



## EFFECT OF TEMPERATURE CURING ON CRACKING RESISTANCE OF COLD RECYCLED ASPHALT MIXTURE

Nguyen Ngoc Lan\*, Nguyen Quang Phuc, Nguyen Thi Mi Tra,  
Pham Thi Thanh Thuy

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 01/03/2022

Revised: 03/04/2022

Accepted: 10/04/2022

Published online: 15/04/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.7>

\* *Corresponding author*

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

**Abstract.** Among the current asphalt concrete technologies, the cold recycled asphalt technology with bitumen emulsion and cement can be considered as the lowest energy consumption technology solution because the component materials do not have to be heated during manufacturing. With cold recycled asphalt mixes using bitumen emulsion and cement additives, the stiffness of mixture is dependent on curing time and temperature. This paper presents the results of an experimental research to evaluate the effect of curing temperature on the crack resistance of cold recycled asphalt mixture. The results show that the tensile strength, failure energy, the absolute value of the post-peak slope and the cracking tolerance index increased by 3034.7%, 268.3%, 252.4%, and 26.3% when the sample curing temperature increased from 25°C to 60°C, respectively. This result contributes will suggest a appropriate curing temperature to increase the crack resistance of cold recycled asphalt concrete.

**Keywords:** Asphalt emulsion, Cold recycled, Failure energy, Cracking tolerance index, Tensile strength.



## ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ BẢO DƯỠNG MẪU ĐẾN SỨC KHÁNG NỨT CỦA BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NGUỘI

Nguyễn Ngọc Lan\*, Nguyễn Quang Phúc, Nguyễn Thị Mi Trà,  
Phạm Thị Thanh Thủy

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: 01/03/2022

Ngày nhận bài sửa: 03/04/2022

Ngày chấp nhận đăng: 10/04/2022

Ngày xuất bản Online: 15/04/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.7>

\* Tác giả liên hệ

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

**Tóm tắt.** Trong số các công nghệ bê tông asphalt hiện nay, công nghệ bê tông asphalt tái chế nguội bằng nhũ tương bitum kết hợp với xi măng có thể được coi là giải pháp công nghệ tiêu thụ năng lượng thấp nhất do các vật liệu thành phần không phải gia nhiệt trong quá trình chế tạo. Với hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội sử dụng nhũ tương bitum và phụ gia xi măng, độ cứng của hỗn hợp phụ thuộc vào thời gian và nhiệt độ bảo dưỡng. Bài báo này đưa ra kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ bảo dưỡng mẫu đến sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội. Kết quả nghiên cứu cho thấy, cường độ chịu kéo, năng lượng phá hủy, độ dốc đường cong sau giá trị lực lớn nhất và chỉ số kháng nứt tăng tương ứng 3034,7%, 268,3%, 252,4% và 26,3 % khi nhiệt độ bảo dưỡng mẫu tăng từ 25°C lên 60°C. Kết quả này sẽ góp phần đề xuất nhiệt độ bảo dưỡng mẫu phù hợp để tăng sức kháng nứt cho bê tông asphalt tái chế nguội.

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

© 2022 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ bê tông asphalt tái chế nguội là một giải pháp công nghệ tái chế đem lại hiệu quả về kinh tế do không phải gia nhiệt vật liệu bê tông asphalt cũ RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) trong quá trình sản xuất. Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, giải pháp công nghệ này không chỉ đem lại hiệu quả trong việc hạn chế biến dạng hằn lún vệt bánh xe và nứt

mỗi của mặt đường asphalt mà còn tăng hiệu quả và giảm chi phí vòng đời sử dụng của kết cấu mặt đường, bảo tồn nguồn tài nguyên không tái tạo và năng lượng [1-3]. Các vật liệu được sử dụng cho công nghệ asphalt tái chế nguội phổ biến bao gồm bitum bột hoặc nhũ tương, các chất phụ gia hóa học (ví dụ: vôi thủy hoá, xi măng hoặc tro bay) và nước [4-7].

Với hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội, thì thời gian hình thành cường độ và độ cứng của hỗn hợp phụ thuộc vào điều kiện môi trường và thành phần của hỗn hợp [8,9]. Với hỗn hợp asphalt tái chế nguội chỉ sử dụng chất kết dính là nhũ tương, thời gian để hỗn hợp ổn định khoảng 6 tháng đến 3 năm [10, 11]. Do vậy, để cải thiện quá trình rắn chắc cho hỗn hợp tái chế nguội, có thể kết hợp việc sử dụng xi măng cùng với nhũ tương [12]. 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 [13-17]. Sự hình thành độ cứng của bê tông asphalt tái chế nguội tại hiện trường là một quá trình diễn ra từ từ 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 [13,18]. Cụ thể, nhiệt độ cao hơn sẽ đẩy nhanh quá trình đóng rắn [18,19], trong khi ảnh hưởng của độ ẩm tương đối chủ yếu liên quan đến sự có mặt của xi măng [20], độ ẩm cao sẽ thúc đẩy sự hình thành các liên kết của xi măng, do đó làm tăng độ cứng cho hỗn hợp. Để đánh giá tính năng của bê tông asphalt tái chế nguội, quá trình rắn chắc thường được đẩy nhanh trong phòng thí nghiệm bằng cách đưa các mẫu thử vào tủ sấy ở nhiệt độ cố định trong vài ngày [21]. Theo AASHTO PP 86 mẫu sau khi đầm nén sẽ được bảo dưỡng 16 đến 48 giờ ở  $60\pm 1^\circ\text{C}$ . Một dự án nghiên cứu của Bang Nevada đề xuất mẫu bảo dưỡng 48 giờ ở  $60\pm 1^\circ\text{C}$ . Một nghiên cứu khác ở Sở GTVT Bang Florida đề xuất mẫu bảo dưỡng 24 giờ ở  $60\pm 3^\circ\text{C}$  tới khối lượng không đổi. Tiếp theo mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng thí nghiệm 24 giờ trước khi thí nghiệm. Còn nghiên cứu của Kazmi (2018) đề xuất bảo dưỡng 72 giờ ở  $40^\circ\text{C}$  sau đó bảo dưỡng tiếp 24 giờ ở nhiệt độ phòng thí nghiệm. Nghiên cứu được thực hiện bởi Shaowen Du (2018) cho thấy [19], cường độ chịu kéo và cường độ chịu nén của bê tông asphalt tái chế nguội nếu bảo dưỡng liên tục  $20^\circ\text{C}$  trong 365 ngày thì đạt được tương đương khi bảo dưỡng mẫu  $60^\circ\text{C}$  trong 5 ngày. Độ nhạy ẩm của hỗn hợp  $20^\circ\text{C}$  dưỡng hộ 90 ngày tương đương với hỗn hợp dưỡng hộ  $60^\circ\text{C}$  trong 3 ngày. Trong nghiên cứu, tác giả cũng đưa ra các kết luận cho thấy, thành phần hoá học, khoáng vật và cấu trúc vi mô của hồ chất kết dính cũng thay đổi đáng kể ở các điều kiện bảo dưỡng khác nhau. Một nghiên cứu đánh giá tính năng và vi cấu trúc của bê tông asphalt tái chế nguội được thực hiện bởi Yanhai Yang và các cộng sự (2019) [22]. Nghiên cứu cho thấy rằng, khi hỗn hợp được bảo dưỡng ở  $60^\circ\text{C}$  trong 48 giờ, sức kháng nứt của hỗn hợp giảm xuống và độ ổn định động khi thí nghiệm hần lún ở  $60^\circ\text{C}$  tăng lên khi hàm lượng xi măng tăng từ 1,0-5,0%. Với hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội sử dụng phụ gia xi măng, thì điều kiện bảo dưỡng mẫu có thể sẽ ảnh hưởng đến tính năng kháng nứt của hỗn hợp. Soohyok và các cộng sự (2018) đã tiến hành nghiên cứu đánh giá sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội thông qua chỉ số  $CT_{\text{Index}}$ , kết quả cho thấy giá trị  $CT_{\text{Index}}$  thay đổi từ 20 đến 300 [23].

Như vậy, có nhiều nghiên cứu đề xuất điều kiện bảo dưỡng bê tông asphalt tái chế nguội khác nhau. Trong đó, phần lớn các nghiên cứu ở châu Âu đề xuất nhiệt độ bảo dưỡng mẫu thí nghiệm các tính năng bằng với nhiệt độ phòng thí nghiệm và thời gian bảo dưỡng thường kéo dài từ 7 ngày đến 14 ngày. Trong khi đó, các nghiên cứu ở Mỹ đề xuất nhiệt độ bảo dưỡng trong phòng thí nghiệm là từ 40°C hoặc 60°C và thời gian thí nghiệm thường từ 1 ngày đến 3 ngày. Rõ ràng các nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau sẽ dẫn đến quá trình thủy hoá và quá trình nhũ tương phân tách khác nhau, việc nghiên cứu đánh giá các tính năng phù hợp với các nhiệt độ bảo dưỡng khác nhau là cần thiết để có cơ sở đưa ra nhiệt độ bảo dưỡng phù hợp.

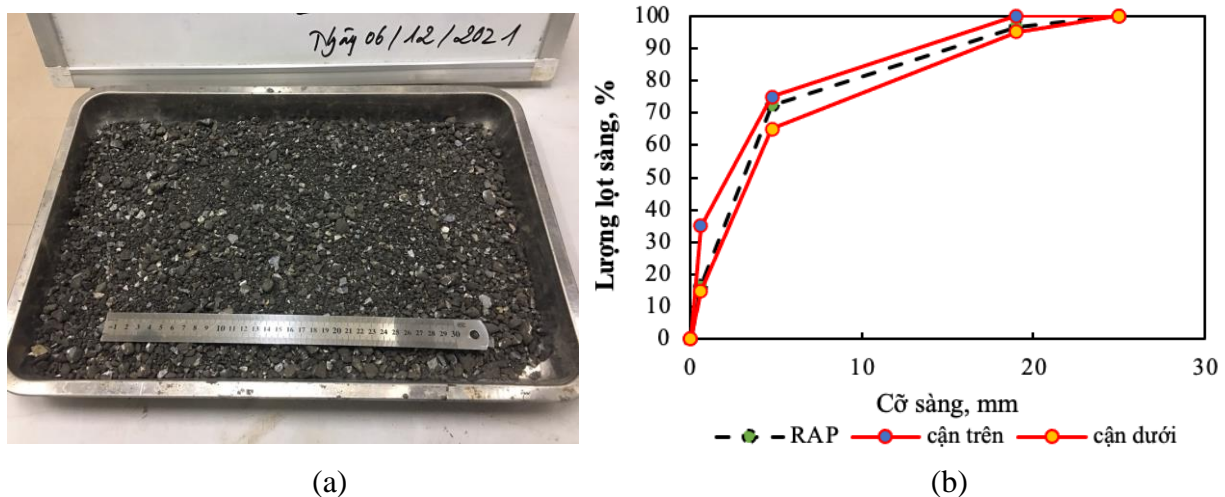
## 2. PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Nội dung chính của bài báo này là đánh giá sức kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nguội sử dụng nhũ tương bitum và phụ gia xi măng ở các nhiệt độ bảo dưỡng 25°C, 40°C và 60°C trong cùng thời gian bảo dưỡng 24 giờ. Thí nghiệm kéo gián tiếp Indirect Tensile Test (IDT) được sử dụng 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 ( $CT_{Index}$ ).

## 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



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

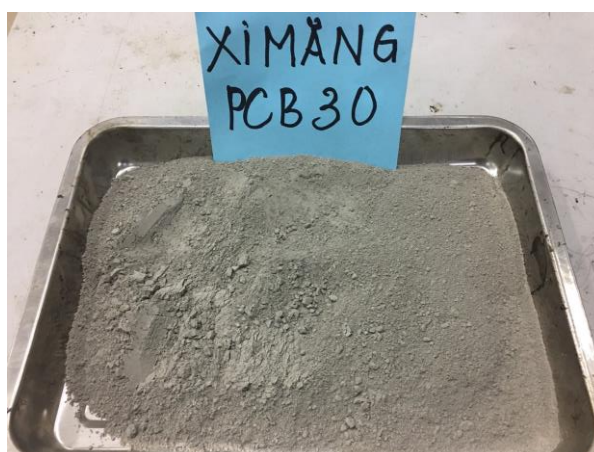
**Nhũ tương.** Một loại nhũ tương cationic phân tách chậm CSS-1h đã được lựa chọn sử dụng theo khuyến cáo của AASHTO MP31. Loại nhũ tương này được sản xuất ở trong phòng thí nghiệm theo công nghệ của tập đoàn Colas với tỷ lệ chất kết dính 63,3%, tỷ lệ còn lại là nước, chất nhũ hoá và phụ gia. Độ pH bằng 2,38.

Bảng 1. Thành phần hạt của vật liệu RAP.

Cỡ sàng	Hàm lượng lọt sàng %
25 mm (1 in)	100
19 mm (3/4 in)	100
4,75mm	70,69
600 $\mu$ m	18,61



Hình 2. Nhũ tương CSS-1h.



Hình 3. Phụ gia xi măng PCB30.

**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 MP31. 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. Theo AASHTO PP86 và trong quá trình trộn có điều chỉnh, nghiên cứu lựa chọn được hàm lượng xi măng theo kinh nghiệm là 1,5% theo khối lượng khô của RAP [24].

**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 [25]. Theo AASHTO PP 86 và trong quá trình trộn có thể điều chỉnh hàm lượng nước lựa chọn theo kinh nghiệm.

Để xác định hàm lượng nhũ tương tối ưu, nghiên cứu chọn bốn hàm lượng nhũ tương sơ bộ lần lượt là 1 %, 2 %, 3%, và 4,0 % theo khối lượng RAP khô. Trên cơ sở các hàm lượng nhũ tương chọn sơ bộ, hàm lượng xi măng chọn bằng 1,5 %, hàm lượng nước bổ sung để đạt được độ chặt lớn nhất, tiến hành đúc mẫu theo hướng dẫn của AASHTO PP 86 để thí nghiệm các chỉ tiêu thỏa mãn theo quy định AASHTO MP 31. Kết quả xác định được hàm lượng nhũ tương tối ưu là 3,3 %.

### 3.2 Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Quá trình trộn hỗn hợp được thực hiện theo chỉ dẫn của tiêu chuẩn AASHTO PP 86 như sau: trộn RAP với lượng nước (độ ẩm tối ưu) trong 60 giây, tiếp theo đó hỗn hợp được trộn với xi măng trong 80 giây, cuối cùng nhũ tương được trộn với hỗn hợp trong 80 giây. Hỗn hợp sau khi trộn đúng theo tỷ lệ thiết kế được 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 03 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 là 24 giờ tương ứng với các nhiệt độ. Hình 4 thể hiện mẫu đầm xoay và bảo dưỡng mẫu ở tủ sấy trong điều kiện khô.



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

### 3.3 Thí nghiệm chỉ số kháng nứt

Thí nghiệm kéo gián tiếp Indirect Tensile Test (IDT) theo mô hình ép chế được sử dụng để đánh giá sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nguội. Với thí nghiệm IDT, chỉ số kháng nứt Cracking Tolerance Index ( $CT_{Index}$ ) là thông số quan trọng nhất để đánh giá sức kháng nứt của hỗn hợp. Thí nghiệm xác định chỉ số  $CT_{Index}$  được thực hiện theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM D 8225-19, Hình 5 thể hiện hình ảnh thí nghiệm và kết quả thu được. Chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  được tính toán từ đường cong quan hệ giữa lực-chuyển vị như ở Hình 5 theo các công thức 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 ( $J/mm^2$ );

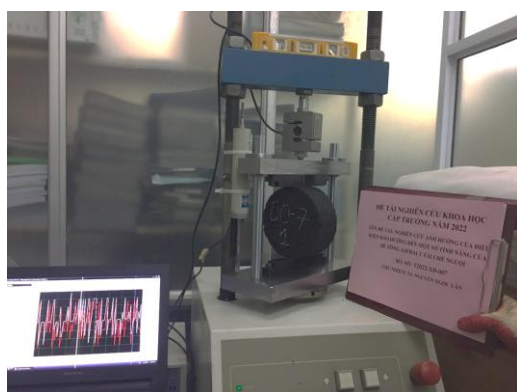
$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6 \quad (2)$$

$W_f$  - công phá huỷ (J);

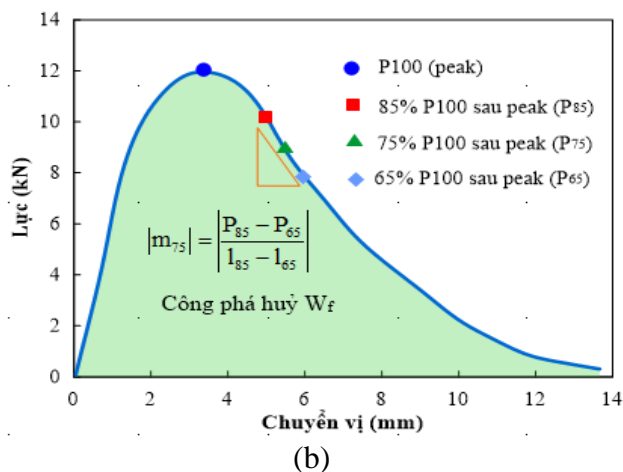
$D$  - đường kính mẫu thí nghiệm (mm);

$t$  - chiều dày mẫu thí nghiệm (mm);

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



(a)



(b)

Hình 5. 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 5b.

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

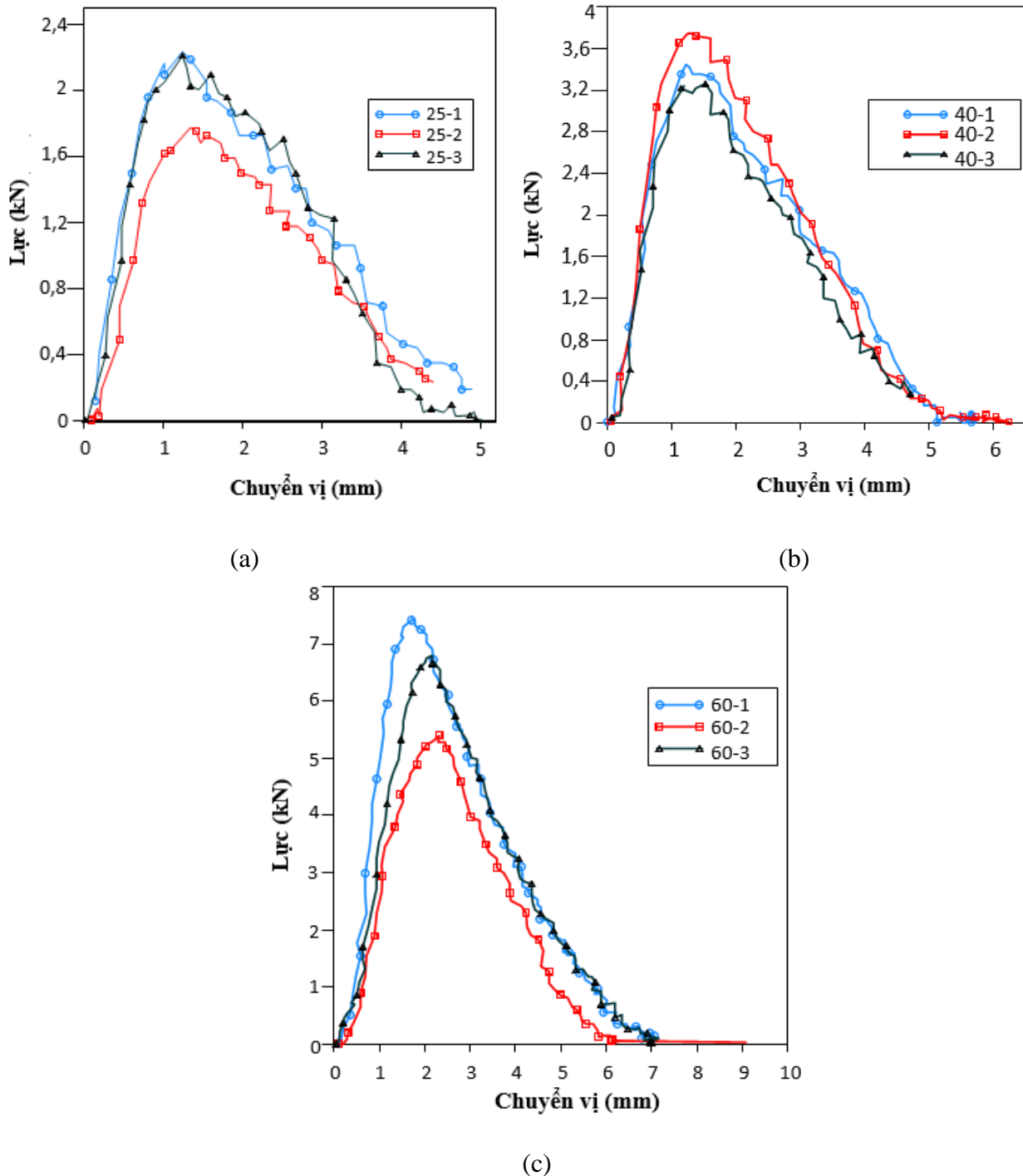
Cường độ chịu kéo được tính theo công thức sau:

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

trong đó:  $h$  – chiều cao mẫu (mm),  $d$  – đường kính mẫu (mm),  $P_{100}$  – 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 của thí nghiệm IDT tương ứng với các mẫu thử bảo dưỡng ở 25°C, 40°C và 60°C sau 24 giờ.



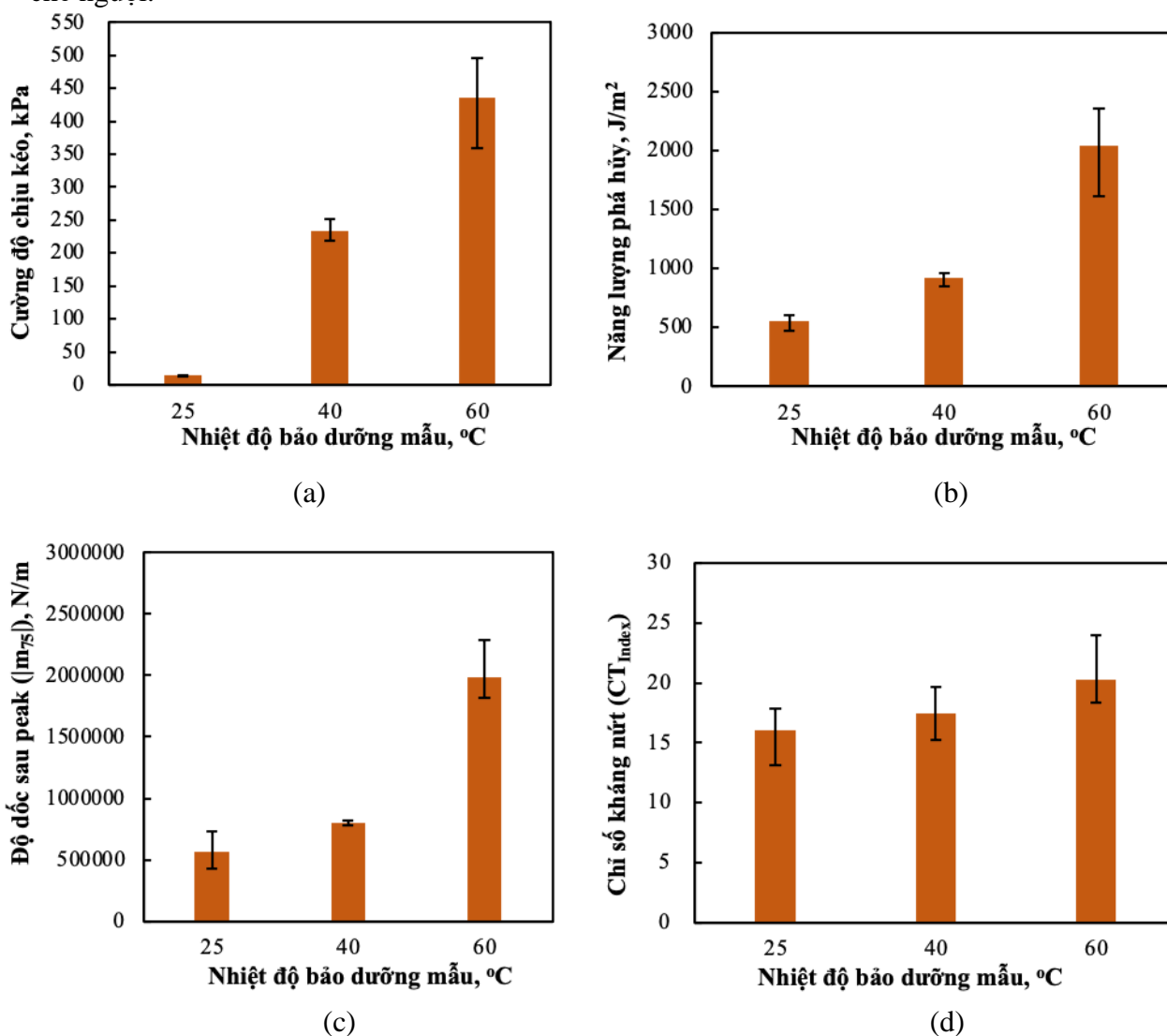
Hình 6. Đường cong lực-chuyển vị của các mẫu thí nghiệm IDT: (a) điều kiện bảo dưỡng mẫu  $25^{\circ}\text{C}$ , (b) điều kiện bảo dưỡng mẫu  $40^{\circ}\text{C}$ , (c) điều kiện bảo dưỡng mẫu  $60^{\circ}\text{C}$ .

Kết quả thể hiện như ở Hình 6 cho thấy, ở các nhiệt độ bảo dưỡng mẫu khác nhau, sự thay đổi đường cong lực-chuyển vị của các mẫu là khác nhau. Ở nhiệt độ bảo dưỡng  $40^{\circ}\text{C}$  và  $60^{\circ}\text{C}$ , đường cong sau khi đạt giá trị lực lớn nhất (peak load) trở nên dốc hơn so với các đường cong mẫu bảo dưỡng  $25^{\circ}\text{C}$ . Ngoài ra, giá trị lực nén lớn nhất tăng lên khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng từ  $25^{\circ}\text{C}$  lên  $60^{\circ}\text{C}$ .



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 7.

Kết quả thể hiện như ở Hình 7 cho thấy rằng, khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng từ 25°C lên 60°C thì các giá trị  $R_k$ ,  $G_f$ ,  $|m_{75}|$  và  $CT_{Index}$  đều có xu hướng tăng lên. Giải thích cho các kết quả này là do khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng hỗn hợp tái chế nguội sử dụng nhũ tương kết hợp với xi măng 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 [19]. Như vậy, việc sử dụng xi măng kết hợp với nhũ tương 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 với bề mặt RAP, thứ hai, đẩy nhanh tốc độ phân tách nhũ tương do các khoáng vật có trong xi măng lấy nước có trong nhũ tương để thủy hóa tạo ra các sản phẩm thủy hóa làm tăng độ cứng cho bê tông asphalt tái chế nguội.



Hình 7. 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.

Trong số các thông số trên, có thể thấy rằng, nhiệt độ bảo dưỡng ảnh hưởng lớn nhất đến cường độ chịu kéo, năng lượng phá hủy và độ dốc sau khi đạt giá trị lực lớn nhất với mức độ tăng tương ứng 3034,7%; 268,3%, và 252,4% khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng từ 25°C lên 60°C. Độ dốc đường cong lực-chuyển vị sau khi đạt giá trị lực lớn nhất  $|m_{75}|$  thể hiện đặc tính giòn của vật liệu. Khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng lên, sẽ dẫn đến đẩy nhanh tốc độ thủy hoá các khoáng vật có trong xi măng để tạo ra các khoáng silicat ngậm nước và bền nước. Các khoáng silicat này sẽ làm cho hỗn hợp trở nên cứng và giòn hơn. Kết quả này thể hiện rõ ràng như ở Hình 7a và Hình 7c.

Với thí nghiệm IDT, chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  là thông số được sử dụng để đánh giá sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt, chỉ số này sẽ tỷ lệ nghịch với  $|m_{75}|$  nhưng với hỗn hợp tái chế nguội sử dụng xi măng kết hợp với nhũ tương khi tăng nhiệt độ bảo dưỡng mẫu đồng thời cũng đẩy nhanh tốc độ phân tách của nhũ tương nên năng lượng phá hủy tăng lên (Hình 7b). Kết quả tính toán chỉ số  $CT_{Index}$  như ở Hình 7d cho thấy, mặc dù  $|m_{75}|$  có xu hướng tăng lên nhưng chỉ số  $CT_{Index}$  không giảm xuống mà có xu hướng tăng lên, với mức độ tăng 26,3% khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng từ 25°C lên 60°C.

#### 4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm đánh giá sức kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nguội sử dụng nhũ tương kết hợp với xi măng được bảo dưỡng trong 24 giờ ở các nhiệt độ 25°C, 40°C và 60°C, một số kết luận sau được đưa ra:

- Đường cong lực-chuyển vị của các mẫu thí nghiệm IDT thay đổi đáng kể ở các nhiệt độ bảo dưỡng 25°C; 40°C và 60°C.

- Cường độ chịu kéo, năng lượng phá hủy, độ dốc đường cong lực-chuyển vị sau giá trị lực nén lớn nhất, và chỉ số kháng nứt đều tăng lên khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng từ 25°C lên 60°C.

- Trong các thông số đặc trưng cho sức kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nguội thì cường độ chịu kéo là chỉ tiêu chịu ảnh hưởng lớn nhất của nhiệt độ bảo dưỡng.

- Mặc dù khi nhiệt độ bảo dưỡng tăng từ 25°C lên 60°C, độ cứng và độ giòn của hỗn hợp tăng lên nhưng chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  vẫn có xu hướng tăng.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. E. Alkins, B. Lane, T. Kazmierowski, Sustainable Pavements: Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling, J. Transp. Res. Board, 2084 (2008) 100–103. <https://doi: 10.3141/2084-11>
- [2]. B. Lane, T. Kazmierowski, Implementation of Cold In-Place Recycling with Expanded Asphalt Technology in Canada., J. Transp. Res. Board, 1905 (2005) 17–24. <https://doi: 10.1177/0361198105190500102>
- [3]. A. Buss, M. G. Mercado, S. Schram, Long-Term Evaluation of Cold-in-Place Recycling and Factors Influencing Performance, J. Perform. Constr. Facil., 31 (2017) 04016111. [https://doi: 10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000985](https://doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000985)
- [4]. B. Gómez-Meijide, I. Pérez, A. R. Pasandín, Recycled construction and demolition waste in Cold

- Asphalt Mixtures: Evolutionary properties, *J. Clean. Prod.*, 112 (2016) 588–598. <https://doi:10.1016/J.JCLEPRO.2015.08.038>
- [5]. B. C. Cox, I. L. Howard, Cold In-Place Recycling Characterization for Single-Component or Multiple-Component Binder Systems, *J. Mater. Civ. Eng.*, 28 (2016) 04016118. [https://doi:10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001621](https://doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001621)
- [6]. W. Ma, R. West, N. Trail, N. Moore, Optimising water content in cold recycled foamed asphalt mixtures, *Road Mater. Pavement Des.*, 86 (2017) 73–102. <https://doi:10.1080/14680629.2017.1389088>
- [7]. Y. Wang, Z. Leng, X. Li, C. Hu, Cold recycling of reclaimed asphalt pavement towards improved engineering performance, *J. Clean. Prod.*, 171 (2018) 1031–1038. <https://doi:10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.132>
- [8]. K. Khweir, D. Fordyce, D. Strickland, J. Read, Effect of curing time on the performance of cold asphaltic mixtures, *Proc. 3rd Eurasphalt Eurobitume Congr.*, Vienna, Austria, 1 (2004) 460–465. <https://trid.trb.org/view/743787>
- [9]. B. Gómez-Meijide, I. Pérez, A proposed methodology for the global study of the mechanical properties of cold asphalt mixtures, *J. Material and Design*, 57 (2014) 520–527. <https://doi:10.1016/J.MATDES.2013.12.079>
- [10]. 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, 5th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (Capsa 89). Proceedings held in Swaziland, 1989. <https://trid.trb.org/view/354466>
- [11]. J. P. Serfass, J. P. Henrat, X. Carbonneau, Evaluation of cold mixes performance in the short and long term, Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 2004. <https://trid.trb.org/view/743787>
- [12]. T. A. Doyle, C. McNally, A. Gibney, A. Tabaković, Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials, *Constr. Build. Mater.*, 38 (2013) 524–529. <https://doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.09.008>
- [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. <https://doi:10.1080/10298436.2014.966710>
- [14]. M. Bocci, A. Grilli, F. Cardone, A. Graziani, A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials, *J. Constr. Build. Mater.*, 25 (2011) 773–778. <https://doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.07.007>
- [15]. Asphalt Academy, Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, 2 (2009) 136.
- [16]. P. Jenkins, K.J., Moloto, Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Des. Report, Phase II—Curing Protoc. Improv. Tech. Memo. 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, *J. Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 2252–2259. <https://doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.04.031>
- [18]. 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. <https://doi:10.1016/J.MATDES.2016.01.094>
- [19]. 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>
- [20]. A. García, P. Lura, M. N. Partl, I. Jerjen, Influence of cement content and environmental humidity on asphalt emulsion and cement composites performance, *Mater. Struct. Constr.*, 46 (2013) 1275–1289. <https://doi:10.1617/S11527-012-9971-6>
- [21]. N. B. Christopher, J. Hedges, Lori L. Sundstrom, Tanya Zwahlen, S. L. Campbell, E. P. Delaney, Practice and Performance of Cold In-Place Recycling and Cold Central Plant Recycling, NCHRP Synthesis Report, 569 (2021). <https://doi:10.17226/26319>
- [22]. Y. Yang, Y. Yang, B. Qian, Performance and microstructure of cold recycled mixes using

asphalt emulsion with different contents of cement, *Materials (Basel)*, 12 (2019). [https://doi:10.3390/MA12162548](https://doi.org/10.3390/MA12162548)

[23]. S. Im, S. Sebesta, Y. Rew, *Methods of Rehabilitating Pavements with Moisture Damaged Asphalt Layers: Technical Report, Research Report FHWA/TX-18/0-0626-R1*. Texas A&M Transportation Institute, 2018.

[24]. AASHTO PP86, *Standard Practice for Emulsified Asphalt Content of Cold Recycled Mixture Designs*, Am. Assoc. State Highw. Transp. Off., 2019, pp. 3–10.

[25]. *Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Emulsified Asphalt Recycling Agent CR201*, Asph. Recycl. Reclaiming Assoc. Glen Ellyn, 2016.