

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THẠCH CAO PHỐT PHO THẢI ĐẾN TÍNH CHẤT KỸ THUẬT CỦA BITUM

EFFECT OF PHOSPHOGYPSUM ON THE TECHNICAL PROPERTIES OF BITUMEN

Đặng Hữu Trung^{1,*},
Nguyễn Thế Hữu¹, Trịnh Thị Hải¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.149>

TÓM TẮT

Ngành công nghiệp Phân bón Việt Nam hằng năm thải ra hàng triệu tấn thạch cao phốt pho (PG), chúng chủ yếu được chôn lấp, gây lãng phí tài nguyên và ô nhiễm môi trường. Tận dụng nguồn PG thải tại nhà máy DAP1 - Đình Vũ (Hải Phòng) vào biến tính bitum nhằm tăng tính ổn định, đồng thời giảm thiểu tác hại đến môi trường là một giải pháp hữu ích. Nghiên cứu này báo cáo về ảnh hưởng của PG ở các hàm lượng 0, 5, 10, 15 và 20% khối lượng (KL) đến tính chất hóa học, độ kim lún, điểm hóa mềm và độ bám dính với đá của bitum. Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng PG từ 0 đến 20% làm cho bitum có tính chất hóa lý ổn định hơn và sự tương tác hóa học giữa PG với các nhóm thành phần của bitum không xảy ra hoặc xảy ra yếu. Đặc biệt điểm hóa mềm tăng từ 51,5 đến 64°C, độ kim lún giảm từ 44 xuống 34,5 (1/10mm), độ bám dính với đá đều đạt cấp 5 là cấp cao nhất.

Từ khóa: Bitum 40/50, thạch cao phốt pho, độ kim lún, điểm hóa mềm, độ bám dính với đá.

ABSTRACT

The Vietnamese fertilizer industry generates millions of tons of phosphogypsum (PG) waste annually, leading to resource depletion and environmental pollution due to landfilling. A beneficial solution involves modifying bitumen with PG from the DAP1-Dinh Vu factory to enhance stability and reduce environmental impact. This study investigated the effects of PG concentrations (0 - 20% by weight) on bitumen's chemical characteristics, penetration, softening point, and adhesion with paving stone. Increasing the PG content from 0 to 20% improved bitumen's physicochemical stability, with minimal or no chemical interaction observed between PG and bitumen. Specifically, softening point increased from 51.5 to 64°C, the penetration decreased from 44 to 34.5 (1/10mm), and adhesion with paving stone reached the highest level (level 5).

Keywords: Bitumen 40/50, phosphogypsum, penetration, softening point, adhesion with paving stone.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: huutrong@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 18/02/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 22/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

1. GIỚI THIỆU

Bitum là một phân đoạn cuối của quá trình chế biến dầu mỏ, chúng được sử dụng vào nhiều mục đích khác nhau. Việc nghiên cứu nâng cao chất lượng của bitum nhằm tăng khả năng ứng dụng của chúng trong nhiều ngành khác nhau là rất cần thiết, đặc biệt trong giao thông, xây dựng, chống ăn mòn và chống thấm [1-5]. Các công trình chủ yếu tập trung sử dụng các chất biến tính như cao su, nhựa epoxy và thậm chí các loại nguyên liệu như dầu ăn thải, dầu động cơ thải... đưa vào biến tính bitum.

Peiliang Cong và cộng sự đã kết hợp giữa nhựa epoxy và styrene-butadien-styrene (SBS) vào biến tính bitum. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc thêm cao su SBS vào bitum đã làm tăng độ bền kéo đứt và độ đàn hồi khi đứt của bitum sau biến tính [6]. Nhựa epoxy cũng được sử dụng ở các hàm lượng từ cao từ 15 đến 50% khối lượng, nhằm biến tính cải thiện các tính chất cơ lý của bitum cho việc bảo dưỡng mặt đường giao thông [7]. Kết quả cho thấy sự có mặt của nhựa epoxy đã làm tăng nhiệt độ chảy mềm và giảm độ kim lún, làm cho mặt đường giao thông sau khi bảo dưỡng có tính ổn định cao hơn, tránh được khả năng chảy mềm trong quá trình sử dụng.

Sự kết hợp giữa 3% khối lượng dầu ăn thải và 3% khối lượng dầu động cơ thải đưa vào biến tính bitum đã được khảo sát nghiên cứu, kết quả cho thấy với sự có mặt của hai loại dầu thải trên đã cải thiện được khả năng già hóa của bitum, làm cho bitum sau biến tính linh động và mềm dẻo hơn [8]. Tính chất lưu biến và các đặc trưng lý hóa của bitum được cải thiện tốt hơn sau khi kết hợp giữa dầu ăn thải và nanoclay vào biến tính bitum [9].

Các nghiên cứu về phosphogypsum và ứng dụng của chúng được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu.

Thành phần chính của phosphogypsum chứa chủ yếu thạch cao dạng $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ trên 80%, các thành phần khác còn lại bao gồm Al_2O_3 , SiO_2 , H_2SO_4 , H_3PO_4 , HF và các tạp chất hòa tan khác. Để sản xuất ra 1 tấn H_3PO_4 làm nguyên liệu cho sản xuất phân bón cần thải ra 4 đến 5 tấn phosphogypsum [10, 11]. Ngô Kim Chi cùng nhóm nghiên cứu [10] đã nghiên cứu thành phần bã thạch cao phosphogypsum thu thập tại nhà máy DAP1 - Đình Vũ, sau quá trình xử lý, làm sạch và tiến hành xác định hình thái cấu trúc của PG thông qua ảnh SEM, kết quả cho thấy bã thạch cao PG có cấu trúc tinh thể, kích thước hạt $< 45\mu\text{m}$. Wengang Li và cộng sự [12] nghiên cứu chế tạo cốt liệu xây dựng có sử dụng PG nhằm giảm thiểu phát thải, hướng đến môi trường bền vững, kết quả nghiên cứu cho thấy hàm lượng PG có thể sử dụng đến 70% phần khối lượng mà vẫn đáp ứng được tiêu chuẩn của bê tông C25.

Nghiên cứu ảnh hưởng của PG đến tính chất cơ lý của xi măng Pooc Lăng đã được nhóm nghiên cứu của Văn Viết Thiên Ân và cộng sự nghiên cứu [13]. Ảnh hưởng của hàm lượng PG đến độ bền kéo đứt, độ dãn dài khi đứt và độ bền nhiệt của vật liệu composite trên cơ sở nhựa polyetylen đã được nhóm tác giả Thái Hoàng và cộng sự nghiên cứu [14].

Lượng PG trên thế giới cũng như ở Việt Nam ngày càng thải ra môi trường một lượng rất lớn, gây ô nhiễm môi trường và lãng phí tài nguyên. Việc tận dụng nguồn nguyên liệu thải sẵn có trong nước vào nghiên cứu biến tính bitum như một chất gia cường, nhằm định hướng ứng dụng trong ngành giao thông và xây dựng sẽ mở ra một hướng nghiên cứu hoàn toàn mới và đầy triển vọng.

2. THỰC NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

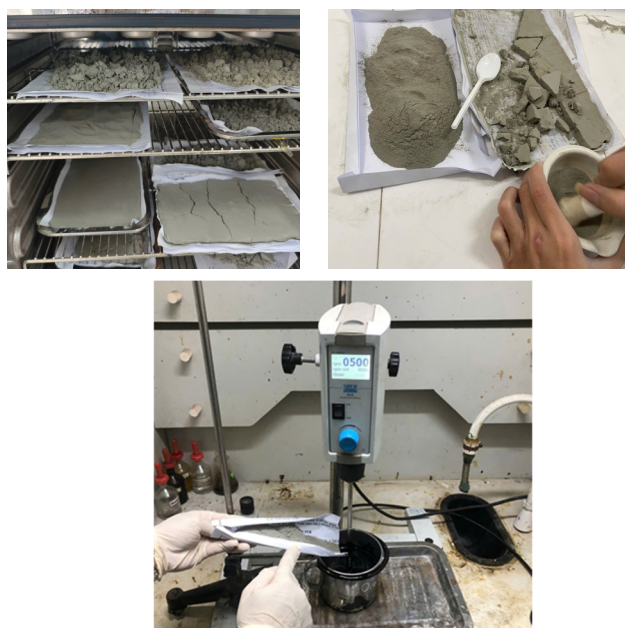
2.1. Hóa chất - Thiết bị

- Phosphogypsum được cấp bởi nhà máy sản xuất phân bón DAP1 - Đình Vũ (Hải Phòng).
- Bitum mac 40/50 được cấp bởi công ty TNHH cung ứng nhựa đường ADCo (Hải Phòng)
- Axeton (Trung Quốc)
- Máy khuấy cơ học VELP (Ý)
- Tủ sấy Memmert (Đức)
- Bếp gia nhiệt (Trung Quốc)
- Thiết bị xác định độ kim lún tự động DF-6 (Trung Quốc).
- Thiết bị xác định nhiệt độ hóa mềm tự động DF-12 (Trung Quốc).
- Thiết bị xác định phổ hồng ngoại Agilent Cary 630 FTIR Spectrometer.

2.2. Xử lý làm sạch PG và biến tính bitum

Phosphogypsum (PG) được chúng tôi lấy trực tiếp trên băng chuyền tại nhà máy sản xuất phân bón DAP1-Đình Vũ (Hải phòng), chúng được sàng qua rây với kích thước 1,0mm và được làm sạch theo quy trình từng mẻ.

Mỗi mẻ khuấy 500 gam PG trong dung dịch H_2SO_4 nồng độ 10%, theo tỉ lệ dung dịch/PG là 3/1 (ml/g) và được khuấy ở tốc độ 350 vòng/phút trong 1 giờ. Sau thời gian khuấy để lắng 5 - 10 phút, gạn thu phần bã rắn, tiếp tục rửa phần bã rắn 3 lần trong nước cất với tỉ lệ nước/bã là 1, lắng gạn dung dịch thu phần bã ướt. Tiếp tục cho CaO ở nồng độ 0,1% vào trung hòa cho đến khi trung tính, sấy khô ở 45°C trong 5 giờ thu được nguyên liệu sạch PG [10].



Hình 1. Hình ảnh xử lý và phân tán PG vào bitum

Trước khi biến tính, nguyên liệu PG được sấy ở nhiệt độ 80°C đến khối lượng không đổi là 3 giờ và chúng được phân tán vào bitum lần lượt ở các tỷ lệ 0, 5, 10, 15 và 20% khối lượng (KL), với các mẫu được ký hiệu tương ứng là PG₀, PG₅, PG₁₀, PG₁₅ và PG₂₀. Hỗn hợp bitum được gia nhiệt đến nhiệt độ làm việc ổn định 130°C và lần lượt cho từ từ chất biến tính PG vào bitum và khuấy trên thiết bị cơ học VELP ở tốc độ 500 vòng/phút cho đến khi hỗn hợp đồng nhất thì dừng lại. Quá trình mô tả sự đồng nhất của hỗn hợp được trình bày trong phần kết quả và thảo luận.

2.3. Các phương pháp xác định tính chất hóa lý của bitum

- Phổ hồng ngoại IR của các mẫu bitum và bitum biến tính bằng bã thạch cao photpho được xác định trên thiết bị Agilent Cary 630 FTIR Spectrometer (Mỹ).

• Điểm hóa mềm của bitum trước và sau khi biến tính bằng PG được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D36 (TCVN 7497-05). Phép thử được xác định trên thiết bị đo điểm hóa mềm tự động DF-12 (Trung Quốc).

• Độ kim lún của bitum trước và sau khi biến tính bằng PG được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D5-20 (TCVN 7495-05). Phép thử được xác định trên thiết bị đo độ kim lún tự động DF-6 (Trung Quốc).

• Độ bám dính của bitum với đá trước và sau khi biến tính bằng PG được xác định theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7504-05.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Nghiên cứu biến tính bitum từ phosphogypsum

Phosphogypsum được lấy từ nhà máy sản xuất phân bón DAP1 - Đình Vũ Hải Phòng và được chúng tôi xử lý, làm sạch theo quy trình đã công bố trước đây [10]. Bitum được biến tính bằng PG với các hàm lượng 0, 5, 10, 15 và 20% khối lượng. Ứng với mỗi hàm lượng, bitum được gia nhiệt đến nhiệt độ ổn định 130°C, sau đó cho từ từ PG vào bitum. Ban đầu hỗn hợp có màu nâu sẫm đến đen, sau một thời gian khuấy màu nâu sẫm dần chuyển thành màu đen đồng nhất, đồng thời lúc này dòng chuyển động của hỗn hợp bitum trong quá trình khuấy trộn trở nên ổn định thì dừng khuấy. Các thông số và kỹ thuật biến tính bitum được mô tả trong bảng 1.

Bảng 1. Thành phần các cấu tử và thời gian phân tán hỗn hợp bitum

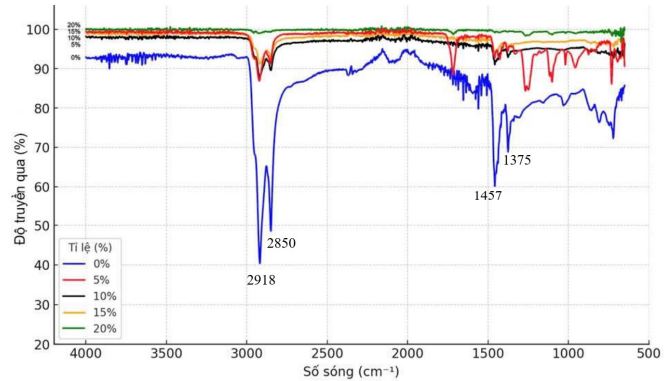
TT	Tên mẫu	Bitum (%)	PG (%)	Bitum biến tính (%)	Thời gian phân tán (phút)
1	PG ₀	100	0	100	0
2	PG ₅	95	5	100	5
3	PG ₁₀	90	10	100	8
4	PG ₁₅	85	15	100	12
5	PG ₂₀	80	20	100	17

Kết quả từ bảng 1 cho thấy, hàm lượng PG càng tăng thì thời gian phân tán càng dài. Cụ thể ở hàm lượng PG5% thời gian phân tán 5 phút, tiếp tục tăng hàm lượng PG lên 10, 15 và 20% cho thời gian phân tán tương ứng lần lượt là 8, 12 và 17 phút.

Như vậy lượng PG đưa vào biến tính bitum càng tăng thì thời gian phân tán càng dài và đạt giá trị lớn nhất ở mẫu PG₂₀ có thời gian phân tán tối đa 17 phút.

3.2. Ảnh hưởng của PG đến phổ IR của mẫu bitum trước và sau biến tính

Đã xác định phổ IR của các mẫu bitum biến tính với PG ở các hàm lượng 0, 5, 10, 15 và 20% KL, kết quả nhận được trình bày trên hình 2.



Hình 2. Phổ hồng ngoại của bitum biến tính bằng PG ở các hàm lượng khác nhau

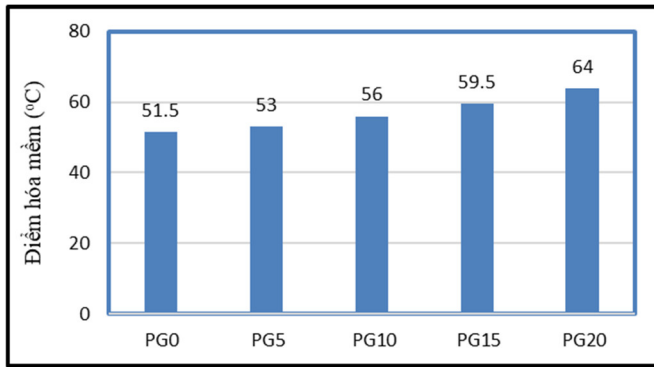
Trên hình 2 cho thấy ở mẫu 0% PG, tức là mẫu chỉ đơn thuần là bitum mức độ hấp thụ năng lượng mạnh nhất ứng với bước sóng 2918 và 2850 đặc trưng cho sự có mặt với nồng độ cao của các liên kết C-H và nhóm CH₂ có trong thành phần của mẫu bitum [15]. Trong khi đó ở các mẫu 5, 10, 15 và 20% PG thì mức độ hấp thụ ở các bước sóng này giảm dần và đạt giá trị bé nhất là mẫu 20% PG (đường phía trên cùng). Xảy ra điều này có thể là do hàm lượng PG càng tăng thì bitum càng bị pha loãng nên các thành phần của mẫu bitum biến tính càng thể hiện cường độ hấp thụ yếu hơn, đặc biệt ở mẫu có chứa 20% PG.

Mức độ hấp thụ quang phổ ở các bước sóng tương ứng 1457 và 1375cm⁻¹ đặc trưng cho sự giao động của các nguyên tử thuộc nhóm CH₂ và CH₃, chứng tỏ sự có mặt các hydrocacbon no như parafin và nhóm chất dầu có trong bitum [15]. Mức độ hấp thụ yếu dần ở các mẫu có chứa PG với hàm lượng cao hơn.

Nhìn chung qua việc xác định phổ IR cho mẫu bitum và các mẫu bitum biến tính bằng PG ở các hàm lượng khác nhau cho thấy chúng tương đồng nhau và chỉ khác nhau về cường độ hấp thụ. Điều đó cho thấy sự tương tác hóa học giữa PG và các nhóm thành phần của bitum không xảy ra hoặc xảy ra yếu. Sự xuất hiện một số peak không theo quy luật trong mẫu PG₅ (ứng với mẫu 5% PG) trong khoảng bước sóng từ 1000 đến 1500cm⁻¹ và 1740cm⁻¹ có thể là do mẫu PG₅ xử lý chưa sạch nên tồn tại một số tạp chất có trong mẫu.

3.3. Ảnh hưởng của PG đến điểm hóa mềm của bitum

Điểm hóa mềm của bitum đánh giá khả năng làm việc, phân loại, tồn trữ, đồng thời cảnh báo khả năng làm việc của bitum ở nhiệt độ cao. Đã xác định điểm hóa mềm của bitum trước và sau khi biến tính bằng PG, kết quả nhận được trình bày trong hình 3.



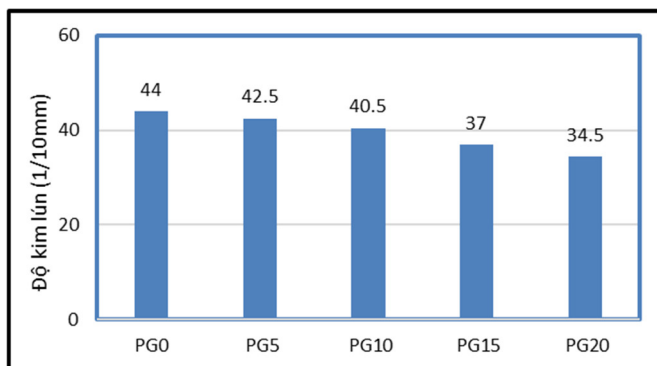
Hình 3. Ảnh hưởng của PG đến điểm hóa mềm của bitum

Kết quả trên hình 3 cho thấy, PG có ảnh hưởng lớn đến nhiệt độ hóa mềm của bitum. Cụ thể khi cho PG vào biến tính bitum ở các hàm lượng lần lượt là 0, 5, 10, 15 và 20%, tương ứng với các mẫu PG₀, PG₅, PG₁₀, PG₁₅ và PG₂₀ điểm hóa mềm tăng lên tương ứng 51,5; 53; 56; 59,5 và 64°C.

Xảy ra điều này là do bản thân PG là chất rắn, có thành phần chính là CaSO₄ ở dạng bột mịn với kích thước < 45µm nên chúng như một chất gia cường cho bitum và làm cho bitum trở nên quánh hơn, dẫn đến làm tăng điểm hóa mềm. Với việc sử dụng 20% PG vào biến tính bitum làm tăng điểm hóa mềm từ 51,5 lên 64°C, đồng thời giảm được lượng phát thải đáng kể và giảm thiểu được hiện tượng vệt lún bánh xe khi nhiệt độ tăng cao vào mùa hè nếu định hướng sử dụng bitum trong ngành giao thông.

3.4. Ảnh hưởng của PG đến độ kim lún của bitum

Mục đích của nghiên cứu này nhằm kiểm tra độ quánh của bitum trước và sau khi biến tính bằng PG. Độ quánh của bitum được biểu thị bằng độ kim lún tính bằng phần mười milimet của kim tiêu chuẩn xuyên thẳng đứng vào mẫu trong điều kiện cho trước về nhiệt độ, thời gian và tải trọng quy định. Đã nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng PG đến độ kim lún của bitum, kết quả nhận được trình bày trên hình 4.



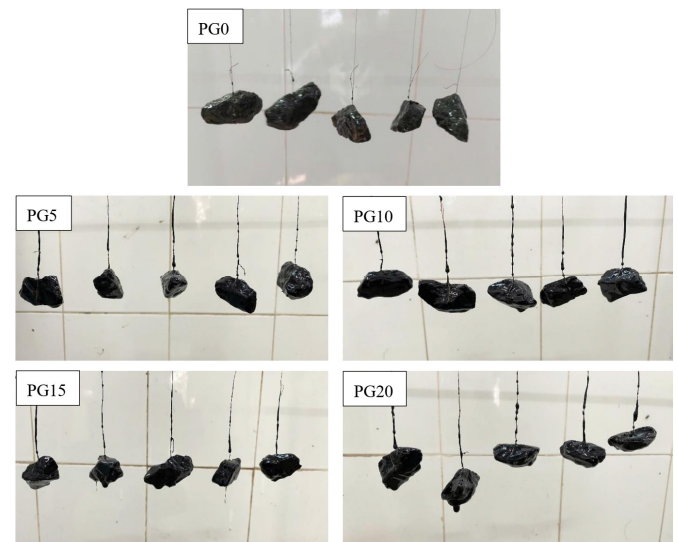
Hình 4. Ảnh hưởng của PG đến độ kim lún của bitum

Kết quả trên hình 4 cho thấy, khi đưa PG vào biến tính bitum lần lượt với các hàm lượng 0, 5, 10, 15 và 20%

(tương ứng với các mẫu PG₀, PG₅, PG₁₀, PG₁₅ và PG₂₀) độ kim lún giảm tương ứng lần lượt là 44; 42,5; 40,5; 37 và 34,5 (0,1mm). Điều này cho thấy hàm lượng PG càng tăng thì độ kim lún của bitum càng giảm, với mức giảm này cho thấy hỗn hợp bitum sau biến tính quánh hơn. Xảy ra điều này là do PG đóng vai trò như một chất độn gia cường có kích thước µm nên khi phân tán vào hệ bitum đã làm cho bitum quánh lại và đồng thời giảm độ kim lún.

3.5. Ảnh hưởng của PG đến độ bám dính với đá của bitum

Khả năng bám dính với đá cốt liệu của bitum là một thông số cần kiểm tra nhằm đánh giá mức độ kết dính của bitum trước và sau khi biến tính. Đã nghiên cứu ảnh hưởng của PG ở các hàm lượng khác nhau đến độ bám dính với đá của bitum, kết quả nhận được trình bày trong hình 5.



Hình 5. Ảnh hưởng của PG đến độ bám dính với đá của bitum

Kết quả trên hình 5 cho thấy hàm lượng PG vào biến tính bitum có ảnh hưởng đến khả năng bám dính với đá cốt liệu. Cụ thể ở mẫu trống không biến tính (PG₀), có độ bám dính với đá trung bình, màng bitum bọc hầu như toàn bộ bề mặt viên đá, đôi chỗ bị bong tróc dày mỏng khác nhau và đối chiếu với tiêu chuẩn TCVN 7504-05 thì mẫu PG₀ đạt ở mức cấp 3.

Trong khi đó ở các mẫu có biến tính PG với các hàm lượng tăng dần 5%, 10%, 15% và 20% cho thấy bề mặt viên đá trông bóng mịn hơn, màng bitum đều bám nguyên vẹn, bọc toàn bộ bề mặt viên đá, không có điểm bong tróc và đối chiếu với tiêu chuẩn cho thấy các mẫu đều đạt ở mức cấp 5 là cấp cao nhất.

4. KẾT LUẬN

Tận dụng nguồn thải phosphogypsum (PG) tại nhà máy sản xuất phân bón DAP1 - Đình Vũ vào việc biến tính bitum

là một giải pháp hữu ích nhằm giảm thiểu phát thải ra môi trường, đồng thời tăng tính ổn định của bitum. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi sử dụng PG vào biến tính bitum ở các hàm lượng 0, 5, 10, 15 và 20% KL làm cho bitum trở nên quán hơn thông qua điểm hóa mềm tăng từ 51,5 đến 64°C và độ kim lún giảm từ 44 xuống 34,5 (1/10mm). Bitum sau biến tính bằng PG ở mức 20%, cho điểm hóa mềm tăng lên và độ kim lún giảm xuống, rất thuận lợi cho việc định hướng ứng dụng trong ngành giao thông, do giải quyết được hiện tượng vết lún bánh xe gây hư hỏng kết cấu mặt đường vào mùa hè. Đồng thời khi có mặt PG làm chất gia cường ở kích thước μm đã làm cho bitum có khả năng kết dính với đá cốt liệu tốt hơn thông qua việc xác định độ bám dính với đá từ cấp 3 lên cấp 5 là cấp cao nhất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. H. Garbaya, A. Jraba, M. A. Khadimallah, E. Elaloui, "The Development of a New Phosphogypsum-Based Construction Material: A Study of the Physicochemical, Mechanical and Thermal Characteristics," *Materials*, 14, 7369. 2021. doi.org/10.3390/ma14237369.
- [2]. Taherkhani, "Investigating the Properties of Asphalt Concrete Containing Glass Fibers and Nanoclay," *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 49(1), 45-58, 2016. doi: 10.7508/cej.2016.01.004.
- [3]. D. Yellanki, P. Gopi, "A Study on Plastic-Bitumen Roads," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5 (9), 17269-17273, 2016. DOI:10.15680/IJIRSET.2016.0509159.
- [4]. M. A. ÇolaK, E. Zorlu, M. Y. Çodur, F. I. Baş, O. Yalçın, E. Kuşkan, "Investigation of Physical and Chemical Properties of Bitumen Modified with Waste Vegetable Oil and aste Agricultural Ash for Use in Flexible Pavements," *Coatings*, 13 (11), 2023. 1866.doi.org/10.3390/coatings13111866.
- [5]. V. Sabadra, "Use of Polymer Modified Bitumen in Road Construction," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(12), 799-801, 2017.
- [6]. P. Cong, S. Chen, J. Yu, H. Chen, "Compatibility and Mechanical Properties of Epoxy Resin Modified Asphalt Binders," *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(2), 118-123, 2011.
- [7]. T. T. C. Hà, T. T. K. Đăng, "Nghiên cứu một số chỉ tiêu cơ lý cơ bản của bitum-epoxy," *Tạp chí Khoa học - Công nghệ Trường Đại học Giao thông Vận tải*, 5, 81-83, 2017.
- [8]. A. K. Banerji, D. Chakraborty, A. Mudi, P. Chauhan, "Characterization of waste cooking oil and waste engine oil on physical properties of aged bitumen," *Materials Today: Proceedings*, 59(3), 1694-1699, 2022.
- [9]. N. Saboo, M. Sukhija, G. Singh, "Effect of Nanoclay on Physical and Rheological Properties of Waste Cooking Oil-Modified Asphalt Binder," *J.*

Mater. Civ. Eng., 33(3), 04020490, 2021. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003598.

[10]. N. K. Chi, D. N. Phụng, C. Q. Truyền, N. M. Linh, D. T. Dinh, N. T. Hằng, D. T. Tiên, P. H. Quỳnh, T. D. Lâm, "Nghiên cứu thành phần bã thạch cao phosphogypsum, loại bỏ tạp chất, thu hồi thạch cao dùng trong sản xuất vật liệu xây dựng," *Tạp chí Môi trường, chuyên đề 1*, pp.33-38, 2019.

[11]. H. Tayibi, C. Pérez, F. A. López, M. Choura, A. López-Delgado, "A phospho-gypsum stabilization process using a sulphur polymer matrix," *International Congress of Solid Waste Management & Sustainable Development, (Tunisia)*, 2008. https://www.researchgate.net/publication/313220437_A_phosphogypsum_stabilization_process_using_a_sulfur_polymer_matrix.

[12]. W. Li, L. Ma, S. Qiu, X. Yin, Q. Dai, W. Du, "Sustainable Utilization of Phosphogypsum in Multi-Solid Waste Recycled Aggregates," *Environmental Impact and Economic Viability Sustainability*, 16, 1161, 2024. doi.org/10.3390/su16031161.

[13]. V. V. T. Ân, C. C. Hào, "Ảnh hưởng của thạch cao phốt pho đến các tính chất cơ lý của xi măng Pooc Lăng PC40," *Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng*, 15, 2, 89-103, 2018.

[14]. T. Hoàng, D. Q. Thắm, N. V. Giang, "Chế tạo và nghiên cứu tính chất, cấu trúc của vật liệu composit trên cơ sở polyetylen và bã thải photphogyp biến tính hữu cơ," *Tạp chí Hóa học*, 49(3), 291-295, 2011.

[15]. N. T. Trang, T. N. Hưng, P. H. Khang, "Nghiên cứu thành phần hóa học và hình thái của chất kết dính nhựa đường - lưu huỳnh sử dụng kỹ thuật chuyển đổi phổ hồng ngoại Fourier (FTIR) và kính hiển vi điện tử quét (SEM)," *Tạp chí Giao thông Vận tải*, 12, 2018.

AUTHORS INFORMATION

Dang Huu Trung, Nguyen The Huu, Trinh Thi Hai

Hanoi University of Industry, Vietnam