiêu cơ lý chính dùng trong phương pháp thiết kế Marshall và đánh giá khả năng chịu lực của BTN dưới tác dụng của tải trọng ở nhiệt độ cao.

Bộ dữ liệu MS được xây dựng từ 34 dữ liệu từ các nghiên cứu [33], [34], [42], [68], [82]. Đáng chú ý, các kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này cũng được sử dụng để xây dựng mô hình và được chia thành 2 phần, phần 1 được sử dụng trong quá trình xây dựng mô hình, phần còn lại được sử dụng để kiểm chứng mô hình một cách độc lập.

Để luận chứng cho việc lựa chọn tham số đầu vào của bài toán, một vài thử nghiệm và luận chứng đã được tiến hành như sau:

- Trước tiên, nghiên cứu tiến hành phân tích và đánh giá tác động của các tham số đầu vào đối với kết quả dự báo. Thay đổi bằng cách thêm bớt từng tham số đầu vào một cách độc lập và quan sát sự thay đổi trong kết quả dự báo để đánh giá tác động của từng tham số.
- Thứ hai, phân tích độ nhạy được thực hiện để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các tham số đầu vào đối với kết quả dự báo. Điều này giúp xác định mức độ quan trọng của từng tham số trong quá trình dự báo.
- Thứ ba, sử dụng các phương pháp tối ưu hóa để xác định các tham số đầu vào. Tìm kiếm các giá trị tối ưu của các tham số để cải thiện hiệu suất và độ chính xác của quá trình dự báo.
- Thứ tư, so sánh và phân tích các kết quả dự báo khi sử dụng các tham số đầu vào khác nhau. Đánh giá sự khác biệt và độ tin cậy của kết quả dự báo giữa các mô hình để xác định tham số đầu vào có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất dự báo hay không.
- Cuối cùng, tận dụng kiến thức và kinh nghiệm của các chuyên gia trong lĩnh vực BTN để xác định các tham số quan trọng và có ý nghĩa trong quá trình dự báo.

Như vậy, việc lựa chọn các tham số đầu vào cho bài toán dự báo BTN_GO dựa trên việc nghiên cứu tác động, phân tích độ nhạy, tối ưu hóa, so sánh kết quả dự báo và sử dụng kiến thức chuyên gia, đóng vai trò quan trọng để đảm bảo hiệu suất và độ chính xác trong quá trình dự báo.

Trên cơ sở đó, 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}).

Bảng 4.1 trình bày phân tích thống kê của các biến đầu vào và đầu ra, bao gồm giá trị trung bình, độ lệch chuẩn (Std), giá trị nhỏ nhất (min), giá trị lớn nhất (max), tứ phân vị thứ nhất (25%), tứ phân vị thứ hai (50%) và tứ phân vị thứ ba (75%).

Bảng 4.1. Các biến đầu vào và đầu ra được sử dụng trong quá trình phát triển mô hình.

	TB	Std	Min	25%	50%	75%	Max
Biến đầu vào							
Tỷ lệ GO, %	0,792	0,728	0,000	0,050	1,000	1,000	2,000
Số lớp TB, lớp	2,621	2,031	0,000	1,000	3,000	3,000	7,500
Số lớp max, lớp	4,121	2,881	0,000	1,000	5,000	5,000	10,000
Chiều dày lớp, mm	1,381	1,498	0,000	0,950	1,390	1,390	5,700
KT lớp, μm	16,864	13,933	0,000	1,000	30,000	30,000	30,000
Kim lún, dmm	65,473	3,850	58,000	63,400	68,500	68,500	68,500
OAC, %	5,480	0,653	4,500	4,900	5,500	5,600	6,500
Lọt sàng 2,36, %	38,133	8,395	20,000	31,600	44,000	44,000	44,000
Lọt sàng 4,75, %	52,327	1,653	28,000	49,200	60,000	60,000	60,000
Lọt sàng 9,5, %	84,915	11,568	66,000	75,000	95,000	95,000	95,000
Lọt sàng $\geq 12,5$, %	96,091	5,433	84,000	95,000	100,000	100,000	100,000
Biến đầu ra							
MS	12,548	2,720	5,870	11,530	13,080	14,080	18,040

4.1.3.1. Điều chỉnh siêu tham số của mô hình

Để dự báo MS của BTN_GO, nghiên cứu sử dụng thuật toán CGB. Ngoài ra, hai thuật toán ARO (Artificial Rabbit Optimization) và SFO (Sailfish Optimizer Algorithm) được sử dụng để điều chỉnh siêu tham số của mô hình CGB. Trong thuật toán ARO và SFO, hai tham số quan trọng cần được tìm kiếm là số lần lặp (iterations) và kích thước dân số (population size, ký hiệu là np). Việc lựa chọn hai tham số này có thể tác động đáng kể đến hiệu suất dự báo của thuật toán.

Về chức năng mục tiêu tối ưu hóa, hiệu suất của mô hình CGB để dự báo MS của BTN_GO được đánh giá thông qua hệ số tương quan R của bộ dữ liệu xác thực và kiểm chứng. Tổng hợp quá trình tìm kiếm hai tham số này được trình bày ở Bảng 4.2.

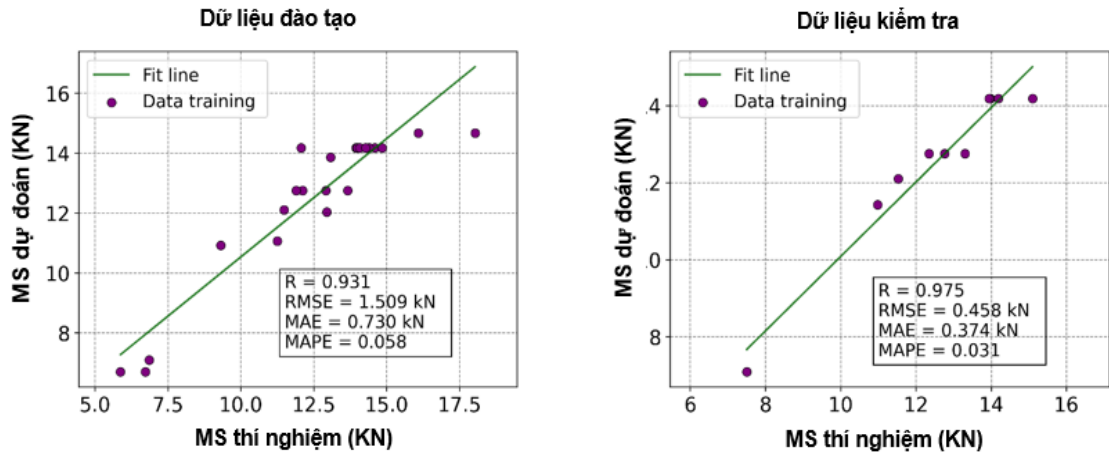
Bảng 4.2. Hiệu suất dự báo của thuật toán ARO và SFO với np khác nhau.

Thuật toán	np	Số lần lặp	R_CV	R_Kiểm chứng
ARO	20	1000	0,811	0,941
SFO	20	1000	0,806	0,944
ARO	30	1000	0,811	0,941
SFO	30	1000	0,796	0,950
ARO	40	1000	0,806	0,943
SFO	40	1000	0,796	0,951

Nhìn chung, cả ARO và SFO đều thể hiện khả năng tối ưu hóa mạnh mẽ và có thể là công cụ hiệu quả để cải thiện hiệu suất của mô hình CGB trong dự báo MS của BTN_GO. Trong nghiên cứu này, tiêu chí để lựa chọn tối ưu hóa cho mô hình CGB dựa trên giá trị R của tập dữ liệu kiểm chứng. Sau khi so sánh hiệu suất của thuật toán ARO và SFO với các np khác nhau, có thể thấy rằng SFO với np = 40 được chọn thể hiện độ chính xác cao nhất trên tập dữ liệu kiểm chứng. Bộ siêu tham số tốt nhất trong trường hợp này được xác định là learning_rate (η) = 0,272, n_estimators (ne) = 9, max_depth (md) = 2, min_samples_split (mss) = 2, and min_samples_leaf (msl) = 2. Đây là những siêu tham số quan trọng ảnh hưởng đến hiệu suất dự báo của mô hình CGB.

4.1.3.2. Kết quả dự báo của mô hình CGB tốt nhất

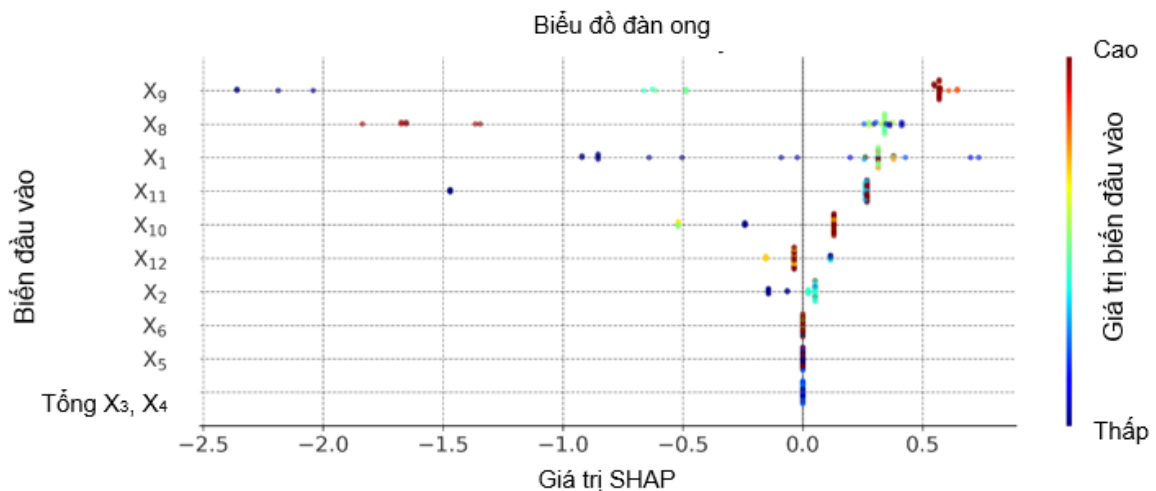
Phần này trình bày kết quả dự báo đại diện của mô hình bằng cách trực quan hóa các đường cong hồi quy. Biểu đồ Hình 4.6 minh họa mối quan hệ giữa giá trị dự báo và giá trị thí nghiệm của MS cho từng tập dữ liệu. Có thể thấy rằng, mô hình CGB thể hiện độ chính xác dự báo cho cả tập dữ liệu đào tạo và kiểm tra, với giá trị R lần lượt là 0,931 và 0,975, trong khi các giá trị RMSE, MAE và MAPE có giá trị rất nhỏ.



Hình 4.6. Tương quan giá trị thử nghiệm và giá trị dự báo MS bằng mô hình CGB.

4.1.3.3. Phân tích độ nhạy

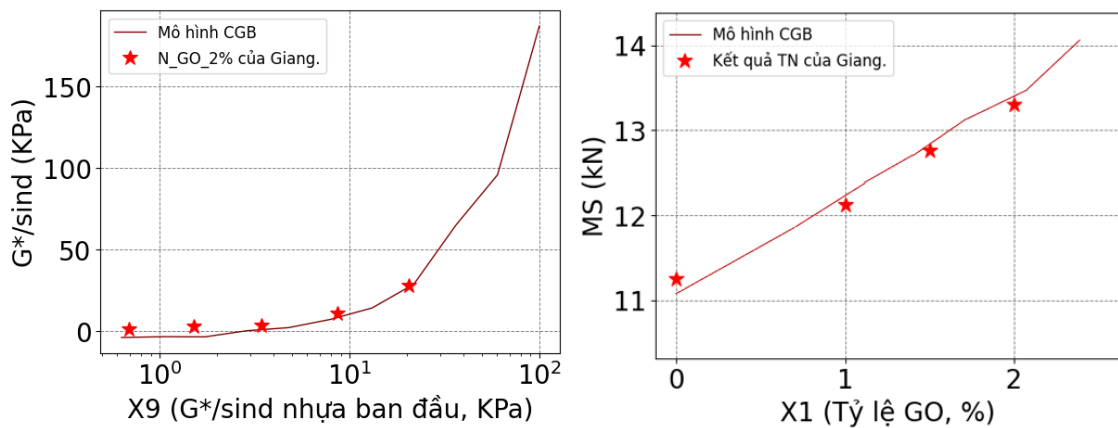
Phần này tiến hành phân tích độ nhạy bằng cách sử dụng các giá trị SHAP (SHapley Additive exPlanations). Phân tích SHAP giúp xác định tham số đầu vào nào đó có tác động đáng kể nhất đến dự báo và cách chúng ảnh hưởng đến hiệu suất của mô hình. Nghiên cứu sử dụng biểu đồ đàn ong để biểu thị sự phân bố các giá trị SHAP cho từng biến đầu vào. Màu sắc của điểm cho biết giá trị của biến, trong khi vị trí của điểm trên trục hoành biểu thị giá trị SHAP. Giá trị dương biểu thị tác động tích cực đến đầu ra của mô hình và giá trị âm biểu thị tác động tiêu cực. Ảnh hưởng của từng biến đến MS của BTN_GO được sắp xếp theo mức độ giảm dần từ trên xuống dưới và thể hiện ở Hình 4.7. Theo đó, hàm lượng nhựa tối ưu (X_8), hàm lượng GO (X_1), hàm lượng lọt sàng 2,36 mm (X_9), sàng 9,5 mm (X_{11}), sàng 4,75 mm (X_{10}), và sàng 12,5 mm (X_{12}) là những tham số ảnh hưởng lớn nhất đến MS của BTN_GO.



Hình 4.7. Biểu đồ SHAP trong phân tích độ nhạy MS.

4.1.4. So sánh kết quả dự báo theo học máy với kết quả thí nghiệm

Để xác minh tính chính xác và độ tin cậy của các mô hình ML, phần này mô tả so sánh nhiều mẫu thử nghiệm của nghiên cứu này với kết quả dự báo bằng các mô hình ML. Trong mỗi hình, duy nhất một biến thay đổi, các biến còn lại được giữ cố định. Trục hoành hiển thị các giá trị của biến thay đổi, giá trị biến đầu ra được hiển thị trên trục tung. Các đường nét liền biểu thị kết quả dự báo bằng các mô hình, biểu tượng ngôi sao hiển thị kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu này. Hình 4.8 minh họa cho mối tương quan giữa ML và kết quả thực nghiệm của nghiên cứu. Kết quả thể hiện trên hình cho thấy các mẫu thí nghiệm nằm rất sát với đường mô hình. Điều này chứng tỏ tính chính xác và độ tin cậy của các mô hình dự báo một số tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO.



Hình 4.8. So sánh kết quả dự báo theo ML với kết quả thí nghiệm.

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. Điều này đặc biệt hữu ích cho các kỹ sư vật liệu trong các nghiên cứu về sau. Minh họa cho giao diện GUI trong dự báo tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO hiển thị lần lượt ở Hình 4.9, Hình 4.10, cách tạo và hướng dẫn sử dụng GUI được trình bày ở Phụ lục 9.

Hàm lượng GO (%)	1.45
Số lớp GO (lớp)	4
Chiều dày lớp GO (nm)	7.44
Đường kính bên trung bình (um)	12.2
Nhiệt độ trộn (°C)	133.5
Vận tốc trộn (rpm)	2653
Thời gian trộn (phút)	35.2
Kiểu hóa già	1
HS hần lún của nhựa đường ban đầu (kPa)	1251.045

Clear Submit

Hệ số hần lún của N_GO (kPa)

[1555.16411354]

Flag

Hình 4.9. Giao diện GUI trong dự báo nhanh $G^*/\sin\delta$ của N_GO.

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.

Như vậy, để đánh giá kết quả khi sử dụng ML trong dự báo tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO, một số tóm tắt các kết quả đánh giá được đưa ra như sau:

- Hiệu suất: Hệ thống dự báo đã hoạt động với hiệu suất cao trong việc dự báo tính chất cơ lý N_GO và BTN_GO. Cụ thể, R^2 lớn nhất là 0,999 cho N_GO và $R = 0,975$ cho BTN_GO, trong khi sai số RMSE nhỏ nhất là 0,112 và 0,458 tương ứng với N_GO và BTN_GO. Các thuật toán ML đã tối ưu hóa quy trình dự báo và cho phép xử lý số lượng lớn dữ liệu một cách nhanh chóng và chính xác.
- Độ chính xác: Hệ thống dự báo đã đạt được độ chính xác cao trong việc dự báo tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO. Các kết quả dự báo được so sánh với các giá trị thực tế đã biết và đạt mức độ tương đồng cao.
- Độ phù hợp: Phương pháp dự báo dựa trên ML cho thấy sự phù hợp và khả năng ứng dụng trong dự báo tính chất N_GO và BTN_GO. Sự tương quan giữa kết quả dự báo và giá trị thực tế được kiểm chứng và cho thấy sự phù hợp đáng kể.

4.1.5. Lợi ích của học máy trong dự báo tính chất cơ lý vật liệu

Từ các kết quả nghiên cứu bên trên cho thấy, ứng dụng thực tế ML trong dự báo các tính chất cơ lý của N_GO và BTN_GO có thể được kết hợp với GUI đã được tạo để đạt được các lợi ích sau:

- Dự báo chính xác và nhanh chóng: Sử dụng ML cho dự báo tính chất cơ lý vật liệu giúp cải thiện độ chính xác và tốc độ của quá trình dự báo. Các mô hình ML có khả năng học từ dữ liệu và phát triển các mô hình dự báo tự động, giúp đạt được kết quả dự báo chính xác và nhanh chóng hơn.
- Tăng cường khả năng tương tác người dùng: GUI cung cấp một giao diện trực quan và dễ sử dụng cho người dùng để nhập dữ liệu và tương tác với hệ thống dự báo. Khi kết hợp ML, GUI có thể hiển thị kết quả dự báo theo cách dễ hiểu và thân thiện với người dùng, giúp tăng cường khả năng tương tác và sử dụng của hệ thống.
- Tối ưu hóa quy trình dự báo: ML có thể tối ưu hóa quy trình dự báo bằng cách tự động tìm ra các mô hình và tham số tối ưu cho dự báo tính chất cơ lý. Kết hợp với GUI, người dùng có thể thực hiện tùy chỉnh và điều chỉnh các tham số đầu vào để tìm kiếm kết quả tốt nhất, tối ưu hóa hiệu suất của quy trình dự báo.

- Quản lý và truy cập dữ liệu dễ dàng: GUI cung cấp một giao diện cho phép người dùng quản lý và truy cập dễ dàng vào dữ liệu liên quan đến tính chất cơ lý vật liệu. Điều này giúp thu thập và tổ chức dữ liệu một cách hiệu quả, tạo điều kiện cho việc đào tạo và xử lý dữ liệu bởi các mô hình ML.

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). Kết cấu áo đường của các tuyến đường QL ở nước ta thường gặp một số dạng điển hình như sau:

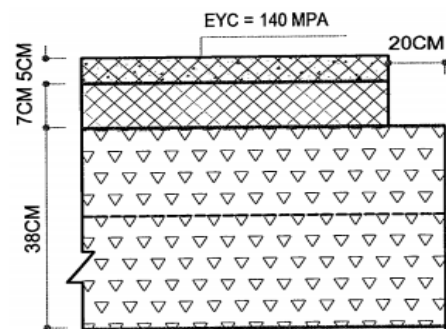
4.2.1.1. KCAĐ trên các tuyến quốc lộ có $E_{yc} \geq 140-155 \text{ MPa}$

KCAĐ cho các tuyến đường này thông thường bao gồm các lớp:

- Tầng mặt gồm 2 lớp BTN với tổng chiều dày từ 12 cm;
- Tầng móng là cấp phối đá dăm (CPĐĐ) loại 1 và CPĐĐ loại 2 với tổng chiều dày khoảng $40 \div 45 \text{ cm}$.
- Lớp đáy áo đường là đất đồi, cát có độ chặt $K \geq 0,98$, chiều dày từ $30 \div 50 \text{ cm}$.

Ví dụ 1: QL6 thuộc địa phận tỉnh Hòa Bình và đoạn tuyến tránh Thành phố Sơn La có $E_{yc} = 140 \text{ MPa}$, được thiết kế theo tiêu chuẩn đường cấp III với tổng chiều dày từ $50 \div 52 \text{ cm}$, bao gồm các lớp như sau:

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. BTNC 12,5: | 5 cm |
| Tưới nhựa dính bám: | $0,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 2. BTNC 19: | 7 cm |
| Tưới nhựa thấm bám: | $1,0 \text{ kg/m}^2$ |
| 3. CPĐĐ loại 1: | 15 cm |
| 4. CPĐĐ loại 2: | $23 \div 25 \text{ cm}$ |



Ví dụ 2: QL32 có $E_{yc} \geq 140 \text{ MPa}$, được thiết kế với tổng chiều dày 57 cm , bao gồm các lớp như sau:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1. BTNC 12,5: | 5 cm |
| Tưới nhựa dính bám: | $0,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 2. BTNC 19: | 7 cm |

Tưới nhựa thấm bảm: $1,0 \text{ kg/m}^2$

3. CPĐĐ loại 1: 15 cm

1. CPĐĐ loại 2: 30 cm

4.2.1.2. KCAĐ trên các tuyến quốc lộ có $E_{yc} \geq 160 \div 180 \text{ MPa}$ [9]

KCAĐ cho các tuyến đường này thông thường bao gồm:

- Tầng mặt gồm 2 lớp BTN với tổng chiều dày từ $12 \div 13 \text{ cm}$
- Tầng móng là CPĐĐ loại 1 và CPĐĐ loại 2 với tổng chiều dày $60 \div 65 \text{ cm}$
 Tổng chiều dày KCAĐ: $H = 70 \div 80 \text{ cm}$. Nếu thay thế một phần CPĐĐ bằng CPĐĐ gia cố xi măng thì $H = 50 \div 60 \text{ cm}$.
- Lớp đáy áo đường là đất đồi, cát có độ chặt $K \geq 0,98$, chiều dày từ $30 \div 50 \text{ cm}$.

Ví dụ 3: QL1A có $E_{yc} \geq 160 \text{ MPa}$, được thiết kế với tổng chiều dày từ $75 \div 78 \text{ cm}$ áp dụng cho các tuyến tránh thành phố, phần mở rộng và chiều dày lớp tăng cường trên mặt đường cũ $> 50 \text{ cm}$. Từ trên xuống dưới, KCAĐ có 2 dạng sau:

Kết cấu 1

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1. BTNC 12,5: | 6 cm |
| Tưới nhựa dính bảm: | $0,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 2. BTNC 19: | 7 cm |
| Tưới nhựa thấm bảm: | $1,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 3. CPĐĐ loại 1: | 30 cm |
| 4. CPĐĐ loại 2: | 35 cm |

Kết cấu 2

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1. BTNC 12,5: | 6 cm |
| Tưới nhựa dính bảm: | $0,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 2. BTNC 19: | 6 cm |
| Tưới nhựa thấm bảm: | $1,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 3. CPĐĐ loại 1: | 60 cm |

Ví dụ 4: QL3 đoạn qua Thái Nguyên có $E_{yc} \geq 171,6 \text{ MPa}$, được thiết kế với tổng chiều dày 60 cm, bao gồm các lớp như sau:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1. BTNC 12,5: | 5 cm |
| Tưới nhựa dính bảm: | $0,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 2. BTNC 19: | 7 cm |
| Tưới nhựa thấm bảm: | $1,5 \text{ kg/m}^2$ |
| 3. CPĐĐ loại 1: | 32 cm |
| 4. CPĐĐ loại 2: | 36 cm |

Như vậy, các tuyến QL ở Việt Nam dù là xây dựng mới hay nâng cấp cải tạo thường có cấu tạo thành phần các lớp tương đối giống nhau, chỉ khác nhau về số lớp và chiều dày mỗi lớp tùy theo lưu lượng xe, điều kiện địa chất, và nguồn vật liệu xây dựng ở mỗi tuyến. Cụ thể:

- Tầng mặt: Được cấu tạo từ 1 ÷ 2 lớp BTNC rải nóng, có hoặc không có lớp BTN chức năng trên cùng, chiều dày tầng mặt thông thường từ 12 ÷ 14 cm.
- Tầng móng: Được chia thành lớp móng trên và móng dưới. Lớp móng trên thường dùng CPDD loại 1 có hoặc không gia cố xi măng, hoặc dùng cấp phối đá gia cố nhựa. Lớp móng dưới có thể dùng CPDD loại 1, CPDD 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 $K \geq 0,98$.

4.2.2. Đề xuất kết cấu áo đường mềm có bê tông nhựa sử dụng GO làm lớp mặt

Trên cơ sở phân tích KCAĐ điển hình ở một số tuyến đường QL ở Việt Nam, để so sánh và đánh giá BTN_GO khi ứng dụng làm lớp mặt, nghiên cứu lựa chọn KCAĐ của QL6 với một số điều chỉnh như sau:

- Lớp mặt: Kết cấu đối chứng gồm BTNC 12,5 (BTN_60/70) dày 5cm, BTNC 19 dày 7 cm; kết cấu mới thay thế BTN_60/70 bằng BTN_GO_2% với chiều dày do tính toán quyết định sao cho hai kết cấu có E_{ch} tương đương nhau, lớp dưới là BTNC 19 với chiều dày không đổi;
- Lớp móng: Kết cấu đối chứng và kết cấu có BTN_GO đều sử dụng lớp móng trên là CPDD loại 1 dày 15 cm, CPDD loại 2 dày 25 cm;
- Lớp đáy móng: Theo mục 4.4 và 5.9 của TCCS 38:2022/TCĐBVN [4] “*Phải bố trí lớp đáy móng thay thế nền đường trên cùng khi đường có lưu lượng giao thông nặng, trục xe $\geq 3 \times 10^6$ (hoặc đường cấp III trở lên). Vật liệu lớp đáy móng có thể là cấp phối sỏi đồi, cấp phối sỏi suối, đất hoặc cát gia cố chất vô cơ, hỗn hợp đá thải*” và “*Lớp đáy móng được bố trí với chiều dày tối thiểu là 30 cm*”. QL6 thuộc đường cấp III, do vậy lớp đáy móng được thiết kế thêm là cấp cấp phối thiên nhiên có chiều dày 30 cm cho cả hai kết cấu.

Chi tiết cấu tạo và chiều dày 2 KCAĐ được trình bày ở Bảng 4.3.

Bảng 4.3. Kết cấu áo đường sử dụng BTN_GO và kết cấu đối chứng.

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%	-	TK
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

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

Hiện nay ở Việt Nam, tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN được áp dụng để tính toán, kiểm toán chiều dày các lớp vật liệu cho hầu hết các tuyến đường sử dụng KCAĐ mềm. Đây là một phương pháp thiết kế dựa trên lý thuyết cơ học, việc tính toán dựa theo kết quả phân tích trạng thái ứng suất – biến dạng của áo đường, từ đó kiểm toán các trạng thái giới hạn của áo đường.

Vì vậy, nghiên cứu sử dụng tiêu chuẩn TCCS 38:2022 để phân tích, đánh giá khi đưa BTN_GO_2% vào KCAĐ thay thế vật liệu BTN_60/70 cho 2 kết cấu được đề xuất ở Bảng 4.3. Thông số đặc trưng của các lớp vật liệu được thể hiện ở Bảng 4.4. Cần chú ý rằng, các thông số về mô đun đàn hồi tĩnh và cường độ kéo uốn của BTN_GO_2% và BTN_60/70 là các giá trị đặc trưng đã điều chỉnh theo độ tin cậy yêu cầu 95% và lấy theo kết quả ở Chương 3 (mục 3.5.4 và 3.6.4). Các thông số tính toán của BTNC 19, CPĐĐ loại 1, CPĐĐ loại 2, CP thiên nhiên và nền đất tham khảo theo TCCS 38:2022/TCĐBVN và tài liệu [14].

QL6 có $E_{yc} = 140\text{MPa}$, chọn hệ số độ tin cậy 95%, hệ số an toàn về cường độ $K_{cd}^{dv} = 1,17$, xác định được $E_{yc} * K_{cd}^{dv} = 163,80\text{MPa}$. Kết quả kiểm toán hai kết cấu được thể hiện ở Bảng 4.5.

Bảng 4.4. Thông số đặc trưng của các lớp vật liệu của 2 kết cấu.

TT	Vật liệu	E (MPa)			R _{ku} (MPa)	C (MPa)	φ (°)
		Kéo uốn	Võng đàn hồi	Trượt			
1	BTN_60/70	685,63	436,57	224,79	5,490		
2	BTN_GO_2%	911,10	583,64	292,29	6,447		
3	BTNC 19	799,08	379,33	255,67	3,050		
4	CPĐD loại 1	300,00	300,00	300,00			
5	CPĐD loại 2	250,00	250,00	250,00			
6	CP thiên nhiên	200,00	200,00	200,00			
7	Nền đất (á cát nhẹ)	50				0,02	30

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

TT	Lớp vật liệu	Chiều dày các lớp KCAĐ, cm	
		KC1	KC2
1	BTN_60/70	5	-
2	BTN_GO_2%	-	4
3	BTNC 19	7	7
4	CPĐD loại 1	15	15
5	CPĐD loại 2	25	25
6	CP thiên nhiên	30	30
TT	Nội dung kiểm toán	KC1	KC2
1	Kiểm toán theo tiêu chuẩn độ võng đàn hồi	Đạt	Đạt
	$E_{yc} * K_{cd}^{dv}$ (MPa)	163,80	163,80
	E_{ch} (MPa)	187,40	187,72
2	Kiểm toán theo tiêu chuẩn cắt trượt trong nền đất	Đạt	Đạt
	C_{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)	0,0144	0,0144
	$T_{ax} + T_{av}$ (MPa)	0,0019	0,0021
3	Kiểm toán theo tiêu chuẩn kéo uốn trong các lớp BTN	Đạt	Đạt
	<i>a. Lớp BTN_60/70</i>		
	R_{ku}^{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)	3,007	
	σ_{ku} (MPa)	0,689	

	<i>b. Lớp BTN_GO_2%</i>		
	R_{ku}^{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)		3,532
	σ_{ku} (MPa)		0,821
	<i>c. Lớp BTNC 19</i>		
	R_{ku}^{tt}/K_{cd}^{tr} (MPa)	1,671	1,671
	σ_{ku} (MPa)	0,673	0,724

Từ kết quả kiểm toán hai KCAĐ mềm theo TCCS 38:2022 có thể rút ra nhận xét: Do BTN_GO_2% có mô đun đàn hồi tĩnh lớn hơn đáng kể so với BTN_60/70 nên có thể giảm chiều dày so với BTN_60/70. Cụ thể, khi sử dụng lớp BTN_GO_2% thay thế cho lớp BTN_60/70 làm lớp mặt trên các tuyến đường QL có $E_{yc} \geq 140$ 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.

Nhìn chung, việc tính toán và kiểm toán KCAĐ theo phương pháp lý thuyết cơ học nói chung và TCCS 38:2022 nói riêng có ưu điểm là đơn giản, nhanh chóng, không cần phần mềm tính toán chuyên dụng. Tuy nhiên, phương pháp này cũng tồn tại những hạn chế nhất định như: các tính toán, kiểm toán chưa phù hợp với điều kiện làm việc thực tế của mặt đường dưới tác động đồng thời của các yếu tố tải trọng và khí hậu, liên tục thay đổi theo thời gian trong suốt quá trình khai thác; chưa đưa ra được các thông số đánh giá tình trạng hư hỏng và tình trạng bề mặt của KCAĐ trong quá trình khai thác. Đây là những lý do chính khiến cho việc xây dựng phương pháp thiết kế lý thuyết cơ học cho đến nay vẫn còn nhiều tồn tại chưa giải quyết được.

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

Hiện nay, phương pháp cơ học thực nghiệm (M-E) là phương pháp tiên tiến nhất trên thế giới trong thiết kế, phân tích KCAĐ và được áp dụng ở nhiều bang nước Mỹ, Canada. Thiết kế KCAĐ mềm theo phương pháp M-E là quá trình mô phỏng sự tác động của tải trọng và khí hậu sát nhất với điều kiện thực tế lên KCAĐ lựa chọn, thông qua quá trình phân tích trạng thái ứng xử của kết cấu áo đường, tính toán được các ứng suất, biến dạng, chuyển vị tương ứng. Từ kết quả phân tích KCAĐ, xây dựng các hàm dự báo các loại hình hư hỏng của kết cấu áo đường và độ êm thuận của mặt đường thông qua chỉ số độ gồ ghề quốc tế (International Roughness Index – IRI). Các hàm dự

báo này được hiệu chỉnh với cơ sở dữ liệu thu thập về tình trạng mặt đường khai thác thực tế (Long Term Pavement Performance – LTPP) nên có độ tin cậy cao.

Nguyên lý thiết kế theo M-E là lựa chọn KCAĐ ban đầu, phân tích kết cấu và đưa ra dự báo các hư hỏng và tình trạng mặt đường. Kết quả dự báo sẽ được đối chiếu với các giá trị quy định (giá trị giới hạn) sử dụng cho dự án, làm cơ sở điều chỉnh kết cấu ban đầu, tối ưu hóa chiều dày vật liệu sử dụng, đáp ứng được các chỉ tiêu yêu cầu.

So với các phương pháp tính toán áo đường theo lý thuyết cơ học, phương pháp M-E có nhiều ưu điểm như:

- Các thông số đầu vào của chương trình thiết kế phù hợp với điều kiện làm việc của KCAĐ do có xét đến các yếu tố tải trọng, chế độ thủy nhiệt của đường, thông số cơ học của vật liệu áo đường;
- Dự báo ứng xử của KCAĐ mềm trong quá trình khai thác theo thời gian phục vụ thông qua các chỉ tiêu như chỉ số IRI, nứt, lún vệt bánh xe.

Trong phần này, phần mềm Darwin-ME 2.3.1 được sử dụng để phân tích 2 kết cấu được lựa chọn ở bên trên. Các số liệu về giao thông được khảo sát và lựa chọn đặc trưng quy mô giao thông trên các tuyến đường QL và cao tốc ở Việt Nam; các số liệu về khí hậu thu thập đặc trưng cho Hòa Bình; số liệu các lớp vật liệu được lấy theo Chương 3.

4.4.1. Các số liệu về giao thông

Phương pháp M-E sử dụng dữ liệu về lưu lượng xe tải trung bình hàng ngày cho năm đầu tiên (N_0) và tỷ lệ của từng loại xe trong các phân tích kết cấu [38]. Dữ liệu này được phân chia thành 13 nhóm để hỗ trợ quá trình tính toán thiết kế. Tại Việt Nam, từ các kết quả khảo sát giao thông trên một số tuyến QL mô tả, tài liệu [19] đã phân loại các loại xe trong dòng giao thông thành 5 nhóm dựa trên loại xe, tải trọng trục và số trục xe. Cụ thể, các nhóm xe bao gồm N_5 , N_6 , N_8 , N_9 và N_{10} tương ứng với loại 5, loại 6, loại 8, loại 9 và loại 10 theo tiêu chuẩn AASHTO [19], [38]. Thông tin chi tiết về các nhóm xe được trình bày trong Bảng 4.6.

QL6 được thiết kế với chuẩn đường cấp III đồng bằng gồm 4 làn xe, thời hạn thiết kế 15 năm, tổng lưu lượng xe ở năm đầu khai thác và hệ số tăng trưởng xe hàng năm được thể hiện trong Bảng 4.7.

Bảng 4.6. Phân loại xe trong phương pháp M-E ở Việt Nam [19].

Nhóm xe	Mô tả	Đặc tính	Các ký hiệu và xe tương đương
5		Xe tải loại trung 2 trục Trục trước bánh đơn Trục sau bánh kép	R11; P11
6		Xe tải loại 3 trục Trục trước bánh đơn Trục sau (2 trục) bánh kép	R12; P12 SU-12; SU-40
8		Xe container loại 4 trục <i>Đầu kéo 2 trục:</i> Trục trước bánh đơn Trục sau bánh kép <i>Mooc kéo theo 2 trục:</i> Trục sau bánh kép	TR11S2 2S2 WB-40; WB-20
9		Xe container loại 5 trục <i>Đầu kéo 3 trục:</i> Trục trước bánh đơn Trục sau (2 trục) bánh kép <i>Mooc kéo theo 2 trục:</i> Trục sau bánh kép	TR12S2 3S2 WB-62
10		Xe container loại 6 trục <i>Đầu kéo 3 trục:</i> Trục trước bánh đơn Trục sau (2 trục) bánh kép <i>Mooc kéo theo 3 trục:</i> Trục sau bánh kép	TR12S3 3S3 WB-67

Bảng 4.7. Tỷ lệ thành phần các dòng xe và hệ số tăng trưởng xe hàng năm.

Loại xe	Nhóm xe	Lưu lượng xe năm đầu (xe/ng.đ)	Tỷ lệ (%)	Hệ số tải trọng	Hệ số tăng trưởng (%)
Xe khách nhỏ	N ₅	155	73,03	0,3497	4,5
Xe khách lớn		245			4,5
Xe tải nhẹ 2 trục		102			4,5
Xe tải trung 2 trục		99			4,5
Xe tải 3 trục	N ₆	100	14,60	0,5951	4,5
Xe tải 4 trục	N ₈	50	7,30	0,7707	4,5
Xe container 5 trục	N ₉	15	2,19	0,9735	4,5
Xe container 6 trục	N ₁₀	20	2,92	2,0791	4,5
Tổng		686	100		

Từ Bảng 4.7, nghiên cứu tính toán được tổng số xe tích lũy vào cuối mỗi giai đoạn đánh giá và được thể hiện ở Bảng 4.8.

Bảng 4.8. Số xe nặng tích lũy trong phân tích M-E.

Thời gian (năm)	Số xe nặng tích lũy (xe)		
2025 (năm đầu)	686	1.000	2000
2032 (7 năm)	970.300	1.141.430	2.828.860
2040 (15 năm)	2.224.840	3.243.200	6.486.410

4.4.2. Các số liệu về khí hậu:

Các số liệu về điều kiện khí hậu bao gồm lượng mưa, nhiệt độ, độ ẩm tương đối, tốc độ gió và ánh nắng mặt trời đang có ảnh hưởng rất lớn đến ứng xử của vật liệu mặt đường. Những số liệu này được thu thập trong khoảng 2 năm từ trạm khí tượng Hòa Bình và đã được xây dựng thành tệp dữ liệu khí hậu đầu vào. Tệp dữ liệu này đóng vai trò quan trọng trong việc dự báo nhiệt độ và độ ẩm trong quá trình thiết kế KCAĐ.

4.4.3. Lựa chọn các kết cấu áo đường

Hai kết cấu áo đường đề xuất trong mục 4.2 (KC1, KC2) được sử dụng để phân tích theo phương pháp M-E.

4.4.4. Các thông số của vật liệu

- Các đặc trưng thể tích và thông số $|E^*|$ của BTN_60/70 và BTN_GO_2% được lấy từ kết quả nghiên cứu và tính toán từ các đường cong chủ tương ứng ở nhiệt độ và tần số yêu cầu trong Chương 3;
- Thông số $|E^*|$ của BTNC 19 tham khảo từ nghiên cứu [13];
- Các thông số vật liệu của cấp phối đá dăm, cấp phối thiên nhiên và đất nền tham khảo theo TCCS 38:2022/TCĐBVN [4].

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

Trong phần này, các số liệu về khí hậu, thông số vật liệu của các lớp, số liệu giao thông theo M-E được sử dụng đưa vào phần mềm Darwin-ME [49] để phân tích KC1 và KC2. Kết quả phân tích KCAĐ theo phương pháp 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 $N_0 = 686$ xe/nd.

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC2	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề cuối cùng của mặt đường IRI (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 do mỏi 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 do mỏi 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 $N_0 = 1.000$ xe/nd.

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC2	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề cuối cùng của mặt đường IRI (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 do mỏi 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 do mỏi 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 4.11. Kết quả phân tích kết cấu theo M-E với $N_0 = 2000$ xe/nd.

TT	Chỉ tiêu đánh giá	Tiêu chuẩn	KC1		KC2	
			Giá trị	Đánh giá	Giá trị	Đánh giá
1	Độ gồ ghề cuối cùng của mặt đường IRI (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 do mỏi 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 do mỏi 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.

Như vậy, với kết quả phân tích KCAĐ theo TCCS 38:2022/TCĐBVN và phương pháp M-E cho thấy, BTN_GO khi được ứng dụng làm lớp mặt trên của KCAĐ mềm không những làm giảm 20% chiều dày của lớp mặt trên mà còn giảm LVBX của toàn KCAĐ và LVBX trong các lớp BTN.

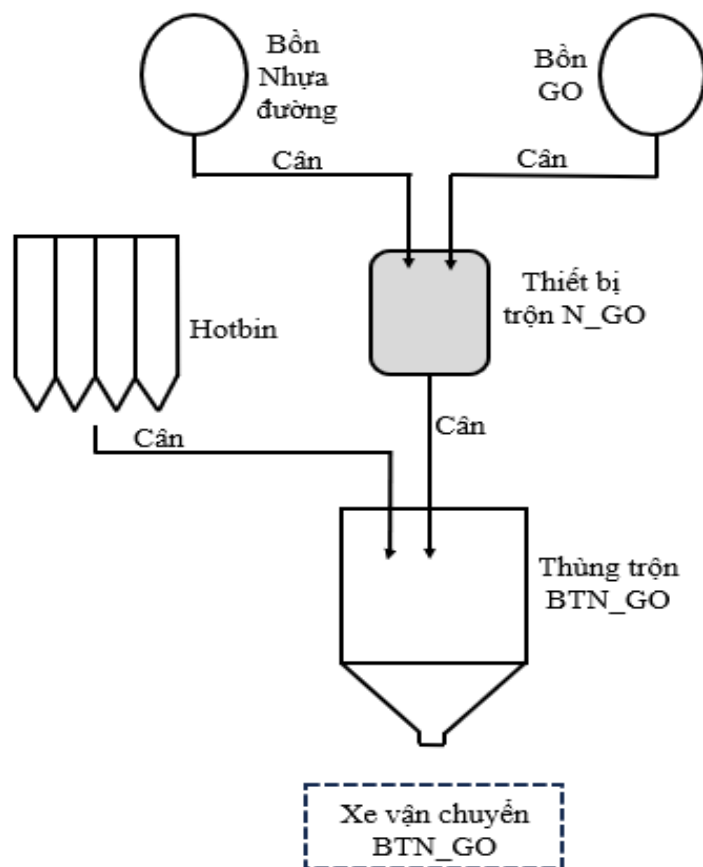
4.5. Đề xuất hướng chế tạo bê tông nhựa sử dụng graphen oxit ở ngoài trạm trộn

Hiện nay, công nghệ chế tạo BTN_GO ngoài thực tế chưa được ban hành thành tiêu chuẩn cũng như chưa có công trình nào nghiên cứu do đây là vật liệu mới trong BTN, đang trong giai đoạn nghiên cứu kỹ thuật. 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. Chất kết dính N_GO có thể được sản xuất tại nhà máy (quy trình như trong phòng thí nghiệm) rồi vận chuyển đến trạm trộn để sản xuất BTN_GO. Khi N_GO sản xuất tại trạm trộn, cần bố trí thêm thiết bị trộn N_GO và không gây cản trở đối với việc sản xuất BTN thông thường. Căn cứ vào kết quả nghiên cứu thông số trộn N_GO ở chương 2 (nhiệt độ 150°C, vận tốc 2000 vòng/phút, và thời gian 20 phút), nghiên cứu đề xuất một số nội dung chính trong sản xuất N_GO và BTN_GO ở trạm trộn 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. Các cửa cấp vật liệu cần phải có nắp đậy kín nhằm tránh thất thoát GO và nhiệt độ trong quá trình khuấy trộn.

- GO được đưa vào thiết bị trộn N_GO một cách tự động theo khối lượng tính toán trước, 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 gian cốt liệu xả từ Hotbin xuống thùng trộn phải được tính toán sao cho N_GO sau khi sản xuất xong được đưa vào thùng trộn và trộn đều 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. Đây là nhiệt độ đã được tính toán và lựa chọn ở chương 3. 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 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 (Hình 4.11).



Hình 4.11. Hướng chế tạo BTN_GO ở trạm trộn.

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, NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

Nghiên cứu được thực hiện theo hướng kế thừa và phát triển thêm so với các nghiên cứu trên thế giới về sử dụng vật liệu mới GO trong cải thiện một số đặc tính của BTN. Bằng phương pháp nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm trong phòng kết hợp ứng dụng ML, các thiết bị thí nghiệm hiện đại, số liệu thí nghiệm được phân tích thống kê, các phương pháp thiết kế và phân tích KCAĐ mềm hiện đại, luận án đã có một số đóng góp mang tính mới về mặt khoa học và thực tiễn như sau:

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 thời gian lưu trữ N_GO, BTN_GO ở trạm trộn và công nghệ thi công BTN_GO ngoài hiện trường.
2. Nghiên cứu ứng dụng phương pháp M-E để phân tích ứng xử của KCAĐ mềm sử dụng BTN_GO trong KCAĐ có lớp móng và lớp mặt dưới khác nhau.
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.

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 Thuận (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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

A. TIẾNG VIỆT

- [1] Bộ Giao thông vận tải (2014), Thông tư 27/2014/TT-BGTVT, *Quy định về quản lý chất lượng vật liệu nhựa đường sử dụng trong xây dựng công trình giao thông*.
- [2] Bộ Giao thông Vận tải (2014), *Quyết định 858/QĐ-BGTVT, Hướng dẫn áp dụng hệ thống các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành nhằm tăng cường quản lý chất lượng thiết kế và thi công mặt đường BTN nóng đối với các tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn*.
- [3] Bộ Giao thông Vận tải (2014), *Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT, Ban hành quy định kỹ thuật về phương pháp thử độ sâu vệt hằn bánh xe của bê tông nhựa xác định bằng thiết bị wheel tracking*.
- [4] Bộ Giao thông Vận tải (2022), *TCCS 38:2022/TCĐBVN, Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế*.
- [5] Bộ Khoa học và Công nghệ (2005), TCVN 7493:2005, *Bitum – Yêu cầu kỹ thuật*.
- [6] Bộ Khoa học và Công nghệ (2011), TCVN 8820, *Hỗn hợp bê tông nhựa nóng – Thiết kế theo phương pháp Marshall*.
- [7] Bộ Khoa học và Công nghệ (2011), TCVN 8860-1, *Bê tông nhựa – Phương pháp thử - Phần 1 : Xác định độ ổn định, độ dẻo Marshall*.
- [8] Bộ Khoa học và Công nghệ (2011), TCVN 8860-12, *Bê tông nhựa – Phương pháp thử - Phần 12 : Xác định độ ổn định còn lại của bê tông nhựa*.
- [9] Vũ Đức Chính (2014), *Nghiên cứu lựa chọn kết cấu và vật liệu cho kết cấu áo đường mềm trên các tuyến đường có xe tải trọng nặng phù hợp với điều kiện nhiệt ẩm – Đề tài cấp bộ năm 2014, Mã số: DT 144047, Bộ Giao thông Vận tải, Việt Nam*.
- [10] Trần Thị Kim Đăng (2010), *Độ bền khai thác và tuổi thọ kết cấu mặt đường bê tông nhựa*, Nhà xuất bản GTVT, Hà Nội, Việt Nam.
- [11] Trần Thị Cẩm Hà (2020), *Nghiên cứu thành phần, tính chất cơ học và khả năng sử dụng bitum epoxy làm chất kết dính cho hỗn hợp asphalt tại Việt Nam*, luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường ĐH GTVT, Hà Nội
- [12] Phan Thị Thúy Hằng (2018), *Nghiên cứu gia cường màng phủ nhựa epoxy bằng ống nano các bon biến tính và graphen oxit*, luận án tiến sĩ, Trường Đại học Đà Nẵng.
- [13] Trần Danh Hợi (2019), *Nghiên cứu hỗn hợp đá nhựa nóng cường độ cao dùng trong kết cấu mặt đường ô tô cấp cao ở Việt Nam*, luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường ĐH GTVT, Hà Nội.
- [14] Trần Ngọc Hưng (2015), *Một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm đặc tính cơ học của bê tông asphalt trong tính toán áo đường mềm theo 22TCN 211-06*.
- [15] Phạm Duy Hữu, Vũ Đức Chính, Đào Văn Đông, Nguyễn Thanh Sang (2010), *Bê tông Asphalt và hỗn hợp Asphalt*, Nhà xuất bản Giao thông Vận tải, Hà Nội, Việt Nam.

- [16] Trần Đại Lâm, Nguyễn Tuấn Dung, Nguyễn Lê Huy, Lê Viết Hải (2017), *Các phương pháp phân tích hóa lý vật liệu*, Viện hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam, Nhà xuất bản khoa học tự nhiên và công nghệ.
- [17] Nguyễn Mai Lâm, Nguyễn Quang Tuấn, Hoàng Thị Thanh Nhân (2015), *Nghiên cứu mô-đun phức động của nhựa đường 60/70 sử dụng tại Việt Nam bằng thí nghiệm trên máy DMA*, Tạp chí GTVT, tháng 12/2015
- [18] Bùi Thị Thanh Loan (2019), *Nghiên cứu chế tạo và khảo sát tính chất của vật liệu graphen oxit bằng phương pháp điện hóa*, luận văn thạc sĩ hóa học, Viện hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam, Hà Nội.
- [19] Nguyễn Hoàng Long (2017), *Nghiên cứu cơ sở khoa học để áp dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm (The Mechanistic Empirical Pavement Design – MEPD) trong phân tích kết cấu áo đường mềm ở Việt Nam*, Đề tài cấp bộ năm 2017, Mã số: DT 174055, Bộ Giao thông Vận tải, Việt Nam
- [20] Phan Ngọc Minh (2014), *Vật liệu cacbon cấu trúc nano và các ứng dụng tiềm năng*, NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ Hà Nội, 2014
- [21]] Đỗ Hồng Nga (2021), *Ứng dụng, tình hình khai thác, chế biến graphit trên thế giới và Việt Nam*, Viện Khoa học và Công nghệ mỏ - luyện kim.
- [22] Hoàng Nhâm (2000), *Hóa học vô cơ tập 2*, Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.
- [23] Nguyễn Quang Phúc (2018), *Nghiên cứu đề xuất giới hạn chiều sâu lún, điểm bong màng nhựa và độ chụm khi thí nghiệm lún vệt bánh xe ở Việt Nam*, Tạp chí Khoa học – Công nghệ, tháng 07/2018.
- [24] Vũ Ngọc Phương (2019), *Nghiên cứu sử dụng phụ gia tăng khả năng dính bám đá-nhựa cải thiện chất lượng BTN ở Việt Nam*, luận án tiến sĩ kỹ thuật, trường ĐH GTVT, Hà Nội.
- [25] Nguyễn Hồng Quân (2021), *Nghiên cứu sử dụng phế thải nhựa làm phụ gia tăng cường đặc tính cơ học của bê tông asphalt khu vực Hà Nội*, luận án tiến sĩ kỹ thuật, trường ĐH GTVT, Hà Nội.
- [26] Trần Quốc Tuấn (2019), *Nghiên cứu chế tạo và khảo sát ảnh hưởng của graphen oxit đến cường độ chịu nén và độ bền kéo của xi măng composite*, Đề tài cấp trường, Trường Đại học Công nghệ GTVT.
- [27] Nguyễn Thu Trang (2021), *Nghiên cứu ảnh hưởng của lưu huỳnh khi sử dụng làm phụ gia cho bê tông nhựa*, luận án tiến sĩ kỹ thuật, trường ĐH GTVT, Hà Nội.
- [28] Nguyễn Tường Vy, H L Trung, M T Tâm, H T Huy (2016), *Tổng hợp graphene từ graphite oxide giãn nở nhiệt và hydrazine từ đó ứng dụng trong chế tạo nanocomposite PMMA/graphene*, Tạp chí Khoa học phát triển, Vol 19, T5

B. TIẾNG ANH

- [29] AASHTO (2009), TP62-07, *Determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [30] AASHTO (2010), *Developing Dynamic Modulus Master Curves for Hot Mix Asphalt (HMA)*.
- [31] AASHTO (2013), M320-10, *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*.
- [32] ASTM (2019), D8225, *Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*.
- [33] Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J., & Huang, Z. (2020), *Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide*, Construction and Building Materials, 254, 119261.
- [34] Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J., & Huang, Z. (2022), *Physical properties of graphene-oxide modified asphalt and performance analysis of its mixtures using response surface methodology*, International Journal of Pavement Engineering, 23(5), 1378-1392.
- [35] J. Barugahare, A.N. Amirkhanian, F. Xiao, S.N. Amirkhanian. (2020), *Predicting the dynamic modulus of hot mix asphalt mixtures using bagged trees ensemble*, Construction and Building Materials. 260-120468.
- [36] A. Behnood, E.M. (2021), Golafshani, *Predicting the dynamic modulus of asphalt mixture using machine learning techniques: An application of multi biogeography-based programming*, Construction and Building Materials. 266 - 120983.
- [37] N. Baldo, E. Manthos, M. Miani. (2019), *Stiffness modulus and marshall parameters of hot mix asphalts: Laboratory data modeling by artificial neural networks characterized by cross-validation*, Applied Sciences. 9-3502.
- [38] CDOT (2018), *M-E pavement design manual, USA*
- [39] Congress, I.R (2012), IRC 37, *Guidelines for the design of flexible pavements*.
- [40] Dougan, C. E., Stephens, J. E., Mahoney, J., & Hansen, G (2003), *E* - Dynamic modulus – Test protocol – Problems and Solutions* (No. CT-SPR- 0003084-F-03-3), Connecticut Transportation Institute, University of Connecticut, US
- [41] Duan, S., Li, J., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F., Yang, H., & Yao, X. (2019), *Synthesis and evaluation of high-temperature properties of butylated graphene oxide composite incorporated SBS (C4H9-GO/SBS)-modified asphalt*, Journal of Applied Polymer Science, 136(46), 48231.
- [42] Fakhri, M. (2021), *The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA)*. Case Studies in Construction Materials, 15, e00655.

- [43] Fujie Zhou, Soohyok Im, Lijun Sun & Tom Scullion (2017), *Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design and QC/QA*, Journal Road Materials and Pavement Design, Volume 18, 2017 - Issue 4, Pages 405-427.
- [44] Gong, Y. Sun, Y. Dong, B. Han, P. Polaczyk, W. Hu, B. Huang. (2020), *Improved estimation of dynamic modulus for hot mix asphalt using deep learning*, Construction and Building Materials. 263-119912.
- [45] Habib, N. Z., Aun, N. C., Zoorob, S. E., & Lee, P. I. (2015), *Use of graphene oxide as a bitumen modifier: An innovative process optimization study*, In Advanced Materials Research (Vol. 1105, pp. 365-369). Trans Tech Publications Ltd.
- [46] Han, M., Muhammad, Y., Wei, Y., Zhu, Z., Huang, J., & Li, J. (2021), *A review on the development and application of graphene based materials for the fabrication of modified asphalt and cement*, Construction and Building Materials, 285, 122885.
- [47] Hosseini, P. Hajikarimi, M. Gandomi, F.M. Nejad, A.H. Gandomi. (2021), *Optimized machine learning approaches for the prediction of viscoelastic behavior of modified asphalt binders*, Construction and Building Materials. 299-124264.
- [48] Huang, Y. H. (2004), *Pavement analysis and design*, Second edition, Pearson Education, Inc
- [49] Kaya, O. (2015), *Investigation of AASHTOWare Pavement ME Design/Darwin-ME TM performance prediction models for Iowa pavement analysis and design*, Iowa State University, USA.
- [50] Kok, M. Yilmaz, B. Sengoz, A. Sengur, E. Avci. (2010), *Investigation of complex modulus of base and SBS modified bitumen with artificial neural networks*, Expert Systems with Applications. 37 -7775–7780.
- [51] Kubat (2017), *An introduction to machine learning*, Springer.
- [52] Lam, H. J. (2015), *Investigation on the Usage of Optimum Content of Graphite Oxide for Bitumen Modification* (Doctoral dissertation, UTAR).
- [53] Li, J., Han, M., Muhammad, Y., Liu, Y., Su, Z., Yang, J., ... & Duan, S. (2018), *Preparation and properties of sbs-g-gos-modified asphalt based on a thiol-ene click reaction in a bituminous environment*, Polymers, 10(11), 1264.
- [54] Li, Y., Wu, S., & Amirkhanian, S. (2018), *Investigation of the graphene oxide and asphalt interaction and its effect on asphalt pavement performance*, Construction and Building Materials, 165, 572-584.
- [55] Lin, M., Wang, Z. L., Yang, P. W., & Li, P. (2019), *Micro-structure and rheological properties of graphene oxide rubber asphalt*, Nanotechnology reviews, 8(1), 227-235.
- [56] Liu, K., Zhang, K., & Shi, X. (2018), *Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide*, Construction and Building Materials, 163, 880-889.
- [57] Liu, K., Zhu, J., Zhang, K., Wu, J., Yin, J., & Shi, X. (2019), *Effects of mixing sequence on mechanical properties of graphene oxide and warm mix additive composite modified asphalt binder*. Construction and Building Materials, 217, 301-309.

- [58] L.F. Walubita, A.N. Faruk, S.I. Lee, D. Nguyen, R. Hassan, T. Scullion. (2014) *HMA shear resistance, permanent deformation, and rutting tests for Texas mixes: final year-2 report*, Texas A&M Transportation Institute.
- [59] Majidifard, Jahangiri, Rath, L.U. Contreras, W.G. Buttlar, A.H. Alavi. (2021), *Developing a prediction model for rutting depth of asphalt mixtures using gene expression programming*, Construction and Building Materials. 267-120543.
- [60] Mohammed, Khan, E.B.M. Bashier (2016), *Machine learning: algorithms and applications*, Crc Press.
- [61] Mukhopadhyay, P., & Gupta, R. K. (Eds.). (2012), *Graphite, Graphene, and their polymer nanocomposites*, CRC press.
- [62] Nguyen Q. T., Di Benedetto H., Sauzéat C., Tapsoba N. (2013), *Time Temperature Superposition Principle Validation for Bituminous Mixes in the Linear and Nonlinear Domains*, Journal of Materials in Civil Engineering, 25(9), pp. 1181-1188.
- [63] NI, M. (2010), *The 2S2PID - An Excellent Linear Viscoelastic Model*, UNIMAS e-Journal of civil Engineering, 1(2).
- [64] Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003), *General 2S2PID model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes*, Road materials and pavement design, 4(2), pp. 185-224.
- [65] Ramirez Cardona, D. A., Pouget, S., Di Benedetto, H., & Olard, F. (2015), *Viscoelastic behaviour characterization of a gap-graded asphalt mixture with SBS polymer modified bitumen*, Materials Research, 18(2), 373-381.
- [66] Rais, N. M., Wahab, M. Y. A., Endut, I. R., & Latif, A. A. (2013), *Dynamic Modulus Master Curve Construction Using the Modified MEPDG Model*, In Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS), 2013 1st International Conference, pp. 212-21, IEEE.
- [67] R. Fitzgerald. (2000), *Novel Application of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-carbon Pre-forms*, PhD Thesis, Master's Thesis, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA, 2000
- [68] Singh, B. B., Mohanty, F., Das, S. S., & Swain, S. K. (2020), *Graphene sandwiched crumb rubber dispersed hot mix asphalt*, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7(5), 652-667.
- [69] Specht, O. Khatchatourian, L.A.T. Brito, J.A.P. Ceratti. (2007), *Modeling of asphalt-rubber rotational viscosity by statistical analysis and neural networks*, Materials Research. 10 69–74.
- [70] Tasdemir. (2009), *Artificial neural networks for predicting low temperature performances of modified asphalt mixtures*.
- [71] U. Isacson and X. Lu. (1995), *Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art*, Materials and Structures, vol. 28, no. 3, pp. 139–159, 1995
- [72] Wang, R., Yue, J., Li, R., & Sun, Y. (2019), *Evaluation of aging resistance of asphalt binder modified with graphene oxide and carbon nanotubes*, Journal of Materials in Civil Engineering, 31(11), 04019274.

- [73] Wang, R., Qi, Z., Li, R., & Yue, J. (2020), *Investigation of the effect of aging on the thermodynamic parameters and the intrinsic healing capability of graphene oxide modified asphalt binders*, Construction and Building Materials, 230, 116984.
- [74] Wei Gao (2015), *Graphene oxide*, ebook.
- [75] Wu, S., Zhao, Z., Li, Y., Pang, L., Amirkhanian, S., & Riara, M. (2017), *Evaluation of aging resistance of graphene oxide modified asphalt*, Applied Sciences, 7(7), 702.
- [76] Wu, S., & Tahri, O. (2021), *State-of-art carbon and graphene family nanomaterials for asphalt modification*, Road Materials and Pavement Design, 22(4), 735-756.
- [77] Xiao, S. Amirkhanian, C.H. Juang.(2009), *Prediction of fatigue life of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement using artificial neural networks*, Journal of Materials in Civil Engineering. 21-253–261.
- [78] Xiaoge, T., & Bin, H. (2009), *Dynamic Modulus of Asphalt Treated Mixtures*, In Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference (pp. 16-21).
- [79] Yu, R., Zhu, X., Hu, J., Zhao, W., & Fang, C. (2019), *Preparation of graphene oxide and its modification effect on base asphalt*, Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 27(3), 256-264.
- [80] Zeng, W., Wu, S., Pang, L., Sun, Y., & Chen, Z. (2017), *The utilization of graphene oxide in traditional construction materials: Asphalt*, Materials, 10(1), 48.
- [81] Zeng, Q., Liu, Y., Liu, Q., Liu, P., He, Y., & Zeng, Y. (2020), *Preparation and modification mechanism analysis of graphene oxide modified asphalts*, Construction and Building Materials, 238, 117706.
- [82] Zhu, J., Zhang, K., Liu, K., & Shi, X. (2019), *Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide*, Construction and Building Materials, 217, 273-282.
- [83] Zhu, J., Zhang, K., Liu, K., & Shi, X. (2020), *Adhesion characteristics of graphene oxide modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM-scanned micro-morphology*, Construction and Building Materials, 244, 118404.

C. TIẾNG NGÀ

- [84] В.Н. Вернигорова, Н.И. Макридин, Ю.А. Соколова (2003). *Современные методы исследования свойств строительных материалов. Учебное пособие.* -М. Издательство АСВ. 2003. 240. Стр

D. TÀI LIỆU TRÊN INTERNET

- [85] Catherine Jewell (2019), *Tiên phong sản xuất vật liệu graphen tại Việt Nam*, Bảo hộ Thương hiệu, <https://baohothuonghieuhieu.com/tien-phong-san-xuat-vat-lieu-graphene-tai-viet-nam/>