

STUDY ON THE EFFECTS OF ADDITIVES ON PROPERTIES OF BITUMEN 60/70

Do Dinh Trung^{1*}, Pham Quang Thuan²

¹Institute of Tropical Durability - Vietnam-Russia Tropical Centre

²Institute of chemistry and materials - Academy of military science and technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 18/10/2021 Revised: 30/11/2021 Published: 30/11/2021	The paper investigated effect of some additives to the mechanical properties of bitumen 60/70. The additives are dispersed into the bitumen 60/70 by stirring at 170°C. The samples for penetration, softening point and coating hardness were determined according to TCVN 7495:2005, TCVN 7497:2005 and TCVN 2098:2007. The research exhibited that when we increase carbon nanotubes or carbon black powder from 1% to 3% by weight, the mechanical properties of bitumen 60/70 do not change much. However, when adding 3% modified carbon nanotubes or 2% Elvaloy AM products into the bitumen 60/70, the mechanical properties of bitumen 60/70 are significantly improved, the penetration is reduced to 41 - 46°C, the softening point increases up to 70°C and the coating hardness increases to 0.54.
KEYWORDS Bitumen 60/70 Carbon nanotubes Modified carbon nanotubes Carbon black powder Elvaloy AM	

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA PHỤ GIA ĐẾN TÍNH CHẤT CỦA NHỰA ĐƯỜNG 60/70

Đỗ Đình Trung^{1*}, Phạm Quang Thuận²

¹Viện Độ bền Nhiệt đới - Trung tâm Nhiệt đới Việt-Nga

²Viện Hóa học-Vật liệu - Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 18/10/2021 Ngày hoàn thiện: 30/11/2021 Ngày đăng: 30/11/2021	Bài báo khảo sát ảnh hưởng của một số phụ gia đến tính chất cơ lý của nhựa đường 60/70. Các phụ gia được phân tán vào nhựa đường 60/70 bằng khuấy trộn ở nhiệt độ 170°C. Độ kim lún, nhiệt độ chảy mềm và độ cứng lớp sơn được xác định lần lượt theo TCVN 7495:2005, TCVN 7497:2005 và TCVN 2098:2007. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, khi thêm từ 1% đến 3% khối lượng ống nanocarbon hoặc bột than thì tính chất cơ lý của nhựa đường thay đổi không nhiều. Tuy nhiên, khi thêm 3% ống nanocarbon biến tính hoặc 2% sản phẩm Elvaloy AM vào trong nhựa đường 60/70, tính chất cơ lý của nhựa đường 60/70 được cải thiện rõ rệt, độ kim lún giảm xuống 41 - 46°C, nhiệt độ chảy mềm tăng lên tới 70°C và độ cứng lớp sơn tăng đến giá trị 0,54.
TỪ KHÓA Nhựa đường 60/70 Ống nano carbon Ống nano carbon biến tính Bột than Elvaloy AM	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5178>

* Corresponding author. Email: trungdodinh@mail.ru

1. Giới thiệu

Việt Nam nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới nóng ẩm. Với biến đổi khí hậu hiện nay, càng làm cho khí hậu nước ta thêm khắc nghiệt, nhiệt độ tăng cao, chênh lệch nhiệt độ ngày đêm lớn nên các vật liệu trong môi trường này bị phá hủy nhanh chóng [1]. Nhựa đường 60/70 là sản phẩm thương mại được chỉ định sử dụng cho vùng nhiệt đới nóng ẩm. Tuy nhiên, với điều kiện thời tiết khắc nghiệt như Việt Nam, vật liệu nhựa đường 60/70 không đạt được tính chất sử dụng như mong muốn. Do vậy, việc nghiên cứu biến tính nhựa đường 60/70 đảm bảo tính chất sử dụng được đặt ra. Bài báo đã khảo sát một số vật liệu là ống nanocarbon, ống nanocarbon biến tính, bột than và sản phẩm Elvaloy AM với vai trò là phụ gia nhằm tăng tính năng sử dụng của vật liệu nhựa đường 60/70 [2]-[6], một loại vật liệu thông dụng sẵn có trên thị trường Việt Nam.

Vật liệu ống nanocarbon (CNTs) và ống nanocarbon biến tính là những sản phẩm của công nghệ nano được ứng dụng hiện nay trong nhiều lĩnh vực, mang lại nhiều kết quả khả quan [7], [8].

Elvaloy AM là sản phẩm công nghệ mới của Công ty DuPont (Mỹ), với công thức phân tử là terpolymer ethylene glycidyl acrylate (EGA) chứa nhóm epoxy, có khả năng phản ứng, tạo liên kết với nhóm carboxyl, amine, hydroxyl,... trong thành phần của nhựa đường, tạo mạng đan lưới giữa các phân tử. Do đó, Elvaloy AM đã tỏ rõ những ưu điểm vượt trội khi được bổ sung vào trong thành phần nhựa đường [9]-[12].

2. Thực nghiệm

2.1. Nguyên vật liệu, dụng cụ

2.1.1. Nguyên vật liệu, hóa chất

Nhựa đường 60/70 (Petrolimex, Việt Nam); carbon nanotubes (Trung Quốc); bột than (kích thước 15 - 300 nm, Trung Quốc); sản phẩm Elvaloy AM (DuPont, Mỹ); HNO₃ 68% (AR, Trung Quốc); H₂SO₄ 98% (AR, Trung Quốc); xăng dung môi (Việt Nam); nước cất (Việt Nam).

2.1.2. Vật tư, dụng cụ

Bình cầu 3 cổ (dung tích 250 ml, Schott-Duran, Đức); ống sinh hàn xoắn (Glassco, Ấn Độ); ống đong 100 ml (Schott-Duran, Đức); nhiệt kế nhám 14,5 với giới hạn đến 300°C (Amarell, Đức); bếp đun có khuấy từ, giới hạn nhiệt độ đến 500°C (IKA C-MAG HS 7); máy ly tâm Centrifuge 80-2B (Jiangsu zhengji instruments Co., Ltd.); giấy pH (Isolab, Đức).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

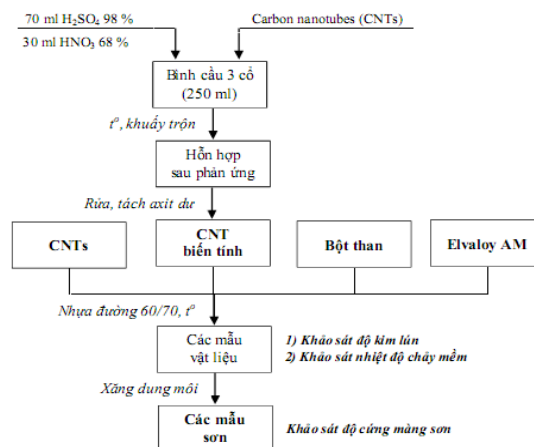
2.2.1. Biến tính carbon nanotubes

Cân 3,0 g CNTs và đưa vào bình cầu 3 cổ (dung tích 250 ml), lắp nhiệt kế, khuấy từ và ống sinh hàn xoắn. Thêm 100 ml hỗn hợp axit HNO₃ 68% và H₂SO₄ 98% (với tỷ lệ thể tích 30 ml HNO₃ và 70 ml H₂SO₄) vào bình cầu 3 cổ. Bật tủ hút, nâng dần nhiệt độ bếp đun với tốc độ gia nhiệt 1 - 2°C/phút kết hợp với khuấy từ liên tục. Duy trì hỗn hợp phản ứng tại nhiệt độ 90°C trong 3 giờ. Kết thúc phản ứng, để nguội hỗn hợp đến nhiệt độ phòng, pha loãng và để lắng hỗn hợp sản phẩm trong thời gian 12 - 15 giờ. Rửa và tách axit khỏi hỗn hợp sản phẩm CNTs biến tính nhiều lần bằng nước cất một lần, sử dụng máy ly tâm Centrifuge 80-2B (Jiangsu zhengji instruments Co., Ltd.) để tách sản phẩm CNTs biến tính với tốc độ ly tâm 3500 vòng/phút trong thời gian 5 phút. Rửa và tách sản phẩm đến khi thu được CNTs biến tính trung tính, kiểm tra bằng giấy đo pH.

Sấy sản phẩm CNTs biến tính trong tủ sấy chân không ở nhiệt độ 90°C đến khối lượng không đổi. Kết quả chụp ảnh SEM trên Hình 1 cho thấy, CNTs biến tính thu được có cấu trúc dạng hình ống đan xen nhau với kích thước đường kính ống dao động trong khoảng 44,8 - 67,1 nm, có khả năng hòa tan 6,78 g/lít nước. Hiệu suất thu hồi sản phẩm đạt khoảng 70%.



Hình 1. Ảnh SEM của CNTs biến tính



Hình 2. Quy trình, sơ đồ thí nghiệm

2.2.2. Chế tạo các mẫu vật liệu trên cơ sở nhựa đường 60/70 và một số phụ gia (CNTs, CNTs biến tính, bột than và Elvaloy AM)

Đun nóng chảy nhựa đường 60/70 tới 170°C, kết hợp khuấy trộn đều, bổ sung từ từ phụ gia (CNTs, CNTs biến tính, bột than hoặc Elvaloy AM tùy từng mẫu chế tạo) với hàm lượng khác nhau vào nhựa đường nóng chảy và duy trì chế độ khuấy trong các khoảng thời gian khác nhau (15 phút, 30 phút, 60 phút và 90 phút tùy từng hỗn hợp). Chi tiết thành phần mẫu vật liệu và thời gian duy trì ở nhiệt độ 170°C được đưa ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần mẫu vật liệu và thời gian khuấy trộn hỗn hợp ở nhiệt độ 170°C

Thành phần mẫu vật liệu	Thời gian khuấy trộn tại 170°C
Nhựa đường 60/70	15; 30 và 60 phút
Nhựa đường 60/70 + 1% CNTs	15; 30 và 60 phút
Nhựa đường 60/70 + 2% CNTs	15; 30 và 60 phút
Nhựa đường 60/70 + 3% CNTs	15; 30 và 60 phút
Nhựa đường 60/70 + 1% CNTs biến tính	15; 30 và 60 phút
Nhựa đường 60/70 + 2% CNTs biến tính	15; 30 và 60 phút
Nhựa đường 60/70 + 3% CNTs biến tính	15; 30; 60 và 90 phút
Nhựa đường 60/70 + 3% bột than	60 phút
Nhựa đường 60/70 + 2% Elvaloy AM	60 phút

2.2.3. Các phương pháp xác định

Độ kim lún được xác định theo TCVN 7495:2005 [13], trên thiết bị Matest B057 Kit (Italy).

Nhiệt độ chảy mềm được xác định theo TCVN 7497:2005 [14], trên thiết bị DF12 (Trung Quốc), sử dụng nước cất đun sôi để nguội trong cốc đun.

Độ cứng lớp sơn phủ được xác định theo TCVN 2098:2007 [15], sử dụng phép đo với con lắc Persoz trên thiết bị Pendulum Damping Tester Model 299/300.

Quy trình, sơ đồ thí nghiệm được thể hiện trên Hình 2.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Khảo sát độ kim lún của mẫu nhựa đường 60/70 chứa phụ gia

Độ kim lún của các mẫu vật liệu trên cơ sở nhựa đường 60/70 được bổ sung phụ gia (CNTs, CNTs biến tính, bột than hoặc Elvaloy AM) bằng phương pháp phân tán khuấy trộn đều, kết hợp gia nhiệt ở 170°C trong các khoảng thời gian khác nhau (15, 30, 60 và 90 phút) xác định theo TCVN 7495:2005, với điều kiện thử tại 25°C, tải trọng 100 g và thời gian 5 s. Kết quả được tổng hợp trong Bảng 2.

Số liệu Bảng 2 cho thấy, các mẫu nhựa đường bổ sung CNTs có độ kim lún thay đổi không nhiều so với mẫu nhựa đường ban đầu, mặc dù CNTs hoạt động mạnh hơn so với carbon graphite nhưng vẫn tương đối trơ về mặt hóa học, nên khi thêm CNTs vào thành phần của nhựa đường, đơn thuần chỉ là biến tính vật lý, độ kim lún giảm xuống một chút là do khi đun nóng, một phần nhóm chất dầu nhẹ trong nhựa đường bay hơi, một phần chuyển hóa thành nhóm chất nhựa, sau đó thành asphalt và tiếp tục bị oxy hóa tạo thành các hợp chất có phân tử lượng cao hơn.

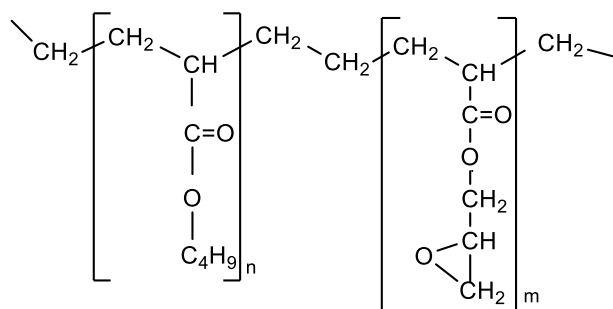
Bảng 2. Kết quả xác định độ kim lún các mẫu nhựa đường bổ sung phụ gia, với các thời gian khuấy trộn khác nhau

Thành phần mẫu vật liệu	Độ kim lún, 0,1 mm			
	15 phút	30 phút	60 phút	90 phút
Nhựa đường 60/70	65	64	64	-
Nhựa đường 60/70 + 1% CNTs	65	65	64	-
Nhựa đường 60/70 + 2% CNTs	65	64	63	-
Nhựa đường 60/70 + 3% CNTs	63	63	62	-
Nhựa đường 60/70 + 1% CNTs biến tính	63	61	57	-
Nhựa đường 60/70 + 2% CNTs biến tính	60	56	50	-
Nhựa đường 60/70 + 3% CNTs biến tính	58	52	46	44
Nhựa đường 60/70 + 3% bột than	-	-	66	-
Nhựa đường 60/70 + 2% Elvaloy AM	-	-	41	-

Với các mẫu nhựa đường được bổ sung CNTs biến tính, khi tăng hàm lượng trong nhựa đường hoặc tăng thời gian khuấy trộn thì độ kim lún đều giảm xuống. Khi sử dụng 3% CNTs biến tính với thời gian khuấy trộn 60 phút, độ kim lún đã giảm tới 28,13% (đến giá trị 46). Nếu tiếp tục đun nóng thêm 30 phút nữa, độ kim lún giảm tới giá trị 44. Sự giảm độ kim lún khi bổ sung CNTs biến tính có thể được giải thích như sau: trong thành phần của nhựa đường có chứa nhóm phân cực asphalt nên dễ dàng liên kết với các nhóm phân cực trên bề mặt CNTs biến tính (nhóm - COOH, - OH,...), kéo dài mạch phân tử tạo nên các hợp chất chứa các liên kết bền vững và ổn định làm giảm độ kim lún. Ngoài ra, phân tử CNTs biến tính với kích thước nhỏ cỡ nano dễ dàng chèn và lấp đầy các khoảng trống giữa các phân tử nhựa đường làm cấu trúc nhựa đường đặc khít hơn, vững chắc hơn. Điều này cho thấy, việc bổ sung CNTs biến tính mang lại hiệu quả rõ rệt đối với độ kim lún của nhựa đường.

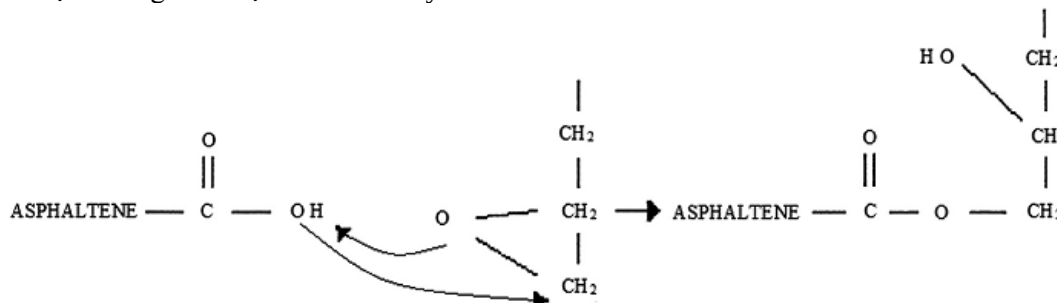
Với các mẫu nhựa đường 60/70 được bổ sung 3% bột than, độ kim lún không thay đổi so với mẫu nhựa đường ban đầu, do bột than là carbon vô định hình, có cấu trúc không trật tự và không theo quy luật, không kết hợp với nhau thành dạng tinh thể lớn, rất trơ về mặt hóa học nên khi bổ sung vào nhựa đường, bột than không có phản ứng liên kết với các hợp chất trong nhựa đường, do vậy không làm thay đổi độ kim lún.

Với mẫu nhựa đường được bổ sung 2% Elvaloy AM, độ kim lún giảm tới 35,94% (đến giá trị 41, với thời gian khuấy trộn là 60 phút). Điều này có thể được giải thích về mặt cấu trúc hóa học của Elvaloy AM [16] được minh họa trên Hình 3 và phản ứng tương tác với nhựa đường [9] trên Hình 4.



Hình 3. Công thức hóa học của Elvaloy AM

Trong mạch phân tử của Elvaloy AM có chứa nhóm chức epoxy, còn sản phẩm nhựa đường chứa các nhóm chức phân cực ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$,...), các nhóm này tạo phản ứng liên kết với nhóm epoxy trong Elvaloy AM tạo thành các hợp chất hóa học rất bền vững làm giảm độ kim lún của mẫu nhựa đường khi được thêm Elvaloy AM.



Hình 4. Phản ứng của Elvaloy AM và nhựa đường

3.2. Khảo sát nhiệt độ chảy mềm

Các mẫu vật liệu được chế tạo với điều kiện khuấy trộn hỗn hợp ở nhiệt độ 170°C trong thời gian 60 phút. Rót hỗn hợp nhựa đường nóng vào từng vòng chứa mẫu, để nguội trong không khí từ 1 đến 2 giờ. Sau thời gian 3 đến 4 giờ, tiến hành xác định nhiệt độ chảy mềm của hỗn hợp nhựa đường.

Giá trị nhiệt độ chảy mềm của các mẫu vật liệu được tổng hợp trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả xác định nhiệt độ chảy mềm của các mẫu nhựa đường bổ sung phụ gia

Ký hiệu mẫu	Thành phần	Nhiệt độ chảy mềm, $^{\circ}\text{C}$
B60/70	Nhựa đường 60/70	52
B60/70 - 1%CNT	Nhựa đường 60/70 + 1% CNTs	55
B60/70 - 2%CNT	Nhựa đường 60/70 + 2% CNTs	59
B60/70 - 3%CNT	Nhựa đường 60/70 + 3% CNTs	62
B60/70 - 2%CNTm	Nhựa đường 60/70 + 2% CNTs biến tính	66
B60/70 - 3%CNTm	Nhựa đường 60/70 + 3% CNTs biến tính	70
B60/70 - 3%C	Nhựa đường 60/70 + 3% bột than	60
B60/70 - 2%ElAM	Nhựa đường 60/70 + 2% Elvaloy AM	70

Kết quả trong Bảng 3 cho thấy, mẫu B60/70, các mẫu B60/70 được bổ sung CNTs hoặc B60/70 - 3%C có nhiệt độ chảy mềm thay đổi không nhiều. Đối với mẫu B60/70 - 3%CNTm và B60/70 - 2%ElAM, nhiệt độ chảy mềm có sự thay đổi rõ rệt, tăng lên 18°C (tương đương tăng 34,62%) so với mẫu B60/70.

Nhiệt độ chảy mềm của mẫu nhựa đường được bổ sung CNTs biến tính tăng lên là do CNTs biến tính có độ dẫn nhiệt cao làm cho hỗn hợp hấp thụ nhiệt ít hơn. Hơn nữa, CNTs biến tính có modul đàn hồi kéo (modul Young) và tính ổn định cao làm hỗn hợp nhựa đường chứa CNTs biến tính ổn định hơn, chống lại sự chảy mềm, do đó nhiệt độ chảy mềm tăng lên. Ngoài ra, trong quá trình khuấy trộn có gia nhiệt để tạo hỗn hợp nhựa đường với phụ gia, thành phần nhóm asphalt được tăng lên (đây là nhóm quyết định tốc độ chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái lỏng của nhựa đường), là do một phần nhóm chất dầu và chất nhựa trong nhựa đường chuyển hóa thành nhóm asphalt. Nhóm asphalt phân cực nên dễ dàng liên kết với nhóm chức gắn trên bề mặt CNTs trong quá trình biến tính (như nhóm $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$,...), do đó nhiệt độ chảy mềm tăng.

3.3. Khảo sát độ cứng của lớp sơn phủ

Để khảo sát sự thay đổi độ cứng của lớp sơn phủ trên cơ sở nhựa đường 60/70, đã sử dụng mẫu nhựa đường 60/70, nhựa đường 60/70 + 3% CNTs biến tính và nhựa đường 60/70 + 2% Elvaloy AM với thời gian khuấy trộn 60 phút tại nhiệt độ 170°C .

Hòa tan các mẫu trên vào xăng dung môi theo tỷ lệ: mẫu thí nghiệm/xăng dung môi = 3/7 về khối lượng, khuấy trộn để tạo hỗn hợp đồng nhất. Tạo lớp phủ mỏng lên bề mặt các tấm thủy tinh bằng phương pháp quét, để khô tự nhiên. Sau thời gian ít nhất 7 ngày, tiến hành đo độ cứng lớp sơn phủ trên thiết bị Pendulum Damping Tester Model 299/300, sử dụng phương pháp con lắc Persoz. Kết quả thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả xác định độ cứng lớp sơn phủ trên cơ sở nhựa đường 60/70 chứa phụ gia

Ký hiệu mẫu	Thành phần	Độ cứng lớp sơn phủ
B60/70	Nhựa đường 60/70	0,17
B60/70 - 3%CNTm	Nhựa đường 60/70 + 3% CNTs biến tính	0,43
B60/70 - 2%ElAM	Nhựa đường 60/70 + 2% Elvaloy AM	0,54

Kết quả trong Bảng 4 cho thấy, độ cứng lớp sơn phủ B60/70 - 3%CNTm và B60/70 - 2%ElAM đã tăng lên rõ rệt và khác biệt nhiều so với lớp sơn phủ B60/70. Độ cứng lớp sơn B60/70 - 3%CNTm tăng 152,94%, độ cứng lớp sơn B60/70 - 2%ElAM tăng 217,65% so với lớp sơn trên cơ sở nhựa đường 60/70.

Các kết quả nghiên cứu trên cho thấy, cơ tính của nhựa đường 60/70 thay đổi rõ rệt khi thay đổi tỷ lệ các chất phụ gia. Khi tăng tỷ lệ các chất phụ gia trong thành phần của nhựa đường 60/70 thì cơ tính tăng (tức là độ kim lún giảm, nhiệt độ chảy mềm tăng, độ cứng màng sơn tăng). Với chất phụ gia là CNTs biến tính và Elvaloy, cơ tính tăng lên rõ rệt hơn; còn với CNTs và bột than, sự tăng lên là không đáng kể. Sự tăng cơ tính này có thể được lý giải là do xảy ra phản ứng, tạo liên kết, tăng sự hình thành các phân tử lớn hơn giữa phân tử nhựa đường 60/70 với các phân tử chất phụ gia.

4. Kết luận

Khi thêm 1% đến 3% khối lượng ống nanocarbon hoặc bột than thì tính chất cơ lý của nhựa đường 60/70 thay đổi không nhiều.

Khi bổ sung 3% khối lượng ống nanocarbon biến tính hoặc 2% sản phẩm Elvaloy AM kết hợp gia nhiệt tại 170°C và khuấy trộn đều, độ kim lún, nhiệt độ chảy mềm và độ cứng của lớp sơn phủ trên cơ sở nhựa đường 60/70 đã được cải thiện rõ rệt. Với 3% khối lượng ống nanocarbon biến tính trong thành phần của nhựa đường 60/70, độ kim lún giảm 28,13%, nhiệt độ chảy mềm tăng 34,62%, độ cứng lớp sơn phủ tăng 152,94%. Với 2% sản phẩm Elvaloy AM trong thành phần của nhựa đường 60/70, độ kim lún giảm 35,94%, nhiệt độ chảy mềm tăng 34,62%, độ cứng lớp sơn phủ tăng 217,65%. Cải thiện tính chất cơ lý của nhựa đường 60/70 làm tăng khả năng thích ứng sử dụng của loại sản phẩm thương mại này trong điều kiện khí hậu nhiệt đới nóng ẩm ở Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/REFERENCES

- [1] A. Kuznetsov, "Tropical forests of the cardamom mountains: Species composition and vertical structure," *Journal of tropical Science and Technology*, vol. 06, pp. 23-36, 2014.
- [2] A. S. Yero and M. R. Hainin, "The effect of commercial wax on viscosity characteristics of modified asphalt," *International Journal of Recent Research and Applied Studies*, vol. 8, no. 2, pp. 171-175, 2011.
- [3] R. Muniandy, F. Jakarni, S. Hassim, and A. Oladimeji, "Effect of various additives on the low temperature performance of petroleum based asphalt binders," *Journal of traffic and transportation engineering*, vol. 8, pp. 113-126, 2020.
- [4] V. O. Bulatovic, V. Rek, and K. J. Markovic, "Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen," *Journal of elastomers & plastics*, vol. 46, no. 5, pp. 448-469, 2013.
- [5] O. J. Oyedepo and S. D. Oluwajana, "Evaluation of properties of bitumen modified with waste type," *Nigerian Journal of Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 119-124, 2014.
- [6] T. Geckil, P. Ahmedzale, and T. Alatas, "Effect of carbon black on the high and low temperature properties of bitumen," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 16, pp. 207-218, 2018.

-
- [7] I. Amin, S. M. El-Badawy, T. Breakah, and M. H. Z. Ibrahim, "Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate," *Construction and building materials*, vol. 121, pp. 361-372, 2016.
 - [8] A. A. Mamun and Md. Arifuzzaman, "Nano-scale moisture damage evaluation of carbon nanotube-modified asphalt," *Construction and building materials*, vol. 193, pp. 268-275, 2018.
 - [9] T. Geckil and M. Seloglu, "Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer," *Construction and building materials*, vol. 173, pp. 262-271, 2018.
 - [10] G. Polacco, J. Stastna, D. Biondi, F. Antonelli, Z. Vlachovicova, and L. Zanzotto, "Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 280, pp. 366-373, 2004.
 - [11] B. H. Sellers, "Characterization and transitions of asphalt cement composite materials," LSU Master's Theses, University of North Carolina at Charlotte, 2009, pp. 8-10.
 - [12] G. da S. Pereira and A. R. Morales, "Modification of thermal and rheological behavior of asphalt binder by the addition of an ethylene-methyl acrylate-glycidyl methacrylate terpolymer and polyphosphoric acid," *Polimeros*, vol. 27, no. 4, pp. 298-308, 2017.
 - [13] TCVN 7495:2005, "Bitumen - Test method for penetration," (in Vietnamese), *Ministry of construction*, 2005.
 - [14] TCVN 7497:2005, "Bitumen - Test method for softening point (ring-and-ball apparatus)," (in Vietnamese), *Ministry of construction*, 2005.
 - [15] TCVN 2098:2007, "Paints and varnishes - Pendulum damping test," (in Vietnamese), *Ministry of science and technology*, 2007.
 - [16] S. Keyf, "Investigation of penetration and penetration index in bitumen modified with SBS and reactive terpolymer," *Sigma*, vol. 28, pp. 26-34, 2010.