



## THE EFFECT OF AGING ON THE CRACKING RESISTANCE OF WARM MIX ASPHALT WITH HIGH RAP CONTENT

Nguyen Ngoc Lan, Truong Van Quyet\*

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 27/08/2021

Revised: 28/09/2021

Accepted: 06/10/2021

Published online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.6>

\* *Corresponding author*

Email: quyet.tv@utc.edu.vn; Tel: +84978452140

**Abstract.** Asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) have high stiffness due to the aged binder in these recycled materials. The evaluation of the cracking resistance of the asphalt mixture containing RAP is therefore a priority for the asphalt materials, especially with high RAP content. In addition, aging in asphalt binders is recognized as one of the factors causing cracking-related failures. Asphalt aging occurs during the production, construction, and service life of the pavements. Therefore, the evaluation of asphalt mixtures' cracking resistance is one of the critical items to assess the quality and durability of the pavements during the exploitation period. This paper presents the results of the evaluation of cracking resistance of warm mix asphalt with RAP contents of 30% and 50% under the different aging conditions. The IDEAL-CT determines cracking resistance through a fracture mechanics-based parameter Cracking Tolerance Index ( $CT_{Index}$ ). Three aging conditions were performed including the loose mixture including short-term oven aging at 135°C for 4 hours, long-term oven aging at 135°C for 24 hours, and long-term oven aging at 95°C for 8 days after short-term oven aging. Laboratory test results of the  $CT_{Index}$  indicated the influence of different aging conditions on the cracking resistance of warm mix asphalt with high RAP content.

**Keywords:** Warm mix asphalt, Reclaimed asphalt pavement, Recycled asphalt, Aging, Cracking resistance, Cracking Tolerance Index ( $CT_{Index}$ )



## ẢNH HƯỞNG CỦA HOÁ GIÀ ĐẾN SỨC KHÁNG NÚT CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ ẤM CÓ TỶ LỆ RAP CAO

Nguyễn Ngọc Lân, Trương Văn Quyết\*

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: 27/08/2021

Ngày nhận bài sửa: 28/09/2021

Ngày chấp nhận đăng: 06/10/2021

Ngày xuất bản Online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.6>

\* Tác giả liên hệ

Email: quyet.tv@utc.edu.vn; Tel: +84978452140

**Tóm tắt.** Hỗn hợp asphalt tái chế thường có độ cứng cao do sử dụng bitum đã bị lão hoá có trong RAP, vì vậy sức kháng nứt trở thành mối quan tâm, đặc biệt khi hỗn hợp có hàm lượng RAP cao. Ngoài ra, sự hoá già của bitum trong hỗn hợp asphalt cũng là một trong những nguyên nhân gây ra các hư hỏng liên quan đến nứt. Bitum bị hoá già có thể xảy ra trong quá trình sản xuất, thi công và khai thác mặt đường. Vì vậy, đánh giá sức kháng nứt của bê tông asphalt là một trong những chỉ tiêu cần được thực hiện để có thể nâng cao được chất lượng và độ bền của mặt đường asphalt trong thời gian khai thác. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế ấm có tỷ lệ RAP bằng 30% và 50%. Sức kháng nứt của hỗn hợp asphalt được đánh giá thông qua chỉ số kháng nứt (Cracking Tolerance Index –  $CT_{Index}$ ). Ba điều kiện hoá già được thực hiện với hỗn hợp ở trạng thái rời sau khi trộn bao gồm hoá già ngắn hạn 4 giờ  $135^{\circ}C$ , hoá già dài hạn 24 giờ  $135^{\circ}C$  và hoá già dài hạn 8 ngày ở  $95^{\circ}C$  sau khi hoá già ngắn hạn. Trên cơ sở kết quả thí nghiệm chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  ứng với các điều kiện hoá già khác nhau, nghiên cứu đưa ra được các kết luận ảnh hưởng của các điều kiện hóa già khác nhau đến sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế ấm có tỷ lệ RAP cao.

**Từ khóa:** Hỗn hợp asphalt ấm, Vật liệu cào bóc mặt đường asphalt cũ, Asphalt tái chế, Hoá già, Sức kháng nứt, Chỉ số kháng nứt ( $CT_{Index}$ ).

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông asphalt là loại vật liệu chính được sử dụng trong xây dựng mặt đường ô tô hiện nay. Một trong những lý do mặt đường asphalt được sử dụng phổ biến là do hiệu quả của việc

tái sử dụng lại vật liệu này khi hết tuổi thọ khai thác. Theo số liệu khảo sát của Hiệp hội mặt đường asphalt Mỹ, có đến hơn 95% hệ thống đường bộ ở Mỹ sử dụng hỗn hợp asphalt nóng (Hot Mix Asphalt - HMA) hoặc hỗn hợp asphalt ấm (Warm Mix Asphalt - WMA), và các hỗn hợp này sử dụng khoảng 76,2 triệu tấn (chiếm 99%) vật liệu cào bóc mặt đường asphalt cũ (Reclaimed Asphalt Pavement-RAP) mỗi năm [1]. Hỗn hợp WMA được sử dụng với mục đích cho phép giảm nhiệt độ khi trộn và thi công hỗn hợp asphalt, nhiệt độ trộn chỉ từ 100°C-140°C. Việc ứng dụng bê tông asphalt tái chế theo công nghệ ấm tạo ra một số lợi ích liên quan đến phát triển bền vững và cải thiện khả năng làm việc. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra các hiệu quả đạt được của công nghệ bê tông asphalt tái chế ấm như tăng hiệu quả đầm nén, hiệu quả khi thi công trong thời tiết lạnh, tăng khoảng cách vận chuyển, tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp và giảm thiểu lượng khí thải [2, 3].

Ảnh hưởng của hoá già đến tính năng của bê tông asphalt tái chế ấm cũng cần được quan tâm bởi vì sự hoá già được cho là một trong những nguyên nhân chính có ảnh hưởng đáng kể đến các tính năng của hỗn hợp asphalt. Nguyên nhân gây ra bởi hai quá trình chính là quá trình bay hơi và quá trình oxy hoá làm tăng tỷ lệ pha rắn/pha lỏng trong cấu trúc của chất kết dính. Quá trình bay hơi xuất hiện trong giai đoạn trộn và đầm nén khi các hydrocacbon nhẹ bay hơi ở nhiệt độ khoảng 150°C-160°C. Quá trình oxy hoá xảy ra trong suốt quá trình khai thác khi các hydrocacbon phản ứng với oxy [4]. Quá trình oxy hoá làm tăng độ cứng và độ giòn của vật liệu asphalt đồng thời làm giảm khả năng chịu biến dạng, dẫn đến khả năng bị nứt cao. Để nhận biết ứng xử của mặt đường asphalt do hoá già tại hiện trường, sự hoá già của hỗn hợp nên được mô phỏng trong phòng thí nghiệm. Một số quy trình hoá già trong phòng thí nghiệm đã được nghiên cứu và thực hiện để mô phỏng sự hoá già [5-14]. Các quy trình hoá già này có thể được phân loại chung dựa trên trạng thái vật liệu trong quá trình hoá già (hoá già trên mẫu đã đầm nén hay hỗn hợp rời). Theo AASHTO R30 [15], hỗn hợp asphalt rời được đặt trong tủ sấy ở  $135 \pm 3^\circ\text{C}$  trong 4 giờ  $\pm$  5 phút để mô phỏng quá trình hoá già ngắn hạn (short term oven aging - STOA) trong quá trình sản xuất và vận chuyển. Đối với hoá già dài hạn (long term oven aging - LTOA), hỗn hợp sau khi đã hoá già ngắn hạn được đầm bằng thiết bị đầm xoay (AASHTO T312 [16]) thành mẫu và sau đó được đưa vào tủ sấy trong 5 ngày ở  $85^\circ\text{C}$  để đặc trưng cho sự hoá già từ 5 đến 10 năm ngoài hiện trường [17]. Tuy nhiên, các nghiên cứu [8, 11] đã chỉ ra rằng phương pháp này có thể không phù hợp để mô phỏng sự hoá già ngoài hiện trường trong mọi điều kiện. Quy trình này chỉ áp dụng một giá trị nhiệt độ và thời gian hoá già duy nhất để xem xét sự hoá già tại hiện trường ở bất kỳ khu vực, nhiệt độ và vùng khí hậu nào của mặt đường. Hơn nữa, hoá già trên mẫu đã đầm nén có thể có sự khác nhau về mức độ hoá già ở trung tâm so với bề mặt của mẫu, dẫn đến sự không chính xác khi đánh giá các tính năng. Để giải quyết vấn đề trên, Viện Asphalt Hoa Kỳ đã đưa ra quy trình hoá già trên hỗn hợp asphalt rời được đặt vào tủ sấy trong 24 giờ ở  $135^\circ\text{C}$  để mô phỏng sự hoá già dài hạn ngoài hiện trường [18]. Sự hoá già trên hỗn hợp rời là đồng đều hơn và làm giảm thời gian hoá già đáng kể so với mẫu được đầm nén. Điều kiện hoá già này dự kiến sẽ mô phỏng từ 7 đến 10 năm hoá già ngoài hiện trường [13]. Tuy nhiên, nghiên cứu chỉ ra rằng hoá già bitum ở nhiệt độ lớn hơn  $100^\circ\text{C}$  có thể gây ra những thay đổi hóa học trong bitum mà nó không có trong thực tế ngoài hiện trường. Gần đây báo cáo của NCHRP 871 đưa ra quy trình hoá già dài hạn cho hỗn hợp asphalt và kết quả cho thấy  $95^\circ\text{C}$  là nhiệt độ tối ưu cho điều kiện hoá già dài hạn [11]. Thời gian hoá già thay đổi theo vị trí địa lý của mặt đường và cũng được điều chỉnh dựa trên điều kiện khí hậu và chiều sâu mặt đường.

Bê tông asphalt bị lão hoá sẽ ảnh hưởng lớn đến khả năng kháng nứt của hỗn hợp, do vậy cần phải kiểm soát sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt. Gần đây đã có nhiều nghiên cứu ở Mỹ nhằm đưa ra mô hình thí nghiệm đánh giá sức kháng nứt của bê tông asphalt [19].

Các mô hình thí nghiệm phải đảm bảo có tương quan cao với nứt ở mặt đường bê tông asphalt và tính thuận tiện khi sử dụng. Trong số các mô hình thí nghiệm nứt của bê tông asphalt đang được sử dụng ở Mỹ hiện nay, thì các mô hình thí nghiệm Semi-Circular Bend test (SCB), Indirect Tensile Asphalt Cracking test (IDEAL-CT) và Texas Overlay test (OT) có tương quan cao nhất với nứt thực tế ở mặt đường asphalt [11]. Các thí nghiệm này ngày càng trở nên phổ biến ở Sở giao thông vận tải các bang và nhà thầu ở Mỹ [20, 21]. Trong đó, thí nghiệm IDEAL-CT để xác định chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  đã được ứng dụng rộng rãi để kiểm tra/kiểm soát chất lượng vì tính đơn giản (mẫu thí nghiệm không cần cắt, dán, khoan, hoặc khía rãnh như với thí nghiệm SCB và OT), tính thực tiễn (đào tạo vận hành đơn giản) và mức độ sai số thấp (hệ số phương sai < 25%) [22, 23]. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng chỉ số  $CT_{Index}$  xác định từ thí nghiệm IDEAL-CT có tương quan tốt với nứt ngoài hiện trường trên cơ sở thử nghiệm nhanh của Cơ quan Quản lý đường cao tốc Mỹ (FHWA) [23]. Trong nghiên cứu này, mối quan hệ giữa chỉ số OT (Overlay test), SCB- $J_c$  (Louisiana SCB test), FI (SCB test) và  $CT_{Index}$  được xác định trong phòng thí nghiệm với nứt ngoài hiện trường (% diện tích nứt) đã được đánh giá. Tổng phần trăm diện tích nứt được đo sau các lượt ESALs của xe tải nặng chạy qua tại các lần thử nghiệm. Sáu hỗn hợp asphalt có sử dụng RAP và RAS khác nhau được thử nghiệm. Tương ứng với mỗi phương pháp thí nghiệm nứt, các mẫu thử được chuẩn 4 điều kiện khác nhau bao gồm LMLC-STOA (Lab-mixed, lab-compacted), LMLC-CA (các hỗn hợp sau khi hoá già ngắn hạn tiếp tục hoá già 8 giờ ở 135°C để đạt ngưỡng hoá già bất lợi – critical aging), PMLC-RH (Plant-mixed, lab-compacted, các mẫu được gia nhiệt lại trước khi đầm nén) và PMLC-CA (các mẫu được gia nhiệt lại sau đó “critical aging” trước khi đầm nén). Kết quả chỉ ra rằng, trong số các mối quan hệ giữa các chỉ số với nứt ngoài hiện trường được xây dựng thì chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  có tương quan tốt nhất với nứt ngoài hiện trường (% diện tích nứt sau 20 triệu ESALs) với hệ số  $R^2$  lần lượt là 0,898 ; 0,947 ; 0,811 và 0,958 tương ứng với 4 điều kiện khác nhau ở trên.

Trong phạm vi nghiên cứu ở đây, phương pháp thí nghiệm IDEAL-CT xác định chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  đã được sử dụng để đánh giá sức kháng nứt của các hỗn hợp bê tông asphalt tái chế ẩm có tỷ lệ RAP 30% và 50% cùng với hỗn hợp asphalt nóng đối chứng (HMA) có tỷ lệ RAP bằng 0%. Ba điều kiện hoá già được thực hiện bao gồm hoá già ngắn hạn 4 giờ ở 135°C (STOA-4h-135°C), hoá già dài hạn 24 giờ ở 135°C (LTOA-24h-135°C) và hoá già dài hạn 8 ngày ở 95°C sau khi hoá già ngắn hạn (LTOA-8d-95°C). Trên cơ sở kết quả thí nghiệm chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  ứng với các điều kiện hoá già khác nhau, nghiên cứu đưa ra được các kết luận ảnh hưởng của điều kiện hóa già đến sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế ẩm có hàm lượng RAP cao.

## 2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu và thành phần hỗn hợp

Chất kết dính bitum quánh loại 60/70 được sử dụng trong nghiên cứu này. Hỗn hợp cốt liệu được sử dụng để chế tạo bê tông asphalt loại 12,5 mm bao gồm đá 10x16, đá 5x10, đá 0x5 và bột khoáng. Tất cả các loại cốt liệu được lấy ở trạm trộn Tân Cang 3 của Công ty cổ phần Đầu tư xây dựng BMT, Biên Hòa, Đồng Nai. Các loại cốt liệu được thí nghiệm và kiểm tra, đều thỏa mãn theo yêu cầu của TCVN 8819:2011 [24]. Hỗn hợp RAP sử dụng cho nghiên cứu là loại 12,5 (RAP 12,5) cũng được cung cấp bởi Công ty Cổ phần đầu tư và xây dựng BMT. RAP sẽ được chiết tách để xác định hàm lượng bitum trong RAP và thành phần cấp phối. Các chỉ tiêu kỹ thuật của bitum trong RAP được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Một số chỉ tiêu của bitum trong RAP.

Chỉ tiêu	Kết quả	Tiêu chuẩn thí nghiệm
Độ kim lún ở 25 °C, 0,1 mm	25,4	ASTM D 5
Nhiệt độ hoá mềm, °C	76,7	ASTM D 36
Độ nhớt ở 135 °C, Pa.s	2,134	AASHTO T316
G*/sinδ ở 82 °C, kPa	1,1	AASHTO T315

Công nghệ bê tông asphalt ẩm sử dụng trong nghiên cứu là công nghệ phụ gia Zycotherm, đây là một loại phụ gia hóa học dạng lỏng có thành phần chính là nano-organosilane. Phụ gia này đã được sản xuất thương mại có tác dụng làm tăng khả năng bao phủ lớp màng bitum với cốt liệu, nâng cao khả năng đầm nén cho hỗn hợp. Zycotherm được trộn với bitum đã gia nhiệt trước theo phương pháp trộn ướt với hàm lượng là 0,15% theo khối lượng bitum. Bảng 2 đưa ra kết quả thí nghiệm của phụ gia Zycotherm.

Bảng 2. Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia Zycotherm.

Chỉ tiêu, đơn vị	Kết quả
Khối lượng riêng, g/cm <sup>3</sup>	0,98
Hình dạng	Lỏng
Màu sắc	Vàng nhạt
Độ nhớt, Pa.s	2,2
Điểm chớp cháy, °C	85

Để xác định hàm lượng bitum tối ưu, phương pháp Marshall đã được lựa chọn thể thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông asphalt tái chế ẩm. Nhiệt độ trộn hỗn hợp yêu cầu đạt được từ 140-145°C trong khi nhiệt độ đầm nén yêu cầu từ 120-125°C. Tỷ lệ phối trộn các vật liệu thành phần, hàm lượng bitum tối ưu và các kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu của các hỗn hợp được thể hiện ở Bảng 3 và Bảng 4.

Bảng 3. Thành phần hạt của hỗn hợp vật liệu khoáng.

Cỡ sàng (mm)	Thành phần hạt của hỗn hợp vật liệu khoáng		
	HMA	30%RAP	50%RAP
19	100	100	100
12,5	89,0	89,2	89,8
9,5	74,0	76,2	75,8
4,75	38,7	43,9	43,9
2,36	26,6	29,3	28,8
1,18	20,7	22,8	22,4
0,60	14,4	16,3	16,4
0,30	10,9	12,6	13,0
0,15	8,7	10,0	10,3
0,075	6,8	7,7	8,0

Bảng 4. Kết quả thiết kế thành phần hỗn hợp theo Marshall.

Chỉ tiêu hỗn hợp		Kết quả			Yêu cầu kỹ thuật
		HMA	30%RAP	50%RAP	
Tỷ lệ vật liệu (theo khối lượng hỗn hợp)	RAP 12,5	0	28,5	47,4	
	Đá 10×16	19,2	9,5	6,6	-
	Đá 5×10	28,8	16,1	8,5	-
	Đá 0×5	43,2	38,0	30,3	-
	Bột đá	3,8	2,8	1,9	-
	Bitum trong RAP	0,0	1,1	1,9	-
	Bitum mới	5,0	4,0	3,4	-
Độ rỗng dư, $V_a$ (%)		4,5	4,1	4,3	3-6
Độ rỗng hỗn hợp VLK, VMA (%)		15,7	14,1	14,3	$\geq 14$
Độ rỗng lấp đầy bitum, VFA (%)		71,5	70,7	70,1	65-75
Hàm lượng bitum hấp phụ, $P_{ba}$ (%)		0,3	0,7	1,1	-
Hàm lượng bitum có hiệu, $P_{be}$ (%)		4,7	4,4	4,3	-
Độ ổn định Marshall, kN		11,3	15,0	16,6	$\geq 8$
Độ dẻo Marshall, mm		3,5	3,6	3,6	2-4

## 2.2. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Trong thí nghiệm xác định chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  theo ASTM D8225-2019 [25], các mẫu thí nghiệm được chế tạo theo tiêu chuẩn, có đường kính bằng  $150 \pm 2$  mm, chiều cao bằng  $62 \pm 1$  mm. Các mẫu này được đầm trên thiết bị đầm xoay với mục tiêu đạt được độ rỗng dư bằng  $7 \pm 0,5\%$ . Hình 1 và Hình 2 thể hiện quá trình hoá già hỗn hợp asphalt rời trong tủ sấy và đầm mẫu bằng thiết bị đầm xoay. Ba điều kiện hoá già khác nhau được thực hiện bao gồm hoá già ngắn hạn 4 giờ ở  $135^\circ\text{C}$  (STOA-4h- $135^\circ\text{C}$ ), hoá già dài hạn 24 giờ ở  $135^\circ\text{C}$  (LTOA-24h- $135^\circ\text{C}$ ) và hoá già dài hạn 8 ngày ở  $95^\circ\text{C}$  sau khi hoá già ngắn hạn (LTOA-8d- $95^\circ\text{C}$ ).



(a)



(b)

Hình 1. Hỗn hợp được hoá già trong tủ sấy: (a) Hỗn hợp được làm nguội trong khay đựng; (b) Hỗn hợp được gia nhiệt trong tủ sấy.



Hình 2. Chế bị mẫu thí nghiệm: (a) Đầm mẫu trên thiết bị đầm xoay Troxler;  
(b) Mẫu thí nghiệm sau khi đầm.

Theo tiêu chuẩn ASTM D 8225-19 quy định, số lượng mẫu tối thiểu cho một tổ mẫu là 4 mẫu. Do vậy, tổng số mẫu chế bị để thí nghiệm  $CT_{Index}$  của các hỗn hợp là 36 mẫu.

### 2.3. Tiến hành thí nghiệm

Các mẫu thử được bảo ôn tối thiểu 3 giờ ở 25°C trước khi thí nghiệm, sau đó tiến hành thí nghiệm nén ép chế trên máy nén Marshall với tốc độ tăng tải là 50 mm/phút cùng với phần mềm chuyên dụng để thu được dữ liệu lực và chuyển vị như ở Hình 3a. Chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  được tính toán từ đường cong quan hệ giữa lực-chuyển vị 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 hủy (J);

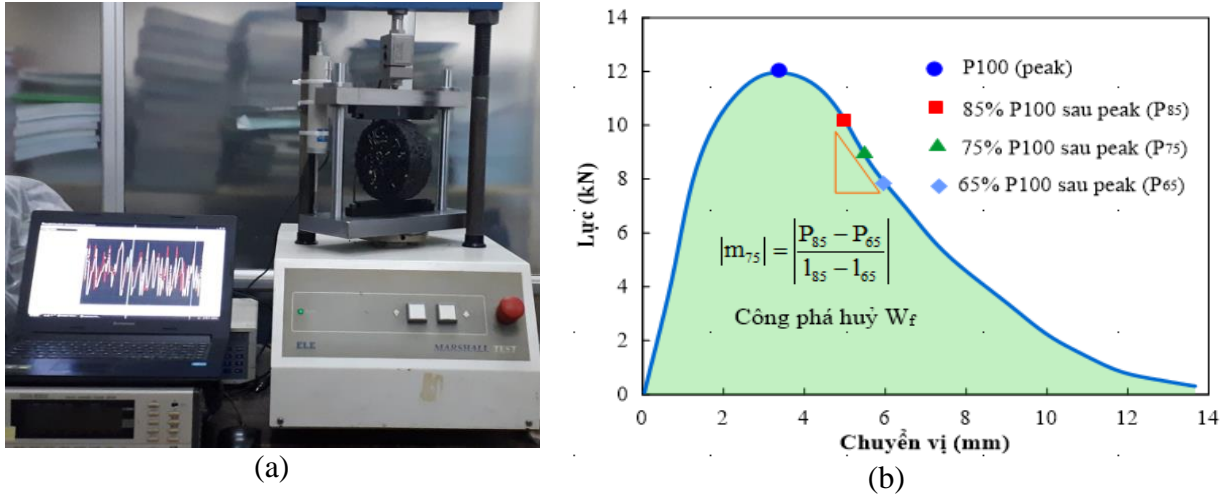
$D$  - đường kính mẫu thí nghiệm (mm);

$t$  - chiều dày mẫu thí nghiệm (mm);

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

$|m_{75}|$  - 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 3b.

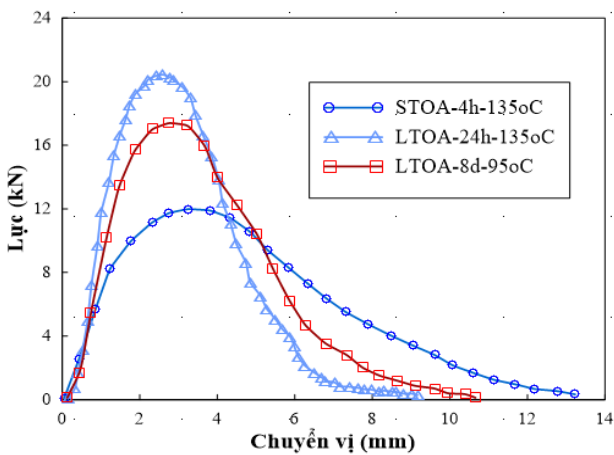
$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (3)$$



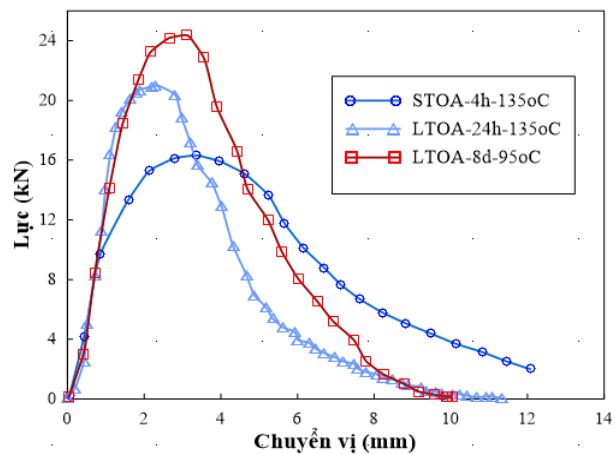
Hình 3. Thí nghiệm sức kháng nứt xác định chỉ số  $CT_{Index}$  (a) Quá trình thí nghiệm; (b) Đường cong lực-chuyển vị.

## 2.4. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

Kết quả thí nghiệm kéo gián tiếp (IDEAL-CT) của các mẫu thử được thể hiện bằng đường cong lực-chuyển vị sau khi được xử lý thống kê theo tiêu chuẩn ASTM C670 như ở Hình 4, Hình 5, và Hình 6. Kết quả có thể nhận thấy rằng, trong các điều kiện hoá già khác nhau, sự thay đổi của các đường cong lực-chuyển vị của các mẫu là khác nhau rõ rệt. Dựa vào đường cong quan hệ lực-chuyển vị của các hỗn hợp cho thấy, giá trị lực lớn nhất (peak load) tăng lên đáng kể và độ dốc trước khi đạt giá trị lực lớn nhất (pre-peak slope) trở nên dốc hơn đối với trường hợp hoá già dài hạn và khi hỗn hợp asphalt sử dụng hàm lượng RAP cao. Điều này cũng dẫn đến giá trị biến dạng của mẫu nhỏ khi hỗn hợp được hoá già dài hạn. Sức kháng nứt của bê tông asphalt được đánh giá thông qua các chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$ , năng lượng phá huỷ ( $G_f$ ) và giá trị tuyệt đối của độ dốc đường cong nằm phía sau giá trị lực lớn nhất ( $|m_{75}|$ ).

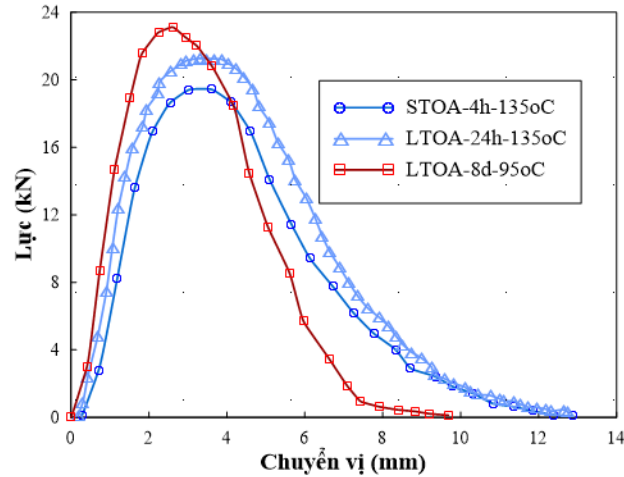


Hình 4. Đường cong quan hệ lực - chuyển vị của mẫu HMA.

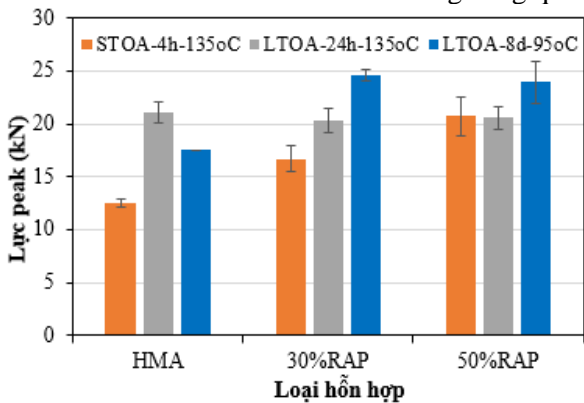


Hình 5. Đường cong quan hệ lực – chuyển vị của mẫu 30% RAP.

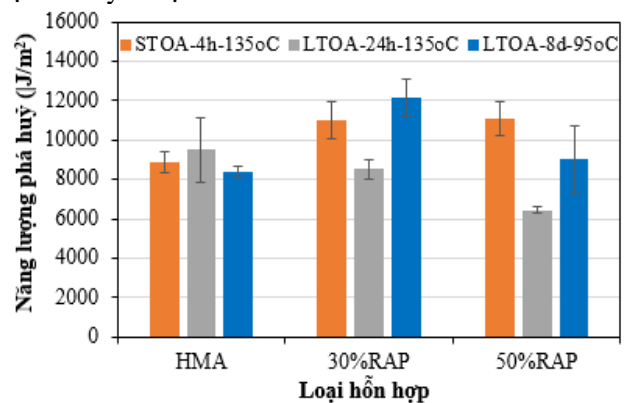




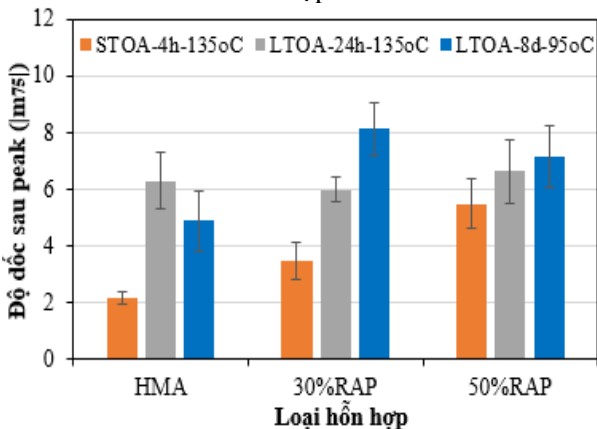
Hình 6. Đường cong quan hệ lực - chuyển vị của mẫu 50%RAP.



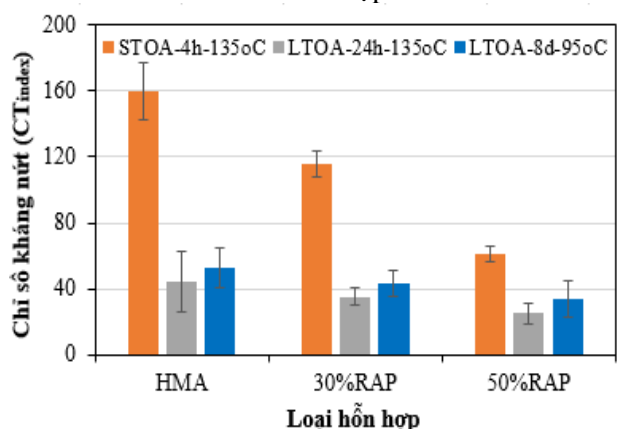
Hình 7. Giá trị lực lớn nhất ( $P_{100}$ ) của các hỗn hợp.



Hình 8. Giá trị năng lượng phá huỷ ( $G_f$ ) của các hỗn hợp.



Hình 9. Giá trị độ dốc sau peak ( $|m_{75}|$ ) của các hỗn hợp.

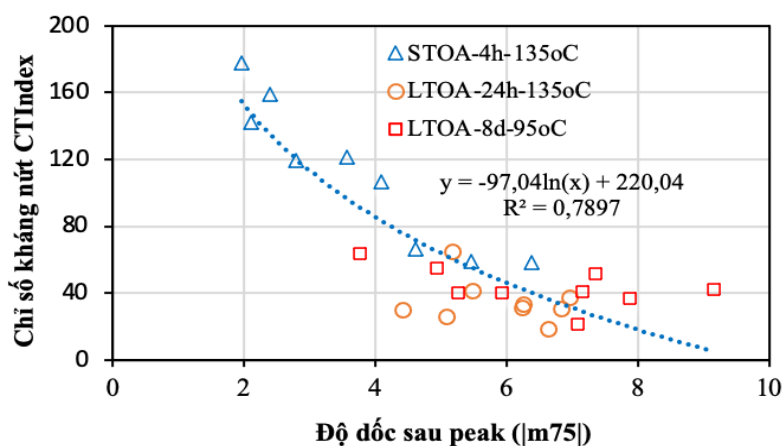


Hình 10. Chỉ số kháng nứt  $CT_{index}$  của các hỗn hợp.

Giá trị lực lớn nhất (peak load –  $P_{100}$ ), năng lượng phá huỷ nứt  $G_f$ , giá trị tuyệt đối của độ dốc nằm phía sau giá trị lực lớn nhất (post-peak slope – độ dốc sau peak,  $|m_{75}|$ ) và chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  được xác định từ đường cong quan hệ lực – chuyển vị của các hỗn hợp asphalt khác nhau trong các điều kiện hoá già khác nhau được thể hiện ở Hình 7, 8, 9, 10. Giá trị tuyệt đối của độ dốc sau peak ( $|m_{75}|$ ) là lớn hơn đối với các mẫu được hoá già dài hạn LTOA, điều này cho thấy vết nứt nhanh chóng phát triển do độ giòn của vật liệu tăng lên

(Hình 9). Ngược lại, độ dốc sau peak là thoải hơn đối với các mẫu STOA cho thấy có khả năng chống lan truyền vết nứt tốt hơn.

Với các hỗn hợp được hoá già dài hạn LTOA, giá trị lực nén lớn nhất của các hỗn hợp này cao hơn so với hỗn hợp được hoá già ngắn hạn STOA. Năng lượng phá huỷ không có sự thay đổi mạnh mẽ như giá trị độ dốc ở các điều kiện hoá già, hoặc giữa các hỗn hợp khác nhau. Vì chỉ số  $CT_{Index}$  được tính toán liên quan đến cả ba thông số, nên ảnh hưởng thực của những thay đổi đối với các hỗn hợp khác nhau và điều kiện hoá già khác nhau là giá trị  $CT_{Index}$ . Kết quả cho thấy, khi mức độ hoá già tăng lên (tức là khi các hỗn hợp được hoá già dài hạn), khả năng kháng nứt giảm được thể hiện thông qua chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  của các mẫu LTOA thấp hơn so với mẫu STOA đối với tất cả các hỗn hợp. Khả năng kháng nứt giảm chủ yếu là do giá trị tuyệt đối của độ dốc sau peak  $|m_{75}|$  tăng với tất cả các hỗn hợp. Với hỗn hợp HMA, giá trị độ dốc  $|m_{75}|$  và chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  tương ứng với các điều kiện hoá già STOA-4h-135°C, LTOA-24h-135°C và LTOA-8d-95°C lần lượt là 2,16; 6,32 ; 4,89 kN/mm và 159,7 ; 44,5 ; 52,9. Như vậy, có thể thấy rằng khả năng kháng nứt đã giảm đáng kể khi mức độ hoá già tăng lên. Với hỗn hợp sử dụng 30%RAP, giá trị độ dốc  $|m_{75}|$  và chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  tương ứng với các điều kiện hoá già STOA-4h-135°C, LTOA-24h-135°C và LTOA-8d-95°C lần lượt là 3,49; 5,99 ; 8,14 kN/mm và 115,7 ; 35,4 ; 43,3. Kết quả này có thể thấy rằng chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  chịu ảnh hưởng lớn bởi giá trị độ dốc sau peak  $|m_{75}|$ . Một mối quan hệ giữa chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  và độ dốc sau peak  $|m_{75}|$  được thể hiện ở Hình 11 với hệ số  $R^2 = 0,79$ . Tương quan này cũng tương đồng với kết quả nghiên cứu của Hussain Bahia và các cộng sự. (2020).



Hình 11. Quan hệ giữa chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  và giá trị độ dốc sau peak  $|m_{75}|$  của tất cả các hỗn hợp.

Về ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến chỉ số kháng nứt của các hỗn hợp, kết quả cho thấy, đối với hỗn hợp asphalt tái chế ẩm sử dụng vật liệu RAP (30%RAP và 50%RAP), chỉ số  $CT_{Index}$  đều thấp hơn so với hỗn hợp đối chứng (HMA) ở các điều kiện hoá già khác nhau. Ở điều kiện hoá già ngắn hạn, chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  của hỗn hợp đối chứng HMA và hỗn hợp sử dụng 30%RAP, 50%RAP có giá trị lần lượt là 159,7 ; 115,7 ; 61,2. Tuy nhiên, giá trị lực nén lớn nhất đạt được tăng lên bởi vì chất kết dính bitum trong hỗn hợp cứng hơn khi tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp và mức độ hoá già tăng lên. Vì vậy, khả năng chống biến dạng ban đầu tăng lên khi hỗn hợp asphalt sử dụng RAP và/hoặc khi bị hoá già.

### 3. KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá sức kháng nứt của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế ẩm có tỷ lệ RAP cao, có thể đưa ra một số kết luận như sau:

– Điều kiện hoá già dài hạn có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử nứt của bê tông asphalt. Giá trị tuyệt đối của độ dốc nằm phía sau giá trị lực lớn nhất ( $|m_{75}|$ ) là lớn hơn đối với các mẫu được hoá già dài hạn. So với năng lượng phá huỷ nứt, độ dốc  $|m_{75}|$  ảnh hưởng lớn hơn đến chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$ .

– Khi mức độ hoá già tăng lên (tức là khi các hỗn hợp được hoá già dài hạn), khả năng kháng nứt giảm được thể hiện thông qua chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  thấp hơn so với các hỗn hợp được hoá già ngắn hạn. Đối với hỗn hợp asphalt tái chế ẩm sử dụng vật liệu RAP, chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  đều thấp hơn so với hỗn hợp đối chứng (HMA) ở các điều kiện hoá già khác nhau.

– Giá trị lực nén lớn nhất tăng lên khi hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp tăng và trong điều kiện hoá già dài hạn.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Williams, J. Willis, T. Ross, Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2018, Information Series 138 9th Annual Survey, 2018.
- [2] M. Symons, NCAT-Evaluates Warm Mix Asphalt, A Publ. Natl. Cent. Asp. Technol. Auburn University, 17 (2005) 1–16.
- [3] Đào Văn Đông và cộng sự, Nghiên cứu thiết kế, chế tạo bê tông asphalt tái chế ẩm và ứng dụng trong xây dựng đường ô tô, Mã số KC.02.16/16-20, 2020.
- [4] M. Partl, H. Bahia, F. Canestrari, C. Roche, H. Benedetto, D. H. Piber, Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB, Springer Netherlands, 2013. <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-5104-0>
- [5] F. Zhou et al., Experimental Design for field validation of laboratory tests to assess cracking resistance of asphalt mixtures, NCHRP 09-57, Texas A&M Transportation Institute, 2016.
- [6] S. Sreedhar, E. Coleri, The effect of long-term aging on fatigue cracking resistance of asphalt mixtures, Int. J. Pavement Eng., 4 (2020). <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1745206>
- [7] W. Zhang, S. Shen, S. Wu, L. N. Mohammad, Long-Term Field Aging of Warm-Mix and Hot-Mix Asphalt Binders, J. Transp. Res. Board, 2632 (2017) 140–149. <https://doi.org/10.3141/2632-15>
- [8] M. D. Elwardany, F. Y. Rad, C. Castorena, Y. R. Kim, Evaluation of asphalt mixture laboratory long-term ageing methods for performance testing and prediction, Road Mater. Pavement Des., 18 (2016) 28–61. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266740>
- [9] F. Yin, E. Arámbula-Mercado, A. Epps Martin, D. Newcomb, N. Tran, Long-term ageing of asphalt mixtures, Road Mater. Pavement Des., 18 (2017) 2–27 <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266739>
- [10] F. Yousefi Rad, M. D. Elwardany, C. Castorena, Y. R. Kim, Investigation of proper long-term laboratory aging temperature for performance testing of asphalt concrete, Constr. Build. Mater., 147 (2017) 616–629. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.197>
- [11] Y.R. Kim et al., Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction, NCHRP 871 report, Transportation Research Board, 2018. <https://doi.org/10.17226/24959>
- [12] M. D. Elwardany, F. Y. Rad, C. Castorena, Y. R. Kim, Evaluation of asphalt mixture laboratory

long-term ageing methods for performance testing and prediction, *Road Mater. Pavement Des.*, 18, (2016) 28–61. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1266740>

[13] Z. A. Arega, A. Bhasin, T. De Kesel, Influence of extended aging on the properties of asphalt composites produced using hot and warm mix methods, *Constr. Build. Mater.*, 44 (2013) 168–174. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.081>

[14] Trương Văn Quyết, Nguyễn Ngọc Lân, Phạm Minh Trang, Ảnh hưởng của điều kiện hoá già đến sức kháng nứt của bê tông asphalt, *Tap chí Giao thông vận tải*, 5 (2021) 72-76.

[15] AASHTO R30, Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA), ASTM International, 2012.

[16] AASHTO T312, Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor, ASTM International, 2014.

[17] E. T. Harrigan, Engineering, Simulating the Effects of Hot-Mix Asphalt Aging for Performance Testing and Pavement Structural Design, Transportation Research Board, 2007. <https://doi.org/10.17226/23238>

[18] R. Zhang, J. E. Sias, E. V. Dave, Evaluation of the cracking and aging susceptibility of asphalt mixtures using viscoelastic properties and master curve parameters, *J. Traffic Transp.*, 9 (2020) 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2020.09.002>

[19] F. Zhou et al., Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures, NCHRP 9-57 report, Texas A&M Transportation Institute, 2016.

[20] R. West, C. Rodezno, F. Leiva, F. Yin, Development of a Framework for Balanced Mix Design, Transportation Research Board, 2018.

[21] J. E. Sias, E. V. Dave, L. M. McCarthy, Practices for Fabricating Asphalt Specimens for Performance Testing in Laboratories, NCHRP Synthesis 552, Transportation Research Board, 2020.

[22] T. Bennert, E. Haas, E. Wass, Indirect tensile test (IDT) to determine asphalt mixture performance indicators during quality control testing in New Jersey, *Transp. Res. Board*, 2672 (2018) 394–403. <https://doi.org/10.1177/0361198118793276>

[23] R. West et al., NCAT Report PHASE VII (2018-2021) NCAT Test Track Findings, National Center for Asphalt Technology at Auburn University, Alabama, US, 2021.

[24] TCVN 8819-2011, Mặt đường bê tông nhựa nóng - Yêu cầu thi công và nghiệm thu, Tiêu chuẩn Việt Nam, 2011.

[25] ASTM D8225-19, Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature, ASTM International, 2019.