



## EFFECT OF CURING TEMPERATURE AND CURING TIME ON CRACKING OF COLD RECYCLED ASPHALT MIXTURE WITH CEMENT ASPHALT EMULSION

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

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 30/01/2023

Revised: 23/02/2023

Accepted: 07/03/2023

Published online: 15/04/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.1>

\* *Corresponding author*

Email: [nguyenngoclan@utc.edu.vn](mailto:nguyenngoclan@utc.edu.vn); Tel: +84902119278

**Abstract.** Cold recycled asphalt mixture using emulsified asphalt and portland cement has significantly improved strength and moisture sensitivity. The cold recycled asphalt mixture with cementitious admixtures, the time of formation and strength development is dependent on curing conditions and affect the cracking properties of the mixture. This paper presents the results of an experimental evaluating the cracking properties of cold recycled mixtures cured at 25°C, 40°C and 60°C. Corresponding to each temperature, the mix curing time was 1 day, 3 days, 7 days and 28 days. The results show that, the tensile strength increases with increasing temperature and curing time. In the curing times, when the curing temperature was increased from 25°C to 40°C and 60°C, the failure energy ( $G_f$ ) and the Cracking Tolerance Index ( $CT_{Index}$ ) increased. In addition, at each curing temperature, when increasing the curing time from 1 day to 3 days, 7 days and 28 days, the  $CT_{Index}$  decreased. Tensile strength,  $G_f$  and  $CT_{Index}$  did not change significantly for the mixture cured at 40°C and 60°C at 28 days.

**Keywords:** Cold recycled asphalt, Cement asphalt emulsion, Curing time, Curing temperature, Failure energy, Cracking tolerance index, Tensile strength.

© 2023 University of Transport and Communications



## ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ VÀ THỜI GIAN BẢO DƯỠNG ĐẾN ĐẶC TÍNH KHÁNG NỨT CỦA BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NGUỘI SỬ DỤNG NHŨ TƯƠNG VÀ XI MĂNG

Nguyễn Ngọc Lê\*, Nguyễn Thị Mi Trà, Nguyễn Quang Phúc

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

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 30/01/2023

Ngày nhận bài sửa: 23/02/2023

Ngày chấp nhận đăng: 07/03/2023

Ngày xuất bản Online: 15/04/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.1>

\* Tác giả liên hệ:

Email: nguyenngoclan@utc.edu.vn; Tel: +84902119278

**Tóm tắt.** Hỗn hợp asphalt tái chế nguội sử dụng nhũ tương asphalt kết hợp với xi măng đã được cải thiện đáng kể về cường độ và tính ổn định nước. Với hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng thêm phụ gia xi măng, thời gian hình thành và phát triển cường độ phụ thuộc nhiều vào điều kiện bảo dưỡng và có thể ảnh hưởng đến đặc tính nứt của hỗn hợp. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá đặc tính kháng nứt của hỗn hợp tái chế nguội được bảo dưỡng ở 25°C, 40°C và 60°C. Tương ứng với mỗi nhiệt độ, thời gian bảo dưỡng hỗn hợp là 1 ngày, 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày. Kết quả cho thấy rằng, khi tăng nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng lên thì cường độ chịu kéo tăng lên. Ở các ngày tuổi bảo dưỡng, khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 25°C lên 40°C và 60°C thì năng lượng phá hủy ( $G_f$ ) và chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  tăng lên. Ngoài ra, ở mỗi nhiệt độ bảo dưỡng, khi tăng thời gian bảo dưỡng từ 1 ngày lên 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày thì chỉ số  $CT_{Index}$  giảm xuống. Cường độ chịu kéo,  $G_f$  và chỉ số  $CT_{Index}$  thay đổi không đáng kể đối với hỗn hợp được bảo dưỡng 40°C và 60°C ở 28 ngày tuổi.

**Từ khóa:** Asphalt tái chế nguội, Nhũ tương asphalt asphalt, Nhiệt độ bảo dưỡng, Thời gian bảo dưỡng, Năng lượng phá hủy, Chỉ số kháng nứt, Cường độ chịu kéo.

© 2023 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]. Hiệu quả kinh tế đạt được bằng cách giảm nhu cầu về vật liệu mới và giảm mức tiêu thụ nhiên liệu. Các lợi ích về môi trường bao gồm giảm nhu cầu sử dụng tài nguyên thiên nhiên và giảm phát thải khí nhà kính trong cả quá trình xây dựng.

Với hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội chỉ sử dụng chất kết dính nhũ tương asphalt hoặc bitum bột 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]. Do vậy, để đẩy nhanh quá trình hình thành cường độ và tăng tính ổn định nước cho hỗn hợp, phụ gia khoáng như xi măng, 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 phản ứng giữa xi măng và nhũ tương asphalt asphalt. 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 asphalt phân tách, mất mát độ ẩm và quá trình hydrat hóa các thành phần khoáng vật của xi măng [11-17]. Các quá trình này sẽ bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ, nhiệt độ cao sẽ đẩy nhanh quá trình đóng rắn [3]. Do vậy, trong quá trình thiết kế và đánh giá tính năng, hỗn hợp tái chế nguội thường được đẩy nhanh quá trình rắn chắc bằng cách bảo dưỡng trong tủ bảo ôn ở các nhiệt độ khác nhau.

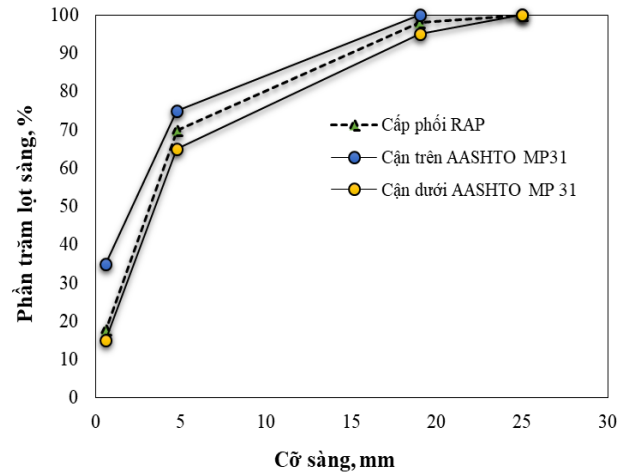
Nhiệt độ bảo dưỡng thay đổi từ 25°C đến 60°C [18-21]. Thời gian bảo dưỡng thay đổi từ 1 ngày đến 28 ngày. Các quy trình bảo dưỡng phổ biến là bảo dưỡng 40°C trong 3 ngày và bảo dưỡng 60°C trong 2 ngày hoặc 3 ngày, sau đó mẫu được lấy ra khỏi khuôn và được bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ [22, 23]. Phương pháp đóng rắn cấp tốc ở 110°C trong 24 giờ cũng được đề xuất trong một số tài liệu [24]. Viện Asphalt Hoa Kỳ đề xuất bảo dưỡng mẫu ở 40°C trong 3 ngày để mô phỏng 6 tháng bảo dưỡng tại hiện trường [25]. Serfass et al. nhận thấy rằng 14 ngày đóng rắn ở 35°C và độ ẩm 20% tương ứng với khoảng 1-3 năm trong điều kiện khí hậu ôn đới [4]. Một nghiên cứu từ Ireland đưa ra kết luận, mẫu bảo dưỡng ở 40°C trong 28 ngày có thể tương đương với 1 năm bảo dưỡng hiện trường [26]. Du nhận thấy rằng cường độ ép chẻ của hỗn hợp tái chế nguội sau khi đóng rắn ở 60°C trong 72 giờ cao hơn so với hỗn hợp đóng rắn ở 25°C trong 28 ngày [27]. Cho đến nay, các mối quan hệ tương đương giữa gia tốc bảo dưỡng và bảo dưỡng nhiệt độ bình thường vẫn chưa rõ ràng. Hỗn hợp tái chế nguội sử dụng nhũ tương asphalt kết hợp với phụ gia xi măng có thể đạt được về độ cứng và tính ổn định nước, tuy nhiên đặc tính kháng nứt cần được đảm bảo để cân bằng tính năng cho hỗn hợp. Với mục tiêu đánh giá mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ bảo dưỡng đến đặc tính kháng nứt của hỗn hợp tái chế nguội và sự thay đổi đặc tính này theo thời gian, nghiên cứu tiến hành thí nghiệm kéo gián tiếp Indirect Tensile Test (IDT) để xác định các thông số cường độ chịu kéo ( $P$ ), năng lượng phá hủy ( $G_f$ ), độ dốc đường cong lực-chuyển vị sau giá trị lực lớn nhất ( $|m_{75}|$ ), và chỉ số kháng nứt ( $CT_{Index}$ ) của các mẫu thử được bảo dưỡng ở các nhiệt độ 25°C, 40°C, 60°C và ở các ngày tuổi khác nhau là 1 ngày, 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày.

### 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

#### 3.1. Thành phần hỗn hợp

**Vật liệu RAP.** Vật liệu RAP sau khi cào bóc ở mặt đường được nghiền để đảm bảo kích thước hạt lớn nhất bằng 19 mm theo quy định AASHTO MP 31 (Hình 1a). RAP được sấy khô

sau đó chiết tách bitum và kiểm tra thành phần hạt, kết quả được thể hiện như ở Hình 1b và Bảng 1.



(a)

(b)

Hình 1. Loại RAP 0-19: (a) ảnh RAP, (b) thành phần hạt RAP.

Bảng 1. Thành phần hạt của vật liệu RAP.

Cỡ sàng	Hàm lượng lọt sàng %
25 mm	100
19 mm	100
4,75mm	70,69
600 μm	18,61

**Nhũ tương asphalt.** Nhũ tương asphalt cationic phân tách chậm CSS-1h đã được lựa chọn sử dụng theo khuyến cáo của AASHTO MP31. Loại nhũ tương asphalt 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 2 thể hiện màu sắc và trạng thái của loại nhũ tương asphalt 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. Theo khuyến cáo của tiêu chuẩn AASHTO PP86 và ARRA-CR201, 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 1,5% theo khối lượng khô của RAP dựa trên các kết quả nghiên cứu của Cox và nhóm nghiên cứu (2013), Gu F và nhóm nghiên cứu (2018) [28, 29].



Hình 2. Nhũ tương asphalt CSS-1h.



Hình 3. 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. Lượng nước thêm vào hỗn hợp được xác định dựa trên độ ẩm tối ưu của hỗn hợp tái chế, độ ẩm của RAP và hàm lượng nước có trong nhũ tương asphalt. 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 [30].

**Hàm lượng nhũ tương asphalt tối ưu.** Tham khảo kết quả nghiên cứu của nhóm đã được thực hiện, nghiên cứu xác định hàm lượng nhũ tương tối ưu theo khối lượng RAP khô là 3,3 %. Bảng 2 đưa ra tỷ lệ thành phần và các chỉ tiêu kỹ thuật của hỗn hợp tái chế ứng với hàm lượng nhũ tương asphalt tối ưu [31].

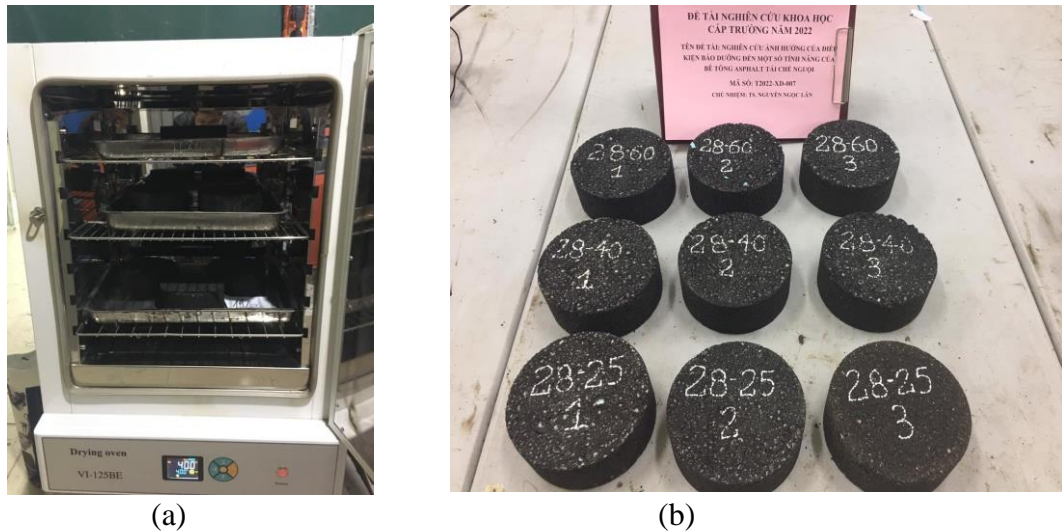
Bảng 2. Tỷ lệ thành phần và các chỉ tiêu kỹ thuật của hỗn hợp tái chế.

<b>1. Tỷ lệ thành phần:</b>		
Nhũ tương asphalt (theo khối lượng RAP khô)		3,3 %
Xi măng PCB 30		1,5 %
Nước (theo khối lượng RAP khô)		2,6 %
<b>2. Các chỉ tiêu của hỗn hợp thiết kế:</b>		
<i>Chỉ tiêu</i>	<i>Kết quả thí nghiệm</i>	<i>Giới hạn yêu cầu</i>
Độ ổn định Marshall, (kN)	8,6	Tối thiểu 5,56
Độ ổn định Marshall còn lại	0,82	Tối thiểu 0,7
Độ bong bật, %	1,2	Tối đa 7%
Hệ số Residual Asphalt : Cement	3,6:1,0	Tối thiểu 3,0:1,0

### 3.2 Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Trên cơ sở thành phần hỗn hợp đã được xác định, nghiên cứu tiến hành chế tạo mẫu thí nghiệm theo hướng dẫn của tiêu chuẩn AASHTO PP 86, quá trình được thực hiện như sau: trộn RAP với lượng nước thêm vào trong 60 giây, tiếp theo đó hỗn hợp được trộn với xi măng trong 60 giây, cuối cùng nhũ tương asphalt được trộn với hỗn hợp trong 60 giây. Hỗn hợp sau khi trộn tiến hành đầm trên thiết bị đầm xoay để đạt được mẫu thí nghiệm có kích thước bằng 150 mm và chiều cao 62 mm. Số lượng mẫu thí nghiệm của mỗi tổ mẫu ứng với các nhiệt độ

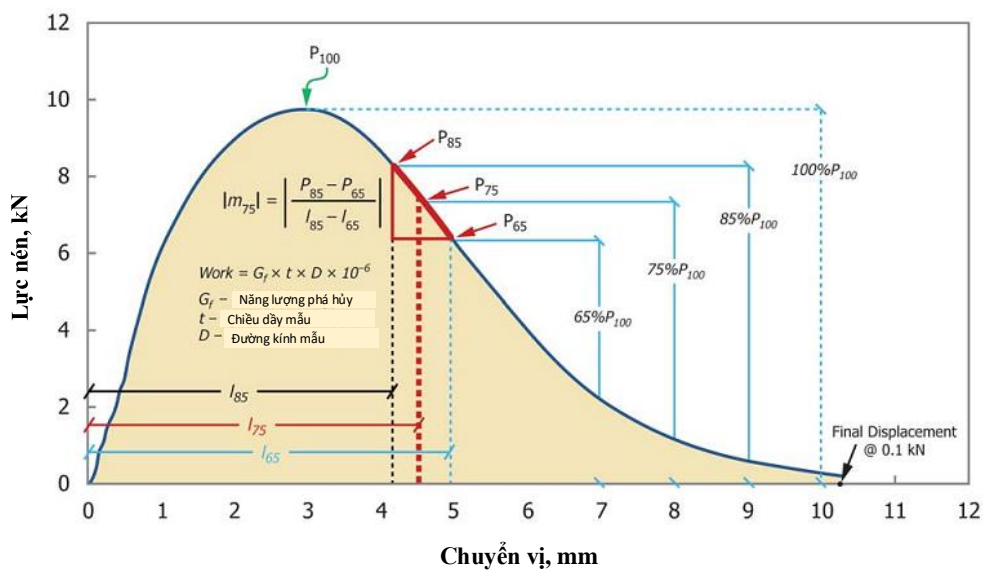
bảo dưỡng khác nhau là 3 mẫu, tổng số mẫu thí nghiệm là 36 mẫu. Các mẫu sau khi đầm được tiến hành bảo dưỡng ở điều kiện khô ứng với các nhiệt độ 25°C, 40°C, 60°C. Thời gian gian bảo dưỡng các mẫu ở mỗi nhiệt độ lần lượt là 1 ngày, 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày. Hình 4 thể hiện mẫu được bảo dưỡng mẫu ở tủ sấy trong điều kiện khô và mẫu sau khi bảo dưỡng.



Hình 4. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm: (a) Bảo dưỡng mẫu trong tủ sấy khô, (b). Mẫu sau khi bảo dưỡng.

### 3.3. Thí nghiệm kéo gián tiếp

Để đánh giá đặc tính kháng nứt của hỗn hợp tái chế nguội, thí nghiệm kéo gián tiếp Indirect Tensile Test (IDT) theo mô hình ép chẻ được lựa chọn. Thí nghiệm và tính toán các thông số đặc trưng cho khả năng kháng nứt của hỗn hợp được thực hiện theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM D 8225. Hình 5 thể hiện hình ảnh thí nghiệm và mẫu sau khi thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm thu được đường cong quan hệ giữa lực với chuyển vị có dạng như ở Hình



Hình 5. Đường cong lực - chuyển vị.

Từ đường cong này, các thông số đặc trưng cho khả năng kháng nứt của hỗn hợp như chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$ , năng lượng phá hủy, giá trị tuyệt đối của độ dốc đường cong lực-chuyển vị nằm sau giá trị lực nén lớn nhất, cường độ chịu kéo được tính toán như sau:

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \left( \frac{l_{75}}{D} \right) \quad (1)$$

trong đó:

$G_f$  - năng lượng phá hủy ( $J/mm^2$ );

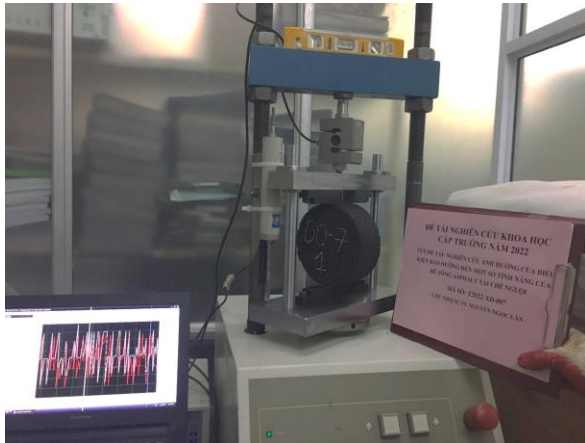
$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6 \quad (2)$$

$W_f$  - công phá hủy (J);

$D$  - đường kính mẫu thí nghiệm (mm);

$t$  - chiều dày mẫu thí nghiệm (mm);

$l_{75}$  - chuyển vị ứng với lực nén giảm bằng 75% lực nén lớn nhất (mm);



(a)



(b)

Hình 6. Thí nghiệm IDT: (a) thiết bị và mẫu thí nghiệm, (b) kết quả đường cong lực-chuyển vị.

$|m_{75}|$  - giá trị tuyệt đối của độ dốc đường cong lực-chuyển vị nằm sau giá trị lực nén lớn nhất ( $kN/mm$ ) được xác định theo công thức (3). Giá trị  $P_{85}$  và  $P_{65}$  được xác định như ở Hình 5.

$$|m_{75}| = \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \quad (3)$$

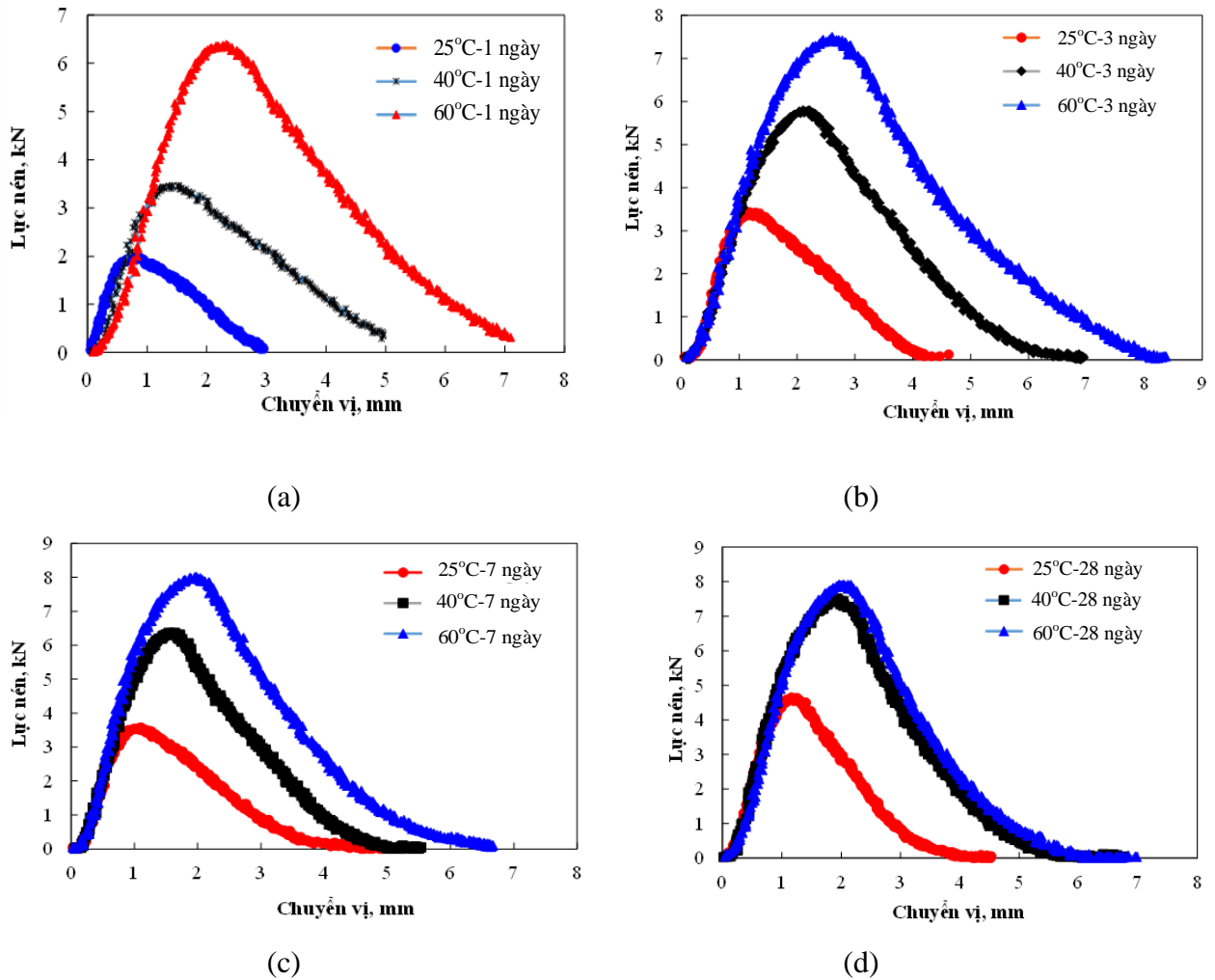
Cường độ chịu kéo được tính theo công thức sau:

$$R_k = \frac{2 \times P_{100}}{\pi \times h \times d}, MPa \quad (4)$$

trong đó: h – chiều cao mẫu (mm), d – đường kính mẫu (mm), P<sub>100</sub> – lực nén lớn nhất (N)

### 3.4 Kết quả thí nghiệm và thảo luận

Hình 6 thể hiện kết quả đường cong lực-chuyển vị thu được từ thí nghiệm IDT tương ứng với các mẫu thử bảo dưỡng ở 1 ngày, 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày.



Hình 7. Đường cong lực-chuyển vị của các mẫu thí nghiệm IDT.

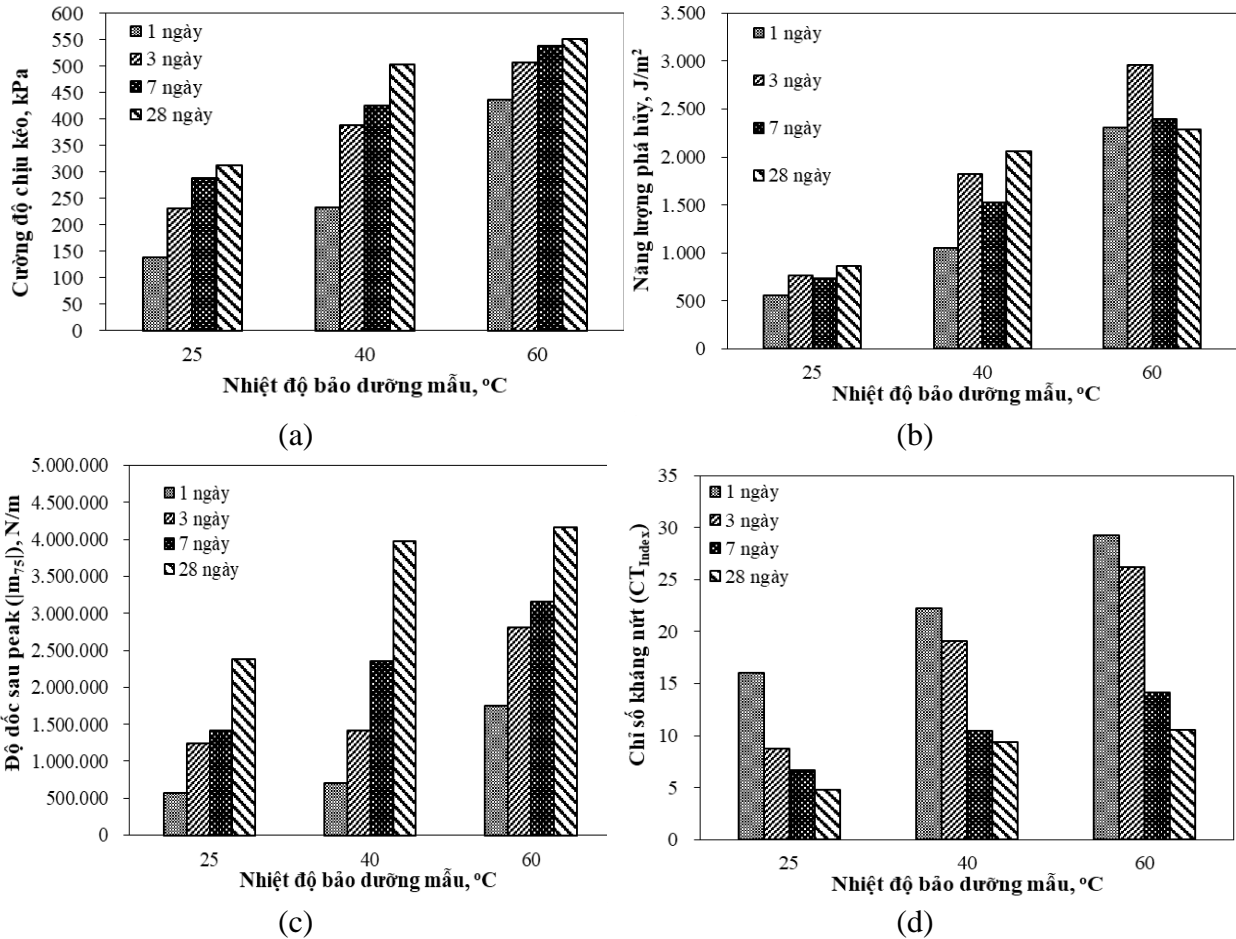
ở các ngày tuổi bảo dưỡng khác nhau: (a) 1 ngày, (b) 3 ngày, (c) 7 ngày, (d) 28 ngày

Kết quả thể hiện từ Hình 7 cho thấy rằng, ở các nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau, sự thay đổi đường cong lực-chuyển vị của các mẫu là khác nhau. Ở cùng một thời gian bảo dưỡng, khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng lên thì lực nén lớn nhất cũng tăng lên. Ngoài ra, ở thời điểm bảo dưỡng 3 ngày, 7 ngày, 28 ngày độ dốc đường cong lực-chuyển vị của các mẫu trước khi bị



phá hoại gần như bằng nhau. Ở thời điểm bảo dưỡng 28 ngày, cường độ chịu lực – chuyển vị của các mẫu bảo dưỡng 40°C và 60°C không có sự khác biệt đáng kể.

Trên cơ sở các kết quả số liệu đường cong lực-chuyển vị thu được của các mẫu thí nghiệm, nghiên cứu tiến hành tính toán các thông số đặc trưng cho sức kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nguội như cường độ chịu kéo ( $R_k$ ), năng lượng phá hủy ( $G_f$ ), độ dốc đường cong lực-chuyển vị sau giá trị lực nén lớn nhất ( $|m_{75}|$ ), và chỉ số kháng nứt ( $CT_{Index}$ ) theo các công thức (1), (2) và (3). Kết quả tính toán được thể hiện ở Hình 8.

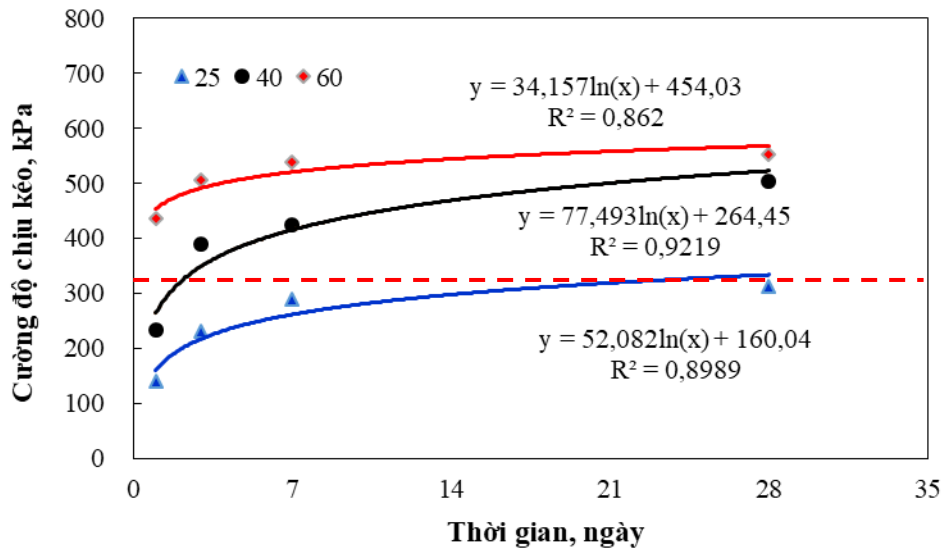


Hình 8. Kết quả tính toán các thông số từ thí nghiệm IDT: (a) cường độ chịu kéo, (b) năng lượng phá hủy, (c) độ dốc sau peak, (d) chỉ số kháng nứt.

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo thể hiện như ở Hình 8a cho thấy rằng, ở các ngày tuổi bảo dưỡng khác nhau, khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 25°C lên 40°C và 60°C cường độ chịu kéo tăng tương ứng 59,6% và 107,6%. Ngoài ra, ở cùng nhiệt độ bảo dưỡng, khi tăng thời gian bảo dưỡng lên 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày thì cường độ chịu kéo cũng tăng tương ứng 39,4%, 54,8% và 67,3%. Kết quả này là do khi tăng nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng hỗn hợp tái chế nguội sử dụng nhũ tương asphalt kết hợp với xi măng đã dẫn đến đẩy nhanh tốc độ thủy hóa các khoáng vật có trong xi măng và cũng đồng thời đẩy nhanh tốc độ phân tách của nhũ tương asphalt [29]. Như vậy, nghiên cứu đã chứng minh rằng việc sử dụng xi măng kết hợp với nhũ tương asphalt cho hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội đạt được các lợi ích chính như: thứ nhất, tăng được hiệu quả dính bám giữa pha chất kết dính trong nhũ tương asphalt với bề mặt RAP, thứ hai, đẩy nhanh tốc độ phân tách nhũ tương asphalt do các khoáng

vật có trong xi măng lấy nước có trong nhũ tương asphalt để thủy hóa tạo ra các sản phẩm thủy hóa làm tăng độ cứng cho bê tông asphalt tái chế nguội.

Mức độ thay đổi cường độ chịu kéo của các hỗn hợp ở các thời gian bảo dưỡng khác nhau tương ứng với các nhiệt độ bảo dưỡng được thể hiện như ở Hình 9.



Hình 9. Tốc độ phát triển cường độ chịu kéo của hỗn hợp theo thời gian.

Kết quả thể hiện như ở Hình 9 cho thấy rằng, nếu lấy giá trị cường độ chịu kéo quy định tối thiểu của AASHTO MP31 là 310 kPa thì hỗn hợp bảo dưỡng ở 60°C sau một ngày đã đáp ứng được, đối với hỗn hợp bảo dưỡng 40°C tối thiểu 2 ngày, và đối với hỗn hợp bảo dưỡng ở 25°C phải 28 ngày mới đáp ứng được. Ngoài ra, kết quả cường độ chịu kéo của hỗn hợp bảo dưỡng 60°C ở các ngày tuổi khác nhau còn cho thấy rằng, mức độ chênh lệch cường độ chịu kéo giữa các ngày tuổi không nhiều so với các hỗn hợp bảo dưỡng ở 25°C và 40°C. Như vậy có thể nhận thấy rằng, khi gia tốc nhiệt độ bảo dưỡng hỗn hợp tái chế nguội sử dụng nhũ tương asphalt và xi măng lên 40°C và 60°C, có thể rút ngắn được thời gian bảo dưỡng so với trường hợp bảo dưỡng ở nhiệt độ bình thường phòng thí nghiệm 25°C. Trong phạm vi nghiên cứu ở đây để đảm bảo cường độ chịu kéo cho hỗn hợp tái chế nguội, khuyến cáo nên bảo dưỡng 60°C tối thiểu 24 giờ, nếu bảo dưỡng 40°C thì thời gian bảo dưỡng tối thiểu 48 giờ.

Xu hướng thay đổi năng lượng phá hủy ( $G_f$ ) của các hỗn hợp khi được bảo dưỡng ở các ngày tuổi khác nhau như ở Hình 8b là không rõ ràng. Tuy nhiên, có thể nhận thấy rằng khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng lên 40°C và 60°C thì  $G_f$  tăng tương ứng 121,1% và 238,4% so với  $G_f$  của hỗn hợp bảo dưỡng ở 25°C.

Nếu như xu hướng thay đổi  $G_f$  của các hỗn hợp bảo dưỡng ở các ngày tuổi khác nhau là không rõ ràng thì giá trị  $|m_{75}|$  cho thấy rõ xu hướng thay đổi ở các ngày tuổi và nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau như ở Hình 8c. Cụ thể, khi nhiệt độ bảo dưỡng và thời gian bảo dưỡng tăng lên thì giá trị  $|m_{75}|$  cũng tăng lên, tức là hỗn hợp sẽ trở nên cứng và giòn hơn.

Đối với những loại vật liệu thể hiện đặc tính đàn nhớt, nếu sử dụng thí nghiệm IDT, thì chỉ số  $CT_{Index}$  là thông số thể hiện rõ nhất khả năng kháng nứt. Kết quả tính toán chỉ số  $CT_{Index}$  thể hiện như ở Hình 8d cho thấy rằng, ở các nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau, khi tăng thời gian bảo dưỡng lên 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày thì  $CT_{Index}$  giảm tương ứng 20,1%, 53,8% và 63,5% so với hỗn hợp bảo dưỡng 1 ngày tuổi. Tuy nhiên, ở cùng một ngày tuổi bảo dưỡng, khi tăng

nhệt độ bảo dưỡng từ từ 25°C lên 40°C và 60°C, thì giá trị  $CT_{Index}$  tăng tương ứng 68,4% và 120,7%. Kết quả này cho thấy hiệu quả rõ rệt của việc tăng nhiệt độ bảo dưỡng hỗn hợp tái chế nguội.

#### 4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm đánh giá đặc tính kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nguội sử dụng nhũ tương asphalt và phụ gia xi măng được bảo dưỡng ở các ngày tuổi và nhiệt độ khác nhau, một số kết luận sau được rút ra:

- Cả hai yếu tố nhiệt độ và thời gian bảo dưỡng đều ảnh hưởng đến đặc tính kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nguội sử dụng nhũ tương asphalt. Ở các ngày tuổi khác nhau, khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 25°C lên 40°C và 60°C cường độ chịu kéo tăng tương ứng 59,6% và 107,6%. Ngoài ra, ở cùng nhiệt độ bảo dưỡng, khi tăng thời gian bảo dưỡng lên 3, 7 và 28 ngày thì cường độ chịu kéo cũng tăng tương ứng 39,4 %, 54,8% và 67,3%.

- Cường độ chịu kéo của hỗn hợp được bảo dưỡng ở 60°C sau 1 ngày tuổi đã đáp ứng được mức tối thiểu theo quy định của AASHTO MP31, nhưng với hỗn hợp bảo dưỡng 40°C phải sau 3 ngày, và đối với hỗn hợp bảo dưỡng ở 25°C phải 28 ngày mới đáp ứng được. Ngoài ra, cường độ chịu kéo sau 7 ngày tuổi của hỗn hợp được bảo dưỡng ở 60°C tăng không đáng kể.

- Năng lượng phá hủy ( $G_f$ ) tăng tương ứng 121,1% và 238,4 % khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 25°C lên 40°C và 60°C.

- Ở các nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau, khi tăng thời gian bảo dưỡng lên 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày thì  $CT_{Index}$  giảm tương ứng 20,1%, 53,8% và 63,5% so với hỗn hợp bảo dưỡng 1 ngày tuổi. Tuy nhiên, ở cùng một ngày tuổi bảo dưỡng, khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 25°C lên 40°C và 60°C, thì giá trị  $CT_{Index}$  tăng tương ứng 68,4% và 120,7%.

- Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng, gia tốc nhiệt độ bảo dưỡng hỗn hợp tái chế nguội lên 40°C và 60°C thì có thể rút ngắn được thời gian bảo dưỡng, trong phạm vi nghiên cứu ở đây để đảm bảo cường độ chịu kéo cho hỗn hợp tái chế nguội, khuyến cáo nên bảo dưỡng hỗn hợp ở 60°C tối thiểu 24 giờ, nếu bảo dưỡng hỗn hợp ở 40°C thì thời gian bảo dưỡng tối thiểu 48 giờ.

- Trong phạm vi nghiên cứu ở đây chưa xem xét được hết các yếu tố có thể ảnh hưởng đến đặc tính kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội như nguồn RAP, loại và tỷ lệ các phụ gia hay các nghiên cứu về vi cấu trúc. Các nghiên cứu này cần được tiếp tục triển khai.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. James, Overview of asphalt emulsion, Transp. Res. Circ., (2006) 1–15.
- [2]. Asphalt Institute Manual Series, Asphalt cold mix manual (Third Edition), Lexington, KY 40512-4052 USA, 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, (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 Eurobiume Congress, Vienna, Austria, (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) 04018383. [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]. MAT. Alsheyab, TS. Khedaywi, Effect of electric arc furnace dust (EAFD) on properties of asphalt cement mixture, *Resour. Conserv. Recycl.*, 70 (2013) 38–43.
- [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.
- [10]. A. Hodgkinson, AT. 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).
- [11]. K. Khweir, D. Fordyce, D. Strickland, J. Read, Effect of curing time and the performance of cold asphalt mixtures, in: Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobiume Congress, Vienna, Austria, (2004) 460-465.
- [12]. 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.
- [13]. 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.
- [14]. 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.
- [15]. Asphalt Academy, Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilized Materials, 2nd ed., Asphalt Academy: Pretoria, South Africa, 2009.
- [16]. K.J. Jenkins, P.K. Moloto, Updating bituminous stabilized materials guidelines: Mix design report. PhaseII—Curing protocol: Improvement, In Technical Memorandum Task 7, Jones Edmunds: Gainesville, FL, USA, 2008.
- [17]. A. Kavussi, A. Modarres, A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results, *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 2252–2259.
- [18]. Asphalt Institute, Asphalt cold mix manual. Manual, Series No. 14. 3rd ed., Lexington, USA: Asphalt Institute, 1997.
- [19]. B. Eckmann, F. Delfosse, J. Conan, Cold bituminous mixtures for surface courses, in: Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Vienna, Austria, (2004) 384–394.

- [20]. I.E.A. Thanaya, S.E. Zoorob, J.P. Forth, A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport (TR1), (2009) 47–55.
- [21]. South African Bitumen Association, ETB-the design and use of emulsion treated bases, Sabita Manual 21, Cape Town, South Africa, 1999.
- [22]. D.A. Thomas, M. Ciaran, G. Amanda, T. Amir, Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials, *Constr. Build. Mater.*, 38 (2013) 524–529.
- [23]. A. Graziani, C. Godenzoni, F. Cardone, M. Bocci, Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures, *Mater. Des.*, 95 (2016) 358–369.
- [24]. C.L. Min, C.L. Chih, Y.W. Tai, X. Xuecheng, Developing effective test methods for evaluating cold-mix asphalt patching materials, *Mater. Civ. Eng.*, 28 (2016) 04016108.
- [25]. S.V. Kekwick, Best practice: bitumen emulsion and foamed bitumen materials laboratory processing, in: Proceedings of the 24th Southern African transport conference, SATC, South Africa, 2005.
- [26]. National Roads Authority, NRA Interim Advice Note 01/11 on Low Energy Pavements, NRA, Dublin, 2011.
- [27]. S. Du, Effect of curing conditions on properties of cement asphalt emulsion mixture, *Constr. Build. Mater.*, 164 (2018) 84–93. <https://doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.179>
- [28]. B. C. Cox, I. L. Howard, Cold In-Place Recycling and Full Depth Reclamation Literature Review. White Paper No. CMRC WP 13-1, Mississippi State University Construction Materials Research Center, 2013. [https://www.cee.msstate.edu/downloads/\(2013\)CoxandHoward-CMRCWP13-1](https://www.cee.msstate.edu/downloads/(2013)CoxandHoward-CMRCWP13-1)
- [29]. F. Gu, W. Ma, R.C. West, A.J. Taylor, Y. Zhang, Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: A case study, *Journal of Cleaner Production*, 208 (2018) 1513-1523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.222>
- [30]. ARRA CR-201, Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Emulsified Asphalt Recycling Agent, Asphalt Recycling & Reclaiming Association 2016, 2016.
- [31]. N.N.Lân, N.Q.Phúc, N.T.M. Trà, P.T.T. 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.