

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

**TRƯỜNG VĂN QUYẾT**

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG RÁP  
VÀ PHỤ GIA TÁI SINH ĐẾN TÍNH NĂNG  
CỦA BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG  
DÙNG TRONG XÂY DỰNG ĐƯỜNG Ô TÔ Ở VIỆT NAM**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**HÀ NỘI - 2025**

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

**TRƯỜNG VĂN QUYẾT**

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG RAP  
VÀ PHỤ GIA TÁI SINH ĐẾN TÍNH NĂNG  
CỦA BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG  
DÙNG TRONG XÂY DỰNG ĐƯỜNG Ô TÔ Ở VIỆT NAM**

**Ngành : Kỹ thuật xây dựng Công trình giao thông**

**Mã số : 9580205**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:**

- 1. GS.TS. Đào Văn Đông**
- 2. PGS.TS. Nguyễn Ngọc Lân**

**HÀ NỘI - 2025**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi. Các kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa được công bố trong các công trình khác.

Hà Nội, 11/2025

Tác giả luận án

NCS. Trương Văn Quyết

## LỜI CẢM ƠN

Luận án Tiến sĩ được thực hiện tại Trường Đại học Giao thông vận tải, dưới sự hướng dẫn trực tiếp của GS.TS. Đào Văn Đông và PGS.TS. Nguyễn Ngọc Lân. Nghiên cứu sinh (NCS) xin bày tỏ lòng biết ơn tới các Thầy hướng dẫn, đã định hướng và chỉ dẫn tận tình, đóng góp nhiều ý kiến quý báu và tạo điều kiện thuận lợi để giúp NCS thực hiện Luận án này.

Nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn Ban Giám hiệu Trường Đại học Giao thông vận tải, Phòng Đào tạo Sau đại học, Khoa Công trình, Khoa Kỹ thuật xây dựng, Bộ môn Đường bộ, Bộ môn Vật liệu xây dựng, Phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng, Phòng thí nghiệm trọng điểm LAS-XD 1256 – Trung tâm Khoa học Công nghệ GTVT, Phòng thí nghiệm trọng điểm Đường bộ I – Viện Khoa học và Công nghệ GTVT, Trung tâm Công nghệ Asphalt Mỹ, đã tạo điều kiện thuận lợi cho NCS trong quá trình học tập nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo đã cấp học bổng cho Nghiên cứu sinh thông qua Đề án 89. Nghiên cứu sinh cũng xin trân trọng cảm ơn Quỹ đổi mới Sáng tạo VINIF (Tập đoàn Vingroup) đã tài trợ nghiên cứu trong 2 năm cho những kết quả nghiên cứu khoa học có liên quan đến đề tài NCS với mã số VINIF.2022.TS.099 và VINIF.2023.TS.097.

Đồng thời, Nghiên cứu sinh bày tỏ lời cảm ơn tới các bạn bè đồng nghiệp đã giúp đỡ và gia đình, người thân đã động viên, tạo mọi điều kiện tốt nhất trong suốt thời gian học tập, nghiên cứu.

Hà Nội, 11/2025

## MỤC LỤC

<b>MỞ ĐẦU.....</b>	<b>1</b>
1. Đặt vấn đề.....	1
2. Mục đích và nội dung nghiên cứu .....	3
2.1. Mục đích nghiên cứu.....	3
2.2. Nội dung nghiên cứu.....	3
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu .....	4
3.1. Đối tượng nghiên cứu .....	4
3.2. Phạm vi nghiên cứu.....	4
4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....	4
4.1. Ý nghĩa khoa học .....	4
4.2. Ý nghĩa thực tiễn.....	4
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU RAP VÀ PHỤ GIA TÁI SINH DÙNG TRONG BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Tổng quan về vật liệu RAP .....</b>	<b>6</b>
1.1.1. Tình hình sử dụng vật liệu RAP trên thế giới và Việt Nam .....	6
1.1.2. Những khó khăn khi gia tăng hàm lượng RAP trong hỗn hợp asphalt.....	11
1.1.3. Các nghiên cứu về ảnh hưởng của RAP đến các tính năng của bê tông asphalt .....	13
<b>1.2. Tổng quan sự hóa già của bitum và hỗn hợp asphalt.....</b>	<b>15</b>
1.2.1. Thành phần hóa học và cấu trúc của bitum .....	15
1.2.2. Hóa già bitum.....	17
1.2.3. Hóa già hỗn hợp asphalt.....	21
<b>1.3. Tổng quan về phụ gia tái sinh.....</b>	<b>22</b>
1.3.1. Cơ chế trẻ hoá bitum của phụ gia tái sinh.....	23
1.3.2. Hàm lượng phụ gia tái sinh.....	26

1.3.3. Các nghiên cứu về ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến các tính chất của bitum và tính năng của bê tông asphalt .....	28
<b>1.4. Thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông asphalt tái chế.....</b>	<b>34</b>
<b>1.5. Các nghiên cứu trong nước liên quan đến hướng nghiên cứu và vấn đề nghiên cứu cần giải quyết của Luận án.....</b>	<b>36</b>
<b>1.6. Phương pháp nghiên cứu .....</b>	<b>38</b>
<b>CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ẢNH HƯỞNG CỦA PHỤ GIA TÁI SINH ĐẾN MỘT SỐ TÍNH CHẤT CỦA BITUM.....</b>	<b>40</b>
<b>2.1. Đặt vấn đề nghiên cứu.....</b>	<b>40</b>
<b>2.2. Kế hoạch thí nghiệm.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3. Vật liệu sử dụng cho nghiên cứu .....</b>	<b>43</b>
2.3.1. Vật liệu RAP .....	43
2.3.2. Bitum.....	43
2.3.3. Phụ gia tái sinh.....	44
<b>2.4. Quá trình chiết và thu hồi bitum cũ từ vật liệu RAP.....</b>	<b>45</b>
2.4.1. Quá trình chiết bitum RAP .....	45
2.4.2. Quá trình thu hồi bitum RAP .....	45
<b>2.5. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm .....</b>	<b>47</b>
2.5.1. Phương pháp trộn phụ gia tái sinh với bitum.....	47
2.5.2. Phương pháp hoá già bitum .....	48
<b>2.6. Thí nghiệm xác định độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm.....</b>	<b>49</b>
2.6.1. Phương pháp thí nghiệm .....	49
2.6.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích .....	50
<b>2.7. Thí nghiệm cắt động lưu biến (DSR).....</b>	<b>52</b>
2.7.1. Phương pháp thí nghiệm .....	52
2.7.2. Xây dựng đường cong chủ mô đun cắt động $ G^* $ .....	54
2.7.3. Kết quả thí nghiệm và phân tích .....	57

2.7.4. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến đường cong chủ $ G^* $ .....	63
<b>2.8. Thí nghiệm phân tích thành phần hóa học và cấu trúc bitum .....</b>	<b>69</b>
2.8.1. Thí nghiệm phân tích SEM-EDX... ..	70
2.8.2. Thí nghiệm phân tích quang phổ hồng ngoại FTIR.....	73
<b>2.9. Kết luận .....</b>	<b>79</b>
<b>CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG RAP VÀ PHỤ GIA TÁI SINH ĐẾN CÁC TÍNH NĂNG CỦA BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG .....</b>	<b>81</b>
<b>3.1. Đặt vấn đề và kế hoạch nghiên cứu .....</b>	<b>81</b>
<b>3.2. Vật liệu chế tạo.....</b>	<b>82</b>
<b>3.3. Thành phần hỗn hợp asphalt .....</b>	<b>85</b>
<b>3.4. Thí nghiệm sức kháng hằn lún vết bánh xe theo phương pháp Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT).....</b>	<b>87</b>
3.4.1. Phương pháp thí nghiệm .....	88
3.4.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích .....	89
<b>3.5. Thí nghiệm sức kháng nứt theo mô hình thí nghiệm kéo gián tiếp (IDEAL-CT) .....</b>	<b>91</b>
3.5.1. Phương pháp thí nghiệm .....	93
3.5.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích .....	95
<b>3.6. Xác định hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu.....</b>	<b>103</b>
<b>3.7. Thí nghiệm sức kháng hằn lún vết bánh xe theo mô hình thí nghiệm lún nhanh (IDEAL-RT).....</b>	<b>105</b>
3.7.1. Phương pháp thí nghiệm .....	106
3.7.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích .....	107
<b>3.8. Thí nghiệm mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp (<math>M_R</math>) .....</b>	<b>109</b>
3.8.1. Phương pháp thí nghiệm .....	109
3.8.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích .....	110
<b>3.9. Thí nghiệm mô đun động (<math> E^* </math>).....</b>	<b>111</b>

3.9.1. Phương pháp thí nghiệm .....	112
3.9.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích .....	113
3.9.3. Xây dựng đường cong chủ mô đun động $ E^* $ .....	1139
<b>3.10. Kết luận .....</b>	<b>120</b>
<b>CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU DỰ BÁO TÍNH NĂNG KHAI THÁC CỦA KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG SỬ DỤNG LỚP BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG THEO PHƯƠNG PHÁP CƠ HỌC -THỰC NGHIỆM .....</b>	<b>122</b>
<b>4.1. Các phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm .....</b>	<b>122</b>
<b>4.2. Cơ sở khoa học của phương pháp cơ học - thực nghiệm .....</b>	<b>123</b>
<b>4.3. Ứng dụng phần mềm AASHTOWare® để dự báo các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường .....</b>	<b>124</b>
4.3.1. Kết cấu mặt đường nghiên cứu .....	124
4.3.2. Tiến hành phân tích.....	127
4.3.3. Kết quả phân tích .....	129
<b>4.4. Kết luận .....</b>	<b>139</b>
<b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....</b>	<b>140</b>
<b>DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CÔNG BỐ.....</b>	<b>142</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO.....</b>	<b>143</b>

## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 0.1. Chu trình tuổi thọ của mặt đường (a) Chu trình vòng đời tái sử dụng sau khi mặt đường hư hỏng, (b) Cào bóc vật liệu mặt đường asphalt cũ .....	1
Hình 1.1. Tỷ lệ RAP trung bình được sử dụng trong hỗn hợp asphalt tái chế ở Nhật Bản .....	7
Hình 1.2. Số lượng các bang ở Mỹ sử dụng các hàm lượng RAP khác nhau trong hỗn hợp HMA/WMA giai đoạn 2018–2022.....	9
Hình 1.3. Cấu trúc vi mô của bitum .....	16
Hình 1.4. Sự thay đổi về thành phần hóa học của bitum khi hóa già.....	17
Hình 1.5. Tỷ lệ các nhóm chất trong bitum khi hoá già.....	18
Hình 1.6. Các nhóm chức hóa học (a) tồn tại trong bitum mới và (b) hình thành trong quá trình oxy hóa .....	19
Hình 1.7. Phân tích FTIR cho bitum mới và bitum hóa già .....	20
Hình 1.8. Phương pháp hoá già dài hạn hỗn hợp asphalt.....	21
Hình 1.9. Cơ chế trẻ hoá bitum của phụ gia tái sinh .....	24
Hình 1.10. Giải thích quá trình trẻ hóa bitum RAP của phụ gia tái sinh theo cơ chế vật lý .....	25
Hình 1.11. Tỷ lệ các nhóm chất khi phân tích SARA của bitum mới, bitum PAV, phụ gia tái sinh và bitum PAV được trẻ hóa .....	29
Hình 1.12. Cấu trúc bitum ở các hàm lượng phụ gia tái sinh khác nhau .....	30
Hình 1.13. Mối quan hệ giữa thí nghiệm FTIR và độ kim lún.....	31
Hình 1.14. Mối quan hệ giữa chỉ số CI từ thí nghiệm phân tích SARA và thông số $G^* \sin \delta$ .....	32
Hình 2.1. Kế hoạch thí nghiệm trên chất kết dính bitum .....	41
Hình 2.2. Lấy mẫu RAP .....	43
Hình 2.3. Phụ gia tái sinh .....	44
Hình 2.4. Quá trình chiết và thu hồi bitum trong RAP .....	46
Hình 2.5. Các bước trộn phụ gia tái sinh với bitum .....	47

Hình 2.6. Quá trình trộn phụ gia tái sinh với bitum .....	48
Hình 2.7. Hoá già ngắn hạn RTFO.....	48
Hình 2.8. Hoá già dài hạn PAV .....	49
Hình 2.9. Thí nghiệm xác định độ kim lún.....	49
Hình 2.10. Thí nghiệm xác định nhiệt độ hoá mềm .....	50
Hình 2.11. Kết quả thí nghiệm độ kim lún của các loại bitum.....	51
Hình 2.12. Ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia tái sinh đến độ kim lún .....	51
Hình 2.13. Kết quả thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm của các loại bitum .....	52
Hình 2.14. Mô tả thí nghiệm cắt động lưu biến.....	53
Hình 2.15. Thí nghiệm cắt động lưu biến DSR.....	54
Hình 2.16. Giá trị $G^*/\sin\delta$ của các loại bitum ở nhiệt độ 64°C.....	58
Hình 2.17. So sánh giá trị $G^*\sin\delta$ của các loại bitum ở nhiệt độ 25°C .....	60
Hình 2.18. Giá trị PGH và PGI của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh .....	63
Hình 2.19. Đường cong chủ $ G^* $ của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA1 (a) không hóa già, (b) RTFO và (c) PAV .....	66
Hình 2.20. Đường cong chủ $ G^* $ của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA2 (a) không hóa già, (b) RTFO, và (c) PAV .....	67
Hình 2.21. Đường cong chủ $ G^* $ của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA1 (a) không hóa già, (b) RTFO, và (c) PAV .....	68
Hình 2.22. Thí nghiệm SEM – EDX .....	70
Hình 2.23. Hình ảnh SEM .....	71
Hình 2.24. Phân tích thành phần các nguyên tố bằng thí nghiệm SEM-EDX .....	72
Hình 2.25. Thí nghiệm FTIR.....	73
Hình 2.26. Kết quả thí nghiệm FTIR của các mẫu ở điều kiện không hóa già .....	74
Hình 2.27. Kết quả thí nghiệm FTIR của các mẫu ở điều kiện PAV .....	74
Hình 2.28. Minh họa cách tính diện tích $A_{C=O}$ , $A_{S=O}$ và $A_{ref}$ .....	76
Hình 2.29. Chỉ số cacbonyl $I_{C=O}$ của các loại bitum.....	78

Hình 2.30. Chỉ số sulfoxide $I_{S=O}$ của các loại bitum .....	78
Hình 2.31. Chỉ số kết hợp $I_{C=O}+I_{S=O}$ của các loại bitum.....	78
Hình 2.32. Đánh giá mức độ lão hóa của các loại bitum từ thí nghiệm FTIR .....	79
Hình 3.1. Thành phần hạt của cốt liệu RAP.....	83
Hình 3.2. Thành phần cấp phối của hỗn hợp cốt liệu.....	86
Hình 3.3. Chuẩn bị mẫu thử và thí nghiệm HWTT.....	88
Hình 3.4. Kết quả thí nghiệm hằn lún vệt bánh xe của các hỗn hợp.....	89
Hình 3.5. Chiều sâu hằn lún vệt bánh xe của các hỗn hợp sau 20000 lượt.....	90
Hình 3.6. Quá trình chuẩn bị mẫu .....	93
Hình 3.7. Thí nghiệm IDEAL-CT .....	94
Hình 3.8. Đường cong lực – chuyển vị và chỉ số $CT_{Index}$ của các hỗn hợp có hàm lượng RAP khác nhau .....	96
Hình 3.9. Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu sử dụng phụ gia tái sinh RA1.....	97
Hình 3.10. Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu sử dụng phụ gia tái sinh RA2...97	
Hình 3.11. Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu sử dụng phụ gia tái sinh RA3...97	
Hình 3.12. Chỉ số kháng nứt $CT_{Index}$ của các hỗn hợp ở điều kiện STOA và LTOA....98	
Hình 3.13. Biểu đồ tương tác giữa $G_f$ và tỷ số $ l_{75}/ m_{75} $ ở điều kiện hóa già STOA.....99	
Hình 3.14. Biểu đồ tương tác giữa $G_f$ và tỷ số $ l_{75}/ m_{75} $ ở điều kiện hóa già LTOA....100	
Hình 3.15. Quan hệ giữa chỉ số kháng nứt $CT_{Index}$ và độ dốc $ m_{75} $ .....101	
Hình 3.16. Tỷ số $CT_{Index(LTOA)}/CT_{Index(STOA)}$ .....102	
Hình 3.17. Quan hệ giữa $G^*sin\delta$ và $CT_{Index}$ ở 25°C .....	103
Hình 3.18. Quan hệ giữa $G^*sin\delta$ và $ m_{75} $ ở 25°C .....	103
Hình 3.19. Xác định hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu .....	104
Hình 3.20. Chỉ số kháng nứt $CT_{Index}$ của các hỗn hợp bê tông asphalt tái chế ở hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu .....	105
Hình 3.21. Mô hình và mẫu thử cho thí nghiệm IDEAL-RT .....	106
Hình 3.22. Thí nghiệm IDEAL-RT .....	107

Hình 3.23. Cường độ cắt của các hỗn hợp .....	108
Hình 3.24. Chỉ số kháng lún $RT_{Index}$ của các hỗn hợp.....	108
Hình 3.25. Mẫu thử và thí nghiệm mô đun đàn hồi $M_R$ .....	110
Hình 3.26. Tải trọng tác dụng.....	110
Hình 3.27. Mô đun đàn hồi $M_R$ của các hỗn hợp .....	111
Hình 3.28. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm mô đun động $ E^* $ .....	112
Hình 3.29. Tải trọng tác dụng và biến dạng tương ứng trong thí nghiệm mô đun động $ E^* $ .....	113
Hình 3.30. Thí nghiệm mô đun động $ E^* $ .....	113
Hình 3.31. $ E^* $ của hỗn hợp 0%RAP ở điều kiện STOA và LTOA .....	114
Hình 3.32. $ E^* $ của hỗn hợp 30%RAP với phụ gia tái sinh ở điều kiện STOA .....	114
Hình 3.33. $ E^* $ của hỗn hợp 50%RAP với phụ gia tái sinh ở điều kiện STOA và LTOA .....	116
Hình 3.34. Mức độ ảnh hưởng của các yếu tố ảnh hưởng đến $ E^* $ .....	117
Hình 3.35. So sánh Tukey giá trị $ E^* $ của hỗn hợp sử dụng 50%RAP với phụ gia tái sinh ở điều kiện STOA và LTOA .....	118
Hình 3.36. Phần trăm thay đổi $ E^* $ giữa LTOA và STOA.....	119
Hình 3.37. Đường cong chủ $ E^* $ của các loại bê tông asphalt .....	119
Hình 4.1. Trình tự thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo cơ học – thực nghiệm .....	123
Hình 4.2. Phần mềm AASHTOWare® 1.3.28 .....	123
Hình 4.3. Trạm khí hậu MERRA2 Quốc lộ 51 - Đồng Nai .....	128
Hình 4.4. Quá trình phân tích kết cấu mặt đường .....	129
Hình 4.5. Độ gồ ghề IRI .....	132
Hình 4.6. Tổng chiều sâu hằn lún cho toàn bộ kết cấu.....	132
Hình 4.7. Chiều sâu hằn lún lớp mặt bê tông asphalt.....	132
Hình 4.8. Nứt mỗi từ dưới lên của lớp bê tông asphalt .....	133
Hình 4.9. Nứt mỗi từ trên xuống của lớp bê tông asphalt .....	133

Hình 4.10. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến chỉ tiêu IRI.....	135
Hình 4.11. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến chiều sâu hằn lún vết bánh lốp mặt .....	136
Hình 4.12. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến tổng chiều sâu hằn lún toàn kết cấu.....	137
Hình 4.13. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến nứt mỏi từ trên xuống .....	138

## DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Phạm vi sử dụng RAP ở Mỹ .....	8
Bảng 1.2. Nội dung nghiên cứu.....	39
Bảng 2.1. Ký hiệu các mẫu bitum .....	41
Bảng 2.2. Chi tiết kế hoạch thí nghiệm và số lượng mẫu thử cho nghiên cứu.....	42
Bảng 2.3. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của bitum 60/70 .....	44
Bảng 2.4. Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia tái sinh theo tiêu chuẩn ASTM D4552....	45
Bảng 2.5. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của RAP và bitum RAP .....	46
Bảng 2.6. Tiêu chí đánh giá mức độ phù hợp của mô hình.....	57
Bảng 2.7. Phân tích ANOVA giá trị $G^*/\sin\delta$ ở 64°C (điều kiện không hóa già).....	58
Bảng 2.8. So sánh Tukey giá trị $G^*/\sin\delta$ ở 64°C (điều kiện không hóa già) .....	59
Bảng 2.9. Phân tích ANOVA giá trị $G^*/\sin\delta$ ở 64°C (RTFO) .....	59
Bảng 2.10. Phân tích ANOVA giá trị $G^*/\sin\delta$ ở 25°C (PAV) .....	61
Bảng 2.11. Phân tích ANOVA mô đun cắt động $ G^* $ .....	64
Bảng 2.12. Các tham số của mô hình .....	64
Bảng 2.13. Phương pháp phân tích thành phần hóa học và cấu trúc của bitum.....	69
Bảng 2.14. Thành phần các nguyên tố hóa học trong bitum mới (bitum 60/70) và bitum cũ thu hồi từ RAP (bitum RAP) từ thí nghiệm SEM-EDX.....	72
Bảng 2.15. Các giới hạn tần số sóng được lựa chọn .....	75
Bảng 2.16. Chỉ số cacbonyl và sunfoxide của các loại bitum .....	76
Bảng 3.1. Chi tiết kế hoạch thí nghiệm các tính năng của hỗn hợp và số lượng mẫu thử cho nghiên cứu.....	82
Bảng 3.2. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của đá dăm 10-16 và đá dăm 5-10 .....	83

Bảng 3.3. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của đá dăm 0-5 .....	84
Bảng 3.4. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của bột khoáng .....	84
Bảng 3.5. Kết quả thí nghiệm thành phần hạt của cốt liệu.....	84
Bảng 3.6. Thành phần phối trộn cốt liệu .....	85
Bảng 3.7. Các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông asphalt theo phương pháp Marshall .....	86
Bảng 3.8. Phân tích ANOVA chiều sâu hằn lún vết bánh xe.....	90
Bảng 3.9. So sánh Tukey chiều sâu hằn lún vết bánh xe .....	91
Bảng 3.10. Các thí nghiệm được sử dụng đánh giá sức kháng nứt [143] .....	91
Bảng 3.11. Phân tích ANOVA chỉ số $CT_{Index}$ .....	99
Bảng 3.12. Các yếu tố phân tích phương sai ANOVA của $ E^* $ .....	116
Bảng 3.13. Phân tích phương sai ANOVA giá trị mô đun động $ E^* $ .....	116
Bảng 4.1. Kết cấu áo đường nghiên cứu .....	125
Bảng 4.2. Tổng hợp các lớp mặt trên nghiên cứu .....	125
Bảng 4.3. Mô đun động $ E^* $ và một số chỉ tiêu thể tích của các loại bê tông asphalt	126
Bảng 4.4. Tỷ lệ các xe trong dòng xe trên các Quốc lộ chính ở Việt Nam [2] .....	128
Bảng 4.5. Kết quả phân tích các kết cấu.....	130
Bảng 4.6. Các yếu tố phân tích phương sai ANOVA. ....	134
Bảng 4.7. Phân tích ANOVA chỉ tiêu IRI .....	134
Bảng 4.8. Phân tích ANOVA chỉ tiêu chiều sâu hằn lún vết bánh của lớp mặt.....	135
Bảng 4.9. Phân tích ANOVA chỉ tiêu tổng chiều sâu lún toàn kết cấu.....	136
Bảng 4.10. Phân tích ANOVA chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống .....	138

## DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

AASHTO	: American association of state highway and transportation officials/Tiêu chuẩn của Hiệp hội Đường bộ Mỹ
AFM	: Atomic force microscope/Kính hiển vi lực nguyên tử
ANOVA	: Analysis of variance/Phân tích phương sai
ASTM	: American society for testing and materials/Tiêu chuẩn phòng thí nghiệm vật liệu Mỹ
Adj SS	: Adjusted sum of square/Tổng bình phương hiệu chỉnh
Adj MS	: Adjusted mean square/Trung bình bình phương đã hiệu chỉnh
BMD	: Balanced mix design/Phương pháp thiết kế cân bằng
CT <sub>Index</sub>	: Cracking tolerance index/Chỉ số kháng nứt
DSR	: Dynamic shear rheometer/Thí nghiệm cắt động lưu biến
DF	: Degrees of freedom/Số bậc tự do
EAPA	: European asphalt pavement association/Hiệp hội mặt đường Asphalt Châu Âu
EN	: European standards/Tiêu chuẩn Châu Âu
F-value	: F-value/Giá trị tới hạn khi kiểm định F
FTIR	: Fourier transform infrared spectroscopy/Thí nghiệm phân tích quang phổ hồng ngoại
FHWA	: Federal highway administration/Cục Quản lý Đường bộ liên bang Mỹ
G*	: Dynamic shear modulus/Mô đun cắt động
HMA	: Hot mix asphalt/Hỗn hợp bê tông asphalt nóng
HWTT	: Hamburg wheel tracking test/Thí nghiệm hằn lún vệt bánh xe
IRC	: Indian Road Congress/Hiệp hội đường bộ Ấn Độ
IDT	: Indirect tensile test/Thí nghiệm kéo gián tiếp
IDEAL-CT	: Indirect tensile asphalt cracking test/Thí nghiệm sức kháng nứt theo mô hình kéo gián tiếp
IDEAL-RT	: Indirect tensile asphalt rutting test/Thí nghiệm sức kháng lún vệt hằn bánh xe theo mô hình thí nghiệm lún nhanh
I-FIT	: Illinois flexibility index test/Thí nghiệm uốn mẫu bán nguyệt bang Illinois
LTOA	: Long-term oven aging/Hoá già dài hạn hỗn hợp asphalt

MEPD	: Mechanistic-empirical pavement design/Thiết kế kết cấu mặt đường theo phương pháp cơ học thực nghiệm
$M_R$	: Resilient modulus/Mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp
N	: Number of observations/Tổng số quan sát (trong phân tích Tukey)
NAPA	: National asphalt pavement association/Hiệp hội mặt đường Asphalt Mỹ
NCS	: Nghiên cứu sinh
NCAT	: National center for asphalt technology/Trung tâm Công nghệ Asphalt Mỹ
NCHRP	: National cooperative highway research program/Chương trình nghiên cứu chiến lược Đường bộ Mỹ
OT	: Overlay test/Thí nghiệm Overlay bang Texas
P-value	: P-value/Giá trị P
PAV	: Pressure ageing vessel/Hoá già dài hạn bitum theo phương pháp bình hóa già áp lực
PG	: Performance grade/Phân cấp bitum
PGH	: Continuous high-temperature performance grade/Cấp PG ở nhiệt độ cao
PGL	: Continuous low-temperature performance grade/Cấp PG ở nhiệt độ thấp
RA	: Recycling agent (rejuvenator)/Phụ gia tái sinh
RAP	: Reclaimed asphalt pavement/Vật liệu mặt đường asphalt cũ
RBR	: Recycled binder ratio/Tỷ lệ bitum tái chế
RTFO	: Rolling thin film oven/Hoá già ngắn hạn bitum theo phương pháp sấy màng mỏng xoay
$RT_{Index}$	: Rutting tolerance index/Chỉ số kháng lún
SARA	: Saturates, aromatics, resins, asphaltenes/Thí nghiệm phân tích SARA
SCB	: Semi-circular bend/Thí nghiệm uốn mẫu bán nguyệt
SEM-EDX	: Scanning electron microscope and energy-dispersive X-ray/Kính hiển vi điện tử quét kết hợp phổ tán xạ năng lượng tia X
STOA	: Short-term aging/Hoá già ngắn hạn hỗn hợp asphalt
TCCS	: Tiêu chuẩn cơ sở
TCVN	: Tiêu chuẩn Việt Nam
TFOT	: Thin film oven test/Phương pháp sấy màng mỏng
$\delta$	: Phase angle/Góc trễ pha

## MỞ ĐẦU

### 1. Đặt vấn đề

Phát triển bền vững trong lĩnh vực xây dựng đã trở thành xu hướng tất yếu, được tập trung nghiên cứu và từng bước áp dụng ở các nước phát triển cũng như ở Việt Nam trong những năm gần đây. Mục tiêu của xu hướng này là hướng tới việc giảm thiểu tác động bất lợi đến môi trường và hạn chế khai thác nguồn tài nguyên không tái tạo nhưng vẫn đảm bảo được nhu cầu phát triển các công trình xây dựng. Trong lĩnh vực xây dựng công trình nói chung và lĩnh vực xây dựng công trình giao thông nói riêng, việc lựa chọn vật liệu mới cũng như tái sử dụng vật liệu thải (các chất thải rắn) là yếu tố quan trọng đáp ứng tiêu chí xây dựng bền vững. Công nghệ bê tông asphalt tái chế là công nghệ sử dụng vật liệu từ mặt đường asphalt cũ (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) được cào bóc sau khi đã hết tuổi thọ khai thác, có bổ sung thêm cốt liệu mới và bitum mới (**Hình 0.1**). Với công nghệ tái sử dụng lại vật liệu RAP sẽ giảm thiểu việc sử dụng nguồn tài nguyên không tái tạo (cốt liệu và bitum dầu mỏ), tiết kiệm được chi phí xây dựng mặt đường, đem lại hiệu quả về kinh tế, kỹ thuật và môi trường [114], [134].



**Hình 0.1. Chu trình tuổi thọ của mặt đường [114] (a) Chu trình vòng đời tái sử dụng sau khi mặt đường hư hỏng, (b) Cào bóc vật liệu mặt đường asphalt cũ**

Tại Hội nghị thượng đỉnh thế giới về chống biến đổi khí hậu (26<sup>th</sup> Conference of the

Parties – COP 26) [46], Việt Nam đã cam kết thực hiện giảm phát thải cacbon bằng cách thực hiện các giải pháp trong tất cả các lĩnh vực. Một trong những giải pháp được đưa ra để thực hiện đó là sản xuất, chế tạo và tái sử dụng vật liệu xây dựng hướng tới phát triển bền vững. Theo Quy hoạch mạng lưới đường bộ giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn đến 2050 [7], nước ta sẽ có khoảng 9014 km đường cao tốc, khoảng 29795 km đường Quốc lộ và sẽ có khoảng trên 120 triệu tấn bê tông asphalt được sử dụng. Nếu lấy chu kỳ phải sửa chữa thay thế bằng mặt đường bê tông asphalt mới là 10 năm thì mỗi năm sẽ có khoảng 12 triệu tấn bê tông asphalt từ mặt đường cũ phải cào bóc. Như vậy, tiềm năng nguồn RAP là rất lớn trong giai đoạn hiện nay và tương lai. Tuy nhiên, hầu hết vật liệu RAP ở Việt Nam vẫn chưa được sử dụng có hiệu quả. Bên cạnh đó, nguồn cốt liệu và bitum dầu mỏ làm vật liệu chế tạo bê tông asphalt ngày càng bị giới hạn. Do vậy, việc nghiên cứu tái sử dụng RAP để chế tạo bê tông asphalt tái chế nóng, đặc biệt với hàm lượng RAP cao (lớn hơn 25%) là cần thiết ở Việt Nam. Kết quả nghiên cứu của Luận án góp phần thực hiện giảm phát thải khí gây hiệu ứng nhà kính, qua đó hiện thực hóa cam kết tại COP26 về việc đưa phát thải ròng về zero vào năm 2050.

Mặc dù lợi ích khi sử dụng RAP trong hỗn hợp asphalt tái chế đã được chứng minh, nhưng cũng tồn tại một số hạn chế khi gia tăng sử dụng RAP trong hỗn hợp. Sản phẩm sử dụng hỗn hợp asphalt tái chế với hàm lượng RAP cao thường cứng và giòn hơn so với sử dụng hỗn hợp asphalt truyền thống. Hỗn hợp này thường khó đầm nén ngoài hiện trường, dễ bị nứt, gia tăng mức độ lão hoá theo thời gian, và các đặc tính độ bền thường khác so với hỗn hợp asphalt không có RAP [4], [68]. Vì vậy, phụ gia tái sinh thường được sử dụng để khôi phục đặc tính lưu biến của bitum trong RAP (bitum RAP) và cải thiện tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế. Hiệu quả của phụ gia tái sinh phụ thuộc vào một số yếu tố, như loại và hàm lượng phụ gia tái sinh, nguồn gốc và hàm lượng RAP, cấp của bitum mới, nhiệt độ và thời gian trộn hỗn hợp [67]. Ngoài yêu cầu về hàm lượng, loại phụ gia tái sinh khác nhau sẽ có những thay đổi lưu biến khác nhau khi hoá già, và do đó, khi một loại phụ gia tái sinh được đưa vào hỗn hợp tái chế, các tính năng dài hạn của hỗn hợp cũng cần phải đáp ứng được yêu cầu.

Việc gia tăng hàm lượng RAP sử dụng trong công nghệ bê tông asphalt tái chế là một xu hướng tất yếu nhằm tối ưu hóa tài nguyên, giảm chi phí và hướng đến phát triển bền

vững ở Việt Nam. Tuy nhiên, hiện nay RAP vẫn chưa được sử dụng rộng rãi do chưa có nhiều kinh nghiệm trong quản lý vật liệu RAP, lựa chọn phụ gia tái sinh, cũng như đánh giá hiệu quả dài hạn của hỗn hợp. Để có thể tối đa hóa việc sử dụng RAP vào hỗn hợp asphalt tái chế nóng cũng như kiểm soát và quản lý chất lượng hỗn hợp, việc nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến các tính năng của hỗn hợp là cần thiết nhằm nâng cao chất lượng của mặt đường asphalt. Trên cơ sở đó, có thể đưa ra kết luận chính xác về hiệu quả của phụ gia tái sinh khi xét đến cả điều kiện khai thác ngắn hạn và dài hạn của mặt đường sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng.

## **2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu**

### **2.1. Mục tiêu nghiên cứu**

Luận án tập trung giải quyết ba mục tiêu chính, bao gồm:

- Đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng;
- Đánh giá ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến một số tính chất của bitum và các tính năng ngắn hạn, dài hạn của bê tông asphalt tái chế nóng;
- Dự báo các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường mềm sử dụng lớp bê tông asphalt tái chế nóng.

### **2.2. Nội dung nghiên cứu**

Nội dung nghiên cứu của Luận án bao gồm các vấn đề sau:

- Thực nghiệm xác định một số tính chất vật lý (độ kim lún, nhiệt độ hóa mềm) và đặc tính lưu biến (mô đun cắt động  $|G^*|$ ,  $G^*/\sin\delta$  và  $G^*\sin\delta$ ) của bitum RAP, bitum mới và bitum hỗn hợp (có phụ gia tái sinh);
- Thực nghiệm phân tích thành phần hóa học của bitum mới, bitum RAP và bitum hỗn hợp;
- Thực nghiệm đánh giá các tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh, bao gồm: sức kháng hằn lún vệt bánh xe (HWTT, IDEAL-RT), sức kháng nứt (IDEAL-CT), mô đun động ( $|E^*|$ ), mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp ( $M_R$ ). Các tính năng có xét đến ảnh hưởng của điều kiện hoá già ngắn hạn và dài hạn;

- Dự báo các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng theo phương pháp cơ học thực nghiệm (Mechanistic-Empirical Pavement Design, MEPD), sử dụng phần mềm AASHTOWare®.

### **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

#### **3.1. Đối tượng nghiên cứu**

- Vật liệu RAP và hỗn hợp asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP cao;
- Thành phần hóa học, một số tính chất vật lý và cơ học của bitum RAP, bitum mới và bitum hỗn hợp (có phụ gia tái sinh);
- Các tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh;
- Kết cấu mặt đường sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng.

#### **3.2. Phạm vi nghiên cứu**

Nghiên cứu thiết kế, chế tạo và đánh giá tính năng của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP cao (hàm lượng RAP sử dụng từ 30 – 50% theo khối lượng hỗn hợp asphalt) sử dụng ba loại phụ gia tái sinh (gốc dầu mỏ – RA1, gốc dầu thực vật – RA2 và gốc dầu đậu nành – RA3) trong phòng thí nghiệm.

### **4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

#### **4.1. Ý nghĩa khoa học**

- Thông qua thí nghiệm phân tích thành phần hóa học của một số loại bitum cũng như thực nghiệm đánh giá các tính chất của bitum và tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng, kết quả nghiên cứu của Luận án đã chứng minh được hiệu quả của một số loại phụ gia tái sinh.

- Kết quả nghiên cứu của Luận án đã làm rõ được cơ chế tương tác giữa phụ gia tái sinh với bitum RAP và bitum mới.

#### **4.2. Ý nghĩa thực tiễn**

- Kết quả nghiên cứu của Luận án là tài liệu tham khảo hữu ích cho các cơ sở giáo dục Đại học trong giảng dạy và nghiên cứu, các đơn vị quản lý, các doanh nghiệp tư vấn thiết kế, đơn vị sản xuất và thi công mặt đường bê tông asphalt. Từ đó góp phần mang

lại hiệu quả về mặt kinh tế, xã hội, và môi trường do tận dụng có hiệu quả nguồn vật liệu RAP.

○ Kết quả nghiên cứu của Luận án góp phần cải thiện chất lượng hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP cao khi ứng dụng ở Việt Nam.

## **CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU RAP VÀ PHỤ GIA TÁI SINH DÙNG TRONG BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG**

Chương Tổng quan của Luận án tập trung tìm hiểu các vấn đề liên quan đến vật liệu RAP và phụ gia tái sinh dùng cho bê tông asphalt tái chế nóng với hàm lượng RAP cao, sự lão hóa của bitum và hỗn hợp asphalt khi trải qua quá trình hóa già, phương pháp thiết kế thành phần bê tông asphalt tái chế nóng. Bên cạnh đó, các nghiên cứu trên thế giới về ảnh hưởng của hàm lượng RAP và phụ gia tái sinh đến các tính chất của bitum và tính năng của bê tông asphalt tái chế cũng được phân tích và tổng hợp. Từ các kiến thức tìm hiểu được, phương pháp, nội dung và hướng nghiên cứu của Luận án sẽ được làm rõ.

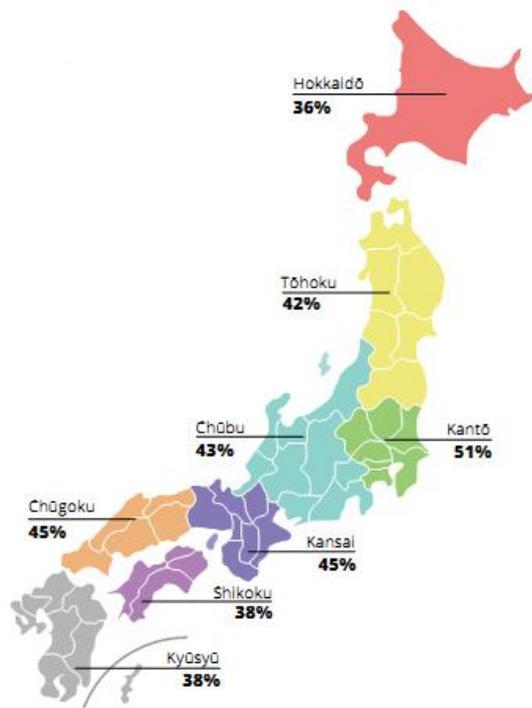
### **1.1. Tổng quan về vật liệu RAP**

#### **1.1.1. Tình hình sử dụng vật liệu RAP trên thế giới và Việt Nam**

Hiện nay, xu hướng sử dụng RAP để sản xuất bê tông asphalt tái chế đang ngày càng phổ biến trên thế giới. Một lượng đáng kể vật liệu tái chế này đã được sử dụng để sản xuất hỗn hợp asphalt nóng (Hot Mix Asphalt - HMA) và hỗn hợp asphalt ấm (Warm Mix Asphalt - WMA). Hỗn hợp asphalt tái chế có hàm lượng RAP từ 15-20% theo khối lượng là phổ biến và được ứng dụng rộng rãi hiện nay [112]. Với tỷ lệ này vẫn đang có những hạn chế nhất định và nhiều nghiên cứu vẫn đang tiếp tục được tiến hành để có thể gia tăng hàm lượng RAP sử dụng lên 50% hoặc cao hơn nhằm đạt được lợi ích kinh tế lớn hơn. Noferini và các cộng sự [92] chỉ ra rằng hỗn hợp asphalt sử dụng với hàm lượng RAP đến 20% không có sự thay đổi về các đặc tính và độ bền so với hỗn hợp asphalt không sử dụng RAP, nhưng khi hàm lượng RAP lớn hơn 25%, các tính năng đã có sự thay đổi theo hướng gia tăng độ cứng và làm giảm khả năng kháng nứt của hỗn hợp, ảnh hưởng đến khả năng khai thác của mặt đường.

Với những lợi ích đạt được từ việc sử dụng RAP, công nghệ bê tông asphalt tái chế nóng (RAP-HMA) ở Nhật Bản đã được áp dụng từ năm 1970 [33], [118]. Do hạn chế nguồn cốt liệu thô và thiếu không gian để xử lý chất thải, nên Nhật Bản đã thúc đẩy tìm kiếm các giải pháp bền vững để tối đa hóa việc bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và giảm thiểu

chất thải. Dự thảo về sử dụng RAP trong xây dựng mặt đường đã được ban hành vào năm 1984 và được áp dụng cho các dự án nhỏ. Kết quả thử nghiệm cho thấy các tính năng của bê tông asphalt tái chế với hàm lượng RAP thấp ( $\leq 25\%$ ) tương đương với bê tông asphalt truyền thống. Phần lớn vật liệu RAP được sử dụng trong hỗn hợp HMA hoặc WMA và chỉ lượng nhỏ RAP được sử dụng trong lớp móng (base). Dự thảo này tiếp tục được sửa đổi và bổ sung vào năm 2004 và năm 2010 đã đưa vào áp dụng công nghệ HMA-RAP với hàm lượng RAP cao. Từ năm 2013, công nghệ RAP-HMA với hàm lượng RAP cao đã được áp dụng phổ biến ở nhiều nơi tại Nhật Bản (**Hình 1.1**) [70]. Chỉ sau hai năm, đến năm 2015, khoảng 99% khối lượng RAP trong tổng khối lượng đã được tái sử dụng.



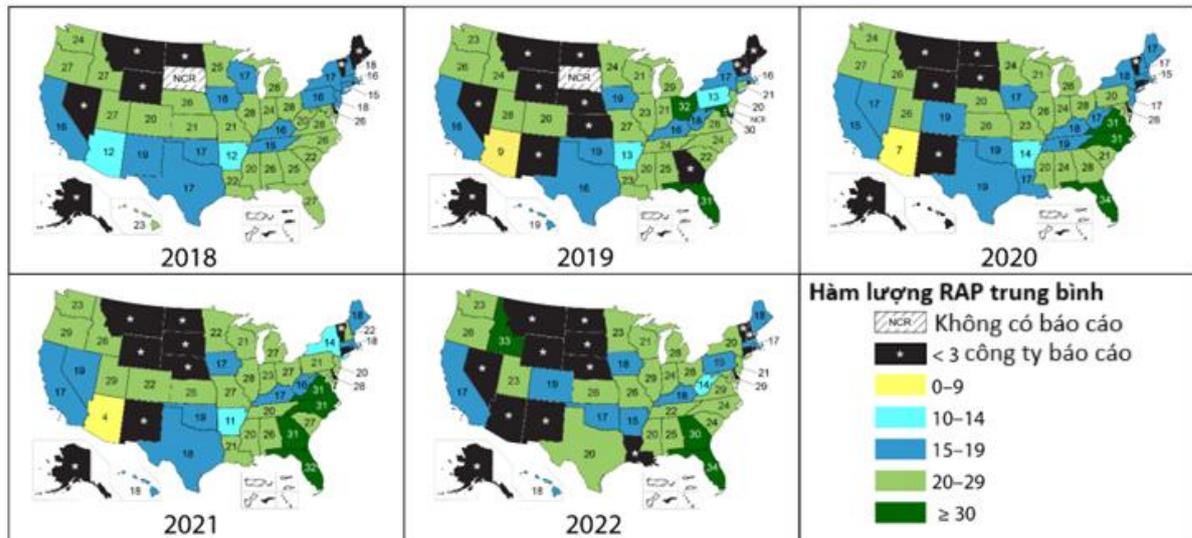
**Hình 1.1. Tỷ lệ RAP trung bình được sử dụng trong hỗn hợp asphalt tái chế ở Nhật Bản [70]**

Tương tự như Nhật Bản, theo báo cáo của Hiệp hội mặt đường Asphalt Mỹ (NAPA) chỉ ra rằng, 100% khối lượng RAP đã được tái sử dụng vào năm 2022, ở hầu hết các Bang của Mỹ [60]. Trong đó, khoảng 98,1% khối lượng RAP được tái sử dụng để chế tạo hỗn hợp HMA và WMA, trong khi khoảng 1,9% được tái sử dụng làm vật liệu trong các ứng dụng khác. Giới hạn hàm lượng RAP được phép sử dụng ở Mỹ dựa vào lớp mặt đường

thiết kế và lưu lượng giao thông [109]. Một số Bang đưa ra giới hạn hàm lượng RAP được sử dụng trong hỗn hợp để các tính năng của bê tông asphalt tái chế thỏa mãn yêu cầu nhằm đảm bảo chất lượng và tuổi thọ khai thác của mặt đường (**Bảng 1.1**). Theo Cục quản lý Đường bộ liên Bang Mỹ (FHWA), hỗn hợp asphalt tái chế có hàm lượng RAP trên 25% theo khối lượng được coi là hỗn hợp có hàm lượng RAP cao [56]. **Hình 1.2** thể hiện hàm lượng RAP được sử dụng trong hỗn hợp HMA/WMA ở mỗi Bang của Mỹ [60].

**Bảng 1.1. Phạm vi sử dụng RAP ở Mỹ [109]**

TT	Bang	Giới hạn RAP	Lớp mặt đường	Lưu lượng giao thông (ESALs)	Cấp bitum mới
1	Indiana	Max 15% Max 25%	Lớp mặt Lớp khác	$\geq 3 \times 10^6$ -	Theo MS-2
2	Iowa	Max 15% Max 10%	Lớp mặt Lớp mặt	Tất cả các mức $\leq 3 \times 10^5$	Cấp PG thấp hơn nếu hàm lượng RAP > 20%
3	Nebraska	Max 35% Max 25% Max 15%	-	$< 3 \times 10^5$ $3 \times 10^5$ tới $1 \times 10^7$ $1 \times 10^7$ tới $3 \times 10^7$	Cấp PG thấp hơn nếu hàm lượng RAP > 35%
4	Wisconsin	Max 25%	Lớp mặt	-	Không thay đổi cấp PG
5	Missouri	Lên đến 100%	-	-	Hàm lượng RAP > 30%, cấp PG như bitum mới
6	Kansas	Lên đến 100%	-	-	-
7	Ohio	Max 15% Max 20% Max 25% 40-45%	Lớp mặt trên Lớp mặt trên Lớp mặt trên Lớp mặt dưới và lớp móng	Giao thông nặng Giao thông trung bình Giao thông nhẹ -	-



**Hình 1.2. Số lượng các bang ở Mỹ sử dụng các hàm lượng RAP khác nhau trong hỗn hợp HMA/WMA giai đoạn 2018–2022 [60]**

Theo Copeland [47], trong số bốn loại chi phí để sản xuất hỗn hợp bê tông asphalt bao gồm chi phí về vật liệu, sản xuất, vận chuyển và thi công thì chi phí về vật liệu là cao nhất, chiếm 70% giá thành hỗn hợp bê tông asphalt. Do vậy, việc sử dụng một lượng lớn vật liệu RAP đã làm đáng kể giá thành bê tông asphalt ở Mỹ. Zaumanis và các cộng sự [132] chỉ ra rằng chi phí cho mỗi tấn hỗn hợp bê tông asphalt tái chế sử dụng 100% RAP đã giảm từ 50% đến 70% so với hỗn hợp asphalt đối chứng không sử dụng RAP.

Ở Châu Âu, công nghệ bê tông asphalt tái chế cũng đã phát triển nhanh chóng. Đức là quốc gia đầu tiên sử dụng vật liệu RAP vào hỗn hợp asphalt tái chế. Pháp và Phần Lan sử dụng vật liệu RAP cho các tuyến đường có lưu lượng giao thông thấp và từ năm 2000, RAP cũng được sử dụng cho mặt đường cấp cao [109]. Theo hiệp hội mặt đường Asphalt Châu Âu (EAPA), các Quốc gia châu Âu cũng chủ yếu sử dụng RAP để sản xuất hỗn hợp HMA và WMA [50]. Mục tiêu hiện tại của EAPA là sử dụng RAP với tỷ lệ trên 50% trong hỗn hợp HMA [43]. Hàm lượng RAP sử dụng cho phép là 30% đối với lớp mặt dưới [50]. Đối với lớp mặt trên, hàm lượng RAP được phép sử dụng là 20% mà không cần thay đổi cấp bitum mới [80]. Ở Anh, Cơ quan đường cao tốc cho phép hàm lượng RAP được sử dụng lên đến 30% cho các lớp bê tông asphalt [109].

Tại Nga, các quy định về sử dụng RAP lần đầu tiên xuất hiện vào năm 2016. Năm 2020, hai tiêu chuẩn ГОСТ P 59118.1-2020 [146] và ГОСТ P 59118.2-2020 [147] quy định

về các yêu cầu kỹ thuật của vật liệu RAP và phương pháp thiết kế thành phần bê tông asphalt tái chế nóng đã được ban hành. Hàm lượng RAP được sử dụng dựa trên tính đồng nhất của RAP, loại bitum sử dụng và yêu cầu lớp kết mặt đường. Hỗn hợp asphalt tái chế có hàm lượng RAP từ 10% đến 30% được sử dụng cho lớp mặt trên và từ 20% đến 40% cho lớp mặt dưới. Hàm lượng RAP lên đến 60% có thể được sử dụng khi có phụ gia tái sinh và đồng thời đảm bảo các tính năng của hỗn hợp.

Ở New Zealand và Úc, việc sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng với hàm lượng RAP từ 15% đến 20% cho các lớp mặt đã phổ biến [9]. Hàm lượng RAP cao hơn 30% có thể được cho phép sử dụng, tuy nhiên cần chứng minh quá trình sản xuất phù hợp và tuân thủ quy trình kiểm soát chất lượng.

Chính quyền các Bang quản lý đường cao tốc ở Ấn Độ đã ban hành quy định kỹ thuật để thúc đẩy việc sử dụng vật liệu RAP. Năm 2015, tiêu chuẩn IRC-120 đã ban hành và khuyến cáo việc sử dụng RAP cho công nghệ tái chế nóng và tái chế nguội [59]. Hàm lượng RAP tối đa trong hỗn hợp có thể lên đến 50%, tuy nhiên hàm lượng RAP đến 30% được sử dụng phổ biến. Nghiên cứu chỉ ra rằng, sử dụng 30% RAP trong hỗn hợp asphalt không làm ảnh hưởng đến các tính năng và chất lượng mặt đường [109].

Ở Trung Quốc, khối lượng vật liệu RAP hàng năm lên tới 220 triệu tấn, nhưng mức độ sử dụng để sản xuất bê tông asphalt tái chế vẫn còn hạn chế vì những lo ngại liên quan đến kiểm soát chất lượng vật liệu RAP [137]. Năm 2019, chỉ dẫn kỹ thuật cho mặt đường sử dụng bê tông asphalt tái chế (JTG/T5521 [64]) đã được ban hành, trong đó yêu cầu hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng trên 30%RAP cần phải được kiểm tra/đánh giá trước khi dùng làm lớp mặt. Hiện nay, tiêu chuẩn DB11/T2073 [49] quy định về các yêu cầu kỹ thuật cho công nghệ bê tông asphalt tái chế nóng tại trạm đã được ban hành năm 2022, và mục tiêu của Trung Quốc là tiếp tục gia tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp asphalt tái chế.

Năm 2009, hàm lượng RAP đến 40% đã được sử dụng trong hỗn hợp tái chế nóng tại Nam Phi. Đến năm 2019, hàm lượng RAP 40% đã trở nên phổ biến ở quốc gia này [78].

Đối với nước ta hiện nay, vật liệu RAP vẫn chưa được sử dụng có hiệu quả do chưa có hệ thống quản lý và thu gom trong quá trình cào bóc mặt đường asphalt cũ cũng như

chưa có nhiều kinh nghiệm trong sản xuất bê tông asphalt tái chế nóng. Phần lớn vật liệu RAP đã được sử dụng trong công nghệ tái chế nguội tại chỗ theo các phương pháp khác nhau để ứng dụng làm lớp móng đường ô tô [13], [14], [15]. Công nghệ này đã được áp dụng thử nghiệm tại một số dự án ở Việt Nam như Quốc lộ 1A (đoạn Km1941+100 – Km1941+600 tỉnh Long An) và Quốc lộ 5 (đoạn Km76 – Km82, Hà Nội đi Hải Phòng) sử dụng nhũ tương và xi măng, Quốc lộ 1A (Quận 12, Thành phố Hồ Chí Minh) và Quốc lộ 5 (Km82 – Km94) sử dụng bitum bột và xi măng v.v. Năm 2023, vật liệu RAP cũng được áp dụng thử nghiệm cho công nghệ tái chế nguội tại trạm trộn cố định sử dụng nhũ tương và xi măng. Ứng dụng thử nghiệm vật liệu RAP cho công nghệ bê tông asphalt tái chế ấm đã được thực hiện bởi nhóm nghiên cứu của tác giả Đào Văn Đông và các cộng sự năm 2020 ở Quốc lộ 51 (Biên Hòa, Đồng Nai) [2]. Đối với bê tông asphalt tái chế nóng sử dụng RAP, công nghệ này cũng đã được áp dụng thử nghiệm tại Quốc lộ 51 bởi Công ty Cổ phần Đầu tư xây dựng BMT vào năm 2022 [1]. Với các nghiên cứu thử nghiệm này, Bộ Khoa học và Công nghệ đã ban hành các tiêu chuẩn kỹ thuật thi công và nghiệm thu lớp mặt đường sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng với các hàm lượng RAP thấp hơn 25% và từ 25% đến 50% (TCVN 13567-4:2024 [17] và TCVN 13567-6:2025 [18]). Do vậy, đây là tiền đề quan trọng để có thể sử dụng vật liệu RAP phổ biến và hiệu quả hơn trong tương lai, mang lại nhiều lợi ích về kỹ thuật, kinh tế và môi trường.

### **1.1.2. Những khó khăn khi gia tăng hàm lượng RAP trong hỗn hợp asphalt**

Một số rủi ro có thể xuất hiện khi gia tăng hàm lượng RAP trong hỗn hợp asphalt liên quan đến quản lý chất lượng vật liệu RAP, công nghệ sản xuất tại trạm trộn, phương pháp thiết kế hỗn hợp và các tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng RAP.

#### ***1.1.2.1. Chất lượng và tính đồng nhất của vật liệu RAP***

Khi sử dụng hàm lượng RAP cao, hỗn hợp asphalt thường có nguy cơ kém đồng nhất [73]. Để kiểm soát vấn đề này, chất lượng và tính đồng nhất của vật liệu RAP cần được đánh giá trước khi thiết kế bao gồm hàm lượng bitum trong RAP, thành phần hạt, hàm lượng hạt mịn, độ ẩm v.v. Do vậy, các đặc tính này phải được xét đến trong thiết kế cấp phối và sản xuất bê tông asphalt tái chế để quản lý RAP chính xác.

### ***1.1.2.2. Công nghệ sản xuất tại trạm trộn***

Vật liệu RAP không nên được gia nhiệt cùng với cốt liệu mới vì có thể xuất hiện nhiều khói và mất an toàn. Hơn nữa, RAP không nên được gia nhiệt trực tiếp ở nhiệt độ cao vì sẽ làm gia tăng sự lão hóa của bitum và bitum trong RAP sẽ bị dính vào băng tải. Giải pháp thường được thực hiện là để cốt liệu mới truyền nhiệt gián tiếp đến RAP để đảm bảo nhiệt độ trộn hỗn hợp thích hợp. Vì vậy, hàm lượng RAP không quá 50% có thể phù hợp để sản xuất ở các trạm trộn, trong trường hợp hàm lượng RAP sử dụng lớn hơn 50% thì cần có thiết bị gia nhiệt cho RAP [59].

### ***1.1.2.3. Phương pháp thiết kế hỗn hợp***

Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng, các chỉ tiêu kỹ thuật liên quan đến thiết kế thành phần hỗn hợp asphalt tái chế có hàm lượng RAP thấp là tương đương với hỗn hợp không có RAP [53], [73], [108], [119]. Tuy nhiên, phương pháp thiết kế thành phần cần được điều chỉnh với hỗn hợp asphalt tái chế có hàm lượng RAP cao, cần xét đến các đặc tính của vật liệu RAP như cấp phối cốt liệu RAP, hàm lượng hạt mịn, hàm lượng và tính chất của bitum RAP). Do vậy, việc quản lý vật liệu RAP liên quan chặt chẽ đến hỗn hợp thiết kế vì tính đồng nhất của vật liệu RAP. Sự có mặt của bitum RAP làm thay đổi các đặc tính lưu biến của bitum hỗn hợp (bao gồm bitum mới và bitum RAP) và của hỗn hợp asphalt tái chế. Hầu hết các nghiên cứu hiện nay đều cho rằng bitum cũ trong RAP được trộn lẫn hoàn toàn với bitum mới trong quá trình chế tạo hỗn hợp [56], [60], [141]. Tuy nhiên, một số nghiên cứu khác cho rằng chỉ một phần bitum RAP được trộn lẫn với bitum mới [34], [101]. Do vậy, việc xác định được mức độ trộn lẫn của bitum cũ trong RAP vào bitum mới là một trong những những khó khăn nên xem xét thực hiện đối với hỗn hợp asphalt có hàm lượng RAP cao, vì không có quy trình rõ ràng được xác định [47], [141]. Hơn nữa, để tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp cần bổ sung thêm phụ gia tái sinh để khôi phục các đặc tính của bitum cũ trong RAP [34].

### ***1.1.2.4. Các tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế***

Việc gia tăng hàm lượng RAP làm tăng độ cứng của hỗn hợp bê tông asphalt, do bitum trong RAP đã bị lão hóa do trải qua quá trình hóa già [56], [90]. Khi bitum bị hoá già, nhóm asphalt trong bitum tăng lên trong khi nhóm matenes (nhóm chất dầu, nhóm chất

nhựa và nhóm chất thơm) có xu hướng giảm, làm bitum trở nên cứng hơn [34]. Hỗn hợp asphalt cứng hơn có thể làm giảm khả năng kháng nứt do mỏi, nứt do nhiệt và nứt phản ánh [108]. Ngoài ra, độ nhạy ẩm của hỗn hợp có thể bị ảnh hưởng do sự trộn lẫn không đủ giữa bitum RAP và bitum mới trong quá trình sản xuất [81]. Đối với biến dạng không hồi phục, việc sử dụng bitum mới mềm hơn và phụ gia tái sinh có thể ảnh hưởng đến khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe [108], [141]. Do đó, quá trình thiết kế hỗn hợp asphalt cần lựa chọn giá trị tối ưu hàm lượng phụ gia tái sinh để đạt được mục tiêu giảm độ cứng nhưng vẫn đảm bảo khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe [56], [131].

### **1.1.3. Các nghiên cứu về ảnh hưởng của RAP đến các tính năng của bê tông asphalt tái chế**

Khi sử dụng với hàm lượng RAP thấp, từ 10% đến 20%, các tính năng của bê tông asphalt tái chế sử dụng RAP có sự khác biệt không đáng kể so với hỗn hợp không có RAP. Do đó, sự có mặt của RAP có thể coi như có ảnh hưởng không đáng kể đến chất lượng của bê tông asphalt [74], [92], [102]. Tuy nhiên, hỗn hợp asphalt tái chế với hàm lượng RAP cao thường có độ cứng cao, dẫn đến khả năng kháng nứt thấp nếu không thực hiện các điều chỉnh trong thiết kế hỗn hợp. Ngược lại, hỗn hợp asphalt tái chế thể hiện khả năng kháng hằn lún tốt hơn, nhưng điều này có thể bị giảm nếu sử dụng phụ gia tái sinh vượt quá hàm lượng [102], [128]. Do vậy, thiết kế hỗn hợp chính xác và thí nghiệm các tính năng có thể giúp kiểm tra/kiểm soát chất lượng hỗn hợp asphalt tái chế.

Sondag và các cộng sự [111] đã nghiên cứu ảnh hưởng của RAP đến tính năng của hỗn hợp RAP-HMA. Kết quả chỉ ra rằng hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng 40%RAP dẫn đến độ cứng của hỗn hợp tăng lên 74%. Hơn nữa, nguồn RAP khác nhau cũng dẫn đến những thay đổi về độ cứng khác nhau. Ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế cũng được chỉ ra trong báo cáo NCHRP 09-46 [90]. Kết quả chỉ ra rằng mô đun động  $|E^*|$  (thí nghiệm theo tiêu chuẩn AASHTO TP62) của bê tông asphalt tái chế bị ảnh hưởng đáng kể bởi hàm lượng RAP và nguồn vật liệu RAP. Để phân tích ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến tính năng của hỗn hợp tái chế, Izaks và các cộng sự [61] đã sử dụng thí nghiệm mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp ( $M_R$ ) để đánh giá độ cứng của các hỗn hợp bao gồm hỗn hợp đối chứng, hỗn hợp tái chế sử dụng 30%RAP và 50%RAP. Hỗn hợp đối chứng sử dụng bitum mác 50/70, trong khi hỗn hợp tái chế

sử dụng bitum mác 70/100. Kết quả cho thấy hỗn hợp sử dụng 30% RAP có độ cứng thấp hơn so với hỗn hợp đối chứng, nhưng độ cứng của hỗn hợp sử dụng 50% RAP là cao nhất. Việc sử dụng bitum mềm hơn làm giảm độ cứng khi hàm lượng RAP được sử dụng tới 30%. Độ cứng cao sẽ cải thiện khả năng kháng hằn lún của mặt đường, tuy nhiên lại giảm khả năng xuất hiện vết nứt [80], [108].

Kết quả nghiên cứu liên quan đến khả năng kháng nứt mỏi cho thấy có sự giảm độ bền mỏi của hỗn hợp asphalt có chứa RAP [61], [73], [90]. Kết quả nghiên cứu của Izaks và các cộng sự chỉ ra rằng hỗn hợp asphalt tái chế với 50% RAP dễ bị nứt mỏi hơn, ngay cả khi độ cứng tương tự như với hỗn hợp asphalt không có RAP [61]. Kết quả này có thể dự đoán việc sử dụng bitum mềm hơn đã làm giảm độ cứng của hỗn hợp tái chế nhưng không cải thiện được độ bền mỏi.

Đối với biến dạng không hồi phục, các nghiên cứu chỉ ra rằng hỗn hợp asphalt tái chế có khả năng kháng hằn lún tốt hơn so với hỗn hợp không có RAP [61], [119]. Dự án NCHRP 09-46 cũng đã đánh giá khả năng kháng biến dạng không hồi phục, sử dụng thí nghiệm hằn lún vết bánh xe [90]. Tuy nhiên, kết luận chỉ ra rằng độ nhạy hằn lún vết bánh xe chủ yếu phụ thuộc vào nguồn vật liệu và cấp PG của bitum mới, không bị ảnh hưởng nhiều bởi hàm lượng RAP.

Các nghiên cứu của Lee và các cộng sự [73], Izaks và các cộng sự [61] đã sử dụng thí nghiệm hằn lún vết bánh xe để đánh giá khả năng kháng hằn lún của bê tông asphalt. Trong nghiên cứu của Izaks và các cộng sự, chiều sâu hằn lún trung bình lớn nhất với hỗn hợp không có RAP. Hỗn hợp sử dụng 30%RAP cho sức kháng hằn lún cao nhất. Nói chung, độ nhạy biến dạng có thể chấp nhận được đối với tất cả các hỗn hợp tái chế, nghĩa là hàm lượng RAP không ảnh hưởng đáng kể đến khả năng kháng hằn lún vết bánh xe [61]. Tuy nhiên, nghiên cứu của Lee và các cộng sự [73] chỉ ra rằng độ sâu vết hằn bánh xe giảm khi hàm lượng RAP tăng lên.

Mogawer và các cộng sự [81] tiến hành nghiên cứu về ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến các tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng. Nghiên cứu cho thấy độ cứng hỗn hợp tăng lên khi hàm lượng RAP lớn hơn 30%. Ngược lại, hỗn hợp sử dụng 20%RAP có độ cứng thấp hơn so với hỗn hợp đối chứng sử dụng cốt liệu mới. Về đánh giá khả năng kháng nứt, khi hàm lượng RAP tăng dẫn đến tuổi thọ mỏi thấp hơn theo thí nghiệm

Overlay Test (tiêu chuẩn Tex-248-F [113]). Việc sử dụng bitum mềm hơn làm giảm độ cứng của hỗn hợp tái chế. Hỗn hợp asphalt tái chế cho thấy khả năng kháng hằn lún tăng lên khi gia tăng hàm lượng RAP trong hỗn hợp.

Nhìn chung, các nghiên cứu đều chỉ ra rằng khi sử dụng RAP, độ cứng của bê tông asphalt tái chế có xu hướng tăng lên. Điều này có thể cải thiện được khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe, nhưng lại dẫn đến tuổi thọ mỏi và khả năng kháng nứt thấp hơn. Như vậy, hàm lượng RAP đưa vào hỗn hợp bê tông tái chế cần phải đảm bảo cân bằng giữa khả năng kháng nứt và khả năng kháng hằn lún. Nội dung nghiên cứu của Luận án cũng sẽ tập trung vào đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng RAP sử dụng đến các tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng. Đồng thời, ảnh hưởng của quá trình hóa già dài hạn đến các tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng cũng được xét đến trong nghiên cứu.

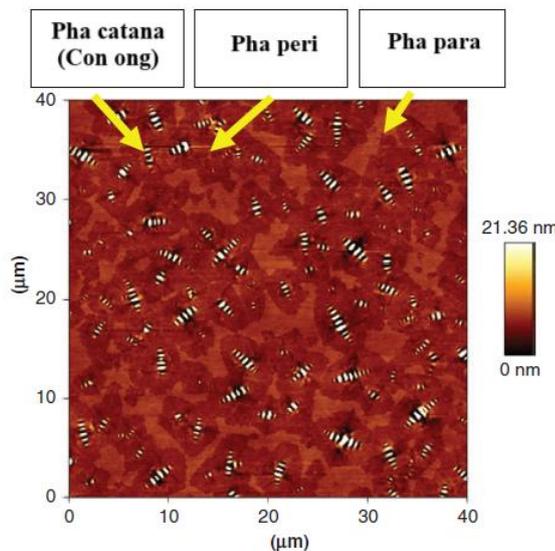
## **1.2. Tổng quan sự hóa già của bitum và hỗn hợp asphalt**

### **1.2.1. Thành phần hóa học và cấu trúc của bitum**

Bitum (sản phẩm từ quá trình chưng cất dầu mỏ) là một hỗn hợp phức tạp của các hợp chất hydro cacbon và một số dẫn xuất phi kim loại khác. Thành phần hóa học của bitum rất phức tạp, bao gồm cacbon (82-88%), lưu huỳnh (0-6%), ni tơ (0,5-1%), hydro (8-11%), oxy (0-1,5%) và một số nguyên tố khác [6], [110]. Thông thường, bitum được chia thành hai nhóm hóa học rộng là nhóm asphalt và nhóm maltene. Nhóm maltene có thể được chia nhỏ hơn thành ba nhóm, bao gồm nhóm chất bão hòa (saturates), nhóm chất thơm (aromatics) và nhóm chất nhựa (resins). Hiện nay, kỹ thuật sắc ký là phương pháp thường được sử dụng để xác định thành phần các nhóm chất trong bitum (còn được gọi là phân tích SARA). Nhóm chất bão hòa (5-15% theo khối lượng bitum) bao gồm các hydro cacbon mạch thẳng và mạch nhánh, là một chất lỏng trong suốt, có trọng lượng phân tử trung bình. Nhóm chất thơm (40-65%) là một chất lỏng màu vàng - đỏ, bao gồm các hợp chất thơm naphthenic có trọng lượng phân tử thấp nhất và chiếm tỷ lệ chính trong môi trường phân tán. Nhóm chất nhựa (30-45%) là một chất rắn/bán rắn màu nâu sẫm, trọng lượng phân tử trung bình, có bản chất phân cực và kết dính mạnh. Nhóm asphalt (5-25%) là một loại chất rắn màu đen với trọng lượng phân tử cao. Hàm lượng nhóm asphalt có tác động đáng kể đến các đặc tính lưu biến của bitum. Khi hàm lượng nhóm asphalt tăng, bitum trở nên cứng hơn và có độ nhớt cao hơn [75], [110].

Cấu trúc bitum có thể coi là một hệ keo phức tạp bao gồm các mixen asphalt (micelle) có trọng lượng phân tử cao được phân tán vào trong môi trường chất dầu có trọng lượng phân tử thấp hơn (nhóm maltene) [6], [110]. Các mixen asphalt bao quanh bởi một lớp chất nhựa/chất thơm hoạt động như một chất ổn định. Xa khỏi tâm của mixen, có một sự chuyển đổi dần sang các loại chất nhựa/thơm ít phân cực hơn và ra ngoài đến môi trường phân tán là các chất dầu thơm. Tùy theo thành phần các nhóm chất, bitum thể hiện ba ứng xử khác nhau, bao gồm “sol” (nhớt), “sol-gel” (đàn nhớt) và “gel” (đàn hồi). Khi hàm lượng nhóm chất thơm/chất nhựa lớn, các mixen asphalt có thể chuyển động tự do trong môi trường dầu, được đặc trưng bởi cấu trúc “sol”. Nếu hàm lượng nhóm chất thơm/chất nhựa thấp, các mixen asphalt thường có xu hướng liên kết lại với nhau, đặc trưng bởi cấu trúc “gel”.

Các phương pháp thí nghiệm được sử dụng để phân tích cấu trúc vi mô của bitum, bao gồm thí nghiệm kính hiển vi lực nguyên tử (AFM), kính hiển vi điện tử quét (SEM), kính hiển vi huỳnh quang, tia X v.v. Hiện nay, thiết bị kính hiển vi lực nguyên tử thường được sử dụng để phân tích. Trong một cấu trúc vi mô điển hình của bitum thu được từ thí nghiệm AFM, ba thành phần chính được quan sát thấy, bao gồm pha catana (catana-phase) còn được gọi là cấu trúc “con ong”, pha peri (peri-phase) bao quanh những “con ong” và pha para (para-phase) bên cạnh pha peri (**Hình 1.3**) [97]. Quá trình hoá già và trẻ hóa bitum đều liên quan đến cấu trúc “con ong”. Hầu hết các nghiên cứu chỉ ra rằng, sự xuất hiện của cấu trúc “con ong” là do hàm lượng nhóm asphalt [71], [76].



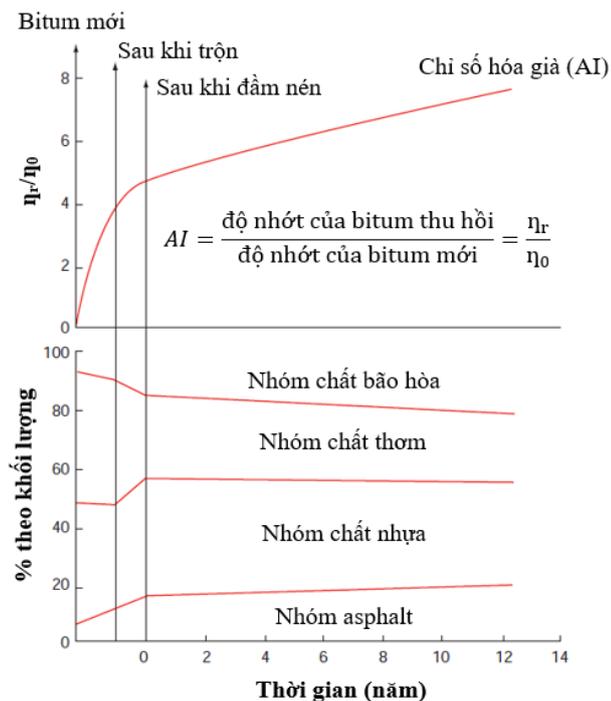
**Hình 1.3. Cấu trúc vi mô của bitum [97]**

### 1.2.2. Hóa già bitum

Hóa già (lão hóa) bitum xảy ra do những thay đổi thành phần hóa học, dẫn đến sự thay đổi các tính chất của bitum. Bitum bị hóa già thường trải qua quá trình hóa già ngắn hạn và hóa già dài hạn. Hóa già ngắn hạn xảy ra trong quá trình sản xuất hỗn hợp HMA (bao gồm quá trình trộn, vận chuyển, thi công và đầm nén hỗn hợp), do nhiệt độ sản xuất hỗn hợp cao (thường lớn hơn 150°C), trong khi hóa già dài hạn xảy ra trong quá trình khai thác mặt đường [110]. Cơ chế chính của quá trình hóa già là do sự bay hơi các thành phần có trọng lượng phân tử thấp (chất dễ bay hơi) và sự oxy hóa làm thay đổi thành phần các nhóm chất trong bitum. Sự oxy hóa và bay hơi các chất dễ bay hơi xuất hiện trong quá trình sản xuất và thi công hỗn hợp HMA. Tuy nhiên, khi hỗn hợp đạt đến nhiệt độ không khí, quá trình bay hơi ít xảy ra trong khi quá trình oxy hóa vẫn tiếp tục xảy ra. Vì vậy, quá trình oxy hóa được coi là quá trình chính trong quá trình lão hóa bitum.

#### 1.2.2.1. Sự thay đổi thành phần hóa học của bitum do quá trình hóa già

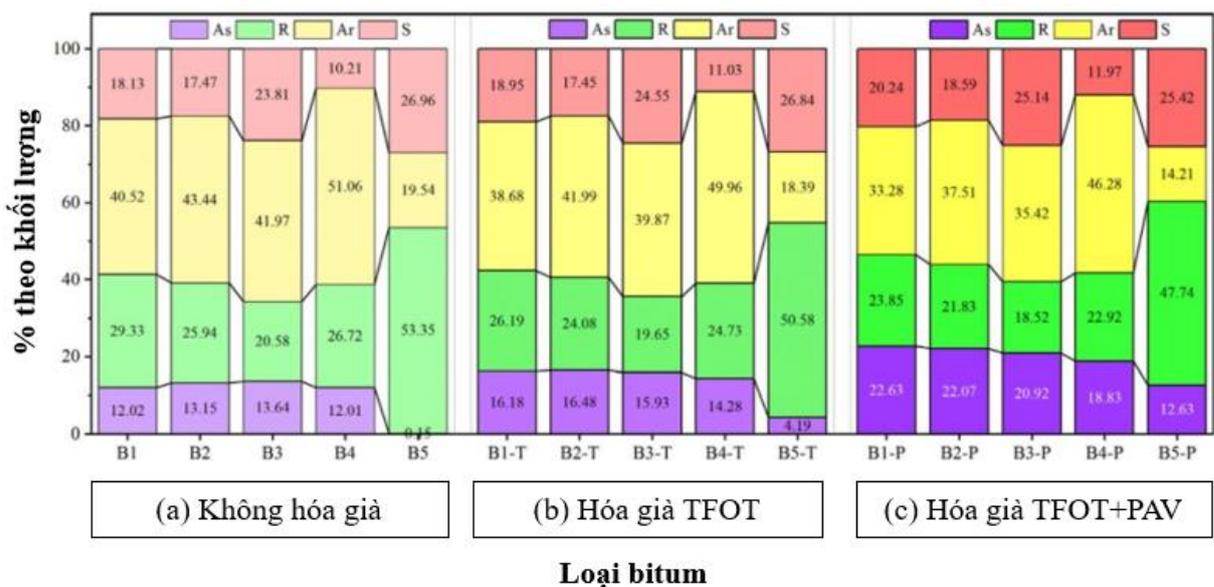
Về thành phần hóa học, Airey và các cộng sự [32] đã chỉ ra sự thay đổi thành phần các nhóm chất của bitum khi hóa già. Nghiên cứu kết luận rằng, khi bitum bị hóa già, hàm lượng nhóm asphalt tăng lên và hàm lượng nhóm chất thơm giảm đi theo thời gian. Các yếu tố này làm tăng độ nhớt của bitum và do đó làm bitum trở nên cứng hơn.



Hình 1.4. Sự thay đổi về thành phần hóa học của bitum khi hóa già [110]

Sự thay đổi chỉ số hóa già thông qua giá trị độ nhớt và thành phần hóa học của bitum ở các điều kiện hóa già được thể hiện ở **Hình 1.4** [110]. Trong nghiên cứu này, hàm lượng nhóm asphalt tăng, trong khi hàm lượng nhóm chất nhựa và nhóm chất thơm có xu hướng giảm theo thời gian. Hàm lượng nhóm chất bão hòa cho thấy có xu hướng tăng theo thời gian.

Li và các cộng sự [75] cũng đã đánh giá sự thay đổi của các nhóm chất trong bitum do hoá già bằng thí nghiệm phân tích SARA (Saturate - Aromatic - Resin – Asphalt) với năm loại bitum khác nhau (ký hiệu từ B1 đến B5). **Hình 1.5** thể hiện sự thay đổi về nhóm chất bão hòa, nhóm chất thơm, nhóm chất nhựa và nhóm asphalt của bitum ở điều kiện không hóa già, hóa già ngắn hạn bằng phương pháp sấy màng mỏng TFOT (T) và hóa già dài hạn TFOT+PAV (P). Dựa trên kết quả phân tích SARA cho thấy, sự hoá già làm thay đổi thành phần các nhóm chất trong bitum. Nhóm chất bão hòa hầu như không thay đổi (giảm hoặc tăng nhẹ). Nhóm chất thơm và nhóm chất nhựa, khi bị oxy hóa lần lượt chuyển thành nhóm chất nhựa và nhóm asphalt. Từ nhóm chất thơm chuyển thành nhóm chất nhựa, do vậy, hàm lượng nhóm chất thơm giảm khi trải qua quá trình hoá già. Hàm lượng nhóm chất nhựa tăng hoặc giảm nhẹ do có sự dịch chuyển của nhóm chất nhựa bị oxy hóa thành nhóm asphalt và của nhóm chất thơm bị oxy hóa thành nhóm chất nhựa. Hàm lượng nhóm asphalt tăng khi bitum trải qua quá trình hóa già.

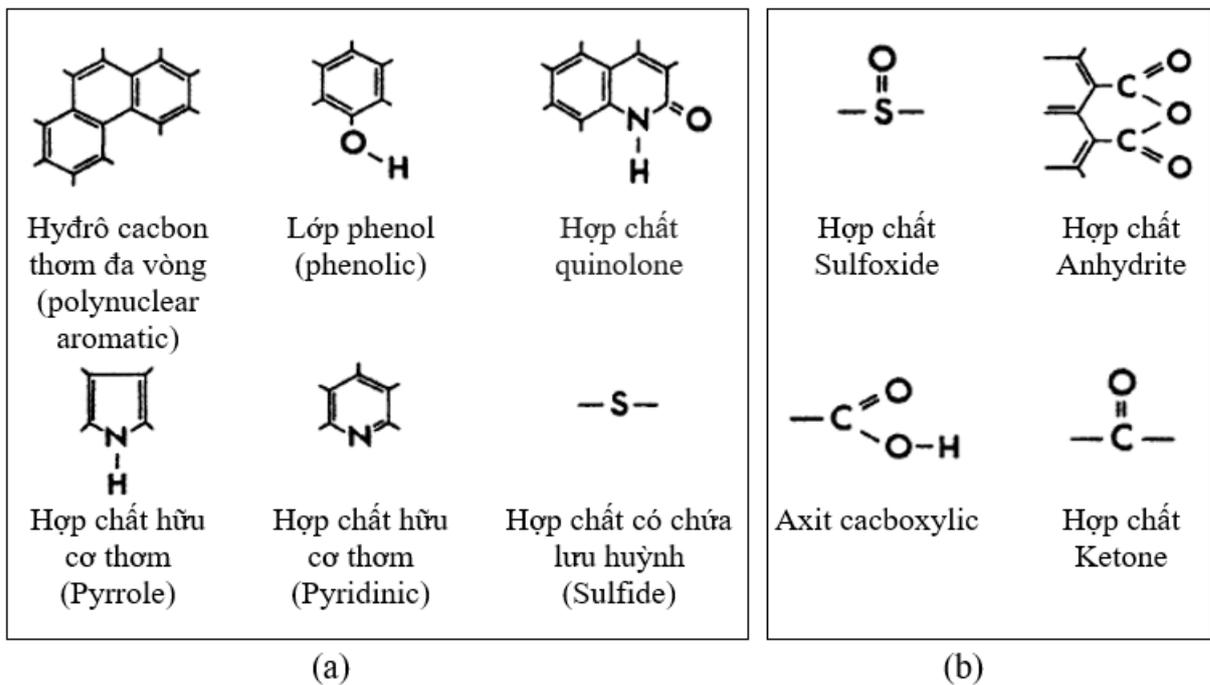


**Hình 1.5. Tỷ lệ các nhóm chất trong bitum khi hoá già [75]**

(As: Asphalt, R: Resin, Ar: Aromatic, S: Saturate)

Corbett và Merz [48] chỉ ra rằng, khi trải qua quá trình hóa già, thành phần hóa học của bitum thay đổi theo một mô hình tương tự nhau, trong đó nhóm chất thơm chuyển thành nhóm chất nhựa, sau đó tạo thành nhóm asphalt. Nhóm chất bão hòa về cơ bản vẫn không thay đổi hoặc thay đổi nhẹ do có phản ứng hóa học thấp. Các thay đổi hóa học trong quá trình lão hóa đối với các loại bitum khác nhau là khác nhau, chịu ảnh hưởng bởi công nghệ sản xuất và các nguồn dầu thô khác nhau.

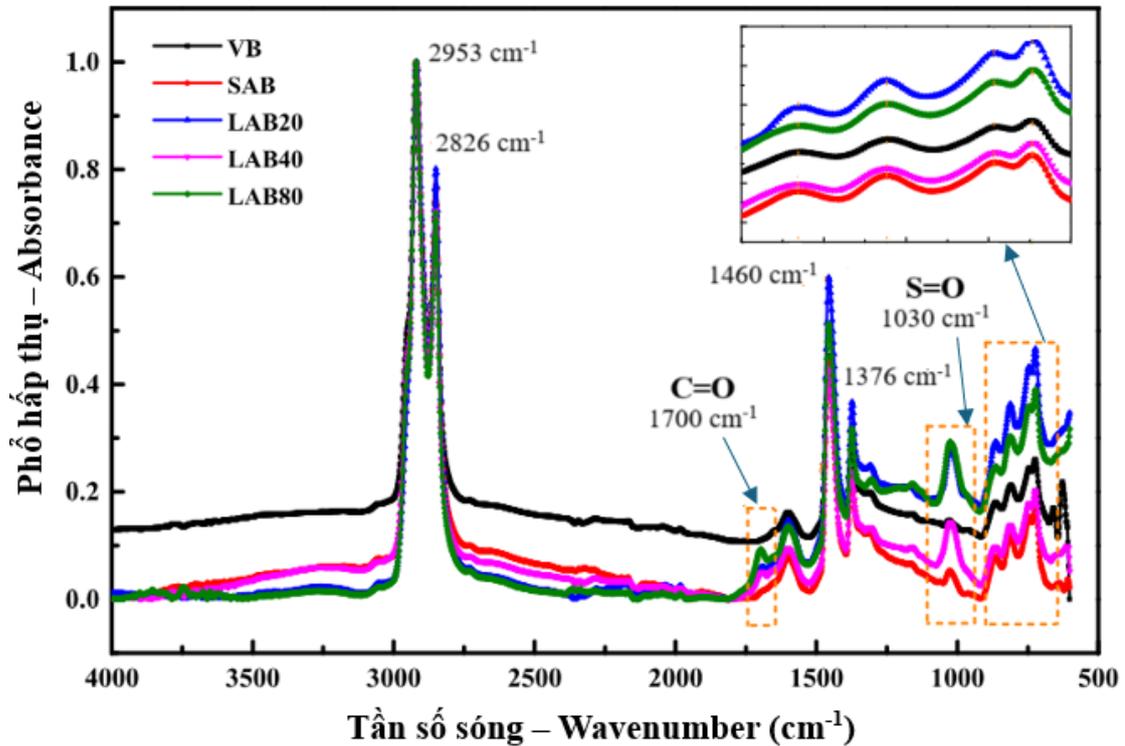
Trong thành phần hóa học của bitum, bên trong bốn nhóm chất lớn (nhóm chất dầu, nhóm chất nhựa, nhóm chất thơm và nhóm chất bão hòa) lại chứa các hợp chất phân tử (molecules) khác nhau. Công thức cấu tạo cho các hợp chất phân tử chính của bitum được thể hiện trong **Hình 1.6a**. Theo quan điểm hóa học, quá trình hóa già bitum là do sự oxy hóa, oxy trong không khí tiếp xúc với bitum theo thời gian, do đó tạo ra các nhóm carbonyl (liên kết C=O) và nhóm sulfoxide (liên kết S=O) (**Hình 1.6b**), làm thay đổi thành phần hóa học, dẫn đến bitum trở nên giòn hơn [79], [99]. Do vậy, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để đánh giá mức độ hoá già của bitum, bằng cách đo sự thay đổi liên kết C=O và S=O sử dụng thí nghiệm FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) [62], [79], [104], [105].



**Hình 1.6. Các nhóm chức hóa học**

(a) tồn tại trong bitum mới và (b) hình thành trong quá trình oxy hóa [99]

Ren và các cộng sự [105] đã thực hiện thí nghiệm phân tích quang phổ hồng ngoại (FTIR) đối với bitum mới (VB), bitum hóa già ngắn hạn TFOT (SAB) và bitum trải qua đồng thời quá trình hóa già ngắn hạn TFOT và hóa già dài hạn PAV sau 20, 40 và 80 giờ (LAB20, LAB40 và LAB80) [105]. Kết quả cho thấy, phổ hấp thụ đạt đỉnh tại một số tần số sóng 2953, 2862, 1700, 1600, 1460, 1376, 1030, 864, 814 và 743  $\text{cm}^{-1}$  (Hình 1.7). Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, trong quá trình lão hóa, phổ hấp thụ tại tần số sóng 1700 và 1030  $\text{cm}^{-1}$  tăng lên đáng kể. Điều này cho thấy hàm lượng nhóm chức hóa học cacbonyl (liên kết C=O) và nhóm sulfoxide (liên kết S=O) trong bitum tăng lên khi trải qua quá trình hóa già.



Hình 1.7. Phân tích FTIR cho bitum mới và bitum hóa già [105]

### 1.2.2.2. Phương pháp hóa già bitum trong phòng thí nghiệm

Bằng cách đẩy nhanh quá trình oxy hóa có thể thúc đẩy sự hoá già, và phương pháp này được áp dụng trong phòng thí nghiệm để mô phỏng quá trình hoá già của bitum tại hiện trường. Do đó, các biện pháp như tăng nhiệt độ, tăng diện tích bề mặt của bitum tiếp xúc với không khí, giảm độ dày màng bitum, tăng áp suất là các kỹ thuật được sử dụng trong phòng thí nghiệm để tăng tốc quá trình hoá già. Phương pháp sấy màng mỏng (TFOT) và phương pháp sấy màng mỏng xoay (RTFO) thường được sử dụng để mô phỏng điều

kiện hoá già ngắn hạn của bitum trong phòng thí nghiệm theo TCVN 11711:2017 [11] (hoặc ASTM D1754 [36]) và TCVN 11710:2017 [10] (hoặc AASHTO T240 [29]). Hoá già dài hạn được thực hiện theo phương pháp hóa già nhanh bằng bình áp lực (PAV) để mô phỏng quá trình bitum bị oxy hóa, theo tiêu chuẩn AASHTO R28 [25].

### 1.2.3. Hóa già hỗn hợp asphalt

Một số quy trình hoá già trong phòng thí nghiệm đã được nghiên cứu và thực hiện để mô phỏng sự hoá già hỗn hợp asphalt. Các quy trình hoá già này có thể được phân loại dựa trên trạng thái vật liệu trong quá trình hoá già bao gồm hoá già trên hỗn hợp rời hay hóa già trên mẫu bê tông asphalt đã đầm nén (**Hình 1.8**).



**Hình 1.8. Phương pháp hoá già dài hạn hỗn hợp asphalt [107]**

*(a) Hóa già trên hỗn hợp rời và (b) hóa già trên mẫu đã đầm nén*

Theo AASHTO R30 [26], hỗn hợp asphalt rời được đặt vào 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), xảy ra trong quá trình sản xuất và vận chuyển hỗn hợp asphalt. Đối với hoá già dài hạn (long term oven aging - LTOA), hỗn hợp sau khi đã được hoá già ngắn hạn, tiến hành đầm nén để tạo mẫu và sau đó được đưa vào tủ sấy trong 5 ngày ở  $85^\circ\text{C}$  để mô phỏng sự hoá già từ 5 đến 10 năm ngoài hiện trường. Tuy nhiên, một số nghiên cứu 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 [51], [107]. Lý do được đưa ra là quy trình này chỉ áp dụng một giá trị nhiệt độ và thời gian hoá già duy nhất để mô phỏng 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 và không xét đến độ rỗng dư, dẫn đến sự không chính xác khi đánh giá các tính năng. Ngoài ra, thời gian 5 ngày ở 85°C là không đủ để mô phỏng sự hoá già dài hạn ở hiện trường. Để giải quyết vấn đề trên, Viện Asphalt Mỹ đã đưa ra quy trình hoá già trên hỗn hợp asphalt rời. Theo quy trình hóa già này, hỗn hợp được đặt vào tủ sấy trong 24 giờ ở 135°C để mô phỏng sự hoá già dài hạn ngoài hiện trường [138]. 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 mô phỏng từ 7 đến 10 năm ngoài hiện trường. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng hoá già bitum ở nhiệt độ lớn hơn 100°C có thể gây ra những thay đổi hóa học trong bitum mà không xuất hiện trong thực tế ngoài hiện trường.

Gần đây, báo cáo của NCHRP 871 [107] đưa ra quy trình hoá già dài hạn cho hỗn hợp asphalt và kết quả cho thấy 95°C là nhiệt độ tối ưu cho điều kiện hoá già dài hạn. 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. Việc sử dụng mẫu hỗn hợp rời tạo ra sự hoá già nhanh hơn so với mẫu được đầm nén. Hoá già ở 95°C cũng làm giảm đáng kể thời gian lão hóa cần thiết so với nhiệt độ 85°C quy định trong AASHTO R30 [26].

### **1.3. Tổng quan về phụ gia tái sinh**

Nứt và hằn lún mặt đường là những dạng hư hỏng thường gặp, ảnh hưởng đến chất lượng của mặt đường bê tông asphalt. Hư hỏng do nứt càng trở nên nghiêm trọng với hỗn hợp asphalt tái chế có hàm lượng RAP cao do bitum cũ trong RAP bị hoá già. Do đó, hỗn hợp asphalt tái chế với hàm lượng RAP cao dễ bị nứt mỏi (nứt ở nhiệt độ trung bình), nứt do nhiệt (nứt ở nhiệt độ thấp) và nứt khối trong quá trình khai thác mặt đường [69]. Để hạn chế những nguy cơ trên, các nghiên cứu gần đây tập trung vào việc sử dụng các loại phụ gia tái sinh cho hỗn hợp asphalt tái chế với hàm lượng RAP cao. Một số nghiên cứu đã chỉ ra hiệu quả của việc sử dụng phụ gia tái sinh trong việc cải thiện khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt tái chế bằng cách giảm độ giòn của bitum cũ trong RAP [58], [82], [122], [125]. Hơn nữa, thêm phụ gia tái sinh với hàm lượng thích hợp, các tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế có thể đạt được tương đương với hỗn hợp asphalt không có RAP [58], [87].

Phụ gia tái sinh là sản phẩm có các đặc tính hóa học và vật lý với vai trò khôi phục các

đặc tính lưu biến của bitum cũ bằng cách cải thiện tỷ lệ nhóm asphalt/maltene, giảm kích thước các cụm asphalt và tăng mức độ phân tán của pha maltene. Điều này làm giảm độ nhớt cũng như độ cứng và làm tăng độ dẻo của bitum cũ. Việc sử dụng các loại phụ gia tái sinh trong hỗn hợp asphalt tái chế đạt được những ưu điểm như cải thiện tính công tác, nâng cao chất lượng và mang lại lợi ích kinh tế và môi trường [67]. Theo EAPA, phụ gia tái sinh có tác dụng khôi phục các đặc tính lưu biến của bitum cũ [50]. Nó không thể bổ sung trở lại thành phần hoá học giống như bitum mới, nhưng cải thiện được đặc tính lưu biến để phục hồi các đặc tính cơ học của bitum cũ. Theo báo cáo của NCAT [88], phụ gia tái sinh được phân loại theo các gốc, như dầu parafin (paraffinic oils), chiết xuất thơm (aromatic extracts), dầu gỗ thông (tall oils), dầu naphthenic (naphthenic oils), dầu thực vật (hỗn hợp gồm triglycerides và các axit béo).

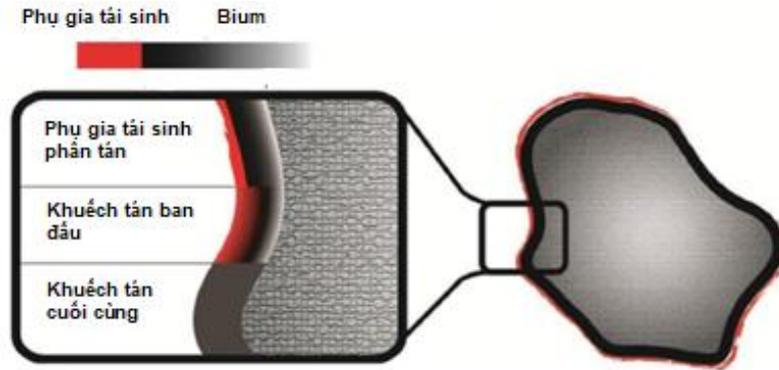
### 1.3.1. Cơ chế trẻ hoá bitum của phụ gia tái sinh

Quá trình lão hóa gây ra những thay đổi về mặt hình thái cấu trúc trong bitum, và có sự thay đổi tỷ lệ giữa pha lỏng (giảm đi do nhóm chất dầu bay hơi) và pha rắn (nhóm asphalt tăng lên), làm gia tăng các sản phẩm dạng keo (cụm asphalt). Quá trình trẻ hóa là quá trình ngược lại của quá trình lão hóa. Quá trình trẻ hóa làm phá vỡ các cụm asphalt và cân bằng lại các thành phần SARA, dẫn đến sự cải thiện các đặc tính lưu biến của bitum [98]. Phụ gia tái sinh có vai trò bổ sung các thành phần dễ bay hơi đã mất và phân chia cụm asphalt thành các hợp chất nhỏ hơn.

Vì vậy, vai trò của phụ gia tái sinh là làm mềm và phục hồi các đặc tính lưu biến của bitum cũ trong vật liệu RAP. Sử dụng phụ gia tái sinh nhằm mục đích bổ sung nhóm maltene, giảm do quá trình oxy hóa, bay hơi hoặc hấp thụ vào các thành phần khác. Cơ chế trẻ hoá bitum của phụ gia tái sinh phụ thuộc chủ yếu vào ba yếu tố chính, bao gồm (1) sự phân tán đồng đều của bitum mới, bitum cũ và phụ gia tái sinh trong hỗn hợp asphalt, (2) sự khuếch tán của phụ gia tái sinh vào bitum RAP, và (3) sự tương thích giữa bitum mới, bitum cũ trong RAP và phụ gia tái sinh [65], [108]. Các giai đoạn khuếch tán được thể hiện ở **Hình 1.9**.

Sự phân tán là sự trộn lẫn do các tác động vật lý và phụ gia tái sinh sẽ được phân tán đồng đều vào hỗn hợp bao gồm bitum mới và bitum RAP, thông qua quá trình trộn cơ học sử dụng thiết bị trộn. Trộn cơ học trong phòng thí nghiệm và tại trạm trộn thường

là đủ để đạt được sự phân tán đồng đều phụ gia tái sinh vào trong hỗn hợp, và mức độ phân tán là một hàm của thời gian trộn, khi thời gian trộn càng dài, sự phân tán sẽ càng tốt [86].



**Hình 1.9. Cơ chế trẻ hoá bitum của phụ gia tái sinh [65]**

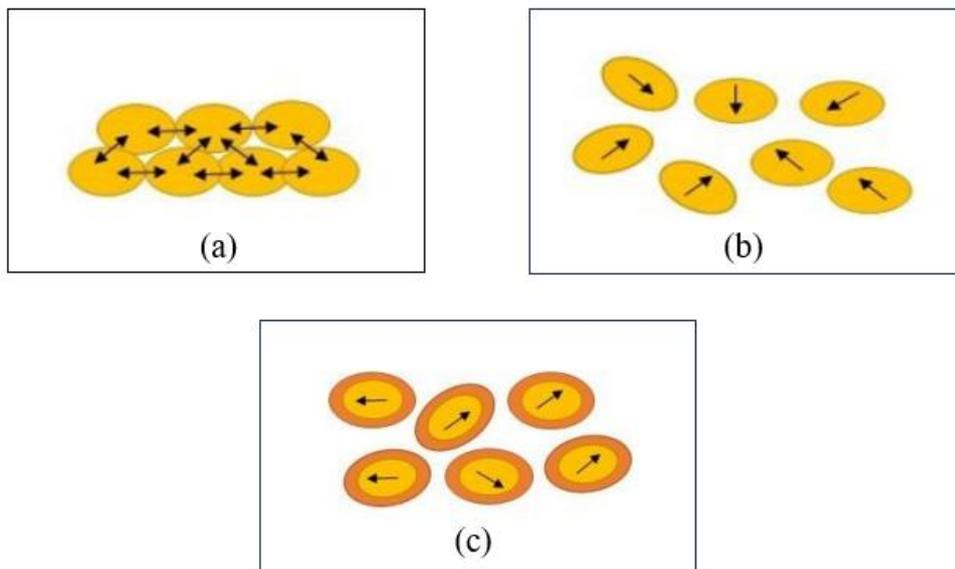
Sự khuếch tán là quá trình mà một thành phần di chuyển từ nồng độ cao hơn đến nồng độ thấp hơn. Ban đầu, phụ gia tái sinh tiếp xúc với RAP tạo thành một lớp màng mỏng có độ nhớt rất thấp bao quanh bitum cũ đang bao phủ các hạt cốt liệu RAP. Sau đó, phụ gia tái sinh bắt đầu khuếch tán vào lớp ngoài bitum cũ và bắt đầu làm mềm bitum cũ. Theo thời gian, sự khuếch tán của phụ gia tái sinh vào bitum cũ tiếp tục xảy ra, có sự giảm độ nhớt của lớp bên trong và tăng độ nhớt của lớp ngoài bề mặt hạt cốt liệu RAP.

Fusong và các cộng sự [55] chỉ ra rằng tốc độ khuếch tán có thể được gia tăng khi tăng nhiệt độ trộn và nhiệt độ đầm nén. Thêm phụ gia tái sinh ở nhiệt độ phòng sẽ làm chậm sự khuếch tán hơn so với việc thêm các phụ gia tái sinh vào bitum mới và/hoặc vật liệu RAP ở nhiệt độ cao. Ngoài ra, quá trình khuếch tán bị ảnh hưởng bởi loại và hàm lượng phụ gia tái sinh và các đặc tính lưu biến của bitum RAP. Bên cạnh đó, phương pháp thêm phụ gia tái sinh vào hỗn hợp asphalt tái chế cũng có ảnh hưởng đến sự khuếch tán, và hiệu quả của phụ gia tái sinh trong hỗn hợp asphalt.

Zaumanis và các cộng sự [132] cũng nhấn mạnh rằng sự khuếch tán không hoàn toàn của phụ gia tái sinh vào bitum RAP có thể dẫn đến hỗn hợp xuất hiện nứt nhanh hơn. Nếu phụ gia tái sinh không khuếch tán hoàn toàn vào bitum RAP, một phần của bitum RAP không được trẻ hóa, có thể làm giảm hàm lượng bitum thiết kế trong hỗn hợp và dẫn đến hỗn hợp trở nên cứng, giòn và tăng nguy cơ xuất hiện các vết nứt trên mặt đường.

Hiệu quả của phụ gia tái sinh phụ thuộc vào cả hai quá trình, gồm quá trình phân tán và khuếch tán, và khả năng tương thích với bitum cũ. Các phụ gia tái sinh phải khuếch tán vào bitum mới và bitum RAP sau khi được thêm vào. Tính đồng nhất của bitum hỗn hợp là một tham số quan trọng, nếu phụ gia tái sinh không được phân bố đều, hỗn hợp có thể có sức kháng hằn lún thấp ở nhiệt độ cao, khả năng kháng nứt kém ở nhiệt độ thấp và độ nhạy ẩm thấp. Tùy thuộc vào mỗi loại phụ gia tái sinh khác nhau, có những loại phụ gia tái sinh khuếch tán tốt khi được trộn trực tiếp với vật liệu RAP, so với việc thêm phụ gia tái sinh vào bitum mới, tuy nhiên phụ gia tái sinh phải được phân tán đồng đều trên bề mặt vật liệu RAP [58].

Cơ chế vật lý liên quan đến quá trình trẻ hóa bitum RAP của phụ gia tái sinh cũng được giải thích bởi Weezenbeek (**Hình 1.10**) [116]. **Hình 1.10a** thể hiện trạng thái của bitum RAP ở điều kiện nhiệt độ thường, ở đó các mixen asphalt có độ phân cực cao và liên kết chặt chẽ với nhau. Khi ở nhiệt độ cao, các liên kết này bị phá vỡ và các mixen có xu hướng tách ra (**Hình 1.10b**). Phụ gia tái sinh được thêm vào để làm giảm các hiệu ứng phân cực của mixen bằng cách cản trở sự hình thành các liên kết phân cực giữa các mixen và do đó cải thiện tính dẻo của bitum (**Hình 1.10c**).



**Hình 1.10. Giải thích quá trình trẻ hóa bitum RAP của phụ gia tái sinh theo cơ chế vật lý [116]**

*(a) liên kết giữa các mixen trong bitum RAP, (b) liên kết bị phá vỡ và (c) cản trở sự hình thành các liên kết bởi lớp màng phụ gia tái sinh*

### 1.3.2. Hàm lượng phụ gia tái sinh

Zaumanis và các cộng sự [133] kết luận rằng các phụ gia tái sinh gốc thực vật (như dầu thực vật thải, dầu hữu cơ, dầu đậu nành và dầu gỗ thông chưng cất) yêu cầu hàm lượng thấp hơn nhiều so với các sản phẩm dựa trên gốc dầu mỏ (chiết xuất thơm và dầu động cơ thải) để đạt được cấp PG tương tự (giảm PG của hỗn hợp bitum). Osmari và các cộng sự [96] cũng báo cáo rằng dầu ăn thải và dầu thàu dầu yêu cầu hàm lượng thấp hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ để mang lại hiệu quả tương tự đối với độ nhớt của bitum cũ. Kết luận tương tự đã được báo cáo bởi Kaseer và các cộng sự [66], trong đó dầu gỗ thông, dầu thực vật và dầu gốc sinh học yêu cầu hàm lượng thấp hơn để giảm cấp PG ở nhiệt độ cao (PGH) của bitum hỗn hợp so với các sản phẩm làm từ dầu mỏ (chiết xuất thơm). Nabizadeh và các cộng sự [85] so sánh hiệu quả của ba loại phụ gia tái sinh (chiết xuất thơm, dầu gỗ thông, và dầu đậu nành) về tính năng của hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng 65% RAP. Các tác giả chỉ ra rằng chiết xuất thơm có hiệu quả hơn trong việc giảm độ cứng và tăng khả năng kháng nứt so với phụ gia tái sinh khác, thông qua thí nghiệm mô đun đàn hồi động và các thí nghiệm nứt trên mẫu bán nguyệt.

Hàm lượng phụ gia tái sinh nên được lựa chọn dựa trên cân bằng các tính năng của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nhằm mục đích cải thiện khả năng kháng nứt mà không ảnh hưởng đến khả năng kháng hằn lún. Đối với một loại phụ gia tái sinh và vật liệu RAP cụ thể, một hàm lượng thấp có thể làm giảm độ cứng và độ giòn của bitum RAP, nhưng có thể không có hiệu quả đáng kể trong việc cải thiện khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt. Ngược lại, hàm lượng phụ gia tái sinh vượt quá, có thể cải thiện đáng kể khả năng kháng nứt, nhưng làm giảm khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe của bê tông asphalt tái chế. Khi hàm lượng phụ gia tái sinh vượt quá cũng có thể gây ra các vấn đề như khả năng dính bám kém [135].

Hàm lượng phụ gia tái sinh cũng có thể ảnh hưởng đến các thay đổi về lưu biến và thành phần hóa học của các hỗn hợp bitum sau khi hóa già dài hạn [122], [126]. Do đó, cần lựa chọn đúng hàm lượng phụ gia tái sinh để tối ưu hóa các đặc tính. Thông thường, hàm lượng phụ gia tái sinh được chọn dựa trên kinh nghiệm hoặc khuyến cáo của nhà sản xuất. Tuy nhiên, hàm lượng cho một loại phụ gia tái sinh cụ thể không thể tương tự như đối với các hỗn hợp có các loại và hàm lượng RAP khác nhau, bởi vì các yếu tố như

nguồn gốc và cấp bitum mới, mức độ lão hóa của vật liệu tái chế và tỷ lệ RAP trong hỗn hợp cũng có ảnh hưởng [35].

Để xác định hàm lượng phụ gia tái sinh, phương pháp pha trộn giữa bitum mới, bitum cũ trong RAP và phụ gia tái sinh để tạo thành bitum hỗn hợp, sau đó tiến hành đánh giá. Một số nghiên cứu đã sử dụng biểu đồ pha trộn dựa trên độ nhớt và/hoặc độ kim lún của bitum hỗn hợp với các hàm lượng phụ gia tái sinh khác nhau để lựa chọn hàm lượng [10], [19], [25], [31]. Koudelka và các cộng sự [72] đưa ra cách tiếp cận xác định hàm lượng phụ gia tái sinh dựa trên thí nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum. Trong nghiên cứu này, hàm lượng phụ gia tái sinh cần thiết để phục hồi giá trị độ kim lún được xác định đầu tiên và sau đó, giá trị nhiệt độ hoá mềm tối thiểu sẽ được kiểm tra. Hiệu quả làm mềm của phụ gia tái sinh cũng được thực hiện bởi Zaumanis và các cộng sự [133] dựa trên thí nghiệm độ kim lún. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng tất cả các loại phụ gia tái sinh làm tăng độ kim lún của bitum hỗn hợp để đạt được giá trị độ kim lún mục tiêu như bitum mới. Phụ gia tái sinh gốc dầu hữu cơ yêu cầu hàm lượng thấp hơn để mang lại tác dụng tương tự so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (chiết xuất thơm). Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng tương quan giữa giá trị độ kim lún và hàm lượng phụ gia tái sinh dạng hàm số mũ là phù hợp hơn so với các nghiên cứu khác cho rằng có sự thay đổi tuyến tính giữa giá trị độ kim lún và hàm lượng phụ gia tái sinh.

Các nghiên cứu gần đây đã dựa vào cấp PG để xác định hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu, trong đó hàm lượng tối thiểu có thể được xác định để đảm bảo đủ khả năng kháng nứt ở nhiệt độ thấp (PG ở nhiệt độ thấp - PGL) và kháng nứt do mỏi ở nhiệt độ trung bình (PG ở nhiệt độ trung bình - PGI), trong khi hàm lượng tối đa để đảm bảo kháng hần lún (PG ở nhiệt độ cao - PGH) [87], [132], [139]. Tran và các cộng sự [87], Zaumanis và các cộng sự [133] báo cáo rằng, có sự giảm tuyến tính trong cả PGH và PGL khi tăng hàm lượng phụ gia tái sinh. Arámbula-Mercado và các cộng sự [35] cũng chỉ ra quy luật tuyến tính giữa hàm lượng phụ gia tái sinh với cả giá trị PGH và PGL.

Zhou và các cộng sự [143] nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia tái sinh gốc sinh học (từ dầu thực vật) đến cấp PG ở nhiệt độ cao và PG nhiệt độ thấp của các mẫu bitum hỗn hợp (bitum mới, bitum RAP và phụ gia tái sinh). Hàm lượng phụ gia tái sinh được tính theo tổng khối lượng bitum. Kết quả chỉ ra rằng việc bổ sung phụ gia tái sinh gốc sinh

học làm giảm cả PG ở nhiệt độ cao và PG ở nhiệt độ thấp của bitum hỗn hợp.

Như vậy, dựa trên các phân tích trên, có thể kết luận rằng hàm lượng phụ gia tái sinh nên được lựa chọn sao cho bitum hỗn hợp đạt được các chỉ tiêu tương tự như bitum mới. Đồng thời, hàm lượng phụ gia tái sinh cần đảm bảo cân bằng giữa khả năng kháng hàn lún và khả năng kháng nứt của hỗn hợp. Sử dụng hàm lượng thấp có thể không hiệu quả trong việc khôi phục bitum cũ về đặc tính lưu biến và đặc tính hỗn hợp ở nhiệt độ trung bình và nhiệt độ thấp, trong khi sử dụng hàm lượng cao có thể gây bất lợi cho các tính năng hỗn hợp ở nhiệt độ cao.

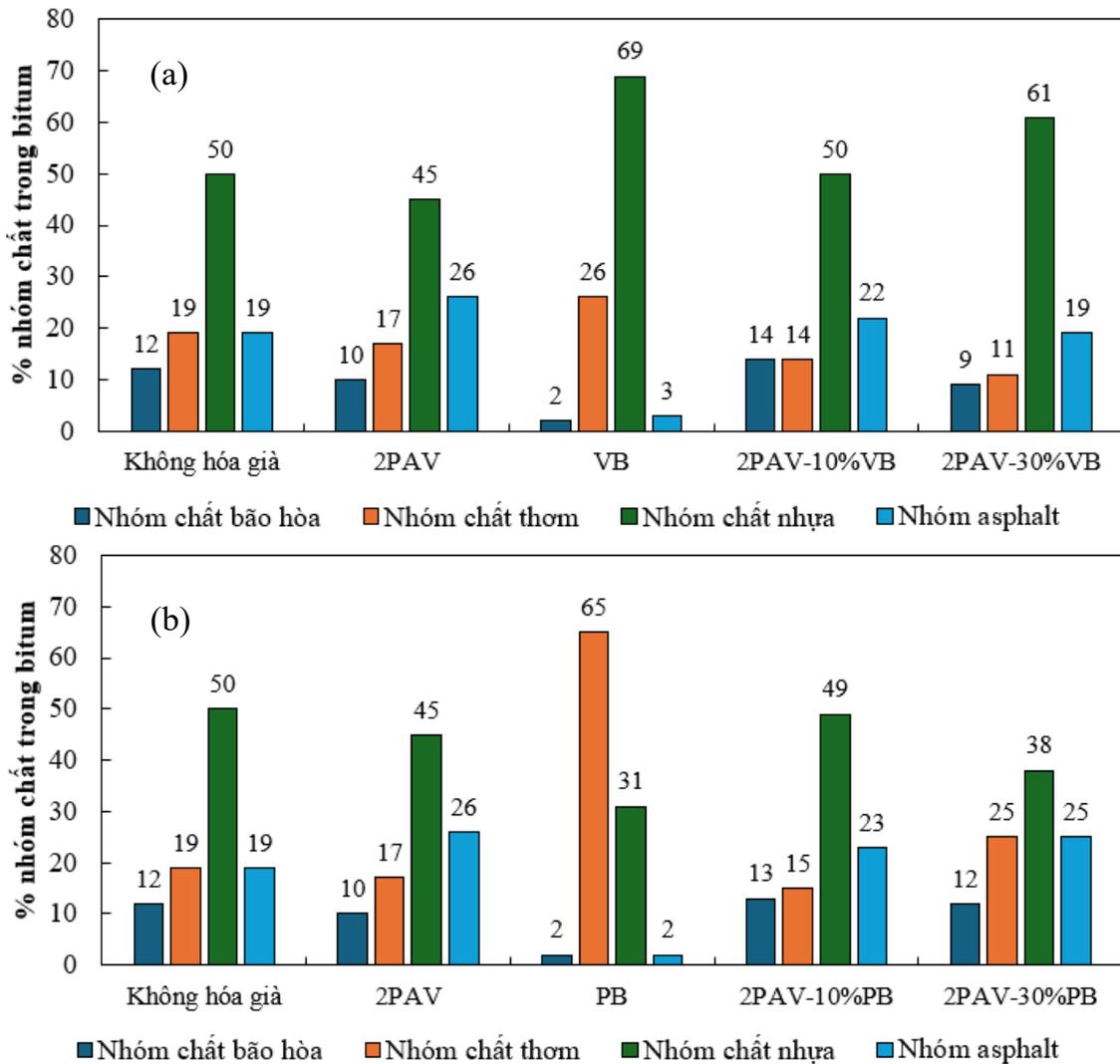
### **1.3.3. Các nghiên cứu về ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến các tính chất của bitum và tính năng của bê tông asphalt**

Loại và hàm lượng phụ gia tái sinh, tính chất của bitum mới và bitum RAP, nhiệt độ trộn và phương pháp trộn phụ gia tái sinh có ảnh hưởng đến hiệu quả của phụ gia tái sinh trong việc khôi phục đặc tính lưu biến bitum cũ và trong hỗn hợp asphalt. Nếu một loại phụ gia tái sinh được thêm vào với hàm lượng thích hợp, ở nhiệt độ thích hợp và ở đủ khoảng thời gian trộn, hỗn hợp sẽ đạt được các tính năng theo yêu cầu. Ngược lại, nếu hàm lượng phụ gia tái sinh không đạt được sự pha trộn cân bằng và sự trộn lẫn là không đủ, phụ gia tái sinh có thể ảnh hưởng xấu đến tính năng của hỗn hợp tái chế.

#### ***1.3.3.1. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến thành phần hóa học và cấu trúc của bitum***

Thông qua thí nghiệm phân tích SARA, Yu và các cộng sự [128] đã kết luận rằng những thay đổi về nhóm hoá học giữa bitum RAP và bitum hỗn hợp (có phụ gia tái sinh) là kết quả của hiệu ứng trẻ hóa do bổ sung phụ gia tái sinh. Osmari và các cộng sự [96] cũng chỉ ra rằng, hàm lượng nhóm chất thơm giảm theo thời gian lão hóa bitum, trong khi hàm lượng nhóm asphalt tăng. Tuy nhiên, khi thêm phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ vào bitum cũ bị lão hóa (12% theo khối lượng), hàm lượng nhóm chất thơm có xu hướng tăng lên và hàm lượng nhóm asphalt có xu hướng giảm. Zadshir và các cộng sự [129] cũng đã thử nghiệm bitum bị hoá già dài hạn PAV, và sau đó được trẻ hóa bằng cách sử dụng phụ gia tái sinh có nguồn gốc từ dầu thực vật (VB) và gốc dầu mỏ (PB) với hàm lượng sử dụng là 10% và 30% theo khối lượng bitum hóa già (**Hình 1.11**). Thành phần

hóa học của phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (VB) có hàm lượng nhóm chất nhựa và nhóm chất thơm lớn, nhóm chất bão hòa và nhóm asphalt thấp. Phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (PB) đặc trưng bởi một tỷ lệ lớn các nhóm chất thơm và một tỷ lệ thấp hơn của nhóm chất nhựa. Kết quả cho thấy, hàm lượng nhóm asphalt gia tăng đối với bitum bị hóa già, làm thay đổi tỷ lệ nhóm asphalt/nhóm chất nhựa. Với việc bổ sung phụ gia tái sinh, nhóm chất nhựa và nhóm chất thơm tăng lên dẫn đến hệ thống keo được cải thiện.



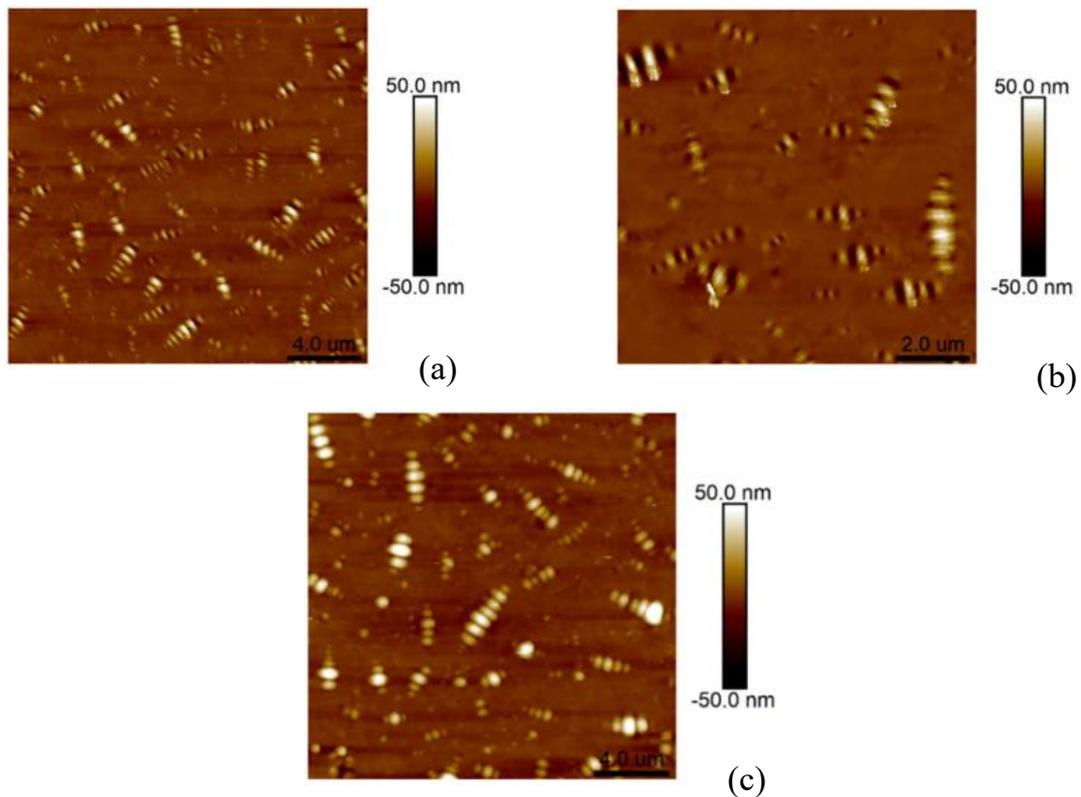
**Hình 1.11. Tỷ lệ các nhóm chất khi phân tích SARA của bitum mới, bitum PAV, phụ gia tái sinh và bitum PAV được trẻ hóa [129]**

(a) phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật, (b) phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ

Mokhtari [83] cũng đã sử dụng thí nghiệm FTIR để đánh giá mức độ lão hóa của bitum bị hóa già và so sánh với bitum bị hóa già được trẻ hóa bằng phụ gia tái sinh. Kết quả cho thấy phụ gia tái sinh có thể làm giảm mức độ lão hóa của bitum. Tuy nhiên, chỉ số

sulfoxide ( $I_{S=O}$ ) không thay đổi đáng kể sau khi phụ gia tái sinh được thêm vào. Ngược lại, chỉ số cacbonyl ( $I_{C=O}$ ) có sự cải thiện cao hơn được quan sát thấy sau khi bitum được trẻ hóa. Cả chỉ số cacbonyl và sulfoxide đều giảm khi tăng hàm lượng phụ gia tái sinh. Dựa trên các quang phổ từ thí nghiệm FTIR, nghiên cứu kết luận rằng không có phản ứng hóa học đáng kể nào giữa bitum hóa già và phụ gia tái sinh bởi không xuất hiện thêm nhóm hóa học mới nào khi phụ gia tái sinh được đưa vào. Do vậy, nghiên cứu kết luận rằng, tương tác giữa phụ gia tái sinh và bitum hóa già chỉ là tương tác vật lý, như được giải thích bởi Weezenbeek [116].

Osmari và các cộng sự [96] đã chỉ ra rằng bitum RAP thể hiện kích thước cấu trúc “con ong” lớn hơn so với bitum hỗn hợp có phụ gia tái sinh. Kim và các cộng sự [71] cho thấy rằng việc bổ sung phụ gia tái sinh vào bitum RAP làm giảm kích thước và số lượng cấu trúc “con ong” và cấu trúc này xuất hiện ít hơn nhiều so với trong bitum RAP.



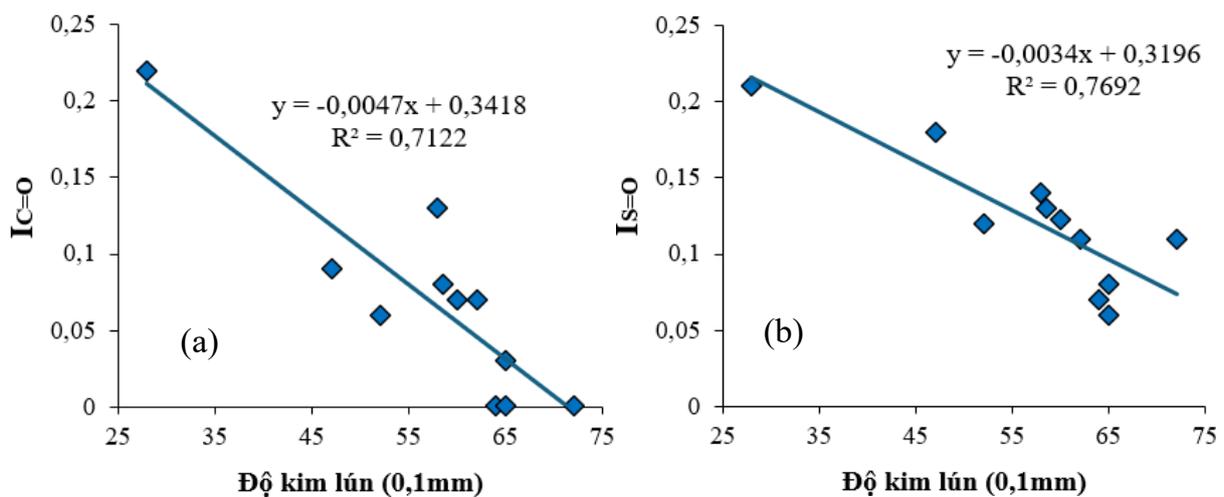
**Hình 1.12. Cấu trúc bitum từ phân tích kính hiển vi lực nguyên tử AFM [63]**

*(a) Bitum mới, (b) Bitum RAP (c) Bitum RAP + 4% phụ gia tái sinh*

Jiang và các cộng sự [63] đã thực hiện phân tích cấu trúc của bitum RAP được trộn lẫn phụ gia tái sinh có tên thương mại là LT-2 với hàm lượng 4% theo khối lượng bitum

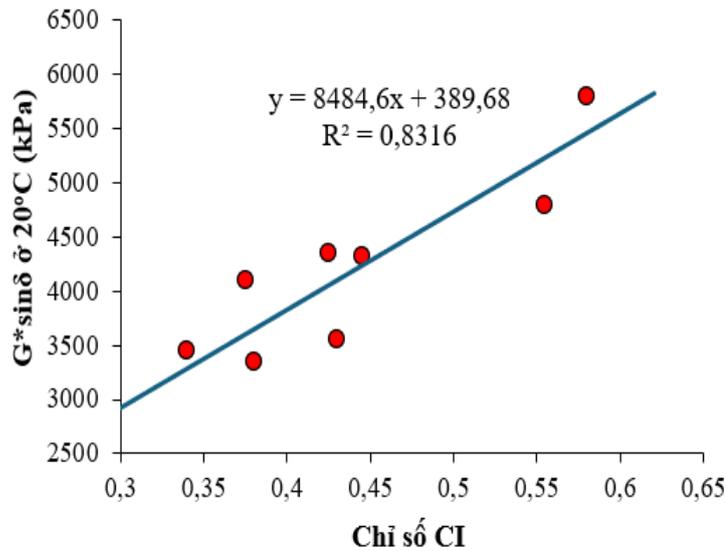
RAP, như được thể hiện ở **Hình 1.12**. Kết quả cho thấy rằng mẫu bitum RAP được thêm 4% phụ gia tái sinh có cấu trúc “con ong” thay đổi so với không có phụ gia tái sinh. So với bitum mới, bitum RAP có cấu trúc “con ong” xích lại hơn, kích thước “con ong” lớn hơn và số lượng ít hơn. Điều này thể hiện bởi sự hình thành các cụm asphalt do nhóm matene giảm. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh, kích thước “con ong” đã giảm và số lượng tăng lên, có xu hướng gần giống với cấu trúc bitum mới. Do vậy, bitum RAP có xu hướng mềm hơn khi phụ gia tái sinh được thêm vào.

Mối tương quan giữa thành phần hóa học và thông số vật lý - lưu biến (physical-rheological) của bitum cũng được nghiên cứu bởi Mansourkhaki và các cộng sự [77]. Từ kết quả thí nghiệm FTIR, khi tăng tỷ lệ bitum RAP trong bitum hỗn hợp làm gia tăng chỉ số  $I_{C=O}$  và  $I_{S=O}$ . Việc sử dụng bitum mềm hơn hoặc phụ gia tái sinh có tác dụng làm giảm chỉ số  $I_{C=O}$  và  $I_{S=O}$ . Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, có mối tương quan tốt giữa chỉ số  $I_{C=O}$  với độ kim lún của bitum (**Hình 1.13**). Cũng trong nghiên cứu này, chỉ số “keo” (colloidal index - CI) được xác định từ kết quả phân tích SARA, là tỷ số giữa nhóm asphalt và nhóm chất bão hòa so với nhóm chất thơm và nhóm chất nhựa. Kết quả từ **Hình 1.14** cho thấy, chỉ số CI cũng có mối tương quan tốt với thông số môđun từ thí nghiệm DSR ( $G^*\sin\delta$ ) sau khi hóa già dài hạn. Như vậy, khi chỉ số CI tăng lên có nghĩa là hàm lượng nhóm asphalt có xu hướng tăng lên, hàm lượng nhóm chất nhựa và nhóm chất thơm có xu hướng giảm đi, làm cho bitum trở nên cứng hơn ( $G^*\sin\delta$  càng cao).



**Hình 1.13. Mối quan hệ giữa thí nghiệm FTIR và độ kim lún [77]**

(a) chỉ số  $I_{C=O}$  và độ kim lún, (b) chỉ số  $I_{S=O}$  và độ kim lún



**Hình 1.14. Mối quan hệ giữa chỉ số CI từ thí nghiệm phân tích SARA và thông số  $G^* \sin \delta$  [77]**

Từ các nghiên cứu ở trên cho thấy rằng, thành phần hóa học và cấu trúc của bitum có mối liên hệ với các tính chất vật lý và lưu biến của bitum. Các nghiên cứu trong nước trước đây, liên quan đến vật liệu bitum và bê tông asphalt tái chế nóng mới chỉ tập trung về các tính chất cơ - lý, chưa có những nghiên cứu sâu về thành phần hóa học cũng như cấu trúc vi mô của bitum. Vì vậy, song song với các nghiên cứu thực nghiệm đánh giá tính chất của bitum và tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng, thì nội dung của Luận án cũng sẽ tiến hành các nghiên cứu liên quan đến thành phần cấu trúc và các tính chất hóa - lý của bitum.

### ***1.3.3.2. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến đặc tính lưu biến của bitum***

Thông qua thí nghiệm cắt động lưu biến (DSR), có thể đánh giá được các đặc tính lưu biến của bitum (mô đun cắt động  $|G^*|$  và góc trễ pha ( $\delta$ )). Giá trị  $|G^*|$  lớn tương ứng với loại bitum cứng hơn, trong khi các giá trị  $\delta$  lớn tương ứng với độ nhớt thấp hơn. Kết quả thí nghiệm DSR trên bitum cũ chỉ ra sự gia tăng giá trị  $|G^*|$  và giảm giá trị  $\delta$ , tương tự như ảnh hưởng của sự hoá già trong phòng thí nghiệm và/hoặc ngoài hiện trường [66]. Ngược lại, khi sử dụng phụ gia tái sinh, bitum cũ có phụ gia tái sinh sẽ làm giảm giá trị  $|G^*|$  và tăng giá trị  $\delta$ . Yu và các cộng sự [128] chỉ ra rằng việc bổ sung phụ gia tái sinh vào bitum cũ làm giảm giá trị  $|G^*|$  và tăng giá trị  $\delta$  ở các mức độ khác nhau, tùy thuộc vào nguồn gốc của bitum cũ và loại phụ gia tái sinh. Các tác giả chỉ ra rằng phụ gia tái

sinh gốc dầu thực vật có tác động nhiều hơn trong việc giảm giá trị  $|G^*|$  và tăng giá trị  $\delta$  so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (chiết xuất thơm) khi cả hai đều được sử dụng với hàm lượng như nhau.

Osmari và các cộng sự [96] chỉ ra rằng loại phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật thải và dầu gỗ thông có tác động nhiều hơn trong việc giảm giá trị  $|G^*|$  nhưng thay đổi tương tự giá trị  $\delta$  so với việc sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ. Kim và các cộng sự [71] cũng chỉ ra rằng phụ gia tái sinh gốc dầu thông có tác động nhiều hơn trong việc giảm giá trị  $|G^*|$  so với sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu đậu nành và phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ.

Yin và các cộng sự [126] chỉ ra rằng việc thêm phụ gia tái sinh làm giảm giá trị  $|G^*|$  và tăng giá trị  $\delta$  của bitum hỗn hợp, nhưng hiệu quả trẻ hóa của các phụ gia tái sinh giảm đi khi hoá già dài hạn. Các kết luận tương tự đã được báo cáo bởi Garcia-Cucalon và các cộng sự [57] với hiệu quả tái sinh giảm dần khi hoá già dài hạn, nơi có sự gia tăng nhanh giá trị  $G^*$  và giảm giá trị  $\delta$  do hoá già với bitum hỗn hợp không có phụ gia tái sinh. Tuy nhiên, bitum hỗn hợp có phụ gia tái sinh cho thấy các tính năng được cải thiện hơn ( $|G^*|$  thấp hơn và  $\delta$  cao hơn) so với bitum hỗn hợp không có phụ gia tái sinh.

Arámbula-Mercado và các cộng sự [35] chỉ ra rằng việc bổ sung phụ gia tái sinh với hàm lượng cao mang lại sự phục hồi các đặc tính lưu biến của bitum hỗn hợp (giá trị  $|G^*|$  thấp hơn và  $\delta$  cao hơn). Nghiên cứu chỉ ra rằng, phụ gia tái sinh có hiệu quả cả khi bitum được hoá già dài hạn. Kết quả cũng cho thấy hiệu quả trẻ hóa bitum của phụ gia tái sinh khi so sánh giữa bitum hỗn hợp có tỷ lệ bitum tái chế (RBR) cao sử dụng phụ gia tái sinh so với bitum hỗn hợp có tỷ lệ RBR thấp hơn và không có phụ gia tái sinh. Điều này chứng tỏ vai trò của phụ gia tái sinh khi gia tăng tỷ lệ sử dụng RAP trong hỗn hợp asphalt.

### ***1.3.3.3. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến các tính năng của bê tông asphalt***

Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng việc thêm RAP làm tăng độ cứng của hỗn hợp asphalt và sử dụng phụ gia tái sinh có thể làm giảm độ cứng, được đánh giá thông qua mô đun động ( $|E^*|$ ) và mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp ( $M_R$ ) [44], [68], [81]. Kim và các cộng sự [71] cho rằng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ có tác động nhiều nhất trong việc giảm  $|E^*|$  của hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng 65% RAP so với phụ gia tái sinh gốc dầu

đầu nành và dầu thông. Kaseer và các cộng sự [68] cũng báo cáo rằng có sự giảm đáng kể độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế với tỷ lệ RAP cao do bổ sung phụ gia tái sinh nhưng hiệu quả của phụ gia tái sinh trong việc giảm độ cứng là giảm dần khi hỗn hợp trải qua quá trình hoá già dài hạn.

Tương tự như ảnh hưởng đến độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế, việc bổ sung phụ gia tái sinh có thể cải thiện hiệu quả khả năng kháng nứt ở nhiệt độ thường [54], [126] theo các phương pháp thí nghiệm khác nhau, như thí nghiệm Indirect Tensile (IDT), thí nghiệm Overlay Test (OT), thí nghiệm Semi-Circular Bending (SCB), thí nghiệm uốn mỗi bốn điểm (Four-Point Bending) và thí nghiệm Illinois Flexibility Index (I-FIT). Tuy nhiên, hiệu quả của các phụ gia tái sinh trong việc cải thiện khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt cũng giảm do hoá già. Yin và các cộng sự [126] chỉ ra rằng, phụ gia tái sinh có hiệu quả trong việc cải thiện khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt với hàm lượng RAP cao, nhưng khả năng kháng nứt giảm dần khi trải qua hoá già. Hỗn hợp có phụ gia tái sinh đạt được các đặc tính lưu biến và khả năng kháng nứt tương đương hoặc thậm chí tốt hơn so với các hỗn hợp có hàm lượng RAP thấp không có phụ gia tái sinh.

Sử dụng phụ gia tái sinh có thể cải thiện hiệu quả kháng nứt ở nhiệt độ thấp. Zaumanis và các cộng sự [132] đã sử dụng thí nghiệm cường độ kéo gián tiếp (IDT) và xác định năng lượng phá huỷ để mô tả đặc tính trở hóa hỗn hợp asphalt dùng 100% RAP ở điều kiện nhiệt độ thấp. Kết quả chỉ ra rằng hỗn hợp asphalt với độ cứng thấp hơn ít có khả năng phát triển nứt ở nhiệt độ thấp. Tuy nhiên, hỗn hợp asphalt tái chế không có phụ gia tái sinh thường có độ cứng cao hơn và do đó khả năng kháng hằn lún tốt hơn [81].

Do tác dụng của phụ gia tái sinh trong việc giảm độ cứng của hỗn hợp asphalt, độ nhạy cảm hằn lún có thể tăng lên đối với hỗn hợp asphalt có phụ gia tái sinh [82]. Yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng chống hằn lún của hỗn hợp asphalt tái chế là hàm lượng dùng phụ gia tái sinh sử dụng. Arámbula-Mercado và cộng sự [35] chỉ ra rằng hàm lượng phụ gia tái sinh quá lớn sẽ làm mềm đáng kể bitum và sẽ tác động tiêu cực đến khả năng kháng hằn lún của hỗn hợp.

#### **1.4. Thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng**

Quá trình thiết kế hỗn hợp asphalt sử dụng RAP, đặc biệt với hàm lượng RAP cao

thường khác với hỗn hợp asphalt truyền thống. Thành phần hỗn hợp asphalt tái chế có thể được xác định theo một số hướng dẫn của Viện Asphalt Mỹ (MS-2) [84], phương pháp của Nhật Bản (NAPA – Information Series 139) [118], báo cáo của Hiệp hội mặt đường asphalt Mỹ (Quality Improvement Series - QIS 124) [103] và tiêu chuẩn AASHTO M323 [24]. Các phương pháp này đều được thiết kế nhằm thỏa mãn các đặc tính thể tích, trong đó MS-2 và phương pháp của Nhật Bản thiết kế theo Marshall, trong khi QIS 124 và AASHTO M323 dựa theo phương pháp SuperPave. Theo các phương pháp của Mỹ, bitum được sử dụng với cấp PG giữ nguyên nếu hàm lượng RAP sử dụng nhỏ hơn 15% trong khi hàm lượng RAP từ 15% đến 25% nên sử dụng bitum có cấp PG thấp hơn một cấp so với cấp bitum thông thường sử dụng. Tuy nhiên, Kaseer và các cộng sự [68] nhận thấy rằng không cần phải sử dụng bitum mềm hơn khi hàm lượng RAP từ 15% đến 25%. Đối với hàm lượng RAP trên 25%, biểu đồ trộn lẫn giữa bitum mới và bitum RAP được kiến nghị sử dụng để lựa chọn loại bitum có cấp PG phù hợp hoặc sử dụng phụ gia tái sinh. Đối với phương pháp của Nhật Bản, biểu đồ trộn lẫn được xác định dựa trên giá trị độ kim lún với độ kim lún mục tiêu là 50 (bitum gốc thường được sử dụng là loại bitum 40/60). Việc sử dụng phụ gia tái sinh (hàm lượng từ 5-10% theo khối lượng bitum RAP) là phổ biến đối với hỗn hợp có hàm lượng RAP cao ở Nhật Bản. Hệ số cường độ kéo gián tiếp (Indirect Tensile Coefficient) trên mẫu Marshall được bảo ôn 5 giờ ở 20°C được quy định từ 0,6 – 0,9 với vùng có điều kiện khí hậu thông thường và từ 0,4 – 0,6 với vùng có khí hậu lạnh.

Ở Mỹ, vấn đề nứt đã trở thành mối quan tâm chính trong thời gian gần đây do việc sử dụng rộng rãi vật liệu RAP trong hỗn hợp asphalt. Do vậy, thiết kế thành phần hỗn hợp asphalt tái chế theo phương pháp cân bằng (Balanced Mix Design - BMD) đã được áp dụng để đảm bảo hỗn hợp có khả năng kháng nứt, đồng thời đáp ứng các yêu cầu về khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe và độ ẩm. Để đánh giá các tính năng, thí nghiệm hằn lún vệt bánh xe (HWTT) và thí nghiệm Overlay Test (OT) thường được sử dụng. Bên cạnh đó, các phương pháp đánh giá tính năng khác cũng có thể áp dụng cho phương pháp BMD, như thí nghiệm lún nhanh (IDEAL-RT), thí nghiệm uốn mẫu bán nguyệt (SCB), thí nghiệm kéo gián tiếp (IDEAL-CT) v.v. Năm 2014, Bang Wisconsin đã xây dựng chỉ dẫn đánh giá thí nghiệm các tính năng của hỗn asphalt tái chế nóng có hàm

lượng RAP trên 25% [117]. Hai thí nghiệm được sử dụng để áp dụng cho phương pháp thiết kế cân bằng là thí nghiệm kháng hằn lún vết bánh xe (HWTT) và thí nghiệm kháng nứt trên mẫu bán nguyệt (SCB).

Trong hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng RAP, để đạt được sự cân bằng về sức kháng hằn lún vết bánh xe và sức kháng nứt, chỉ biến hàm lượng bitum là không đủ. Zaumanis và các cộng sự (2019) [130] chỉ ra rằng hàm lượng bitum tối ưu để đảm bảo sức kháng hằn lún vết bánh xe và sức kháng nứt mỗi không giao nhau hoặc không có một điểm chung. Trong trường hợp như vậy, biện pháp khác có thể được áp dụng như thay đổi cấp bitum mới hoặc sử dụng phụ gia tái sinh [136]. Zhou và các cộng sự [143] đã đề xuất phương pháp thiết kế thành phần hỗn hợp RAP-HMA sử dụng phụ gia tái sinh theo phương pháp cân bằng, bao gồm bốn bước, là (1) lựa chọn loại phụ gia tái sinh; (2) xác định khoảng hàm lượng phụ gia tái sinh cần thiết để đáp ứng tất cả các chỉ tiêu kỹ thuật của bitum; (3) xác định khoảng hàm lượng phụ gia tái sinh cần thiết để thoả mãn yêu cầu về khả năng kháng hằn lún vết bánh xe và khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt; và (4) lựa chọn hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu dựa trên đánh giá từ hỗn hợp để đảm bảo cân bằng giữa sức kháng hằn lún vết bánh xe và sức kháng nứt. Các yêu cầu về tính năng kháng hằn lún vết bánh xe và kháng nứt phụ thuộc vào nhiều yếu tố như lưu lượng giao thông, điều kiện khí hậu, kết cấu và chiều dày lớp mặt đường. Đối với những vị trí có yêu cầu cao về lưu lượng giao thông hoặc điều kiện thời tiết nóng, hàm lượng phụ gia tái sinh thấp hơn có thể được lựa chọn bởi vì hằn lún vết bánh xe là mối quan tâm lớn nhất. Ngược lại, đối với mặt đường nằm ở vùng có khí hậu lạnh, khả năng kháng nứt là mối quan tâm chính, và do đó, nên sử dụng hàm lượng phụ gia tái sinh cao hơn.

Từ những phân tích ở trên, Luận án đề xuất việc thiết kế thành phần bê tông asphalt tái chế nóng với hàm lượng RAP cao theo phương pháp cân bằng. Hàm lượng phụ gia tái sinh phù hợp được lựa chọn dựa trên thí nghiệm kháng hằn lún vết bánh xe (HWTT) và thí nghiệm kháng nứt theo mô hình kéo gián tiếp (IDEAL-CT). Các thiết bị này đều có ở phòng thí nghiệm tại Trường Đại học GTVT nên có thể áp dụng được.

### **1.5. Các nghiên cứu trong nước liên quan đến hướng nghiên cứu và các vấn đề cần giải quyết của Luận án**

Ở Việt Nam, một số nghiên cứu liên quan đến công nghệ bê tông asphalt tái chế nóng

và ẩm sử dụng vật liệu RAP đã được thực hiện. Đối với công nghệ bê tông asphalt tái chế ẩm, nghiên cứu của nhóm tác giả Đào Văn Đông và cộng sự [2] đã bước đầu đưa ra giới hạn hàm lượng RAP tối đa sử dụng không nên quá 30% cho công nghệ ẩm lựa chọn, mặc dù nghiên cứu đã khảo sát đánh giá với nhiều tỷ lệ RAP khác nhau thay đổi từ 20-50%. Trong nghiên cứu này, thành phần bê tông asphalt tái chế ẩm không sử dụng phụ gia tái sinh, hai loại phụ gia biến tính bitum được sử dụng để giảm nhiệt độ trộn và thi công là phụ gia Sasobit và phụ gia Zycotherm. Đối với công nghệ bê tông asphalt tái chế nóng, một số nghiên cứu được thực hiện trong phòng và thử nghiệm ngoài hiện trường cũng đã được thực hiện trên hỗn hợp có hàm lượng RAP không lớn hơn 25% (Viện Khoa học và Công nghệ GTVT [17]) và từ 30-50% có sử dụng phụ gia tái sinh (Công ty Cổ phần Đầu tư xây dựng BMT) [1]. Một nghiên cứu bước đầu về ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến khả năng kháng lún và khả năng kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nóng với hàm lượng RAP cao đã được thực hiện bởi Nguyễn Ngọc Lân và cộng sự [5].

Như vậy, cho đến nay đã có một số nghiên cứu ở trong nước về bê tông asphalt tái chế nóng/tái chế ẩm với các hàm lượng RAP khác nhau, nhưng những nghiên cứu này chưa sử dụng hoặc mới chỉ sử dụng một loại phụ gia tái sinh và chưa có các nghiên cứu đánh giá tổng thể các loại phụ gia tái sinh khác nhau. Việc sử dụng phụ gia tái sinh trong công nghệ bê tông asphalt tái chế nóng ở Việt Nam gần như chưa được đề cập nhiều.

Một vài nghiên cứu trước đây mới chỉ thực hiện trên pha hỗn hợp asphalt, vẫn chưa có các nghiên cứu liên quan đến tính chất cơ – lý cũng như bản chất cơ – lý – hóa của bitum (bitum mới, bitum RAP và bitum hỗn hợp được trộn lẫn từ bitum mới, bitum RAP và phụ gia tái sinh). Hơn nữa, ảnh hưởng của điều kiện hóa già đến các tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng cũng chưa được thực hiện trong các nghiên cứu trước đây.

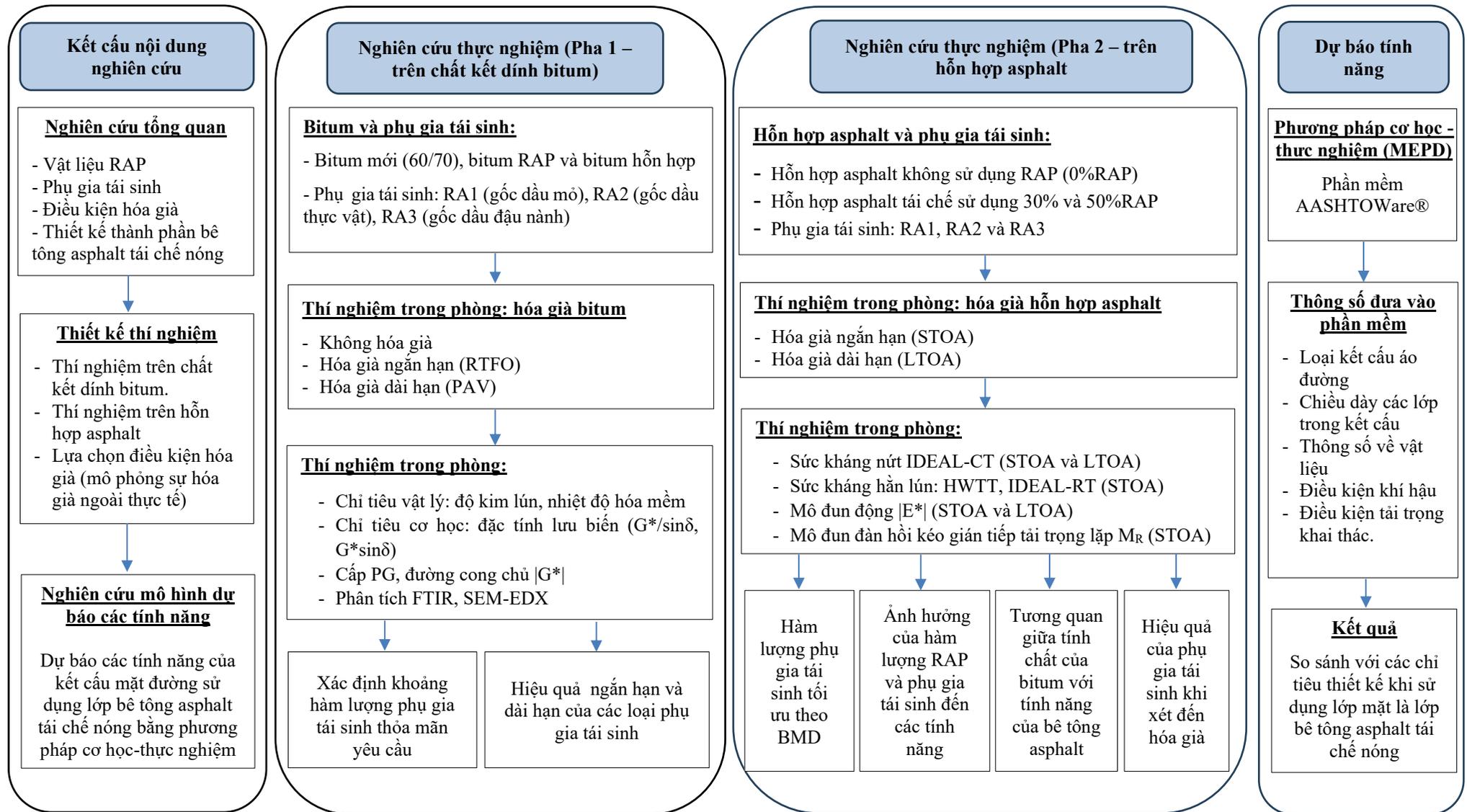
Do vậy, Luận án sẽ tiến hành các nghiên cứu đồng thời trên chất kết dính bitum (các chỉ tiêu cơ – lý – hóa) và trên hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP (các tính năng) để có thể kết luận rõ hơn về cơ chế ảnh hưởng của các loại phụ gia tái sinh khác nhau. Các điều kiện mô phỏng hóa già ngắn hạn, hóa già dài hạn đối với bitum và hỗn hợp asphalt cũng được xét đến để đánh giá rõ hơn về hiệu quả của từng loại phụ gia tái sinh. Từ đó, có cơ sở khoa học đề xuất kiến nghị hàm lượng RAP và phụ gia tái

sinh phù hợp đảm bảo cân bằng các tính năng cho hỗn hợp asphalt.

### **1.6. Phương pháp nghiên cứu**

Để đạt được mục tiêu của đề tài, phương pháp nghiên cứu sẽ là nghiên cứu lý thuyết kết hợp với nghiên cứu thực nghiệm. Kế hoạch nghiên cứu được thể hiện ở **Bảng 1.2**.

**Bảng 1.2. Nội dung nghiên cứu**



## **CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ẢNH HƯỞNG CỦA PHỤ GIA TÁI SINH ĐẾN MỘT SỐ TÍNH CHẤT CỦA BITUM**

### **2.1. Giới thiệu chương**

Trong phân loại mác bitum ở Việt Nam hiện nay, độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm là hai trong số các chỉ tiêu kỹ thuật quan trọng dùng để đánh giá chất lượng bitum. Bên cạnh đó, TCVN 13567-1:2022 [16] cũng đã đưa cách phân loại bitum theo cấp PG. Đối với hỗn hợp bê tông asphalt tái chế sử dụng RAP (đặc biệt với hàm lượng RAP cao), bitum cũ trong RAP được trộn lẫn với bitum mới dẫn đến sự thay đổi các tính chất vật lý và cơ học của bitum hỗn hợp (bitum mới, bitum RAP và phụ gia tái sinh). Trong Chương này, nghiên cứu tiến hành đánh giá ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến một số tính chất của bitum hỗn hợp, bao gồm chỉ tiêu vật lý (độ kim lún, nhiệt độ hoá mềm), đặc tính lưu biến khi phụ gia tái sinh được thêm vào. Từ đó, đưa ra giới hạn hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu để các tính chất của bitum hỗn hợp đạt được tương đương như bitum mới. Ảnh hưởng của điều kiện hóa già cũng được xét đến để đánh giá hiệu quả của các loại phụ gia tái sinh. Các phân tích vi cấu trúc và thành phần hóa học cũng được thực hiện để làm rõ hiệu quả của phụ gia tái sinh sử dụng.

### **2.2. Kế hoạch thí nghiệm**

Nội dung này trình bày về kế hoạch nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến một số tính chất của bitum hỗn hợp. Để có thể so sánh ảnh hưởng của các loại phụ gia tái sinh có gốc khác nhau, ba loại phụ gia tái sinh được lựa chọn trong nghiên cứu này là phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1), phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và phụ gia tái sinh gốc dầu đậu nành (RA3). RA1 và RA2 là hai loại phụ gia tái sinh đã được sản xuất thương mại hóa trên thị trường. Phụ gia tái sinh RA3 bước đầu được nghiên cứu chế tạo trong phòng thí nghiệm từ quá trình chưng cất và biến tính dầu đậu nành và có các chỉ tiêu tương tự như loại RA2 được thương mại hóa. Đầu tiên vật liệu RAP sẽ được chiết tách để thu hồi bitum cũ trong RAP (bitum RAP). Tiếp theo, bitum RAP sẽ được trộn lẫn với bitum mới và phụ gia tái sinh để tạo thành bitum hỗn hợp. Sau đó, các nghiên cứu thực nghiệm trên bitum hỗn hợp được thực hiện.

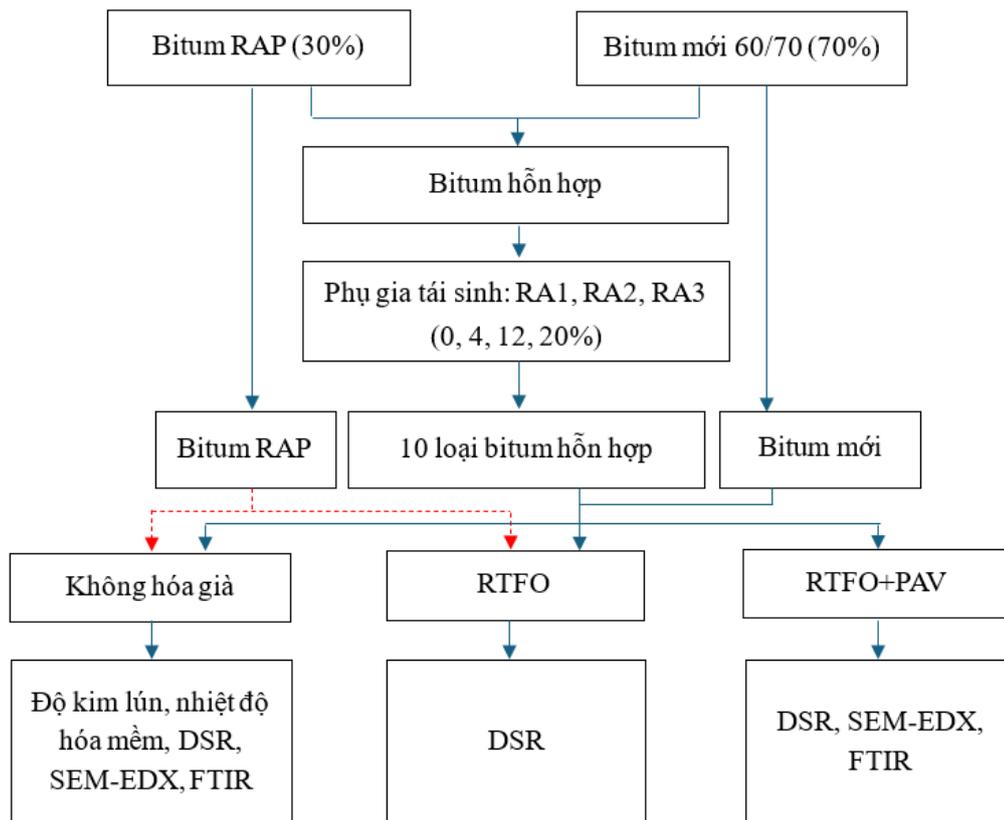
Hàm lượng RAP tối đa sử dụng trong hỗn hợp được xác định thông qua tỷ lệ bitum được

tái chế (Recycled Binder Ratio - RBR). RBR được định nghĩa là phần trăm bitum trong RAP, theo khối lượng, so với tổng hàm lượng bitum theo khối lượng hỗn hợp bê tông asphalt theo công thức (2.1) [91].

$$RBR = \frac{P_{bRAP} \times P_{RAP}}{100 \times P_b} \quad (2.1)$$

Trong đó,  $P_{bRAP}$  là hàm lượng bitum trong RAP,  $P_{RAP}$  là tỷ lệ RAP theo khối lượng hỗn hợp và  $P_b$  là hàm lượng bitum trong hỗn hợp.

Trong nghiên cứu này, tỷ lệ bitum RAP trong bitum hỗn hợp là 0,3 (RBR = 0,3), tương ứng với hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng 50%RAP. **Hình 2.1** thể hiện kế hoạch thực nghiệm trong phòng đánh giá ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến một số tính chất của bitum hỗn hợp.



**Hình 2.1. Kế hoạch thí nghiệm trên chất kết dính bitum**

Ký hiệu các mẫu bitum được thể hiện trong **Bảng 2.1**. Ba loại phụ gia tái sinh (RA1, RA2 và RA3) được sử dụng với các hàm lượng 0%, 4%, 12% và 20% theo khối lượng bitum RAP. Các hàm lượng này được lựa chọn dựa trên khuyến cáo từ nhà sản xuất và

các nghiên cứu đã thực hiện. Trong đó, hàm lượng phụ gia tái sinh thấp (4%) và cao (20%) được lựa chọn để đánh giá ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến các tính chất của bitum.

**Bảng 2.1. Ký hiệu các mẫu bitum**

TT	Ký hiệu	Mô tả
1	V	Bitum mới 60/70
2	R	Bitum cũ thu hồi từ vật liệu RAP (bitum RAP)
3	B	Bitum hỗn hợp (70% bitum mới + 30% bitum RAP + không có phụ gia tái sinh)
4	RA1-4	Bitum hỗn hợp + 4% phụ gia tái sinh RA1
5	RA1-12	Bitum hỗn hợp + 12% phụ gia tái sinh RA1
6	RA1-20	Bitum hỗn hợp + 20% phụ gia tái sinh RA1
7	RA2-4	Bitum hỗn hợp + 4% phụ gia tái sinh RA2
8	RA2-12	Bitum hỗn hợp + 12% phụ gia tái sinh RA2
9	RA2-20	Bitum hỗn hợp + 20% phụ gia tái sinh RA2
10	RA3-4	Bitum hỗn hợp + 4% phụ gia tái sinh RA3
11	RA3-12	Bitum hỗn hợp + 12% phụ gia tái sinh RA3
12	RA3-20	Bitum hỗn hợp + 20% phụ gia tái sinh RA3

Chi tiết kế hoạch nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến các tính chất của bitum được thể hiện ở **Bảng 2.2**.

**Bảng 2.2. Chi tiết kế hoạch thí nghiệm và số lượng mẫu thử cho nghiên cứu**

Bitum	Nội dung thí nghiệm/Điều kiện hóa già/Số lượng mẫu thử										
	Chỉ tiêu vật lý		Đặc tính lưu biến						Thành phần hóa học và cấu trúc		
	Độ kim lún	Điểm hóa mềm	Cấp PG			Đường cong chủ $ G^* $			SEM - EDX	FTIR	
			Không hóa già	Không hóa già	Không hóa già ( $G^*/\sin\delta$ )	RTFO ( $G^*/\sin\delta$ )	PAV ( $G^*/\sin\delta$ )	Không hóa già		RTFO	PAV
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
V	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	2	2	2	2	-	2	2	-	2	2	-

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
B	2	2	2	2	2	2	2	2	—	2	2
RA1-4	2	2	2	2	2	2	2	2	—	—	—
RA1-12	2	2	2	2	2	2	2	2	—	2	2
RA1-20	2	2	2	2	2	2	2	2	—	—	—
RA2-4	2	2	2	2	2	2	2	2	—	—	—
RA2-12	2	2	2	2	2	2	2	2	—	2	2
RA2-20	2	2	2	2	2	2	2	2	—	—	—
RA3-4	2	2	2	2	2	2	2	2	—	—	—
RA3-12	2	2	2	2	2	2	2	2	—	2	2
RA3-20	2	2	2	2	2	2	2	2	—	—	—
<b>Tổng</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>22</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>10</b>

### 2.3. Vật liệu sử dụng cho nghiên cứu

#### 2.3.1. Vật liệu RAP

RAP là sản phẩm từ quá trình cào bóc mặt đường bê tông asphalt cũ, sau đó tiến hành nghiền sàng để thu được vật liệu RAP. Trong nghiên cứu này, vật liệu RAP sử dụng cho nghiên cứu được lấy ở trạm trộn Tân Cang, Biên Hòa, Đồng Nai của Công ty Cổ phần Đầu tư xây dựng BMT (Hình 2.2). Đây là đơn vị có dây chuyền nghiền, sàng và phân loại RAP đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật. RAP thu được từ quá trình cào bóc mặt đường cũ tại Quốc lộ 51, với tuổi thọ của mặt đường khoảng 5 năm.



Hình 2.2. Lấy mẫu RAP

#### 2.3.2. Bitum

Chất kết dính bitum mới là loại bitum 60/70 của Công ty trách nhiệm hữu hạn Nhựa đường Petrolimex. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu kỹ thuật của bitum 60/70 được

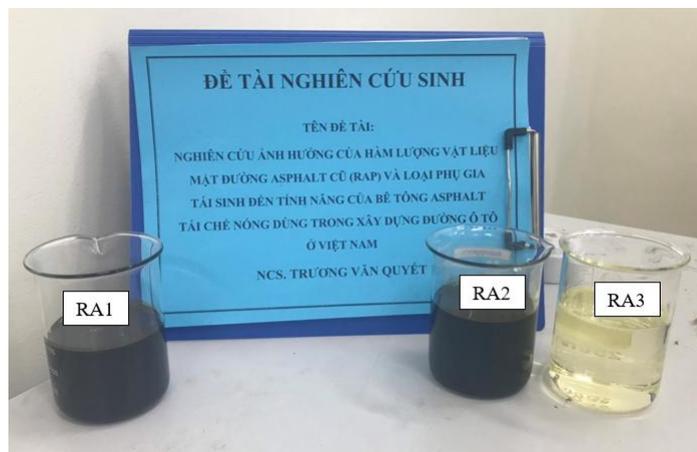
thể hiện ở **Bảng 2.3** và cho thấy đều thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 13567-1:2022 [16].

**Bảng 2.3. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của bitum 60/70**

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1	Độ kim lún ở 25°C, 0,1 mm	63,5	60-70
2	Nhiệt độ hoá mềm, °C	49,6	≥ 46
3	Khối lượng riêng ở 25°C, g/cm <sup>3</sup>	1,032	-
4	Độ dính bám đối với đá, cấp	Cấp 4	Cấp 3
5	Độ nhớt ở 60°C, Pa.s	199	≥ 180
6	G*/sinδ ở điều kiện không hóa già, kPa		
	64 °C	1,87	-
	70 °C	0,82	-

### 2.3.3. Phụ gia tái sinh

Trong nghiên cứu này, ba loại phụ gia tái sinh sử dụng trong nghiên cứu, được ký hiệu là RA1, RA2 và RA3. RA1 là loại phụ gia tái sinh có nguồn gốc từ dầu mỏ, có màu nâu sẫm. RA2 là loại phụ gia tái sinh có nguồn gốc từ thực vật, cũng có màu nâu sẫm. RA3 là loại phụ gia tái sinh có nguồn gốc từ dầu đậu nành, có màu vàng nhạt. Cả ba loại phụ gia tái sinh đều ở dạng lỏng. Các chỉ tiêu kỹ thuật của ba loại phụ gia tái sinh được thể hiện ở **Bảng 2.4** và đều thỏa mãn theo tiêu chuẩn ASTM D4552 [38] về phân loại phụ gia tái sinh.



**Hình 2.3. Phụ gia tái sinh**

**Bảng 2.4. Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia tái sinh theo tiêu chuẩn ASTM D4552**

Chỉ tiêu	Phụ gia tái sinh			Yêu cầu kỹ thuật theo ASTM D4552			
	RA1	RA2	RA3	Loại 1		Loại 2	
				Min	Max	Min	Max
1. Độ nhớt ở 60°C (mm <sup>2</sup> /s)	67	45	36	10	49	50	175
2. Điểm chớp cháy, °C	256	248	288	219	–	219	–
3. Hàm lượng chất bão hoà, %	7	2	2	–	30	–	30
4. Thí nghiệm sau khi RTFO ở 163°C							
4.1. Tỷ số độ nhớt	1,0	1,2	1,1	–	3	–	3
4.2. Thay đổi khối lượng (%)	0,7	0,5	0,5	–	4	–	4
5. Khối lượng riêng ở 25°C	1,008	0,952	0,988	0,9	1,1	0,9	1,1

## 2.4. Quá trình chiết và thu hồi bitum cũ từ vật liệu RAP

### 2.4.1. Quá trình chiết bitum RAP

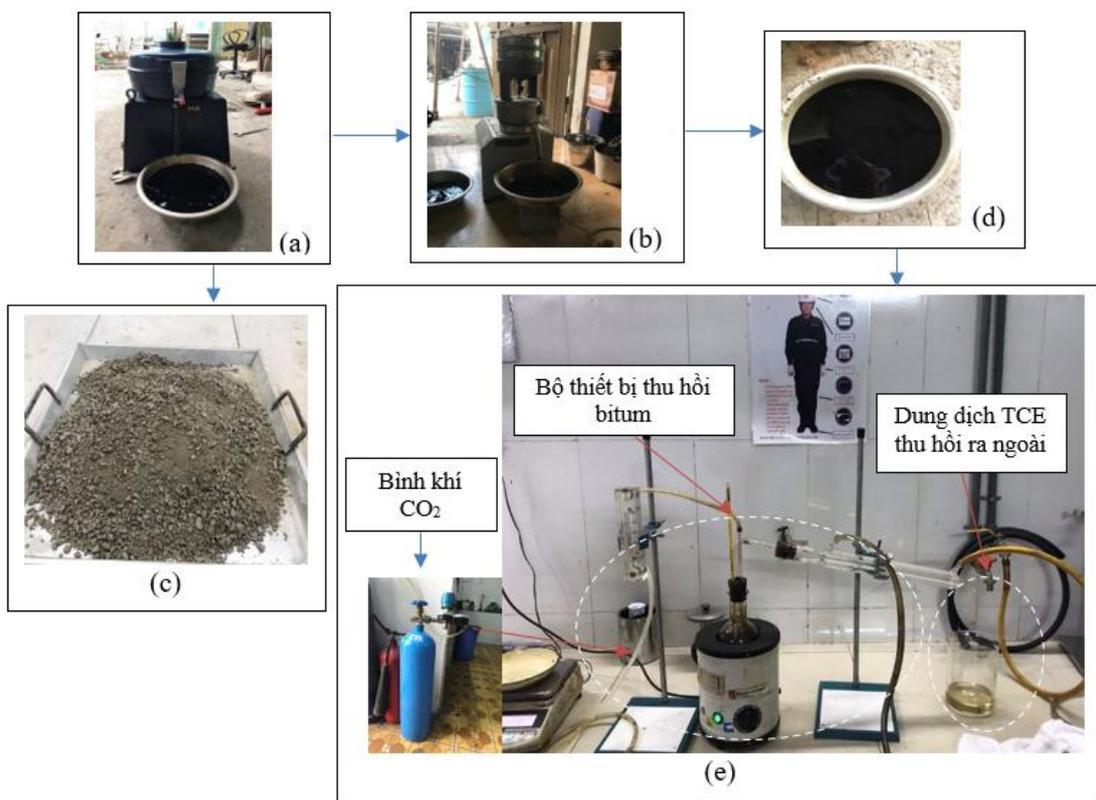
Bitum cũ được tách ra từ vật liệu RAP bằng phương pháp chiết ly tâm theo tiêu chuẩn AASHTO T164 [28]. Dung môi sử dụng là trichloetylen (TCE) để loại bỏ bitum khỏi cốt liệu trong vật liệu RAP. Quá trình chiết và thu hồi bitum RAP được thực hiện tại Phòng thí nghiệm trọng điểm Đường bộ I, Viện Khoa học và Công nghệ GTVT.

Vật liệu RAP được sấy khô và sau đó ngâm trong dung dịch TCE trong một giờ để hòa tan bitum. Thiết bị quay ly tâm được sử dụng để tách phần dung dịch có chứa bitum và bột khoáng trong hỗn hợp RAP (**Hình 2.4a**). Tốc độ quay được tăng dần cho đến khi đạt tốc độ 3600 vòng/phút và máy ly tâm sẽ được tiếp tục chạy cho đến khi tất cả dung dịch được lấy hết ra, và phần còn lại là cốt liệu RAP thu được sau khi chiết (**Hình 2.4c**). Tiếp theo, bột khoáng có trong dung dịch đã chiết sẽ được chiết tách tiếp để tạo ra dung dịch chỉ chứa bitum sử dụng thiết bị quay ly tâm tốc độ cao (**Hình 2.4b** và **Hình 2.4d**).

### 2.4.2. Quá trình thu hồi bitum RAP

Phương pháp Abson được sử dụng để thu hồi bitum RAP theo tiêu chuẩn AASHTO R59 [27] (**Hình 2.4e**). Nguyên tắc cơ bản của phương pháp Abson là làm nóng bình chứa dung dịch cho đến khi dung môi bắt đầu bay hơi và thoát ra khỏi bình, chỉ giữ lại bitum.

Bộ thiết bị thu hồi bao gồm một thiết bị gia nhiệt có điều khiển nhiệt độ, nguồn nước và bình khí CO<sub>2</sub>. Quá trình thu hồi bắt đầu bằng cách làm nóng dung dịch trong bình bằng cách gia nhiệt cho nhiệt độ tăng dần. Khi nhiệt độ đạt 135°C lúc đó hạ thấp ống thông khí xuống đáy bình chứa mẫu chiết và đưa khí vào bình với tốc độ khoảng 100ml/phút để đẩy dung môi bay hơi và ngăn tạo bọt. Quá trình chưng cất được tiếp tục cho đến khi nhiệt độ đạt đến khoảng 157°C đến 160°C và tại thời điểm này, tăng lưu lượng khí CO<sub>2</sub> vào khoảng 900ml/phút. Kết quả thí nghiệm một số chỉ tiêu của bitum RAP sau khi được thu hồi, được thể hiện ở **Bảng 2.5**.



**Hình 2.4. Quá trình chiết và thu hồi bitum trong RAP**

(a) Chiết bitum bằng thiết bị quay ly tâm, (b) Tách bột khoáng từ dung dịch chiết được bằng thiết bị quay ly tâm tốc độ cao, (c) cốt liệu RAP thu được sau khi loại bỏ bitum, (d) dung dịch có chứa bitum sau khi chiết, (e) quá trình thu hồi bitum RAP

**Bảng 2.5. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của RAP và bitum RAP**

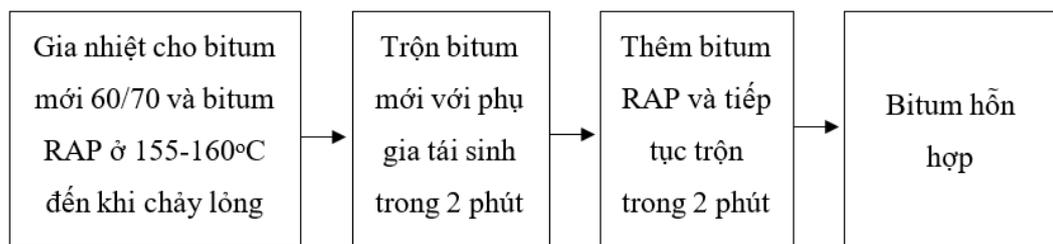
Chỉ tiêu	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1. Hàm lượng bitum trong RAP, %	3,0	–
2. Hàm lượng hạt lọt qua sàng 0,075 mm, %	3,8	< 5

Chỉ tiêu	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
3. Độ ẩm của RAP, %	0,5	–
4. Chỉ tiêu bitum RAP:		
4.1. Độ kim lún ở 25 °C, 0,1 mm	25,4	> 20
4.2. Nhiệt độ hóa mềm, °C	64,6	–
4.3. Độ nhớt ở 60°C, Pa.s	24500	–
4.4. G*/sinδ (không hóa già), kPa 64°C 82°C	8,07 1,05	–
4.5. G*/sinδ (hóa già ngắn hạn RTFO), kPa 64°C 88°C	40,1 2,25	–

## 2.5. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

### 2.5.1. Phương pháp trộn phụ gia tái sinh với bitum

Sau khi bitum cũ được thu hồi từ vật liệu RAP (bitum RAP), tiến hành trộn bitum mới với bitum RAP và phụ gia tái sinh để tạo thành bitum hỗn hợp theo mô tả ở **Bảng 2.1**. Về phương pháp trộn, phụ gia tái sinh thường được trộn trước với bitum mới nhưng cũng có thể được trộn với vật liệu RAP đã được gia nhiệt [121]. Theo báo cáo của Yin và các cộng sự [124], phụ gia tái sinh được trộn với bitum mới trước khi trộn với cốt liệu và RAP là phương pháp được áp dụng phổ biến tại các trạm trộn ở Mỹ hiện nay. Lý do là tại các trạm trộn, thiết bị cấp phụ gia tái sinh được kết nối với thiết bị cấp bitum và được đưa vào cùng lúc. Do hàm lượng phụ gia tái sinh sử dụng thấp nên nếu thêm vào RAP, có thể xảy ra hiện tượng phân tán không đều. Trong nghiên cứu này, phụ gia tái sinh được trộn với bitum mới trong 2 phút. Sau đó thêm bitum RAP vào, và tiếp tục trộn trong 2 phút (**Hình 2.5**). Quá trình trộn cơ học sử dụng thiết bị có cánh khuấy với tốc độ trung bình từ 100-200 vòng/phút (**Hình 2.6**).



**Hình 2.5. Các bước trộn phụ gia tái sinh với bitum**



**Hình 2.6. Quá trình trộn phụ gia tái sinh với bitum**

### **2.5.2. Phương pháp hoá già bitum**

Mục đích nghiên cứu là đánh giá ảnh hưởng của điều kiện hóa già cũng như hiệu quả của phụ gia tái sinh đến các tính chất của bitum hỗn hợp. Do vậy, mỗi loại bitum đều trải qua quá trình mô phỏng sự hoá già, bao gồm hoá già ngắn hạn và hoá già dài hạn. Trạng thái không hoá già là ngay sau khi hỗn hợp bitum được trộn xong.

#### **2.5.2.1. Hoá già ngắn hạn bitum**

Phương pháp màng mỏng trong lò quay (RTFO) được sử dụng để mô phỏng điều kiện hoá già ngắn hạn trên chất kết dính bitum trong phòng thí nghiệm theo tiêu chuẩn AASHTO T240 [29] (**Hình 2.7**). Các mẫu bitum được rót vào bình thủy tinh hình trụ rồi đưa lên giá khung quay trong buồng thiết bị RTFO. Các mẫu bitum được tiếp xúc với luồng không khí và nhiệt độ được duy trì 163°C trong 85 phút.



**Hình 2.7. Hoá già ngắn hạn RTFO**

#### **2.5.2.2. Hoá già dài hạn bitum**

Hoá già dài hạn của bitum được thực hiện theo phương pháp hóa già bình áp lực (PAV)

theo tiêu chuẩn AASHTO R28 [25]. Sau khi hoá già ngắn hạn RTFO, các mẫu bitum được sử dụng để thí nghiệm hoá già dài hạn. Các mẫu được đặt dưới áp suất 2,1 MPa và duy trì nhiệt độ 100°C trong 20 giờ để mô tả thí nghiệm hoá già dài hạn (Hình 2.8).



Hình 2.8. Hoá già dài hạn PAV

## 2.6. Thí nghiệm xác định độ kim lún và nhiệt độ hóa mềm

### 2.6.1. Phương pháp thí nghiệm

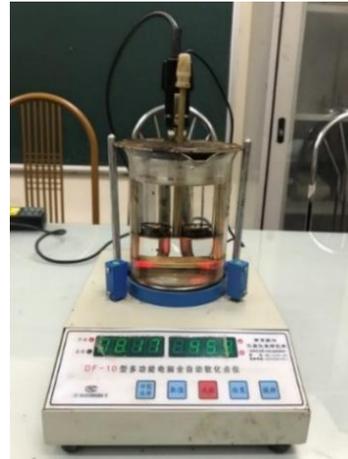
Để đánh giá sự thay đổi về các tính chất vật lý của bitum mới, bitum RAP và bitum hỗn hợp, thí nghiệm xác định độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm được thực hiện. Độ kim lún là chỉ tiêu dùng để đánh giá tính quán tính của bitum và dùng để phân loại mác bitum quán. Thí nghiệm đo độ kim lún được thực hiện ở nhiệt độ 25°C theo tiêu chuẩn ASTM D5 [39] (hoặc TCVN 7495:2005 [20]) (Hình 2.9).



Hình 2.9. Thí nghiệm xác định độ kim lún

Nhiệt độ hoá mềm là chỉ tiêu dùng để đánh giá tính ổn định nhiệt của bitum khi nhiệt độ

thay đổi. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của việc sử dụng phụ gia tái sinh đến khả năng chịu nhiệt độ của bitum, theo tiêu chuẩn ASTM D36 [37] (hoặc TCVN 7497:2005 [21]) (**Hình 2.10**). Thí nghiệm độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng, Trường Đại học GTVT.

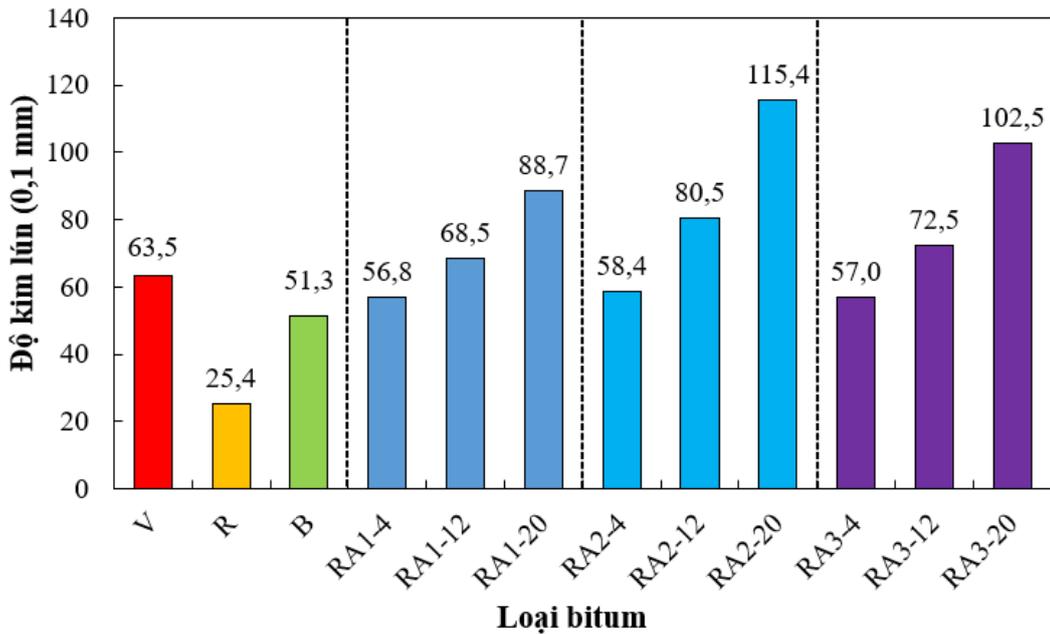


**Hình 2.10. Thí nghiệm xác định nhiệt độ hoá mềm**

### 2.6.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích

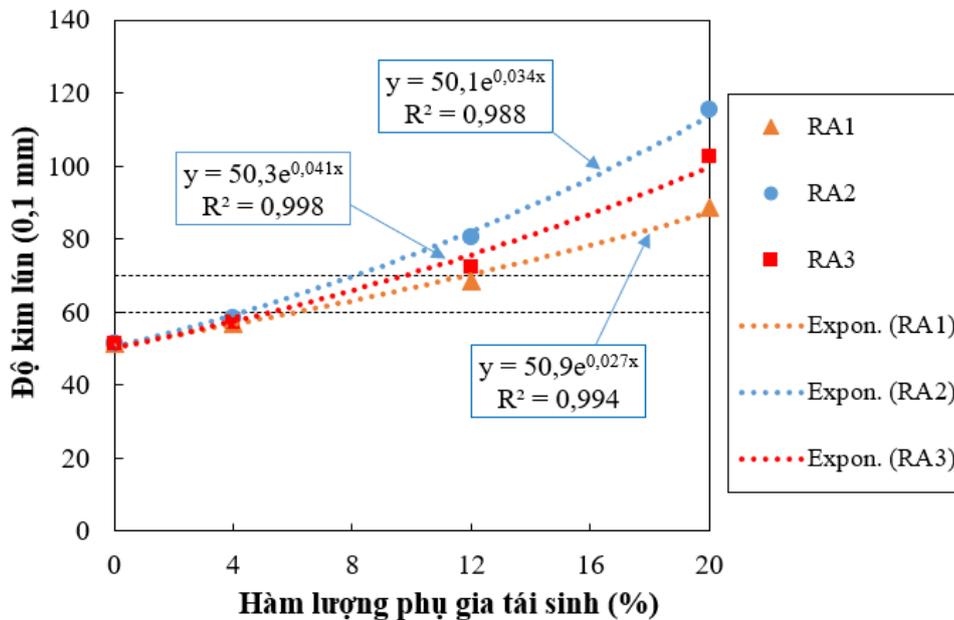
**Hình 2.11** thể hiện kết quả thí nghiệm đo độ kim lún cho các mẫu bitum 60/70, bitum RAP, và bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh ở các hàm lượng khác nhau. Có thể thấy rằng bitum RAP có sự suy giảm đáng kể về độ kim lún (25,4). Nguyên nhân dẫn đến sự suy giảm độ kim lún là do sự thay đổi thành phần các nhóm chất của bitum khi vật liệu RAP bị hoá già theo thời gian, như được báo cáo bởi Zadshir và các cộng sự [129]. Có một sự gia tăng đáng kể về hàm lượng của nhóm asphalt và giảm hàm lượng nhóm chất thơm trong bitum bị lão hóa, dẫn đến bitum trở nên cứng hơn [32].

Độ kim lún của bitum hỗn hợp (bao gồm bitum mới và bitum RAP) là 51,3 (0,1mm), không đạt được mục tiêu cấp độ kim lún 60/70. Tuy nhiên, khi thêm phụ gia tái sinh, giá trị độ kim lún của bitum tăng lên cùng với sự gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh từ 4 đến 20%. Bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA2 và RA3 cho giá trị độ kim lún cao hơn so với sử dụng phụ gia tái sinh RA1. Khi hàm lượng phụ gia tái sinh tăng từ 4% đến 20%, độ kim lún của bitum hỗn hợp tăng từ 58,4 lên 115,4 khi sử dụng phụ gia tái sinh RA2, tăng từ 57,0 lên 102,5 đối với phụ gia tái sinh RA3, và tăng từ 56,8 lên 88,7 đối với phụ gia tái sinh RA1.



Hình 2.11. Kết quả thí nghiệm độ kim lún của các loại bitum

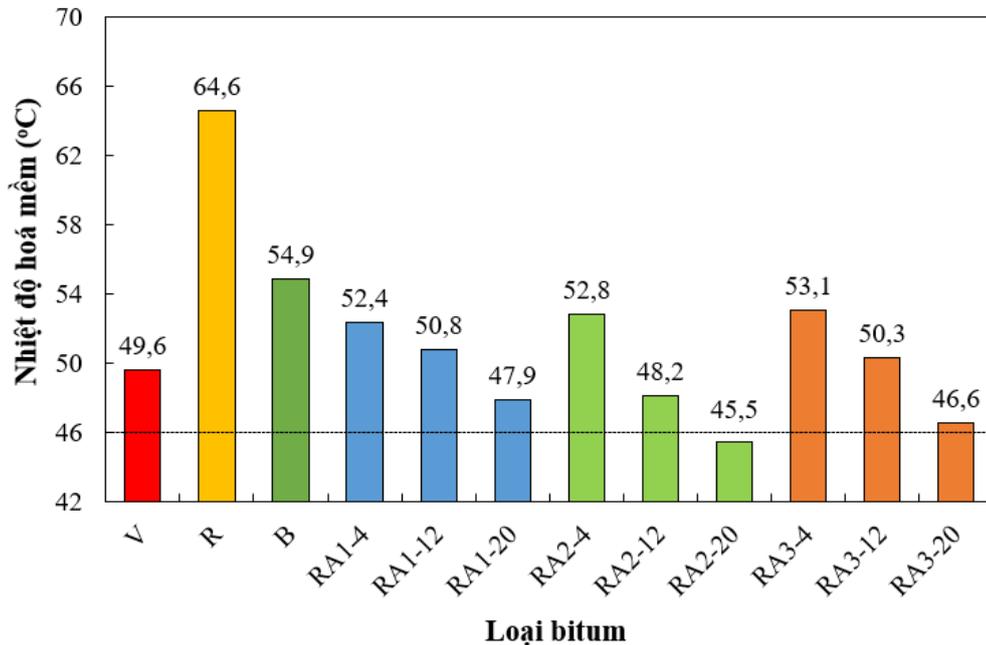
Ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia tái sinh đến độ kim lún của bitum hỗn hợp được thể hiện ở Hình 2.12. Kết quả cho thấy để đạt được độ kim lún tương đương bitum 60/70, phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ cần hàm lượng cao hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật. Kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu của Zaumanis và các cộng sự khi chỉ ra hiệu quả của phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật ở điều kiện ngắn hạn [133].



Hình 2.12. Ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia tái sinh đến độ kim lún

Hình 2.13 thể hiện kết quả thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm của bitum mới 60/70, bitum RAP và bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh. Như được thể hiện ở Hình 2.13, nhiệt

độ hoá mềm của bitum mới 60/70 là 49,6°C (lớn hơn yêu cầu nhiệt độ hoá mềm tối thiểu) và của bitum RAP là 64,6°C.



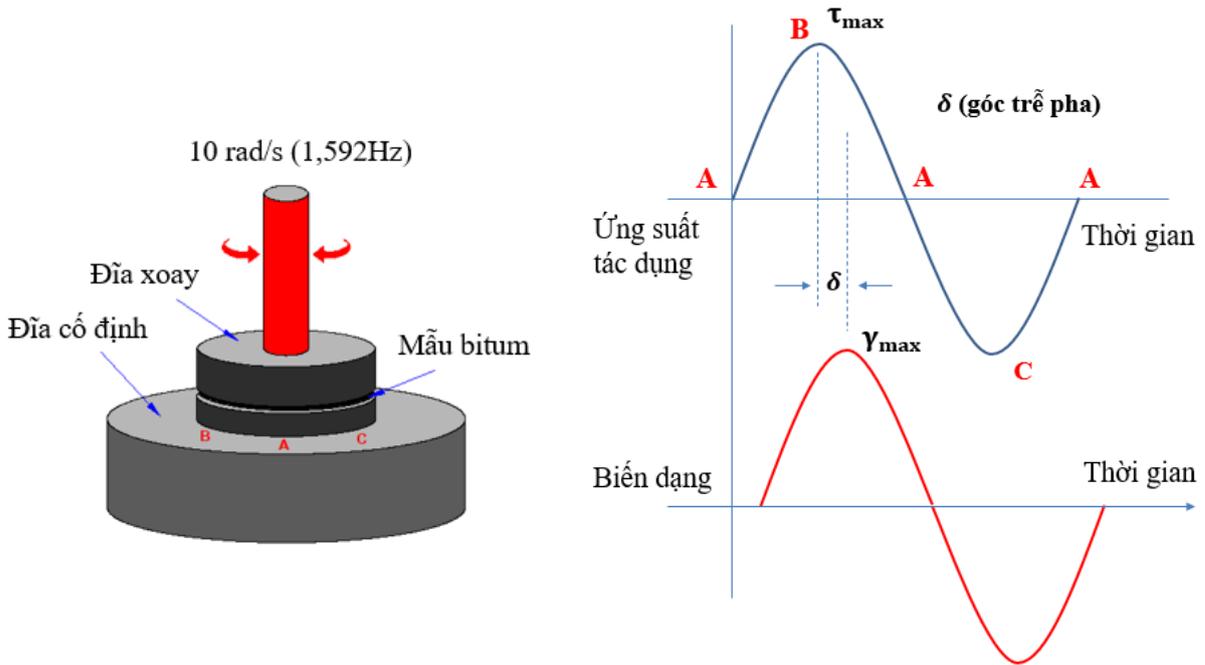
**Hình 2.13. Kết quả thí nghiệm nhiệt độ hoá mềm của các loại bitum**

Với bitum hỗn hợp không có phụ gia tái sinh, giá trị nhiệt độ hoá mềm cao nhất là 54,9°C, trong khi bitum hỗn hợp có phụ gia tái sinh thể hiện sự giảm nhiệt độ hoá mềm, đặc biệt thể hiện đáng kể khi sử dụng phụ gia tái sinh RA2. Khi hàm lượng phụ gia tái sinh tăng từ 4% đến 20%, nhiệt độ hóa mềm của bitum hỗn hợp có phụ gia tái sinh RA2 giảm từ 52,8°C xuống 45,5°C; giảm từ 53,1°C xuống 46,6°C đối với phụ gia tái sinh RA3 và giảm từ 52,4°C xuống 47,9°C đối với phụ gia tái sinh RA1. Như vậy, có thể thấy rằng, phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật thể hiện khả năng làm mềm bitum cao hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ.

## 2.7. Thí nghiệm cắt động lưu biến của bitum (DSR)

### 2.7.1. Phương pháp thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, các đặc tính lưu biến của bitum được xác định thông qua thí nghiệm cắt động lưu biến (Dynamic Shear Rheometer - DSR) theo tiêu chuẩn AASHTO T315 [30] (hoặc TCVN 11808:2017 [12]). Thí nghiệm DSR đưa ra hai tham số quan trọng là giá trị mô đun cắt động  $|G^*|$  (kPa) và góc trễ pha  $\delta$  (độ). **Hình 2.14** mô tả thí nghiệm cắt động lưu biến của bitum và sự trễ pha giữa ứng suất và biến dạng.

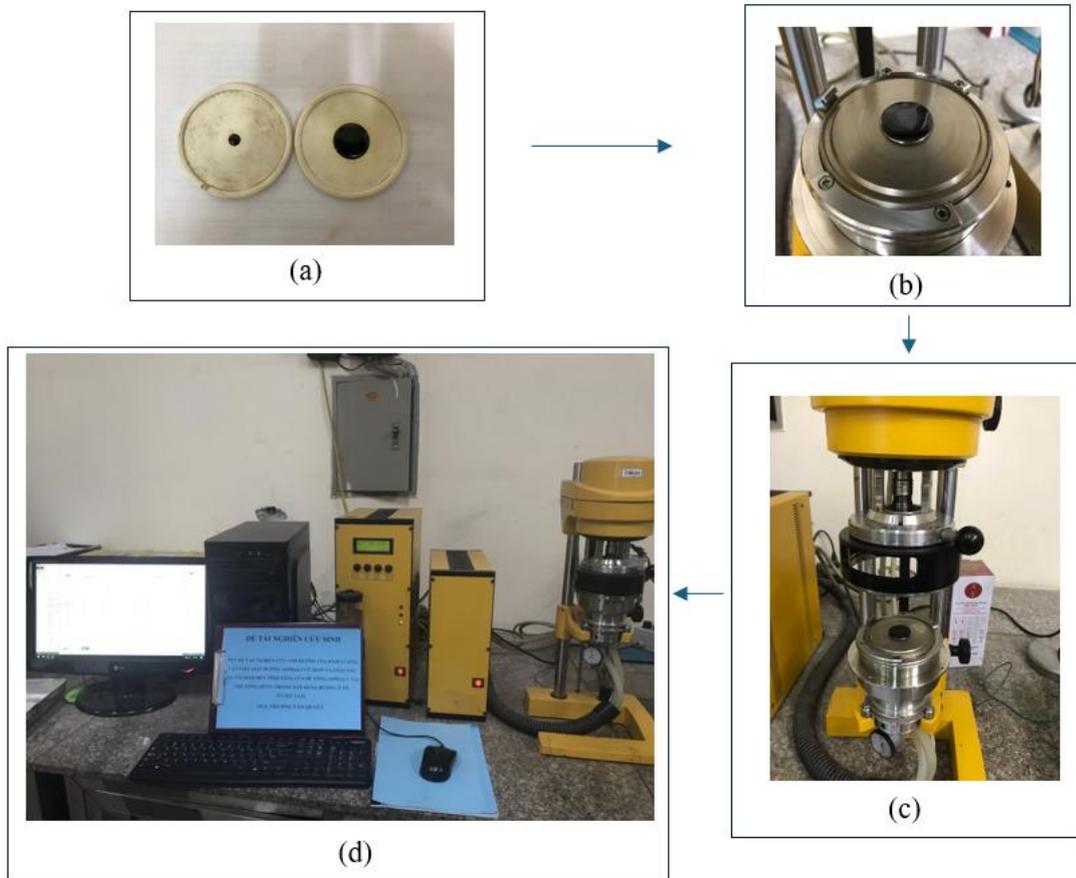


**Hình 2.14. Mô tả thí nghiệm cắt động lưu biến**

Giá trị mô đun cắt động là một chỉ tiêu đặc trưng cho độ cứng và khả năng chống biến dạng do tải trọng của bitum. Mô đun cắt động và góc trễ pha cho thấy khả năng chống biến dạng cắt trượt của bitum trong vùng làm việc đàn nhớt tuyến tính. Mẫu thí nghiệm có hai dạng bao gồm mẫu đường kính 25mm với chiều dày 1mm và mẫu đường kính 8mm với chiều dày 2mm (**Hình 2.15a**). Khi thí nghiệm, mẫu thử nghiệm được đặt giữa hai tấm đĩa bằng kim loại nằm song song đồng tâm (**Hình 2.15b** và **Hình 2.15c**). Trong quá trình thử nghiệm, một đĩa sẽ xoay điều hoà với đĩa còn lại gắn cố định với tần số và ứng suất tác dụng được lựa chọn (thí nghiệm không chế ứng suất). Mức ứng suất yêu cầu khi thử nghiệm phụ thuộc vào loại bitum thí nghiệm. **Hình 2.15d** thể hiện quá trình thí nghiệm cắt động lưu biến DSR.

Trong nghiên cứu này, mô đun cắt động và góc trễ pha được xác định để đánh giá đặc tính lưu biến của các loại bitum sử dụng các loại phụ gia tái sinh khác nhau. Thí nghiệm được tiến hành ở tần số 1,592 Hz và một dải nhiệt độ khác nhau để xác định cấp của bitum theo tiêu chuẩn AASHTO M320 [23]. Kích thước mẫu cho thí nghiệm DSR cũng thay đổi dựa trên quá trình hoá già. Đối với điều kiện không hoá già và hoá già ngắn hạn (RTFO) mẫu bitum có đường kính 25 mm với chiều dày 1 mm được sử dụng, trong khi đối với điều kiện hoá già dài hạn (PAV), sử dụng mẫu có đường kính 8 mm với chiều dày 2 mm. Thí nghiệm cắt động lưu biến được thực hiện tại Phòng thí nghiệm LAS-XD

1256, Trung tâm Khoa học Công nghệ GTVT, Trường Đại học GTVT.



**Hình 2.15. Thí nghiệm cắt động lưu biến DSR**

### 2.7.2. Xây dựng đường cong chủ của mô đun cắt động $|G^*|$

Có rất nhiều mô hình được xây dựng để dự đoán ứng xử đàn nhớt tuyến tính của bitum và bê tông asphalt thông qua đường cong chủ (master curve) [93]. Đường cong chủ có thể được mô hình hóa thông qua các mô hình như Maxwell, mô hình Kelvin, mô hình Huet-Sayegh và mô hình 2S2P1D v.v. Nhiều nghiên cứu đã áp dụng mô hình 2S2P1D để mô hình hóa đường cong chủ cho mô đun cắt động  $|G^*|$  hoặc mô đun động  $|E^*|$  bởi mô hình này có tương quan cao với kết quả thực nghiệm và có thể mô phỏng ứng xử đàn nhớt của hầu hết các vật liệu bitum trong một phạm vi rộng của tần số và nhiệt độ [94], [95].

Đường cong chủ của mô đun cắt động  $|G^*|$  trong phạm vi đàn nhớt tuyến tính được xây dựng từ dữ liệu thu thập trong một phạm vi nhiệt độ và tần số. Mục đích của mô hình hóa đường cong chủ  $|G^*|$  là với số lượng kết quả thực nghiệm hữu hạn, có thể mô phỏng

được sự thay đổi giá trị  $|G^*|$  theo nhiệt độ hoặc tần số, từ đó có thể xác định được giá trị  $|G^*|$  của bitum ở bất kỳ nhiệt độ/tần số nào. Nhiệt độ tham chiếu được lựa chọn và dữ liệu ở tất cả các nhiệt độ khác được dịch chuyển theo tần số cho đến khi tạo thành một đường cong trơn hợp nhất. Trong nghiên cứu này, mô hình 2S2P1D được áp dụng để mô hình hóa đường cong chủ của mô đun cắt động  $|G^*|$ . Nhiệt độ thí nghiệm được lựa chọn lần lượt là 5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 65°C và 75°C, và tại mỗi nhiệt độ, giá trị  $|G^*|$  được xác định ở 6 tần số là 0,05Hz; 0,1Hz; 0,5Hz; 1,592Hz; 5Hz và 10Hz. Mô hình 2S2P1D bao gồm 7 tham số, giá trị mô đun cắt phức  $G^*$  được xác định theo công thức (2.2) [95].

$$G^*(\omega) = G_o + \frac{G_g - G_o}{1 + \alpha(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2.2)$$

Trong đó:  $i$  là số phức với  $i^2 = -1$ ,  $\omega$  là tần số (Hz),  $k, h$  là các số mũ với  $0 < k < h < 1$ ,  $\alpha$  và  $\beta$  là các hằng số, với  $\beta$  được xác định theo công thức (2.3).

$$\eta = \frac{(G_g - G_o)}{\beta\tau} \quad (2.3)$$

Với  $\eta$  là độ nhớt newton và  $\tau$  là đặc tính thời gian, là hàm của nhiệt độ. Giá trị của  $\tau$  có thể lấy gần đúng theo công thức (2.4).

$$\tau = a_T \times \tau_o \quad (2.4)$$

Ở đó  $a_T$  là hệ số dịch chuyển theo nhiệt độ,  $\tau_o$  là đặc tính thời gian tại nhiệt độ tham chiếu, là hàm của nhiệt độ.

$G_o$  là mô đun cắt động ứng với tần số tác dụng của tải trọng rất thấp ( $\omega \rightarrow 0$ ) và  $G_g$  là giá trị mô đun cắt động ứng với tần số tác dụng của tải trọng rất cao ( $\omega \rightarrow \infty$ ).

Công thức (2.2) có thể được chia làm 2 phần và viết lại như sau:

$$\begin{aligned} G^*(\omega) &= \frac{G_g - G_o}{1 + A + iB} \\ &= G_o + \frac{(G_g - G_o) \times (1 + A(\omega) - iB(\omega))}{(1 + A(\omega))^2 + B^2(\omega)} \\ &= \left[ G_o + \frac{(G_g - G_o) \times (1 + A(\omega))}{(1 + A(\omega))^2 + B^2(\omega)} \right] + i \left[ \frac{(G_g - G_o) \times (-B(\omega))}{(1 + A(\omega))^2 + B^2(\omega)} \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Trong đó: 
$$A(\omega) = \alpha(\omega\tau)^{-k} \times \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{-h} \times \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$B(\omega) = -(\omega\beta\tau)^{-1} \times \alpha(\omega\tau)^{-k} \times \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) - (\omega\tau)^{-h} \times \sin\left(\frac{h\pi}{2}\right) \quad (2.7)$$

Công thức (2.5) có thể tóm tắt lại như sau:

$$G^*(\omega) = G_1(\omega) + iG_2(\omega) \quad (2.8)$$

Cuối cùng, mô đun cắt động  $|G^*|$  của bitum được xác định từ mô hình 2S2P1D theo công thức:

$$|G^*| = \sqrt{G_1^2 + G_2^2} \quad (2.9)$$

Để đánh giá chất lượng của mô hình 2S2P1D, phương pháp thống kê được sử dụng để đánh giá thông qua tỷ số độ lệch tiêu chuẩn ( $S_e/S_y$ ) và hệ số xác định  $R^2$ . Tỷ số độ lệch tiêu chuẩn ( $S_e/S_y$ ) được xác định theo công thức (2.10) và (2.11)

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{(n - q)}} \quad (2.10)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{(n - 1)}} \quad (2.11)$$

Trong đó:

$S_e$  là sai số tiêu chuẩn của các giá trị dự báo;  $S_y$  là độ lệch chuẩn của các kết quả thực nghiệm,  $n$  là số lượng mẫu và  $q$  là số các biến độc lập trong mô hình.

$Y$  là giá trị thí nghiệm;  $\bar{Y}$  là giá trị trung bình của các kết quả thí nghiệm và  $\hat{Y}$  là các giá trị dự báo theo mô hình.

Hệ số xác định  $R^2$  được xác định theo công thức (2.12).

$$R^2 = 1 - \frac{(n - q)}{(n - 1)} \times \left(\frac{S_e}{S_y}\right)^2 \quad (2.12)$$

Mô hình dự báo hoàn toàn khớp với kết quả thực nghiệm khi giá trị  $R^2 = 1$ . Tiêu chí đánh giá sự phù hợp của mô hình dựa theo giá trị  $S_e/S_y$  và  $R^2$ , và được thể hiện ở **Bảng 2.5**.

**Bảng 2.5. Tiêu chí đánh giá mức độ phù hợp của mô hình [95]**

Tiêu chí	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub> /S <sub>y</sub>
Rất tốt	≥ 0,90	≤ 0,35
Tốt	0,70 - 0,89	0,36 - 0,55
Khá	0,40 - 0,69	0,56 - 0,75
Thấp	0,20 - 0,39	0,76 - 0,89
Rất thấp	≤ 0,19	≥ 0,9

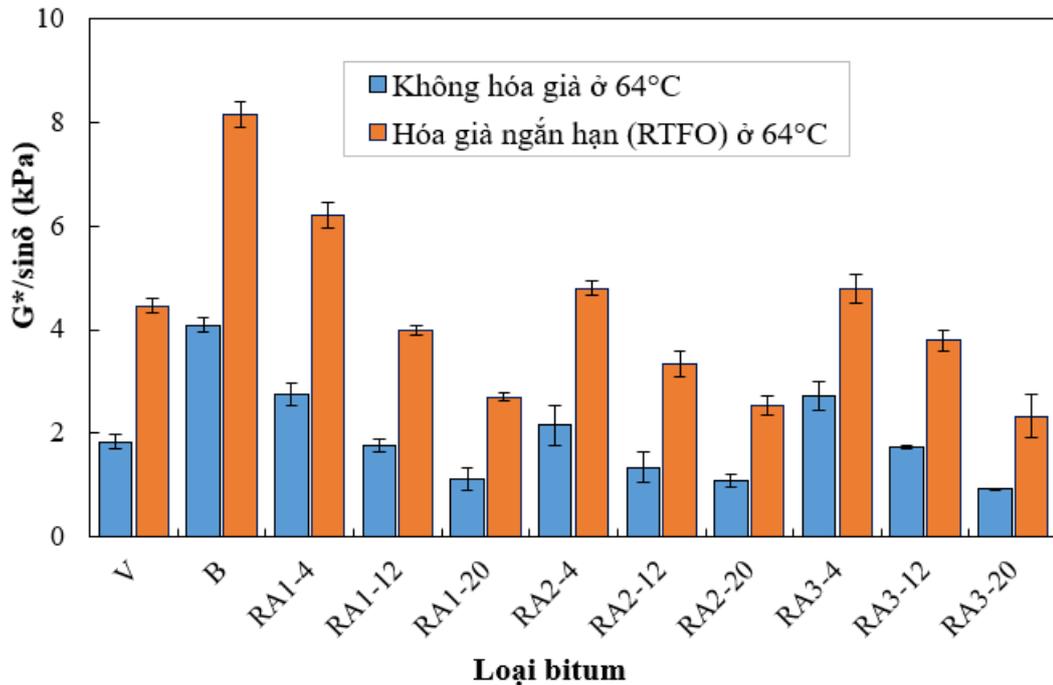
### 2.7.3. Kết quả thí nghiệm và phân tích

#### 2.7.3.1. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến thông số $G^*/\sin\delta$ và $G^*\sin\delta$

Vấn đề nứt do mỏi trở thành mối quan tâm chính ở thời gian khai thác sau của mặt đường trong khi hằn lún vệt bánh xe là mối quan tâm chính trong thời gian khai thác ban đầu. Yuan Zhang và các cộng sự [140] chỉ ra rằng, thông số từ thí nghiệm DSR có mối liên hệ với tính năng kháng hằn lún và tính năng kháng nứt của bê tông asphalt. Giá trị  $G^*/\sin\delta$  có thể dự đoán tính năng kháng hằn lún ở nhiệt độ cao trong khi giá trị  $G^*\sin\delta$  có thể dự đoán khả năng kháng nứt ở nhiệt độ trung bình và nhiệt độ thấp. Trong nghiên cứu này, bitum 60/70 sử dụng tương ứng với loại bitum có cấp PG 64-xx (PGH = 68,6°C). Giá trị nhiệt độ cao là 64°C và nhiệt độ trung bình là 25°C được lựa chọn để phân tích ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến thông số  $G^*/\sin\delta$  và  $G^*\sin\delta$ .

##### a. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến thông số $G^*/\sin\delta$ tại nhiệt độ cao

**Hình 2.16** thể hiện sự thay đổi giá trị  $G^*/\sin\delta$  tại nhiệt độ 64°C với các loại bitum khác nhau ở điều kiện không hóa già và hóa già ngắn hạn (RTFO). Đối với bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA1, giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở 64°C giảm từ 32,6% đến 73,0% khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh từ 4% đến 20%, tương ứng. Khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh từ 4% đến 20%, giá trị  $G^*/\sin\delta$  giảm từ 47,1% đến 79,4% đối với phụ gia tái sinh RA2 và giảm từ 33,4% đến 75,4% đối với phụ gia tái sinh RA3. Như vậy, sử dụng phụ gia tái sinh làm giảm giá trị  $G^*/\sin\delta$  của bitum hỗn hợp.



**Hình 2.16. Giá trị  $G^*/\sin\delta$  của các loại bitum ở nhiệt độ 64°C**

Phân tích ANOVA chỉ ra rằng, khả năng làm mềm bitum phụ thuộc vào cả loại và hàm lượng phụ gia tái sinh (giá trị P-value < 0,05) (**Bảng 2.6**). So sánh Tukey chỉ ra ảnh hưởng khác nhau về loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến khả năng làm mềm bitum hỗn hợp (**Bảng 2.7**). Các chữ cái viết hoa (A, B, ...) trong mỗi yếu tố ảnh hưởng biểu thị kết quả phân tích nhóm, với các chữ cái giống nhau biểu thị không có sự khác biệt về mặt thống kê và các chữ cái khác nhau biểu thị có sự khác biệt thống kê. Kết quả cho thấy, khả năng làm mềm bitum phụ thuộc đáng kể vào hàm lượng phụ gia tái sinh sử dụng. Bitum hỗn hợp dùng phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) cho khả năng làm mềm cao hơn so với sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1).

**Bảng 2.6. Phân tích ANOVA giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở 64°C (điều kiện không hóa già)**

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Loại phụ gia tái sinh	2	0,2428	0,12142	5,72	0,041
Hàm lượng phụ gia tái sinh	3	16,3424	5,4447	256,45	< 0,001
Error	6	0,1275	0,02124		
Tổng	11	16,7127			

**Bảng 2.7. So sánh Tukey giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở 64°C (điều kiện không hóa già)**

Loại phụ gia tái sinh	N	Trung bình	Nhóm
RA1	4	2,42728	A
RA3	4	2,38536	A B
RA2	4	2,10674	B
Hàm lượng phụ gia tái sinh			
0	3	4,08400	A
4	3	2,54445	B
12	3	1,61493	C
20	3	0,98246	D

**Hình 2.16** cũng chỉ ra rằng sự thay đổi độ cứng của bitum tỷ lệ thuận với cả bitum không hoá già và hoá già ngắn hạn RTFO. Tuy nhiên, ở điều kiện hóa già RTFO, kết quả phân tích ANOVA cho thấy không có sự khác biệt về ảnh hưởng của loại phụ gia tái sinh đến giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở 64°C (giá trị P-value > 0,05) (**Bảng 2.8**). Như vậy, liên quan đến khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe, hàm lượng phụ gia tái sinh RA2 và RA3 cần được quan tâm vì nó làm mềm đáng kể hỗn hợp bitum so với phụ gia tái sinh RA1.

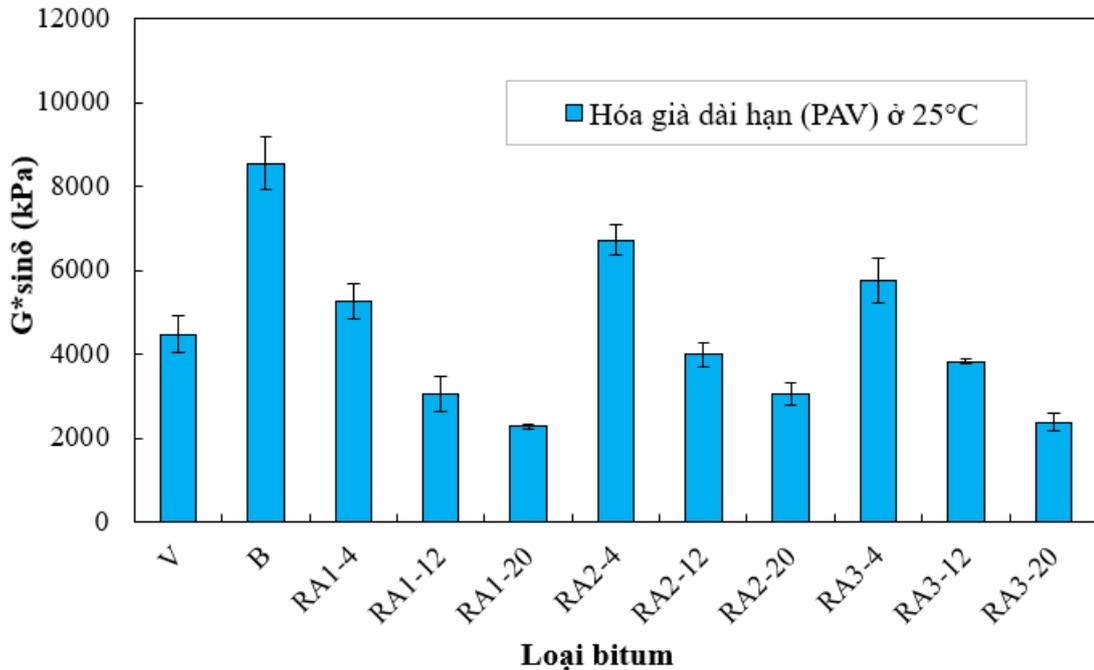
**Bảng 2.8. Phân tích ANOVA giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở 64°C (RTFO)**

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Loại phụ gia tái sinh	2	1,0474	0,5237	3,94	0,081
Hàm lượng phụ gia tái sinh	3	56,2959	18,7653	141,00	< 0,001
Error	6	0,7985	0,1331		
Tổng	11	54,1419			

***b. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến thông số  $G^*/\sin\delta$  ở nhiệt độ trung bình***

Theo tiêu chuẩn AASHTO M320 [23] về phân loại bitum theo cấp PG, giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở điều kiện hóa già dài hạn PAV không được vượt quá 5000 kPa. **Hình 2.17** thể hiện sự thay đổi giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở 25°C với các loại bitum khác nhau và ở điều kiện hóa già dài

hạn. Kết quả chỉ ra rằng, với bitum hỗn hợp không có phụ gia tái sinh (B), giá trị  $G^* \sin \delta$  cao hơn đáng kể so với mẫu bitum mới 60/70 (V). Tuy nhiên, khi sử dụng phụ gia tái sinh, giá trị  $G^* \sin \delta$  có xu hướng giảm và thấp hơn so với bitum 60/70 ở hàm lượng 12%.



**Hình 2.17.** So sánh giá trị  $G^* \sin \delta$  của các loại bitum ở nhiệt độ 25°C

Giá trị  $G^* \sin \delta$  của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh với hàm lượng 12% và 20% đều thấp hơn ngưỡng giới hạn trong khi ở hàm lượng 4%, giá trị này là cao hơn. Vì vậy, có thể thấy rằng, phụ gia tái sinh có hiệu quả làm giảm độ cứng của bitum hỗn hợp sau khi hóa già dài hạn. Khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh từ 4% đến 20%, giá trị  $G^* \sin \delta$  có xu hướng giảm. Mức độ giảm từ 38,4% đến 73,4% đối với phụ gia tái sinh RA1, từ 21,4% đến 64,4% đối với phụ gia tái sinh RA2 và giảm từ 32,6% đến 72,1% đối với phụ gia tái sinh RA3. Như vậy, mức độ hóa già của bitum giảm khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh, dẫn đến khả năng kháng nứt mỏi sẽ gia tăng.

Phân tích ANOVA cho thấy, hàm lượng phụ gia tái sinh có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng làm mềm bitum trong điều kiện hóa già dài hạn (**Bảng 2.9**). Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, giá trị  $G^* \sin \delta$  của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1) thấp hơn so với sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2 và RA3). Như vậy, có thể thấy rằng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1) giữ được khả năng trẻ hóa tốt nhất sau khi trải qua quá trình hóa già dài hạn.

**Bảng 2.9. Phân tích ANOVA giá trị  $G^*\sin\delta$  ở 25°C (PAV)**

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Loại phụ gia tái sinh	2	1620354	810177	5,93	0,038
Hàm lượng phụ gia tái sinh	3	64901484	21633828	158,43	< 0,001
Error	6	819327	136554		
Tổng	11	67341165			

**2.7.3.2. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến cấp PG của bitum**

Mục tiêu chính của việc sử dụng phụ gia tái sinh là tối đa hóa việc sử dụng vật liệu RAP trong hỗn hợp asphalt tái chế, từ đó thay thế một phần bitum mới nhưng hỗn hợp asphalt vẫn đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật. Tối ưu hóa hàm lượng phụ gia tái sinh cần được quan tâm vì hàm lượng phụ gia tái sinh cao hơn có thể làm giảm khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe, trong khi hàm lượng thấp hơn có thể làm cho hỗn hợp asphalt trở nên cứng và dễ bị nứt ở nhiệt độ thấp. Arámbula-Mercado và cộng sự [35] báo cáo rằng xác định hàm lượng phụ gia tái sinh để khôi phục giá trị cấp đúng PG ở nhiệt độ cao (PGH) trước vì nó sẽ đảm bảo khôi phục cả cấp PG ở nhiệt độ thấp (PGL) và PG ở nhiệt độ trung bình (PGI). Trong nghiên cứu này, giới hạn hàm lượng của phụ gia tái sinh được xác định để đảm bảo khả năng kháng hằn lún (khôi phục giá trị PGH). Theo tiêu chuẩn ASTM D7643 [40], giá trị PGH và PGI được xác định bằng cách nội suy từ các giá trị  $G^*/\sin\delta$  và  $G^*\sin\delta$  tương ứng, theo công thức (2.13), (2.14) và (2.15).

Đối với điều kiện không hoá già:

$$PGH = T_1 + \frac{\log_{10}(1,0) - \log_{10}(G_1^*/\sin\delta_1)}{\log_{10}(G_2^*/\sin\delta_2) - \log_{10}(G_1^*/\sin\delta_1)} \times (T_2 - T_1) \quad (2.13)$$

Đối với điều kiện hoá già ngắn hạn (RTFO):

$$PGH = T_1 + \frac{\log_{10}(2,2) - \log_{10}(G_1^*/\sin\delta_1)}{\log_{10}(G_2^*/\sin\delta_2) - \log_{10}(G_1^*/\sin\delta_1)} \times (T_2 - T_1) \quad (2.14)$$

Trong đó:

$T_1, T_2$  là nhiệt độ thí nghiệm ứng với  $G_1^*/\sin\delta_1 > 1,0$  kPa và  $G_2^*/\sin\delta_2 < 1,0$  kPa

$T_1, T_2$  là nhiệt độ thí nghiệm ứng với  $G^*_{1'}/\sin\delta_{1'} > 2,2 \text{ kPa}$  và  $G^*_{2'}/\sin\delta_{2'} < 2,2 \text{ kPa}$

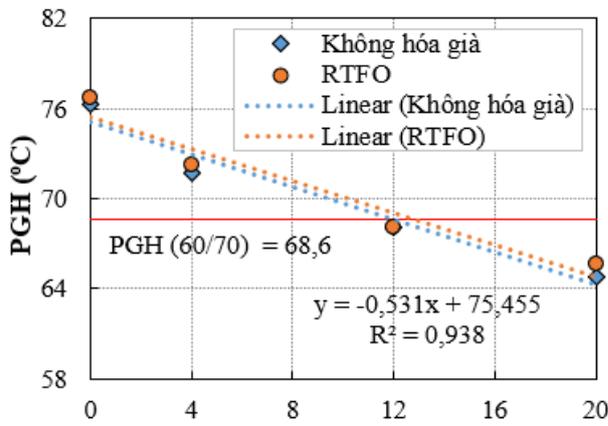
Đối với điều kiện hoá già dài hạn (PAV):

$$PGI = T_{1''} + \frac{\log_{10}(5000) - \log_{10}(G^*_{1''}\sin\delta_{1''})}{\log_{10}(G^*_{2''}\sin\delta_{2''}) - \log_{10}(G^*_{1''}\sin\delta_{1''})} \times (T_{2''} - T_{1''}) \quad (2.15)$$

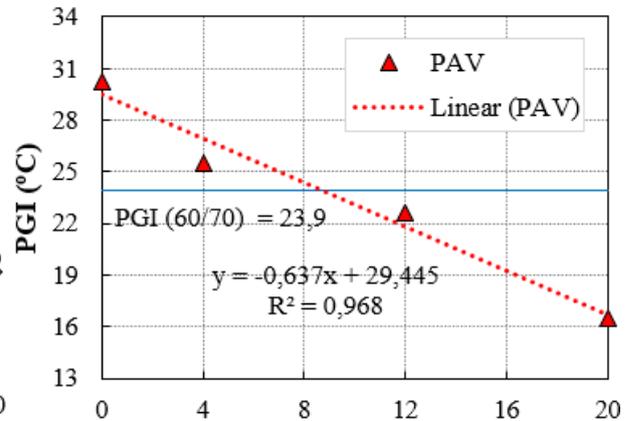
Trong đó:

$T_{1''}, T_{2''}$  là nhiệt độ thí nghiệm ứng với  $G^*_{1''}\sin\delta_{1''} > 5000 \text{ kPa}$  và  $G^*_{2''}\sin\delta_{2''} < 5000 \text{ kPa}$

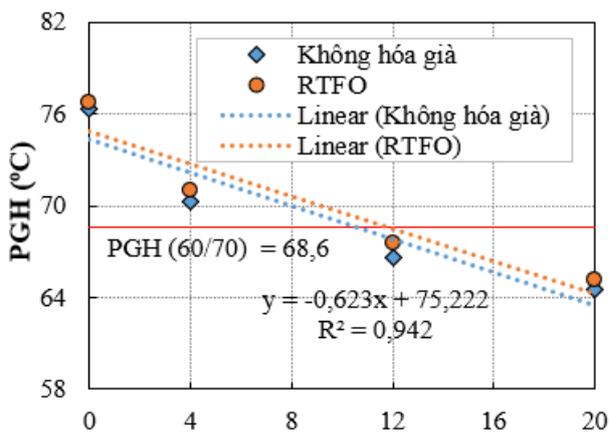
Các giá trị PGH và PGI được sử dụng để xây dựng phương trình hồi quy cho từng loại phụ gia tái sinh (**Hình 2.18**). Kết quả cho thấy, khi sử dụng phụ gia tái sinh với hàm lượng 12%, bitum hỗn hợp được trẻ hóa có cấp PG ở nhiệt độ cao tương đương hoặc thấp hơn so với bitum mới 60/70 ở điều kiện không hóa già và hóa già ngắn hạn. Kết quả này thể hiện đúng bản chất vai trò của phụ gia tái sinh giúp làm giảm độ nhớt và độ cứng cũng như tăng độ dẻo của bitum cũ.



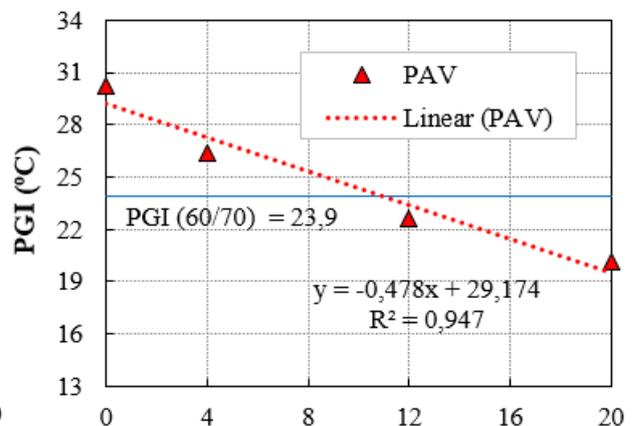
(a) Hàm lượng phụ gia tái sinh RA1 (%)



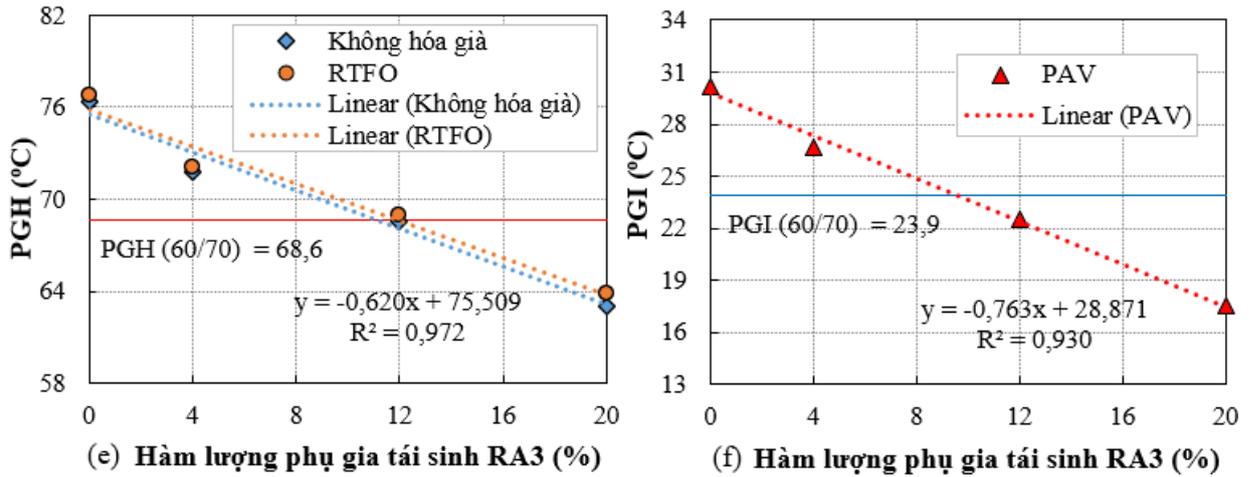
(b) Hàm lượng phụ gia tái sinh RA1 (%)



(c) Hàm lượng phụ gia tái sinh RA2 (%)



(d) Hàm lượng phụ gia tái sinh RA2 (%)



**Hình 2.18. Giá trị PGH và PGI của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh**

Hình 2.18a, Hình 2.18c, Hình 2.18e chỉ ra rằng trong số ba loại phụ gia tái sinh được sử dụng trong nghiên cứu này, phụ gia tái sinh RA2 và RA3 (gốc dầu thực vật) thể hiện vai trò lớn trong việc giảm cấp PG ở nhiệt độ cao (xét ở điều kiện không hóa già và hóa già ngắn hạn). Trong trường hợp hóa già dài hạn, các loại phụ gia tái sinh cũng thể hiện khả năng làm giảm sự lão hóa bitum so với trường hợp không có phụ gia tái sinh (Hình 2.18b, Hình 2.18d, Hình 2.18f).

Có thể thấy rằng, để đạt được cấp PG ở nhiệt độ trung bình tương tự như bitum mới 60/70 (PGI = 23,9°C), bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA2 và RA3 cần hàm lượng lớn hơn so với phụ gia tái sinh RA1 khi xét đến điều kiện hóa già dài hạn. Các kết quả trong Hình 2.18 cũng cho thấy phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ có hiệu quả nhất trong số ba loại phụ gia tái sinh trong việc phục hồi và duy trì các tính chất của bitum dưới ảnh hưởng của điều kiện hóa già dài hạn. Dựa vào giá trị PGH và PGI có thể thấy rằng, giới hạn hàm lượng đối với cả ba loại phụ gia tái sinh không nên vượt quá 12% để đạt được cấp PG tương tự như bitum mới 60/70.

#### 2.7.4. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến đường cong chủ $|G^*|$

Dữ liệu mô đun cắt động  $|G^*|$  của các loại bitum khác nhau được thu thập từ thí nghiệm ở 8 nhiệt độ thí nghiệm (5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 65°C, 75°C), 6 tần số thí nghiệm (0,05Hz; 0,1Hz; 0,5Hz; 1,592Hz; 5Hz; 10Hz) và 3 điều kiện hóa già (không hóa già, RTFO, PAV). Kết quả phân tích ANOVA cho thấy, việc bổ sung phụ gia tái sinh đã làm giảm đáng kể độ cứng ( $|G^*|$  giảm) ở tất cả các nhiệt độ/tần số và ở các điều kiện hóa già khác nhau (Bảng 2.10). Các yếu tố gồm hàm lượng phụ gia tái sinh, điều kiện

hóa già, nhiệt độ và tần số thí nghiệm đều có ảnh hưởng đến mô đun cắt động  $|G^*|$  ( $P$ -value  $< 0,05$ ). Cả ba loại phụ gia tái sinh đều thể hiện khả năng làm mềm bitum cũ trong vật liệu RAP, không có sự khác biệt thống kê được chỉ ra giữa ba loại phụ gia tái sinh.

**Bảng 2.10. Phân tích ANOVA mô đun cắt động  $|G^*|$**

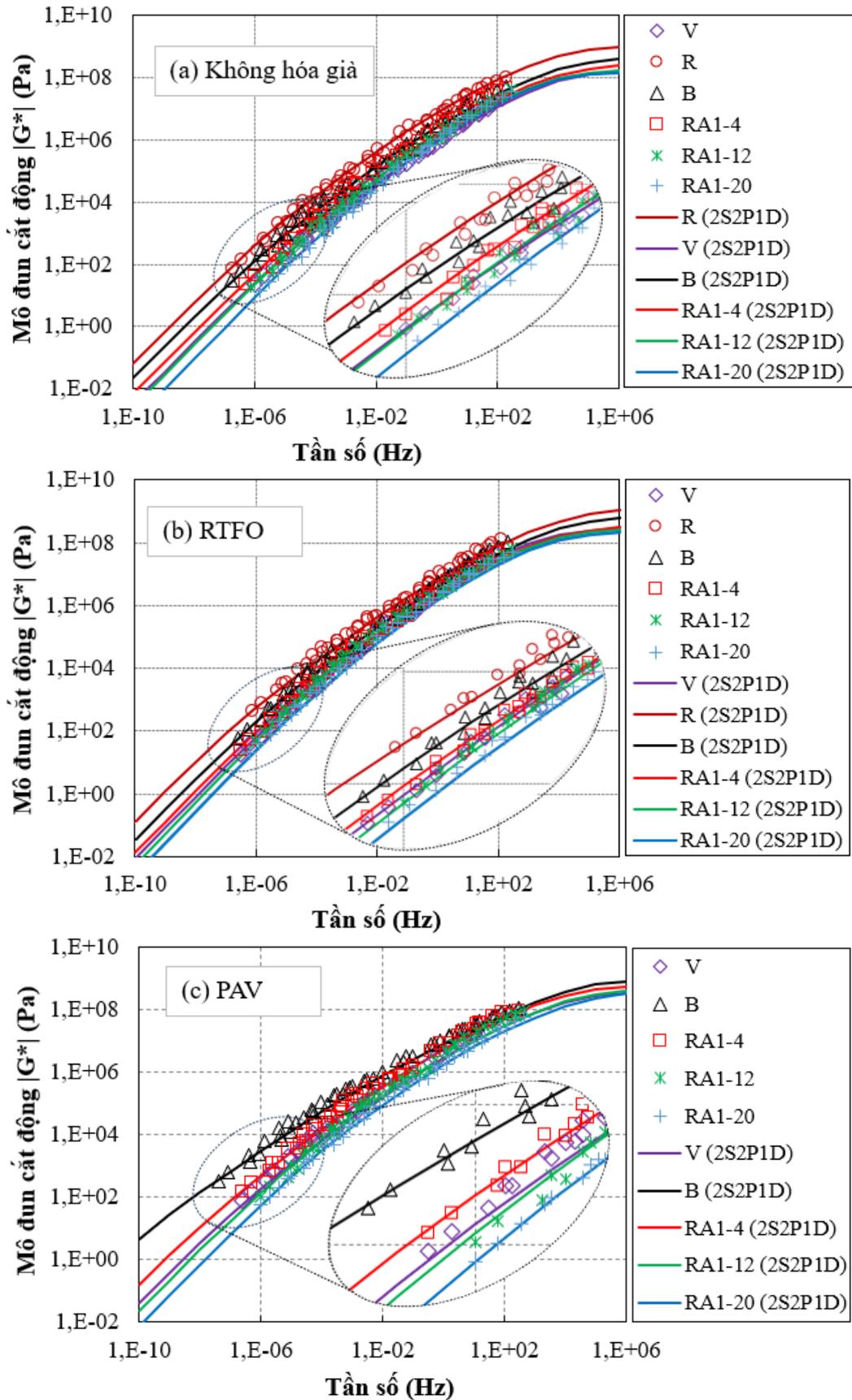
Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	19	2,51910E+17	1,32584E+16	112,03	< 0,001
Linear	19	2,51910E+17	1,32584E+16	112,03	< 0,001
Loại phụ gia tái sinh	2	2,19270E+13	1,09635E+13	0,09	0,912
Hàm lượng	3	6,23284E+15	2,07761E+15	17,56	< 0,001
Điều kiện hóa già	2	1,27350E+16	6,36751E+15	53,81	< 0,001
Nhiệt độ	7	1,82884E+17	2,61263E+16	220,77	< 0,001
Tần số	5	5,00355E+16	1,00071E+16	84,56	< 0,001
Error	1708	2,02130E+17	1,18343E+14		
Tổng	1727	4,54040E+17			

Trong đường cong chủ, mô đun cắt động  $|G^*|$  được xây dựng theo tần số thay đổi. Nhiệt độ tham chiếu được lựa chọn để xây dựng là 25°C. Các tham số của mô hình đường cong chủ được thể hiện ở **Bảng 2.11**. Đường cong chủ  $|G^*|$  của bitum hỗn hợp sử dụng ba loại phụ gia tái sinh với các hàm lượng khác nhau và ở các điều kiện hóa già khác nhau được thể hiện ở **Hình 2.19**, **Hình 2.20** và **Hình 2.21**.

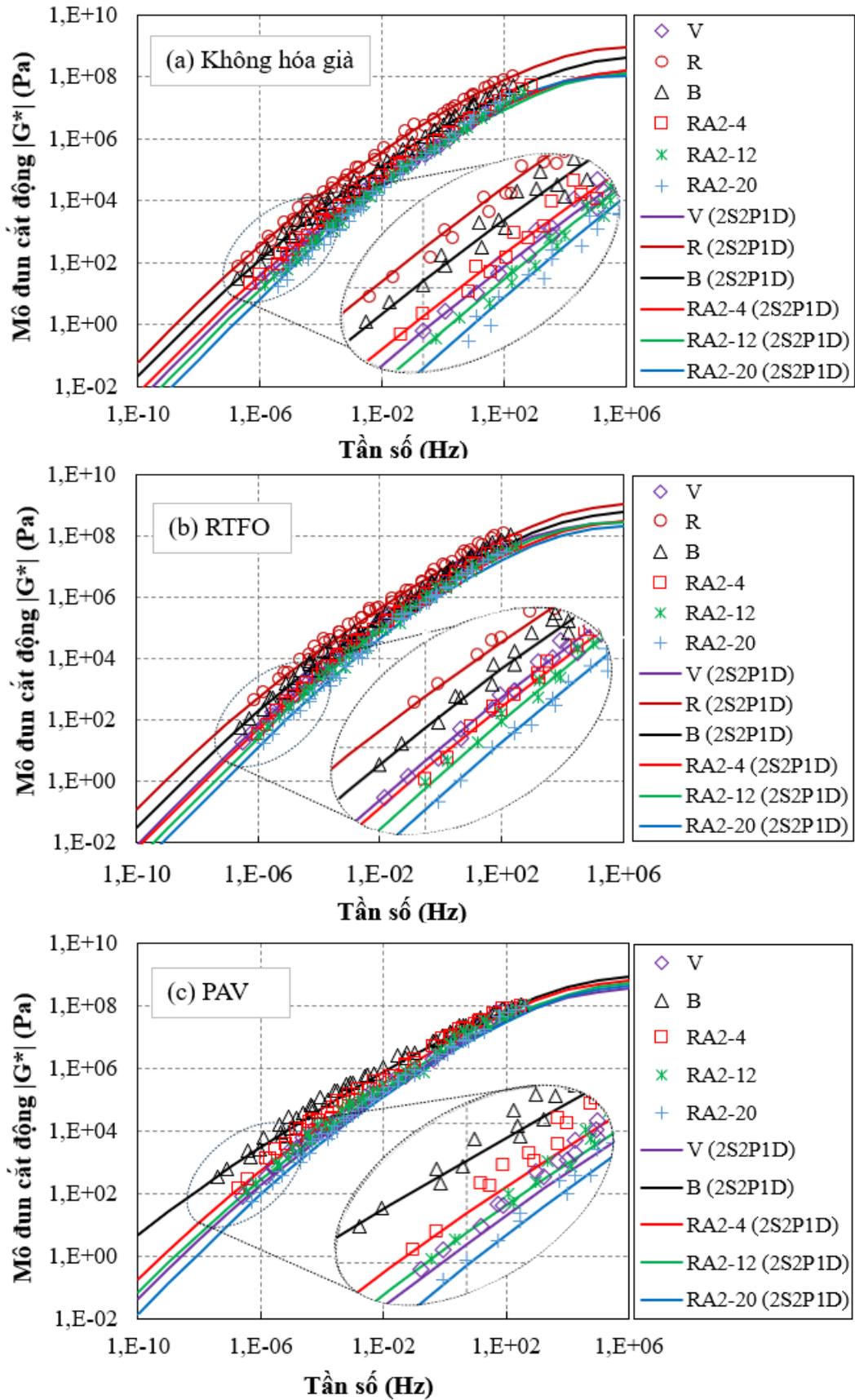
**Bảng 2.11. Các tham số của mô hình**

Ký hiệu	$G_{00}$ (Pa)	$G_0$ (Pa)	k	h	$\alpha$	$\tau$	$\beta$	$S_e/S_y$	$R^2$
V	0	1,8E+08	0,42	0,7	3,0	1,2E-04	250	0,17	0,964
R	0	1,0E+09	0,42	0,7	5,2	2,0E-04	500	0,08	0,991
B	0	5,0E+08	0,42	0,7	4,9	1,8E-04	400	0,15	0,973
RA1-4	0	3,0E+08	0,42	0,7	4,5	1,8E-04	200	0,14	0,978
RA1-12	0	2,0E+08	0,42	0,7	3,0	1,8E-04	120	0,07	0,994
RA1-20	0	1,6E+08	0,42	0,7	2,1	1,5E-04	60	0,13	0,980
RA2-4	0	2,0E+08	0,42	0,7	4,5	1,5E-04	350	0,07	0,993

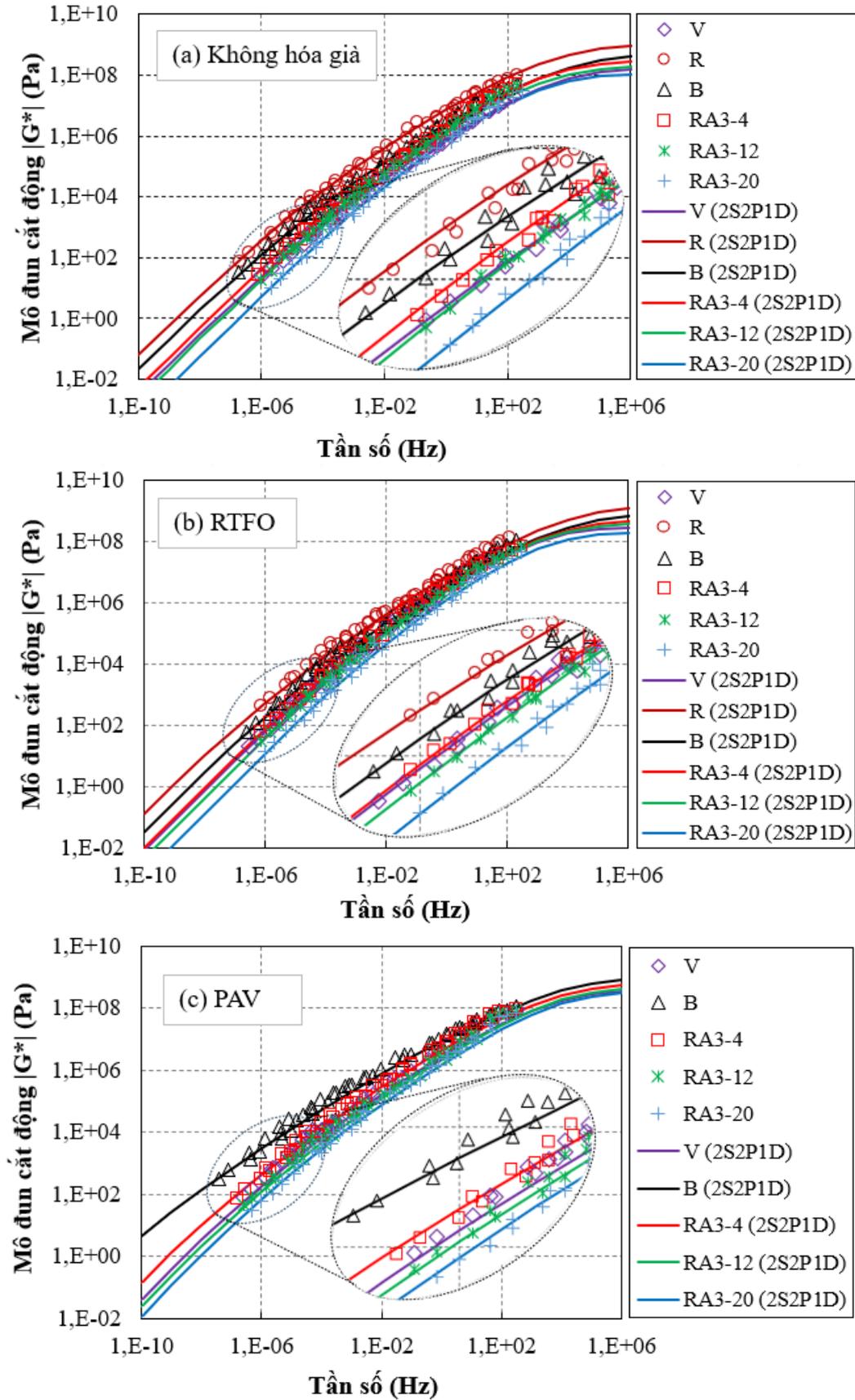
Ký hiệu	$G_{00}$ (Pa)	$G_0$ (Pa)	k	h	$\alpha$	$\tau$	$\beta$	$S_e/S_y$	$R^2$
RA2-12	0	1,5E+08	0,42	0,7	4,0	1,5E-04	120	0,10	0,988
RA2-20	0	1,2E+08	0,42	0,7	1,9	2,0E-04	50	0,15	0,971
RA3-4	0	3,2E+08	0,42	0,7	2,8	1,8E-04	150	0,12	0,981
RA3-12	0	2,0E+08	0,42	0,7	2,2	1,8E-04	100	0,09	0,991
RA3-20	0	1,2E+08	0,42	0,7	2,0	1,5E-04	50	0,10	0,988
V (RTFO)	0	3,0E+08	0,42	0,7	2,4	3,0E-04	150	0,13	0,981
R (RTFO)	0	1,4E+09	0,42	0,7	5,5	2,0E-04	800	0,14	0,976
B (RTFO)	0	7,5E+08	0,42	0,7	4,8	1,8E-04	400	0,07	0,994
RA1-4 (RTFO)	0	3,5E+08	0,42	0,7	4,0	2,5E-04	250	0,09	0,990
RA1-12 (RTFO)	0	3,0E+08	0,42	0,7	3,5	2,5E-04	120	0,08	0,992
RA1-20 (RTFO)	0	2,5E+08	0,42	0,7	3,0	1,8E-04	100	0,16	0,971
RA2-4 (RTFO)	0	3,5E+08	0,42	0,7	4,0	1,5E-04	200	0,06	0,996
RA2-12 (RTFO)	0	3,0E+08	0,42	0,7	3,8	1,5E-04	100	0,09	0,990
RA2-20 (RTFO)	0	2,5E+08	0,42	0,7	3,6	1,5E-04	60	0,09	0,990
RA3-4 (RTFO)	0	5,0E+08	0,42	0,7	3,2	1,8E-04	180	0,14	0,978
RA3-12 (RTFO)	0	4,0E+08	0,42	0,7	2,6	1,8E-04	100	0,15	0,974
RA3-20 (RTFO)	0	2,0E+08	0,42	0,7	2,2	1,8E-04	60	0,11	0,986
V (PAV)	0	4,0E+08	0,42	0,7	4,5	3,0E-04	600	0,14	0,977
B (PAV)	0	1,0E+09	0,42	0,7	8,0	6,0E-04	25000	0,09	0,990
RA1-4 (PAV)	0	6,5E+08	0,42	0,7	5,3	4,4E-04	1000	0,14	0,977
RA1-12 (PAV)	0	5,0E+08	0,42	0,7	5,6	2,5E-04	300	0,27	0,963
RA1-20 (PAV)	0	4,0E+08	0,42	0,7	5,2	1,5E-04	200	0,08	0,993
RA2-4 (PAV)	0	7,0E+08	0,42	0,7	5,1	4,0E-04	1200	0,08	0,991
RA2-12 (PAV)	0	6,0E+08	0,42	0,7	5,4	2,5E-04	800	0,08	0,993
RA2-20 (PAV)	0	5,0E+08	0,42	0,7	4,0	1,5E-04	300	0,06	0,996
RA3-4 (PAV)	0	6,5E+08	0,42	0,7	5,5	3,5E-04	1200	0,09	0,989
RA3-12 (PAV)	0	5,0E+08	0,42	0,7	4,1	1,4E-04	600	0,18	0,962
RA3-20 (PAV)	0	4,0E+08	0,42	0,7	3,9	1,0E-04	500	0,05	0,997



**Hình 2.19. Đường cong chủ  $|G^*|$  của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA1 (a) không hóa già, (b) RTFO và (c) PAV**



Hình 2.20. Đường cong chủ  $|G^*|$  của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA2  
(a) không hóa già, (b) RTFO, và (c) PAV



Hình 2.21. Đường cong chủ  $|G^*|$  của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA3  
(a) không hóa già, (b) RTFO, và (c) PAV

Ở điều kiện không hóa già và hóa già ngắn hạn RTFO, kết quả cho thấy phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) có giá trị  $|G^*|$  thấp hơn khi so sánh với bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1). Kết quả này chỉ ra rằng phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật có hiệu quả cao trong việc khôi phục các đặc tính của bitum cũ ở điều kiện hóa già ngắn hạn. Tuy nhiên, xét ở điều kiện PAV, giá trị  $|G^*|$  của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật cao hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ. Điều này chứng tỏ, sự hóa già xảy ra nhanh hơn đối với bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật khi trải qua quá trình hóa già dài hạn.

## 2.8. Thí nghiệm phân tích thành phần hóa học và cấu trúc bitum

Hiện nay, có nhiều phương pháp phân tích thành phần hóa học và cấu trúc của bitum. Mỗi một phương pháp có một số vấn đề, bởi vì kết quả phân tích có thể khác nhau phụ thuộc vào loại bitum và quy trình thí nghiệm khi được phân tích. Do đó, để nghiên cứu sâu về thành phần và cấu trúc của bitum, nên thực hiện đồng thời nhiều thí nghiệm phân tích khác nhau. Các phương pháp thường sử dụng được thể hiện trong **Bảng 2.12**.

**Bảng 2.12. Phương pháp phân tích thành phần hóa học và cấu trúc của bitum**

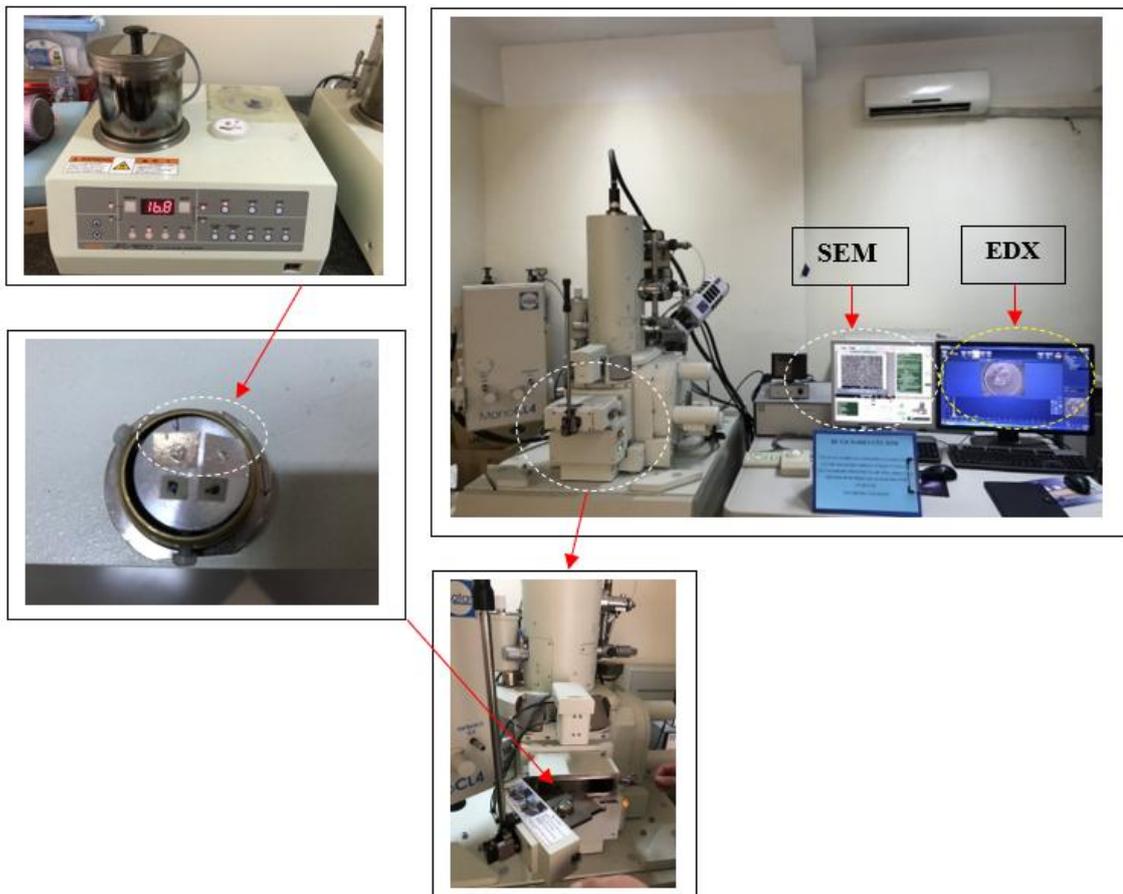
Phương pháp	Loại phân tích	Thông số đầu ra
Kính hiển vi lực nguyên tử (AFM)	Cấu trúc	Cấu trúc vi mô và tính chất của bitum
Phân tích quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR)	Hoá học	Hàm lượng cacbonyl và nhóm sunfoxide
Phân tích SARA	Hoá học	Hàm lượng các nhóm chất (nhóm chất bão hòa, nhóm chất nhựa, nhóm chất thơm và nhóm asphalt)
Sắc ký lỏng áp suất cao (High-pressure Chromatography)	Hoá học	Số nhóm hóa học và trọng lượng phân tử
Kính hiển vi điện tử quét kết hợp phổ tán xạ năng lượng tia X (SEM-EDX)	Cấu trúc và nguyên tố hoá học	Cấu trúc vi mô bề mặt và phân tích các nguyên tố

Trong nội dung Luận án này, nghiên cứu tiến hành phân tích vi cấu trúc và thành phần các nguyên tố hóa học của bitum mới (V) và bitum RAP (R) dựa trên thí nghiệm SEM-

EDX. Đồng thời, để đánh giá sự thay đổi thành phần hóa học khi phụ gia tái sinh được thêm vào, thí nghiệm FTIR cho sáu loại bitum bao gồm bitum mới (V), bitum RAP (R), bitum hỗn hợp (B) và bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3 với hàm lượng 12% (B+RA1, B+RA2 và B+RA3). Các mẫu bitum trải qua quá trình hóa già dài hạn (PAV) cũng được xét đến để đánh giá ảnh hưởng của điều kiện hóa già đến mức độ lão hóa của các loại bitum sử dụng phụ gia tái sinh. Thông qua nghiên cứu này, có thể giải thích cho các kết quả nghiên cứu về các tính chất vật lý và lưu biến của bitum và tính năng của bê tông asphalt.

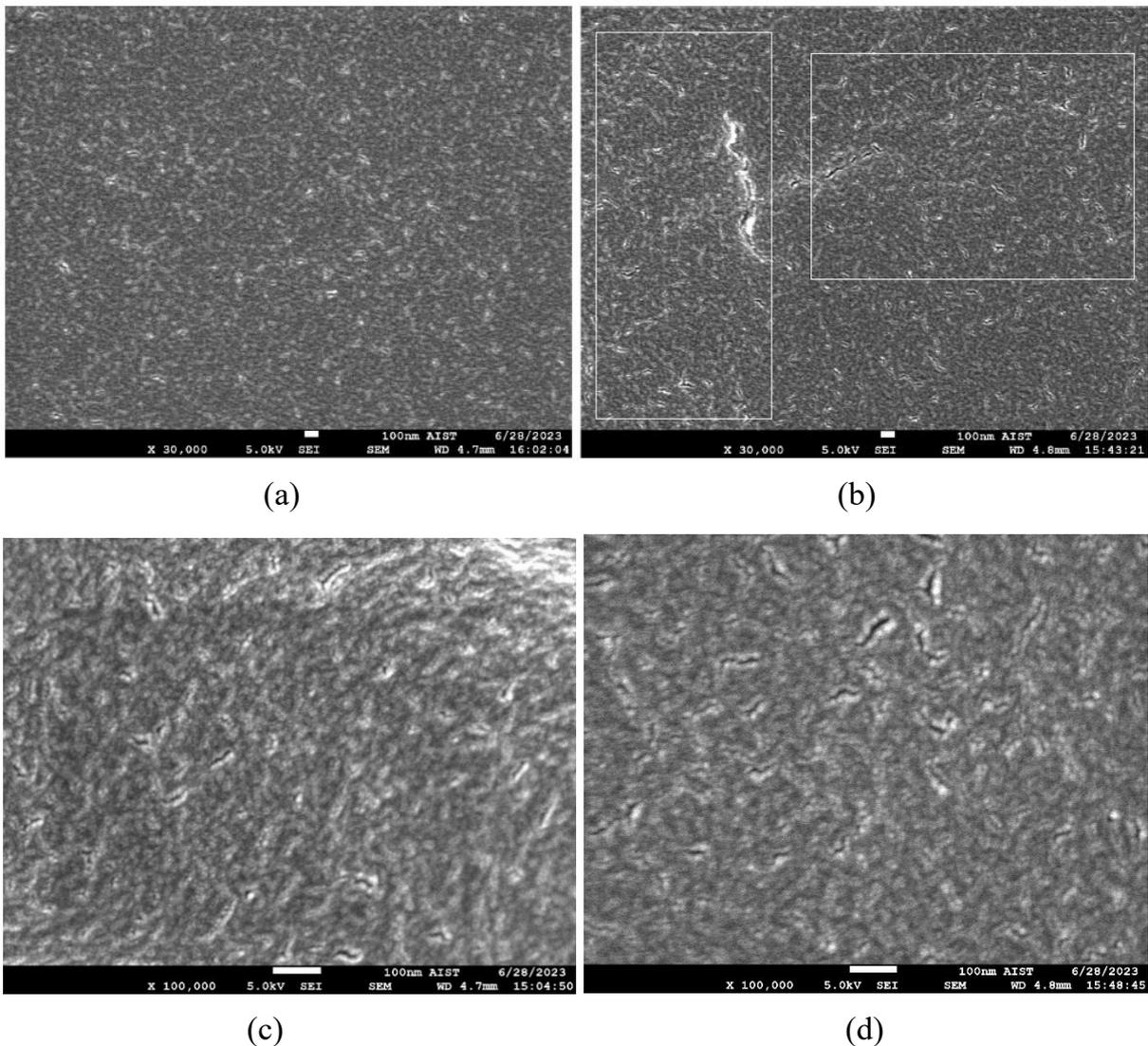
### 2.8.1. Thí nghiệm phân tích SEM-EDX

Thí nghiệm phân tích vi cấu trúc và thành phần các nguyên tố hóa học được thực hiện sử dụng thiết bị phân tích SEM-EDX (Hình 2.22). Vì bitum là vật liệu hữu cơ có độ dẫn điện kém nên trong thí nghiệm chụp SEM, mẫu bitum sẽ được phủ một lớp platin trước khi thử nghiệm để thu được hình ảnh rõ nét. Thí nghiệm phân tích SEM-EDX được thực hiện tại Viện Vật lý kỹ thuật, Đại học Bách Khoa Hà Nội.



**Hình 2.22. Thí nghiệm SEM – EDX**

Kết quả phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét SEM của mẫu bitum 60/70 và bitum RAP được thể hiện ở **Hình 2.23**. Hình ảnh SEM cho thấy, có sự thay đổi trong cấu trúc vi mô của bitum RAP khi so sánh với bitum mới 60/70. Tỷ lệ pha phân tán (mixen) trong bitum RAP có xu hướng gia tăng và tập trung gần nhau hơn (**Hình 2.23b**). Điều này là do sự thay đổi hàm lượng nhóm chất nhựa, chất bão hòa và chất thơm. Nhóm chất thơm và chất bão hòa sẽ chuyển thành nhóm chất nhựa, và nhóm chất nhựa sẽ chuyển thành nhóm asphalt, làm gia tăng hàm lượng nhóm asphalt trong bitum.



**Hình 2.23. Hình ảnh SEM**

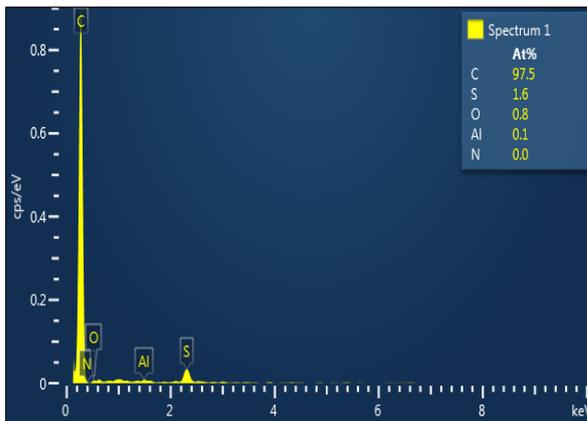
*(a) và (c) Bitum 60/70, (b) và (d) Bitum RAP*

**Bảng 2.13** và **Hình 2.24** thể hiện kết quả phân tích thành phần các nguyên tố hóa học của bitum. Đối với bitum RAP (R), có sự gia tăng hàm lượng nguyên tố Oxy (5,2% theo

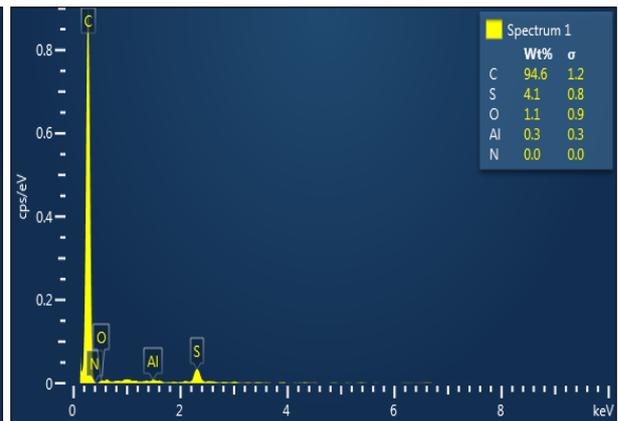
khối lượng các nguyên tố) so với bitum mới 60/70 (V) (1,1% theo khối lượng). Kết quả này cũng giải thích cho quá trình lão hóa của bitum gây ra bởi quá trình oxy hóa.

**Bảng 2.13. Thành phần các nguyên tố hóa học trong bitum mới (bitum 60/70) và bitum cũ thu hồi từ RAP (bitum RAP) từ thí nghiệm SEM-EDX**

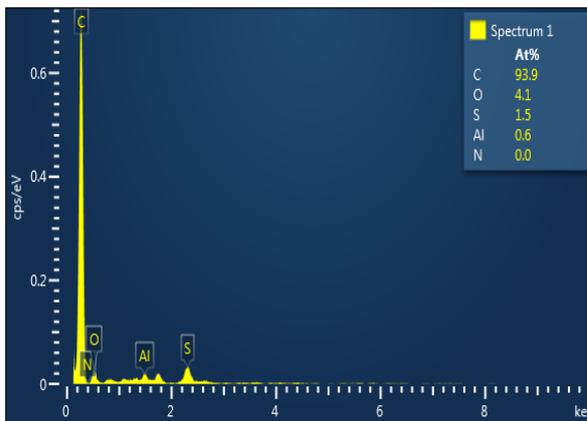
Nguyên tố hóa học	Bitum 60/70 (V)		Bitum RAP (R)	
	% nguyên tố	% khối lượng	% nguyên tố	% khối lượng
C	97,5	94,6	93,9	89,8
S	1,6	4,1	1,5	3,7
O	0,8	1,1	4,1	5,2
Al	0,1	0,3	0,6	1,3
N	0,0	0,0	0,0	0,0



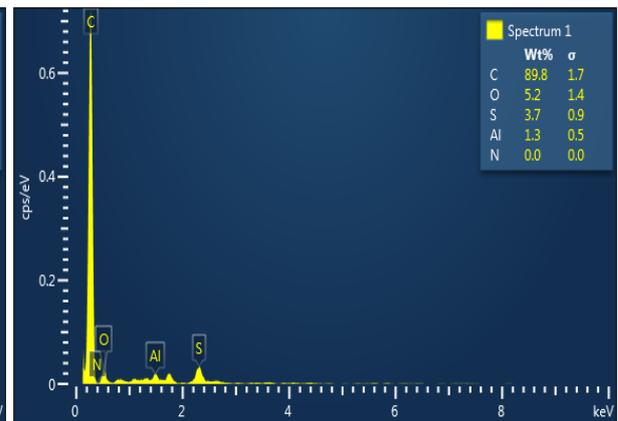
(a)



(b)



(c)



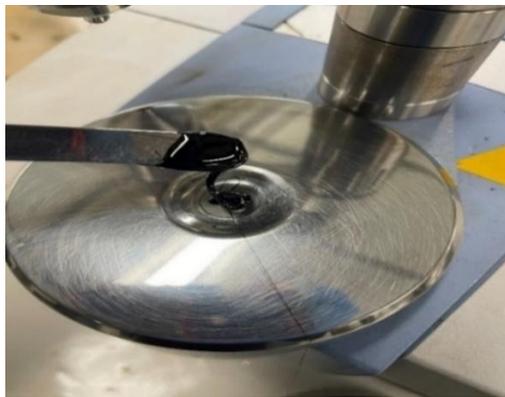
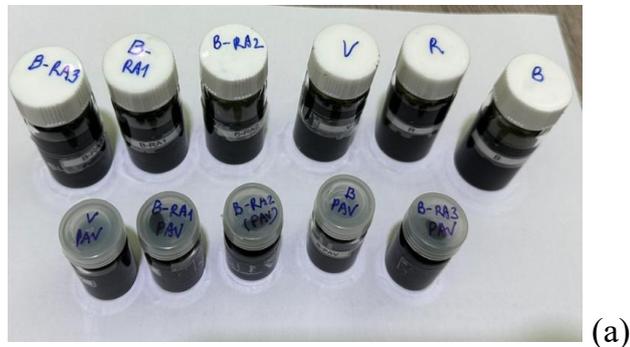
(d)

**Hình 2.24. Phân tích thành phần các nguyên tố bằng thí nghiệm SEM-EDX**

(a) % theo nguyên tố (bitum 60/70), (b) % theo khối lượng (bitum 60/70), (c) % theo nguyên tố (bitum RAP), (d) % theo khối lượng (bitum RAP)

### 2.8.2. Thí nghiệm phân tích quang phổ hồng ngoại FTIR

Hiện nay, phân tích quang phổ FTIR là công nghệ phổ biến để xác định và phân tích các nhóm chức hóa học trong hợp chất hữu cơ. Nguyên tắc của thí nghiệm FTIR dựa trên ánh sáng hồng ngoại quét lên bề mặt bitum và sau đó quan sát những thay đổi trong thành phần hóa học. Thí nghiệm này cũng được sử dụng để xác định các thành phần khác có trong bitum như polyme, sợi, phụ gia. v.v. Phổ hấp thụ (absorbance) hiển thị các đỉnh ở các tần số sóng (wavenumber) khác nhau, và mỗi đỉnh tương ứng với một nhóm chức hóa học. Trong nghiên cứu này, mẫu bitum đã được chuẩn bị và gửi mẫu đến Trung tâm Công nghệ Asphalt Mỹ (NCAT) để phân tích (**Hình 2.25a**).



(b)



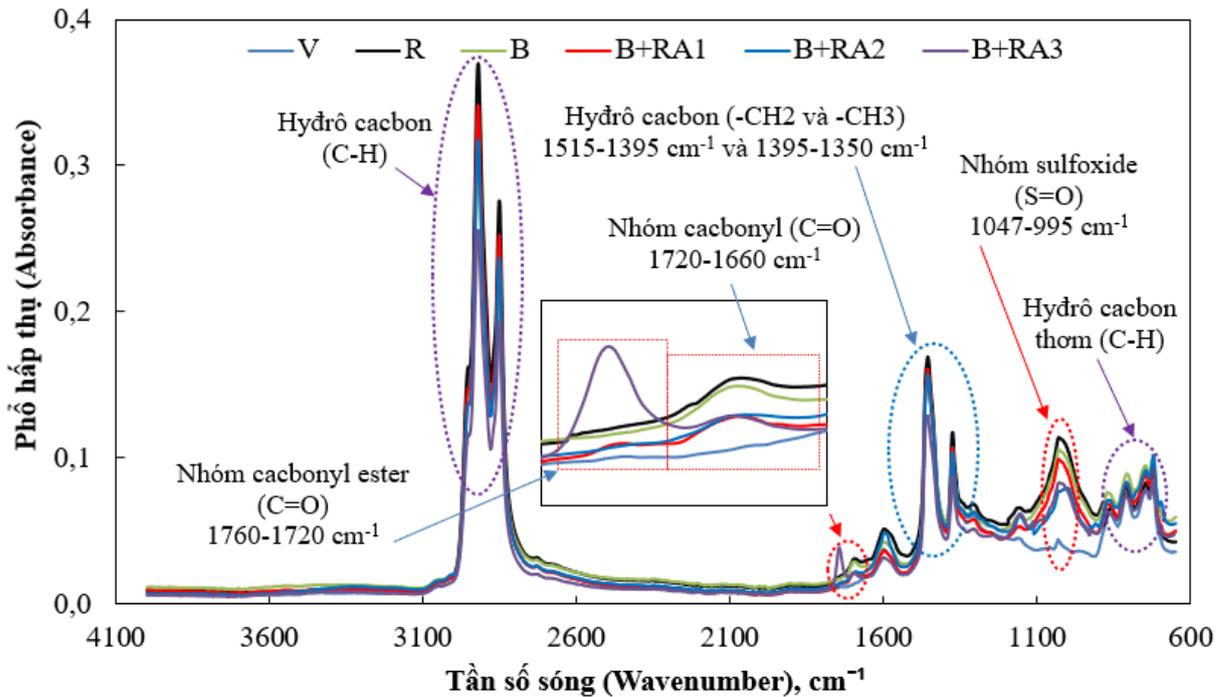
(c)

**Hình 2.25. Thí nghiệm FTIR**

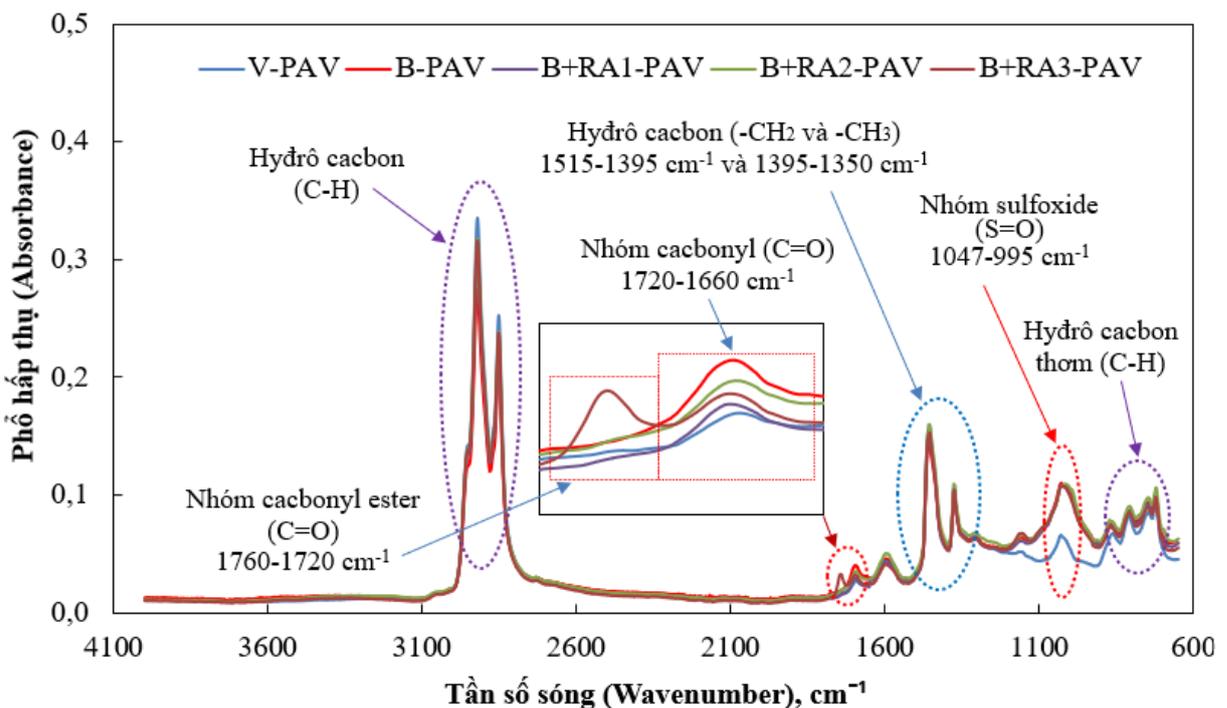
*(a) Chuẩn bị mẫu thử, (b) và (c) Tiến hành thí nghiệm và phân tích*

Thí nghiệm phân tích quang phổ FTIR thường được sử dụng để đánh giá mức độ lão hóa của bitum bằng cách quan sát sự thay đổi nhóm cacbonyl (liên kết C=O) và nhóm sulfoxide (liên kết S=O). Khi liên kết C=O và S=O được hình thành nhiều hơn, độ phân cực của bitum tăng lên, ảnh hưởng đến các đặc tính lưu biến của bitum, dẫn đến độ cứng tăng lên. Trong thí nghiệm này, mẫu bitum được gia nhiệt đến khi chảy lỏng, sau đó nhỏ giọt vào tấm đĩa chứa mẫu và để nguội ở nhiệt độ phòng trước khi thí nghiệm (**Hình**

2.25b). Các phổ được ghi lại bằng phần mềm OPUS trong phạm vi tần số sóng hấp thụ từ 650 – 4000  $\text{cm}^{-1}$  (Hình 2.25c). Mỗi mẫu thí nghiệm sẽ được quét 2 lần và mỗi loại bitum sẽ tiến hành thí nghiệm 2 mẫu. Hình 2.26 và Hình 2.27 thể hiện kết quả phân tích quang phổ của các mẫu bitum ở điều kiện không hóa già và hóa già dài hạn PAV.



Hình 2.26. Kết quả thí nghiệm FTIR của các mẫu ở điều kiện không hóa già



Hình 2.27. Kết quả thí nghiệm FTIR của các mẫu ở điều kiện PAV

Dựa trên phổ hấp thụ thu được ở các tần số sóng khác nhau, thông tin về các nhóm chức hóa học trong bitum có thể được xác định. Các giới hạn tần số sóng được lựa chọn để tính toán diện tích nhóm cacbonyl, diện tích nhóm sulfoxide và diện tích tham chiếu được đưa ra bởi Jacobs và các cộng sự, thể hiện ở **Bảng 2.14** [62].

**Bảng 2.14. Các giới hạn tần số sóng được lựa chọn** [62]

Nhóm	Phạm vi tần số sóng (cm <sup>-1</sup> )	Ghi chú
Nhóm aliphatics (hydrô cacbon mạch thẳng)	1515-1395 và 1395-1350	(tính toán A <sub>ref</sub> )
Nhóm sulfoxide	1047-995	(tính toán A <sub>S=O</sub> )
Nhóm cacbonyl	1720-1660	(tính toán A <sub>C=O</sub> )
Nhóm cacbonyl ester	1760-1720	-

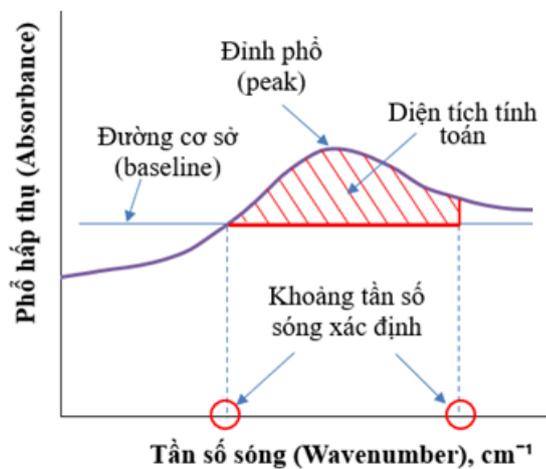
Dải tần số sóng từ 1720-1660 cm<sup>-1</sup> chỉ ra sự xuất hiện phổ của nhóm cacbonyl trong bitum. Nhóm cacbonyl ester (dải tần số sóng từ 1760-1720 cm<sup>-1</sup>) cũng xuất hiện trong quang phổ của bitum có phụ gia tái sinh. Do đó, dựa trên hàm lượng nhóm cacbonyl ester, có thể chỉ ra sự có mặt của phụ gia tái sinh trong mẫu bitum. Kết quả cho thấy, ở dải tần số sóng 1760-1720 cm<sup>-1</sup>, phụ gia tái sinh gốc dầu đậu nành (RA3) thể hiện phổ peak cao nhất. Kết quả này cũng phù hợp với một số nghiên cứu trước đây, đã chỉ ra rằng, phổ peak cao ở dải tần số này là do dầu đậu nành có chứa nhiều thành phần este của axit béo [45], [62]. Chỉ số cacbonyl (I<sub>C=O</sub>) và chỉ số sulfoxide (I<sub>S=O</sub>) được xác định để đánh giá khả năng trẻ hóa cũng như mức độ lão hóa của bitum. Giá trị I<sub>C=O</sub> và I<sub>S=O</sub> được xác định theo công thức (2.15) và (2.16) [62].

$$I_{C=O} = \frac{A_{C=O}}{A_{ref}} \quad (2.15)$$

$$I_{S=O} = \frac{A_{S=O}}{A_{ref}} \quad (2.16)$$

Trong đó, A<sub>C=O</sub> là diện tích của nhóm cacbonyl được tính trong dải tần số sóng từ 1720-1660 cm<sup>-1</sup> và sử dụng phổ 1760 cm<sup>-1</sup> làm đường cơ sở. A<sub>S=O</sub> là diện tích của nhóm sulfoxide được tính trong dải tần số sóng từ 1047-995 cm<sup>-1</sup> và sử dụng phổ 1047 cm<sup>-1</sup>

làm đường cơ sở.  $A_{ref}$  là diện tích tham chiếu, ở vị trí tần số mà phổ hấp thụ không có sự thay đổi đáng kể trong quá trình oxy hóa. Theo nghiên cứu của Jacobs và các cộng sự [62], Marsac và các cộng sự [79], các nhóm methyl (-CH<sub>3</sub>) và ethylene (-CH<sub>2</sub>) được coi là không bị ảnh hưởng đáng kể bởi quá trình oxy hóa và các dải tần số hấp thụ phổ 1515-1395 cm<sup>-1</sup> và 1395-1350 cm<sup>-1</sup> được lấy để tính toán  $A_{ref}$ , sử dụng phổ 1515 cm<sup>-1</sup> và 1395 cm<sup>-1</sup> làm đường cơ sở, tương ứng. Phương pháp tính toán diện tích  $A_{C=O}$ ,  $A_{S=O}$  và  $A_{ref}$  được thể hiện ở **Hình 2.28**. Kết quả tính toán chỉ số cacbonyl và sunfoxide được thể hiện ở **Bảng 2.15**.



**Hình 2.28.** Minh họa cách tính diện tích  $A_{C=O}$ ,  $A_{S=O}$  và  $A_{ref}$

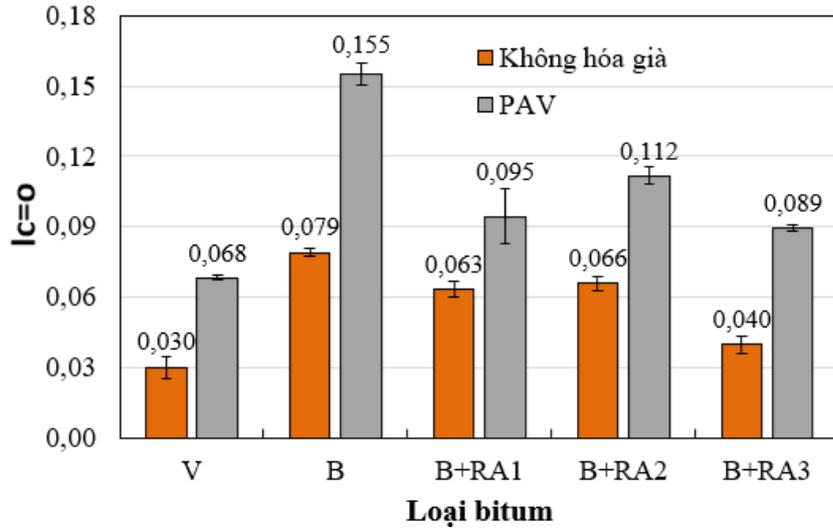
**Bảng 2.15.** Chỉ số cacbonyl và sunfoxide của các loại bitum

TT	Ký hiệu mẫu		$A_{C=O}$	$A_{S=O}$	$A_{ref}$	$I_{C=O}$		$I_{S=O}$	
1	V	1	0,208	0,108	7,734	0,027	0,030	0,014	0,016
		2	0,253	0,140	7,581	0,033		0,018	
2	R	1	0,753	0,610	7,596	0,099	0,101	0,080	0,084
		2	0,725	0,613	7,045	0,103		0,087	
3	B	1	0,560	0,606	7,203	0,078	0,079	0,084	0,081
		2	0,568	0,557	7,072	0,080		0,079	
4	B+RA1	1	0,490	0,525	7,435	0,066	0,063	0,071	0,072
		2	0,459	0,548	7,544	0,061		0,073	
5	B+RA2	1	0,473	0,618	7,426	0,064	0,066	0,083	0,079
		2	0,462	0,511	6,799	0,068		0,075	
6	B+RA3	1	0,231	0,487	6,178	0,037	0,040	0,0788	0,078
		2	0,239	0,438	5,735	0,042		0,0764	

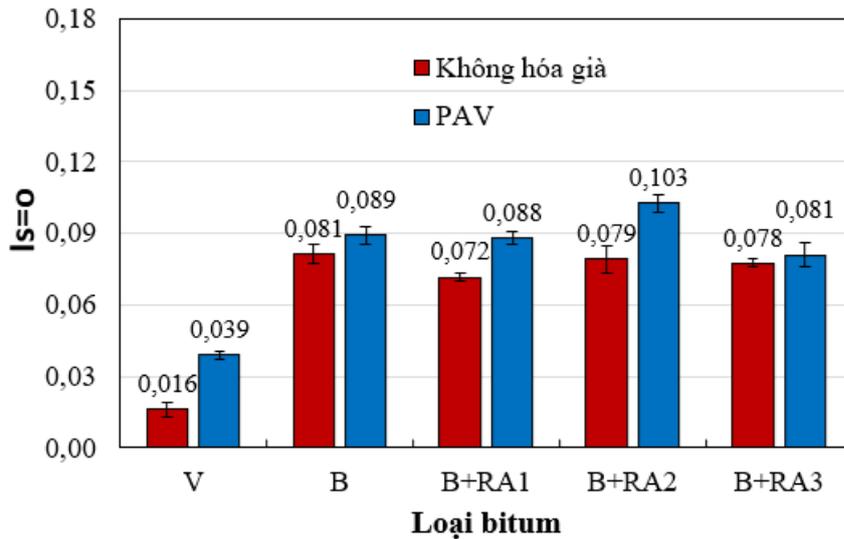
TT	Ký hiệu mẫu		$A_{C=O}$	$A_{S=O}$	$A_{ref}$	$I_{C=O}$		$I_{S=O}$	
7	V-PAV	1	0,468	0,279	6,946	0,067	0,068	0,040	0,039
		2	0,510	0,281	7,394	0,069		0,038	
8	B-PAV	1	1,081	0,592	6,824	0,158	0,155	0,087	0,089
		2	0,979	0,592	6,452	0,152		0,092	
9	B+RA1-PAV	1	0,628	0,656	7,271	0,086	0,095	0,090	0,088
		2	0,699	0,586	6,811	0,103		0,086	
10	B+RA2-PAV	1	0,786	0,720	7,199	0,109	0,112	0,100	0,103
		2	0,826	0,760	7,222	0,114		0,105	
11	B+RA3-PAV	1	0,594	0,568	6,727	0,088	0,089	0,084	0,081
		2	0,673	0,578	7,452	0,090		0,078	

**Hình 2.29, Hình 2.30 và Hình 2.31** thể hiện chỉ số cacbonyl ( $I_{C=O}$ ), chỉ số sulfoxide ( $I_{S=O}$ ) và chỉ số kết hợp ( $I_{C=O}+I_{S=O}$ ) của các loại bitum. Kết quả cho thấy, chỉ số  $I_{C=O}$  và  $I_{S=O}$  của mẫu bitum RAP là cao nhất cho thấy sự lão hóa xảy ra. Điều này giải thích cho sự gia tăng độ cứng của bitum RAP (độ kim lún giảm, nhiệt độ hóa mềm và mô đun cắt động  $|G^*|$  tăng). Chỉ số  $I_{C=O}$  và  $I_{S=O}$  của bitum hỗn hợp (B) cũng cao hơn so với bitum mới (V), cho thấy sự lão hóa cũng xuất hiện do sự có mặt của bitum RAP. Khi mẫu bitum hỗn hợp được trẻ hóa bằng phụ gia tái sinh, chỉ số  $I_{C=O}$  và  $I_{S=O}$  là thấp hơn so với bitum không sử dụng phụ gia tái sinh, nhưng cao hơn so với bitum mới. Cả ba loại phụ gia tái sinh đều làm giảm mức độ oxy hóa của bitum cũ có trong vật liệu RAP. Tuy nhiên, sự thay đổi chỉ số cacbonyl là rõ ràng hơn so với chỉ số sulfoxide (**Hình 2.30**). Trong số ba loại phụ gia tái sinh, phụ gia tái sinh gốc dầu đậu nành (RA3) có hiệu quả hơn trong việc làm giảm mức độ oxy hóa của bitum RAP.

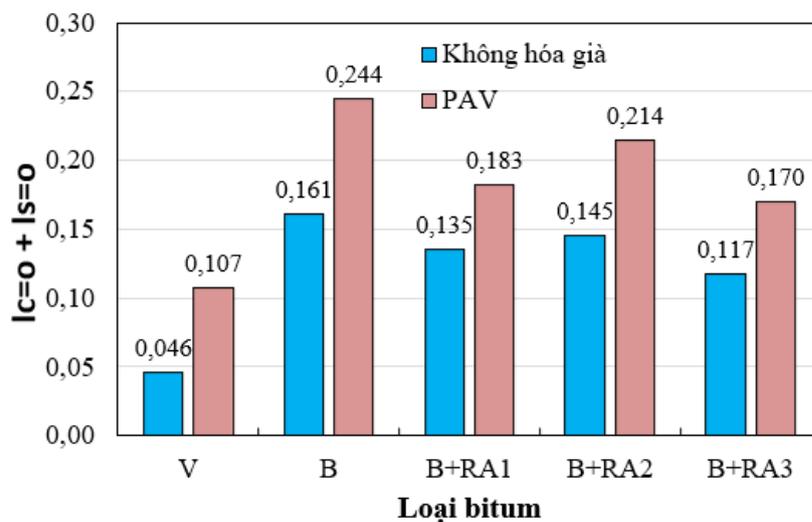
Khi trải qua quá trình hóa già dài hạn, kết quả cho thấy chỉ số cacbonyl, chỉ số sulfoxide và chỉ số kết hợp của tất cả các loại bitum gia tăng. Sự gia tăng liên kết C=O và S=O liên quan đến sự gia tăng hàm lượng nhóm asphalt trong bitum. Các kết quả trong nghiên cứu này phù hợp với một số nghiên cứu khác đã thực hiện khi chỉ ra rằng chỉ số cacbonyl, chỉ số sulfoxide tăng lên sau khi bitum trải qua quá trình hóa già [62], [105], [106]. Do quá trình oxy hóa xảy ra trong bitum, dẫn đến sự chuyển đổi các thành phần nhẹ hơn (nhóm maten) của bitum thành các thành phần nặng hơn (nhóm asphalt), làm gia tăng độ cứng và giảm khả năng dễ bị biến dạng của bitum.



Hình 2.29. Chỉ số cacbonyl  $I_{C=O}$  của các loại bitum

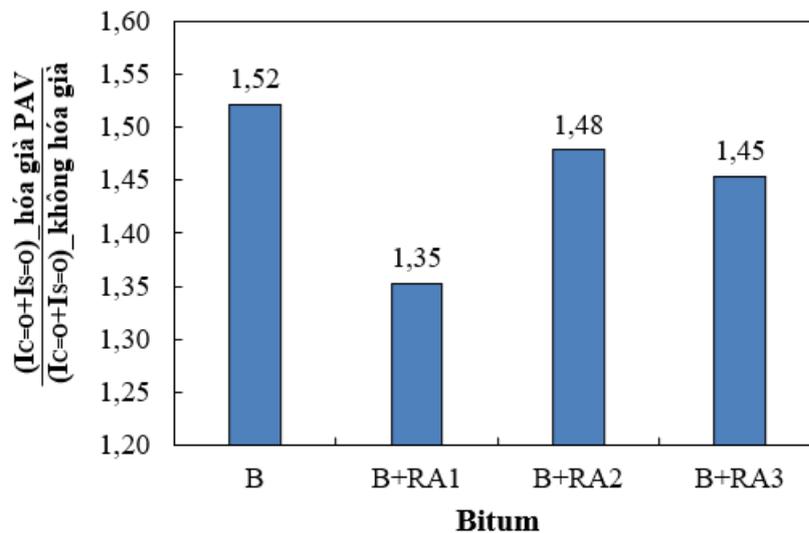


Hình 2.30. Chỉ số sulfoxide  $I_{S=O}$  của các loại bitum



Hình 2.31. Chỉ số kết hợp  $I_{C=O}+I_{S=O}$  của các loại bitum

Để đánh giá hiệu quả của các loại phụ gia tái sinh đến mức độ hóa già của bitum hỗn hợp được trẻ hóa, tỷ số  $[(I_{C=O}+I_{S=O})_{\text{hóa già PAV}}/(I_{C=O}+I_{S=O})_{\text{không hóa già}}]$  được xây dựng. Khi tỷ số này càng lớn thể hiện mức độ lão hóa xảy ra càng nhanh trong bitum. Kết quả nghiên cứu cho thấy, bitum hỗn hợp được trẻ hóa bằng phụ gia tái sinh RA2 thể hiện mức độ lão hóa nhanh nhất khi trải qua hóa già dài hạn trong khi bitum hỗn hợp được trẻ hóa bằng phụ gia tái sinh RA1 (gốc dầu mỏ) thể hiện mức độ lão hóa thấp nhất (Hình 2.32). Từ kết quả thí nghiệm FTIR cho thấy rằng, phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ thể hiện mức độ lão hóa chậm hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật. Kết luận này là phù hợp với các kết luận đưa ra từ kết quả thí nghiệm mô đun cắt động  $|G^*|$  của bitum mà Luận án đã thực hiện ở Mục 2.6.



**Hình 2.32. Đánh giá mức độ lão hóa của các loại bitum từ kết quả thí nghiệm FTIR**

## 2.9. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong Chương này, các kết luận sau được đưa ra:

- o Ba loại phụ gia tái sinh (RA1, RA2, RA3) đều thể hiện hiệu quả làm mềm bitum cũ trong RAP. Kết quả chỉ ra rằng, phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) yêu cầu hàm lượng thấp hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1) để đạt được các tính chất vật lý và cơ học như bitum mới 60/70.

- o Khả năng làm mềm bitum phụ thuộc vào loại và phụ thuộc đáng kể vào hàm lượng phụ gia tái sinh sử dụng. Khi hàm lượng phụ gia tái sinh được thêm vào bitum hỗn hợp

từ 4% đến 20% (theo khối lượng bitum RAP), giá trị  $G^*/\sin\delta$  ở 64°C giảm từ 32,6% đến 73,0% đối với phụ gia tái sinh RA1, giảm từ 47,1% đến 79,4% đối với phụ gia tái sinh RA2 và giảm từ 33,4% đến 75,4% đối với phụ gia tái sinh RA3.

- Đối với cả ba loại phụ gia tái sinh, giới hạn hàm lượng phụ gia tái sinh không nên vượt quá 12% để đạt được cấp PG tương tự như bitum mới mức 60/70.

- Mức độ lão hóa của bitum hỗn hợp phụ thuộc vào loại và hàm lượng phụ gia tái sinh được sử dụng. Kết quả từ thí nghiệm cắt động lưu biến (DSR) cho thấy, bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ thể hiện sự lão hóa chậm hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật và gốc dầu đậu nành.

- Ở điều kiện hóa già dài hạn, chỉ số kết hợp ( $I_{C=O}+I_{S=O}$ ) của bitum hỗn hợp gia tăng lần lượt 1,35; 1,48 và 1,45 lần so với điều kiện không hóa già, tương ứng khi sử dụng ba loại phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3. Như vậy, dựa trên thí nghiệm phân tích quang phổ hồng ngoại (FTIR) cũng cho thấy, phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ có hiệu quả hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật về khả năng chống lão hóa khi bitum hỗn hợp trải qua quá trình hóa già.

## **CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG RAP VÀ PHỤ GIA TÁI SINH ĐẾN CÁC TÍNH NĂNG CỦA BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG**

### **3.1. Giới thiệu chương và kế hoạch nghiên cứu**

Do tác dụng của phụ gia tái sinh trong việc giảm độ cứng của bitum, dẫn đến khả năng kháng nứt tăng nhưng khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe có thể giảm. Đặc biệt, khi hàm lượng phụ gia tái sinh quá lớn sẽ làm mềm đáng kể bitum và sẽ tác động bất lợi đến khả năng kháng hằn lún. Yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng kháng hằn lún là hàm lượng phụ gia sử dụng. Do vậy, hàm lượng phụ gia tái sinh tối ưu được lựa chọn nhằm mục đích cân bằng giữa tính năng kháng hằn lún và kháng nứt của hỗn hợp asphalt.

Trong nội dung nghiên cứu Chương này, hỗn hợp bê tông asphalt chặt có kích thước hạt danh định lớn nhất bằng 12,5 mm (AC12,5) được lựa chọn. Các hỗn hợp được đánh giá bao gồm, hỗn hợp bê tông asphalt đối chứng không sử dụng RAP (V-0RAP), hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP (30RAP) và 50%RAP (50RAP). Hàm lượng RAP được lựa chọn nằm trong giới hạn áp dụng của TCVN 13567-6:2025 [18] và phù hợp với xu hướng Quốc tế, nơi nhiều nghiên cứu tại Mỹ, Nhật Bản và Châu Âu đã chứng minh tính khả thi khi có các giải pháp kỹ thuật thích hợp. Do đó, phạm vi hàm lượng RAP từ 30% đến 50% được xem là hợp lý, bảo đảm đồng thời hiệu quả kinh tế và lợi ích môi trường. Hai điều kiện hóa già được xét đến bao gồm hóa già ngắn hạn (STOA) và hóa già dài hạn (LTOA). Hỗn hợp rời sau khi trộn xong sẽ được cho vào tủ sấy ở nhiệt độ  $135 \pm 3$  °C trong 4 giờ để mô phỏng hóa già ngắn hạn. Đối với hóa già dài hạn, hỗn hợp rời sau khi hóa già ngắn hạn sẽ tiếp tục được đặt trong tủ sấy 5 ngày ở 95°C. Ba loại phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3 được sử dụng, đã được mô tả ở Chương 2. Các nghiên cứu thực nghiệm ở Chương 3 bao gồm:

- Thực nghiệm xác định thành phần hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng.
- Thực nghiệm xác định sức kháng hằn lún vệt bánh xe (HWTT và IDEAL-RT).
- Thực nghiệm xác định sức kháng nứt (IDEAL-CT).
- Thực nghiệm xác định mô đun động ( $|E^*|$ ).
- Thực nghiệm xác định mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp ( $M_R$ ).

Chi tiết về kế hoạch nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng RAP và phụ gia tái sinh đến các tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng được thể hiện ở **Bảng 3.1**.

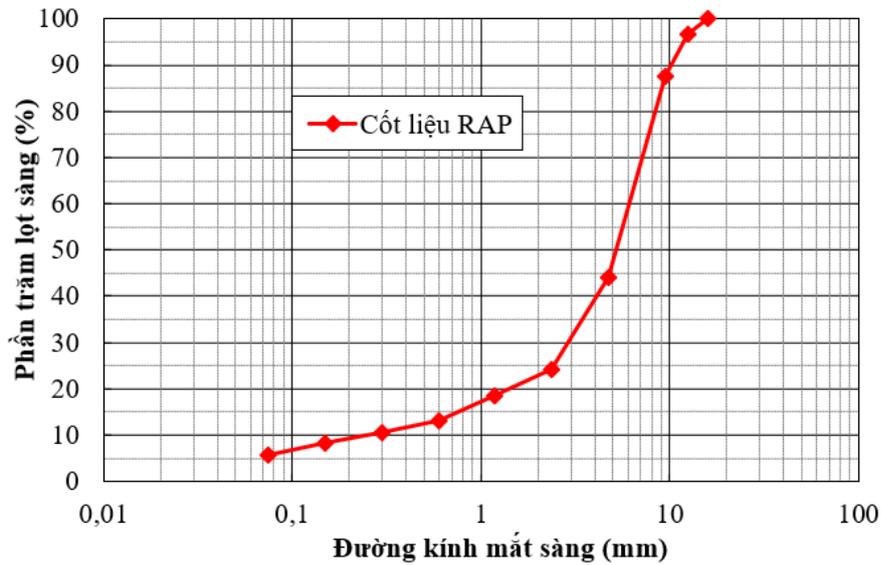
**Bảng 3.1. Chi tiết kế hoạch thí nghiệm các tính năng của hỗn hợp và số lượng mẫu thử cho nghiên cứu**

Hỗn hợp	Số mẫu thử tương ứng với các chỉ tiêu hỗn hợp và điều kiện hóa già							Ghi chú
	HWT (STOA)	IDEAL- CT <sub>Index</sub>		IDEAL- RT <sub>Index</sub> (STOA)	M <sub>R</sub> (STOA)	E*		
		STOA	LTOA			STOA	LTOA	
V-0RAP	2	4	4	4	6	6	6	0%RAP
30RAP	2	4	–	4	6	6	–	30%RAP
50RAP	2	4	4	4	6	6	6	50%RAP
50RAP-RA1-4	2	4	4	–	–	–	–	4%RA1
50RAP-RA1-12	2	4	4	–	–	–	–	12%RA1
50RAP-RA1-20	2	–	–	–	–	–	–	20%RA1
50RAP-RA2-4	2	4	4	–	–	–	–	4%RA2
50RAP-RA2-12	2	4	4	–	–	–	–	12%RA2
50RAP-RA3-4	2	4	4	–	–	–	–	4%RA3
50RAP-RA3-12	2	4	4	–	–	–	–	12%RA3
30RAP-RA1	–	4	–	4	6	6	–	Hàm lượng phụ gia tái sinh lựa chọn
30RAP-RA2	–	4	–	4	6	6	–	
30RAP-RA3	–	4	–	4	6	6	–	
50RAP-RA1	–	4	–	4	6	6	6	
50RAP-RA2	–	4	–	4	6	6	6	
50RAP-RA3	–	4	–	4	6	6	6	
<b>Tổng</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>30</b>	

### 3.2. Vật liệu chế tạo bê tông asphalt

Vật liệu RAP được lựa chọn như ở Chương 2. Sau khi bitum cũ (bitum RAP) được tách ra từ vật liệu RAP, tiến hành các thí nghiệm xác định một số chỉ tiêu kỹ thuật của bitum RAP và cốt liệu RAP. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của bitum RAP được thể hiện ở **Bảng 2**. (Chương 2). **Hình 3.1** thể hiện thành phần hạt của cốt liệu RAP thu được sau khi chiết

tách bitum. Kết quả cho thấy rằng, thành phần hạt của RAP là cấp phối liên tục tương tự như hỗn hợp vật liệu khoáng.



**Hình 3.1. Thành phần hạt của cốt liệu RAP**

Cốt liệu mới (đá dăm) được sử dụng để chế tạo bê tông asphalt bao gồm đá dăm 10-16, đá dăm 5-10, đá dăm 0-5 và bột khoáng. Các loại cốt liệu này cũng được lấy ở trạm trộn Tân Cang, Biên Hòa, Đồng Nai để đảm bảo cùng một nguồn vật liệu nghiên cứu. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của cốt liệu được thể hiện ở **Bảng 3.2**, **Bảng 3.3** và **Bảng 3.4** và thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 13567-1:2022 [16]. **Bảng 3.5** thể hiện thành phần hạt của các loại cốt liệu khác nhau.

**Bảng 3.2. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của đá dăm 10-16 và đá dăm 5-10**

STT	Tên chỉ tiêu	Kết quả		Yêu cầu kỹ thuật
		Đá dăm 10-16	Đá dăm 5-10	
1	Tỷ trọng khối	2,712	2,768	$\geq 2,6$
2	Tỷ trọng biểu kiến	2,782	2,854	–
3	Độ hút nước, %	0,929	1,088	$\leq 2$
4	Cường độ chịu nén, MPa	110	110	$\geq 80$
5	Độ hao mòn Los Angeles, %	12,20	13,45	$\leq 28$
6	Độ dính bám đá - bitum, cấp	4	4	$\geq 3$

**Bảng 3.3. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của đá dăm 0-5**

STT	Tên chỉ tiêu	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1	Tỷ trọng khối	2,667	$\geq 2,5$
2	Tỷ trọng biểu kiến	2,758	-
3	Độ hút nước, %	1,248	-
4	Mô đun độ lớn	3,12	$\geq 2$
5	Hệ số đương lượng cát, %	87,42	$\geq 60$

**Bảng 3.4. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của bột khoáng**

STT	Tên chỉ tiêu	Kết quả	Yêu cầu kỹ thuật
1	Tỷ trọng khối	2,763	$\geq 2,5$
2	Phân trăm lượng lọt qua sàng, %	0,6 mm	100
3		0,3 mm	97,9
4		0,075 mm	95,8
5	Độ ẩm, %	0,26	$< 1$

**Bảng 3.5. Kết quả thí nghiệm thành phần hạt của cốt liệu**

Kích thước mắt sàng (mm)	Phân trăm lọt sàng (%)			
	Đá dăm 10-16	Đá dăm 5-10	Đá dăm 0-5	Bột khoáng
16	100	100	100	100
12,5	64,6	99,0	100	100
9,5	8,6	82,8	100	100
4,75	0,4	12,0	84,4	100
2,36	0	8,3	49,7	100
1,18	0	7,0	31,2	100
0,6	0	5,5	21,0	100
0,3	0	0	13,8	100
0,15	0	0	9,4	97,9
0,075	0	0	3,7	95,8

Bitum sử dụng trong nghiên cứu là loại bitum 60/70 của công ty TNHH nhựa đường Petrolimex. Các chỉ tiêu của bitum 60/70 đã được thể hiện ở **Bảng 2.3** (Chương 2).

Ba loại phụ gia tái sinh được sử dụng là phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1), phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và phụ gia tái sinh gốc dầu đậu nành (RA3). Một số chỉ tiêu kỹ thuật của ba loại phụ gia tái sinh đã được thể hiện ở **Bảng 2.4** (Chương 2).

### 3.3. Thành phần hỗn hợp asphalt

Hiện nay, thiết kế thành phần hỗn hợp asphalt theo phương pháp Marshall vẫn được sử dụng phổ biến ở Việt Nam. Do vậy, đề tài đã lựa chọn phương pháp này để thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng với cỡ hạt danh định lớn nhất là 12,5 mm (AC12,5). Hỗn hợp asphalt tái chế nóng được thiết kế để đạt được các tính năng tương đương như với hỗn hợp asphalt nóng truyền thống (không sử dụng RAP). Các chỉ tiêu kỹ thuật của hỗn hợp asphalt tái chế nóng được thiết kế cần thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 13567-1:2022 [16].

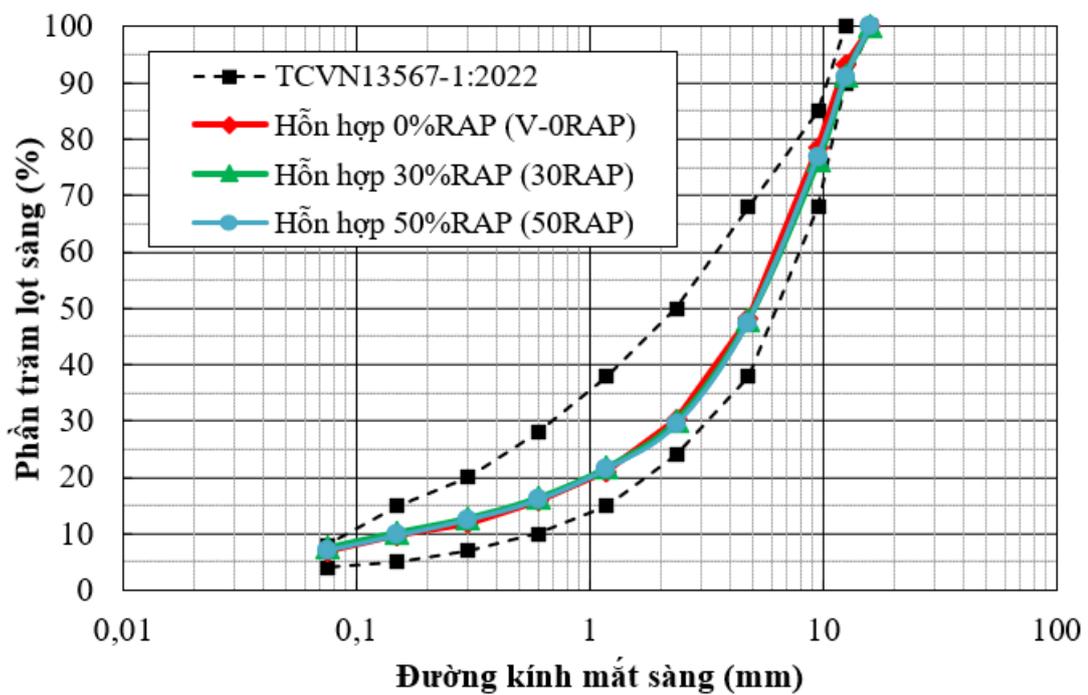
Trên cơ sở thành phần hạt của các cốt liệu đã được xác định, nghiên cứu tiến hành tính toán tỷ lệ phối trộn và kiểm tra cấp phối của hỗn hợp cốt liệu. Kết quả tính toán tỷ lệ thành phần hỗn hợp cốt liệu được thể hiện ở **Bảng 3.6**. Đường cong cấp phối của các hỗn hợp cốt liệu được thể hiện ở **Hình 3.2**.

**Bảng 3.6. Thành phần phối trộn cốt liệu**

Loại hỗn hợp	Tỷ lệ phối trộn ứng với loại cốt liệu				
	Đá 10-16	Đá 5-10	Đá 0-5	RAP	Bột khoáng
V-0RAP	18	30	48	0	4
30RAP	16	18	32	30	4
50RAP	12	13	22	50	3

Đối với hỗn hợp asphalt tái chế, việc thiết kế thành phần hỗn hợp vẫn tuân theo trình tự thiết kế như hỗn hợp không có RAP nhưng có một số khác biệt nhỏ [84]. Vật liệu RAP được coi như là một cốt liệu khi xác định cấp phối hỗn hợp cốt liệu. Theo MS-2 [84], vật liệu RAP được gia nhiệt ở nhiệt độ 110°C trong 2 giờ. Nhiệt độ cao hơn hoặc thời gian gia nhiệt dài hơn có thể dẫn đến những thay đổi về tính chất của vật liệu RAP. Cốt liệu mới được gia nhiệt ở nhiệt độ 180-200°C. Để bù cho việc nhiệt độ của RAP thấp

hơn, cốt liệu mới nên được gia nhiệt cao hơn nhiệt độ trộn. Nguyên tắc chung là tăng nhiệt độ của cốt liệu mới thêm 0,5°C cho mỗi phần trăm RAP được sử dụng trong hỗn hợp. Bitum mới được gia nhiệt đến khi chảy lỏng và không điều chỉnh nhiệt độ của bitum. Vật liệu RAP đã được gia nhiệt sẽ được thêm vào và trộn cùng với cốt liệu mới. Sau đó bitum mới được thêm vào với hàm lượng theo thiết kế. Để tìm ra hàm lượng bitum tối ưu ứng với hỗn hợp cốt liệu đã chọn, mỗi hỗn hợp asphalt tiến hành đúc 5 tổ mẫu với các hàm lượng bitum cách nhau 0,5%. Kết quả thiết kế thành phần và các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông asphalt theo phương pháp Marshall được thể hiện ở **Bảng 3.7**.



Hình 3.2. Thành phần cấp phối của hỗn hợp cốt liệu

Bảng 3.7. Các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông asphalt theo phương pháp Marshall

Chỉ tiêu	Loại hỗn hợp			TCVN 13567-1:2022
	V-0RAP	30RAP	50RAP	
Tổng hàm lượng bitum, %	5	5	5	-
Hàm lượng bitum RAP, %	-	0,9	1,4	-
Hàm lượng bitum mới, %	5	4,1	3,6	-
Tỷ trọng lớn nhất của hỗn hợp bê tông asphalt, $G_{mm}$	2,566	2,557	2,542	-

Chỉ tiêu	Loại hỗn hợp			TCVN 13567-1:2022
	V-0RAP	30RAP	50RAP	
Tỷ trọng khối của mẫu bê tông bê tông asphalt sau đầm nén, $G_{mb}$	2,456	2,431	2,424	-
Độ rỗng dư, $V_a$ , %	4,30	4,93	4,64	4 - 6
Độ rỗng hỗn hợp vật liệu khoáng, VMA, %	14,4	14,9	14,9	$\geq 14$
Độ rỗng lấp đầy bitum, VFA, %	70,2	66,9	68,8	65 - 75
Độ ổn định Marshall, kN	12,8	14,5	15,6	$\geq 8,0$
Độ dẻo Marshall, mm	3,5	3,3	3,2	1,5 - 4

Đối với hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh, phụ gia tái sinh sẽ được trộn trước với bitum mới, sau đó sẽ được trộn cùng với cốt liệu mới và vật liệu RAP đã được gia nhiệt. Phụ gia tái sinh có thể được đưa vào hỗn hợp bê tông asphalt tái chế theo hai phương pháp khác nhau bao gồm, không thay thế bitum mới (nghĩa là bổ sung phụ gia tái sinh) hoặc thay thế bitum mới bằng lượng phụ gia tái sinh thêm vào. Tuy nhiên, Arámbula và các cộng sự [35] chỉ ra rằng, mức độ bao phủ cốt liệu của bitum có xu hướng giảm nếu phụ gia tái sinh đưa vào được tính là thay thế một phần bitum, trong khi bitum có mức độ bao phủ vào cốt liệu cao khi phụ gia tái sinh được tính thêm vào bitum (không thay thế - bổ sung phụ gia tái sinh). Do vậy, trong nghiên cứu này, khối lượng phụ gia tái sinh được thêm vào là bổ sung và không tính vào khối lượng bitum mới.

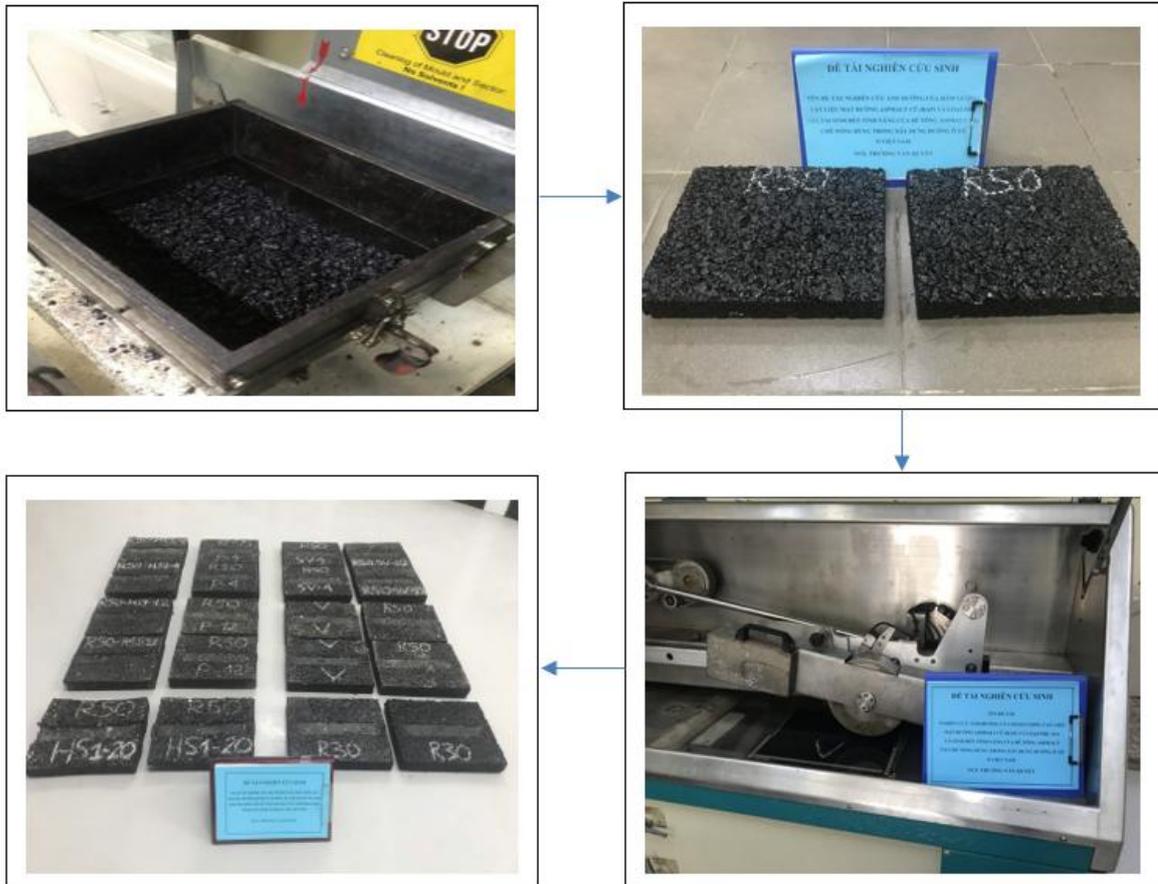
### 3.4. Thí nghiệm sức kháng hằn lún vệt bánh xe theo phương pháp Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT)

Sử dụng phụ gia tái sinh làm giảm độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế, tuy nhiên chiều sâu hằn lún vệt bánh xe có thể tăng lên. Khi hàm lượng phụ gia tái sinh quá lớn sẽ làm mềm đáng kể bitum và sẽ tác động bất lợi đến khả năng kháng hằn lún của hỗn hợp asphalt. Ở Việt Nam, thí nghiệm hằn lún vệt bánh xe theo phương pháp HWTT theo tiêu chuẩn TCVN 13899:2023 [19] (hoặc tiêu chuẩn AASHTO T324 [32]) thường được sử dụng để đánh giá sức kháng hằn lún của bê tông asphalt.

### 3.4.1. Phương pháp thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng RAP, loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến sức kháng hằn lún vết bánh xe của hỗn hợp asphalt tái chế nóng, các hỗn hợp asphalt được chuẩn bị như thể hiện ở **Bảng 3.1**. Trước khi đầm tạo mẫu, các hỗn hợp rời được đặt trong tủ sấy để mô phỏng điều kiện hóa già ngắn hạn theo tiêu chuẩn AASHTO R30 [26].

**Hình 3.3** thể hiện quá trình chế bị mẫu trên thiết bị đầm lặn và quá trình thí nghiệm hằn lún vết bánh xe. Quá trình đầm tạo mẫu và thí nghiệm được thực hiện ở Phòng thí nghiệm LAS-XD 1256, Trung tâm Khoa học Công nghệ GTVT, Trường Đại học GTVT. Các mẫu được chế bị trong phòng thí nghiệm với kích thước 300×260×50 mm, độ rỗng dư bằng 7±1,0 %. Nhiệt độ thí nghiệm được lựa chọn là 50°C trong môi trường nước với số lượt tác dụng của bánh xe là 20000 lượt. Chiều sâu hằn lún vết bánh xe cho phép tối đa là 12,5 mm (TCVN 13567-1:2022) [16].



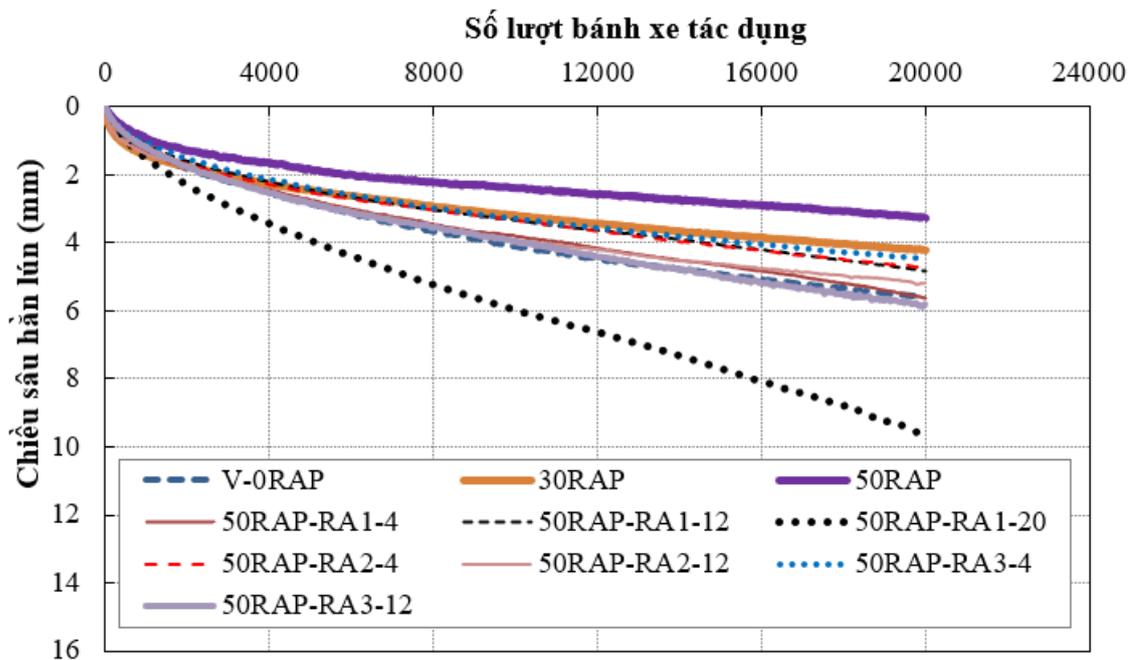
**Hình 3.3. Chuẩn bị mẫu thử và thí nghiệm HWTT**

### 3.4.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích

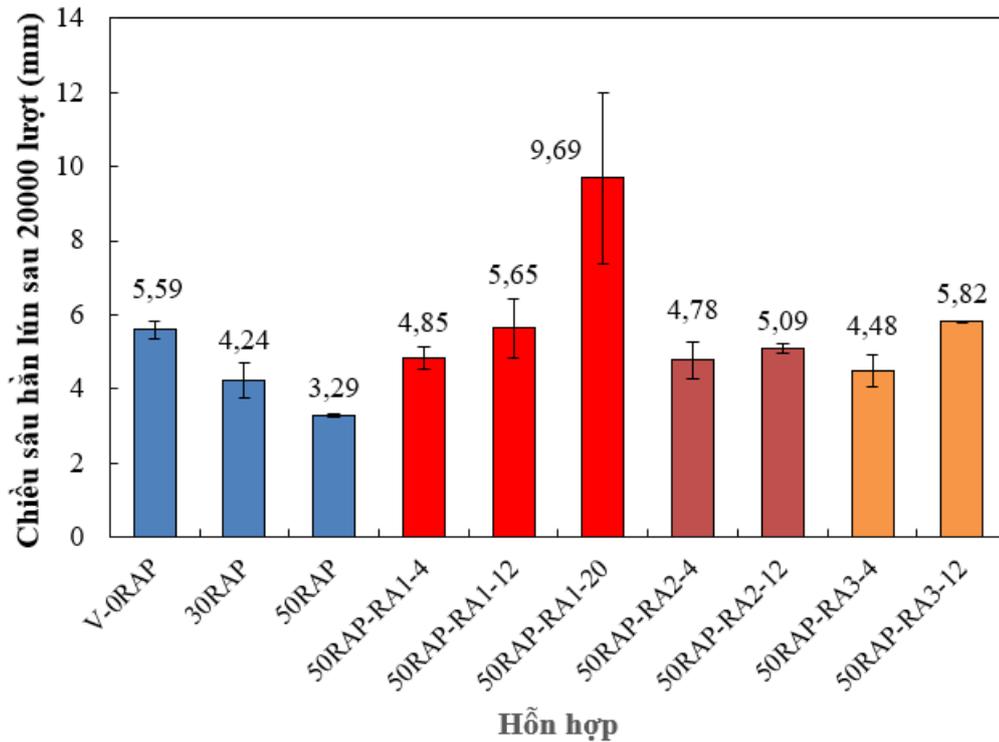
Kết quả thí nghiệm hằn lún vết bánh xe của các hỗn hợp được thể hiện ở **Hình 3.4**. **Hình 3.5** thể hiện kết quả chiều sâu hằn lún của các hỗn hợp sử dụng các loại phụ gia tái sinh khác nhau sau 20000 lượt bánh xe tác dụng. Giá trị độ lún đạt được sau 20000 lượt bánh xe tác dụng của các mẫu bê tông asphalt đều thấp hơn so với giới hạn độ lún lớn nhất cho phép là 12,5 mm.

#### 3.4.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến sức kháng hằn lún vết bánh xe của bê tông asphalt tái chế nóng

Kết quả thí nghiệm hằn lún vết bánh xe của các hỗn hợp có hàm lượng RAP khác nhau (V-0RAP, 30RAP và 50RAP) cũng được thể hiện ở **Hình 3.4** và **Hình 3.5**. Khi gia tăng hàm lượng RAP trong hỗn hợp, chiều sâu hằn lún vết bánh xe có xu hướng giảm xuống. Với hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP, chiều sâu hằn lún giảm tương ứng 24,2% và 41,5% so với hỗn hợp đối chứng không có RAP. Như vậy, có thể thấy rằng, sức kháng hằn lún vết bánh xe của hỗn hợp asphalt tái chế nóng tăng lên khi gia tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp. Kết quả này có thể được giải thích do sự có mặt của bitum RAP, đã bị lão hóa và trở nên cứng hơn (độ kim lún giảm, nhiệt độ hóa mềm và mô đun cắt động  $|G^*|$  tăng)



**Hình 3.4. Kết quả thí nghiệm hằn lún vết bánh xe của các hỗn hợp**



**Hình 3.5.** Chiều sâu hằn lún vết bánh xe của các hỗn hợp sau 20000 lượt

**3.4.2.2. Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến sức kháng hằn lún vết bánh xe của bê tông asphalt tái chế nóng**

**Bảng 3.8** thể hiện kết quả phân tích ANOVA về ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến chiều sâu hằn lún vết bánh xe của các hỗn hợp asphalt tái chế nóng. Kết quả chỉ ra rằng, trong ba loại phụ gia tái sinh được sử dụng để nghiên cứu, không có sự khác biệt về ảnh hưởng của loại phụ gia tái sinh đến chiều sâu hằn lún vết bánh xe. Tuy nhiên, hàm lượng phụ gia tái sinh được thêm vào trong hỗn hợp có ảnh hưởng đến sức kháng hằn lún của hỗn hợp ( $P\text{-value} < 0,05$ ). Đối với cả ba loại phụ gia tái sinh, khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh, chiều sâu hằn lún vết bánh xe có xu hướng gia tăng nhưng vẫn thấp hơn giới hạn quy định ( $< 12,5$  mm).

**Bảng 3.8.** Phân tích ANOVA chiều sâu hằn lún vết bánh xe

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Loại phụ gia tái sinh	2	0,0691	0,03454	0,46	0,661
Hàm lượng phụ gia tái sinh	2	27,2898	9,09661	121,22	0,000
Error	4	0,3002	0,0504		
Tổng	9	32,4177			

Phân tích Tukey so sánh sự khác nhau về hàm lượng phụ gia tái sinh được thêm vào đến chiều sâu hằn lún của hỗn hợp (**Bảng 3.9**). Kết quả cho thấy có sự khác biệt về chiều sâu hằn lún giữa hỗn hợp asphalt tái chế nóng có và không có phụ gia tái sinh (nhóm C). Ở một khoảng hàm lượng phụ gia tái sinh thấp (4-12% theo khối lượng bitum RAP), không có sự khác nhau về chiều sâu hằn lún của các hỗn hợp (cùng nhóm B). Tuy nhiên, ở hàm lượng phụ gia tái sinh cao (20%), có sự gia tăng đáng kể về chiều sâu hằn lún vết bánh xe (nhóm A). Điều này thể hiện vai trò của phụ gia tái sinh trong việc trẻ hóa và làm mềm bitum cũ trong vật liệu RAP. Với hỗn hợp 50RAP-RA1-20, chiều sâu hằn lún ở 20000 lượt tác dụng là 9,69 mm, giá trị này gần với chiều sâu lún tối đa cho phép.

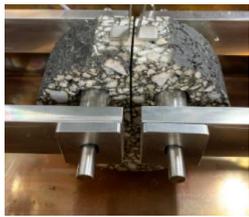
**Bảng 3.9. So sánh Tukey chiều sâu hằn lún vết bánh xe**

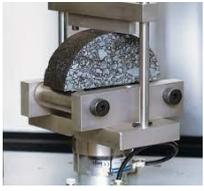
Hàm lượng phụ gia tái sinh	N	Trung bình	Nhóm
20	1	9,59778	A
12	3	5,51833	B
4	3	4,70000	B
0	3	3,27000	C

### 3.5. Thí nghiệm sức kháng nứt theo mô hình thí nghiệm kéo gián tiếp (IDEAL-CT)

Hiện nay, để đánh giá sức kháng nứt của bê tông asphalt, có thể sử dụng nhiều mô hình khác nhau. Việc lựa chọn mô hình thí nghiệm nào sẽ phụ thuộc vào việc đánh giá dạng phá hoại nứt, độ tin cậy của thí nghiệm, tính dễ phổ cập của thí nghiệm. **Bảng 3.10** đưa ra các mô hình thí nghiệm đánh giá sức kháng nứt, tùy thuộc vào dạng phá hoại nứt.

**Bảng 3.10. Các thí nghiệm được sử dụng đánh giá sức kháng nứt [144]**

Phương pháp thí nghiệm	Dạng nứt	Mô hình	Tiêu chuẩn
Thí nghiệm kéo trực tiếp mẫu hình đĩa – Disk-Shaped Compact Tension (DCT)	Nứt ở nhiệt độ thấp và nứt phản ánh		ASTM D7313

<b>Phương pháp thí nghiệm</b>	<b>Dạng nứt</b>	<b>Mô hình</b>	<b>Tiêu chuẩn</b>
Thí nghiệm kéo gián tiếp – Indirect Tensile (IDT)	Nứt ở nhiệt độ thấp		AASHTO T322
Thí nghiệm uốn mẫu bán nguyệt – Semi-Circular Bending (SCB)	Nứt ở nhiệt độ thấp		AASHTO TP105 AASHTO T394
	Nứt ở nhiệt độ trung bình (Louisiana SCB)		ASTM D8044
	Nứt ở nhiệt độ trung bình (I-FIT)		AASHTO TP124 AASHTO T393
Thí nghiệm Overlay test (OT)	Nứt môi/Nứt phản ánh		Tex-248-F
Thí nghiệm uốn môi bốn điểm (Flexural Bending Beam)	Nứt môi		AASHTO T321
Thí nghiệm kéo gián tiếp – Indirect Tensile Asphalt Cracking Test (IDEAL–CT)	Nứt/nứt ở nhiệt độ trung bình		ASTM D8225
Thí nghiệm môi theo chu kỳ kéo trực tiếp - Direct tension cyclic fatigue (DTCF)	Nứt môi		AASHTO T400

Trên cơ sở tổng hợp các thí nghiệm đánh giá sức kháng nứt nứt ở trên, nghiên cứu đã lựa chọn mô hình thí nghiệm kéo gián tiếp (IDEAL-CT) trên mẫu trụ tròn để đánh giá khả năng kháng nứt, theo tiêu chuẩn ASTM D8225 [41]. Phương pháp thí nghiệm này đã được áp dụng phổ biến ở nhiều bang tại Mỹ do tính đơn giản, thời gian thực hiện nhanh cũng như phù hợp với điều kiện thực tế ở Việt Nam hiện nay. Kế hoạch thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của các hỗn hợp có xét đến điều kiện hóa già đã được chỉ ra ở **Bảng 3.1**.

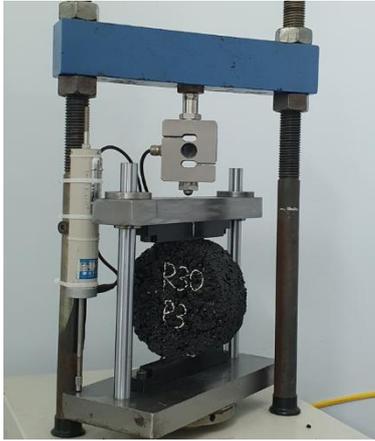
### 3.5.1. Phương pháp thí nghiệm

Thí nghiệm IDEAL-CT được thực hiện để xác định chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  (Cracking Tolerance Index). Các mẫu thí nghiệm có đường kính bằng 150 mm, chiều cao bằng  $62 \pm 1$  mm, độ rỗng dư bằng  $7 \pm 0,5$  %. Hỗn hợp rời sau khi trộn xong sẽ được cho vào tủ sấy để hóa già ngắn hạn (STOA) và hóa già dài hạn (LTOA). Sau đó, các hỗn hợp sẽ được đầm để tạo mẫu sử dụng thiết bị đầm xoay Troxler. **Hình 3.6** thể hiện quá trình chuẩn bị mẫu cho thí nghiệm IDEAL-CT. Quá trình chuẩn bị mẫu và thí nghiệm IDEAL-CT được thực hiện ở Phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng, Trường Đại học GTVT.

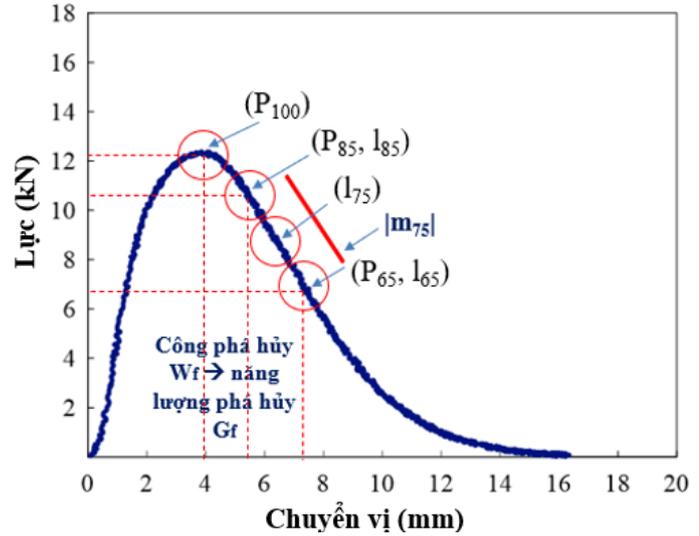


**Hình 3.6. Quá trình chuẩn bị mẫu**

Trước khi thí nghiệm IDEAL-CT, mẫu được đặt vào tủ bảo ôn ở 25°C trong 4 giờ, sau đó tiến hành thí nghiệm nén ép chế trên máy nén với tốc độ tăng tải là 50 mm/phút với tốc độ ghi dữ liệu lực và chuyển vị là 40-50 Hz (**Hình 3.7a**). Kết quả thí nghiệm thể hiện bằng biểu đồ quan hệ lực – chuyển vị, như ở **Hình 3.7b**.



(a)



(b)

**Hình 3.7. Thí nghiệm IDEAL-CT**

(a) tiến hành thí nghiệm, (b) đường cong quan hệ lực – chuyển vị

Từ số liệu biểu đồ quan hệ lực – chuyển vị được sử dụng để tính toán chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$ . Chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  được tính toán theo công thức (3.1) và (3.2) [41].

Với mẫu có chiều cao 62 mm:

$$CT_{Index} = \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \left( \frac{l_{75}}{D} \right) \quad (3.1)$$

Với mẫu có chiều cao khác 62 mm:

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \left( \frac{l_{75}}{D} \right) \quad (3.2)$$

Trong đó:

$G_f$  là năng lượng phá hủy nứt ( $J/m^2$ )

$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6 \quad (3.3)$$

D là đường kính mẫu thí nghiệm (mm);

$t$  là chiều cao mẫu thí nghiệm (mm);

$W_f$  là công phá hủy (J) được tính toán là vùng diện tích phía dưới của đường cong quan hệ lực – chuyển vị, xác định theo công thức (3.4)

$$W_f = \sum_{i=1}^{n-1} \left( (l_{i+1} - l_i) \times P_i + \frac{1}{2} \times (l_{i+1} - l_i) \times (P_{i+1} - P_i) \right) \quad (3.4)$$

với  $P_i$  là lực ở vị trí thứ  $i$  (kN);

$P_{i+1}$  là lực ở vị trí thứ  $i + 1$  (kN);

$l_i$  – chuyển vị ở vị trí thứ  $i$  (mm);

$l_{i+1}$  – chuyển vị ở vị trí thứ  $i + 1$  (mm);

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

$|m_{75}|$  là giá trị tuyệt đối của độ dốc đường cong lực – chuyển vị sau giá trị lực nén lớn nhất (N/m), xác định theo công thức (3.5), giá trị ( $P_{85}$ ,  $l_{85}$ ) và ( $P_{65}$ ,  $l_{65}$ ) được xác định như ở **Hình 3.7b**.

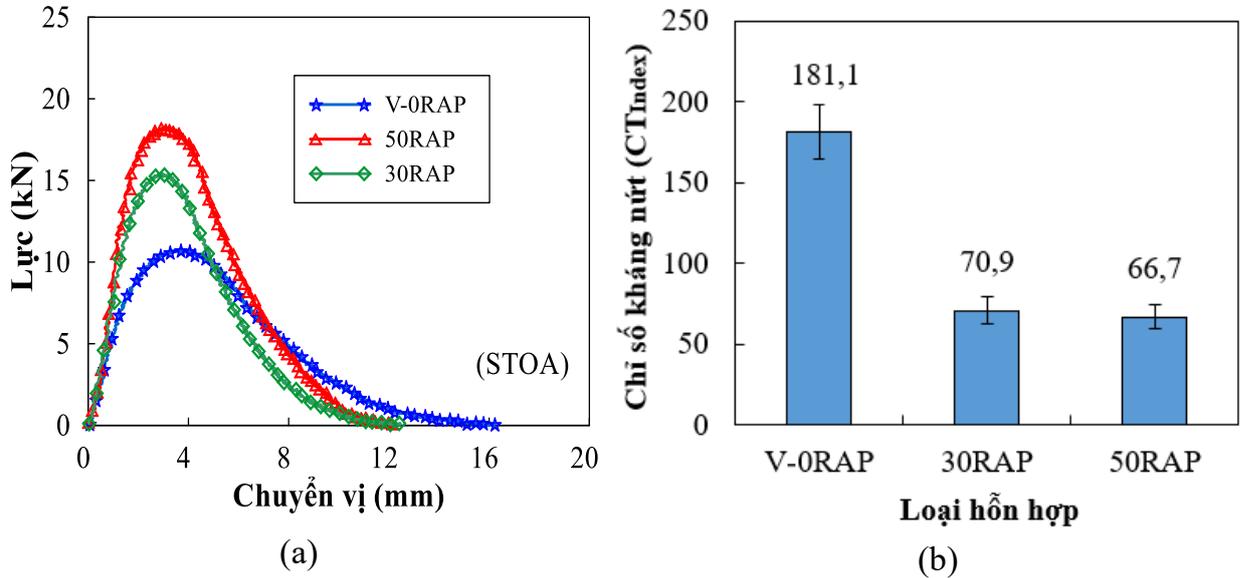
$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (3.5)$$

### 3.5.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích

#### 3.5.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến sức kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nóng

Kết quả thí nghiệm kéo gián tiếp (IDEAL-CT) của các mẫu bê tông asphalt có hàm lượng RAP khác nhau được thể hiện bằng đường cong lực – chuyển vị, như thể hiện ở **Hình 3.8a**. Có thể nhận thấy rằng, đối với hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng RAP, sự thay đổi của các đường cong lực – chuyển vị của các loại hỗn hợp bê tông asphalt là khác nhau rõ rệt. Giá trị lực lớn nhất (peak load –  $P_{100}$ ) tăng lên đáng kể và độ dốc trước khi đạt giá trị lực lớn nhất (pre-peak slope) trở nên dốc hơn đối với hỗn hợp asphalt sử dụng RAP. Khi tăng hàm lượng RAP trong hỗn hợp, giá trị lực lớn nhất ( $P_{100}$ ) tăng lên. Trong khi đó, giá trị chuyển vị ứng với giá trị lực lớn nhất ( $l_{100}$ ) có xu hướng giảm. Giá trị độ dốc  $|m_{75}|$  có xu hướng gia tăng khi tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp. Điều này cho thấy rằng, hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng sử dụng RAP trở nên cứng

và giòn hơn so với hỗn hợp asphalt đối chứng. Năng lượng phá huỷ ( $G_f$ ), độ dốc ( $|m_{75}|$ ) và chỉ số kháng nứt ( $CT_{Index}$ ) được xác định từ đường cong quan hệ lực – chuyển vị thông qua thí nghiệm.



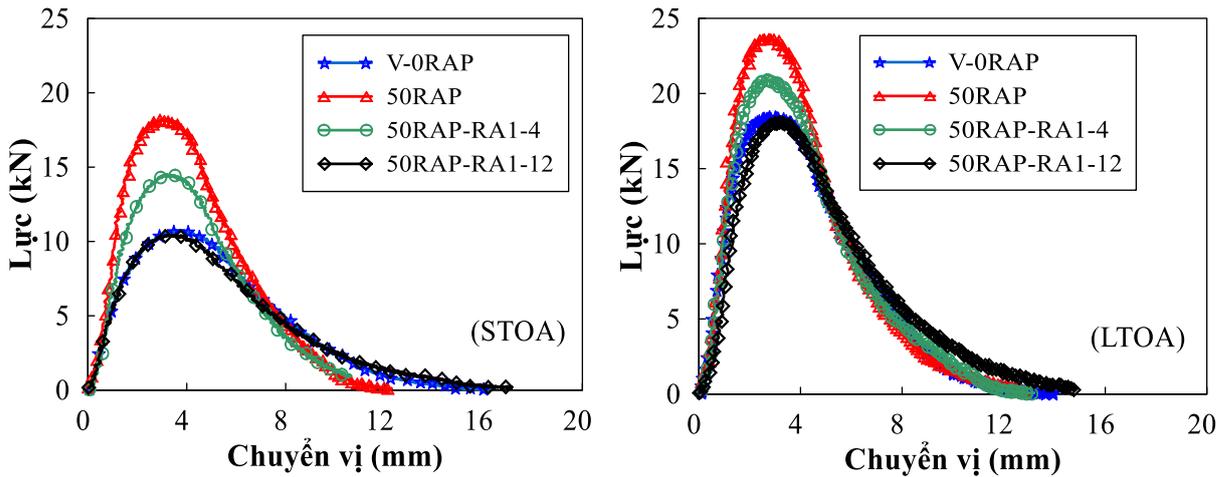
**Hình 3.8. Đường cong lực – chuyển vị và chỉ số  $CT_{Index}$  của các hỗn hợp có hàm lượng RAP khác nhau**

(a) Đường cong lực – chuyển vị, (b) Chỉ số  $CT_{Index}$

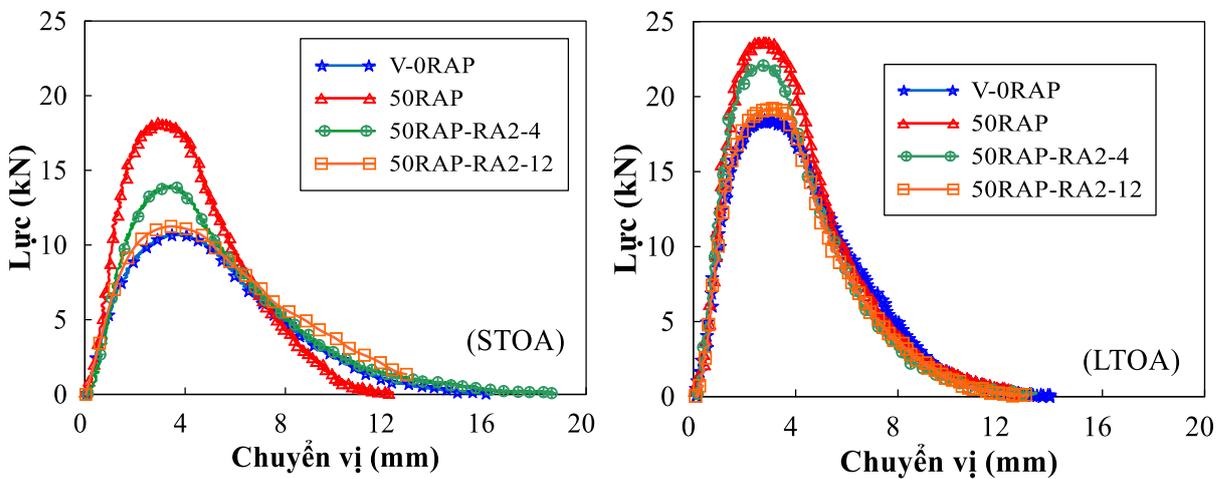
Chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  của các hỗn hợp có hàm lượng RAP khác nhau cũng được thể hiện ở **Hình 3.8b**. Kết quả cho thấy rằng, có sự giảm đáng kể về chỉ số  $CT_{Index}$  của hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng RAP so với hỗn hợp asphalt đối chứng. So với hỗn hợp asphalt không sử dụng RAP (V-0RAP), chỉ số kháng nứt giảm 60,8% và 63,1% tương ứng với hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng 30%RAP và 50%RAP.

### 3.5.2.2. Ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến sức kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nóng

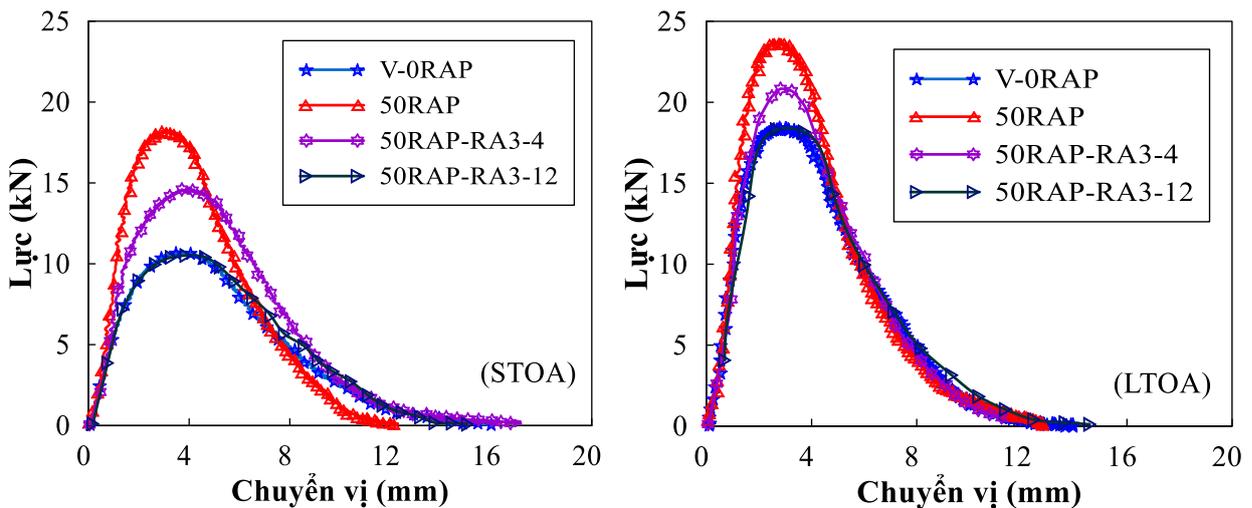
Để đánh giá ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến khả năng kháng nứt, hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 50%RAP (50RAP) được sử dụng trong nghiên cứu này. Các đường cong lực – chuyển vị từ thí nghiệm IDEAL-CT của các mẫu bê tông asphalt ở điều kiện STOA và LTOA được thể hiện ở **Hình 3.9**, **Hình 3.10** và **Hình 3.11**. Kết quả cho thấy, giá trị lực lớn nhất ( $P_{100}$ ) có xu hướng giảm khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh sử dụng.



Hình 3.9. Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu sử dụng phụ gia tái sinh RA1



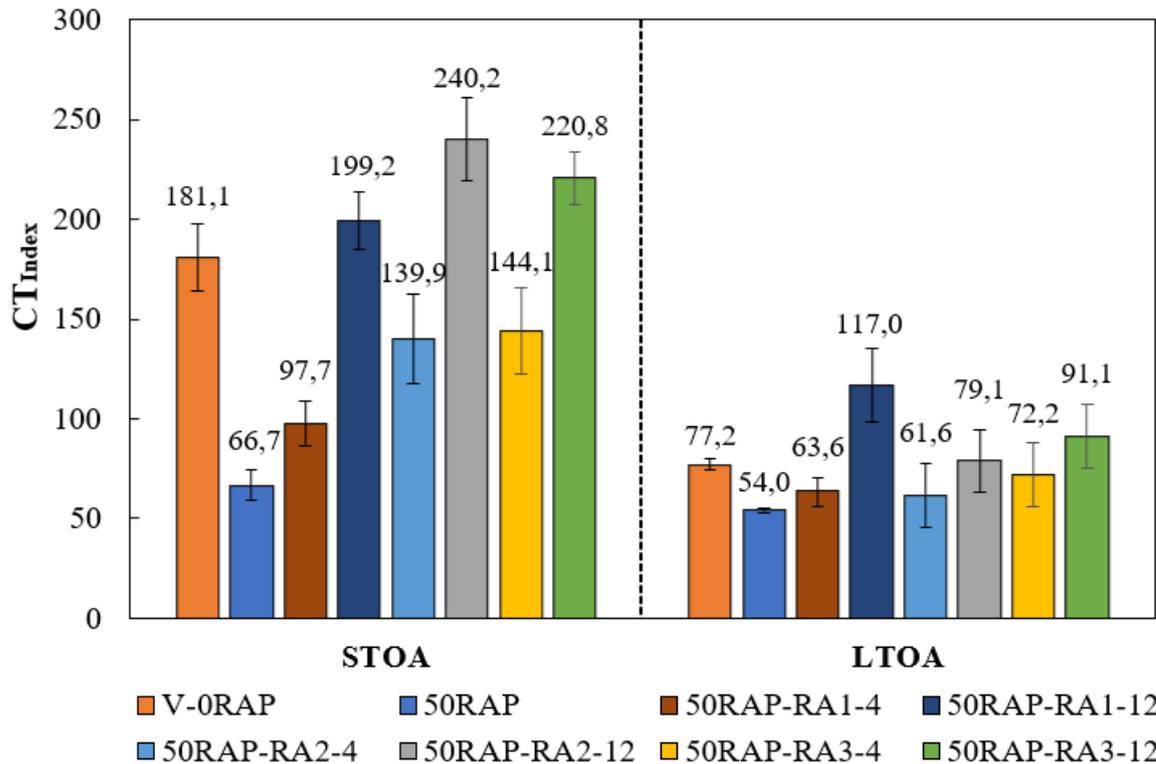
Hình 3.10. Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu sử dụng phụ gia tái sinh RA2



Hình 3.11. Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu sử dụng phụ gia tái sinh RA3

Hình 3.12 thể hiện kết quả chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  của các hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng ba loại phụ gia tái sinh khác nhau ở điều kiện hóa già ngắn hạn STOA và dài

hạn LTOA. Ở điều kiện STOA, đối với hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh RA1, chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  tăng lên từ 97,7 đến 199,2 khi gia tăng hàm lượng phụ gia tái sinh từ 4% đến 12%. Đối với phụ gia tái sinh RA2, chỉ số kháng nứt gia tăng từ 139,9 đến 240,2 và từ 144,1 đến 220,8 đối với phụ gia tái sinh RA3. Như vậy, sử dụng phụ gia tái sinh đã cải thiện theo hướng gia tăng khả năng kháng nứt cho hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng sử dụng RAP.



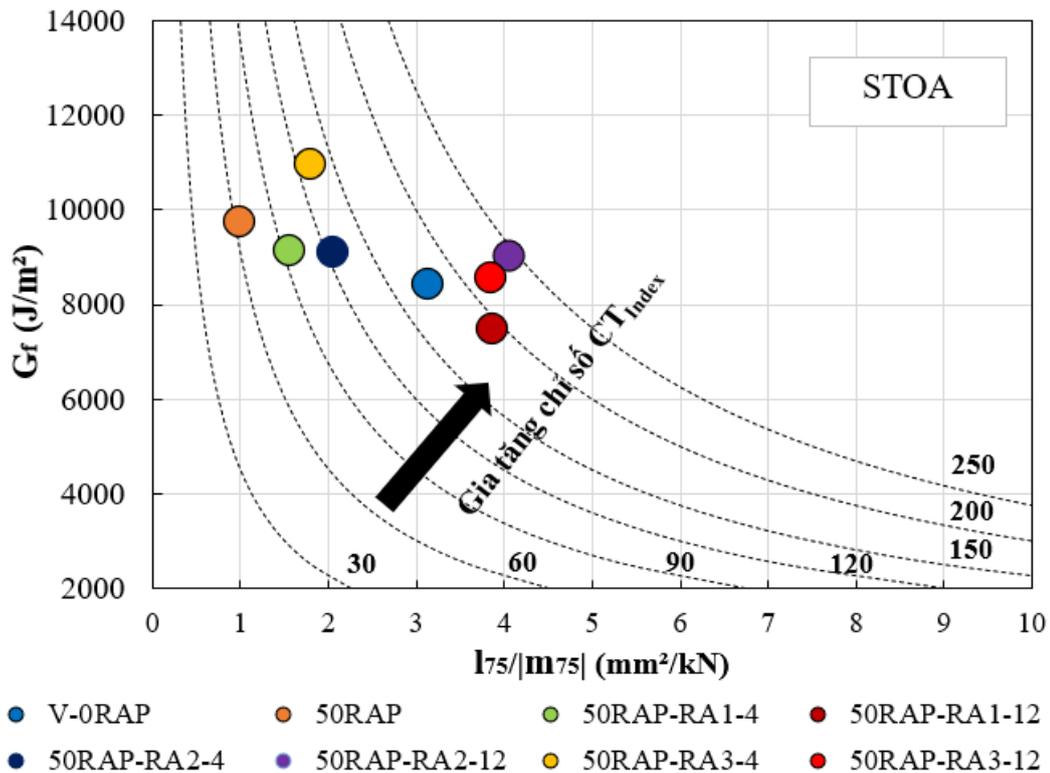
**Hình 3.12. Chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  của các hỗn hợp ở điều kiện STOA và LTOA**

Phân tích phương sai ANOVA chỉ ra rằng, hàm lượng phụ gia tái sinh có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt tái chế nóng ( $P\text{-value} < 0,05$ ) (**Bảng 3.11**). Cả ba loại phụ gia tái sinh đều có hiệu quả cải thiện khả năng kháng nứt và không có sự khác biệt đáng kể về mức độ cải thiện khả năng kháng nứt khi so sánh ba loại phụ gia tái sinh sử dụng ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Việc bổ sung phụ gia tái sinh đã khôi phục được khả năng kháng nứt cho hỗn hợp asphalt, dẫn đến gia tăng chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  và làm giảm giá trị độ dốc  $|m_{75}|$ . Dựa trên kết quả thí nghiệm thu được, có thể kết luận rằng, phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) có hiệu quả kháng nứt cao hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1) khi xét ở điều kiện hóa già ngắn hạn.

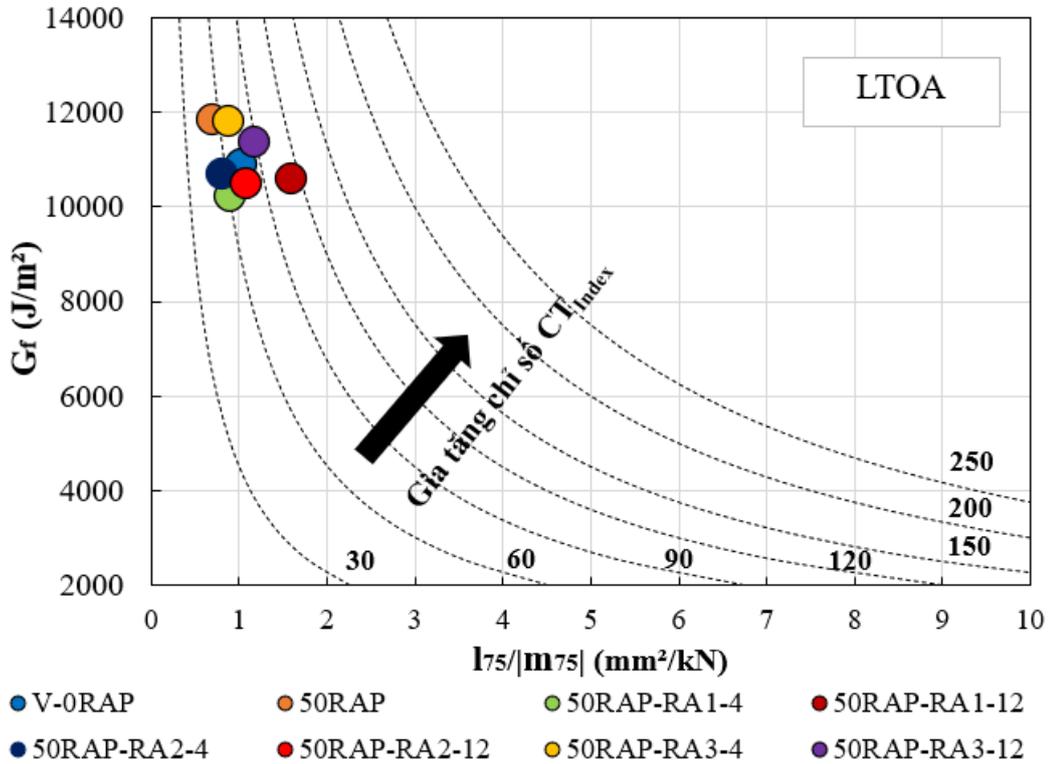
**Bảng 3.11. Phân tích ANOVA chỉ số  $CT_{Index}$**

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Loại phụ gia tái sinh	2	224,3	112,1	0,10	0,903
Hàm lượng phụ gia tái sinh	2	31190,3	15595,1	14,25	0,001
Điều kiện hóa già	1	19391,4	19391,4	17,72	0,001
Error	12	13134,8	1094,6		
Tổng	13	63940,8			

Để hiểu rõ hơn về ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến khả năng kháng nứt, nghiên cứu đã sử dụng biểu đồ tương tác được đưa ra bởi Yin và các cộng sự [123]. Biểu đồ thể hiện tương quan giữa giá trị  $G_f$  biểu thị độ dai (toughness), thể hiện trên trục tung và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  biểu thị ứng xử dẻo - giòn tương đối (relative ductile-brittle), được thể hiện trên trục hoành. Theo công thức (3.1), sự gia tăng giá trị  $G_f$  và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  dẫn đến chỉ số  $CT_{Index}$  cao hơn, xuất hiện gần góc trên bên phải của biểu đồ. Biểu đồ tương tác cũng thể hiện các đường cong dạng đường đồng mức, thể hiện quan hệ giữa giá trị  $G_f$  và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  với chỉ số  $CT_{Index}$ . Các điểm dữ liệu dọc theo mỗi đường đồng mức tạo ra cùng một khoảng giá trị  $CT_{Index}$  nhưng biểu thị giá trị  $G_f$  và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  khác nhau.



**Hình 3.13. Biểu đồ tương tác giữa  $G_f$  và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  ở điều kiện hóa già STOA**

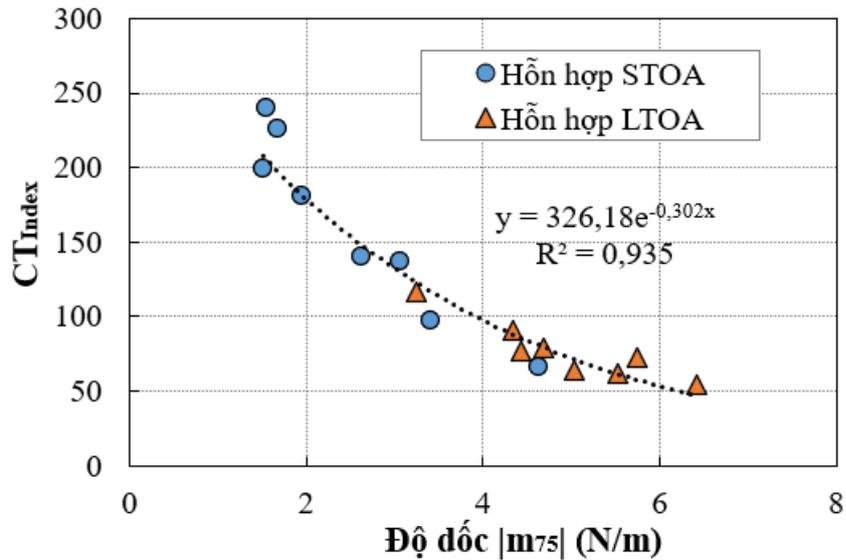


**Hình 3.14. Biểu đồ tương tác giữa  $G_f$  và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  ở điều kiện hóa già LTOA**

Hình 3.13 thể hiện kết quả thí nghiệm IDEAL-CT của các hỗn hợp STOA trên biểu đồ tương tác. Việc sử dụng phụ gia tái sinh trong hỗn hợp asphalt tái chế nóng làm thay đổi nhẹ giá trị  $G_f$  nhưng làm gia tăng đáng kể tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$ , dẫn đến chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  cao hơn so với hỗn hợp 50%RAP không có phụ gia tái sinh. Xu hướng này chỉ ra rằng, phụ gia tái sinh đã cải thiện độ dẻo của hỗn hợp bằng cách làm mềm bitum RAP.

Năng lượng phá hủy  $G_f$  và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  cho hỗn hợp LTOA cũng được thể hiện trong biểu đồ tương tác (Hình 3.14). Ở điều kiện hóa già LTOA, các hỗn hợp asphalt tái chế nóng với phụ gia tái sinh cho thấy giá trị  $G_f$  và tỷ số  $l_{75}/|m_{75}|$  tương tự như hỗn hợp 0%RAP và 50%RAP, dẫn đến đạt được giá trị  $CT_{Index}$  tương đương.

Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, năng lượng phá hủy  $G_f$  không thể hiện sự thay đổi đáng kể như giá trị độ dốc  $|m_{75}|$  nên khả năng kháng nứt giảm chủ yếu là do độ dốc  $|m_{75}|$  tăng. Như vậy, chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  chịu ảnh hưởng lớn bởi giá trị độ dốc  $|m_{75}|$ . Một mối quan hệ giữa chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  và độ dốc  $|m_{75}|$  được thể hiện ở Hình 3.15. Kết quả cho thấy, có mối tương quan rất cao giữa chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  và độ dốc  $|m_{75}|$  với hệ số  $R^2 = 0,935$ . Mối quan hệ này cũng tương đồng với kết quả nghiên cứu của Bahia và các cộng sự [42].



Hình 3.15. Quan hệ giữa chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  và độ dốc  $|m_{75}|$

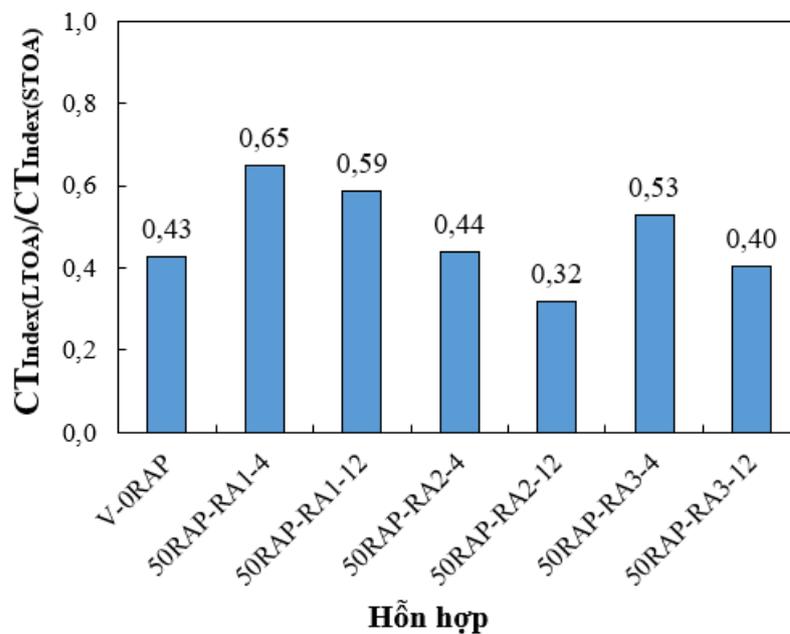
### 3.5.2.3. Ảnh hưởng của điều kiện hóa già đến sức kháng nứt của của bê tông asphalt tái chế nóng

Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu bê tông asphalt xét đến điều kiện hóa già dài hạn được thể hiện ở Hình 3.9, Hình 3.10 và Hình 3.11. Kết quả cho thấy rằng, sự thay đổi các đường cong lực – chuyển vị của các loại bê tông asphalt ở điều kiện hóa già dài hạn LTOA là khác nhau rõ rệt so với ở điều kiện hóa già ngắn hạn STOA. Hình 3.12 so sánh ảnh hưởng của điều kiện hóa già đến sức kháng nứt của hỗn hợp asphalt. Có thể nhận thấy, sự hóa già làm giảm đáng kể khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt. Phân tích phương sai ANOVA (Bảng 3.11) cũng thể hiện sự khác nhau về khả năng kháng nứt ở hai điều kiện hóa già ngắn hạn STOA và hóa già dài hạn LTOA ( $P\text{-value} < 0,05$ ).

Để đánh giá ảnh hưởng của hóa già cũng như hiệu quả của loại phụ gia tái sinh đến khả năng kháng nứt, tỷ số  $CT_{Index(LTOA)}/CT_{Index(STOA)}$  được thiết lập. Giá trị này càng lớn (luôn nhỏ hơn 1), đồng thời chỉ số kháng nứt  $CT_{Index(STOA)}$  càng cao có nghĩa rằng hỗn hợp có khả năng kháng nứt tốt ở cả điều kiện hóa già ngắn hạn và hóa già dài hạn.

Dựa trên kết quả Hình 3.16 cho thấy, phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1) cho hiệu quả kháng nứt tốt hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) khi xét đến điều kiện hóa già dài hạn. Hơn nữa có thể thấy rằng, khi hàm lượng phụ gia tái sinh sử dụng trong hỗn hợp asphalt tái chế nóng càng cao, tỷ số  $CT_{Index(LTOA)}/CT_{Index(STOA)}$  càng nhỏ, cho thấy mức độ lão hóa của hỗn hợp xảy ra càng

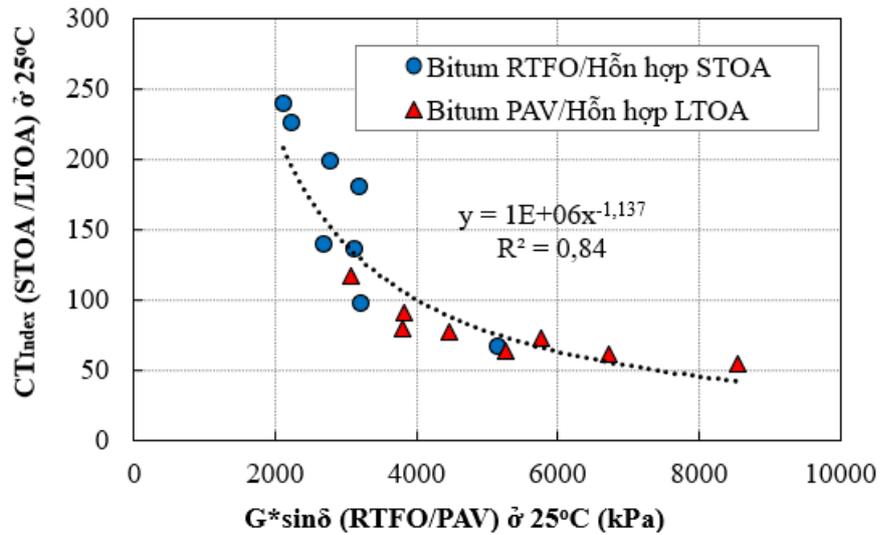
lớn. Kết quả này cũng thể hiện sự tương quan với kết quả thí nghiệm  $G^*\sin\delta$  của bitum hỗn hợp ở điều kiện hóa già dài hạn (PAV), khi chỉ ra rằng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ giữ được khả năng trẻ hóa tốt hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật. Kết luận này được giải thích thông qua thí nghiệm phân tích thành phần hóa học (FTIR) của các mẫu bitum đã được thực hiện ở Chương 2. Mức độ gia tăng chỉ số cacbonyl  $I_{C=O}$  và chỉ số sulfoxide  $I_{S=O}$  trong bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1) diễn ra chậm hơn so với sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) khi trải qua quá trình hóa già dài hạn PAV.



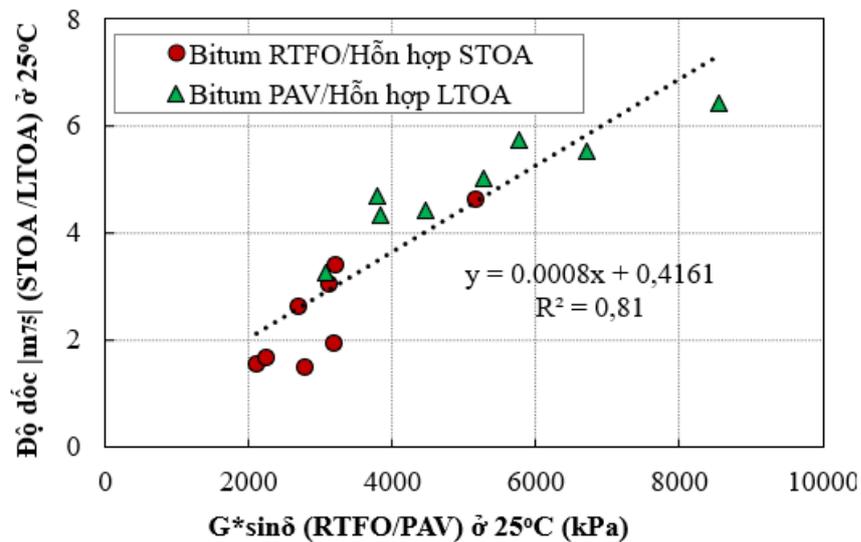
Hình 3.16. Tỷ số  $CT_{Index(LTOA)}/CT_{Index(STOA)}$

#### 3.5.2.4. Tương quan giữa thí nghiệm cắt động lưu biến của bitum với thí nghiệm kháng nứt của bê tông asphalt

Một mối tương quan giữa thông số  $G^*\sin\delta$  của bitum với chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  và độ dốc  $|m_{75}|$  của hỗn hợp ở nhiệt độ 25°C được thiết lập để so sánh tính chất lưu biến của bitum (từ thí nghiệm DSR) với khả năng kháng nứt của hỗn hợp (từ thí nghiệm IDEAL-CT). Trong nghiên cứu này, mối tương quan được thiết lập dựa trên bitum ở điều kiện RTFO và PAV tương ứng với hỗn hợp asphalt ở điều kiện STOA và LTOA. Hình 3.17 thể hiện mối tương quan giữa thông số  $G^*\sin\delta$  với chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  ở 25°C. Kết quả cho thấy, có một mối tương quan cao giữa hai thông số trên ( $R^2 = 0,84$ ). Như vậy, khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt phụ thuộc đáng kể vào tính chất của bitum.



Hình 3.17. Quan hệ giữa  $G^* \sin \delta$  và  $CT_{Index}$  ở 25°C



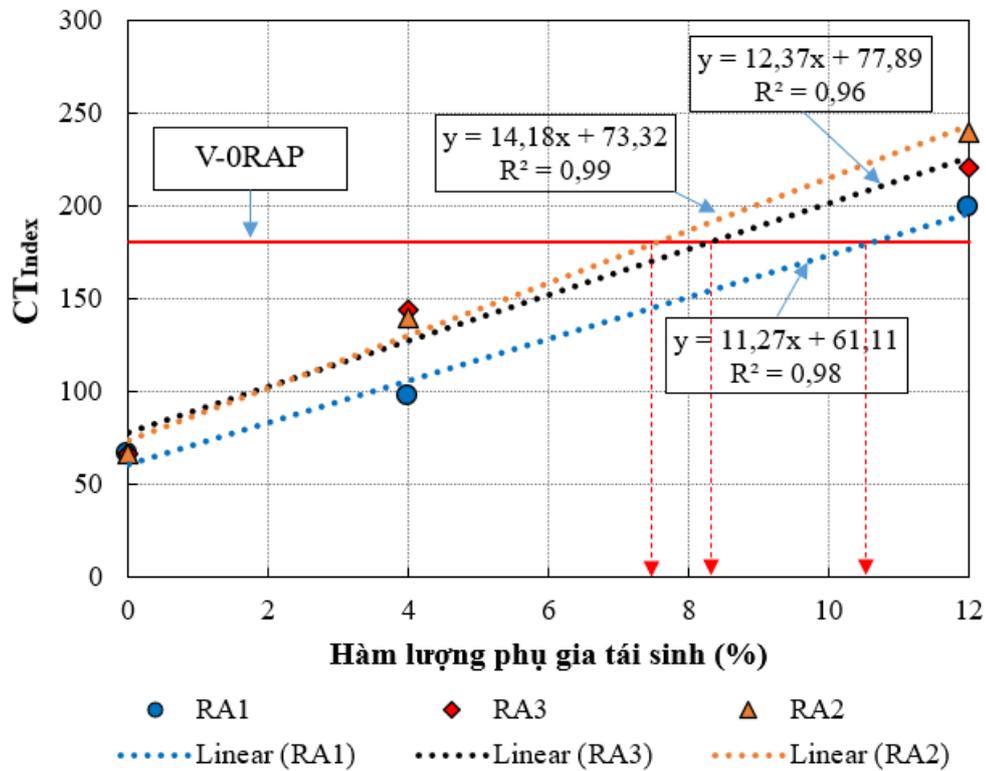
Hình 3.18. Quan hệ giữa  $G^* \sin \delta$  và  $|m_{75}|$  ở 25°C

Trong thí nghiệm IDEAL-CT, độ dốc  $|m_{75}|$  được coi là chỉ số đặc trưng cho tốc độ lan truyền vết nứt và ảnh hưởng đáng kể đến khả năng kháng nứt của hỗn hợp asphalt. Mối quan hệ giữa thông số  $G^* \sin \delta$  với độ dốc  $|m_{75}|$  được thể hiện ở **Hình 3.18**. Kết quả cũng cho thấy, có sự tương quan cao giữa thông số  $G^* \sin \delta$  với độ dốc  $|m_{75}|$  ở 25°C ( $R^2 = 0,81$ ).

### 3.6. Xác định hàm lượng phụ gia tái sinh

Hàm lượng phụ gia tái sinh dùng trong hỗn hợp asphalt tái chế nóng được xác định để đạt được khả năng kháng nứt tương đương với hỗn hợp asphalt đối chứng (V-ORAP) mà không ảnh hưởng đến khả năng kháng hằn lún vết bánh xe. **Hình 3.19** cho thấy, hàm

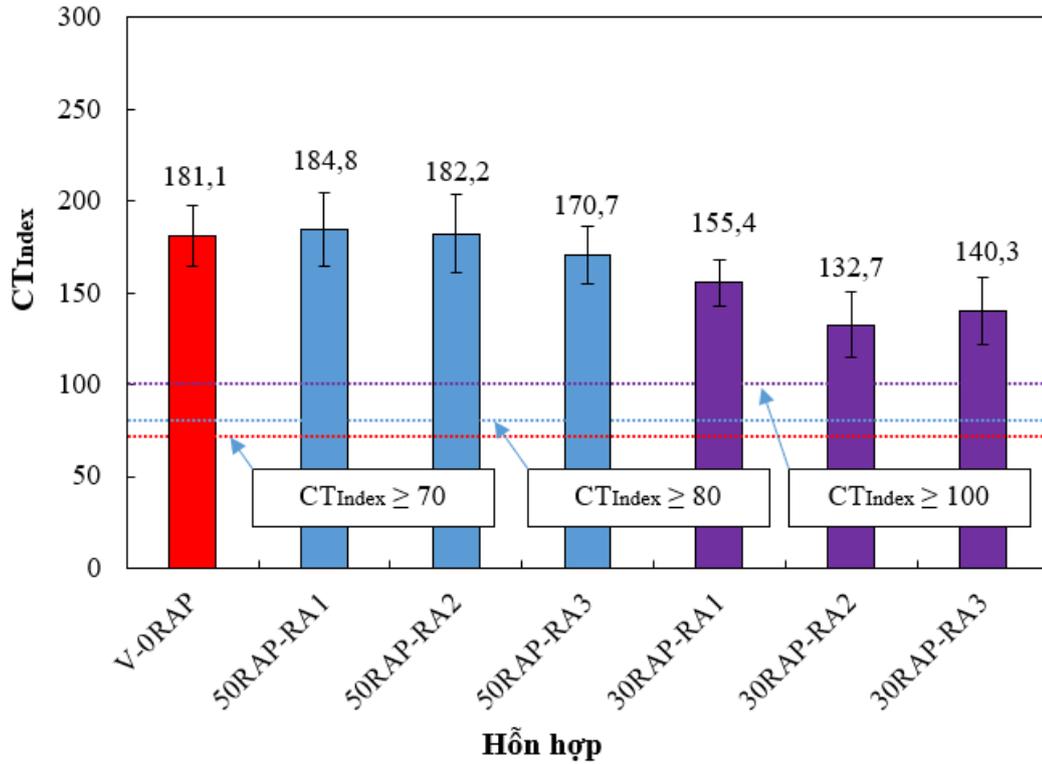
lượng phù hợp cho ba loại phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3 được xác định tương ứng là 10,5%; 7,5% và 8,3% theo khối lượng bitum RAP.



**Hình 3.19. Xác định hàm lượng phụ gia tái sinh**

Để đánh giá khả năng kháng nứt của các hỗn hợp asphalt tái chế nóng ứng với hàm lượng phụ gia tái sinh được lựa chọn, thí nghiệm IDEAL-CT đã được thực hiện. Hàm lượng phụ gia tái sinh (RA1, RA2 và RA3) tương ứng là 10,5%; 7,5% và 8,3% theo khối lượng bitum RAP được áp dụng cho cả hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP.

Trong thí nghiệm này, số lượng mẫu thí nghiệm cho mỗi hỗn hợp là 4 mẫu. Chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  được xác định từ thí nghiệm IDEAL-CT của các hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP với hàm lượng phụ gia tái sinh đã được lựa chọn cho mỗi loại được thể hiện ở **Hình 3.20**. Kết quả cho thấy, chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  của hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh đã gia tăng đáng kể, do đó cải thiện khả năng kháng nứt của hỗn hợp. Tất cả các hỗn hợp trong nghiên cứu đều có chỉ số  $CT_{Index}$  lớn hơn giá trị tối thiểu, được quy định ở một số Bang ở Mỹ, là 70 (Bang Virginia), 80 (Bang Oklahoma) và 100 (Bang Tennessee) đối với các tuyến đường quan trọng [127].



**Hình 3.20. Chỉ số kháng nứt CT<sub>Index</sub> của các hỗn hợp ở hàm lượng phụ gia tái sinh lựa chọn**

### 3.7. Thí nghiệm sức kháng hằn lún vệt bánh xe theo mô hình thí nghiệm lún nhanh (IDEAL-RT)

Thí nghiệm HWTT để đánh giá sức kháng hằn lún vệt bánh xe đã được sử dụng phổ biến ở nhiều nước trên thế giới và ở Việt Nam. Tuy nhiên, nhược điểm của thí nghiệm này là thời gian thí nghiệm dài, mất nhiều thời gian cho việc kiểm soát và đảm bảo chất lượng (QA/QC) trong quá trình thiết kế và thi công hỗn hợp asphalt. Do vậy, cần có thí nghiệm nhanh và đơn giản để thuận lợi cho quá trình QA/QC. Gần đây, một phương pháp thí nghiệm đánh giá sức kháng hằn lún vệt bánh xe mới (Indirect Tensile Asphalt Rutting Test, IDEAL-RT), hay còn gọi là thí nghiệm lún nhanh (Rapid Shear Rutting Test) được đưa ra bởi Zhou và các cộng sự [142], và một số Bang ở Mỹ đã áp dụng phương pháp thí nghiệm này để đánh giá sức kháng hằn lún vệt bánh xe trong quá trình thiết kế hỗn hợp. Để đánh giá khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng khi sử dụng phụ gia tái sinh với hàm lượng được lựa chọn, thí nghiệm IDEAL-RT được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM D8360 [12]. Kế hoạch thí nghiệm và số lượng mẫu thử cho thí nghiệm IDEAL-RT đã được thể hiện ở **Bảng 3.1**.

### 3.7.1. Phương pháp thí nghiệm

Thí nghiệm IDEAL-RT được thực hiện để xác định chỉ số kháng lún  $RT_{Index}$  của hỗn hợp asphalt. Chỉ số  $RT_{Index}$  là một thông số đặc trưng cho khả năng kháng hằn lún vết bánh xe của bê tông asphalt. Khi chỉ số  $RT_{Index}$  càng cao thì khả năng kháng hằn lún của bê tông asphalt càng tốt và do đó chiều sâu hằn lún tại hiện trường càng nhỏ.

**Hình 3.21a** thể hiện mô hình thí nghiệm sức kháng hằn lún theo mô hình thí nghiệm lún nhanh. Trước khi đầm nén, các hỗn hợp rời cũng được đưa vào tủ sấy để mô phỏng quá trình hóa già ngắn hạn (STOA). Đối với thí nghiệm này, các mẫu được chuẩn bị có đường kính 150 mm, chiều cao  $62 \pm 1$  mm được đầm nén bằng thiết bị đầm xoay Troxler với mục tiêu đạt được độ rỗng dư bằng  $7 \pm 0,5\%$  (**Hình 3.21b**).



**Hình 3.21. Mô hình và mẫu thử cho thí nghiệm IDEAL-RT**

*(a) Mô hình thí nghiệm, (b) Chuẩn bị mẫu thí nghiệm*

Trước khi thí nghiệm, các mẫu được đặt vào bể nước ở nhiệt độ  $50^\circ\text{C}$  trong thời gian  $45 \pm 5$  phút. Sau đó, tiến hành thí nghiệm nén ép chẻ trên máy nén Marshall được duy trì với tốc độ tăng tải là  $50 \pm 2$  mm/phút sử dụng bộ gá thí nghiệm IDEAL-RT, như được thể hiện ở **Hình 3.22a**.

Đường cong quan hệ lực – chuyển vị từ thí nghiệm IDEAL-RT được ghi lại, thể hiện trong **Hình 3.22b**. Tải trọng lớn nhất ( $P_{max}$ ) thu được từ đường cong lực – chuyển vị, được sử dụng để tính toán cường độ cắt ( $\tau_f$ ), theo công thức (3.6).

$$\tau_f = 0,356 \times \frac{P_{max}}{t \times w} \quad (3.6)$$

Trong đó:

$\tau_f$  là cường độ chịu cắt (Pa);

$P_{max}$  là giá trị lực lớn nhất khi thí nghiệm (N);

$t$  là chiều cao mẫu (mm);

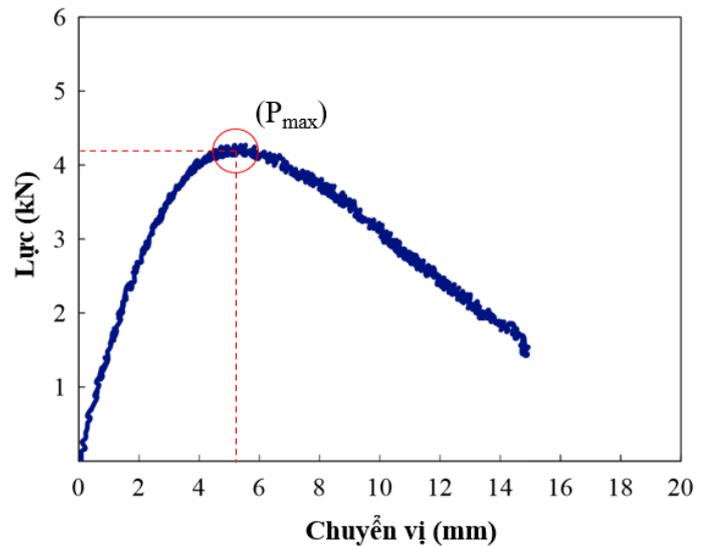
$w$  là bề rộng của dải tải tác dụng lên mẫu (upper loading strip) ( $w = 0,0191$  m).

Chỉ số kháng lún  $RT_{Index}$  được tính toán từ cường độ cắt, theo công thức (3.7).

$$RT_{Index} = 6,618 \times 10^{-5} \times \frac{\tau_f}{1Pa} \quad (3.7)$$



(a)



(b)

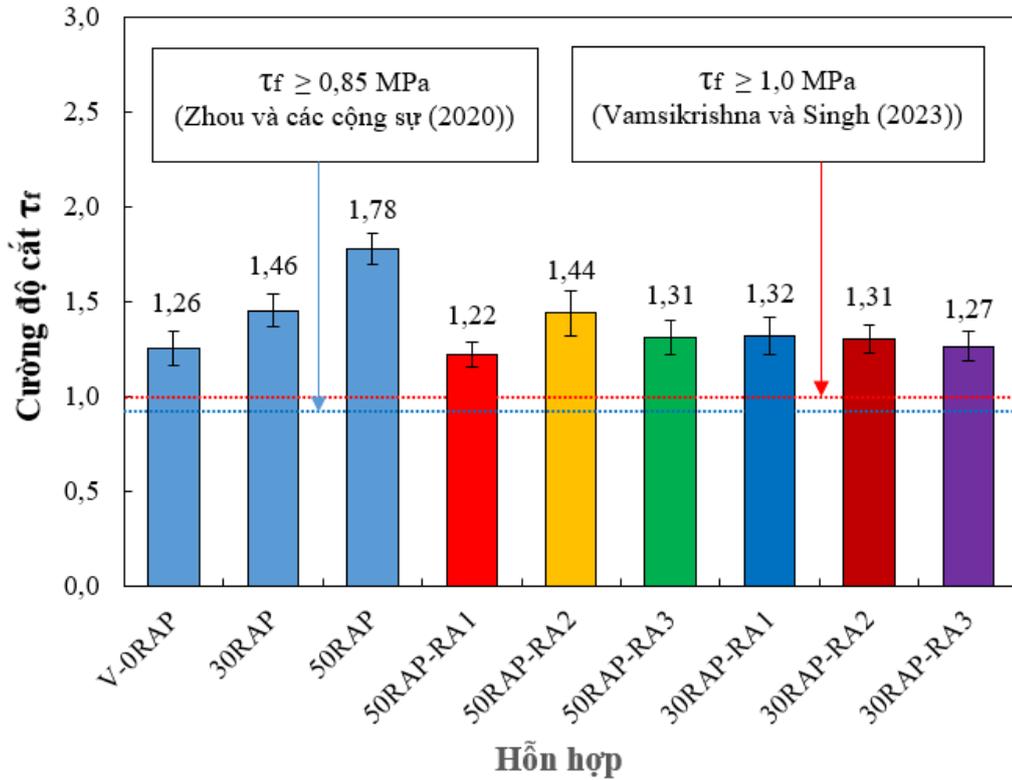
**Hình 3.22. Thí nghiệm IDEAL-RT**

(a) Tiến hành thí nghiệm, (b) Đường cong quan hệ lực – chuyển vị

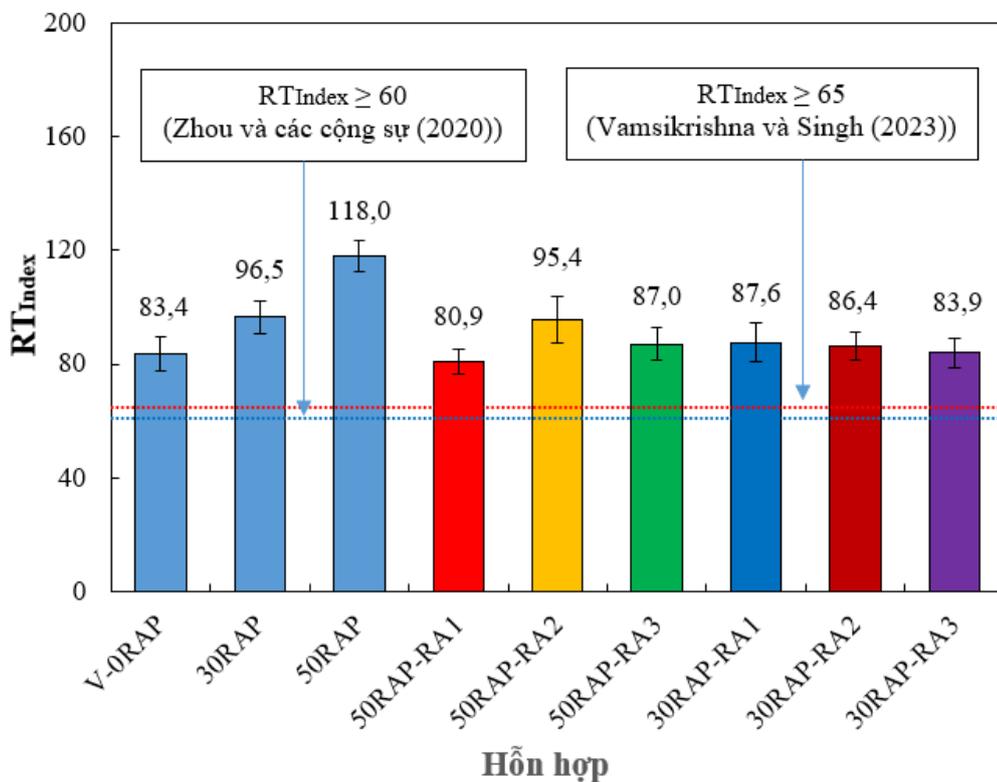
### 3.7.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích

Cường độ cắt được xác định từ các giá trị  $P_{max}$  tương ứng với các đường cong lực – chuyển vị của các hỗn hợp. Các hỗn hợp có giá trị  $P_{max}$  lớn hơn cho giá trị cường độ cắt cao hơn. Trong nghiên cứu này, giá trị cường độ cắt nằm trong khoảng từ 1,22–1,78 MPa đối với các hỗn hợp được hóa già ngắn hạn STOA (**Hình 3.23**).

**Hình 3.23** chỉ ra rằng, hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng RAP có giá trị cường độ cắt cao hơn so với hỗn hợp không sử dụng RAP. Zhou và các cộng sự (2020) [142], Vamsikrishna và Singh [115] đã đề xuất giá trị cường độ cắt tối thiểu là 0,85 MPa và 1,0 MPa. Như vậy, kết quả cho thấy giá trị cường độ cắt của các hỗn hợp đều lớn hơn giá trị tối thiểu theo quy định.



Hình 3.23. Cường độ cắt của các hỗn hợp ở hàm lượng phụ gia tái sinh lựa chọn



Hình 3.24. Chỉ số  $RT_{Index}$  của các hỗn hợp ở hàm lượng phụ gia tái sinh lựa chọn

Với mô hình thí nghiệm lún nhanh IDEAL-RT, chỉ số kháng lún  $RT_{Index}$  của hỗn hợp asphalt được tính toán từ giá trị cường độ cắt theo công thức (3.7). Khi hỗn hợp có chỉ

số  $RT_{Index}$  cao hơn, chiều sâu hằn lún của bê tông asphalt sẽ nhỏ hơn, do đó khả năng kháng hằn lún vết bánh xe sẽ gia tăng. Zhou và các cộng sự [142] đã đưa ra giá trị  $RT_{Index}$  tối thiểu là 60 làm tiêu chí chấp nhận tương ứng cho các hỗn hợp bê tông asphalt sử dụng bitum cấp PG 64-xx. Trong nghiên cứu này, chỉ số kháng lún  $RT_{Index}$  dao động từ 80,9 đến 118,0 (**Hình 3.24**). Khi gia tăng hàm lượng RAP sử dụng, chỉ số  $RT_{Index}$  của hỗn hợp sử dụng 30%RAP và 50%RAP tăng 15,7% và 41,5% so với hỗn hợp đối chứng (0%RAP). Sử dụng phụ gia tái sinh đã làm giảm độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng. Tuy nhiên, kết quả cho thấy, chỉ số kháng lún  $RT_{Index}$  của các hỗn hợp đều lớn hơn ngưỡng quy định được đưa ra bởi Zhou và các cộng sự [142], Vamsikrishna và Singh [115].

### **3.8. Thí nghiệm mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp ( $M_R$ )**

Kết cấu mặt đường được thiết kế gồm nhiều lớp (lớp bê tông asphalt trên cùng, tiếp theo là các lớp cấp phối đá dăm và phía dưới là lớp đất nền) để phân bố tải trọng, từ lớp bề mặt có mô đun đàn hồi cao nhất xuống lớp đất nền có mô đun đàn hồi thấp nhất. Mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp (resilient modulus -  $M_R$ ) của các lớp có ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính khai thác của mặt đường. Do vậy, thông số này là đặc tính vật liệu quan trọng, và được sử dụng trong thiết kế kết cấu mặt đường theo tiêu chuẩn AASHTO-93 [22].

#### **3.8.1. Phương pháp thí nghiệm**

Mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp  $M_R$  được thí nghiệm theo tiêu chuẩn EN 12697-26 [52]. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ 20°C và 30°C với tần số thí nghiệm 1,0 Hz. Các mẫu thí nghiệm có đường kính 100 mm và chiều cao  $63,5 \pm 1,3$  mm, được đầm nén bằng thiết bị đầm xoay Troxler với độ rỗng dư đạt theo thiết kế. Trước khi đầm mẫu, các hỗn hợp cũng được hóa già ngắn hạn STOA. Số lượng mẫu thí nghiệm mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp  $M_R$  cho các hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh với hàm lượng lựa chọn đã được thể hiện ở phần kế hoạch thí nghiệm (**Bảng 3.1**). Mẫu thí nghiệm và quá trình tiến hành thí nghiệm mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp  $M_R$  sử dụng bộ thiết bị Copper, được thể hiện ở **Hình 3.25**.

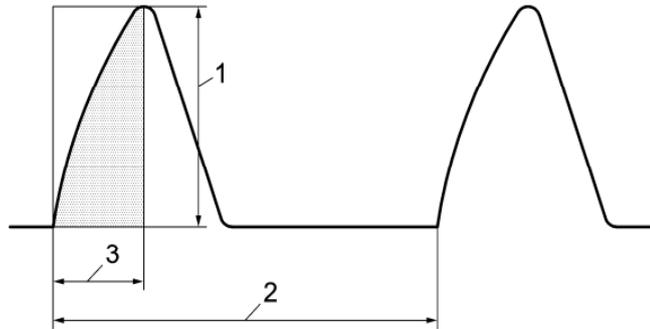


(a)

(b)

**Hình 3.25. Mẫu thử và thí nghiệm mô đun đàn hồi  $M_R$**

*(a) Mẫu thí nghiệm, (b) Tiến hành thí nghiệm*



**Hình 3.26. Tải trọng tác dụng**

*(1) giá trị lớn nhất của tải trọng, (2) chu kỳ gia tải và (3) biến dạng ứng với tải trọng*

Tải trọng gia tải có dạng hình haversine như thể hiện ở **Hình 3.26**. Mô đun đàn hồi  $M_R$  được xác định theo công thức (3.8).

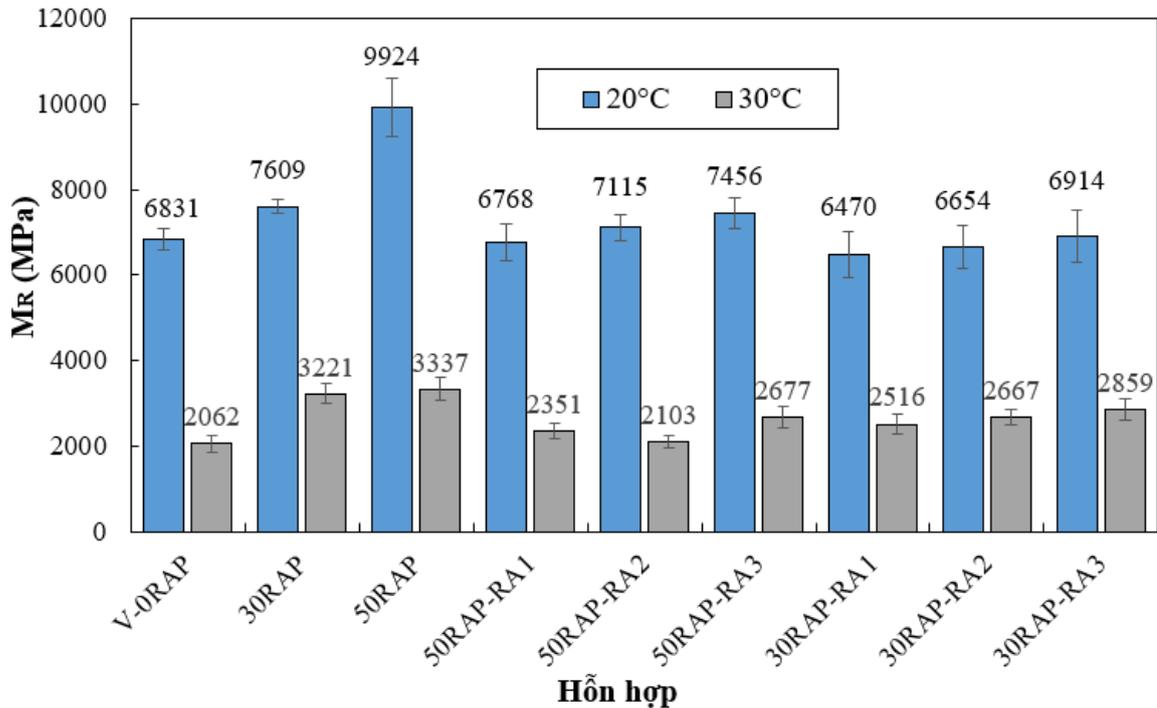
$$M_R = \frac{P}{h \times t} \times (0,27 + \mu) \quad (3.8)$$

Trong đó: P là tải trọng tác dụng (N), h là biến dạng theo phương ngang (mm), t là chiều dày của mẫu (mm) và  $\mu$  là hệ số Poisson.

### 3.8.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi  $M_R$  của các loại bê tông asphalt ở nhiệt độ 20°C và 30°C được thể hiện ở **Hình 3.27**. Nhìn chung, có thể thấy rằng, giá trị mô đun đàn hồi  $M_R$  giảm khi nhiệt độ thí nghiệm tăng. Khi gia tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp, giá trị  $M_R$  có xu hướng tăng, thể hiện hỗn hợp asphalt trở nên cứng hơn. Điều này

có thể được giải thích do bitum cũ trong RAP đã bị lão hóa làm cho hỗn hợp asphalt trở nên cứng hơn. Đối với hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP (30RAP và 50RAP), mô đun đàn hồi  $M_R$  gia tăng 11,4% và 45,3% so với hỗn hợp đối chứng không sử dụng RAP (V-0RAP) khi thí nghiệm ở nhiệt độ 20°C.



**Hình 3.27. Mô đun đàn hồi  $M_R$  của các hỗn hợp**

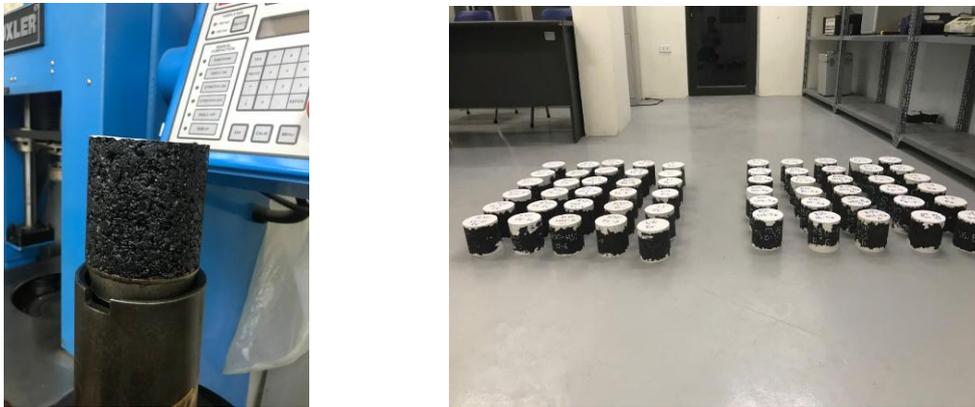
Khi sử dụng phụ gia tái sinh, giá trị mô đun đàn hồi  $M_R$  của hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP có xu hướng giảm, và đạt được tương đương với hỗn hợp đối chứng 0%RAP. Kết quả cho thấy, cả ba loại phụ gia tái sinh (RA1, RA2 và RA3) đều có hiệu quả làm giảm độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng.

### 3.9. Thí nghiệm mô đun động ( $|E^*|$ )

Phương pháp cơ học - thực nghiệm (MEPD) đã và đang được sử dụng phổ biến trong thiết kế kết cấu mặt đường ở nhiều nước trên thế giới, đặc biệt với kết cấu mặt đường sử dụng công nghệ vật liệu mới. Mô đun động ( $|E^*|$ ) là một trong những thông số quan trọng nhất được yêu cầu trong thiết kế kết cấu mặt đường theo phương pháp MEPD [89]. Theo Witczak và các cộng sự [120], mô đun động cũng là một tham số quan trọng được sử dụng để dự báo khả năng kháng hằn lún và kháng nứt do mỏi trong kết cấu mặt đường.

### 3.9.1. Phương pháp thí nghiệm

Quá trình chuẩn bị mẫu và thí nghiệm mô đun động  $|E^*|$  được thực hiện tại phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng, Trường Đại học GTVT. Ba loại phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3 với hàm lượng được lựa chọn dùng cho cả hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP. Kế hoạch thí nghiệm và số lượng mẫu thử cho thí nghiệm mô đun động  $|E^*|$  được thể hiện ở **Bảng 3.1**. Các hỗn hợp được hóa già ngắn hạn STOA và hóa già dài hạn LTOA trước khi đầm nén trên thiết bị Troxler để đạt được mẫu có đường kính 100 mm và chiều cao trong khoảng từ 100 mm đến 104 mm với độ rỗng dư theo thiết kế (**Hình 3.28**).

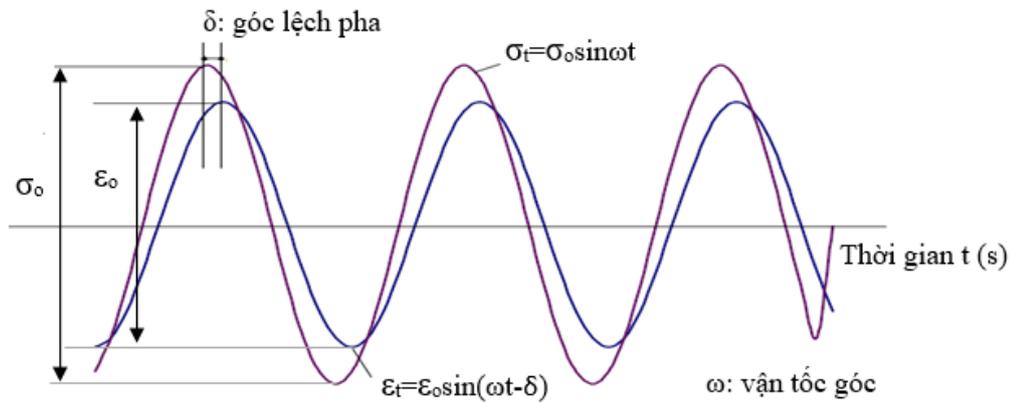


**Hình 3.28. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm mô đun động  $|E^*|$**

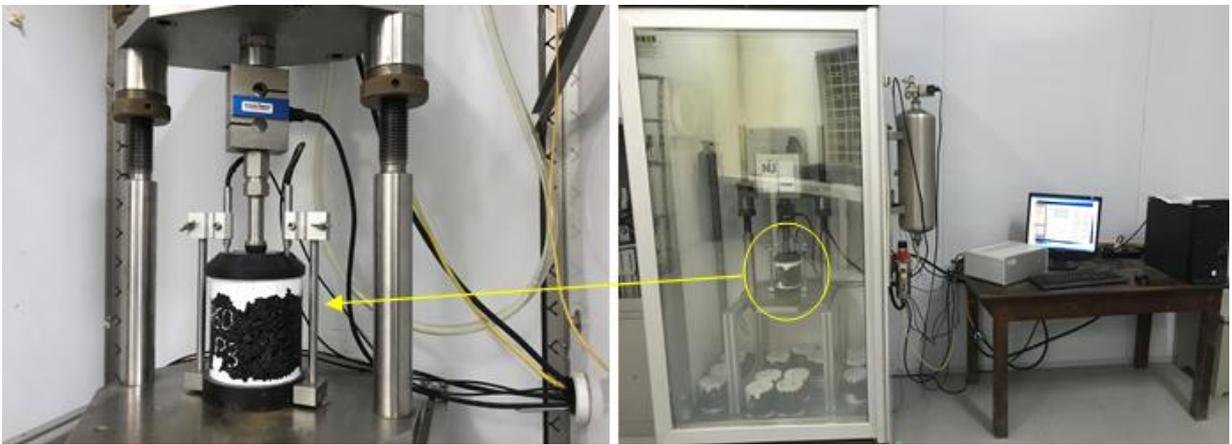
Mô đun động  $|E^*|$  được xác định thông qua thí nghiệm nén dọc trục không hạn chế nở hông trên mẫu hình trụ tròn theo tiêu chuẩn AASHTO TP62 [31] sử dụng bộ thiết bị Copper. Tải trọng tác dụng lên mẫu là một hàm điều hòa dạng hình sin ở các tần số khác nhau và đo giá trị biến dạng tại tần số tương ứng (**Hình 3.29**). Quá trình thí nghiệm mô đun động  $|E^*|$  được thể hiện ở **Hình 3.30**. Thí nghiệm được thực hiện ở sáu tần số, từ tần số cao nhất tới tần số thấp nhất bao gồm 25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,1Hz, và bốn nhiệt độ thí nghiệm, bao gồm 4°C, 21°C, 37°C, 54°C theo tiêu chuẩn AASHTO TP62 [31]. Giá trị ứng suất tác dụng lên mẫu phụ thuộc vào nhiệt độ thí nghiệm, để có giá trị biến dạng dọc trục trong khoảng 50 tới 150 microstrain. Mô đun động  $|E^*|$  được xác định theo công thức (3.9).

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad (3.9)$$

Trong đó:  $\sigma_0$  là biên độ ứng suất và  $\epsilon_0$  là biên độ biến dạng



**Hình 3.29. Tải trọng tác dụng và biến dạng tương ứng trong thí nghiệm  $|E^*|$**

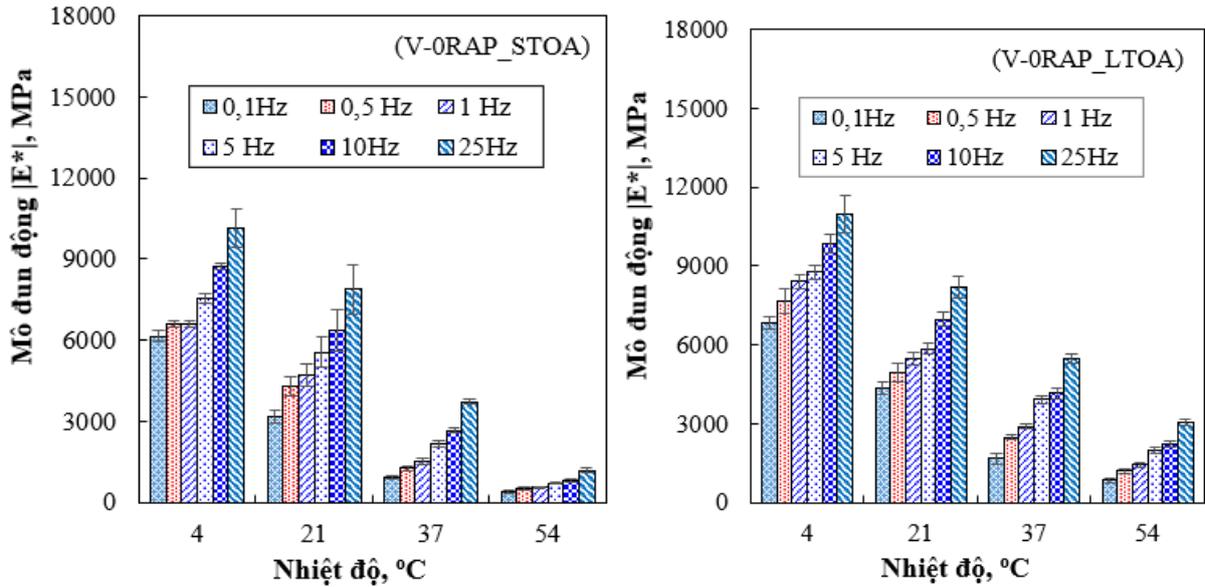


**Hình 3.30. Thí nghiệm mô đun động  $|E^*|$**

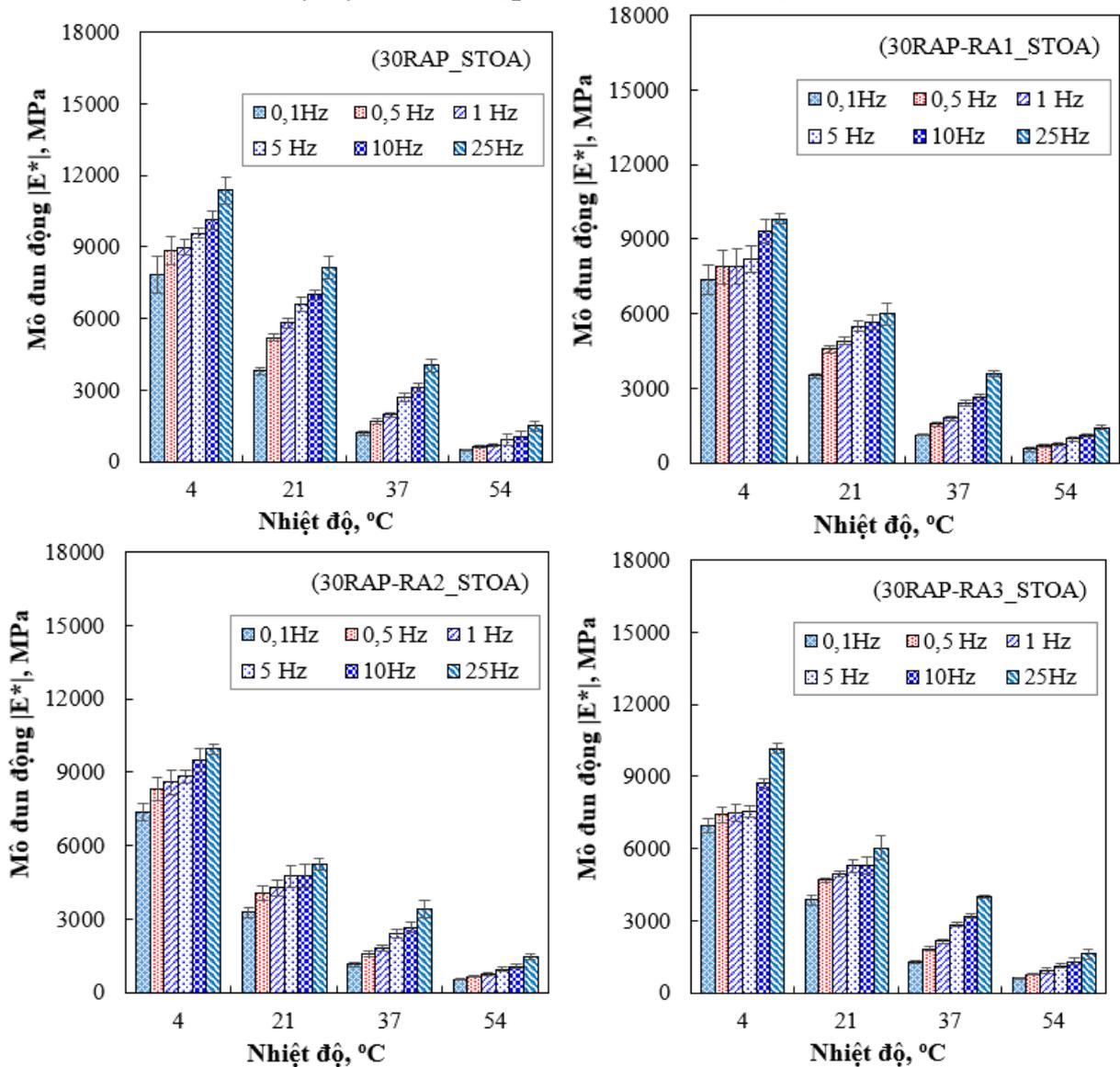
### 3.9.2. Kết quả thí nghiệm và phân tích

#### 3.9.2.1. Kết quả thí nghiệm mô đun động $|E^*|$

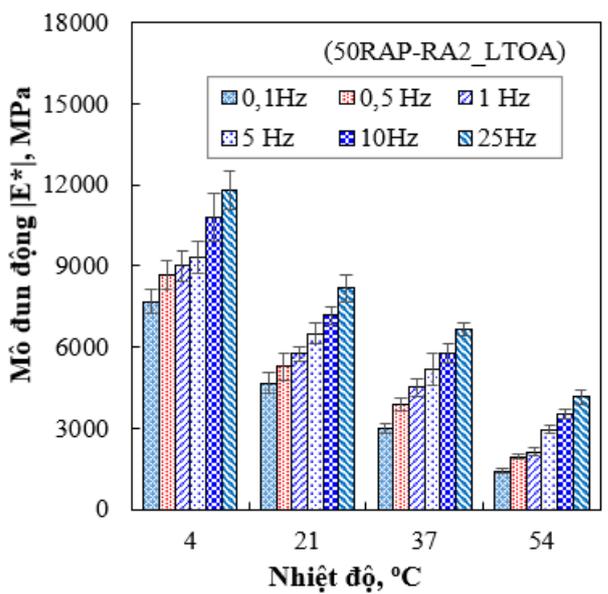
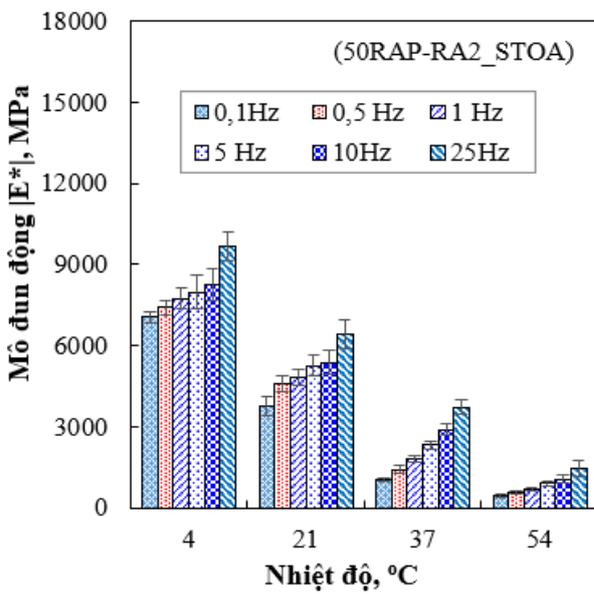
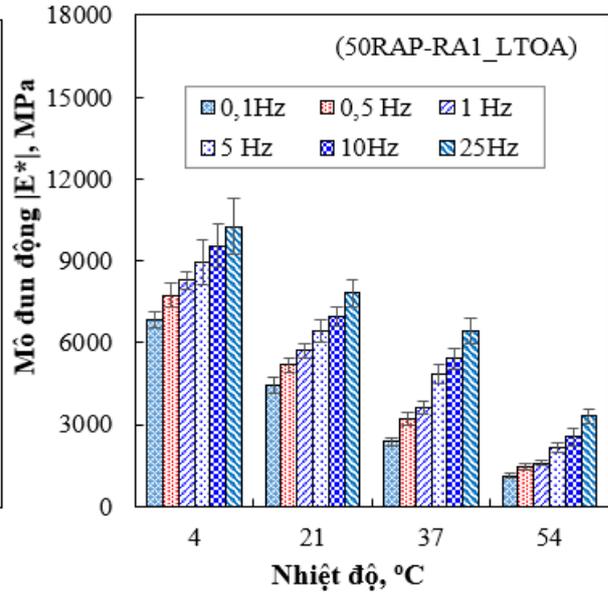
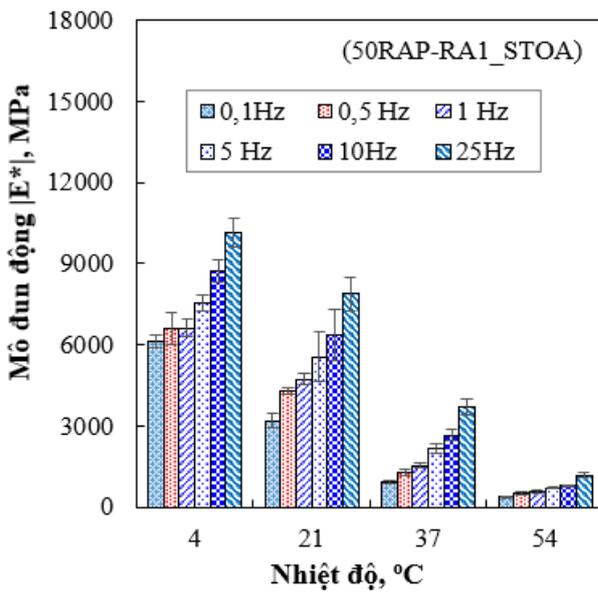
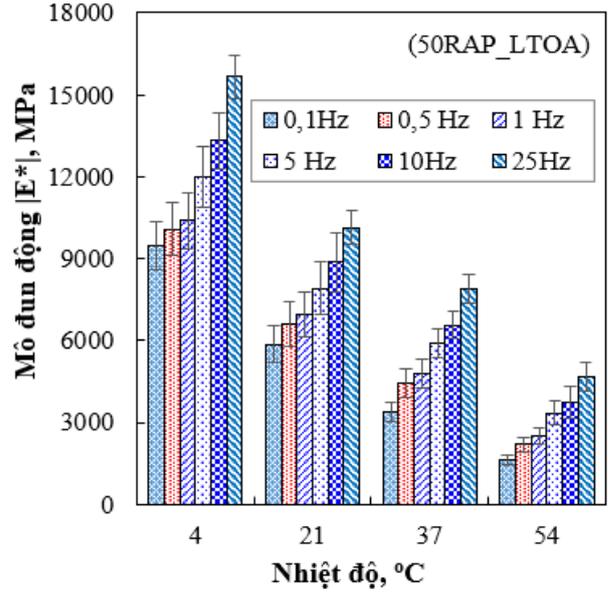
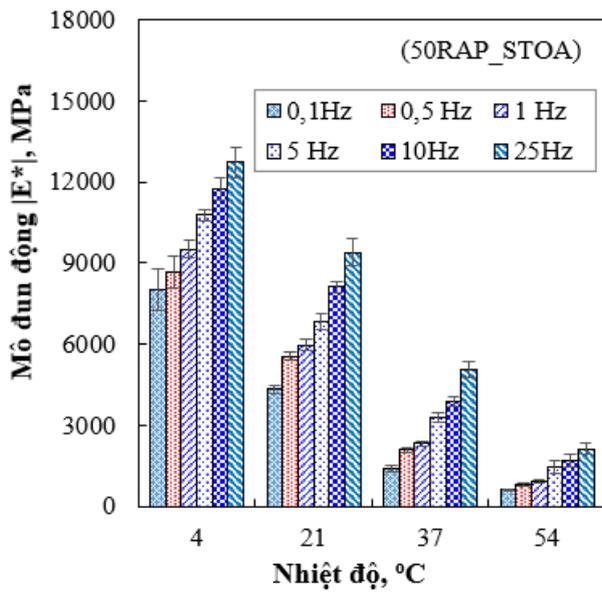
**Hình 3.31, Hình 3.32 và Hình 3.33** thể hiện kết quả thí nghiệm mô đun động  $|E^*|$  của các hỗn hợp ở các nhiệt độ và tần số khác nhau có xét đến điều kiện hóa già. Nhìn chung, có thể thấy rằng, mô đun động  $|E^*|$  tăng khi tăng tần số thí nghiệm tác dụng và  $|E^*|$  giảm khi nhiệt độ thí nghiệm tăng. Kết quả cho thấy, hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30%RAP và 50%RAP có giá trị  $|E^*|$  trung bình cao hơn so với hỗn hợp không sử dụng RAP (V-0RAP) lần lượt là 20,3% và 35,2%. Như vậy, độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng có xu hướng gia tăng khi tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp. Tuy nhiên, mô đun động  $|E^*|$  có xu hướng giảm khi hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh.

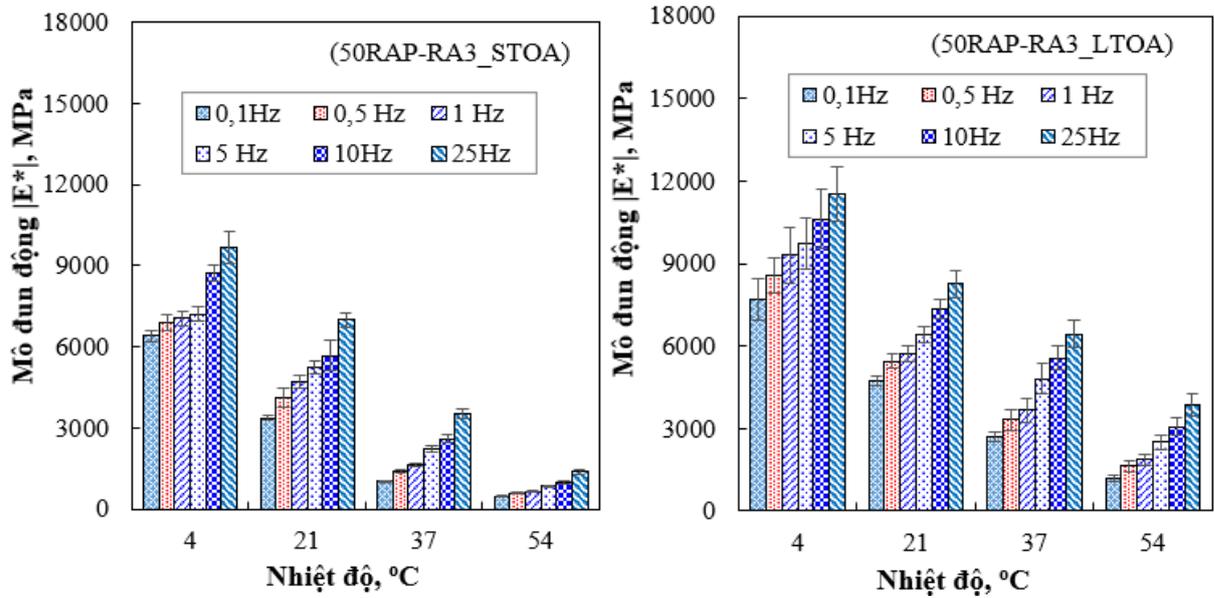


Hình 3.31.  $|E^*|$  của hỗn hợp 0%RAP ở điều kiện STOA và LTOA



Hình 3.32.  $|E^*|$  của hỗn hợp 30%RAP với phụ gia tái sinh ở điều kiện STOA





**Hình 3.33.**  $|E^*|$  của hỗn hợp 50%RAP với phụ gia tái sinh ở điều kiện STOA và LTOA

**3.9.2.2. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến mô đun động  $|E^*|$**

**Bảng 3.12** trình bày các yếu tố được đưa ra để phân tích phương sai ANOVA. Kết quả từ **Bảng 3.13** cho thấy, các yếu tố bao gồm phụ gia tái sinh, nhiệt độ và tần số thí nghiệm đều có ảnh hưởng đến giá trị mô đun động  $|E^*|$  (giá trị P-value < 0,05).

**Bảng 3.12.** Các yếu tố phân tích phương sai ANOVA của  $|E^*|$

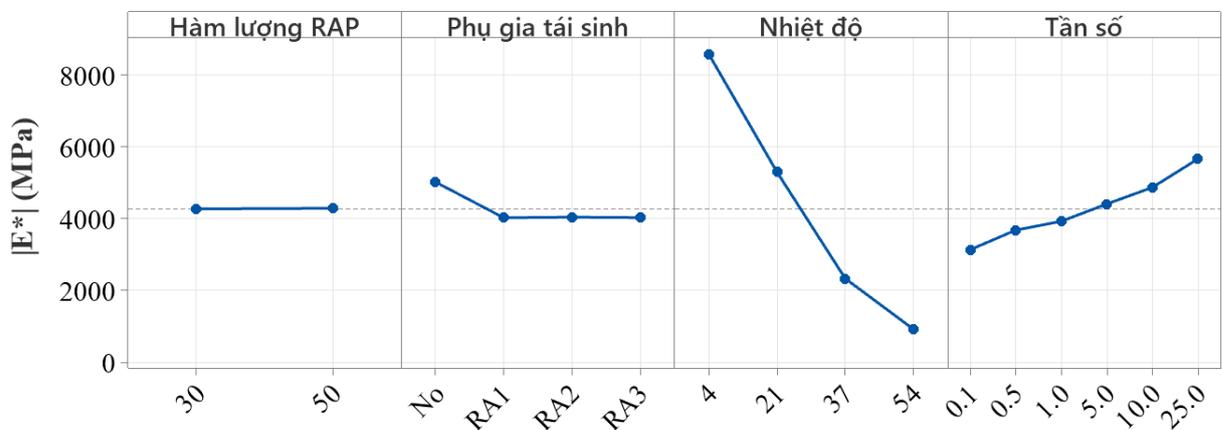
Yếu tố	Mức	Biến
Hàm lượng RAP (%)	2	30 và 50
Phụ gia tái sinh	4	RA1, RA2 và RA3 và No (không có phụ gia tái sinh)
Nhiệt độ (°C)	4	4, 21, 37 và 54
Tần số (Hz)	6	0,1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10 và 25

**Bảng 3.13.** Phân tích phương sai ANOVA giá trị mô đun động  $|E^*|$

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	62	1867199924	30116128	480,92	< 0,001
Linear	12	1818008263	151500689	2419,31	< 0,001
Hàm lượng RAP	1	10356	10356	0,17	0,685

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Phụ gia tái sinh	3	35318227	11772742	188,00	< 0,001
Nhiệt độ	3	1653491906	551163969	8801,52	< 0,001
Tần số	5	129187773	25837555	412,60	< 0,001
2-Way Interactions	50	49191661	983833	15,71	< 0,001
Hàm lượng RAP*Phụ gia tái sinh	3	5374820	1791607	28,61	< 0,001
Hàm lượng RAP*Nhiệt độ	3	1698544	566181	9,04	< 0,001
Hàm lượng RAP*Tần số	5	1537255	307451	4,91	< 0,001
Phụ gia tái sinh*Nhiệt độ	9	16647942	1849771	29,54	< 0,001
Phụ gia tái sinh*Tần số	15	5914399	394293	6,30	< 0,001
Nhiệt độ*Tần số	15	18018701	1201247	19,18	< 0,001
Error	129	8078170	62621		
Tổng	191	1875278094			

Đối với hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng RAP, độ cứng có xu hướng giảm khi hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh và không có sự khác biệt về độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng với hàm lượng RAP khác nhau khi sử dụng phụ gia tái sinh (P-value > 0,05). Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến  $|E^*|$ , **Hình 3.34** cho thấy, nhiệt độ và tần số thí nghiệm có ảnh hưởng đáng kể nhất đến kết quả thí nghiệm  $|E^*|$ . Mô đun động  $|E^*|$  giảm khi tăng nhiệt độ thí nghiệm từ 4°C đến 54°C và có sự khác nhau đáng kể về giá trị  $|E^*|$  ở mỗi nhiệt độ thí nghiệm. Đối với tần số thí nghiệm, mô đun động  $|E^*|$  tăng khi tần số thí nghiệm tăng từ 0,1Hz đến 25Hz.



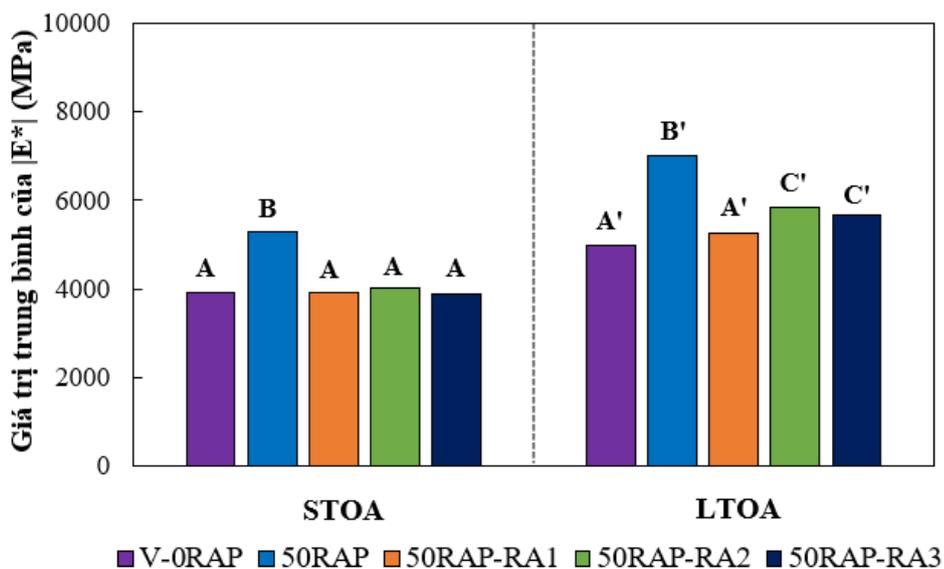
**Hình 3.34. Mức độ ảnh hưởng của các yếu tố ảnh hưởng đến  $|E^*|$**

Kết quả từ **Hình 3.34** cũng cho thấy rằng, ở điều kiện STOA, có sự khác biệt giữa hỗn hợp tái chế nóng sử dụng RAP có và không có phụ gia tái sinh. So với hỗn hợp tái chế nóng không có phụ gia tái sinh thì giá trị  $|E^*|$  trung bình của các hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh thấp hơn 19,7%. Kết quả này cũng chứng minh rằng, phụ gia tái sinh đã làm giảm độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế nóng, làm tăng sức kháng nứt cho hỗn hợp.

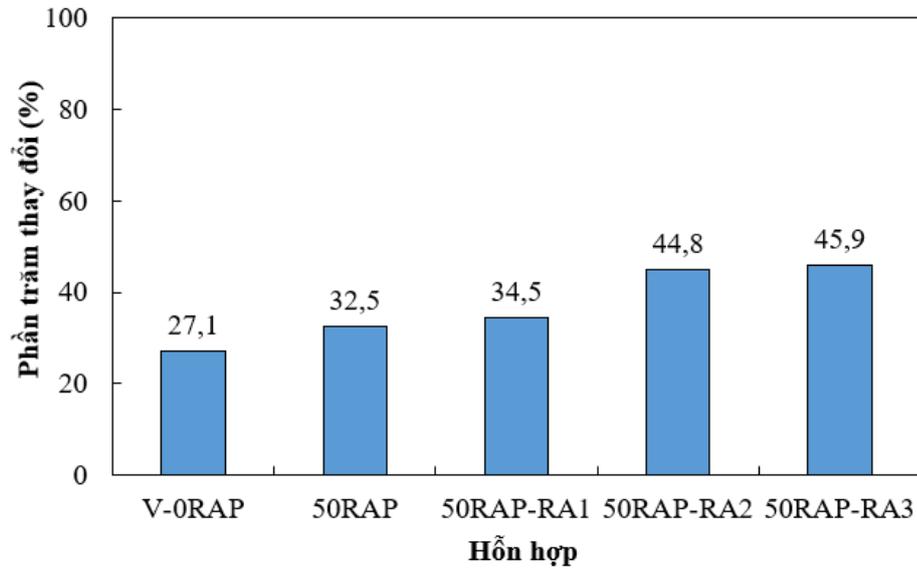
### 3.9.2.3 Đánh giá hiệu quả của phụ gia tái sinh khi xét đến điều kiện hóa già thông qua thí nghiệm $|E^*|$

Để đánh giá hiệu quả dài hạn của ba loại phụ gia tái sinh, điều kiện LTOA được thực hiện trên hỗn hợp sử dụng 50%RAP và hỗn hợp đối chứng (0%RAP), như được thể hiện ở phần kế hoạch thí nghiệm (**Bảng 3.1**). So sánh Tukey ở **Hình 3.35** cho thấy, không có sự khác biệt về  $|E^*|$  giữa các hỗn hợp V-0RAP, 50RAP-RA1, 50RAP-RA2 và 50RAP-RA3 (cùng nhóm A) ở điều kiện STOA nhưng có sự khác biệt về  $|E^*|$  giữa các hỗn hợp ở điều kiện LTOA. Kết quả cũng cho thấy rằng, có sự khác biệt giữa hỗn hợp 50%RAP có và không có phụ gia tái sinh ở cả điều kiện STOA và LTOA (nhóm B và nhóm B').

Ở điều kiện hóa già dài hạn LTOA, giá trị  $|E^*|$  của tất cả các hỗn hợp có xu hướng gia tăng do sự oxy hóa diễn ra trong bitum, dẫn đến hỗn hợp trở nên cứng hơn. Kết quả cho thấy hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 50%RAP có sự gia tăng về độ cứng cao hơn so với hỗn hợp đối chứng không sử dụng RAP khi trải qua quá trình hóa già.



**Hình 3.35.** So sánh Tukey giá trị  $|E^*|$  của hỗn hợp sử dụng 50%RAP với phụ gia tái sinh ở điều kiện STOA và LTOA

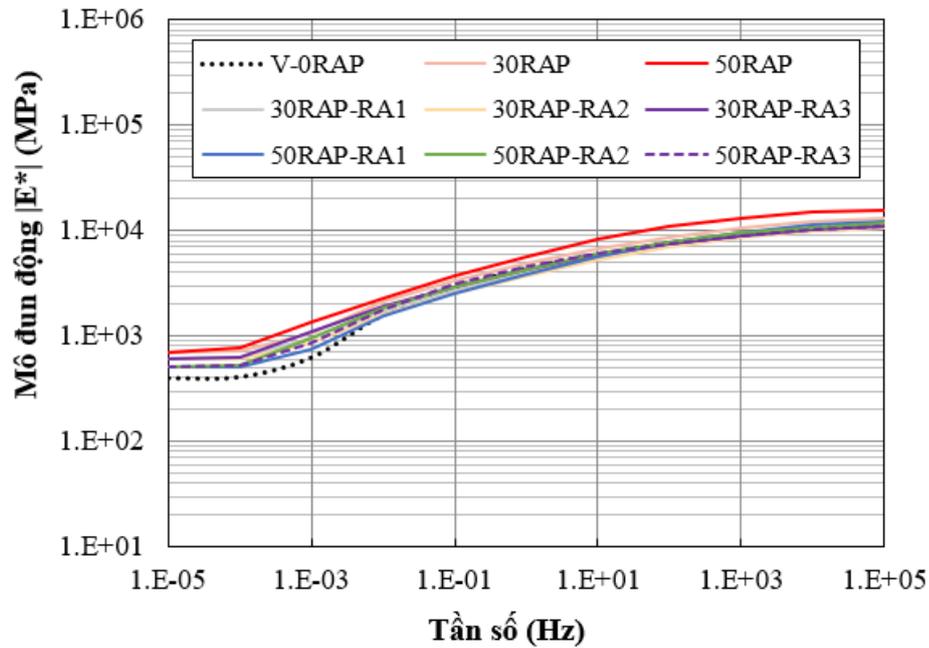


**Hình 3.36. Phần trăm thay đổi  $|E^*|$  giữa LTOA và STOA**

Mức độ thay đổi  $|E^*|$  của các hỗn hợp ở điều kiện LTOA so với STOA được đánh giá thông qua tỷ số  $(|E^*|_{LTOA} - |E^*|_{STOA}) \times 100 / |E^*|_{STOA}$ , được thể hiện như ở **Hình 3.36**. Mức độ thay đổi nhỏ thể hiện sự ổn định của hỗn hợp khi trải qua quá trình hoá già dài hạn và ngược lại. Kết quả cho thấy rằng, hỗn hợp đối chứng không sử dụng RAP (V-0RAP) có mức độ thay đổi thấp nhất (27,1%). Ngoài ra, ở điều kiện hóa già dài hạn LTOA, mô đun động  $|E^*|$  của hỗn hợp V-0RAP và 50RAP-RA1 là tương tự nhau (cùng nhóm A') và thấp hơn so với hỗn hợp 50RAP-RA2 và 50RAP-RA3 (cùng nhóm C'). Như vậy, có thể kết luận rằng hỗn hợp asphalt tái chế sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ thể hiện sự lão hóa chậm hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật khi trải qua quá trình hóa già dài hạn. Kết luận này cũng được chỉ ra từ thí nghiệm phân tích thành phần hóa học (FTIR), đã được thực hiện ở Chương 2.

### 3.9.3. Xây dựng đường cong chủ mô đun động $|E^*|$

Từ các kết quả thí nghiệm  $|E^*|$ , nghiên cứu cũng đã sử dụng mô hình 2S2P1D để mô hình hóa đường cong chủ của mô đun động cho các loại hỗn hợp asphalt. Từ đường cong chủ có thể xác định được mô đun động ở nhiệt độ và tần số bất kỳ, được sử dụng để phân tích kết cấu mặt đường theo phương pháp cơ học thực nghiệm. Phương pháp xây dựng đường cong chủ  $|E^*|$  là tương tự như xây dựng đường cong chủ  $|G^*|$ , đã được mô tả ở Chương 2. Kết quả xây dựng đường cong chủ  $|E^*|$  được thể hiện ở **Hình 3.37**.



Hình 3.37. Đường cong chủ  $|E^*|$  của các loại bê tông asphalt

### 3.10. Kết luận

Dựa trên các kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong phòng thí nghiệm đánh giá một số tính năng của hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng và hỗn hợp đối chứng, các kết luận được đưa ra như sau:

- Khi tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp asphalt tái chế, khả năng kháng hằn lún gia tăng nhưng khả năng kháng nứt giảm. So với hỗn hợp asphalt đối chứng không sử dụng RAP (0%RAP), hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng 30% RAP và 50% RAP có độ lún vết bánh xe giảm tương ứng 24,2% và 41,5%, nhưng chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  giảm, tương ứng 60,8% và 63,1%.

- Hàm lượng phụ gia tái sinh sử dụng có ảnh hưởng đến sức kháng hằn lún vết bánh xe của hỗn hợp asphalt. Ở một khoảng hàm lượng thấp (từ 4-12% theo khối lượng bitum RAP), phụ gia tái sinh ảnh hưởng không đáng kể đến độ lún vết hằn bánh xe. Tuy nhiên, ở hàm lượng cao (20%), có sự gia tăng đáng kể đến kết quả thí nghiệm độ lún vết hằn bánh xe.

- Dựa trên kết quả thí nghiệm sức kháng nứt của các hỗn hợp asphalt tái chế nóng, hàm lượng phụ gia tái sinh phù hợp được xác định để đảm bảo khả năng kháng nứt tương đương với hỗn hợp đối chứng (V-0%RAP) mà không ảnh hưởng đến khả năng kháng

hần lún vết bánh xe, lần lượt là 10,5% ; 7,5% và 8,3% theo khối lượng bitum RAP, tương ứng với ba loại phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3.

○ Ở điều kiện hóa già ngắn hạn (STOA), phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) thể hiện khả năng kháng nứt tốt hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1). Tuy nhiên, khi xét đến điều kiện hóa già dài hạn (LTOA), phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ cho hiệu quả kháng nứt tốt hơn so với hai loại phụ gia còn lại. Kết quả cho thấy, hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ thể hiện sự lão hóa thấp hơn so với phụ gia gốc dầu thực vật khi trải qua quá trình hóa già dài hạn.

○ Một mối quan hệ cũng được thiết lập từ thí nghiệm cắt động lưu biến của bitum ở điều kiện hóa già RTFO/PAV và thí nghiệm sức kháng nứt của hỗn hợp asphalt ở điều kiện hóa già STOA/LTOA. Kết quả cho thấy, chỉ số kháng nứt  $CT_{Index}$  có mối tương quan cao với giá trị  $G^* \sin \delta$  ( $R^2 = 0,84$ ).

○ Trong nghiên cứu này, chỉ số  $RT_{Index}$  của các hỗn hợp dao động từ 80,9 đến 118,0 và đều lớn hơn giá trị tối thiểu quy định (60 hoặc 65), đã được đề xuất bởi một số nghiên cứu trên thế giới.

○ Mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lập  $M_R$  và mô đun động  $|E^*|$  của các hỗn hợp asphalt tái chế nóng có xu hướng tăng, khi gia tăng hàm lượng RAP sử dụng. Khi sử dụng phụ gia tái sinh,  $M_R$  và  $|E^*|$  có xu hướng giảm. So với hỗn hợp asphalt tái chế nóng không có phụ gia tái sinh thì giá trị  $|E^*|$  trung bình của các hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh thấp hơn 19,7%.

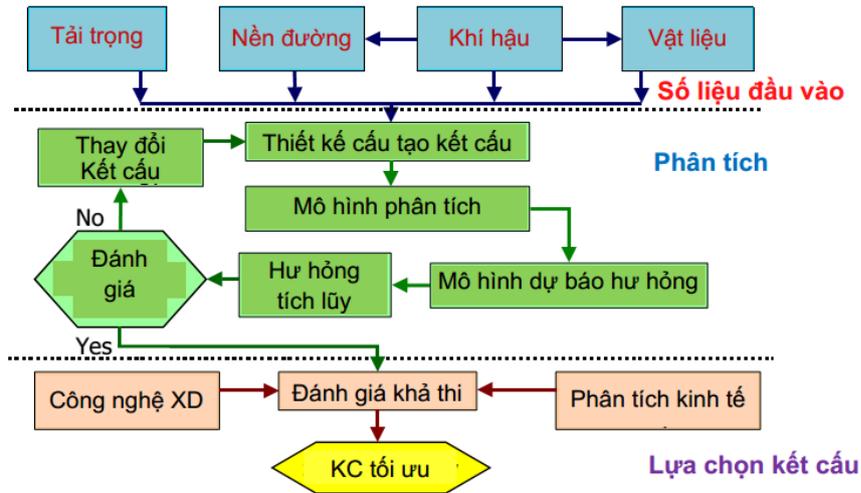
## **CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU DỰ BÁO TÍNH NĂNG KHAI THÁC CỦA KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG SỬ DỤNG LỚP BÊ TÔNG ASPHALT TÁI CHẾ NÓNG THEO PHƯƠNG PHÁP CƠ HỌC - THỰC NGHIỆM**

### **4.1. Các phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường mềm**

Hiện nay, nghiên cứu phân tích sự làm việc của kết cấu mặt đường cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ khai thác của kết cấu mặt đường đã được quan tâm nhiều hơn ở Việt Nam. Các nghiên cứu tập trung vào ảnh hưởng của tải trọng xe, điều kiện khí hậu, loại vật liệu đến các tính năng khai thác và tuổi thọ của kết cấu mặt đường. Từ đó, đánh giá, đề xuất và lựa chọn phương pháp thiết kế kết cấu mặt đường đảm bảo an toàn và kinh tế.

Trong thiết kế kết cấu mặt đường mềm, hai phương pháp thường được sử dụng bao gồm phương pháp lý thuyết và phương pháp thực nghiệm. Phương pháp lý thuyết sử dụng lý thuyết đàn hồi với các phương trình tính ứng suất - biến dạng phát sinh trong kết cấu mặt đường là hệ nhiều lớp đàn hồi. Phương pháp này đã được xây dựng thành tiêu chuẩn thiết kế kết cấu mặt đường mềm (TCCS 38:2022) [9] và đang được áp dụng tại Việt Nam. Phương pháp thực nghiệm với phương trình thiết kế là các mối quan hệ thực nghiệm thu thập từ các thử nghiệm và từ kinh nghiệm trong quá trình thiết kế - khai thác (AASHTO-93) [22]. Hướng dẫn thiết kế mặt đường theo AASHTO được sử dụng tương đối phổ biến ở Việt Nam, và đã ban hành tiêu chuẩn TCCS 37:2022 [8]. Cùng với việc sử dụng phương pháp thực nghiệm AASHTO, các Bang của Mỹ và Canada cũng đang áp dụng phương pháp cơ học - thực nghiệm (MEPD) trong thiết kế kết cấu mặt đường [100].

Phương pháp cơ học - thực nghiệm là phương pháp phối hợp các phương trình theo lý thuyết, bao gồm lý thuyết đàn hồi, lý thuyết nhiệt và các phương trình từ các mối quan hệ thực nghiệm và kinh nghiệm thu được. Trình tự thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo cơ học - thực nghiệm được thể hiện ở **Hình 4.1**. Đây là phương pháp tiên tiến nhất hiện nay để phân tích, tính toán kết cấu mặt đường dựa trên phần mềm AASHTOWare® (AASHTOWare Pavement ME Design).



Hình 4.1. Trình tự thiết kế kết cấu mặt đường mềm theo cơ học – thực nghiệm [2]

#### 4.2. Cơ sở khoa học của phương pháp cơ học - thực nghiệm

Trong phương pháp cơ học - thực nghiệm, dữ liệu đầu vào (tải trọng, khí hậu và vật liệu) được khai báo chi tiết dựa trên dữ liệu thu thập hoặc tùy theo cấp độ dữ liệu lựa chọn. Phần mềm AASHTOWare® cũng tích hợp các thông số thiết kế về lưu lượng giao thông, khí hậu, thông số vật liệu các lớp và khi dữ liệu thu thập chưa đầy đủ, có thể sử dụng các dữ liệu có sẵn trong phần mềm. Trong Luận án này, phần mềm AASHTOWare® phiên bản 1.3.28 [145] để phân tích kết cấu mặt đường được sử dụng (Hình 4.2).



Hình 4.2. Phần mềm AASHTOWare® 1.3.28

Trong phần mềm AASHTOWare®, dữ liệu đầu vào (thông số về tải trọng, khí hậu và vật liệu) được khai báo chi tiết dựa trên dữ liệu được thu thập, thí nghiệm trực tiếp hoặc thông qua tính toán gián tiếp, tùy theo cấp độ dữ liệu lựa chọn. Phần mềm

AASHTOWare®, cũng tích hợp các thông số thiết kế về lưu lượng, vật liệu, nền đất, khí hậu và độ tin cậy sử dụng cho tất cả các loại mặt đường. Khi dữ liệu thu thập về dự án chưa đầy đủ, có thể sử dụng các dữ liệu của MEPD.

Phần mềm cơ học - thực nghiệm áp dụng các nguyên lý của cơ học kỹ thuật. Quy trình thiết kế bao gồm ba yếu tố cơ bản là (1) các lý thuyết được sử dụng để dự đoán ứng xử của mặt đường (biến dạng, ứng suất, độ võng, v.v.) theo tải trọng xe và khí hậu, (2) các đặc tính vật liệu sử dụng để là đầu vào cho lý thuyết tính toán và (3) các mối quan hệ giữa thông số ứng xử của mặt đường và tình trạng hư hỏng quan sát được tại hiện trường.

Quá trình thiết kế theo phương pháp cơ học thực - nghiệm là quá trình thử dần đúng. Người thiết kế phải đưa ra một kết cấu mặt đường mẫu cùng với các giới hạn hư hỏng có thể chấp nhận được, như biến dạng không phục hồi (chiều sâu hằn lún vệt bánh xe), nứt do môi, độ gồ ghề (IRI) tương ứng với từng kết cấu. Đầu ra của phần mềm đưa ra kết quả tính toán, phân tích theo các trạng thái hư hỏng của mặt đường. Khi các điều kiện kết cấu giống nhau, chỉ khác nhau lớp mặt trên sử dụng, nên có thể so sánh, đánh giá ảnh hưởng của lớp mặt trên đến các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường.

### **4.3. Ứng dụng phần mềm AASHTOWare® để dự báo các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường**

#### **4.3.1. Kết cấu mặt đường nghiên cứu**

Kết cấu mặt đường được lựa chọn cần gắn liền với nguồn vật liệu đầu vào đã thí nghiệm để đảm bảo tính thống nhất. Do vậy, Quốc lộ 51 nối Thành phố Hồ Chí Minh với tỉnh Đồng Nai và Bà Rịa - Vũng Tàu được lựa chọn để phân tích. **Bảng 4.1** thể hiện kết quả khảo sát chiều dày các lớp trong kết cấu mặt đường ở Quốc lộ 51, tại lý trình Km 25+00 - Km 27+00 (trái tuyến, làn số 2).

Để đánh giá các yếu tố ảnh hưởng bao gồm, loại lớp mặt, chiều dày lớp mặt và lưu lượng xe thiết kế đến các chỉ tiêu khai thác của mặt đường, lớp bê tông asphalt C12,5 ban đầu được thay bằng lớp mặt mới. Kết cấu có lớp mặt mới là các loại bê tông asphalt tái chế nóng có tỷ lệ RAP bằng 30% và 50%, sử dụng ba loại phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3, đã được nghiên cứu trong phòng (30RAP-RA1, 30RAP-RA2, 30RAP-RA3, 50RAP-RA1, 50RAP-RA2 và 50RAP-RA3). Kết quả phân tích cũng được so sánh với

kết cấu có lớp mặt là bê tông asphalt nóng không sử dụng RAP (V-0RAP) và bê tông asphalt tái chế nóng không có phụ gia tái sinh (30RAP và 50RAP). **Bảng 4.2** tổng hợp các lớp mặt trên sử dụng các loại bê tông asphalt được nghiên cứu.

**Bảng 4.1. Kết cấu mặt đường nghiên cứu**

Kết cấu	Lớp vật liệu	Chiều dày, mm
BTA C12.5 BTA R25 BTA C20	Bê tông asphalt chặt 12,5mm (BTA C12,5)	52
	Bê tông asphalt rỗng 25mm (BTA R25)	87
CPĐĐ	Bê tông asphalt chặt 20mm (BTA C20)	78
	Cấp phối đá dăm (CPĐĐ)	483
	Nền đất á sét	

**Bảng 4.2. Tổng hợp các lớp mặt trên nghiên cứu**

STT	Lớp mặt trên	Hàm lượng RAP (%)	Ghi chú
1	V-0RAP	0	Không sử dụng RAP
2	30RAP	30	Không có phụ gia tái sinh
3	30RAP-RA1	30	Phụ gia tái sinh RA1 (10,5%)
4	30RAP-RA2	30	Phụ gia tái sinh RA2 (7,5%)
5	30RAP-RA3	30	Phụ gia tái sinh RA3 (8,3%)
6	50RAP	50	Không có phụ gia tái sinh
7	50RAP-RA1	50	Phụ gia tái sinh RA1 (10,5%)
8	50RAP-RA2	50	Phụ gia tái sinh RA2 (7,5%)
9	50RAP-RA3	50	Phụ gia tái sinh RA3 (8,3%)

Các loại bê tông asphalt dùng làm lớp mặt trên đã được thí nghiệm một số chỉ tiêu cơ lý trong phòng (**Bảng 4.3**). Trong đó, mô đun động ở nhiệt độ -10°C được xác định từ đường cong chủ  $|E^*|$  đã được thực hiện ở Chương 3, xây dựng từ dữ liệu đo mô đun động  $|E^*|$  khi thí nghiệm ở một dải nhiệt độ thí nghiệm khác nhau (4°C, 21°C, 37°C và 54°C) và các tần số thí nghiệm khác nhau (0,1Hz; 0,5Hz; 1Hz; 5Hz; 10Hz và 25Hz).

**Bảng 4.3. Mô đun động  $|E^*|$  và một số chỉ tiêu thể tích của các loại bê tông asphalt**

Hỗn hợp	Đặc tính thể tích		Nhiệt độ (°C)	Mô đun động $ E^* $ /Tần số (Hz)					
				0,1	0,5	1	5	10	25
V-0RAP	$G_{mb}$	2,456	-10	9422	10395	10769	11528	11807	12136
	$V_a$ (%)	4,33	4	6138	6598	6608	7541	8733	10146
	$V_{be}$ (%)	11,92	21	3178	4293	4722	5556	6346	7878
			37	899	1266	1511	2152	2642	3711
			54	398	497	555	695	792	1180
30RAP	$G_{mb}$	2,431	-10	11201	12207	12571	13266	13506	13777
	$V_a$ (%)	4,93	4	7819	8842	8981	9578	10126	11385
	$V_{be}$ (%)	11,80	21	3792	5196	5798	6611	6983	8127
			37	1186	1680	1958	2702	3123	4029
			54	525	670	752	977	1116	1606
50RAP	$G_{mb}$	2,424	-10	13304	14548	14963	15692	15923	16168
	$V_a$ (%)	4,64	4	8031	8688	9513	10786	11734	12721
	$V_{be}$ (%)	11,77	21	4320	5547	5953	6843	8127	9397
			37	1389	2076	2317	3281	3859	5067
			54	598	805	928	1454	1696	2124
30RAP-RA1	$G_{mb}$	2,435	-10	9416	10187	10454	10945	11108	11287
	$V_a$ (%)	4,32	4	7563	7994	8286	8444	8735	9728
	$V_{be}$ (%)	11,82	21	3410	4435	4767	5253	5336	5465
			37	1107	1543	1785	2418	2668	3516
			54	452	649	711	891	1100	1344
30RAP-RA2	$G_{mb}$	2,457	-10	9187	10013	10302	10837	11015	11212
	$V_a$ (%)	4,17	4	7370	8302	8579	8815	9500	9947
	$V_{be}$ (%)	11,95	21	3260	4045	4269	4741	4788	5223
			37	1129	1571	1798	2396	2652	3407
			54	511	649	726	932	1042	1441
30RAP-RA3	$G_{mb}$	2,444	-10	9904	10548	10767	11164	11294	11437
	$V_a$ (%)	4,30	4	6935	7400	7483	7529	8698	10174
	$V_{be}$ (%)	11,86	21	3865	4689	4942	5278	5312	6031
			37	1280	1833	2132	2834	3187	3989
			54	620	769	920	1119	1289	1598
50RAP-RA1	$G_{mb}$	2,439	-10	9906	11059	11474	12256	12520	12814
	$V_a$ (%)	4,29	4	6887	7161	7294	7594	8951	9678
	$V_{be}$ (%)	11,84	21	3328	4284	4580	5521	5722	6668
			37	968	1341	1566	2211	2646	3555
			54	401	494	549	681	766	1087

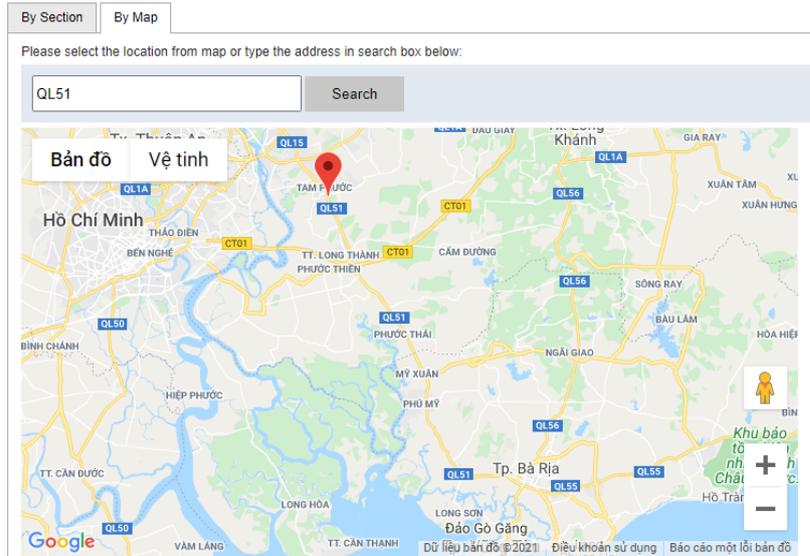
Hỗn hợp	Đặc tính thể tích		Nhiệt độ (°C)	Mô đun động  E* /Tần số (Hz)					
				0,1	0,5	1	5	10	25
50RAP-RA2	G <sub>mb</sub>	2,441	-10	9911	10817	11135	11723	11919	12136
	V <sub>a</sub> (%)	4,31	4	7063	7397	7735	7976	8268	9673
	V <sub>be</sub> (%)	11,85	21	3762	4574	4836	5264	5382	6418
			37	1039	1266	1511	2152	2642	3711
			54	452	586	666	890	1049	1438
50RAP-RA3	G <sub>mb</sub>	2,468	-10	8937	9811	10146	10822	11070	11361
	V <sub>a</sub> (%)	4,25	4	6397	6889	7056	7216	8730	9660
	V <sub>be</sub> (%)	11,98	21	3371	4092	4726	5235	5675	6999
			37	1015	1398	1625	2201	2598	3520
			54	462	578	648	830	954	1363

#### 4.3.2. Tiến hành phân tích

Mục đích của nghiên cứu là so sánh, đánh giá các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường, với lớp mặt trên là các lớp bê tông asphalt khác nhau, được mô tả ở **Bảng 4.2**. Như vậy, các điều kiện đầu vào và các lớp bên dưới là giống nhau, chỉ khác nhau về lớp mặt trên cùng. Thông số về khí hậu, thông số về tải trọng và thông số về các lớp vật liệu sử dụng trong kết cấu mặt đường sẽ được khai báo vào phần mềm để tiến hành phân tích.

Thông số khí hậu cho kết cấu nghiên cứu được lấy từ trạm MERRA2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications), số hiệu ID\_111053, thuộc địa phận tỉnh Đồng Nai (**Hình 4.3**). MERRA là một chương trình phân tích dữ liệu khí hậu miễn phí, được cung cấp bởi Cơ quan Hàng không và vũ trụ Mỹ (NASA). Ở Việt Nam, trạm MERRA2 cung cấp số liệu khí hậu của 125 trạm, trải đều trên cả đất liền và các hải đảo. Các số liệu về khí hậu để phân tích bao gồm nhiệt độ không khí, lượng mưa, vận tốc gió, độ ẩm v.v.

Các thông số về tải trọng được khai báo vào phần mềm bao gồm, lưu lượng xe thiết kế, tỷ lệ các xe tương ứng với từng loại xe, tỷ lệ tăng trưởng xe hàng năm, các loại hình trục xe, hệ số phân bố tải trọng trục, các hệ số điều chỉnh cho thông số tải trọng v.v. Thành phần các xe trong dòng xe trên các tuyến Quốc lộ chính của nước ta [3] được áp dụng cho các kết cấu nghiên cứu, thể hiện ở **Bảng 4.4**.



**Hình 4.3. Trạm khí hậu MERRA2 Quốc lộ 51 - Đồng Nai**

**Bảng 4.4. Tỷ lệ các xe trong dòng xe trên các Quốc lộ chính ở Việt Nam [3]**

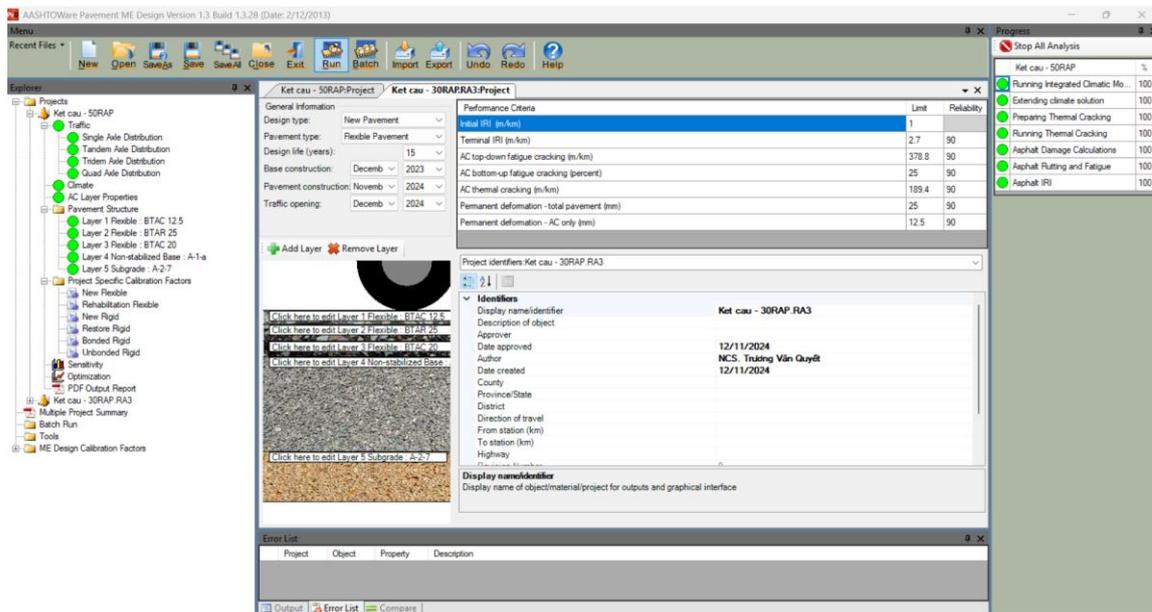
Nhóm xe	Nhóm 5 (xe 2 trục đơn)	Nhóm 6 (xe 1 trục đơn và 1 trục đôi)	Nhóm 8 (xe 2 trục đơn và 1 trục đôi)	Nhóm 9 (xe 1 trục đơn và 2 trục đôi)	Nhóm 10 (xe 1 trục đơn, 1 trục đôi và 1 trục ba)	Tổng
Tỷ lệ (%)	73,85	14,25	1,93	8,58	1,39	100

Lưu lượng xe thiết kế được đưa ra phân tích là 2000 xe/ngày đêm và 5000 xe/ngày đêm để đánh giá ảnh hưởng của lưu lượng xe đến các chỉ tiêu khai thác của mặt đường. Hệ số tăng trưởng xe là 3% theo mô hình hàm mũ. Kết quả tính toán theo TCCS 37:2022 [8] cho thấy, với kết cấu mặt đường của Quốc lộ 51 hiện đang khai thác, lưu lượng xe thiết kế 2000 xe/ngày đêm đảm bảo khả năng khai thác của mặt đường. Một số thông số khác về tải trọng được lấy theo mặc định của chương trình phần mềm.

Thông số vật liệu của các lớp trong kết cấu mặt đường cũng được khai báo tùy theo cấp độ dữ liệu, với cấp dữ liệu cao nhất là cấp 1 (từ kết quả thí nghiệm trong phòng). Trong trường hợp không có số liệu thí nghiệm, các thông số được khai báo theo dạng dữ liệu cấp 2 (từ các công thức tương quan) hoặc cấp 3 (từ các giá trị tham khảo đã thu thập trong cơ sở dữ liệu của phần mềm). Đối với lớp bê tông asphalt, các thông số vật liệu đưa vào phân tích gồm chiều dày lớp, mô đun động  $|E^*|$ , khối lượng thể tích, độ rỗng dư, cường độ chịu kéo gián tiếp, độ cứng từ biến, hệ số phát xôn, cấp PG hay

độ kim lún và các thông số nhiệt. Thông số đầu vào của lớp cấp phối đá dăm bao gồm, chiều dày lớp, mô đun đàn hồi  $M_R$ , hệ số poát xông, thành phần hạt và một số chỉ tiêu khác. Đối với lớp đất nền, mô đun đàn hồi  $M_R$ , hệ số poát xông, thành phần hạt, khối lượng thể tích, độ ẩm v.v. cũng là các thông số cần được khai báo trong phần mềm.

Kết quả thí nghiệm mô đun động  $|E^*|$  và một số chỉ tiêu liên quan đến thể tích của các loại bê tông asphalt, dùng làm lớp mặt được khai báo trong phần mềm. Để đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp mặt, lớp bê tông asphalt có chiều dày 50mm và 70mm được phân tích. Các thông số vật liệu của lớp đất nền, lớp cấp phối đá dăm, lớp bê tông asphalt chặt (BTA C20) và lớp bê tông asphalt rỗng (BTA R25) của kết cấu mặt đường Quốc lộ 51 được tham khảo từ một nghiên cứu thực nghiệm đã thực hiện trước đó [2]. Tuổi thọ tính toán cho các kết cấu mặt đường được lấy là 15 năm. Quá trình phân tích kết cấu mặt đường được thể hiện ở **Hình 4.4**.



**Hình 4.4.** Quá trình phân tích kết cấu mặt đường

### 4.3.3. Kết quả phân tích

#### 4.3.3.1. Kết quả phân tích với các loại kết cấu

Với mục đích đánh giá ảnh hưởng hàm lượng RAP, phụ gia tái sinh, chiều dày lớp mặt và lưu lượng xe thiết kế đến các chỉ tiêu khai thác của kết cấu mặt đường (độ gồ gề IRI, tổng chiều sâu lún vệt bánh xe toàn kết cấu, chiều sâu lún vệt bánh xe lớp mặt, nứt

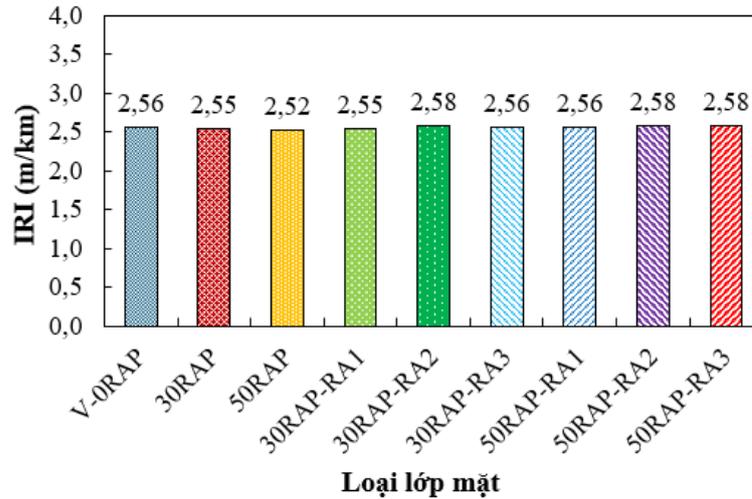
mỏi từ dưới lên và nứt mỏi từ trên xuống), tiến hành chạy phần mềm với kết cấu mặt đường có lớp mặt là các loại bê tông asphalt khác nhau, như thể hiện ở **Bảng 4.2**. Thông số vật liệu của các lớp bên dưới không thay đổi và được khai báo giống nhau. Kết quả phân tích, dự báo các tính năng của kết cấu mặt đường từ phần mềm được thể hiện ở **Bảng 4.5**.

**Bảng 4.5. Kết quả phân tích các kết cấu**

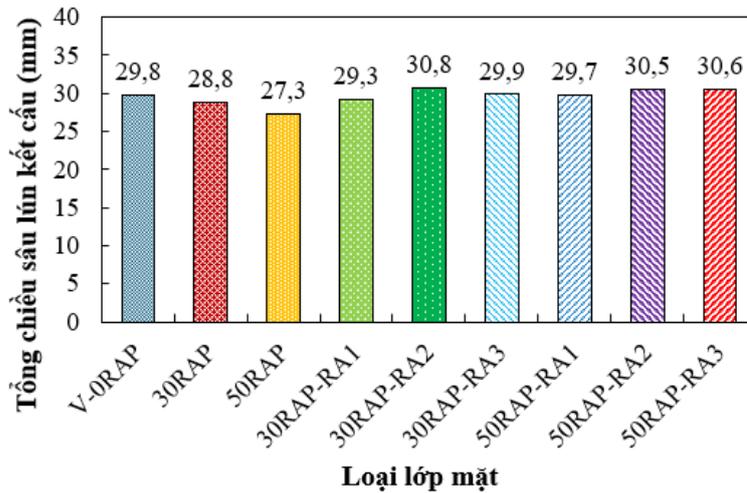
TT	Kết cấu	Loại lớp mặt	Chiều dày lớp mặt (mm)	Lưu lượng xe thiết kế năm đầu (xe/ngày đêm)	Chỉ tiêu IRI (m/km)	Tổng chiều sâu lún toàn kết cấu (%)	Nứt mỏi từ dưới lên (%)	Nứt mỏi từ trên xuống (m/km)	Chiều sâu lún lớp mặt (mm)
1	KC1	V-0RAP	50	2000	2,56	29,76	1,95	1057,37	21,91
2	KC1	V-0RAP	50	5000	2,91	41,65	3,30	1741,06	33,10
3	KC2	V-0RAP	70	2000	2,31	21,58	1,73	498,06	14,04
4	KC2	V-0RAP	70	5000	2,53	29,44	2,20	704,64	21,27
5	KC3	30RAP	50	2000	2,55	28,81	1,91	1348,44	21,09
6	KC3	30RAP	50	5000	2,90	40,39	2,99	2024,82	31,98
7	KC4	30RAP	70	2000	2,29	20,53	1,69	528,67	13,11
8	KC4	30RAP	70	5000	2,49	27,89	2,10	760,06	19,84
9	KC5	50RAP	50	2000	2,52	27,34	1,89	1451,93	19,67
10	KC5	50RAP	50	5000	2,88	39,94	2,99	1943,87	31,52
11	KC6	50RAP	70	2000	2,28	20,22	1,69	491,44	12,78
12	KC6	50RAP	70	5000	2,48	27,71	2,10	693,12	19,35
13	KC7	30RAP-RA1	50	2000	2,55	29,30	1,96	1105,48	21,46
14	KC7	30RAP-RA1	50	5000	2,90	41,08	3,28	1781,69	32,54
15	KC8	30RAP-RA1	70	2000	2,31	21,51	1,73	502,49	13,97
16	KC8	30RAP-RA1	70	5000	2,53	29,33	2,20	712,33	21,13
17	KC9	30RAP-RA2	50	2000	2,58	30,79	1,96	1029,17	22,93
18	KC9	30RAP-RA2	50	5000	2,95	43,37	3,33	1685,04	34,79
19	KC10	30RAP-RA2	70	2000	2,34	22,68	1,73	507,71	15,13
20	KC10	30RAP-RA2	70	5000	2,57	31,11	2,21	721,27	22,92
21	KC11	30RAP-RA3	50	2000	2,56	29,88	1,96	1127,48	22,04
22	KC11	30RAP-RA3	50	5000	2,93	41,97	3,28	1808,77	33,43

TT	Kết cấu	Loại lớp mặt	Chiều dày lớp mặt (mm)	Lưu lượng xe thiết kế năm đầu (xe/ngày đêm)	Chỉ tiêu IRI (m/km)	Tổng chiều sâu lún toàn kết cấu (%)	Nứt mỗi từ dưới lên (%)	Nứt mỗi từ trên xuống (m/km)	Chiều sâu lún lớp mặt (mm)
23	KC12	30RAP-RA3	70	2000	2,32	21,72	1,73	512,06	14,18
24	KC12	30RAP-RA3	70	5000	2,54	29,65	2,20	730,43	21,47
25	KC13	50RAP-RA1	50	2000	2,56	29,70	1,95	1059,41	21,86
26	KC13	50RAP-RA1	50	5000	2,91	41,68	3,26	1725,65	33,16
27	KC14	50RAP-RA1	70	2000	2,32	21,71	1,73	499,92	14,18
28	KC14	50RAP-RA1	70	5000	2,54	29,64	1,89	707,88	21,47
29	KC15	50RAP-RA2	50	2000	2,58	30,47	1,95	1109,45	22,63
30	KC15	50RAP-RA2	50	5000	2,95	42,87	3,26	1785,60	34,33
31	KC16	50RAP-RA2	70	2000	2,33	22,39	1,73	524,44	14,87
32	KC16	50RAP-RA2	70	5000	2,56	30,69	2,19	753,25	22,52
33	KC17	50RAP-RA3	50	2000	2,58	30,57	1,96	1075,41	22,73
34	KC17	50RAP-RA3	50	5000	2,95	43,03	3,30	1744,98	34,48
35	KC18	50RAP-RA3	70	2000	2,34	22,54	1,73	518,93	15,01
36	KC18	50RAP-RA3	70	5000	2,57	30,91	2,20	741,89	22,74

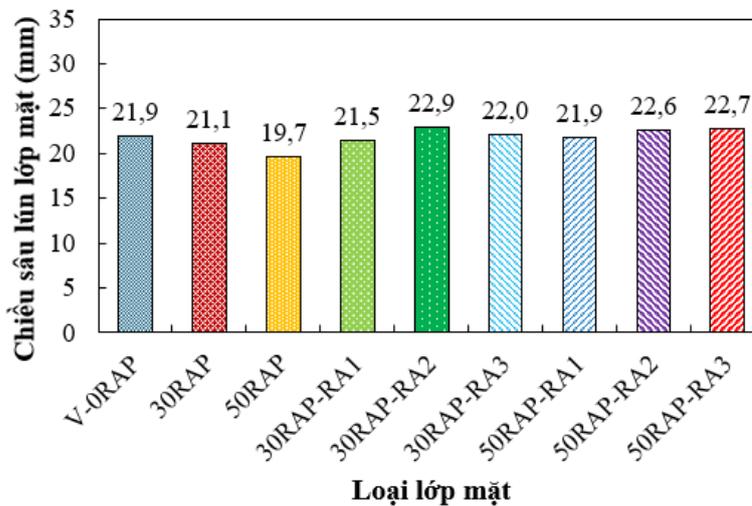
**Hình 4.5** đến **Hình 4.9** thể hiện kết quả phân tích các chỉ tiêu của kết cấu mặt đường từ phần mềm AASHTOWare® với lớp mặt sử dụng các loại bê tông asphalt khác nhau, có chiều dày 50 mm và lưu lượng xe thiết kế năm đầu là 2000 xe/ngày đêm, ở thời điểm sau 15 năm khai thác. Kết quả cho thấy, khi sử dụng RAP, kết cấu mặt đường sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng cải thiện được khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe, độ gồ gề IRI và nứt mỗi từ dưới lên so với sử dụng bê tông asphalt nóng đối chứng (0%RAP), nhưng chỉ tiêu nứt từ trên xuống gia tăng. Chiều sâu hằn lún vệt bánh xe của lớp mặt sử dụng bê tông asphalt có hàm lượng RAP là 0%, 30% và 50% lần lượt là 21,9 mm, 21,1 mm và 19,7 mm (**Hình 4.7**). Khi gia tăng hàm lượng RAP sử dụng trong hỗn hợp, chiều sâu hằn lún vệt bánh xe có xu hướng giảm. Tuy nhiên, chỉ tiêu nứt từ trên xuống tăng 27,5% và 37,3% tương ứng với lớp mặt sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP là 30% và 50%. Các kết quả này cũng tương đồng với kết quả thí nghiệm hằn lún vệt bánh xe và thí nghiệm kháng nứt được thực hiện trong phòng thí nghiệm.



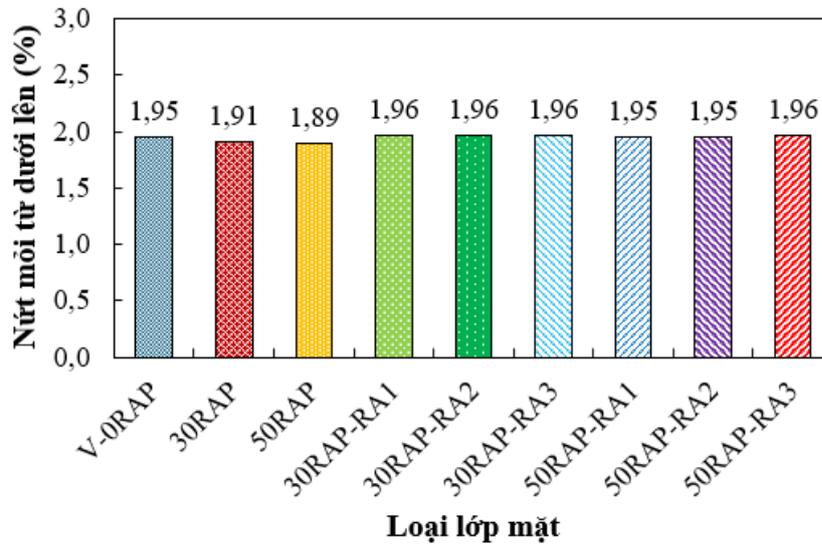
**Hình 4.5. Độ gồ gề IRI** (với kết cấu có lớp mặt dày 50 mm và lưu lượng xe năm đầu 2000 xe/ngày đêm, sau 15 năm khai thác)



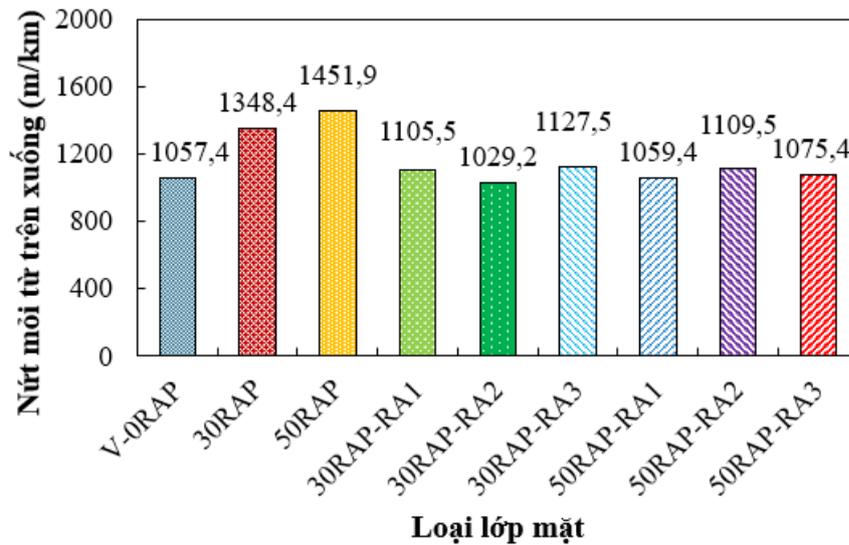
**Hình 4.6. Tổng chiều sâu hằn lún cho toàn bộ kết cấu** (với kết cấu có lớp mặt dày 50 mm và lưu lượng xe năm đầu 2000 xe/ngày đêm, sau 15 năm khai thác)



**Hình 4.7. Chiều sâu hằn lún lớp mặt** (với kết cấu có lớp mặt dày 50 mm và lưu lượng xe năm đầu 2000 xe/ngày đêm, sau 15 năm khai thác)



**Hình 4.8. Nứt mỗi từ dưới lên** (với kết cấu có lớp mặt dày 50 mm và lưu lượng xe năm đầu 2000 xe/ngày đêm, sau 15 năm khai thác)



**Hình 4.9. Nứt mỗi từ trên xuống** (với kết cấu có lớp mặt dày 50 mm và lưu lượng xe năm đầu 2000 xe/ngày đêm, sau 15 năm khai thác)

#### 4.3.3.2. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ tiêu khai thác của mặt đường

Các số liệu thu được từ 18 loại kết cấu mặt đường, mỗi loại khảo sát ở 2 mức lưu lượng xe khác nhau, sau khi chạy từ phần mềm được sử dụng để phân tích đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến các chỉ tiêu khai thác của mặt đường (**Bảng 4.5**). Các chỉ tiêu khai thác của mặt đường được xét đến bao gồm, độ gồ gề IRI, chiều sâu hần lún vết bánh xe của lớp mặt, tổng chiều sâu hần lún của toàn kết cấu và nứt mỗi từ trên xuống. **Bảng 4.6** thể hiện các yếu tố đầu vào và các biến được đưa ra để phân tích ANOVA.

**Bảng 4.6. Các yếu tố phân tích phương sai ANOVA**

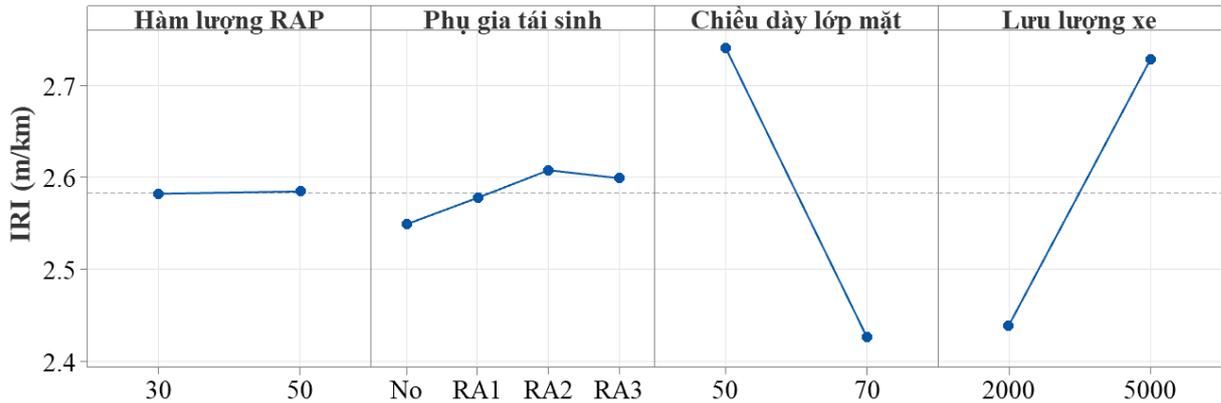
Yếu tố	Mức	Biến
Hàm lượng RAP (%)	2	30 và 50
Phụ gia tái sinh	4	RA1, RA2 và RA3 và No (không có phụ gia tái sinh)
Chiều dày lớp mặt (mm)	2	50 và 70
Lưu lượng xe (xe/ngày đêm)	2	2000 và 5000

**a. Ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ tiêu độ gồ gề IRI**

Phân tích ANOVA chỉ ra rằng, trừ hàm lượng RAP (P-value = 0,184 > 0,05), các yếu tố khác đều có ảnh hưởng đến chỉ tiêu độ gồ gề IRI (P-value < 0,05) (**Bảng 4.7**). **Hình 4.10** thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ tiêu IRI của mặt đường. Kết quả cho thấy, yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến chỉ tiêu IRI là chiều dày lớp mặt. Khi chiều dày lớp mặt tăng lên thì giá trị IRI giảm, thể hiện bằng độ dốc của đường thẳng. Tiếp đến là yếu tố lưu lượng xe thiết kế, khi lưu lượng xe thiết kế tăng thì giá trị IRI tăng lên. Phụ gia tái sinh có ảnh hưởng không lớn đến chỉ tiêu IRI.

**Bảng 4.7. Phân tích ANOVA chỉ tiêu IRI**

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	16	1,52670	0,095419	3693,63	< 0,001
Linear	6	1,48306	0,247177	9568,15	< 0,001
Hàm lượng RAP	1	0,00005	0,000050	1,94	0,184
Phụ gia tái sinh	3	0,01641	0,005471	211,77	< 0,001
Chiều dày lớp mặt	1	0,79380	0,793800	30727,74	< 0,001
Lưu lượng xe	1	0,67280	0,672800	26043,87	< 0,001
2-Way Interactions	10	0,04364	0,004364	168,92	< 0,001
Hàm lượng RAP*Phụ gia tái sinh	3	0,00183	0,000608	23,55	< 0,001
Phụ gia tái sinh*Chiều dày lớp mặt	3	0,00052	0,000175	6,77	< 0,001
Phụ gia tái sinh*Lưu lượng xe	3	0,00068	0,000225	8,71	< 0,001
Chiều dày lớp mặt*Lưu lượng xe	1	0,04061	0,040613	1572,10	< 0,001
Error	15	0,00039	0,000026		
Total	31	1,52709			



**Hình 4.10. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến chỉ tiêu IRI**

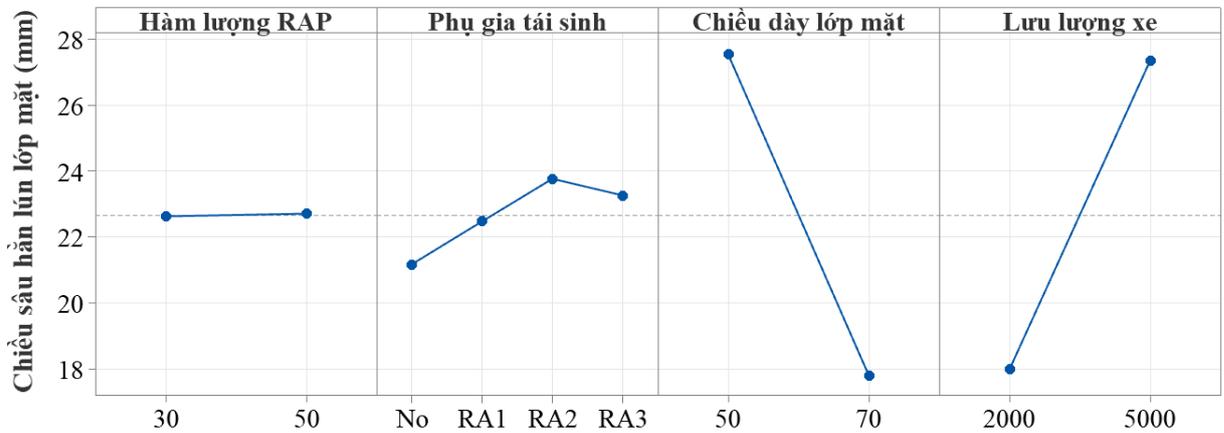
**b. Ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ tiêu chiều sâu hằn lún vết bánh xe của lớp mặt**

Kết quả phân tích ANOVA chỉ ra các yếu tố ảnh hưởng đến chiều sâu lún của lớp mặt bao gồm, phụ gia tái sinh, chiều dày lớp mặt và lưu lượng xe ( $P\text{-value} < 0,05$ ) (**Bảng 4.8**). Độ cứng của bê tông asphalt tái chế nóng sử dụng RAP cũng tăng lên, do vậy, chiều sâu hằn lún vết bánh xe có xu hướng giảm. Sử dụng phụ gia tái sinh làm giảm độ cứng của bê tông asphalt tái chế nên không có sự khác nhau về chiều sâu hằn lún của lớp mặt khi sử dụng các loại bê tông asphalt tái chế nóng với hàm lượng RAP và phụ gia tái sinh khác nhau ( $P\text{-value} = 0,294$ ). Khi sử dụng phụ gia tái sinh, chiều sâu hằn lún vết bánh xe của lớp mặt tăng trung bình 9,4%, như được thể hiện ở **Hình 4.11**.

**Bảng 4.8. Phân tích ANOVA chỉ tiêu chiều sâu hằn lún vết bánh của lớp mặt**

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	1533,64	117,972	2651,79	< 0,001
Linear	6	1494,42	249,070	5598,60	< 0,001
Hàm lượng RAP	1	0,05	0,052	1,17	0,294
Phụ gia tái sinh	3	30,75	10,251	230,42	< 0,001
Chiều dày lớp mặt	1	760,21	760,208	17087,98	< 0,001
Lưu lượng xe	1	703,41	703,406	15811,20	< 0,001
2-Way Interactions	7	39,22	5,603	125,95	< 0,001
Hàm lượng RAP*Phụ gia tái sinh	3	3,26	1,088	24,45	< 0,001
Phụ gia tái sinh*Lưu lượng xe	3	0,66	0,219	4,93	0,011
Chiều dày lớp mặt*Lưu lượng xe	1	35,30	35,301	793,50	< 0,001

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Error	18	0,80	0,044		
Total	31	1534,44			



**Hình 4.11. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến chiều sâu hằn lún vệt bánh lốp mặt**

Kết quả từ **Hình 4.11** cho thấy, ảnh hưởng lớn nhất đến chỉ tiêu chiều sâu lún của lớp mặt là chiều dày lớp mặt và lưu lượng xe thiết kế. Khi lớp mặt thiết kế với chiều dày 70 mm, chiều sâu hằn lún trung bình giảm 35,9%. Lưu lượng xe thiết kế gia tăng (5000 xe/ngày đêm), chiều sâu hằn lún trung bình của lớp mặt cũng tăng lên 52,1%.

**c. Ảnh hưởng của các yếu tố đến chỉ tiêu tổng chiều sâu lún của toàn kết cấu**

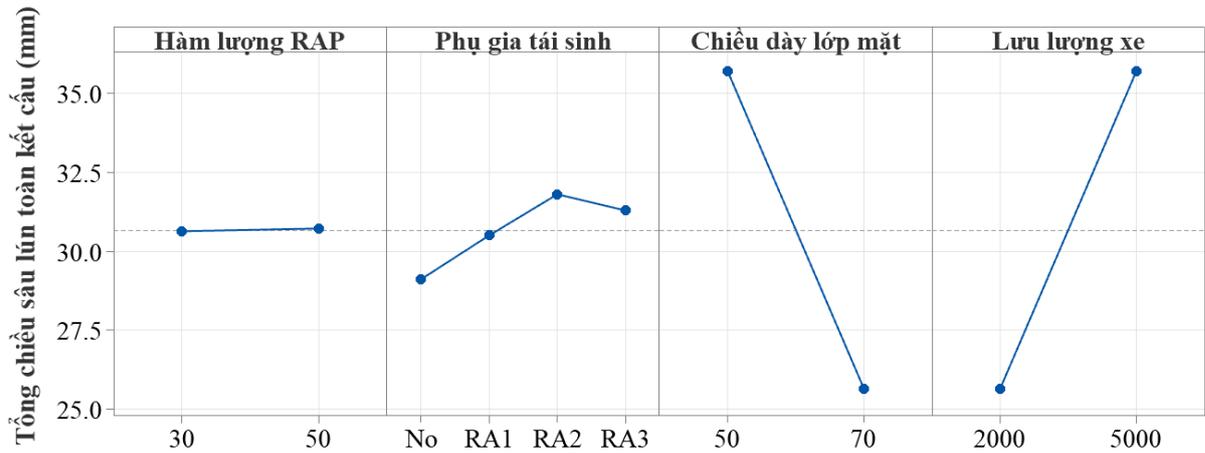
Tương tự như đối với chỉ tiêu chiều sâu lún lớp mặt, kết quả phân tích ANOVA cho thấy, không có sự khác nhau về ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến tổng chiều sâu lún của toàn bộ kết cấu (P-value = 0,283). Ngoài trừ hàm lượng RAP, các yếu tố khác đều có ảnh hưởng đến chỉ tiêu tổng chiều sâu lún toàn kết cấu (P-value < 0,05) (**Bảng 4.9**).

**Hình 4.12** cũng cho thấy rằng, ảnh hưởng lớn nhất đến chỉ tiêu tổng chiều sâu lún kết cấu là chiều dày lớp mặt và lưu lượng xe thiết kế. Khi chiều dày lớp mặt tăng lên và lưu lượng xe thấp thì tổng chiều sâu lún kết cấu giảm.

**Bảng 4.9. Phân tích ANOVA chỉ tiêu tổng chiều sâu lún toàn kết cấu**

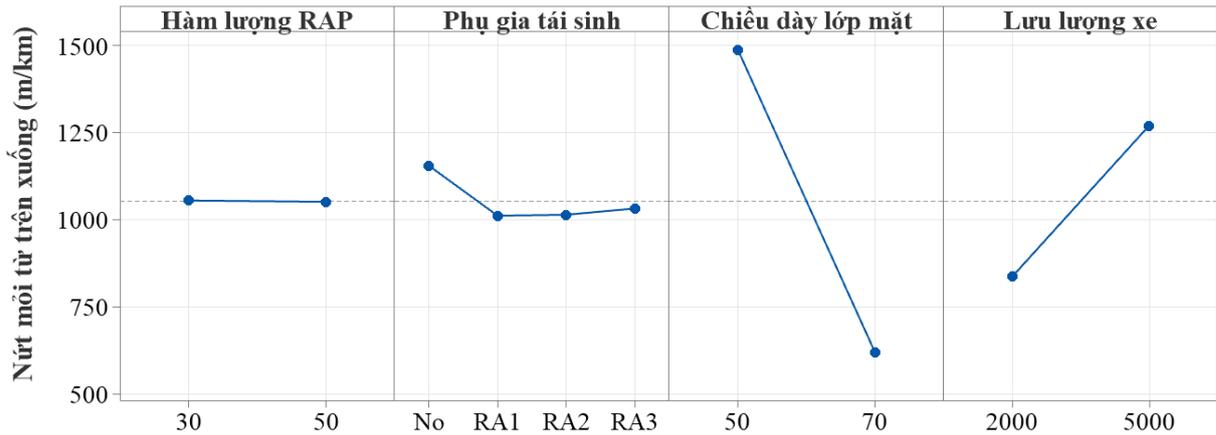
Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	1693,19	130,245	2605,92	< 0,001
Linear	6	1653,76	275,627	5514,69	< 0,001
Hàm lượng RAP	1	0,06	0,061	1,23	0,283

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Phụ gia tái sinh	3	33,03	11,012	220,32	< 0,001
Chiều dày lớp mặt	1	809,63	809,629	16198,88	< 0,001
Lưu lượng xe	1	811,04	811,038	16227,07	< 0,001
2-Way Interactions	7	39,43	5,632	112,69	< 0,001
Hàm lượng RAP*Phụ gia tái sinh	3	3,08	1,025	20,51	< 0,001
Phụ gia tái sinh*Lưu lượng xe	3	0,57	0,189	3,77	0,029
Chiều dày lớp mặt*Lưu lượng xe	1	35,79	35,786	715,99	< 0,001
Error	18	0,90	0,046		
Total	31	1694,09			



**Hình 4.12. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến tổng chiều sâu hằn lún toàn kết cấu**  
**d. Ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống**

Phân tích phương sai ANOVA chỉ ra rằng, trừ hàm lượng RAP (P-value = 0,794), các yếu tố khác đều có ảnh hưởng đến chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống (P-value < 0,05) (**Bảng 4.10**). **Hình 4.13** thể hiện các yếu tố ảnh hưởng chính đến chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống. Kết quả cho thấy, ảnh hưởng lớn nhất đến chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống là chiều dày lớp mặt. Khi lớp mặt thiết kế với chiều dày 70 mm thì chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống giảm 58,4% so với chiều dày thiết kế 50 mm. Lưu lượng xe thiết kế cũng có ảnh hưởng đáng kể đến chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống. Gia tăng lưu lượng xe thiết kế, nứt mỗi từ trên xuống cũng có xu hướng tăng lên. Chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống ứng với kết cấu mặt đường khai thác với lưu lượng 5000 xe/ngày đêm cao hơn 51,7% so với lưu lượng 2000 xe/ngày đêm.



**Hình 4.13. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến nứt mỗi từ trên xuống**

**Bảng 4.10. Phân tích ANOVA chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống**

Yếu tố	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	8139480	813948	529,29	< 0,001
Linear	6	7651530	1275255	829,27	< 0,001
Hàm lượng RAP	1	108	108	0,07	0,794
Phụ gia tái sinh	3	112473	37491	24,38	< 0,001
Chiều dày lớp mặt	1	6038942	6038942	3927,00	< 0,001
Lưu lượng xe	1	1500007	1500007	975,42	< 0,001
2-Way Interactions	4	487950	121987	79,33	< 0,001
Phụ gia tái sinh*Chiều dày lớp mặt	3	114036	38012	24,72	< 0,001
Chiều dày lớp mặt*Lưu lượng xe	1	373914	373914	243,15	< 0,001
Error	21	32294	1538		
Total	31	8171774			

Phụ gia tái sinh cũng có ảnh hưởng đến chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống. Sử dụng phụ gia tái sinh đã làm giảm khả năng nứt mỗi nhờ cơ chế trẻ hóa bitum RAP của phụ gia tái sinh. Chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống giảm trung bình 11,7% đối với kết cấu mặt đường sử dụng lớp bê tông asphalt tái chế nóng có phụ gia tái sinh. Do hiệu quả phụ gia tái sinh đều làm giảm độ cứng của hỗn hợp asphalt tái chế nên không có sự khác nhau về ảnh hưởng của hàm lượng RAP đến chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống. Tuy nhiên, đối với hỗn hợp asphalt tái chế không sử dụng phụ gia tái sinh, chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống có xu hướng tăng lên khi gia tăng hàm lượng RAP sử dụng, như được thể hiện ở **Hình 4.9**.

#### 4.4. Kết luận

Dựa trên phương pháp cơ học thực nghiệm để phân tích, dự báo các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường có lớp mặt là các hỗn hợp bê tông asphalt tái chế nóng, nghiên cứu rút ra một số kết luận sau:

- Kết cấu mặt đường sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng cải thiện được khả năng kháng hằn lún vệt bánh xe, độ gồ ghề IRI và nứt mỗi từ dưới lên. Khi hàm lượng RAP sử dụng càng nhiều thì các chỉ tiêu này càng được cải thiện.
- Chiều sâu hằn lún có xu hướng giảm khi gia tăng hàm lượng RAP sử dụng, nhưng mức độ giảm là không lớn. Chỉ tiêu nứt từ trên xuống tăng lần lượt 27,5% và 37,3% tương ứng với các lớp mặt sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP là 30% và 50%.
- Kết quả phân tích cho thấy, hỗn hợp asphalt tái chế nóng sử dụng phụ gia tái sinh cải thiện được khả năng kháng nứt nhưng làm gia tăng chiều sâu hằn lún vệt bánh xe. Chiều sâu hằn lún vệt bánh xe của lớp mặt tăng trung bình 9,4% trong khi, chỉ tiêu nứt mỗi từ trên xuống giảm trung bình 11,7% đối với kết cấu mặt đường sử dụng lớp bê tông asphalt tái chế nóng có phụ gia tái sinh.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 1. Những đóng góp mới của Luận án

Từ các kết quả nghiên cứu lý thuyết, nghiên cứu thực nghiệm và phân tích kết cấu mặt đường có lớp mặt sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP cao, Luận án đã có một số đóng góp mới về khoa học và thực tiễn như sau:

- Đã đánh giá được ảnh hưởng của ba loại phụ gia tái sinh (RA1 - gốc dầu mỏ, RA2 - gốc dầu thực vật và RA3 - gốc dầu đậu nành) đến chỉ tiêu vật lý và cơ học của bitum hỗn hợp. Kết quả nghiên cứu cho thấy, phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật và gốc dầu đậu nành yêu cầu hàm lượng thấp hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ để đạt được các tính chất tương tự như bitum mới 60/70.

- Đã phân tích được cơ chế tương tác giữa phụ gia tái sinh với bitum RAP, cũng như ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến sự thay đổi các thành phần hoá học trong bitum hỗn hợp thông qua thí nghiệm FTIR.

- Đã đánh giá được ảnh hưởng của hàm lượng RAP, loại và hàm lượng phụ gia tái sinh đến tính năng kháng hằn lún vệt bánh xe và kháng nứt của bê tông asphalt tái chế nóng. Phụ gia tái sinh gốc dầu thực vật (RA2) và gốc dầu đậu nành (RA3) có hiệu quả cải thiện khả năng kháng nứt tốt hơn so với phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ (RA1) ở điều kiện hóa già ngắn hạn. Tuy nhiên, khi trải qua quá trình hóa già dài hạn, phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ thể hiện hiệu quả chống lão hóa tốt hơn so với hai loại phụ gia tái sinh còn lại.

- Trong phạm vi nghiên cứu của Luận án, đã xác định được giới hạn hàm lượng phụ gia tái sinh không nên vượt quá 12% (theo khối lượng bitum RAP) để đảm bảo cân bằng các tính năng, cụ thể các hàm lượng được xác định lần lượt là 10,5%, 7,5% và 8,3% tương ứng với ba loại phụ gia tái sinh RA1, RA2 và RA3.

- Đã đánh giá được ảnh hưởng của hàm lượng RAP và phụ gia tái sinh đến mô đun đàn hồi  $|E^*|$  và mô đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp  $M_R$  của bê tông asphalt tái chế nóng. Trên cơ sở các số liệu thí nghiệm  $|E^*|$ , Luận án đã phân tích, dự báo được các tính năng khai thác của kết cấu mặt đường có lớp mặt sử dụng bê tông asphalt tái chế nóng.

## **2. Hạn chế của Luận án**

Nghiên cứu này mới chỉ xét đến một nguồn vật liệu RAP nên chưa có đánh giá ảnh hưởng của nguồn RAP đến các tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng.

## **3. Kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo**

○ Trong nghiên cứu tiếp theo, cần tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm hiện trường để đánh giá các tính năng khai thác thực tế của hỗn hợp, đồng thời các nguồn RAP khác nhau cũng cần được khảo sát đánh giá.

○ Mức độ trộn lẫn bitum RAP vào bitum mới ứng với loại và tỷ lệ RAP, phụ gia tái sinh cũng cần được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo.

○ Cần thực hiện phân tích vòng đời (Life Cycle Assessment - LCA) và tuyên bố sản phẩm môi trường (Environmental Product Declaration - EPD) cho sản phẩm bê tông asphalt tái chế nóng nhằm định lượng rõ các lợi ích về môi trường đạt được.

## DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

### Bài báo tiếng Anh

1. Dao Van Dong\*, Nguyen Ngoc Lan, Nguyen Huu May, Ly Hai Bang, Truong Van Quyet, **Evaluation of cracking resistance of warm mix asphalt incorporating high reclaimed asphalt pavement content**, Journal of Materials: Design and Applications (SCIE-Q2), 2022, 236(12), 2550–2560 <https://doi.org/10.1177/14644207221100036>
2. Nguyen Ngoc Lan, Truong Van Quyet\*, Dao Van Dong, Nguyen Huu May, Tran Duc Trung, **Effects of rejuvenators and aging conditions on the properties of blended bitumen and the cracking behavior of hot asphalt mixtures with a high RAP content**, Journal of Materials: Design and Applications (SCIE-Q2), 2024, 238(7) 1368-1390 <https://doi.org/10.1177/14644207241236901>

### Bài báo Hội thảo

3. Truong Van Quyet\*, Nguyen Ngoc Lan, Dao Van Dong, Kim Youngik, Tran Duc Trung, **Effects of rejuvenators on cracking resistance of high RAP asphalt mixtures**, Proceedings of the 4th International Conference on Sustainability in Civil Engineering - ICSCE 2022, Hanoi, Vietnam, 59-68 [https://doi.org/10.1007/978-981-99-2345-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2345-8_5).
4. Truong Van Quyet\*, Nguyen Ngoc Lan, Dao Van Dong, Kim Youngik, Kim Diana, **Effects of petroleum-based rejuvenator on performances of hot recycled asphalt mixtures with high RAP content**, 8th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements – ICONFBMP 2024, Thessaloniki, Greece, 586-593 <https://doi.org/10.1201/9781003402541>.

### Bài báo tiếng Việt

5. Trương Văn Quyết\*, Nguyễn Ngọc Lân, Đào Văn Đông, Phạm Minh Trang, **Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh đến độ kim lún và nhiệt độ hoá mềm của bitum biến tính**, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải (02/2023), 74 (2), 174-185 <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.7>
6. Trương Văn Quyết\*, Nguyễn Ngọc Lân, Đào Văn Đông, Phạm Duy Hữu, Lương Xuân Chiểu, **Nghiên cứu một số đặc tính của bitum hỗn hợp sử dụng phụ gia tái sinh gốc dầu mỏ bằng thiết bị cắt động lưu biến**, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải (06/2023), 74 (5), 655-670 <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.8>
7. Trương Văn Quyết\*, Nguyễn Ngọc Lân, **Ảnh hưởng của hàm lượng vật liệu mặt đường asphalt cũ đến tính năng kháng nứt và kháng hằn lún vết bánh xe của bê tông asphalt tái chế nóng**, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải (02/2024), 75(2) 1307-1321 <https://doi.org/10.47869/tcsj.75.2.8>
8. Nguyễn Ngọc Lân, Trương Văn Quyết\*, Lê Thu Trang, **Ảnh hưởng của phụ gia tái sinh Prephalt FBK đến mô-đun đàn hồi kéo gián tiếp tải trọng lặp của bê tông asphalt tái chế nóng có tỷ lệ RAP bằng 50%**, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 03/2024, 39-43.
9. Trương Văn Quyết\*, Nguyễn Ngọc Lân, Đào Văn Đông, **Nghiên cứu thực nghiệm mô đun động của bê tông asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP cao và phụ gia tái sinh**, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải (12/2024) 75(9), 2371-2384 <https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.11>

### Đề tài nghiên cứu khoa học

1. Chủ nhiệm đề tài nghiên cứu Khoa học cấp Bộ, **Nghiên cứu chế tạo phụ gia tái sinh gốc sinh học trong công nghệ tái chế nóng bê tông nhựa tại trạm trộn có tỷ lệ RAP đến 50% ở Việt Nam**, Bộ Giao thông vận tải, 2023.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### TÀI LIỆU TIẾNG VIỆT

1. Công ty Cổ phần Đầu tư xây dựng BMT (2022), *Thử nghiệm công nghệ tái chế nóng bê tông nhựa với hàm lượng RAP từ 25% đến 50% tại trạm trộn*.
2. Đào Văn Đông, Nguyễn Ngọc Lân, Nguyễn Quang Phúc, Lu Thị Yên (2024), *Công nghệ bê tông asphalt tái chế ấm: Nghiên cứu và ứng dụng*, Nhà xuất bản xây dựng, Hà Nội.
3. Đề tài DT 174055 (2017), *Nghiên cứu cơ sở khoa học để áp dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm trong phân tích kết cấu áo đường mềm ở Việt Nam*, Đề tài Bộ Giao thông vận tải.
4. Đào Văn Đông (2021), *Giáo trình Công nghệ vật liệu mới trong xây dựng*, Nhà xuất bản xây dựng, Hà Nội.
5. Nguyễn Ngọc Lân, Võ Đại Tú (2020), "Ảnh hưởng của tỷ lệ phụ gia tái sinh Prephalt đến độ lún vết hằn bánh xe và chỉ số kháng nứt của bê tông asphalt có tỷ lệ tái chế bằng 50%", *Hội nghị Khoa học Công nghệ lần thứ XXII*, Trường Đại học GTVT.
6. Phạm Duy Hữu, Vũ Đức Chính, Đào Văn Đông, Nguyễn Thanh Sang (2011), *Bê tông Asphalt*, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội.
7. Quyết định số 1454/QĐ-TTg (2021), *Phê duyệt quy hoạch mạng lưới đường bộ thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050*, Quyết định của Thủ tướng Chính phủ.
8. TCCS 37 (2022), *Áo đường mềm - Yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế theo chỉ số kết cấu (SN)*, Tiêu chuẩn cơ sở, Bộ Giao thông vận tải.
9. TCCS 38 (2022), *Áo đường mềm – Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế*, Tiêu chuẩn cơ sở, Bộ Giao thông vận tải.
10. TCVN 11710 (2017), *Nhựa đường - Thử nghiệm xác định ảnh hưởng của nhiệt và không khí bằng phương pháp sấy màng mỏng xoay*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
11. TCVN 11711 (2017), *Thử nghiệm xác định ảnh hưởng của nhiệt và không khí bằng phương pháp sấy màng mỏng*, Tiêu Chuẩn Việt Nam.
12. TCVN 11808 (2017), *Nhựa đường - Xác định các đặc tính lưu biến bằng lưu biến kế cắt động*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
13. TCVN 13510-1 (2020), *Lớp vật liệu tái chế nguội tại chỗ dùng cho kết cấu áo đường ô tô - Thi công và nghiệm thu, Phần 1: Tái chế sâu sử dụng xi măng hoặc xi măng và nhũ tương nhựa*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
14. TCVN 13510-2 (2020), *Lớp vật liệu tái chế nguội tại chỗ dùng cho kết cấu áo đường ô tô - Thi công và nghiệm thu, Phần 2: Tái chế sâu sử dụng nhựa đường bọt và xi măng*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
15. TCVN 13510-3 (2020), *Lớp vật liệu tái chế nguội tại chỗ dùng cho Kết cấu áo đường ô tô - Thi công và nghiệm thu, Phần 2: Tái chế nóng sử dụng nhựa đường bọt và xi măng*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
16. TCVN 13567-1 (2022), *Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu - Phần 1 : Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường thông thường*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
17. TCVN 13567-4 (2024), *Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu - Phần 4: Bê tông nhựa chặt tái chế nóng tại trạm trộn sử dụng vật liệu cũ không quá 25 %*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
18. TCVN 13567-6 (2025), *Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu - Phần 6: Bê tông nhựa chặt tái chế nóng tại trạm trộn sử dụng vật liệu cũ từ trên 25 % đến 50%*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
19. TCVN 13899 (2023), *Hỗn hợp nhựa - Phương pháp thử vết hằn bánh xe*, Tiêu chuẩn Việt Nam.

20. TCVN 7495 (2005), *Bitum – Phương pháp xác định độ kim lún*, Tiêu chuẩn Việt Nam.
21. TCVN 7497 (2005), *Bitum - Phương pháp xác định điểm hóa mềm (dụng cụ vòng và bi)*, Tiêu chuẩn Việt Nam.

## TÀI LIỆU TIẾNG ANH

22. AASHTO-93 (1993), *Guide for design of pavement structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
23. AASHTO M320 (2010), *Performance Graded asphalt binder*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
24. AASHTO M323 (2022), *Standard specification for Superpave Volumetric Mix Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
25. AASHTO R28 (2012), *Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
26. AASHTO R30 (2010), *Standard practice for mixture conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
27. AASHTO R59 (2011), *Standard practice for recovery of asphalt binder from solution by Abson method*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
28. AASHTO T164 (2018), *Standard method of test for quantitative extraction of asphalt binder from Hot Mix Asphalt (HMA)*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
29. AASHTO T240 (2013), *Standard method of test for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (Rolling Thin-Film Oven Test)*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
30. AASHTO T315 (2019), *Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
31. AASHTO TP62 (2007), *Standard method of test for determining dynamic modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
32. Airey, G. D. (2003), "State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials", *International Journal of Pavement Engineering* 4, pp. 165–176.
33. Akatsu, K., Kanou, Y., and Akiba, S. (2018), "Separation recycling technology for restoring Reclaimed Asphalt Pavement", *Journal of the Japan Society of Civil Engineers* 6, pp. 110–117.
34. Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., and Carpenter, S. H. (2007), *Reclaimed Asphalt Pavement - A literature review*, Research Report FHWA-ICT-07-001, Illinois Center for Transportation, US.
35. Arámbula-Mercado, E., Kaseer, F., Epps Martin, A., Yin, F., and Garcia Cucalon, L. (2018), "Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents", *Construction and Building Materials* 158, pp. 432–442.
36. ASTM D1754 (2020), *Standard test method for effects of heat and air on asphaltic materials (Thin-Film Oven Test)*, American Society for Testing and Materials.
37. ASTM D36 (2010), *Standard test method for softening point of bitumen (Ring-and-Ball apparatus)*, American Society for Testing and Materials.
38. ASTM D4552 (2020), *Standard practice for classifying Hot-Mix recycling agents*, American Society for Testing and Materials.
39. ASTM D5 (2010), *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*,

- American Society for Testing and Materials.
40. ASTM D7643 (2019), *Standard practice for determining the continuous grading temperatures and continuous grades for PG Graded Asphalt Binders*, American Society for Testing and Materials.
  41. ASTM D8225 (2019), *Standard test method for determination of Cracking Tolerance Index of asphalt mixture using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate temperature*, American Society for Testing and Materials.
  42. Bahia, H., Zhang, Y., Swiertz, D., and Soleimanbeigi, A. (2020), *Long-term performance of asphalt concrete mixed with RAP and RAS*, Wisconsin Department of Transportation, US.
  43. Bonicelli, A., Calvi, P., Martinez-Arguelles, G., Fuentes, L., and Giustozzi, F. (2017), "Experimental study on the use of rejuvenators and plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures", *Construction and Building Materials* 155, pp. 37–44.
  44. Carvajal Munoz, J. S., Kaseer, F., Arambula, E., and Martin, A. E. (2019), "Use of the resilient modulus test to characterize asphalt mixtures with recycled materials and recycling agents", *Journal of the Transportation Research Board* 2506, pp. 45–53.
  45. Cavalli, M. C., Zaumanis, M., Mazza, E., Partl, M. N., and Poulikakos, L. D. (2018), "Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators", *Composites Part B: Engineering* 141, pp. 174–181.
  46. COP 26, The United Nations Climate Change Conference-UNFCCC, Glasgow, 2021. <https://unfccc.int/conference/glasgow-climate-change-conference-october-november-2021>, (n.d.).
  47. Copeland (2011), *Reclaimed Asphalt Pavement in asphalt mixtures: State of the practice*, No. FHWA-HRT-11-021, Virginia Department of Transportation, US.
  48. Corbett, L. W., and Merz, R. E. (1975), Asphalt binder hardening in the Michigan test road after 18 years of service, *Transportation Research Record* 544, pp. 27–34.
  49. DB 11/T 2073 (2022), *Technical specification for hot central plant recycling of asphalt pavement*, Beijing, China.
  50. EAPA, Asphalt in figures – Provisional figures 2022, European Asphalt Pavement Association, <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2022/>.
  51. Elwardany, M. D., Yousefi Rad, F., Castorena, C., and Kim, Y. R. (2017), "Evaluation of asphalt mixture laboratory long-term ageing methods for performance testing and prediction", *Road Materials and Pavement Design* 18, pp. 28–61.
  52. EN 12697-26 (2018), *Bituminous mixtures - Test methods - Part 26: Stiffness*, European Standard.
  53. EN 13108-1 (2016), *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 1: Asphalt concrete*, European Standard.
  54. Espinoza-Luque, A. F., Al-Qadi, I. L., and Ozer, H. (2018), "Optimizing rejuvenator content in asphalt concrete to enhance its durability", *Construction and Building Materials* 179, pp. 642–648.
  55. Fusong, W., Zipeng, W., Chao, L., Yue, X., Shaopeng, W., Pan, P. (2017), "The rejuvenating effect in hot asphalt recycling by mortar transfer ratio and image analysis", *Materials* 10, pp. 1-11.
  56. FHWA-HRT-11-021 report (2011), *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice*, Federal Highway Administration, US.
  57. Garcia Cucalon, L., King, G., Kaseer, F., Arambula-Mercado, E., Epps Martin, A., Turner, T. F., et al. (2017), "Compatibility of recycled binder blends with recycling agents: Rheological and physicochemical evaluation of rejuvenation and aging processes", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 56, pp. 8375–8384.

58. Im, S., Zhou, F., Lee, R., and Scullion, T. (2014), "Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials", *Construction and Building Materials* 53, pp. 596–603.
59. IRC:120 (2015), *Recommended practice for recycling of bituminous*, Indian Road Congress.
60. Information Series 138 (IS-138) (2024), *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm mix asphalt usage 2022*, National Asphalt Pavement Association.
61. Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I., and Zaumanis, M. (2015), "Hot mix asphalt with high RAP content", *Procedia Engineering* 114, pp. 676–684.
62. Jacobs, G., Margaritis, A., Hernando, D., He, L., Blom, J., and Van den bergh, W. (2021), "Influence of soft binder and rejuvenator on the mechanical and chemical properties of bituminous binders", *Journal of Cleaner Production*, 125596.
63. Jiang, T., Fan, Q., Hou, M., Mi, S., and Yan, X. (2023), "Effects of rejuvenator dosage, temperature, RAP content and rejuvenation process on the road performance of recycled asphalt mixture", *Sustainability* 15, pp. 35–39.
64. JTG/T5521 (2019), *Technical specifications for Highway asphalt pavement recycling*, Beijing, China.
65. Karlsson, R., and Isacson, U. (2003), "Laboratory studies of diffusion in bitumen using markers", *Journal of Materials Science* 38, pp. 2835–2844.
66. Kaseer, F., Cucalon, L. G., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., and Epps, J. (2018), "Practical tools for optimizing recycled materials content and recycling agent dosage for improved short and long-term performance of rejuvenated binder blends and mixtures", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 87, pp. 513–555.
67. Kaseer, F., Martin, A. E., and Arámbula-Mercado, E. (2019), "Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review", *Construction and Building Materials* 211, pp. 974–987.
68. Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., and Epps Martin, A. (2017), "Stiffness characterization of asphalt mixtures with High recycled material content and recycling agents", *Journal of the Transportation Research Board* 2633, pp. 58–68.
69. Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Epps Martin, A., Daniel, J. S., and Salari, S. (2018), "Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test", *Construction and Building Materials* 167, pp. 286–298.
70. Kazuyuki Kubo (2015), *Recycling in Japan - Application of reclaimed asphalt pavement and recycled asphalt shingles in Hot-Mix asphalt*, Transportation Research Circular E-C188, pp. 60–67.
71. Kim, Y-R., Haghshenas, H., Nabizadeh, H., Santosh, K. (2016), *Research on high-RAP asphalt mixtures with rejuvenators and WMA additives*, SPR-P1(15) M016, Nebraska Department of Roads.
72. Koudelka (2018), "The use of rejuvenators as an effective way to restore aged binder properties, *Conference*": *Transport Research Arena*, Vienna.
73. Lee, J., Denneman, E., and Choi, Y. (2015), "Maximising the re-use of reclaimed asphalt pavement: outcomes of year two: RAP mix design", *Austroads* 60.
74. Li, X., Clyne, T. R., and Marasteanu, M. O. (2004), *Recycled asphalt pavement (RAP) Effects on binder and mixture quality*, MN/RC-2005-02, Minnesota Department of Transportation, US.
75. Li, Z., Fa, C., Zhao, H., Zhang, Y., Chen, H., and Xie, H. (2020), "Investigation on evolution of bitumen composition and micro-structure during aging", *Construction and Building Materials* 244, 118322.
76. Loeber, L., Muller, G., Morel, J., and Sutton, O. (1998), "Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach", *Fuel* 77, pp. 1443–1450.

77. Mansourkhaki, A., Ameri, M., and Daryaei, D. (2019), "Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder", *Construction and Building Materials* 203, pp. 83–94.
78. Manual 16/TRH 21 - Sabita (2017), *Use of reclaimed asphalt in the production of asphalt*, pp. 1–54.
79. Marsac, P., Piérard, N., Porot, L., Van Den Bergh, W., Grenfell, J., Mouillet, V., et al. (2014), "Potential and limits of FTIR methods for reclaimed asphalt characterisation, *Materials and Structures*" 47, pp. 1273–1286.
80. Mogawer, W., Austerman, A., Mohammad, L., and Kutay, M. E. (2013), "Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures", *Road Materials and Pavement Design* 14, pp. 129–147.
81. Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J. S., Bonaquist, R., Austerman, A., and Booshehrian, A. (2012), "Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures", *Road Materials and Pavement Design* 13, pp. 183–208.
82. Mogawer, W. S., Booshehrian, A., Vahidi, S., and Austerman, A. J. (2013), "Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures", *Road Materials and Pavement Design* 14, pp. 193–213.
83. Mokhtari, A. (2022), *Evaluation of high-RAP asphalt mixtures containing rejuvenators using image processing, binder rheological and mixture performance tests*, Doctor of Philosophy (PhD), University of Iowa.
84. MS-2 (2014), *Asphalt Mix Design Methods*, 7th Edition, Asphalt Institute, US.
85. Nabizadeh, H., Haghshenas, H. F., Kim, Y. R., and Aragão, F. T. S. (2017), "Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures", *Construction and Building Materials* 152, pp. 65–73.
86. NCHRP research Report 927 (2020), *Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, US.
87. NCAT Report 12-05 (2012), *Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents*, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, US.
88. NCAT Report (2014), *Uses of rejuvenators - Asphalt technology news*, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, US.
89. NCHRP Report 1-37A (2004), *Guide for Mechanistic-Empirical design of new and rehabilitated pavement structures*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, US.
90. NCHRP Report 752 (2013), *Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, US.
91. NCHRP Report 927 (2017), *Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, US.
92. Noferini, L. (2016), *Performances and durability of asphalt mixtures made with reclaimed asphalt pavement*, Doctor of Philosophy (PhD), University of Bologna.
93. Nur Izzi M. Y. (2012), *Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders*, Doctor of Philosophy (PhD), University of Nottingham.
94. Nur Izzi M.Y., Mounier, D., Marc-Stéphane, G., Rosli Hainin, M., Airey, G. D., and Di Benedetto, H. (2013), "Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D model", *Construction and Building Materials* 38, pp. 395–406.
95. Olard, F., and Di Benedetto, H. (2003), "General “2S2P1D” model and relation between

- the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes", *Road Materials and Pavement Design* 4, pp. 185–224.
96. Osmari, P. H., Aragão, F. T. S., Leite, L. F. M., Simão, R. A., da Motta, L. M. G., and Kim, Y. R. (2017), "Chemical, microstructural, and rheological characterizations of binders to evaluate aging and rejuvenation", *Journal of the Transportation Research Board* 2632, pp.14–24.
  97. Osmari, P. H., Thiago, F., Aragão, S., Figueiredo, L., Leite, M., Simão, R. A., et al. (2017), "Rheological characterizations of binders to evaluate aging and rejuvenation", *Journal of the Transportation Research Board* 2632, pp. 14–24.
  98. Pahlavan, F., Mousavi, M., Hung, A. M., and Fini, E. H. (2018), "Characterization of oxidized asphaltene and the restorative effect of a bio-modifier", *Fuel* 212, pp. 593–604.
  99. Petersen, J. C. (2009), *A review of the fundamentals of asphalt oxidation*, Transportation Research Circular E-C140, Transportation Research Board.
  100. Pierce, L. M., and Ginger, M. (2014), *Implementation of the AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide and software, implement*, CDOT-2013-4, Colorado Department of Transportation, US.
  101. Presti, D., Vasconcelos, K., Orešković, M., Pires, G. M., and Bressi, S. (2019), "On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents", *Road Materials and Pavement Design* 21, pp. 2071–2090.
  102. Project D9-12 FY 97 (2001), *Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: Technician's manual*, National Research Council, Transportation Research Board, US.
  103. Quality Improvement Series 124 (2007), *Designing HMA with mixtures content high RAP guide*, National Asphalt Pavement Association, US.
  104. Rathore, M., Haritonovs, V., Merijs Meri, R., and Zaumanis, M. (2022), "Rheological and chemical evaluation of aging in 100% reclaimed asphalt mixtures containing rejuvenators", *Construction and Building Materials* 318, 126026.
  105. Ren, S., Liu, X., Lin, P., Jing, R., and Erkens, S. (2023), "Toward the long-term aging influence and novel reaction kinetics models of bitumen", *International Journal of Pavement Engineering* 24, 2024188.
  106. Ren, S., Liu, X., Varveri, A., Khalighi, S., Jing, R., and Erkens, S. (2023), "Aging and rejuvenation effects on the rheological response and chemical parameters of bitumen", *Journal of Materials Research and Technology* 25, pp. 1289–1313.
  107. Report NCHRP 871 (2018), *Long-term aging of asphalt mixtures for performance testing and prediction*, National Research Council, Transportation Research Board.
  108. Richard Willis, B. J., Taylor, P., Nam Tran, P., and Flavio de Goes Padula, P. (2013), "Effects of changing virgin binder grade and content on RAP mixture properties", *Journal of the Transportation Research Board* 2371.
  109. Sharma, A., Rongmei Naga, G. R., Kumar, P., and Rai, P. (2022), "Mix design, development, production and policies of recycled hot mix asphalt: A review", *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 9, pp. 765–794.
  110. Sims, I. (2016), *The Shell bitumen handbook, Sixth edition*, Shell bitumen by ICE Publishing, One Great George Street, Westminster, London.
  111. Sondag, M. S., Chadbourn, B. A., and Drescher, A. (2014), *Investigation of recycled asphalt Pavement (RAP) mixtures*, retrieved from the University Digital Conservancy, <https://hdl.handle.net/11299/758>.
  112. Tarsi, G., Tataranni, P., and Sangiorgi, C. (2020), "The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review", *Materials (Basel)* 13, pp. 40–52.

113. Tex-248-F (2007), *Test Procedure for Overlay Test*, Texas Department of Transportation.
114. Tran, N. (2024), "*Sustainable Materials and Pavements*", International Conference on Sustainability in Civil Engineering, Hanoi, Vietnam.
115. Vamsikrishna, G., and Singh, D. (2023), "Comparison of rutting resistance of plant produced asphalt mixes using Hamburg Wheel Tracker and Surrogate Simple Performance tests: IDEAL-RT and HT-IDT", *Journal of Materials in Civil Engineering* 35, pp. 1–11.
116. Weezenbeek, V. (2017), Testing report for the performance of Prephalt FBK.
117. West, R. (2015), *Best practices for RAP and RAS management*, Transportation Research Board, US.
118. West, R., and Copeland, A. (2015), *High RAP asphalt pavements: Japan practice*, National Asphalt Pavement Association, US.
119. Willis, J., Turner, P., De Goes Padula, F., Tran, N., and Julian, G. (2013), "Effects of changing virgin binder grade and content on high reclaimed asphalt pavement mixture properties", *Journal of the Transportation Research Board* 2371, pp. 66–73.
120. Witczak M.W., Dragos Andrei, W. N., and Houston. (2000), *Guide for Mechanistic-Empirical design of new and rehabilitated pavement structures*, Transportation Research Board, US.
121. Xie, Z., Rizvi, H., Purdy, C., Ali, A., and Mehta, Y. (2019), "Effect of rejuvenator types and mixing procedures on volumetric properties of asphalt mixtures with 50% RAP", *Construction and Building Materials* 218, pp. 457–464.
122. Yan, J., Zhang, Z., Zhu, H., Li, F., and Liu, Q. (2014), "Experimental study of hot recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement and different recycling agents", *Journal of Testing and Evaluation* 42.
123. Yin, F., Chen, C., Moraes, R., Andrew Hanz, J. H., and Danielle, K. (2023), *Impact of polymer modification on IDEAL-CT and I-FIT for cracking resistance evaluation of asphalt mixtures*, NRRA202303, Minnesota Department of Transportation, US.
124. Yin, F., Langan, M., Moraes, R., and Chen, C. (2022), *Novel methods for adding rejuvenators in asphalt mixtures with high recycled binder ratios*, NRRA202202 Minnesota Department of Transportation, US.
125. Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Epps Martin, A., Newcomb, D., and Tran, N. (2017), "Long-term ageing of asphalt mixtures", *Road Materials and Pavement Design* 18, pp. 2–27.
126. Yin, F., Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., and Epps Martin, A. (2017), "Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents", *Road Materials and Pavement Design* 18, pp. 273–292.
127. Yin, F., West, R. (2021), *Balanced mix design resource guide*, National Asphalt Paving Association, US.
128. Yu, X., Zaumanis, M., Dos Santos, S., and Poulidakos, L. D. (2014), "Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders", *Fuel* 135, pp. 162–171.
129. Zadshir, M., Oldham, D. J., Hosseinezhad, S., and Fini, E. H. (2018), "Investigating bio-rejuvenation mechanisms in asphalt binder via laboratory experiments and molecular dynamics simulation", *Construction and Building Materials* 190, pp. 392–402.
130. Zaumanis, M., Arraigada, M., Wyss, S. A., Zeyer, K., Cavalli, M. C., and Poulidakos, L. D. (2019), "Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator", *Journal of Cleaner Production* 237, 117679.
131. Zaumanis, M., and Mallick, R. B. (2014), "Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art", *International Journal of Pavement*

- Engineering* 16, pp. 39–55.
132. Zaumanis, M., Mallick, R. B., and Frank, R. (2014), "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis, Resources", *Conservation and Recycling* 92, pp. 230–245.
  133. Zaumanis, M., Mallick, R. B., and Frank, R. (2014), "Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications", *Construction and Building Materials* 69, pp. 159–166.
  134. Zaumanis, M., Mallick, R. B., and Frank, R. (2016), "100% Hot mix asphalt recycling: Challenges and benefits", *Transportation Research Procedia* 14, pp. 3493–3502.
  135. Zaumanis, M., Mallick, R., and Frank, R. (2013), "Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures", *Journal of the Transportation Research Board* 2370, pp. 17–25.
  136. Zaumanis, M., Poulikakos, L. D., and Partl, M. N. (2018), "Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters", *Material Designs* 141, pp. 185–201.
  137. Zhang, J., Guo, C., Chen, T., Zhang, W., Yao, K., Fan, C., et al. (2021), "Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators", *Construction and Building Materials* 269, 121337.
  138. Zhang, R., Sias, J. E., and Dave, E. V., "Correlating laboratory conditioning with field aging for asphalt using rheological parameters", *Journal of the Transportation Research Board* 2674, pp. 393–404.
  139. Zhang, Y., and Bahia, H. U. (2021), "Effects of recycling agents (RAs) on rutting resistance and moisture susceptibility of mixtures with high RAP/RAS content", *Construction and Building Materials* 270, 121369.
  140. Zhang, Y., Swiertz, D., and Bahia, H. U. (2021), "Use of blended binder tests to estimate performance of mixtures with high reclaimed asphalt pavement/recycled asphalt shingles content", *Journal of the Transportation Research Board* 2675, pp. 281–293.
  141. Zhou, F., Hu, S., and Das, G. (2011), *High RAP mixes design methodology with balanced performance*, FHWA/TX-11/0-6092-2, Texas A&M Transportation Institute.
  142. Zhou, F., Hu, S., and Newcomb, D. (2020), "Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests", *Construction and Building Materials* 261, 120549.
  143. Zhou, F., Karki, P., and Hu, S. (2019), *Rejuvenator laboratory characterization and field performance*, FHWA/TX-19/5-6614-01-R1, Texas A&M Transportation Institute.
  144. Zhou, F., Newcomb, D., Gurganus, C., Banhashemrad, S., Park, E. S., Sakhaeifar, M., et al. (2016), *Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures: An Experimental Design*, Proj. No. 9-57, Texas A&M Transportation Institute.
  145. <https://www.aashtoware.org/>, (n.d.).

## ТÀI LIỆU TIẾNG NGA

146. ГОСТ Р 59118.1–2020. *Дороги автомобильные общего пользования. Переработанный асфальтобетон (RAP). Технические условия*. Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2020.
147. ГОСТ Р 59118.2–2020. *Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные горячие. Метод проектирования составов с использованием переработанного асфальтобетона (RAP)*. Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2020.