



EFFECTS OF CEMENT CONTENT AND CURING CONDITIONS ON THE MICROSTRUCTURE OF EMULSION MORTAR

Nguyen Thi Mi Tra*, Nguyen Ngoc Lan, Nguyen Quang Phuc

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 06/11/2023

Revised: 24/12/2023

Accepted: 04/01/2024

Published online: 15/02/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.2.5>

* *Corresponding author*

Email: nguyenmitra@utc.edu.vn; Tel: +84987757635

Abstract. Cold recycled asphalt technology is an economically and environmentally effective solution because the asphalt mixture is produced and constructed at ambient temperature conditions. The biggest disadvantages of cold recycled asphalt mixtures are the slow strength formation time and poor water stability. Using additional cement additives is considered a solution to help improve the emulsion breaking time to form and develop strength. Because the emulsion contains water, the process of formation and strength development of the mixture depends on curing conditions. This article presents the results of experimental research analyzing the microstructure and chemical composition of cement emulsion mortar - the element that contributes to the stiffness of cold recycled mixtures. The cement content selected for the experiment is 0%, 1.5% and 2.5%, respectively. The curing time of the emulsion mortar mixture after mixing with cement is 1 day, 7 days, 14 days, and 28 days. The results show that with the same cement ratio, when the temperature and curing time are increased, the cement hydrates faster and more hydration products are formed. At the same curing temperature, different cement ratios also affect the ratio of hydration products and the growth of calcium silicate hydrate crystals ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} - \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$).

Keywords: Cold recycled asphalt, Emulsified Asphalt, Curing time, Curing temperature, Microstructure,

@ 2024 University of Transport and Communications



ẢNH HƯỞNG HÀM LƯỢNG XI MĂNG VÀ ĐIỀU KIỆN BẢO DƯỠNG ĐẾN VI CẤU TRÚC CỦA VỮA NHỰA TƯƠNG NHỰA ĐƯỜNG

Nguyễn Thị Mi Trà *, Nguyễn Ngọc Lân, Nguyễn Quang Phúc

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội.

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 06/11/2023

Ngày nhận bài sửa: 24/12/2023

Ngày chấp nhận đăng: 04/01/2024

Ngày xuất bản Online: 15/02/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.2.5>

* Tác giả liên hệ:

Email: nguyenmitra@utc.edu.vn; Tel: +84987757635

Tóm tắt. Công nghệ bê tông asphalt tái chế nguội là giải pháp công nghệ đem lại nhiều hiệu quả về mặt kinh tế và môi trường do hỗn hợp được sản xuất và thi công ở điều kiện nhiệt độ môi trường. Nhược điểm lớn nhất của hỗn hợp asphalt tái chế nguội là thời gian hình thành cường độ lâu và tính ổn định nước kém. Sử dụng thêm phụ gia xi măng được xem là giải pháp giúp cải thiện thời gian nhũ tương phân tách để hình thành và phát triển cường độ. Do trong thành phần của nhũ tương có nước nên quá trình hình thành và phát triển cường độ của hỗn hợp phụ thuộc vào điều kiện bảo dưỡng. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm phân tích vi cấu trúc và thành phần hóa của vữa nhũ tương xi măng-thành phần góp phần tạo nên độ cứng cho hỗn hợp tái chế nguội. Hàm lượng xi măng được lựa chọn thí nghiệm lần lượt là 0%, 1,5% và 2,5%. Thời gian bảo dưỡng hỗn hợp vữa nhũ tương sau khi trộn với xi măng lần lượt là 1 ngày, 7 ngày, 14 ngày và 28 ngày. Kết quả cho thấy rằng, với cùng tỉ lệ xi măng khi tăng nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng lên thì xi măng thủy hóa nhanh hơn và các sản phẩm thủy hóa hình thành nhiều hơn. Ở nhiệt độ bảo dưỡng như nhau, tỉ lệ xi măng khác nhau cũng ảnh hưởng đến tỉ lệ các sản phẩm thủy hóa và sự phát triển của tinh thể calcium silicate hydrate ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} - \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$).

Từ khóa: Asphalt tái chế nguội, Nhũ tương nhựa đường, Nhiệt độ bảo dưỡng, Thời gian bảo dưỡng, vi cấu trúc.

© 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tái chế nguội 100% vật liệu cào bóc mặt đường bê tông asphalt cũ (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) là một giải pháp công nghệ đem lại nhiều hiệu quả về mặt kinh tế và môi trường khi xây dựng mặt đường [1, 2].

Với hỗn hợp bê tông asphalt (BTAP) tái chế nguội chỉ sử dụng chất kết dính nhũ tương thì quá trình hình thành cường độ của hỗn hợp tái chế nguội có thể cần vài tuần hoặc thậm chí vài tháng và phụ thuộc vào một số yếu tố như nhiệt độ, độ ẩm tương đối, điều kiện thoát nước và chiều dày lớp tái chế [3, 4]. Để đẩy nhanh quá trình hình thành cường độ và tăng tính ổn định nước cho hỗn hợp, phụ gia khoáng như xi măng (XM), vôi thủy hoá hoặc xỉ lò cao nghiền mịn thường được sử dụng [5-8]. Trong số các phụ gia khoáng trên, xi măng Portland được sử dụng nhiều nhất và có hiệu quả tốt hơn so với các sản phẩm khác [9, 10]. Ảnh hưởng chính của xi măng đến tính năng của hỗn hợp được kiểm soát bởi các tương tác hóa lý giữa xi măng và nhũ tương nhựa đường. Theo nghiên cứu của J.Xiao và cộng sự, thông qua phương pháp kính hiển vi điện tử quét (SEM) và chụp cắt lớp (CT) cho thấy các cấu trúc rỗng siêu nhỏ hình thành ở các hàm lượng xi măng và nhựa đường nhũ tương khác nhau cũng ảnh hưởng đáng kể đến tính chất cơ học và tính năng hỗn hợp nhũ tương-xi măng[11]. Trong một nghiên cứu khác của J. Lin và cộng sự, cường độ giai đoạn đầu của hỗn hợp tái chế nguội sử dụng nhũ tương nhựa đường và xi măng (CRME) bị ảnh hưởng bởi xi măng và độ ẩm. Quá trình thủy hóa xi măng lấy nước trong nhũ tương nhựa đường, từ đó có thể đẩy nhanh quá trình phân tách nhũ tương và dẫn đến tăng cường độ giai đoạn đầu của CRME. Ảnh SEM về hình thái bên trong của CRME sau 3 ngày và 7 ngày bảo dưỡng cho thấy có rất nhiều sản phẩm hydrat hóa bao gồm ettringite và canxi hydroxit tồn tại trong bề mặt tiếp xúc giữa cốt liệu và vữa nhũ tương nhựa đường. Quá trình hình thành cấu trúc vi mô của CRME chủ yếu được kiểm soát bằng sự khuếch tán phân tử giữa các hạt nhựa đường [12]. Vi cấu trúc của CRME với các điều kiện hóa già tăng cường khác nhau cũng được mô tả bởi kính hiển vi điện tử quét môi trường (ESEM)[13]. Theo đó sau 10 ngày hóa già ở 60°C hoặc 5 ngày hóa già ở 75°C, CRME có thể tạo thành một cấu trúc vi mô liên tục và đặc sít được cấu tạo bởi các sản phẩm thủy hóa xi măng và chất kết dính nhựa đường. Ngoài ra, khi nhiệt độ lão hóa là 75°C, từ 5 ngày đến 10 ngày, sự thay đổi vi cấu trúc của CRME là rất nhỏ.

Như vậy, tùy thuộc vào thành phần hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội, quá trình rắn chắc được tạo thành bởi sự kết hợp của một số cơ chế như nhũ tương phân tách, mất mát độ ẩm và quá trình hydrat hóa các thành phần khoáng vật của xi măng [14-18]. Các quá trình này sẽ bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ, nhiệt độ cao sẽ đẩy nhanh quá trình đóng rắn [19]. Do vậy, việc nghiên cứu thực nghiệm về thành phần vữa nhũ tương nhựa đường xi măng trong hỗn hợp tái chế nguội để tìm hiểu rõ hơn cơ chế hình thành và phát triển các sản phẩm thủy hóa với các tỉ lệ xi măng và thời gian bảo dưỡng khác nhau đã được tiến hành.

2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

2.1. Thành phần vữa nhũ tương xi măng

Vữa nhũ tương-xi măng (NTX) là hỗn hợp vật liệu gồm nhũ tương nhựa đường, xi măng và nước.

Nhũ tương. Nhũ tương cationic phân tách chậm CSS-1h đã được lựa chọn sử dụng theo khuyến cáo của AASHTO MP31 [20]. Loại nhũ tương này được sản xuất ở trong phòng thí

nghiệm theo công nghệ của tập đoàn Colas với tỷ lệ chất kết dính 63,3%, tỷ lệ còn lại là nước, chất nhũ hoá và phụ gia, độ pH bằng 2,38. Hình 1 thể hiện màu sắc và trạng thái của loại nhũ tương này.

Phụ gia khoáng. Nghiên cứu sử dụng phụ gia là xi măng portland hỗn hợp PCB30 với các chỉ tiêu đáp ứng theo yêu cầu của AASHTO M85 [21]. Theo khuyến cáo của tiêu chuẩn AASHTO PP86 [22] và ARRA-CR201 [23], lựa chọn hàm lượng xi măng từ 0,25 đến 2,5 % theo khối lượng RAP. Trong nghiên cứu này, hàm lượng xi măng được lựa chọn là 0%, 1,5% và 2,5% theo khối lượng khô của RAP đã được tính toán khi thiết kế thành phần hỗn hợp BTAP tái chế nguội trong phòng.



Hình 1. Nhũ tương CSS-1h.



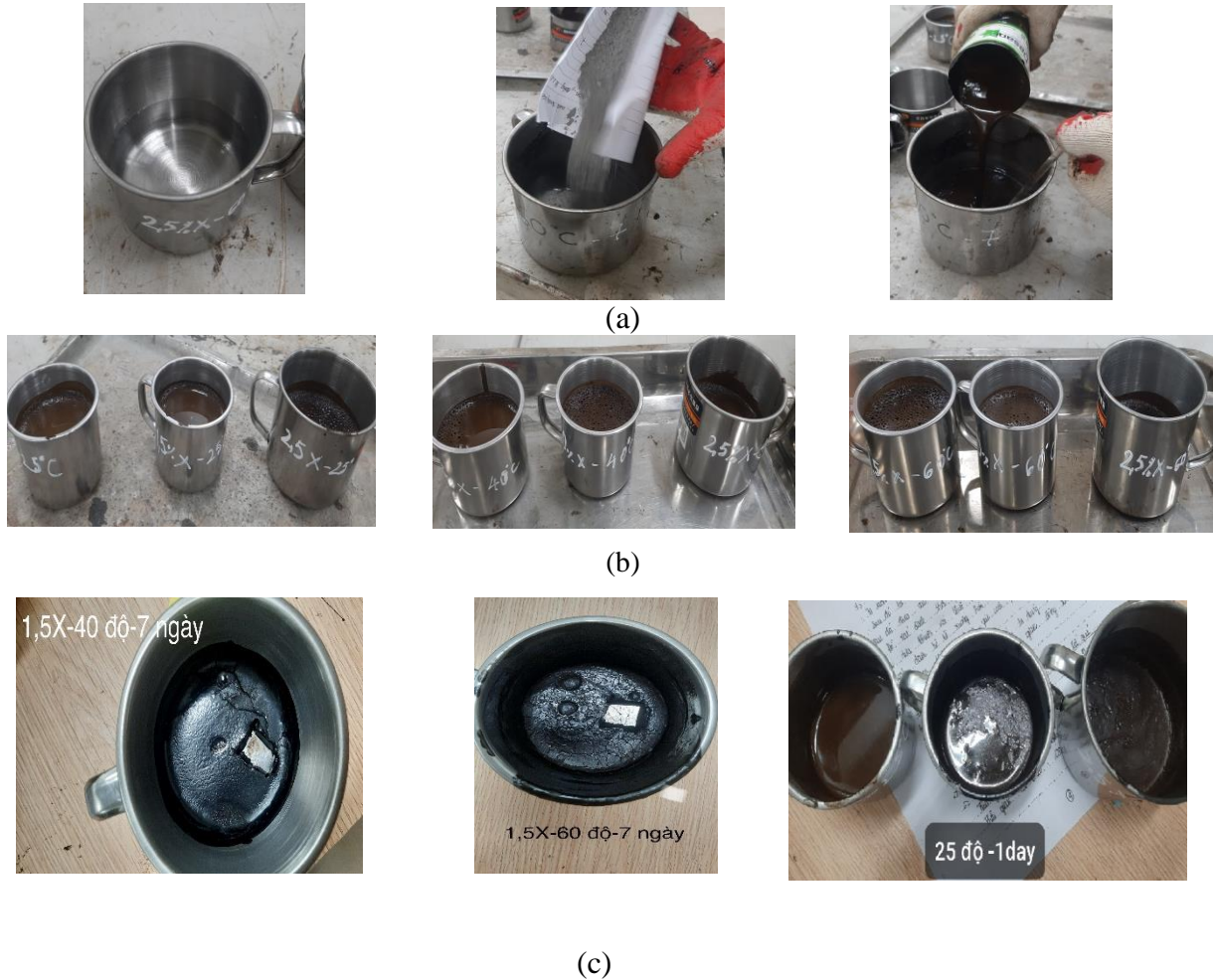
Hình 2. Phụ gia xi măng PCB30.

Nước. Nước được sử dụng cho hỗn hợp tái chế với vai trò cải thiện độ chặt đầm nén. Nước dùng để trộn phải là nước sạch và có các chỉ tiêu kỹ thuật phù hợp với AASHTO MP 31. Theo khuyến cáo của tiêu chuẩn AASHTO PP86 và ARRA_CR201 lựa chọn hàm lượng nước từ 1,5 đến 3,5 % theo khối lượng RAP khô [23]. Đối với hỗn hợp vữa nhũ tương xi măng nghiên cứu, hàm lượng nước được lấy theo tỉ lệ đã thiết kế trong hỗn hợp BTAP tái chế nguội tương ứng với lượng nhũ tương.

Hàm lượng nhũ tương. Một hàm lượng nhũ tương được lựa chọn là 3,3% (theo khối lượng RAP khô) dựa kết quả nghiên cứu của nhóm đã được thực hiện [24] để trộn với nước và các hàm lượng xi măng 1,5 % và 2,5 %.

2.2 Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

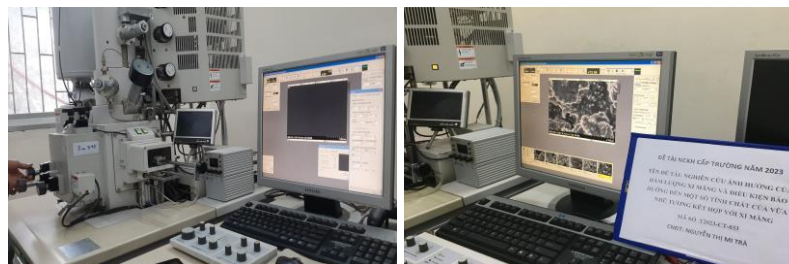
Trên cơ sở thành phần hỗn hợp đã được xác định, nghiên cứu tiến hành tạo mẫu vữa thí nghiệm thành phần hóa và vi cấu trúc, quá trình được thực hiện như sau: trộn Xi măng với nước trong cốc inox rồi khuấy đều bằng đũa thủy tinh, tiếp đó hỗn hợp được trộn đều với nhũ tương. Hỗn hợp sau khi khuấy đều liên tục sẽ được rót vào các cốc nhỏ để bảo dưỡng ở 3 điều kiện nhiệt độ. Số lượng mẫu thí nghiệm của mỗi tổ mẫu ứng với các nhiệt độ bảo dưỡng và tỉ lệ xi măng khác nhau là 3 mẫu. Vậy tổng số mẫu thí nghiệm là 9 mẫu. Các mẫu sau khi chuẩn bị xong được tiến hành bảo dưỡng ở các nhiệt độ 25°C, 40°C, 60°C. Thời gian bảo dưỡng các mẫu ở mỗi nhiệt độ lần lượt là 1 ngày, 7 ngày và 14 ngày. Hình 3 thể hiện quá trình trộn mẫu và mẫu sau khi bảo dưỡng trong tủ sấy.



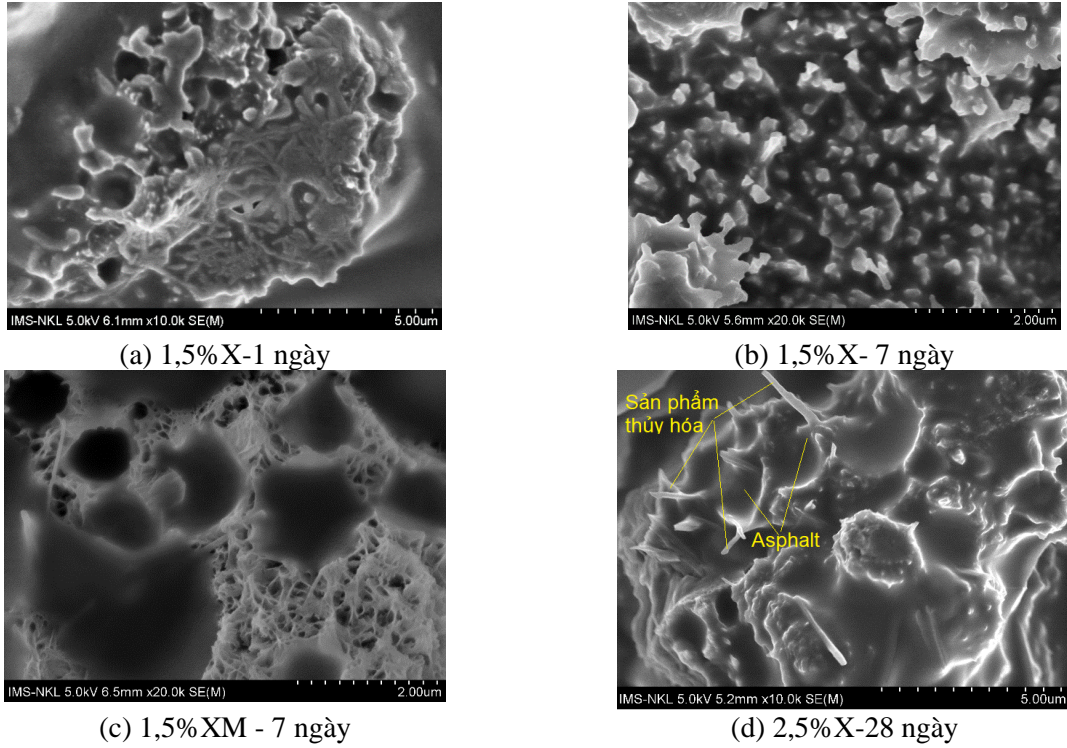
Hình 3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm: (a) trình tự trộn tạo mẫu vữa (b). Chia mẫu sau khi trộn (c). Mẫu sau bảo dưỡng trong tủ sấy ở 40°C, 60°C và 25°C.

2.3. Thí nghiệm chụp vi cấu trúc và phân tích thành phần hóa của vữa nhũ tương xi măng

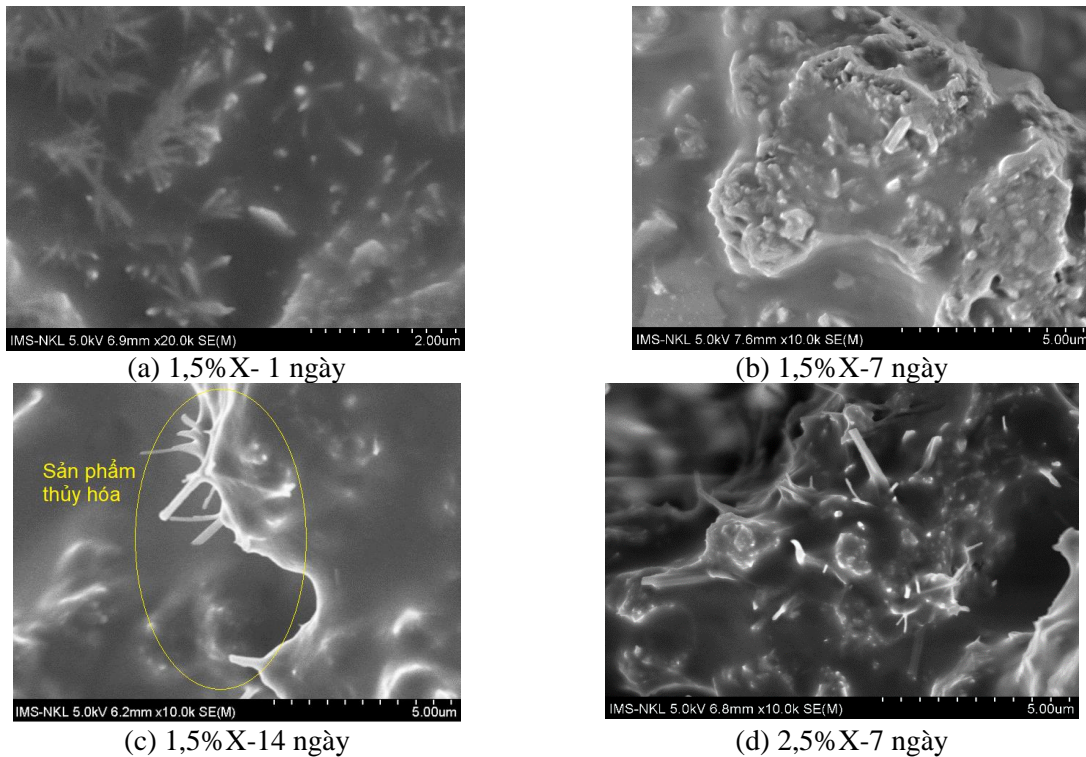
Sự hình thành cấu trúc vi mô của hỗn hợp vữa ở giai đoạn đầu được xác định bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM). Đây là một loại kính hiển vi có thể tạo ra ảnh với độ phân giải cao bằng cách sử dụng một chùm điện tử (chùm các electron) hẹp quét trên bề mặt mẫu. Ngoài ra độ phân giải còn phụ thuộc vào tương tác giữa vật liệu tại bề mặt mẫu vật và điện tử. Chúng cho phép đánh giá các đặc trưng của các vật liệu vô cơ cũng như hữu cơ trong khoảng kích thước từ nm tới μm . Nghiên cứu này sử dụng kính hiển vi điện tử quét Hitachi S-4800 tại Viện Khoa học vật liệu- Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (Hình 4).



Hình 4. Hình ảnh quá trình phân tích vi cấu trúc mẫu vữa nhũ tương xi măng.



Hình 5. Hình ảnh chụp SEM của các mẫu được bảo dưỡng ở 25°C.



Hình 6. Hình ảnh chụp SEM của các mẫu được bảo dưỡng ở 40°C.

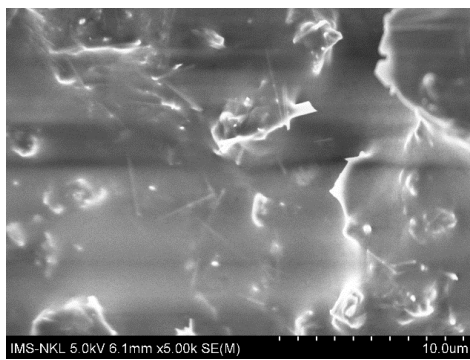
Thiết bị này có độ phân giải tối đa lên tới 2 nm và độ phóng đại cao nhất là 800000 lần. Đồng thời, thiết bị còn có bộ phận phân tích phổ tán sắc năng lượng (Energy Dispersion X-ray

Spectrometer – EDX) EMAX ENERGY của hãng Horiba (Anh) đính kèm cho phép phân tích thành phần các nguyên tố hóa học có trong mẫu.

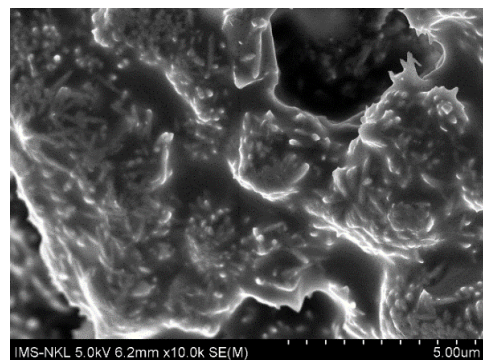
3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1 Phân tích kết quả chụp SEM

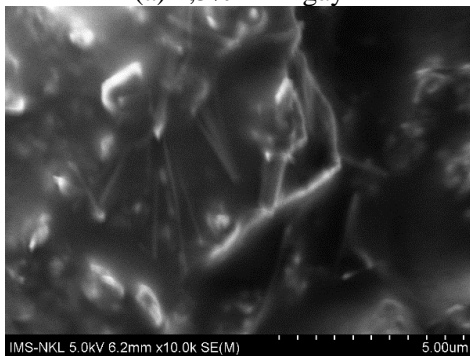
Kết quả chụp SEM của các mẫu với các tỉ lệ xi măng ở các thời điểm và nhiệt độ đóng rắn khác nhau được thể hiện như Hình 5,6,7. Theo đó, hình ảnh SEM về hình thái bên trong của hỗn hợp chất kết dính sau 1 ngày, 3 ngày, 7 ngày và 14 ngày bảo dưỡng. Có thể nhận thấy rằng, có nhiều sản phẩm hydrat hóa bao gồm ettringite và calcium hydrox-ide tồn tại trong cấu trúc vữa nhũ tương-xi măng.



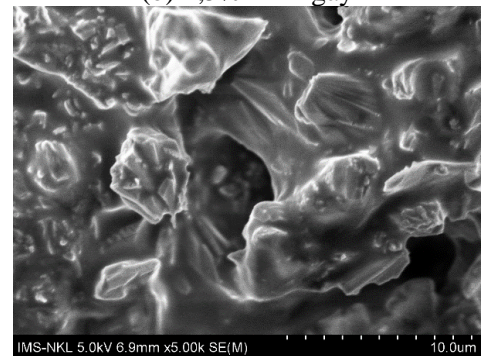
(a) 2,5% X-1 ngày



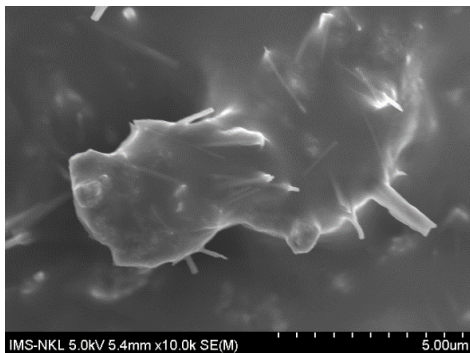
(b) 1,5% X-1 ngày



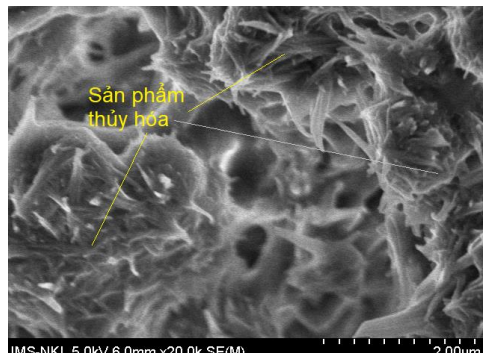
(c) 2,5% X-7 ngày



(d) 1,5% X-7 ngày



(e) 2,5% X-14 ngày

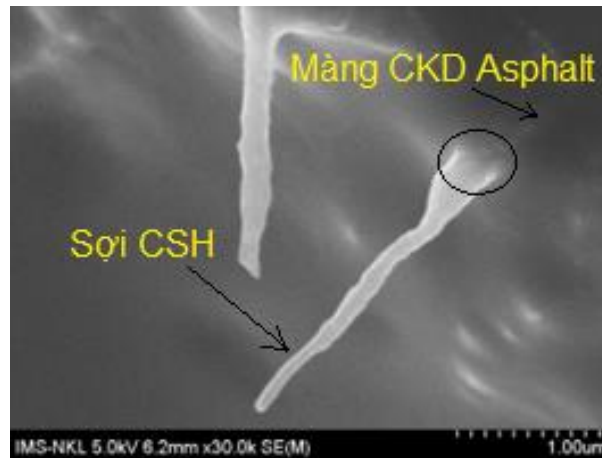


(g) 1,5% X-14 ngày

Hình 7. Hình ảnh chụp SEM của các mẫu được bảo dưỡng ở 60°C.

Nhìn chung các sản phẩm thủy hóa trên bề mặt vữa tăng dần lên khi tăng nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng hỗn hợp ứng với mỗi tỉ lệ xi măng. Tuy nhiên tỷ lệ các sản phẩm thủy hóa ít hơn khi hỗn hợp vữa được bảo dưỡng ở 25°C so với ở điều kiện 40°C và 60°C ở cùng tỉ lệ xi măng và thời gian bảo dưỡng. Ngoài ra, Hình 5a cho thấy các sản phẩm thủy hóa được bao bọc bởi nhựa đường trong khi ở Hình 7b sản phẩm thủy hóa đã hình thành rõ với mật độ tăng dần và bắt đầu xuyên qua màng nhựa. Ở Hình 6 và Hình 7, tỷ lệ các sản phẩm hydrat hóa tăng lên khi tăng nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng hỗn hợp. Hình 7d, 7g cho thấy tỷ lệ các sản phẩm thủy hóa chiếm ưu thế khi tăng thời gian bảo dưỡng từ 7 lên 14 ngày với cùng tỉ lệ xi măng và nhiệt độ bảo dưỡng 60°C.

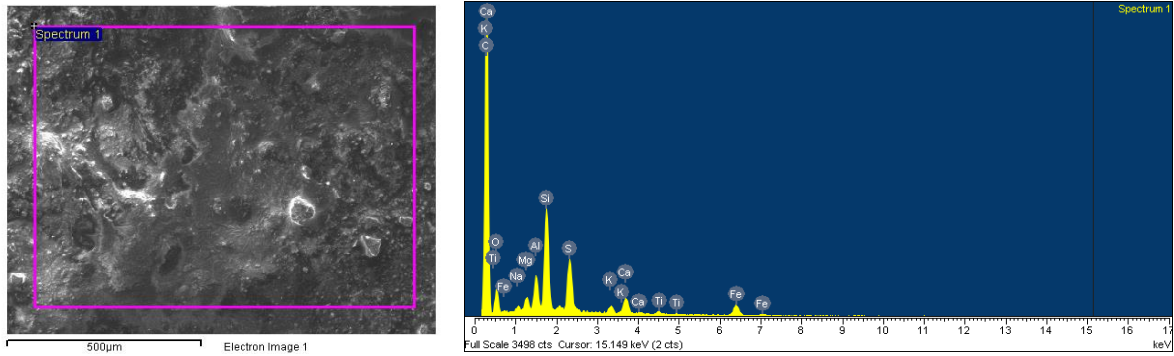
Về ảnh hưởng của hàm lượng xi măng, ở cùng điều kiện nhiệt độ và thời gian thì hỗn hợp vữa có tỉ lệ xi măng cao hơn sẽ hình thành sản phẩm thủy hóa nhiều hơn. Hình 6b và 6d cho thấy với nhiệt độ bảo dưỡng 40°C, hỗn hợp vữa 2,5%X đã xuất hiện nhiều sợi CSH thâm nhập qua màng nhựa so với vữa 1,5%X. Điều này cho thấy hàm lượng xi măng có ảnh hưởng đến sự hình thành, phát triển và tỉ lệ sản phẩm thủy hóa. Bên cạnh đó, sự liên kết giữa màng nhựa đường và các sản phẩm hydrat hóa diễn ra liên tục và trơn tru, không có vết nứt như Hình 8 chứng minh có sự bám dính tốt giữa màng nhựa đường và các sản phẩm thủy hóa.



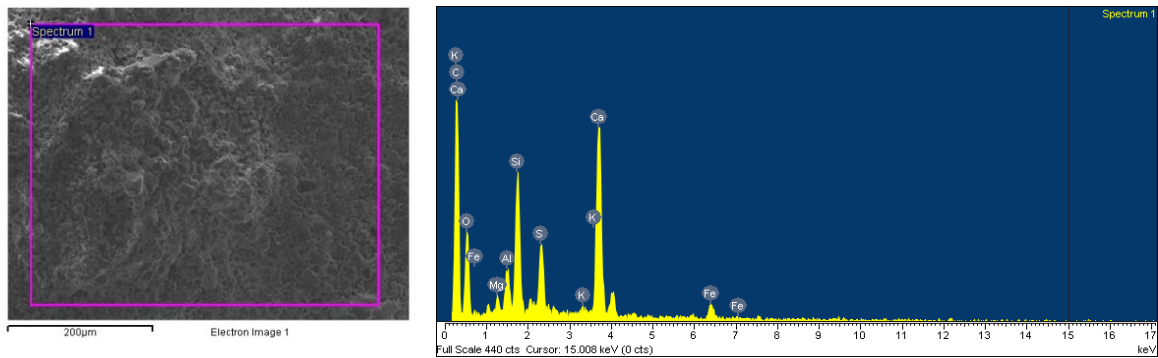
Hình 8. Trạng thái dính bám giữa màng nhựa và sản phẩm thủy hóa.

3.2 Phân tích thành phần hóa học

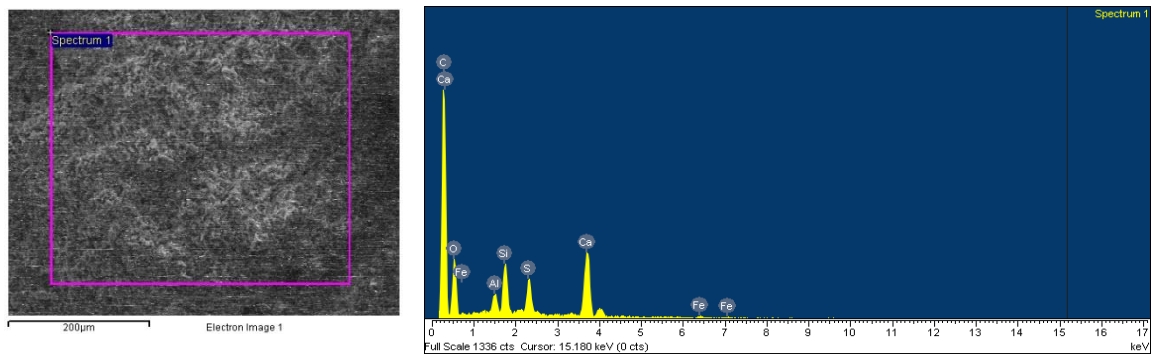
Xi măng Portland chủ yếu được tạo thành từ các khoáng $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C3S), $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C2S), $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A), $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF), CaSO_4 , v.v.. Nhũ tương nhựa đường chủ yếu chứa các nguyên tố C, H, S, O, N. Quá trình thủy hóa xảy ra khi xi măng gặp nước. Sản phẩm thủy hóa xi măng chủ yếu là khoáng calcium silicate hydrate ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} - \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) chứa các nguyên tố Ca, Si, Al, Fe, O [25]. Để xác định thành phần hóa học trong các mẫu vữa nhũ tương được dưỡng ở các nhiệt độ và thời gian khác nhau, thí nghiệm phân tích phổ tán sắc năng lượng EDX đã được thực hiện. Hình 9 đến Hình 15 trình bày một số kết quả phân tích phổ tán sắc năng lượng và thành phần các nguyên tố hóa học chủ yếu.



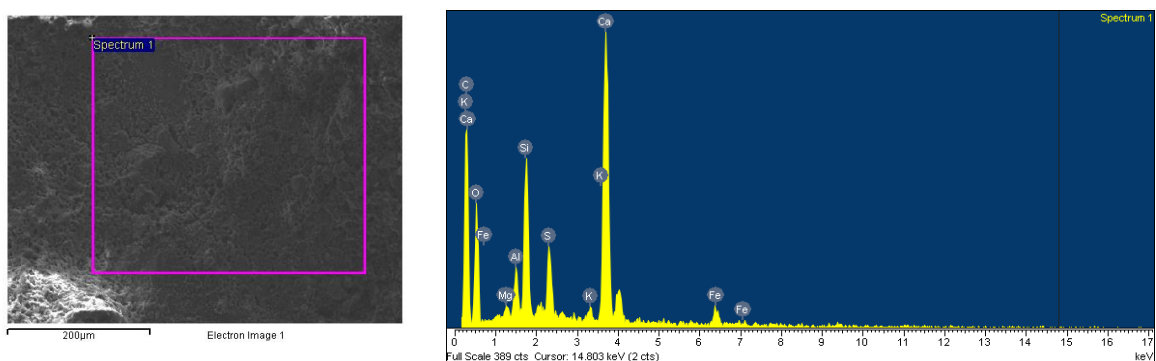
Hình 9. Phổ EDX của mẫu không có xi măng.



Hình 10. Phổ EDX của mẫu 1,5% X - bảo dưỡng 40°C - 3 ngày.

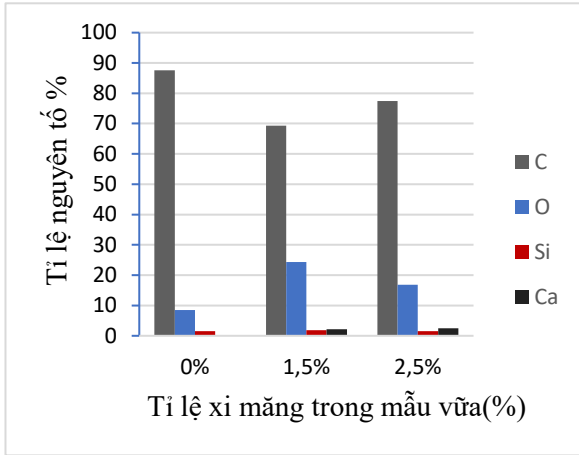


Hình 11. Phổ EDX của mẫu 2,5% X - bảo dưỡng 25°C - 14 ngày.

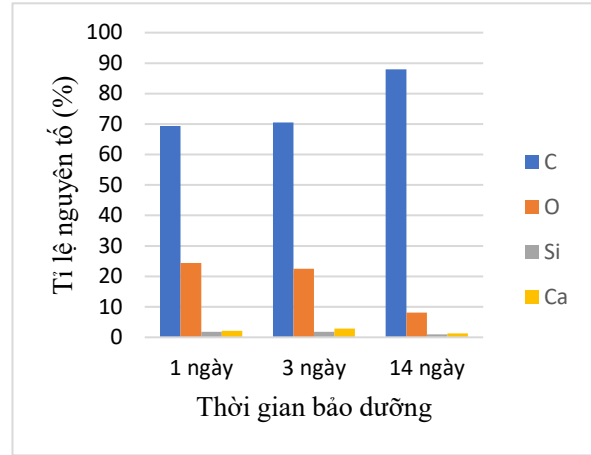


Hình 12. Phổ EDX của mẫu 1,5% - bảo dưỡng 60°C - 3 ngày

Kết quả phổ tán xạ năng lượng tia X của mẫu vữa không có xi măng bao gồm chủ yếu là carbon (Hình 9). Trong quang phổ có mặt các đỉnh của C, O, Si, Ca (Hình 10,11,12) khẳng định sự có mặt của sản phẩm thủy hóa. Tuy nhiên, hàm lượng nguyên tố O, Si, Ca tăng và hàm lượng nguyên tố C giảm trong các mẫu có xi măng (Hình 13). Cụ thể, khi hàm lượng xi măng tăng từ 1,5% lên 2,5% thì tổng hàm lượng các nguyên tố O, Si, Ca tăng tương ứng 18,1 % và 10,6 % so với mẫu đối chứng không có xi măng. Kết quả này cho thấy hỗn hợp vữa nhũ tương xi măng được hình thành bởi sản phẩm thủy hóa và nhũ tương nhựa đường.

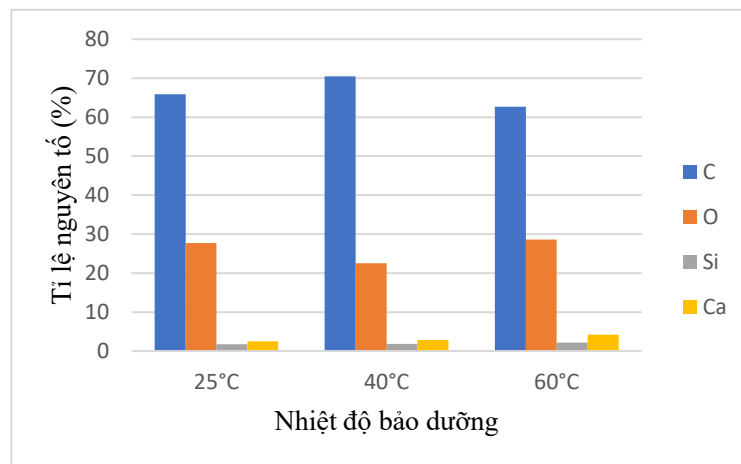


Hình 13. Thành phần các nguyên tố chính của các mẫu vữa với tỉ lệ xi măng khác nhau.



Hình 14. Thành phần các nguyên tố chính của các mẫu vữa 1,5% X ở 40°C với thời gian bảo dưỡng khác nhau.

Sự thay đổi hàm lượng các nguyên tố ở các ngày bảo dưỡng khác nhau của hỗn hợp ứng với hàm lượng 1,5% xi măng, nhiệt độ bảo dưỡng 40°C được thể hiện như ở Hình 14. Kết quả cho thấy rằng, khi tăng thời gian bảo dưỡng hỗn hợp lên 14 ngày thì tổng hàm lượng các nguyên tố O, Si, Ca có nhiều sự thay đổi hơn ở thời gian 3 ngày so với mẫu 1 ngày bảo dưỡng.



Hình 15. Thành phần các nguyên tố chính của các mẫu vữa 1,5% X ở 3 ngày với nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau.

Kết quả ảnh hưởng của nhiệt độ bảo dưỡng đến tổng hàm lượng các nguyên tố O, Si, Ca thể hiện như ở Hình 15 cho thấy, tỷ lệ các nguyên tố O, Si, Ca có xu hướng tăng dần lên khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 40°C lên 60°C, kết quả này là do nhiệt độ cao đã thúc đẩy quá trình phân tách nhũ tương và quá trình thủy hóa các khoáng có trong thành phần xi măng để hình thành khoáng $3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm phân tích vi cấu trúc của các mẫu vữa nhũ tương-xi măng ứng với các hàm lượng xi măng được bảo dưỡng ở các ngày tuổi và nhiệt độ khác nhau, nghiên cứu đưa ra một số kết luận sau:

- Khi tỉ lệ xi măng trong hỗn hợp vữa nhũ tương thấp và ở nhiệt độ bảo dưỡng thấp cũng như thời gian bảo dưỡng ít thì nhựa đường chiếm ưu thế và sản phẩm hydrat hóa vẫn được bao phủ bởi nhũ tương nhựa đường.
- Khi tăng tỉ lệ xi măng từ 1,5% lên 2,5% thì sản phẩm thủy hóa tăng và xâm nhập màng nhựa đường. Ngoài ra, tổng hàm lượng các nguyên tố O, Si, Ca cũng tăng lên trung bình 14,3%.
- Cùng thời gian bảo dưỡng, khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 25°C lên 40°C và 60°C đã thúc đẩy quá trình thủy hóa xi măng từ đó tăng tỉ lệ sản phẩm thủy hóa trong vữa nhũ tương
- Thời gian hình thành cấu trúc hỗn hợp vữa nhũ tương phụ thuộc vào hàm lượng xi măng, nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2023-CT-033.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. James A, Overview of asphalt emulsion. Transp. Res. Circ., 2006.
- [2]. Asphalt Institute Manual Series, Asphalt cold mix manual (Third Edition), 14, 1997.
- [3]. C.P. Marais, M.I. Tait, Pavements with bitumen emulsion treated bases: proposed material specifications, mix design criteria and structural design procedures for southern African conditions, in: 5th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Swaziland, 5–9 (1989) 26–35.
- [4]. J.P. Serfass, J.P. Henrat, X. Carbonneau, Evaluation of cold mixes performance in the short and long term, in: Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobume Congress, Vienna, Austria, May 12–14, 2004 482–492 .
- [5]. A. Alizadeh, A. Modarres, Mechanical and microstructural study of RAP-clay composites containing bitumen emulsion and lime, J. Mater. Civ. Eng, 31 (2019). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002583](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002583)
- [6]. S. Du, Mechanical properties and reaction characteristics of asphalt emulsion mixture with activated ground granulated blast-furnace slag, Constr. Build. Mater., 187 (2018) 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.233>

- [7]. M.A. Omrani, A. Modarres, Emulsified cold recycled mixtures using cement kiln dust and coal waste ash-mechanical-environmental impacts. *J. Clean. Prod.*, 199 (2018) 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.155>
- [8]. M.A.T. Alsheyab, T.S. Khedaywi, Effect of electric arc furnace dust (EAFD) on properties of asphalt cement mixture, *Resour. Conserv. Recycl.*, 70 (2013) 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.10.003>
- [9]. Y. Niazi, M. Jalili, Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion, *Constr. Build. Mater.*, 23 (2009) 1338–1343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020>
- [10]. A. Hodgkinson, A.T. Visser, The role of fillers and cementitious binders when recycling with foamed bitumen or bitumen emulsion, In *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*, Sun City, South Africa, (2004) 12–16.
- [11]. Jingjing Xiao, Wei Jiang, Wanli Ye, Jinhuan Shan, Zhenjun Wang, Effect of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 220 (2019) 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.051>
- [12]. Juntao Lin, Lin Huo, Fang Xu, Yue Xiao, Jinxiang Hong, Development of microstructure and early-stage strength for 100% cold recycled asphalt mixture treated with emulsion and cement, *Construction and Building Materials*, 189 (2018) 924–933. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.064>
- [13]. Chongzheng Zhu, Henglong Zhang, Likui Huang, Chuanwen Wei, Long-term performance and microstructure of asphalt emulsion cold recycled mixture with different gradations, *Journal of Cleaner Production*, 215 (2019) 944–951. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.103>
- [14]. Khweir K, Fordyce D, Strickland D, Read J, Effect of curing time and the performance of cold asphalt mixtures, in *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobume Congress*, Vienna, Austria, 2004, 460–465.
- [15]. B. Gomez-Meijide, I. Perez, A proposed methodology for the global study of the mechanical properties of cold asphalt mixtures, *Mater. Des.*, 57 (2014) 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.079>
- [16]. F. Cardone, A. Grilli, M. Bocci, A. Graziani, Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials, *Int. J. Pavement Eng.*, 16 (2015) 868–880. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.966710>
- [17]. M. Bocci, A. Grilli, F. Cardone, A. Graziani, A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2011) 773–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007>
- [18]. Asphalt Academy, *Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilized Materials*, 2nd ed., Asphalt Academy: Pretoria, South Africa, 2009.
- [19]. C.P. Marais, M.I. Tait, Pavements with bitumen emulsion treated bases: proposed material specifications, mix design criteria and structural design procedures for southern African conditions, in: *5th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*, Swaziland, (1989) 26–35.
- [20] AASHTO MP31, *Standard Specification for Materials for Cold Recycled Mixtures with Emulsified*

Asphalt, 2018.

[21]. AASHTO M 85, Standard Specification for Portland Cement, 2020.

[22]. AASHTO PP86, Standard Practice for Emulsified Asphalt Content of Cold Recycled Mixture Designs, 2019.

[23]. ARRA CR-201, Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Emulsified Asphalt Recycling Agent, Asphalt Recycling & Reclaiming Association, 2016.

[24]. Nguyễn Ngọc Lê, Nguyễn Quang Phúc, Nguyễn Thị Mi Trà, Phạm Thị Thanh Thủy, Ảnh hưởng của nhiệt độ bảo dưỡng mẫu đến sức kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nguội, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 73 (2022) 288-299.

[25]. Yanhai Yang, Ye Yang, Baitong Qian, Performance and Microstructure of Cold Recycled Mixes Using Asphalt Emulsion with Different Contents of Cement, Material, 12 (2019) 2548. <https://doi.org/10.3390/ma12162548>