

การปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยยางธรรมชาติสำหรับงานทาง

**MODIFICATION OF ASPHALT CEMENT BY NATURAL RUBBER FOR
PAVEMENT CONSTRUCTION**

จรัสศรี พันธุ์ไม้

JARASSRE PHANMAI

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์**

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-775-2

การปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยยางธรรมชาติสำหรับงานทาง

**MODIFICATION OF ASPHALT CEMENT BY NATURAL RUBBER FOR
PAVEMENT CONSTRUCTION**

จรัสศรี พันธุ์ไม้

JARASSRE PHANMAI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 44025
วัน, เดือน, ปี 22 มี.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648775-2

**MODIFICATION OF ASPHALT CEMENT BY NATURAL RUBBER FOR
PAVEMENT CONSTRUCTION**

JARASSRE PHANMAI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-648-775-2

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยยางธรรมชาติสำหรับงานทาง |
| นักศึกษา | นางสาว จรัสศรี พันธุ์ไม้ |
| รหัสประจำตัว | 42065101 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีพอลิเมอร์ |
| พ.ศ. | 2545 |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | ผศ.ดร. อธิพิณ แจ่มชัด |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา การนำยางธรรมชาติในรูปยางแผ่นรมควันใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยสำหรับงานสร้างผิวทาง จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศและเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของถนนยางมะตอย เช่น สมบัติยึดหยุ่น ลดการแตกร้าว และเพิ่มอายุการใช้งานของผิวถนน โดยศึกษาปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย ได้แก่ ปริมาณการใส่ยางธรรมชาติในยางมะตอย ผลของสารเชื่อมโยงกำมะถัน ผลของสารเติมแต่งบางชนิด เป็นต้น การปรับปรุงยางมะตอยด้วยยางธรรมชาติในงานวิจัยนี้ ทำได้โดยการนำยางแผ่นรมควันมาบดคั้นด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วผสมกับยางมะตอยด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง (High shear mixer) ที่มีความเร็วประมาณ 5000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ยางแผ่นรมควันบวมตัวในยางมะตอย และบ่มที่ 120 °C เป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำมาผสมอีกครั้งด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง ที่อุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆของยางมะตอยผสมยางธรรมชาติพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง จะทำให้ยางมะตอยแข็งขึ้น มีจุดอ่อนตัว (Softening point) สูงสุดที่ใช้ปริมาณยางแผ่นรมควัน 6 % ค่า Penetration index และค่า Toughness-Tenacity ที่สูงขึ้น โดยปริมาณยางแผ่นรมควันที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยคือ 6 % โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาศึกษาผลของสารเชื่อมโยงพบว่า ยางมะตอยที่ได้จะอ่อนตัวลง ค่าจุดอ่อนตัว ค่า Penetration index และค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) จะมีค่าต่ำกว่าการใช้ยางแผ่นรมควันที่ไม่ใช้สารเชื่อมโยง นอกจากนี้เมื่อนำมาศึกษาผลของการใช้สารช่วยการกระจายตัว (กรดออกซาลิก) และผลของการใช้สารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerator) ได้แก่ TMTD และ MBT พบว่า จะทำให้สมบัติต่างๆ เช่น จุดอ่อนตัว และค่าการคืนตัวกลับสูงขึ้นเล็กน้อยเทียบกับยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยไม่ใช้สารช่วยการกระจายตัวและสารเร่งการเชื่อมโยง

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis Title | Modification of Asphalt Cement by Natural Rubber for Pavement Construction |
| Student | Miss Jarassre Phanmai |
| Student ID. | 42065101 |
| Degree | Master of Science |
| Program | Polymer Technology |
| Year | 2002 |
| Thesis advisor | Asst. Prof. Dr. Ittipol Jangchud |

ABSTRACT

This research work involved a study of property modification of asphalt cement (AC) by using natural rubber (NR) in a form of ribbed smoke sheet (RSS). The objectives of this work were to increase domestic NR demand and to improve asphalt properties, such as flexibility, cracking and aging resistance. Several factors affecting asphalt properties were investigated including % rubber loading, effects of a vulcanizing agent (sulfur), and rubber additives, etc. First, the rubber was masticated on a two-roll mill at 70 °C for 30 minutes then cut into small pieces. It was then mixed with asphalt cement by a high shear mixer at 5000 rpm at 150-170 °C for 2 hours. The modified asphalt was swelled in asphalt cement and cured in an oven at 120 °C for 1 day and then mixed again by the high shear mixer at 150-170 °C for 1 hour. It was found that the rubber modified the asphalt was harder than the unmodified asphalt. The softening point of the modified asphalt had a maximum point at 6 % rubber loading. The penetration index and toughness-tenacity of the rubber modified asphalt were found to increase as % rubber loading increased. An optimum % RSS loading was 6 %. By adding sulfur vulcanizing agent, it was revealed that the cured-rubber modified asphalt had lower penetration, softening point, penetration index and torsional recovery compared to those of the uncured-rubber modified asphalt. By adding a dispersing agent (oxalic acid) and accelerator (TMTD and MBT) it was found that the modified asphalt showed an insignificant improvement in properties such as softening point and torsional recovery.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนแล้วเสร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณทัศนีย์ สุวรรณมงคล ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่ได้สละเวลาในการอ่านและให้คำแนะนำ แก่ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณประพจน์ อีสริยะกุล ผู้อำนวยการสายปฏิบัติการ คุณยุทธพงศ์ ศักดิ์อมรชัย คุณวิจิต นิมา เจ้าหน้าที่ฝ่ายควบคุมคุณภาพโรงงานสูงเนิน และบริษัททิปโก้ แอสฟัลต์จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนเอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ คุณไกรศรี ดวงพัตรา บริษัท BAMCO Ltd. ที่กรุณาคำแนะนำและข้อมูลเกี่ยวกับยางมะตอย

ขอขอบพระคุณ คุณนพรัตน์ วิชิตชลชัย นักวิทยาศาสตร์ส่วนอุตสาหกรรม และสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

ท้ายที่สุดผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องและเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

จรัสศรี พันธุ์ไม้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VI |
| สารบัญรูป..... | IX |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 4 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 4 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.2 ยางมะตอย (Asphalt หรือ Bitumen)..... | 8 |
| 2.2.1 องค์ประกอบของยางมะตอย..... | 9 |
| 2.2.2 น้ำมันดิบที่ใช้ในการผลิตยางมะตอย..... | 11 |
| 2.2.3 กระบวนการผลิตยางมะตอยในอุตสาหกรรม..... | 12 |
| 2.2.4 ยางมะตอยสำหรับงานก่อสร้างผิวจราจร..... | 13 |
| 2.2.5 การทดสอบสมบัติยางมะตอย..... | 15 |
| 2.3 ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์..... | 20 |
| 2.4 ยางธรรมชาติ..... | 25 |
| 2.4.1 สมบัติของยาง..... | 27 |
| 2.4.2 การเชื่อมโยงในยาง..... | 28 |
| 2.4.3 สารเร่งการเชื่อมโยง..... | 28 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 30 |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 30 |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 31 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง..... | 31 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล..... | 34 |
| 4.1 การศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่น รมควันที่อยู่ในรูปสารละลาย..... | 34 |
| 4.2 การศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่น รมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 35 |
| 4.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์..... | 35 |
| 4.2.2 การทดสอบสมบัติต่างๆ..... | 41 |
| 4.3 การศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่น รมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 48 |
| 4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์..... | 48 |
| 4.3.2 การศึกษาสมบัติต่างๆ..... | 49 |
| 4.4 การศึกษาผลของสารช่วยการกระจายตัว (Oxalic acid) ที่มีต่อสมบัติ ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน..... | 55 |
| 4.4.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์..... | 56 |
| 4.4.2 การศึกษาสมบัติต่างๆ..... | 56 |
| 4.5 การศึกษาผลของสารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerator) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน..... | 61 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 66 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 68 |
| ภาคผนวก ก มาตรฐานยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์..... | 72 |
| ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบสมบัติยางมะตอย..... | 73 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 92 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 การทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภท เพนิเทรชัน | 16 |
| 2.2 อัตราเร็วและอุณหภูมิที่กำหนดในการยัดคั่ง..... | 17 |
| 2.3 แสดงค่าจุกวาบไฟด้วยเครื่องทดสอบแบบถ้วยเปิดคลิฟแลนด์ของวัสดุ ยางมะตอยจากแหล่งต่างๆ..... | 19 |
| 3.1 สมบัติยางมะตอย เกรด 60/70..... | 30 |
| 4.1 ค่าเพนิเทรชันของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อม โยง ด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อม โยงที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 62 |
| 4.2 ค่าจุกอ่อนตัวของยางมะตอยที่เชื่อม โยงด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อม โยง ด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อม โยงที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 62 |
| 4.3 ค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน ที่เชื่อม โยงด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อม โยงที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 63 |
| 4.4 ค่าการยัดคั่งของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อม โยง ด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อม โยงที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 63 |
| 4.5 ค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน ที่เชื่อม โยงด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อม โยงที่อัตราส่วนต่างๆ... .. | 63 |
| 4.6 ค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน ที่เชื่อม โยงด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อม โยงที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 64 |
| 4.7 ค่า Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน ที่เชื่อม โยงด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อม โยงที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 64 |
| ก-1 มาตรฐานยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์..... | 72 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ผิวทางมียางเยิ้ม (Bleeding)..... | 2 |
| 1.2 ผิวทางเกิดร่องล้อ (Rutting)..... | 2 |
| 1.3 ผิวทางแตกร้าว (Crack)..... | 3 |
| 2.1 โครงสร้างของแอสฟัลต์..... | 11 |
| 2.2 เครื่องเพนิโทรมิเตอร์ (Penetrometer)..... | 17 |
| 2.3 เครื่องทดสอบการยืดดึง (Ductility machine)..... | 18 |
| 2.4 เครื่องทดสอบจุดความไฟแบบถ้วยเปิดคลีฟแลนด์ (Cleveland open cup)..... | 19 |
| 2.5 การทดสอบค่าจุดอ่อนตัว..... | 21 |
| 2.6 อุปกรณ์ทดสอบค่าการคืนตัวกลับ..... | 23 |
| 2.7 การทดสอบ Toughness-Tenacity (without elastomer)..... | 24 |
| 2.8 การทดสอบ Toughness-Tenacity (with elastomer)..... | 24 |
| 2.9 กราฟแสดงค่า Toughness-Tenacity ของยางมะตอย..... | 25 |
| 2.10 โครงสร้างแบบ cis 1,4 polyisoprene..... | 25 |
| 4.1 สัณฐานวิทยาของยางมะตอย AC 60/70 (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)..... | 36 |
| 4.2 สัณฐานวิทยาของยางมะตอย AC 60/70 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง 2 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)..... | 36 |
| 4.3 สัณฐานวิทยาของยางมะตอย AC 60/70 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง 4 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)..... | 37 |
| 4.4 สัณฐานวิทยาของยางมะตอย AC 60/70 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง 6 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)..... | 37 |
| 4.5 สัณฐานวิทยาของยางมะตอย AC 60/70 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง 8 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)..... | 38 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 4.6 | สัณฐานวิทยาของยางมะตอย AC 60/70 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย ยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า).....38 |
| 4.7 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าความหนืดของ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ที่อุณหภูมิ 135 °C.....40 |
| 4.8 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าความหนืดของ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ที่อุณหภูมิ 165 °C.....40 |
| 4.9 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าเพนิเทรชันของ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง.....42 |
| 4.10 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าจุกอ่อนตัวของ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง.....42 |
| 4.11 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง.....44 |
| 4.12 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าการยึดดึงของ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง.....45 |
| 4.13 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าการคืนตัวกลับ ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง.....46 |
| 4.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่า Toughness ของ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง.....47 |
| 4.15 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่า Tenacity ของ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง.....47 |
| 4.16 | สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อม โยงด้วยกำมะถัน 5, 6, 8 และ 10 phr ปริมาณ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย.....49 |
| 4.17 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าเพนิเทรชันของยางมะตอยที่ ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ปริมาณ 6 % ต่อ น้ำหนักยางมะตอย.....50 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าจุดอ่อนตัวของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ปริมาณ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย..... | 51 |
| 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ปริมาณ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย..... | 51 |
| 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าการยืดดึงของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ปริมาณ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย..... | 52 |
| 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ปริมาณ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย..... | 53 |
| 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ปริมาณ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย..... | 54 |
| 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่า Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ปริมาณ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย..... | 54 |
| 4.24 สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย ที่ใช้สารช่วยกระจายตัว และไม่ใช่สารช่วยกระจายตัว..... | 57 |
| 4.25 ค่าเพนิเทรชันของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง เปรียบเทียบระหว่างการใส่สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช่สารช่วยกระจายตัว..... | 58 |
| 4.26 ค่าจุดอ่อนตัวของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง เปรียบเทียบระหว่างการใส่สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช่สารช่วยกระจายตัว..... | 58 |
| 4.27 ค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงเปรียบเทียบระหว่างการใส่สารช่วยกระจายตัว และไม่ใช่สารช่วยกระจายตัว..... | 59 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 4.28 | ค่าการยึดดึงของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว.....59 |
| 4.29 | ค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว.....59 |
| 4.30 | ค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว.....60 |
| 4.31 | ค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว.....60 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก[1] ในปี พ.ศ.2544 มีปริมาณการผลิตยางทั้งหมดประมาณ 2.3 ล้านตัน ส่งออกในรูปวัตถุดิบประมาณ 1.8 ล้านตัน (คิดเป็นปริมาณร้อยละ 90 ของผลผลิตทั้งหมด) คิดเป็นมูลค่าประมาณ 55,000 ล้านบาท ใช้ในประเทศประมาณ 0.18 ล้านตัน (ร้อยละ 10 ของผลผลิตทั้งหมด) ที่เหลือส่งออกในรูปผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งมีมูลค่าประมาณ 35,000 ล้านบาท ผลิตภัณฑ์ยางที่บริโภคยางธรรมชาติมากที่สุดคือ ยางรถยนต์ (ประมาณร้อยละ 10 ของผลผลิตยางธรรมชาติทั้งหมด) จึงจัดว่ายางเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของประเทศไทย

อย่างไรก็ดี ประเทศไทยเผชิญปัญหาการผลิตยางธรรมชาติในปัจจุบัน เนื่องจากมีการเพิ่มพื้นที่ปลูกเป็นจำนวนมากและจากสถานการณ์ปัญหาเศรษฐกิจของประเทศต่างๆที่เกิดขึ้น ทำให้ความต้องการบริโภคยางธรรมชาติของโลกลดลง ทำให้ปริมาณการผลิตมากเกินความต้องการของตลาด นอกจากนี้ยังมีปัญหาการตลาด การแข่งขันการส่งออกยางกับประเทศคู่แข่งและปัญหาราคายางตกต่ำ ฯลฯ

ปัจจุบัน การขนส่งทางบกเพิ่มขึ้นอย่างมาก มีการขยายถนนและเพิ่มเส้นทางการขนส่งเพื่อกระจายความเจริญไปสู่ชนบทเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งตลอดเวลาที่ผ่านมาในอดีตปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกยังไม่สูงเท่าทุกวันนี้ ผิวทางที่ใช้ยางมะตอยธรรมดาเป็นส่วนผสมจึงไม่มีปัญหาอะไรมากนัก แต่ในปัจจุบันนี้ถนนสายหลักๆภายในประเทศมีการจราจรและน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นมาก การใช้ยางมะตอยธรรมดาเป็นส่วนผสมของผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) จึงเริ่มมีปัญหาขึ้น เพราะผิวทางจะชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติมาก ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทางสูงขึ้นมาก ซึ่งลักษณะความเสียหายของผิวทาง [2] ที่พบเป็นดังนี้

1. ผิวทางมียางแฉิม (Bleeding) เป็นปรากฏการณ์ที่ยางมะตอยในผิวทาง Asphalt Concrete ขึ้นมารวมกันที่ผิวหน้า เมื่อแฉคร้อนจะไหลแฉิม ทำให้ผิวทางลื่น เกิดเนื่องจากยางมะตอยมีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) เร็วมาก



รูปที่ 1.1 ผิวทางมียางแฉิม (Bleeding)

2. ผิวทางเกิดร่องล้อ (Rutting) คือปรากฏการณ์ที่ผิวทาง Asphalt Concrete ยุบตัวเป็นร่องตามแนวล้อที่รถแล่นทับ ส่วนมากมักจะเกิดขึ้นหลังจากที่ผิวทางมียางแฉิมเกิดขึ้นที่ผิวสาเหตุเกิดจากผิวทางไม่มั่นคงแข็งแรงพอ จึงเกิดการยุบตัวและผิวทางขาดคุณสมบัติการยืดหยุ่น (Elastic) ทำให้เมื่อเกิดการยุบตัวแล้วไม่กลับคืน



รูปที่ 1.2 ผิวทางเกิดร่องล้อ (Rutting)

3. ผิวทางแตกร้าว (Crack) มีสาเหตุมาจากผิวทางมีสภาพแข็งเปราะ ขาดความยืดหยุ่น เมื่อมีน้ำหนักรถกระทำซ้ำซาก (Repeated load) ผิวทางจะล้า (Fatigue) ทำให้เกิดรอยแตกร้าว ที่เรียกกันว่า Fatigue crack



รูปที่ 1.3 ผิวทางแตกร้าว (Crack)

4. ผิวทางมีผิวหน้าหลุดเป็นข้าวตัง (Raveling) เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อน เพราะวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของผิวทาง Asphalt Concrete ถูกแรงเสียดทานจากล้อรถตะกุดจนหลุดออก ทำให้ผิวทางมีลักษณะหยาบขรุขระมีหินใหญ่โผล่ ดังนั้นการจะแก้ไขปัญหาผิวทาง Asphalt Concrete โดยเฉพาะถนนสายที่มีปริมาณรถบรรทุกสูง จำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพยางมะตอย ซึ่งเป็นตัวประสาน (Binder) ให้มีสมบัติ ดังนี้

- เพิ่มความหนืด (Viscosity)
- ลดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility)
- เพิ่มจุดอ่อนตัว (Softening point)
- เพิ่มความยืดหยุ่น (Elasticity)
- เพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)
- เพิ่ม Aging Resistance

ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงคุณภาพยางมะตอย เพื่อให้มีสมบัติดังกล่าว ด้วยวิธีการต่างๆ มากมาย วิธีหนึ่งที่นิยม คือ การใช้พอลิเมอร์ (Polymers) ผสมลงในยางมะตอย ซึ่งเรียกว่า “ Polymer Modified Asphalt” หรือที่เรียกชื่อย่อว่า PMA ซึ่งการนำพอลิเมอร์มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยนั้น ได้มีการทำกันอย่างกว้างขวางในหลายประเทศทางยุโรปและอเมริกา สำหรับประเทศไทยก็มีการนำยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ (PMA) มาใช้กับถนนสายที่มีการจราจรหนาแน่นบ้างแล้ว แต่ก็เป็นการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น สไตรีนบิวตะไดอีนสไตรีน (Styrene Butadiene Styrene, SBS) เป็นต้น ในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอย

งานวิจัยนี้เสนอที่จะนำเอายางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ที่อยู่ในรูปยางแท่ง คือ ยางแผ่นดิบหรือยางแผ่นรมควัน (Rubber smoke sheet, RSS) มาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอย โดยอาศัยสมบัติบางประการที่เป็นข้อดีของยางธรรมชาติ เช่น ความคงตัวสูง

(Stability), ความยืดหยุ่นดี (Elasticity) และทนความล้าดี (Fatigue resistance) มาเป็นตัวเสริมสมบัติของยางมะตอย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติแบบยางแห้ง
2. ศึกษาอัตราส่วนผสมของยางมะตอยและยางธรรมชาติที่เหมาะสมรวมทั้งสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆ ที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาข้อกำหนดมาตรฐานและลักษณะการใช้งานของยางมะตอยและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการและสภาวะการเตรียมยางธรรมชาติผสมยางมะตอยเพื่อให้ได้สมบัติตามข้อกำหนด
3. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอยกับยางธรรมชาติรวมทั้งสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ได้แก่ สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) และสารช่วยการกระจายตัว (Dispersing agent) ฯลฯ ที่ช่วยในการผสมและทำให้สมบัติต่างๆดีขึ้น
4. ศึกษาสมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติโดยยางธรรมชาติ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัมฐานวิทยา ฯลฯ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ยางธรรมชาติปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยเพื่อใช้คอกาปูการใช้งานและมีสมบัติต่างๆดีขึ้น
2. สามารถเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศและเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิต ทศนกุล และคณะ [3] โดยความร่วมมือระหว่างแขวงทางหลวงสงขลาและสถานีทดลองยางคองหงส์ ได้ทดลองทำยางมาสเตอร์แบตช์ (Masterbatch) ซึ่งเป็นการผสมระหว่างยางเครพดำกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) ในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง โดยบดยางธรรมชาติให้ نرم ก่อนเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ริดเป็นแผ่นไว้ใช้งาน ต้มแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้ละลาย (อุณหภูมิไม่ควรเกิน 190°C) จนสมบูรณ์ แล้วเติมยางพาราที่ผสมอยู่ในรูปของมาสเตอร์แบตช์ ด้วยอัตราส่วน 5 % ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งหมด ทดลองลาดถนนสายหาดใหญ่-สงขลา (ส่วนที่ตรง) กิโลเมตรที่ 16 เป็นระยะทาง 100 เมตร ผลการทดลองพบว่ายางพาราช่วยเสริมความแข็งแรงให้ถนน มวลสารเกาะกันดี ผิวถนนไม่เยิ้มเหนียวเหมือนใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ได้มีการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยทดลองลาดถนนสายหาดใหญ่-สงขลา (ส่วนที่โค้ง) ที่หลักกิโลเมตรที่ 10.80-11.00 เป็นระยะทาง 200 เมตร

Rogge, D.F., Terrel, R.L. และ George, A.J. [4] ได้ปรับปรุงสมบัติของมะตอยสำหรับวิธีการผสมร้อน (Hot Mix Asphalt, HMA) โดยการใช้พอลิเมอร์ 3 ชนิดคือ เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) สไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene Butadiene, SB) และยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene Butadiene Rubber, SBR) เพื่อแก้ปัญหาการเสียดสภาพของผิวถนน โดยทำการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนามเพื่อเปรียบเทียบระหว่างยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์และยางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ ณ สภาวะที่มีค่าอุณหภูมิต่างๆ และค่าเฉลี่ยการจราจรประมาณ 5,000-8,000 คันต่อวัน พบว่าผิวถนนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ มีการหดตัวซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของผิวถนนน้อยกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ และในการทดสอบความล้า (Fatigue test) ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติจะมีความคงทนกว่า และผลของการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์มีค่า Toughness และค่า Tenacity สูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์

Fleckenstein, L.J., Mahboub, K. และ Allen, D.L. [5] ศึกษาการใช้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติในรัฐเคนตักกี ซึ่งผิวทางต้องรับน้ำหนักบรรทุกมาก เนื่องจากเป็นเมืองที่มีถ่านหิน พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ Resilient modulus สูงกว่าการใช้ยางมะตอยธรรมดา และมีความคงทนต่อการเกิดร่องล้อได้ดีกว่า เมื่อทำ Marshall stability test โดยพอลิเมอร์ที่นำมาปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยได้แก่ สไตรีนบิวตะไดอินโคพอลิเมอร์ (Styrenic Block Copolymer)

Serfass, J.P., Joly, A. และ Samanos, J. [6] ศึกษาการนำยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย สไตรีนบิวตะไดอินสไตรีน (SBS-modified asphalt) มาซ่อมผิวถนน (Surface dressing) โดยเปรียบเทียบระหว่างการผลิตร้อน (Hot mix asphalt) กับการผสมเย็น (ใช้กับ Emulsified binders) SBS เมื่อเติมลงในยางมะตอยจะช่วยปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย โดยจะลดความว่องไวต่ออุณหภูมิลง เพิ่มการยึดเกาะ (Cohesion) ของยางมะตอย เพิ่มความต้านทานการหลุดร่อนของหินผสม (Aggregates) แต่ในการผสมแบบร้อนจะมีค่าความหนืดมากซึ่งอาจจะทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน ความสามารถในการยึดติดกับหินผสมอาจลดน้อยลง เนื่องจากยางมะตอยจะเกาะกันเองทันทีที่เย็นตัวลง ในขณะที่การผสมแบบเย็นจะยึดเกาะกับหินผสมได้ดีกว่าและสะดวกในการใช้งานมากกว่า

Newcomb, D.E., Stroup-Gardiner, M. และ Epps, J.A. [7] ศึกษาการนำพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) ที่ทำให้เป็นเม็ดเล็กๆ และน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene butadiene latex) มาปรับปรุงสมบัติยางมะตอย โดยแบ่งงานวิจัยเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดสอบสมบัติ Resilient modulus ในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่า Resilient modulus ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิโอเลฟิน และน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน นอกจากนี้ยังพบว่าลำดับการผสมของหินผสมยางมะตอย และพอลิเมอร์ก็มีผลต่อค่า Resilient modulus ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาภาคสนามใน 5 บริเวณที่มีความแตกต่างทางสภาพอากาศ ใช้เวลา 5 ปีในการศึกษา พบว่าเมื่อใช้พอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยจะเพิ่มค่า Resilient modulus

Dhalaan, M.A., Balghunnain, F., Dhubaib, I.A. และ Noureldin, S.A. [8] ศึกษาการนำพอลิเมอร์มาปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย เพื่อลดการเสียหายของผิวทางเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในซาอุดีอาระเบีย โดยพอลิเมอร์ที่นำมาใช้มี 2 ชนิดคือ 7% พอลิเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งเมื่อนำมาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะเรียกว่า โนวอพัลท์ (Novophalt) ® และยางมะตอยที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์อีกชนิดจะเรียกว่า Styrelf ® ซึ่งเป็นการนำ 5 % สไตรีนบิวตะไดอินพอลิเมอร์ (Styrene butadiene polymer) ผสมลงไป ในยางมะตอย การทดสอบทำทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม โดยใช้เส้นทางที่รองรับน้ำหนักจากรถบรรทุกน้ำมัน ผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า เมื่อนำพอลิเมอร์มาปรับปรุงสมบัติยางมะตอย ค่าความแข็งกดหรือเพนิเทรชัน (Penetration) จะลดลง ค่าความหนืด (Viscosity) และจุดอ่อนตัว (Softening point) จะสูงขึ้น การทดสอบในภาคสนามพบว่า การเสียหายเนื่องจากการเกิดร่องล้อ (Rutting) พบน้อยมาก

Nair, N.R., Mathew, N.M., Thomas, S., Chatterjee, P. และ Siddiqui, M.A. [9] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยโดยใช้แผ่นยางรมควันที่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงด้วยการละลายยางแผ่นลงใน Fluxing oil เพื่อทำให้อยู่ในรูปสารละลาย (Liquid Natural Rubber, LNR) แล้วนำไปผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยการผสมแบบให้ความร้อน ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ 2 ชนิด คือ เกรดเพนิเทรชัน (Penetration grade) และ เกรดเป่า (Blown grade) และอีกปัจจัยหนึ่ง คือ อัตราส่วนที่ใช้ในการผสม สมบัติที่ใช้ในการทดสอบ คือ ค่าความแข็ง

กด (Penetration) ค่าการดึงยืด (Ductility) จุดอ่อนตัว (Softening point) และความหนืด (Viscosity) จากการศึกษพบว่า เมื่อมีการเติม LNR ลงไป ค่าการดึงยืดจะลดลง แต่ค่าจุดอ่อนตัวจะเพิ่มขึ้น

Narusawa, S., Kunisawa, S. และ Asao, M. [10] ศึกษาการปรับปรุงยางมะตอยโดยใช้เศษยาง (Flatbark rubber) ทำให้อยู่ในรูป Rubber-bitumen masterbatch โดยใช้อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางมะตอยเท่ากับ 80:20 นำมาบดผสมกันด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง ก่อนที่จะนำไปผสมแบบใช้ความร้อน ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา คือ การเติมกำมะถันเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้เติม จากการศึกษพบว่า การเติมซัลเฟอร์ในมาสเตอร์แบชก่อนจะนำไปผสมกับยางมะตอยแบบร้อน จะทำให้ค่าการดึงยืดสูงกว่าที่ไม่ได้เติม

Fernando, M.J., Nadarajah, M. [11] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยน้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) ชนิดต่างๆ คือ น้ำยางสด (Field latex) น้ำยางข้น (Concentrate latex) หางน้ำยาง (Skim latex) ด้วยวิธีการผสมแบบร้อน โดยการพ่นน้ำยางธรรมชาติลงในยางมะตอยที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 300-325 °C และมีการคนอย่างต่อเนื่องจนครบ 20 นาที หลังจากเติมน้ำยางธรรมชาติพบว่า ค่าความแข็งกจะลดลง และค่าจุดอ่อนตัวจะเพิ่มขึ้น

Choquet, F.S., และ Ista, E.J. [12] ศึกษายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA) โดยใช้พอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีนบิวตะไคอินสไตรีนบล็อกโคพอลิเมอร์ (Styrene Butadiene Styrene Block Copolymer, SBS) เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) และอะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic Polypropylene, APP) ในเชิงคุณภาพวิเคราะห์โดยใช้ Infrared Absorption Spectroscopy และปริมาณวิเคราะห์จากการคำนวณโดยใช้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law): $I_0/I = \epsilon \cdot l \cdot c$ พบว่าแถบดูดกลืนที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยมีดังนี้ คือ แถบดูดกลืนของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย SBS คือ 966 และ 698 cm^{-1} แถบการดูดกลืนของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย EVA คือ 1736 และ 1242 cm^{-1} ส่วนแถบการดูดกลืนของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย APP คือ 974 cm^{-1}

De Merlier, Jacqueline; Leveque, J. และ Curchod [13] ศึกษาการนำพอลิเมอร์ ประเภทอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) มาปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผสมคือ 1. พอลิเมอร์นั้นต้องสามารถบวมตัว (Swell) และกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ในยางมะตอย 2. พอลิเมอร์นั้นควรมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 600,000-900,000 3. พอลิเมอร์นั้นควรมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง 4. ปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยอาจใช้ได้ถึง 10 % ในกรณีของยางธรรมชาติ และพอลิไอโซพรีนสังเคราะห์ (Synthetic polyisoprene) ถึงแม้ว่าจะสามารถทำให้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติมีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง แต่ก็อาจจะเสียสภาพได้อย่างรวดเร็ว ถ้าการเก็บรักษาไม่เหมาะสม

Shelburne, T.E. และ Sheppe, R.L. [14] ศึกษาสภาพของผิวทางที่ใช้ยางมะตอยปรับปรุงสมบัติด้วยผงยางธรรมชาติ (Powdered natural rubber) ผงยางรีเคลม (Powdered reclaimed rubber) เปรียบเทียบกับผิวทางที่ใช้ยางมะตอยธรรมดา ซึ่งก่อสร้างโดยหน่วยงานการทางของรัฐเวอร์จิเนีย (Virginia Department of Highway) การศึกษาสภาพผิวทางทำโดยการสังเกตสภาพความเสียหาย (Visual observation) พบว่าผิวทางที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ มีความขรุขระและหลุดร่อนน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ดีต้องใช้เวลานานเป็นเวลาหลายปี จึงจะสามารถตัดสินถึงความแตกต่างระหว่างผิวทางที่ปรับปรุงสมบัติด้วยผงยางธรรมชาติกับผิวทางที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติ

Ista, E.J. และ Choquet, F.S. [15] ศึกษาปริมาณผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วที่อยู่ในผิวทางที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติแล้ว โดยการนำเอาผิวทางที่ตำแหน่งต่างๆ มาละลายในตัวทำละลายที่สามารถละลายยางมะตอยได้ หลังจากนั้นทำการปั่น (Centrifugation) และกรองเอายางและหินผสมออกมา เพื่อสกัดแยกยางออกจากหินผสมด้วยตัวทำละลายไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) พบว่าจากที่ผสมยางลงในยางมะตอย 18 % โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาสกัดจะพบยางในส่วนต่างๆ เป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 14 % โดยน้ำหนัก

2.2 ยางมะตอย (Asphalt หรือ Bitumen)

ยางมะตอย (Asphalt) [16] คือ วัสดุประสานชนิดหนึ่ง มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แหล่งที่มาของยางมะตอยมีอยู่ 2 แหล่งใหญ่ คือ แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และได้จากส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ ในปัจจุบันยางมะตอย เป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติที่สำคัญ 4 ประการ คือ

1. สมบัติในการยึดและประสาน (Cementing)
2. สมบัติในการป้องกันน้ำซึม (Water proofing)
3. สมบัติที่เปลี่ยนเป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง (Thermoplastic)
4. สมบัติในการทนกรดและด่างอ่อนๆ

ซึ่งสมบัติทั้ง 4 ข้อดังกล่าวข้างต้นทำให้ยางมะตอยถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น

- เป็นตัวประสานเพื่อการยึดเกาะ (Cementing and binding) วัสดุต่างๆ เช่นหินย่อยในการทำผิวจราจร
- ใช้สำหรับราดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ผิวหน้าของเขื่อนดิน เพื่อป้องกันน้ำซึมและป้องกันการกัดกร่อนของผิวดิน

- ในวงการอุตสาหกรรม ยางมะตอยได้ถูกนำไปใช้ในงานต่างๆมากมาย เช่น ทำสีกันสนิม ทำกระดาษป้องกันความชื้น ผสมกับทรายทำอิฐเพื่อการก่อสร้าง ทำสารพ่นได้ทั้งรถยนต์เพื่อเก็บเสียงและกันสนิม นอกจากนี้เบตเตอร์รถยนต์ที่ใช้กันอยู่ก็มีแอสฟัลต์เป็นส่วนผสมอยู่ด้วย

2.2.1 องค์ประกอบของยางมะตอย (Asphalt Composition)

ยางมะตอยถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงได้มีการผลิตยางมะตอยชนิดต่างๆมากมายเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะและสภาพของงานที่จะนำยางมะตอยไปใช้ ยางมะตอยบางชนิดจะนิ่มหรือเหลวในอุณหภูมิปกติ บางชนิดต้องให้ความร้อนถึง 90-150°C จึงจะเหลว บางชนิดต้องให้ความร้อนสูงถึง 200°C จึงจะเหลวพอที่จะนำไปใช้งานได้ และบางชนิดในอุณหภูมิปกติจะแข็งจนเปราะ จนสามารถบดให้เป็นผงละเอียดได้

องค์ประกอบหลักของยางมะตอยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

1. สารอิ่มตัว (Saturated)

ส่วนประกอบนี้จะเป็นสารจำพวกพาราฟิน (Paraffin materials) มีบางส่วนเป็นวงแหวนแนฟทานิก (Naphthenic ring) และมีบางส่วนเป็นสายโซ่ตรง (Long straight chains) ซึ่งส่วนนี้มีความเหนียวคล้ายจารบีไม่มีสี และสามารถตกผลึกได้ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300-2,000

2. สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic)

ส่วนประกอบนี้มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลดำของน้ำมันเหนียว จะมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) เชื่อมต่อกัน และประมาณ 25-30 % ของคาร์บอนจะอยู่ในโครงสร้างแบบอะโรมาติก มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300-2,000

3. สารอะโรมาติกแบบมีขั้ว (Polar aromatics)

ส่วนนี้จะประกอบด้วยหลายโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกเชื่อมต่อกัน (Condensed aromatic ring) (35-40 % ของคาร์บอน) ส่วนคาร์บอนอะตอมที่ยังเหลือจะเป็นโครงสร้างเป็นแนฟทานิก (Naphthenic) และพาราฟิน (Paraffin) ซึ่งทั้งสองชนิดนี้จะมีจำนวนไนโตรเจนและออกซิเจนขึ้นไปถึง 1 % และมีกำมะถันถึง 8 % นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบที่มีโครงสร้างที่มีขั้วไฟฟ้า (ประจุ) อยู่ด้วย เช่น หมูไฮดรอกซิล คาร์บอนิล และอะมิโน ซึ่งส่วนต่างๆเหล่านี้จะมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับ การละลายในตัวทำละลายนอร์มอล-เฮปเทน (n-Heptane) และสามารถแบ่งประเภทได้ตามความสามารถในการละลายได้ดังนี้

3.1 เรซิน (Resins)

เป็นส่วนที่เป็นของแข็งสีดำ จะอ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-5,000 และสัดส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) จะเป็น 1:1 ส่วนที่เป็นเรซินนี้สามารถละลายได้ใน n-Heptane

3.2 แอสฟัลทีน (Asphaltenes)

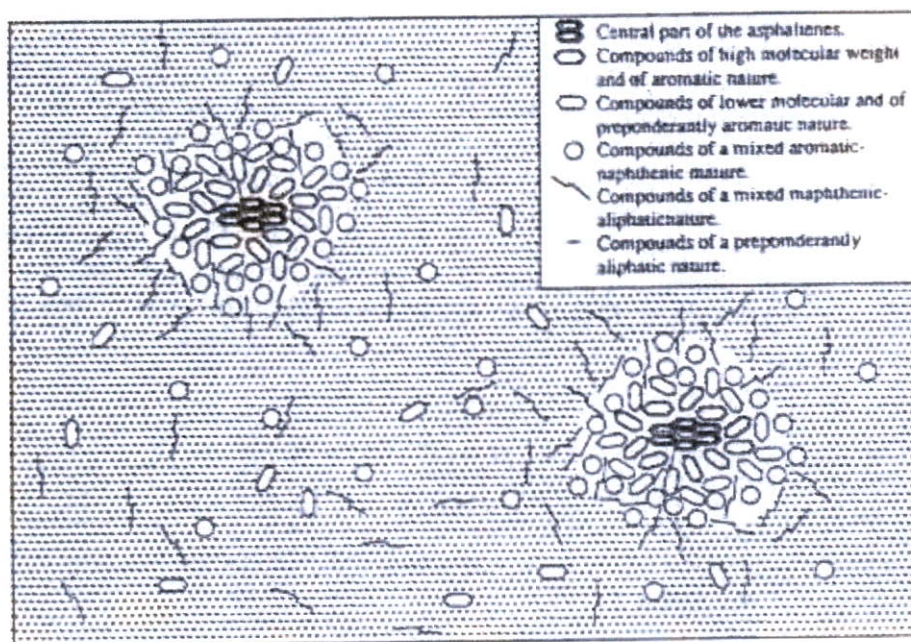
ส่วนนี้จะไม่ละลายใน n-Heptane มีสีเทาดำ และจะสลายตัวเมื่อถูกความร้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-100,000 และสัดส่วนอะตอมของ H/C เป็น 1:1

ส่วนประกอบที่เป็นสารอะโรมาติกแบบมีขั้ว จะเป็นส่วนที่เป็นคุณสมบัติที่แท้จริงของยางมะตอย กล่าวคือ เหนียวและยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัตินี้จะมีความเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับอุณหภูมิ การกระจายตัว และน้ำหนักโมเลกุลของสารอะโรมาติกแบบมีขั้ว ซึ่งจะขึ้นกับความสามารถในการละลายของสารอิ่มตัว (Saturated) และ สารอะโรมาติก (Aromatic)

ยางมะตอย (Asphalt) มีความหนาแน่น 1.01-1.04 g/cm³

มีองค์ประกอบของธาตุทางเคมี คือ

| | | |
|---|---|---------|
| C | = | 82-88 % |
| H | = | 8-11 % |
| S | = | 0-6 % |
| N | = | 0-1 % |
| O | = | 0-1.5 % |



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางมะตอย

2.2.2 น้ำมันดิบที่ใช้ในการผลิตยางมะตอย

ยางมะตอยเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมชนิดหนึ่ง ซึ่งผลิตจากน้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันดิบที่ได้มาจากแหล่งต่างๆทั่วโลกนั้น จะมีลักษณะและส่วนประกอบแตกต่างกันออกไปตามแหล่งที่มา สามารถแยกความแตกต่างที่เด่นชัดออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. Parafin Base Crude

คือ น้ำมันดิบชนิดที่เมื่อทำการแยกน้ำมันประเภทต่างๆ เช่น น้ำมันเบนซิน (Gasoline) น้ำมันก๊าด (Kerosine) น้ำมันดีเซล (Diesel oil) น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant oil) หรือน้ำมันเตาออกแล้ว ส่วนที่เหลือจะเป็น ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax)

2. Mixed Base Crude

คือ น้ำมันดิบชนิดที่หลังจากได้แยกเอาน้ำมันต่างๆ เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันหล่อลื่น หรือน้ำมันเตาออกแล้ว ส่วนที่เหลือจะมีพาราฟินปนกับยางมะตอย

3. Asphalt Base Crude

คือ น้ำมันดิบชนิดที่หลังจากแยกเอาน้ำมันต่างๆออกแล้ว ส่วนที่เหลือจะเป็นยางมะตอย

2.2.3 กระบวนการผลิตยางมะตอยในอุตสาหกรรม

การผลิตหรือการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมโดยทั่วไป จะมีวิธีการโดยย่อคือ น้ำมันดิบจากถังเก็บ จะได้รับความร้อนที่บริเวณท่อนำความร้อน (Tube heater) จนได้อุณหภูมิที่เหมาะสมแล้วไหลผ่านไปยังหอคอยสำหรับกลั่น (Tower distillation) ที่หอคอยนี้ความดันภายใน จะถูกลดลงจนเป็นสูญญากาศ ซึ่งจะทำให้ส่วนประกอบของน้ำมันดิบส่วนที่เบาหรือระเหยง่ายกว่าระเหยเป็นไอลอยตัวขึ้นไป โดยแยกตัวกันลอยเป็นชั้นๆตามความหนักเบา และไอเหล่านี้เมื่อถูกลดอุณหภูมิลง ก็จะควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวที่ระดับอุณหภูมิต่างๆกัน ซึ่งแยกชนิดออกเป็นประเภทใหญ่ๆ คือ Light distillate, Medium distillate, Heavy distillate ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการต่อไปก็จะได้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันเบนซิน (Gasoline) น้ำมันก๊าด (Kerosine) น้ำมันดีเซล (Diesel oil) เป็นต้น ส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Residual materials) ซึ่งเป็นส่วนที่ข้นและระเหยยากนั้นจะเหลืออยู่ที่ก้น ส่วนที่เหลือนี้จะเรียกว่า “Topped crude” ซึ่งอาจใช้เป็นน้ำมันเตาหรืออาจใช้ผลิตเป็นคัตแบ็กแอสฟัลต์ (Cutback asphalt) ชนิดแข็งตัวช้า (Slow curing) ซึ่งเป็นยางมะตอยเหลวโดยตรงได้ และถ้าทำให้ส่วนที่เป็นน้ำมันระเหยออกไปอย่างเหมาะสม โดยผ่านกระบวนการต่อไปที่แตกต่างกัน จะได้ยางมะตอยชนิดต่างๆ โดยส่วนที่เหลือจากการกลั่นนั้นยังมีลักษณะค่อนข้างเหลว เนื่องจากยังมีส่วนที่เป็นน้ำมัน (Oil constituents and other petroleum distillates) ต่างๆเหลืออยู่พอสมควร ถ้าน้ำมันเหล่านี้ถูกแยกออกไป ส่วนที่เหลือก็คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) ที่จะมีความข้น ความเหลว หรือความแข็ง ได้ตามความต้องการ โดยผ่านกระบวนการผลิตดังต่อไปนี้

1. กระบวนการ Vacuum Reduction

กระบวนการนี้แยกเอาน้ำมันต่างๆ ที่ยังเหลืออยู่โดยนำส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Topped crude) มากลับต่อไป โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 370°C พร้อมกับลดความดันในหอกลั่น น้ำมันต่างๆที่ยังหลงเหลือก็จะระเหยออกไป ซึ่งก็จะได้อย่างมะตอยชนิดที่เรียกว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) หรือที่เรียกย่อๆว่า AC ที่มี ความข้นเหลวหรือเกรด (Grade) ต่างๆ ตามความต้องการ

2. กระบวนการ Oxidation

ในกรณีที่ต้องการยางมะตอยชนิดที่มีความแข็งมากขึ้น จะต้องใช้วิธีการที่เรียกว่า Oxidation ซึ่งทำได้โดยนำเอา ส่วนที่เหลือจากการกลั่น หรือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่ยังไม่แข็งมาบรรจุในถังรูปทรงกระบอกที่อยู่แนวตั้ง และให้ความร้อนประมาณ 260°C ในขณะที่เดียวกันก็พ่นอากาศเข้าไปทางด้านล่าง ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นน้ำมัน (Oily constituents) ให้เปลี่ยนมาเป็นแอสฟัลต์เรซิน (Asphalt resins) และทำปฏิกิริยากันต่อให้เปลี่ยนเป็นแอสฟัลทีน (Asphaltenes) ซึ่งจะช่วยให้ยางมะตอยแข็งขึ้น เนื่องจากส่วนที่เป็นของเหลวได้แก่น้ำมันต่างๆจะลดลงไป และส่วนที่เป็นของ

แข็ง ซึ่งได้แก่ Asphaltic resins และ Asphaltenes กลับเพิ่มขึ้น ในกระบวนการนี้สามารถผลิตยางมะตอยที่แข็งมากหรือเกรดเป่า (Blown asphalt) ได้ และอาจผลิตยางมะตอยที่แข็งมากจนเปราะ และสามารถบดให้เป็นผงได้ด้วย

3. กระบวนการ Propane Precipitation

วิธีการนี้ใช้โพรเพนเหลว (Liquid propane) มาผสมกับส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Topped crude) โดยจะทำให้ส่วนที่แข็งของยางมะตอย ซึ่งได้แก่ Asphaltenes และบางส่วนของ Asphaltic resins และส่วนน้อยของส่วนที่เป็นน้ำมัน (Oily constituents) ตกตะกอนแยกตัวออกมา ยางมะตอยที่ได้จากวิธีนี้จะแข็งเกินไปกว่าที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนได้โดยตรง จำเป็นต้องนำไปผสมกับยางมะตอยที่เหลววกว่าก่อน

2.2.4 ยางมะตอยสำหรับงานก่อสร้างผิวจราจร (Paving Asphalt Materials)

ยางมะตอยที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวจราจรมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับวิธีการลดความหนืด ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของผิวทาง และสภาพดินฟ้าอากาศในแต่ละแห่ง ตลอดจนความเหมาะสมกับวิธีการนำไปใช้งาน จึงมีการจัดแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ 3 ประเภท คือ

- แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) เป็นการลดความหนืดโดยการให้ความร้อนโดยตรง
- คัทแบ็กแอสฟัลต์ (Cutback asphalt) เป็นการลดความหนืดโดยการผสมกับตัวทำละลาย (Solvent)
- แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt emulsion) เป็นการลดความหนืดโดยการผสมกับน้ำและสารเคมีที่ช่วยให้อนุภาคของยางมะตอยกระจายตัวหรืออิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier)

1. แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นยางมะตอยที่ใช้สำหรับงานสร้างผิวจราจรแบบแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) มีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ มีลักษณะครึ่งแข็งครึ่งอ่อนที่อุณหภูมิปกติ ในการนำไปใช้ต้องคัมให้เหลวก่อนที่อุณหภูมิประมาณ $90-150^{\circ}\text{C}$ มีเกรดต่างๆ ตั้งแต่อ่อนมากจนถึงแข็ง ซึ่งมีเกรดมาตรฐานอยู่ 5 เกรด คือ 40/50, 60/70, 85/100, 120/150 และ 200/300 ตัวเลขของเกรดจะแสดงความอ่อนแข็งของยางมะตอย ซึ่งได้จากการทดสอบด้วย Penetration test โดยตัวเลขของเกรดหรือเพนิเทรชันเกรด (Penetration grade) จะแสดงจำนวนหน่วยของระยะ (หนึ่งหน่วย = 0.1 มิลลิเมตร) ที่เข็มมาตรฐาน ซึ่งถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัม จมลงในยางมะตอยในระยะเวลา 5 นาที ในขณะที่ยางมะตอยมีอุณหภูมิอยู่ที่ 25°C ยางมะตอยที่แข็งจะมีค่าเพนิเทรชันเกรดที่ต่ำ เนื่องจากเข็มจมลงไปได้น้อย ส่วนยางมะตอยที่อ่อนจะมีค่าเพนิเทรชันเกรดที่สูง การที่ต้องมีการผลิตแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้มีหลายเกรดนั้นก็เพื่อให้สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานและสภาพดินฟ้าอากาศ เช่น ในภูมิประเทศที่มีอากาศร้อนควรใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่มีค่าเพนิเทรชันเกรดต่ำ เช่น

ประเทศไทยโดยทั่วไปใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่มีค่าเพนิเทรชันเกรด 60/70 แต่ถ้าเป็นประเทศที่มีอากาศเย็นอาจใช้ เกรด 120/150 หรือสูงกว่านั้น

2. คัดแบกแอสฟัลท์ (Cutback Asphalt)

คัดแบกแอสฟัลท์เป็นยางมะตอยเหลวที่ทำได้โดยผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) กับตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำมันต่างๆ เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล น้ำมันต่างๆที่ใช้เป็นตัวทำละลายจะเรียกว่า Diluent หรือ Cutter stock ยางมะตอยชนิดนี้จะมีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิปกติ ในการนำไปใช้งานทำผิวจราจร เมื่อทำการลาดผิวทางด้วยคัดแบกแอสฟัลท์แล้ว น้ำมันที่ผสมอยู่จะระเหยตัวไป คงเหลือแต่แอสฟัลต์ซีเมนต์

คัดแบกแอสฟัลท์ที่อุณหภูมิปกติจะมีลักษณะข้นจนกระทั่งเหลว โดยความข้นมากหรือน้อยจะขึ้นกับค่าเพนิเทรชันเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาเป็นส่วนผสมและชนิดของสารละลาย ตลอดจนสัดส่วนการผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลาย ยางมะตอยชนิดนี้ประเภทที่เหลวมากอาจนำไปใช้งานได้โดยตรงโดยไม่ต้องให้ความร้อน หรือให้เพียงเล็กน้อยก็พอสำหรับประเภทที่เหลวปานกลาง โดยปกติให้ความร้อนประมาณ 65-90°C ก็เพียงพอในการใช้งาน แต่ชนิดที่ข้นมากอาจจะต้องให้ความร้อนถึง 90-180°C

คัดแบกแอสฟัลท์แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (Setting) คือ

● Rapid Curing (RC)

คัดแบกแอสฟัลต์ชนิดนี้เป็นประเภทที่แข็งตัวเร็ว (Fast setting) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นส่วนผสมระหว่างน้ำมันเบนซิน (Gasoline) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ระเหยง่ายกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 หรือ 80/100 ยางมะตอยเหลวประเภทนี้โดยทั่วไปใช้ในงานก่อสร้างประเภท งานซ่อมแซมผิวทาง (Surface treatment), Penetration macadam และ Open grade paving mixtures

● Medium Curing (MC)

คัดแบกแอสฟัลต์ชนิดนี้ผลิตได้โดยการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 กับน้ำมันก๊าด (Kerosine) ดังนั้นยางมะตอยเหลวชนิดนี้จึงใช้เวลาในการแข็งตัวนานกว่าชนิด RC เนื่องจากน้ำมันก๊าดระเหยตัวได้ช้ากว่าน้ำมันเบนซิน มักใช้ในงานที่ต้องการใช้ระยะเวลาในการบ่มตัว (Curing) นาน เช่น การทำผิวทางแบบ Prime coat ทั้งนี้เพื่อให้ MC มีโอกาสซึมลงไปถึงฐานผิวทาง (Base course) ได้มาก หรือใช้ในการทำ Dense grade paving mixture

● Slow Curing (SC)

คัดแบกแอสฟัลต์ชนิดนี้ผลิตได้โดยผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 กับน้ำมันหนักเช่น น้ำมันดีเซล หรืออาจผลิตได้จากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง ยางมะตอยเหลวประเภทนี้มักนิยมเรียกว่า "Road oil" ยางมะตอยชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

3. แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion)

แอสฟัลต์อิมัลชันเป็นขางมะตอยเหลวชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์มาทำให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ (Colloidal particles) กระจายตัวอยู่ในน้ำที่มีอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ผสมอยู่เล็กน้อย

แอสฟัลต์อิมัลชันผลิตได้โดยการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิประมาณ 120°C ผสมกับน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 76°C และมีการใช้สารเคมีคือ อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ประมาณ 1-2 % เพื่อช่วยทำให้อนุภาคของแอสฟัลต์ซีเมนต์กระจายตัว น้ำและแอสฟัลต์ซีเมนต์จะถูกตีด้วยเครื่องตีที่เรียกว่า Colloidal mill ซึ่งจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายตัวอยู่ในน้ำ และจะคงอยู่สภาพนี้ได้ถาวร โดยทั่วไปแอสฟัลต์อิมัลชันจะประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณ 60-65 % ส่วนที่เหลือจะเป็นน้ำ การใช้อิมัลซิไฟเออร์ต่างชนิดกันและน้ำที่มีค่า pH ต่างกันก็จะทำให้ได้แอสฟัลต์อิมัลชันที่ต่างชนิดกัน คือ ถ้าให้อนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์กระจายตัวอยู่ในน้ำที่มีประจุลบ (น้ำที่ใช้ต้องมีค่า pH มากกว่า 7) จะเรียกว่า แอสฟัลต์อิมัลชันประจุลบ (Anionic Emulsified Asphalt) แต่ถ้าให้อนุภาคของแอสฟัลต์ซีเมนต์กระจายตัวอยู่ในน้ำที่มีประจุบวก (น้ำที่ใช้ต้องมีค่า pH น้อยกว่า 7) จะเรียกกางมะตอยเหลวชนิดนี้ว่า แอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวก (Cationic Emulsified Asphalt) โดยทั่วไปในงานก่อสร้างถนนในประเทศไทยมีการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกมากกว่าประจุลบ เนื่องจากหินที่ใช้ในการก่อสร้างนั้นส่วนใหญ่มักจะเป็นหินที่ผิวมีประจุเป็นลบ ซึ่งเป็นประจูดตรงข้ามกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดประจุบวก จึงทำให้สามารถจับตัวกันได้ดี เนื่องจากขางมะตอยเหลวชนิดนี้มีน้ำเป็นส่วนประกอบ จึงสามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงโดยไม่ต้องให้ความร้อนก่อน และสามารถทำงานในขณะที่หิน ทราช ขึ้นหรือเปียกได้

2.2.5 การทดสอบสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement Test)

การทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ [17] จะให้ความสำคัญกับลักษณะทางกายภาพ (Physical characteristic) ความบริสุทธิ์ (Purity) ความสามารถในการยึดติด (Adhesive) การระเหย (Volatility) และความสามารถในการติดไฟ (Flammability) เนื่องจากสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับความทนทาน (Durability) ความสม่ำเสมอ (Uniformity) และความปลอดภัย (Safety) ของวัสดุขางมะตอยในการใช้งาน

การทดสอบลักษณะโดยทั่วไป [18] โดยเบื้องต้นทำได้โดย การตรวจวิเคราะห์ แอสฟัลต์ซีเมนต์ต้องเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ (Homogeneous) และเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 175°C ต้องไม่เป็นฟอง ส่วนการทดสอบสมบัติอื่นๆ ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด เพนิเทรชัน เป็นตามตารางที่ 2.1

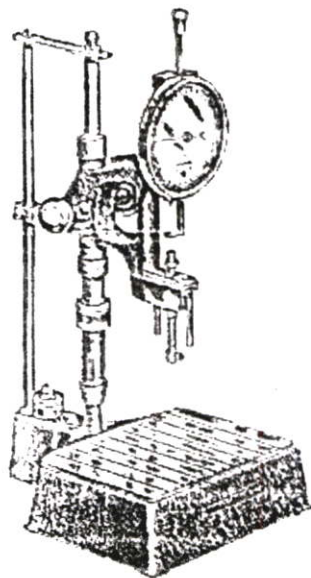
ตารางที่ 2.1 การทดสอบสมบัติแอสฟัลท์ซีเมนต์สำหรับงานทาง ประเภทเพนเทรชัน

| ลำดับที่ | สมบัติที่ทดสอบ | เกณฑ์ที่กำหนด | | | |
|---------------------|--|---------------|---------|----------|-----------|
| | | AC40/50 | AC60/70 | AC80/100 | AC120/150 |
| 1 | ค่าเพนเทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 °C น้ำหนักกด 100 กรัม เป็นเวลา 5 วินาที | 40-50 | 60-70 | 80-100 | 120-150 |
| 2 | จุดวาบไฟ (°C) ไม่น้อยกว่า | 232 | 232 | 232 | 232 |
| 3 | การยึคคิ่ง ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราเร็วของเครื่องคิ่ง 5 เซนติเมตร/นาที | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 4 | การละลายในไตรคลอโรเอทีลีน ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า | 99 | 99 | 99 | 99 |
| ภาคที่เหลือจากการอบ | | | | | |
| 5 | น้ำหนักที่สูญหายไปเมื่อให้ความร้อน ร้อยละโดย น้ำหนัก | 0.8 | 0.8 | 1 | 1.3 |
| 6 | เพนเทรชัน ร้อยละของเพนเทรชันเดิม ไม่น้อยกว่า | 58 | 54 | 50 | 46 |
| 7 | การยึคคิ่ง ที่อุณหภูมิ 25 °C อัตราเร็วของเครื่องคิ่ง 5 เซนติเมตร/นาที | - | 50 | 75 | 100 |

- เพนเทรชัน (Penetration)

เพนเทรชัน หมายถึง ความแข็งอ่อนของผลิตภัณฑ์ยางมะตอย วัดที่ความลึกของเข็มมาตรฐานหรือกรวยแหลมมาตรฐาน จมลึกลงในผลิตภัณฑ์ยางมะตอย ภายใต้ น้ำหนัก เวลา และอุณหภูมิที่กำหนด โดยถ้าไม่ได้มีการกำหนดเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ ให้ทดสอบที่ อุณหภูมิ 25 °C ใช้ น้ำหนักกด 100 กรัม เป็นเวลา 5 วินาที [19]

การทดสอบนี้จะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5 Test Method for Penetration Material [20] เป็นแนวทางในการทดสอบ โดยการทดสอบนี้จะมีค่าสำคัญมากในการนำมา พิจารณาเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ยางมะตอยให้เหมาะสมกับการใช้งาน



รูปที่ 2.2 เครื่องเพนิโตรมิเตอร์ (Penetrometer) [17]

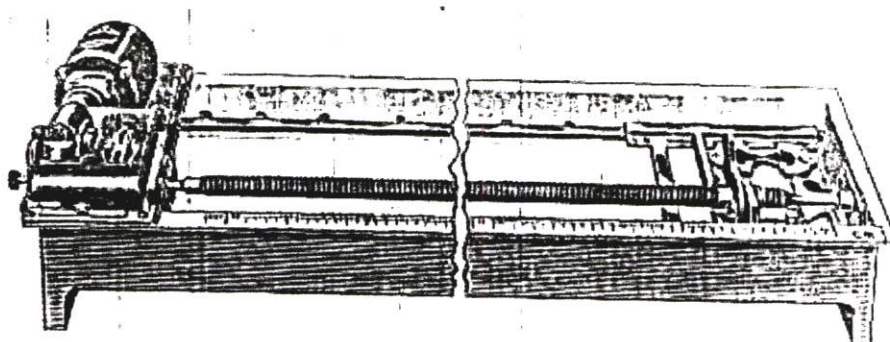
- การยืดดึง (Ductility)

การยืดดึง หมายถึง สมบัติของยางมะตอยเมื่อถูกดึงให้ยืด ในอัตราเร็วและอุณหภูมิที่กำหนด [21] ดังตารางที่ 2.2 วัดเป็นความยืดสูงสุดของชิ้นทดสอบมาตรฐานก่อนขาดออกจากกัน

ตารางที่ 2.2 อัตราเร็วและอุณหภูมิที่กำหนดในการยืดดึง ตามมาตรฐาน ASTM D 113 [22]

| อุณหภูมิ (Temperature) | อัตราการยืด (Rate of Elongation) |
|---------------------------|-------------------------------------|
| 77 °F (25 °C) | 5 cm/min |
| 77 °F (25 °C) | 60 cm/min |
| 60 °F (15.5 °C) | 5 cm/min |
| 39.2 °F (4 °C) | 1-5 cm/min |
| 32 °F (0 °C) | 1/4 - 1 cm/min |

การยืดดึงเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการประสาน และความยืดหยุ่น (Elasticity) มีความสำคัญในกรณีที่น่าวัสดุยางมะตอยไปใช้เป็นตัวประสาน (Binder) ในการทำผิวจราจรต่างๆ โดยทั่วไป แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการ Vacuum reduction จะมีค่าความยืดดึงค่อนข้างสูง ในขณะที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการ Oxidation หรือ Air-Blown จะมีค่าการยืดดึงที่ต่ำกว่า จากการศึกษาในอดีตพบว่า การใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่าการยืดดึง (Ductility) และค่าเพนิเทรชัน (Penetration) ที่ต่ำอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผิวทางแตกร้าว (Crack) ผิวทางมีผิวหน้าหลุดเป็นขี้วดัง (Raveling) หรือ ผิวทางหลุดแยกออกเป็นส่วนๆ (Disintegration) โดยการที่วัสดุยางมะตอยมีค่าการยืดดึงต่ำอาจจะมีสาเหตุมาจาก การใช้อุณหภูมิที่สูงมากระหว่างการเตรียมวัสดุยางมะตอยแบบผสมร้อน (Hot mixed) หรืออาจมาจากการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) เนื่องจากสภาพอากาศ (Weathering) และระยะเวลา (Aging) ในการเก็บรักษาวัสดุยางมะตอย



รูปที่ 2.3 เครื่องทดสอบการยืดดึง (Ductility Machine) [17]

- จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟ หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดของวัสดุยางมะตอยที่จะติดไฟ เมื่อมีเปลวไฟผ่าน ภายใต้ภาวะมาตรฐาน ส่วนจุดติดไฟ หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดของวัสดุยางมะตอยที่จะติดไฟ เมื่อมีเปลวไฟผ่าน และยังคงลุกไหม้ต่อไปเป็นเวลาอย่างน้อย 5 วินาที ภายใต้ภาวะมาตรฐาน [23]

การทดสอบจุดวาบไฟจะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 92 Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup [24] ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแบบถ้วยเปิดคลิฟแลนด์ (Cleveland Open Cup)



รูปที่ 2.4 เครื่องทดสอบแบบถ้วยเปิดคลีฟแลนด์ (Cleveland Open Cup) [17]

ตารางที่ 2.3 ค่าจุดวาบไฟ ด้วยเครื่องทดสอบแบบถ้วยเปิดคลีฟแลนด์ ของวัสดุยางมะตอย จากแหล่งต่างๆ [17]

| แหล่งน้ำมันดิบ (Crude Source) | กระบวนการผลิต (Refining Method) | เพนิตเรชัน ที่ 25 °C 100 กรัม 5 วินาที | จุดวาบไฟ (Flash Point) °C |
|----------------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|
| Mid-Continent | Air-Blown | 73 | 330 |
| Texas | Vacuum distillation | 66 | 299 |
| Venezuela | Steam; Vacuum | 66 | 282 |
| Colorado | Propane; Fluxing | 92 | 232 |
| Texas | Steam; Fluxing | 175 | 290 |

- การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (Solubility in Trichloroethylene)

การทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน ก็เพื่อวัดความบริสุทธิ์ (Purity) ของวัสดุยางมะตอย เนื่องจากในการผลิตยางมะตอยบางชนิดอาจจะมีการใส่สารตัวเติม (Fillers)

การทดสอบนี้จะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5546 Test Method for Solubility of Asphalt Material in Trichloroethylene [25] ซึ่งทำได้โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนเหลวพอที่ได้ โดยต้องไม่ให้ความร้อนสูงกว่าจุดอ่อนตัวเกิน 111 °C เติตัวอย่างประมาณ 2 กรัมลงในขวดรูปกรวย เติมไตรคลอโรเอทิลีนลงไปที่ล้นของจรรยา 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่าจนละลายหมด นำไปกรองด้วยเครื่องกรองที่ประกอบด้วย กูชกรูชิเบิล (Gooch Crucible) และกระดาษกรองใยแก้ววัตแมน ชนิดคุณภาพ 934 AH หรือเทียบเท่า

- การทดสอบผลของความร้อนและอากาศที่มีต่อสมบัติของวัสดุยางมะตอย

การทดสอบผลของความร้อนและอากาศที่มีต่อสมบัติของยางมะตอย จะใช้วิธีการทดสอบแบบ Thin Film Oven Test (TFO) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1754 Test Method for Effect of Heat and Air on Asphalt Materials (Thin-Film Oven Test) [26] การทดสอบนี้กำหนดขึ้นเพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุยางมะตอยขณะใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 150 °C ซึ่งแสดงด้วยการวัดน้ำหนักที่หายไป เพนิเทรชัน และการยึดดึง โดยที่น้ำหนักตัวอย่างของวัสดุยางมะตอยก่อนและหลังทำ Thin film oven ต้องแตกต่างกันไม่เกิน 0.5-1 % และค่าเพนิเทรชันต้องไม่ต่ำกว่า 60-75 % ของค่าเพนิเทรชันก่อนทำ Thin film oven ในส่วนของค่าการยึดดึงหลังทำ Thin film oven ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 50 จนถึง 100

2.3 ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA)

Polymer Modified Asphalt [27] คือ ยางมะตอยชนิดเพนิเทรชันเกรดที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ที่นำมาใช้จะมีอยู่ 3 กลุ่ม คือ

1. บล็อกโคพอลิเมอร์และเทอร์โมพลาสติก (Block Copolymer and Thermoplastics) โดยพอลิเมอร์กลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย สไตรีน (Styrene) อยู่ปลายบล็อก และบิวทาไดอิน (Butadiene) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายยาง (Rubbery) อยู่กลางบล็อก เช่น สไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene Butadiene, SB) สไตรีนบิวทาไดอินสไตรีน (Styrene Butadiene Styrene, SBS) สไตรีนเอทิลีนบิวเทิลีนสไตรีน (Styrene Ethylene Butylene Styrene, SEBS) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) เป็นต้น
2. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (Natural and Synthetic Rubbers) กลุ่มนี้จะประกอบด้วยยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ต่างๆ เช่น พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) พอลิบิวทาไดอิน (Polybutadiene) ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene Butadiene Rubber)
3. วัสดุต่างๆ เช่น เส้นใยต่างๆ (Fibers) ผงยางรถยนต์ (Ground tire) และสารที่ป้องกันการหลุดร่อน (Antistripping Agents)

การใช้พอลิเมอร์ผสมลงในยางมะตอยก็เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆดังนี้

- เพิ่มความหนืด (Viscosity)
- ลดความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature susceptibility)
- เพิ่มจุดอ่อนตัว (Softening point)
- เพิ่มความยืดหยุ่น (Elasticity)

- เพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)
- เพิ่มความทนทานต่อการใช้งาน (Aging resistance)

ซึ่งสมบัติต่างๆดังกล่าว สามารถตรวจได้ด้วยการทดสอบดังต่อไปนี้

1. การทดสอบค่าความหนืด (Viscosity) ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D4402 [28] โดยการใช้เครื่อง Thermal Brookfield ที่มีอัตราเฉือน (Shear rate) 18.6 รอบต่อวินาที ใช้เข็มเบอร์ 21 ที่อุณหภูมิ 135 °C และ 165 °C ซึ่งยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ จะมีค่าความหนืดสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ ซึ่งเมื่อนำมาทำผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) จะให้ความแข็งแรง รับน้ำหนักได้สูง และไม่เสียรูปร่าง (Deformation) ได้ง่าย
2. การทดสอบค่าจุดอ่อนตัว (Softening point)
จุดอ่อนตัว [29] หมายถึง อุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์ยางมะตอยอ่อนตัวถึงระดับที่กำหนด ภายใต้ภาวะทดสอบมาตรฐาน โดยการทดสอบจะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 36 Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring and Ball Apparatus) [30] เป็นแนวทางในการทดสอบ โดยปกติค่าจุดอ่อนตัวของยางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์จะมีค่าประมาณ 45-48 °C ซึ่งมีโอกาสที่ผิวทางเกิดยางเยิ้มง่าย ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์จะทำให้ค่าจุดอ่อนตัวสูงขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหา



รูปที่ 2.5 การทดสอบค่าจุดอ่อนตัว

3. การหาค่า Penetration Index (PI)

ค่า Penetration Index (PI) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุยางมะตอย หาได้จากการนำค่าเพนิเทรชัน (Penetration) และค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ก่อนอบมาคำนวณโดยสูตร

$$PI = 20U - 300V / U + 30V$$

$$U = \log 4 (T_s - T_p)$$

$$V = \log 800 - \log P_t$$

$$T_s = \text{อุณหภูมิที่เป็นค่าจุดอ่อนตัว (}^{\circ}\text{C)}$$

$$T_p = \text{อุณหภูมิที่ทดสอบค่าเพนิเทรชัน}$$

$$P_t = \text{ค่าเพนิเทรชันที่อุณหภูมิ } T_p$$

* การรายงานผลจะมีเครื่องหมาย + หรือ -

ค่า PI จะแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

- กลุ่มที่ค่า PI มากกว่า +1 จะเป็นยางมะตอยที่ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ
- กลุ่มที่ค่า PI น้อยกว่า -1 จะเป็นยางมะตอยที่ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้างสูง
- กลุ่มที่มีค่า PI อยู่ระหว่าง -1 และ +1 จะมีลักษณะกึ่งกลางระหว่าง 2 กลุ่มข้างต้น

4. การทดสอบการคืนตัวกลับ (Torsional recovery test) เป็นการทดสอบเพื่อดูความยืดหยุ่น (Elasticity) ของยางมะตอย การทดสอบนี้จะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 6084 Test method for Elastic Recovery of Bituminous Materials [31] เป็นแนวทางในการทดสอบ

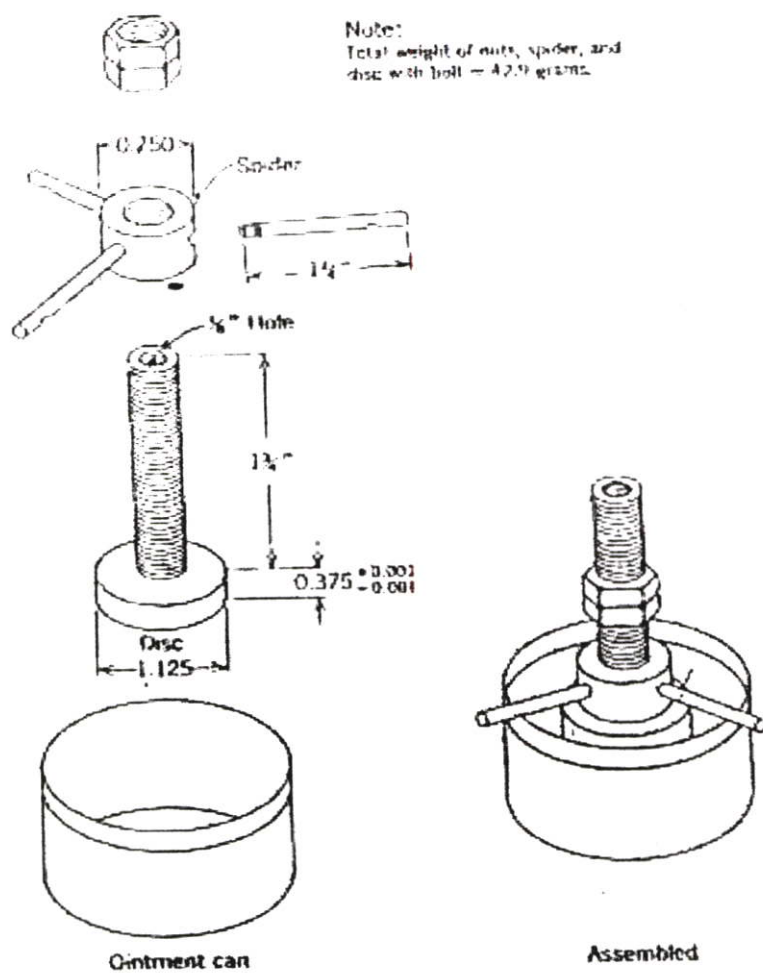
การทดสอบทำได้โดยการใช้ถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดแน่นอน ซึ่งมีตัวอย่างยางมะตอยอยู่เต็มในระดับที่วัดได้ โดยมีแกนโลหะทรงกระบอกอยู่กึ่งกลางตัวอย่าง จากนั้นวางปรับอุณหภูมิ เพื่อให้ได้อุณหภูมิกงที่ เมื่อบิดแกนโลหะทรงกระบอกไป 180 องศา จากตำแหน่งเดิมแล้วปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที วัดมุมที่หมุนกลับของแกนทรงกระบอก

- การรายงานผล รายงานเป็นองศาหมุนที่คืนกลับ เมื่อเทียบกับการหมุนไป 180 องศาในตอนแรก

$$R = L \times 100 / 180$$

$$R = \text{เปอร์เซ็นต์การคืนตัวกลับ โดยการบิด}$$

$$L = \text{มุมของการคืนตัวกลับ}$$

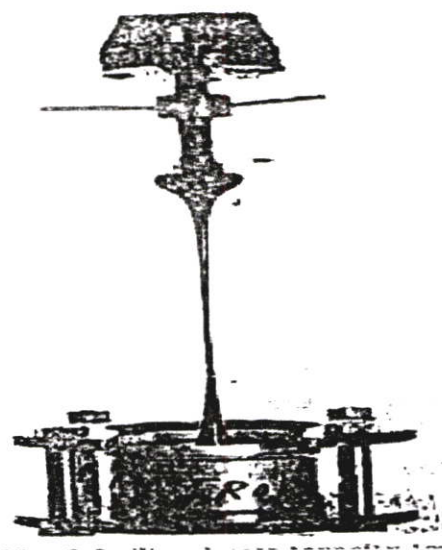


รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ทดสอบสมบัติการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) [17]

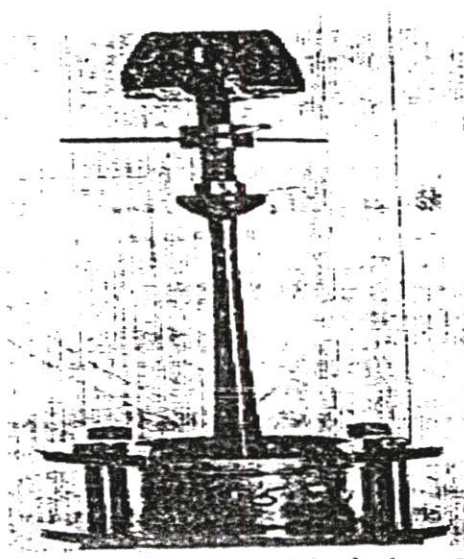
5. การทดสอบความเหนียวโดยใช้วิธี Toughness-Tenacity Test การทดสอบจะใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5801 [32] เป็นแนวทาง โดย

ค่า Toughness จะเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบขาดอย่างสมบูรณ์ภายใต้แรงเค้น หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงดึงกับระยะการดึงที่จุดแรงดึงสูงสุด (แสดงดังรูปที่ 2.9)

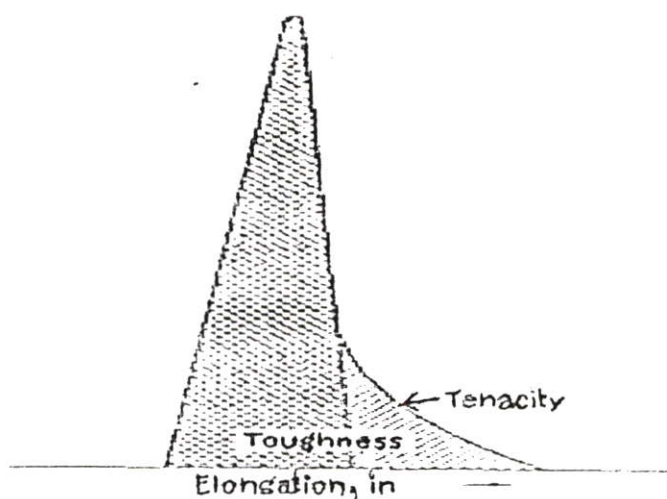
ค่า Tenacity จะเป็นค่าพลังงานที่กระทำจากจุดรับน้ำหนักสูงสุด จนกระทั่งตัวอย่างขาด หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงดึงกับระยะการดึงจากจุดแรงดึงสูงสุด จนถึงจุดขาด (แสดงดังรูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.7 การทดสอบ Toughness-Tenacity (without elastomer) [17]



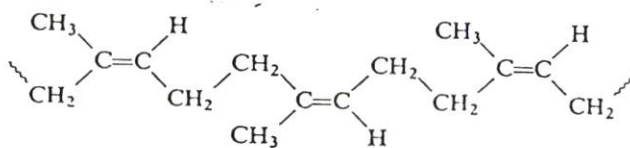
รูปที่ 2.8 การทดสอบ Toughness-Tenacity (with elastomer) [17]



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงค่า Toughness-Tenacity ของยางมะตอย

2.4 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ [33] เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ หรือที่เรียกว่าเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ มีชื่อเรียกทางเคมีว่า cis 1,4 polyisoprene มีสมบัติเด่นคือมีความยืดหยุ่น สามารถถูกยืดให้ยาวออกได้ตามแรงยืด และเมื่อปล่อยเป็นอิสระก็จะคืนกลับสภาพเดิม ปัจจุบันยางที่ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานผลิตภัณฑ์ยางได้มาจากพืชและการสังเคราะห์ของมนุษย์ โดยยางที่ได้มาจากพืชจะเรียกว่า ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ส่วนยางที่ได้จากการสังเคราะห์เรียกว่า ยางเทียมหรือยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างแบบ cis 1,4 polyisoprene

พืชที่ให้ยางธรรมชาติเป็นพืชยืนต้นขนาดใหญ่ มีชื่อเรียกว่า ยางพารา ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Hevea brasiliensis* เมื่อกรีดยางต้นจะให้ น้ำยางไหลออกมา มีสีขาวคล้ายน้ำมัน ซึ่งจะประกอบด้วยอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในน้ำ เมื่อเติมกรดหรือวางทิ้งไว้จนบูดเน่า ก็จะทำให้ยางจับตัวแยกส่วน

ออกจากกัน ยางที่จับตัวแล้วก็จะแปรรูปในลักษณะต่างๆ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

ยางธรรมชาติที่แปรรูปแล้ว ในประเทศไทยมีหลายชนิดด้วยกันดังนี้

1. ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoke Sheet, RSS)

มีผลผลิตประมาณร้อยละแปดสิบของยางทั่วประเทศ ส่วนใหญ่ได้จากการที่ชาวสวนทำให้น้ำยางสดจับตัวโดยการเติมกรด และนำยางที่จับตัวแล้วไปรีดให้อยู่ในรูปยางแผ่นดิบ นำไปผึ่งช่วงขณะหนึ่ง เพื่อให้ความชื้นลดลง ส่วนการรมควันดำเนินการโดยโรงรมควัน (บริษัท ห้างหุ้นส่วน หรือกลุ่มเกษตรกร) จะเป็นผู้รวบรวมหรือรับซื้อยางแผ่นดิบแล้วนำมารมควัน ซึ่งการจัดชั้น (คุณภาพ) ของยางแผ่นรมควันนั้น ใช้การดูด้วยสายตา โดยพิจารณาจากขนาด รูปร่าง ความหนา สี ฟองอากาศ เชื้อราบนแผ่นยาง ความสม่ำเสมอหรือตำหนิจากการรมควัน ความชื้น สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น

2. ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air-dried Sheet, ADS)

วิธีการผลิตเช่นเดียวกับการผลิตยางแผ่นรมควัน ยกเว้นการผึ่งยางให้แห้งต้องผึ่งด้วยลมร้อน ปราศจากควันไฟ และยางมีการเติมสารหรือจุ่มป้องกันเชื้อรา แผ่นยางที่ได้มีลักษณะดีใส ไม่มีรอยตำหนิหรือสิ่งแปลกปลอม การจัดชั้นคุณภาพจะเป็นยางแผ่นผึ่งแห้งเพียงชั้นเดียว

3. ยางเครพ (Crepes)

ยางเครพที่ผลิตโดยทั่วๆ ไปแบ่งเป็น 2 พวก คือ

3.1 ยางเครพที่ผลิตจากน้ำยางสด ได้แก่ ยางโซลเครพ ยางเครพขาว และยางเครพสีจาง เป็นยางที่ไม่มีสารสีเหลือง กรรมวิธีผลิตจะดีไม่ก่อให้เกิดยางสีคล้ำ หรือ สีดำ มีการคัดเลือกพันธุ์ยางที่จะใช้ในการผลิต น้ำยางที่จับตัวต้องเจือจางให้มีเนื้อยางแห้ง 20 % เติมสารโซเดียมไบซัลไฟท์ (Sodium bisulfite) และสารฟอกสี

3.2 ยางเครพคุณภาพต่ำ เป็นยางที่ทำมาจากยางที่จับตัวแล้ว เช่น เศษยาง จียาง เป็นต้น ในขบวนการผลิต ขณะที่ยางแผ่นผ่านเครื่องจักร จะต้องฉีดน้ำล้างยางตลอดเวลา เพื่อชะล้างทำความสะอาด ขั้นสุดท้ายก็จะรีดยางเป็นแผ่นเครพ ผึ่งให้แห้งในโรงผึ่ง

4. ยางแท่ง (Block Rubber)

ยางแท่งเป็นยางที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐาน มีการใช้เครื่องจักรในขบวนการผลิต ปรับปรุงการบรรจุหีบห่อให้ทันสมัย สะดวกในการขนส่งและใช้งาน ยางแท่งของประเทศไทยเดิมเรียกว่า TTR (Thai Tested Rubber) ปี พ.ศ. 2539 ได้เปลี่ยนเป็นยางแท่ง STR (Standard Thai Rubber) การผลิตยางแท่งผลิตได้ทั้งจากน้ำยางสดและจากยางที่จับตัวแล้ว

5. ยางskim (Skim Rubber)

เป็นผลผลิตจากยางน้ำยาง ซึ่งมีเนื้อยางแห้งประมาณ 3-7 % อันเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำยางข้น การผลิตยางskimทำโดยการนำยางน้ำยางมาทำให้จับตัว ซึ่งยางที่ได้จะมีสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่สูง เช่น โพรตีนทำให้ยางมีกลิ่นเหม็น และปฏิกิริยาที่ทำให้ยางคงรูปเกิดขึ้นเร็วที่เรียกว่า ยางสกอร์ช (scorch) และถ้ามีปริมาณทองแดงสูง จะทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็ว โดยทั่วไป ยางskimจะผลิตจำหน่ายในรูปยางแท่งและยางเครพ

6. ยางความหนืดคงตัว (Viscosity Stabilized Rubber)

ลักษณะของยางชนิดนี้มีความหนืดต่ำและคงตัว ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการบดขยาดผสมสารเคมี ที่เรียกว่าการบดขยาดให้นิ่ม (Mastication) ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อย่างไม่เปลี่ยนแปลง

7. น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

น้ำยางข้น คือ น้ำยางที่นำเอาส่วนที่เป็นของเหลวหรือซีรัม (Serum) ซึ่งมีสารจำพวกไม่ใช่ยาง (Non rubber constituents) อยู่ด้วยออกจากน้ำยาง เพื่อให้ได้ส่วนที่เป็นครีมหรือส่วนที่ข้นของน้ำยาง จะได้เนื้อยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งสูง (ประมาณ 58-63%) เพราะน้ำยางสดโดยปกติจะมีเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25-45% (หรือเฉลี่ย 35% โดยประมาณ)

2.4.1 สมบัติของยาง (Properties of Elastomers)

ยาง [34] เป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนรูปได้มากโดยไม่ถูกทำลายหรือฉีกขาด จึงมีสมบัติด้านความหนืด เหมือนเป็นของเหลว ในขณะที่เดียวกันก็มีความสามารถในการคืนตัวสู่ขนาดเดิมได้ในทันทีเมื่อแรงเค้นหยุดการกระทำ ทำให้อยางมีสมบัติของของแข็ง คือมีความยืดหยุ่น (Elasticity) เมื่อรวมสมบัติทั้ง 2 ด้านนี้ เข้าด้วยกัน เราจึงมักเรียกว่ายางเป็นวัสดุวิสโคอิลาสติก Viscoelastic material นอกจากนี้ยางยังมีสมบัติเด่นอื่นๆ อีกหลายประการ พอสรุปได้ดังนี้ คือ

1. เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง
2. สามารถหยุ่นตัวรับน้ำหนักได้สูง
3. มีความสามารถต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance) หรือ ต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance)
4. มีความอ่อนนุ่มในภาวะปกติ แต่แข็งแรงมาก เมื่ออยู่ในภาวะยืดหรือหดตัวเต็มที่
5. เป็นตัวประสานหรือกาว (Adhesive)
6. มีความทนทานต่อการละลายหรือกัดกร่อนของสารเคมีดี
7. มีความต้านทานไฟฟ้าสูง จึงเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

2.4.2 การเชื่อมโยงในยาง (Rubber Vulcanization)

การเชื่อมโยง (Crosslinking หรือ Vulcanization) [35] หรือการทำยางให้สุกเป็น ขบวนการเคมีที่เปลี่ยนยางสายโซ่ตรงที่ อ่อนนุ่ม และไหลได้ ให้เป็นเทอร์โมเซต (Thermoset) มี โครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) ทนอุณหภูมิสูง แข็งแรง ยืดหยุ่น และมีความ เสถียรของรูปร่างสูง มีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติที่เกิดขึ้น คือ

- โมดูลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- ความยืดหยุ่น (Elasticity) เพิ่มขึ้น
- ความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- การสูญเสียพลังงานเมื่อได้รับแรง (Hyteresis) ลดลง
- การเปลี่ยนขนาดถาวรเนื่องจากแรงกด (Compression set) ลดลง

การเชื่อมโยงยางธรรมชาติ สารที่นิยมใช้ในการเชื่อมโยงจะเป็นกำมะถัน (Sulfur) สาร ที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor) และเปอร์ออกไซด์ (Peroxides) เป็นต้น โดยการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เป็นการนำกำมะถันใส่เข้าไปในยางแล้วให้ความร้อนก็จะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมี สมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่นไม่เหม็นขี้ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น

2.4.3 สารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerators)

ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ถ้าใช้สารทำให้ยางคงรูปเพียงอย่างเดียว เช่น กำมะถัน จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ช้ามาก ต้องใช้กำมะถันปริมาณมาก และการวัลคาไนซ์ใช้เวลาด นานที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าใช้สารเร่ง จะช่วยลดเวลา ลดอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ และยังเป็น การช่วย ปรับปรุงสมบัติให้ผลผลิตอีกด้วย ในการลดเวลาการวัลคาไนซ์ยางนั้น โดยปกติจะขึ้นอยู่กับปริมาณ และ/หรือชนิดของสารที่ใช้

การใช้สารเร่ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ คือ

1. ระบบการใช้สารเร่งเพียงตัวเดียว (Primary accelerator) ให้พอเพียงที่จะวัลคาไนซ์ยาง ตามเวลาที่ต้องการ
2. ระบบการใช้สารเร่งตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งประกอบด้วยชนิดหนึ่งที่ใช้ในปริมาณมาก เป็น Primary accelerator และอีกชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณน้อยเป็น Secondary accelerator (10-20 % ของปริมาณสารเร่งทั้งหมด) เพื่อช่วยเสริมและปรับปรุงสมบัติ ของผลผลิต การใช้ระบบวัลคาไนซ์ที่มีสารเร่งตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จะได้ผลผลิตที่มีคุณ ภาพดีกว่าการใช้ระบบสารใดสารหนึ่งเพียงอย่างเดียว

3. ระบบการใช้สารเร่งที่มีปฏิกริยาช้า (Delayed action accelerator) สารประเภทนี้จะไม่เกิดปฏิกริยาขณะกรรมวิธีก่อนการวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาทางเกิดการวัลคาไนซ์ก่อนเวลา

● สมบัติของสารเร่ง สารเร่งที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

1. สามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว
2. มีความว่องไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง
3. ละลายได้ดีในยาง
4. มีความปลอดภัยในกระบวนการผลิต
5. สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อม
6. ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง
7. เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่นๆที่ใส่เข้าไป
8. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้

● ประเภทของสารเร่ง

สารเร่งมีหลายชนิด จึงต้องมีการจัดเป็นหมวดหมู่ ซึ่งในระยะแรก การจัดประเภทของสารเร่ง จะจัดตามความเร็วในการเร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. พวกปฏิกริยาช้า (Slow accelerator)
2. พวกปฏิกริยาเร็วปานกลาง (Medium fast accelerator)
3. พวกปฏิกริยาเร็ว (Fast accelerator)
4. พวกปฏิกริยาเร็ว (Ultra fast accelerator)

แต่เมื่อมีการใช้ยางสังเคราะห์มากขึ้น สารเร่งที่จัดว่าเป็นสารเร่งปฏิกริยาเร็วหรือเร็วมาก ในยางธรรมชาติ จะกลายเป็นสารเร่งที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์ จึงมีการจัดประเภทของสารเร่ง โดยพิจารณาตามลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของสารเรงนั้นๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภท คือ

1. กลุ่มกัวนิดีน (Guanidine)
2. กลุ่มอัลดีไฮด์อะมีน (Aldehyde amine)
3. กลุ่มซัลฟีนามิด (Sulphenamide)
4. กลุ่มไทอาโซล (Thiazole)
5. กลุ่มไธยูเรม (Thiuram)
6. กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate)
7. กลุ่มแซนเทท (Xanthate)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ยางมะตอย (Asphalt Cement, AC) เกรด 60/70 บริษัท ทีพีโกแอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 3.1 สมบัติยางมะตอย (AC 60/70)

| สมบัติ | หน่วย | ยางมะตอยตัวอย่าง |
|--|-------------------|------------------|
| Penetration at 25 °C, 100 g, 5 sec | 0.1 mm | 64 |
| Softening point (Ring and Ball) | °C | 47.5 |
| Ductility at 13 °C , 5 cm/min | cm | > 150 |
| Brookfield viscosity, shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21 at 135 °C | cp | 360 |
| 165 °C | | 112 |
| Density at 25 °C | g/cm ³ | 1.039 |
| Flash point (Cleveland open cup) | °C | 344 |

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. ยางแผ่นรมควัน (Rubber Smoke Sheet, RSS) ชั้น 3 สถาบันวิจัยยาง
3. สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent)
 - กำมะถัน เกรด อุตสาหกรรม
4. สารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerator)
 - Tetramethyl Thiuramdisulphide (TMTD)
 - 2-Mercaptobenzothiazole (MBT)
5. สารช่วยการกระจายตัว
 - Oxalic acid เกรด ห้องปฏิบัติการ
6. น้ำมันสน (Pine oil)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)
2. เครื่องเพนิโทรมิเตอร์ (Pentrometer) รุ่น H-1240 บริษัท Humboldt MFd.CO.
3. เครื่องวงแหวนและลูกป็น (Ring and ball apparatus)
 - วงแหวน รุ่น H-1575 บริษัท Humboldt MFd.CO.
 - ลูกป็น รุ่น H-1580 บริษัท Humboldt MFd.CO.
4. เครื่องวัดการยืดดึง (Ductility machine) รุ่น 2956 บริษัท Porma Scierteic
5. เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Toughness-Tanacity machine) รุ่น Z010 /TN2S บริษัท Zwick
6. เครื่องทดสอบการคืนตัวกลับ (Torsional recovery machine) บริษัท CM และ B.L.S Eng
7. เครื่องทดสอบความหนืด (Thermal brookfield viscometer machine) รุ่น RDVD II+ บริษัท Brookfield Eng. Labsinc
8. เครื่องผสมแรงเฉือนสูง (High shear mixer) รุ่น L4R บริษัท Silverson
9. กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) รุ่น 45VA type B บริษัท Zeiss Germany

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปสารละลาย

ขั้นตอนที่ 1.1 นำยางแผ่นรมควันมาละลายในน้ำมันสน (ยางแผ่นรมควัน 40 กรัม ต่อ น้ำมันสน 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 70 °C)

ขั้นตอนที่ 1.2 นำสารละลายยางที่ได้มาผสมกับยางมะตอย ในอัตราส่วน 5 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย ในช่วงอุณหภูมิ 100-130 °C

ขั้นตอนที่ 1.3 นำยางมะตอยที่ผสมกับยางมะตอยในขั้นตอนที่ 1.2 มาทดสอบสมบัติต่างๆ ตามรายละเอียดในตอนที่ 6

ตอนที่ 2 การศึกษาสมบัติยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติที่ไม่เชื่อมโยง ที่อัตราส่วนต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2.1 นำยางแผ่นรมควันมาคั้น (Mastication) ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 2.2 นำยางที่ผ่านการบดให้ نرم แล้ว มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ (น้ำหนักประมาณ 1 กรัม) หลังจากนั้นนำมาผสมกับยางมะตอยด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูงที่อัตราเร็วประมาณ 5000 รอบต่อ

นาที่ ด้วยอัตราส่วน 2, 4, 6, 8 และ 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย ที่ช่วงอุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บบ่มที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 วัน

ขั้นตอนที่ 2.3 นำยางมะตอยที่ผสมกับยางธรรมชาติในขั้นตอนที่ 2.2 มาทดสอบสมบัติต่างๆ ตามรายละเอียดในตอนที่ 6

ตอนที่ 3 การศึกษาสมบัติยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติ (6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย) ที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่อัตราส่วนต่างๆ

ขั้นตอนที่ 3.1 นำยางแผ่นรมควันมาผสมกับกำมะถันที่อัตราส่วน 5, 6, 8 และ 10 phr (Part per hundred rubber) โดยผสมและบดให้ نرمด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3.2 นำยางที่ผ่านการผสมและบดให้ نرمแล้ว ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ (น้ำหนักประมาณ 1 กรัม) หลังจากนั้นนำมาผสมกับยางมะตอยด้วยเครื่องผสมที่มีอัตราการหมุนประมาณ 5000 รอบต่อนาที ด้วยอัตราส่วน 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย ที่ช่วงอุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บบ่มที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 วัน

ขั้นตอนที่ 3.3 นำยางมะตอยที่ผสมกับยางธรรมชาติในข้อที่ 3.2 มาทดสอบสมบัติต่างๆตามรายละเอียดในตอนที่ 6

ตอนที่ 4 การศึกษาผลของสารช่วยกระจายที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติที่ไม่เชื่อมโยง

ขั้นตอนที่ 4.1 นำยางแผ่นรมควันมาผสมกับ Oxalic acid 5 phr โดยผสมและบดให้ نرمด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 4.2 นำยางแผ่นที่ผ่านการบดให้ نرمแล้วในขั้นตอนที่ 4.1 มาตัดเป็นชิ้นเล็ก (น้ำหนักประมาณ 1 กรัม) นำมาผสมกับยางมะตอยด้วยเครื่องผสมที่มีอัตราการหมุนประมาณ 5000 รอบต่อนาที ในอัตราส่วน 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอยที่ช่วงอุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บบ่มที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 วัน

ขั้นตอนที่ 4.3 นำยางมะตอยที่ผสมกับยางธรรมชาติในขั้นตอนที่ 4.2 มาทดสอบสมบัติต่างๆตามรายละเอียดในตอนที่ 6

ตอนที่ 5 ศึกษาผลของสารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerator) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

ขั้นตอนที่ 5.1 นำยางแผ่นรมควันมาผสมกับกำมะถัน 5 phr และสารเร่งการเชื่อมโยง คือ TMTD ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 1, 1.5 และ 2 phr และ MBT ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 0.5, 1 และ 1.5 phr โดยบดผสมให้ نرمด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 5.2 นำยางที่ผ่านการบดผสมให้ نرم แล้ว มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ (น้ำหนักประมาณ 1 กรัม) หลังจากนั้นนำมาผสมกับยางมะตอยด้วยเครื่องผสมที่มีอัตราการหมุนประมาณ 5000 รอบต่อนาที ในอัตราส่วน 6% ค่อยนำหนักยางมะตอย ที่ช่วงอุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บบ่มที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 วัน

ขั้นตอนที่ 5.3 นำยางมะตอยที่ผ่านการผสมแล้วในขั้นตอนที่ 5.2 มาทดสอบสมบัติต่างๆ ตามรายละเอียดในตอนที่ 6

ตอนที่ 6 การทดสอบสมบัติของวัสดุยางมะตอย

1. การทดสอบความแข็งกดหรือค่าเพนิเทรชันของวัสดุยางมะตอย (Test Method for Penetration Material)
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5
2. การทดสอบค่าจุดอ่อนตัว (Test Method for Softening Point of Bitumen)
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 36
3. การทดสอบการยืดดึง (Test Method for Ductility of Bituminous Material)
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 113
4. การทดสอบการคืนตัวกลับ (Torsional Recovery Test)
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 6084
5. การทดสอบความเหนียว (Toughness- Tenacity Test)
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5801
6. การทดสอบค่าความหนืด โดยใช้เครื่อง Thermal Brookfield Viscometer ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 °C
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 4402

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การดำเนินงานวิจัยศึกษาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควัน ชั้น 3 โดยการนำยางแผ่นรมควันมาคั้นให้มัน ก่อนตัดเป็นชิ้นเล็กๆน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ต่อชิ้น แล้วผสมกับยางมะตอยด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง ที่มีความเร็วประมาณ 5000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ยางแผ่นรมควันบวมตัว (Swell) ในยางมะตอย ก่อนนำมาผสมอีกครั้งด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วศึกษาผลของปริมาณยางแผ่นรมควัน ผลของปริมาณสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) ผลของสารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerator) และผลของสารช่วยการกระจาย โดยศึกษา ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางมะตอยผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) และศึกษาสมบัติต่างๆ ด้วยการทดสอบหาค่าเพนิเทรชัน (Penetration) จุดอ่อนตัว (Softening point) การยืดดึง (Ductility) การคืนตัวกลับ (Torsional recovery) ความเหนียว (Toughness-Tenacity) และค่าความหนืด (Viscosity) สามารถแสดงผลการทดลอง แบ่งตามประเด็น ศึกษาได้ดังนี้

4.1 การศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่อยู่ในรูปสารละลาย

การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันนั้น ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมาก คือ ความสามารถในการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอย เนื่องจากยางแผ่นรมควันจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มาก มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าหนึ่งล้านและมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) อย่างมากและยุ่งเหยิง (Random coil) ดังนั้นในการผสมจึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง และอุณหภูมิขณะผสมค่อนข้างสูง แต่ถ้าสามารถทำให้โมเลกุลของยางแผ่นรมควันมีขนาดเล็กลงและการเกี่ยวพันกันลดน้อยลง โดยการทำให้สายโซ่แต่ละสายโซ่สามารถลื่นไถล (Slip) ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ก็น่าจะทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยดีขึ้น วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ก็คือ การทำยางแผ่นรมควันให้อยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งการทดลองในหัวข้อนี้จะใช้น้ำมันสน (Pine oil) เป็นตัวทำละลายเพื่อทำให้ยางแผ่นรมควันอยู่ในรูปสารละลายก่อนนำไปผสมกับยางมะตอย สาเหตุที่เลือกใช้น้ำมันสน เนื่องจากน้ำมันสนมีจุดวาบไฟ (Flash point) ประมาณ 150 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมยางมะตอยให้เหลวพอที่จะทำการผสมได้ (ประมาณ 100-120 °C) เพื่อความปลอดภัยในขณะที่ทำการผสมกับยางมะตอย อย่างไรก็ตามก็เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก สายโซ่ยาว

ความหนืดสูงและความสามารถในการละลายของแผ่นรมควันในน้ำมันสนค่อนข้างต่ำทำให้ต้องใช้ น้ำมันสนในปริมาณค่อนข้างมาก กล่าวคือต้องเตรียมสารละลายยางธรรมชาติไม่น้อยกว่า 40 % (ยางแผ่นรมควัน 40 กรัม ต่อ น้ำมันสนปริมาณ 100 มิลลิลิตร) จึงจะได้ยางธรรมชาติเหลวที่มีความหนืดไม่สูงมาก สามารถผสมเข้ากับยางมะตอยได้ อย่างไรก็ตามพบว่าเกิดปัญหาขึ้น คือยางมะตอยปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติที่ได้มีความหนืดต่ำมาก ลักษณะเหลวอ่อนนุ่ม มีค่าเพนิเทรชันสูงมาก (>100) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปัญหาในการกำจัด (ระเหย) น้ำมันสนออกจากยางมะตอยทำได้ยาก และใช้เวลานาน (มากกว่า 10 ชั่วโมง) การมีตัวทำละลาย (น้ำมันสน) ตกค้างอยู่ทำให้ยางมะตอยผสมยางแผ่นรมควันที่อยู่ในรูปยางธรรมชาติเหลวมีความอ่อนตัวมาก จนไม่สามารถที่ทดสอบสมบัติต่างๆได้

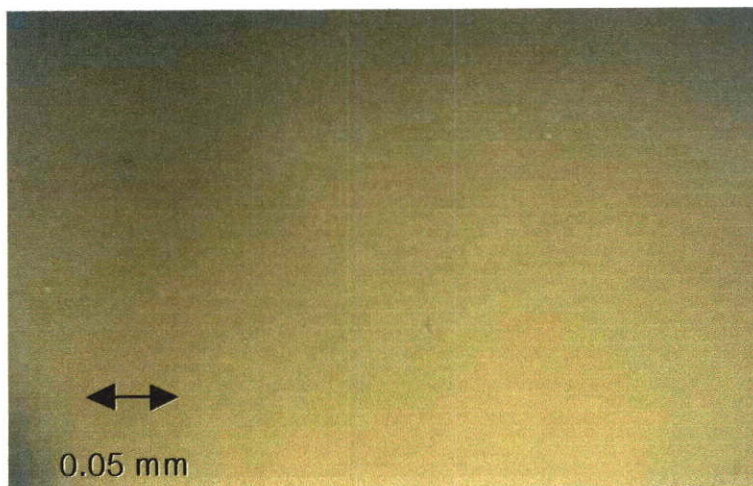
โดยความเป็นจริงแล้วสารละลายที่จะนำมาใช้ในการละลายยางแผ่นรมควันเพื่อทำให้อยู่ในรูปสารละลายนั้นควรจะเป็นน้ำมันที่เป็นส่วนประกอบของยางมะตอย เช่น น้ำมันเบนซิน (Gasoline) น้ำมันก๊าด (Kerosine) และน้ำมันดีเซล (Diesel oil) แต่น้ำมันเหล่านี้มีจุดวาบไฟต่ำ อาจเกิดอันตรายในขณะที่ทำการผสมที่อุณหภูมิสูงได้ถ้าต้องใช้ในปริมาณมาก ดังนั้นการปรับปรุงยางมะตอยด้วยยางธรรมชาติเหลวโดยใช้ตัวทำละลาย จึงไม่สามารถกระทำได้ ด้วยเหตุผลความปลอดภัยในขณะปฏิบัติการ และสมบัติของยางมะตอยที่ไม่ได้มาตรฐาน

4.2 การศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ

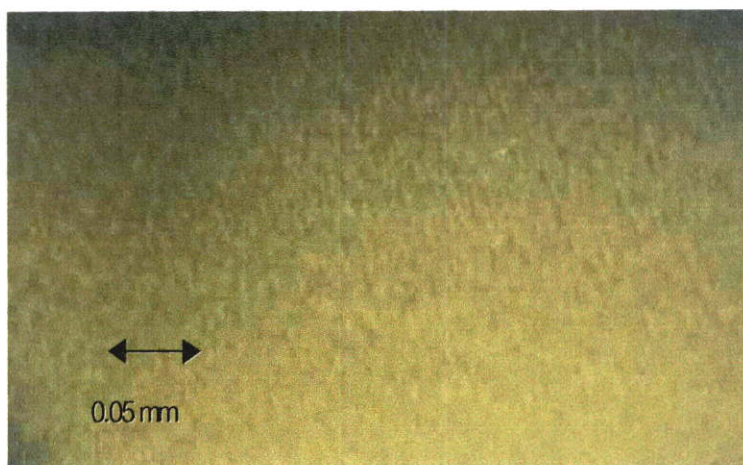
4.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางมะตอย เกรด AC 60/70 ที่ยังไม่ได้ทำการผสมกับยางแผ่นรมควัน เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยายประมาณ 40 เท่า เห็นเป็นลักษณะเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 4.1

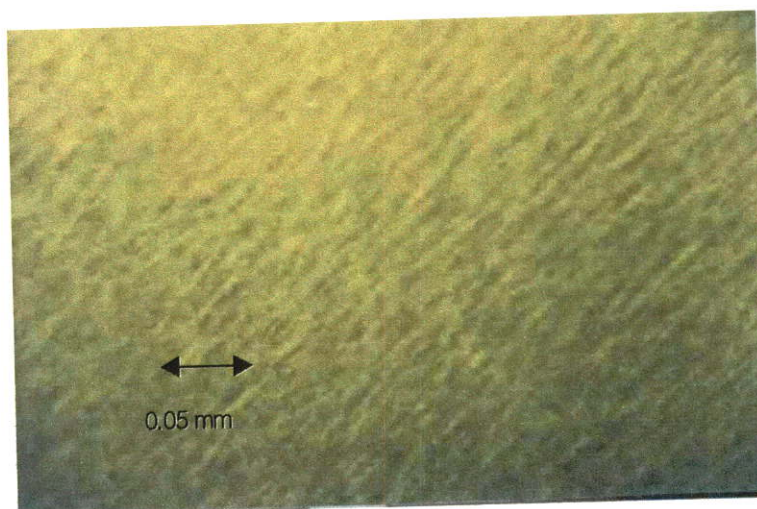
เมื่อทำการผสมยางแผ่นรมควันลงในยางมะตอยซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นน้ำมัน (Oil constituents) อยู่บ้าง ที่อุณหภูมิประมาณ 150-170 °C จะทำให้ยางแผ่นรมควันเกิดการบวมตัว (Swell) และละลายในยางมะตอยขณะร้อน เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยางมะตอย นั่นคือสายโซ่ของยางแผ่นรมควันมีการคลายตัว (Disentanglement) จากเดิมที่มีลักษณะพันกันแบบยุ่งเหยิง ซึ่งการใช้อัตราส่วนปริมาณยางแผ่นรมควันที่ไม่มากนัก เช่น 2, 4 และ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย (พิจารณารูปที่ 4.2-4.4) จะทำให้การกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยค่อนข้างดีกว่าการใช้อัตราส่วนปริมาณที่มาก เช่น ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 8 และ 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอยดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



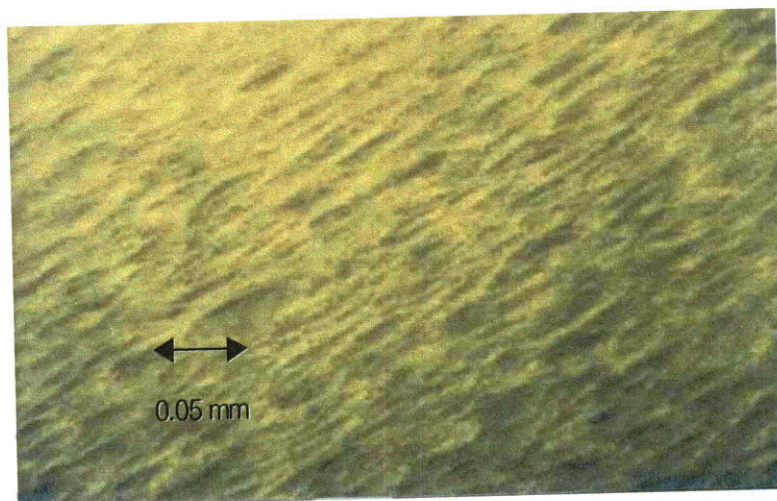
รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของยางมะตอย เกรด AC 60/70 (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า)



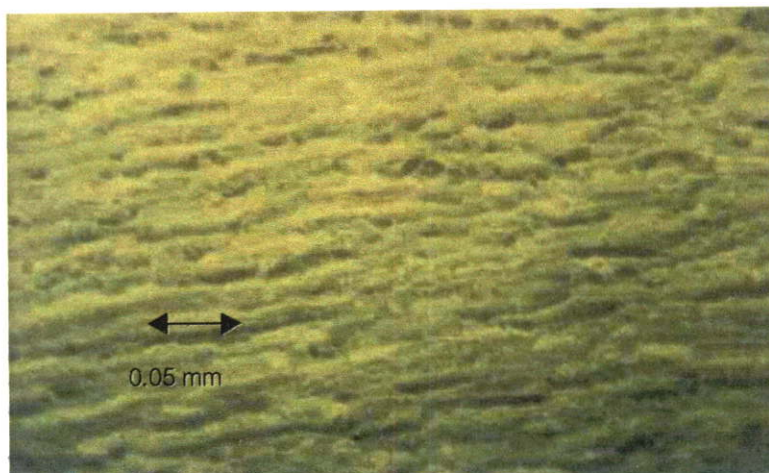
รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงในอัตราส่วน 2 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า)



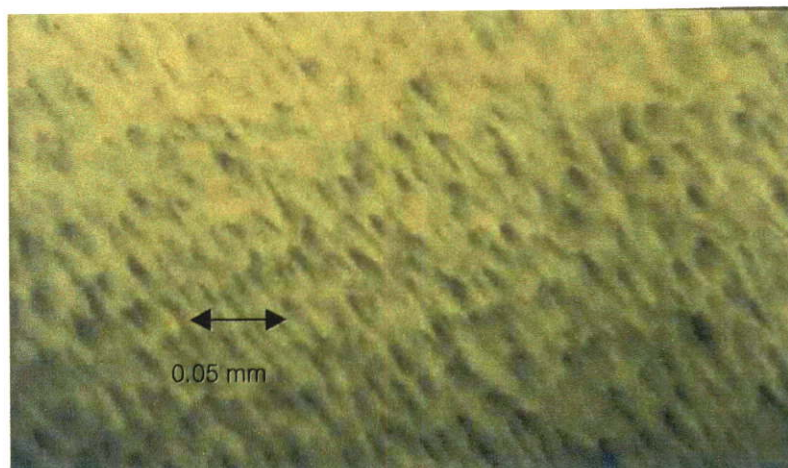
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโงในอัตราส่วน 4 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)



รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโงในอัตราส่วน 6 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)



รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงในอัตราส่วน 8 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)



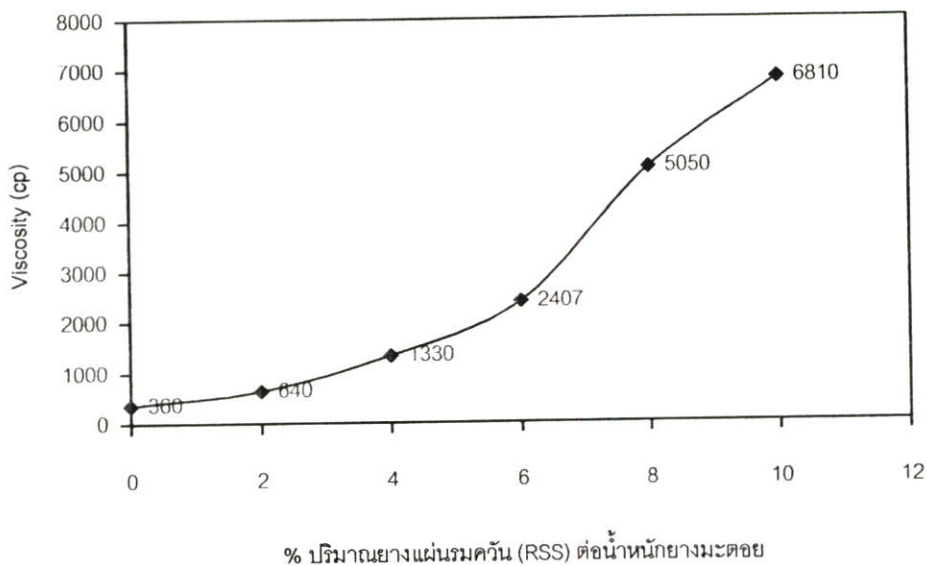
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงในอัตราส่วน 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า)

จะเห็นได้ว่าการเติมยางธรรมชาติในปริมาณมาก (เช่น มากกว่า 6 %) เกิดการแยกวัฏภาค (Phase separation) ระหว่างยางมะตอยกับยางธรรมชาติอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ที่ปริมาณ

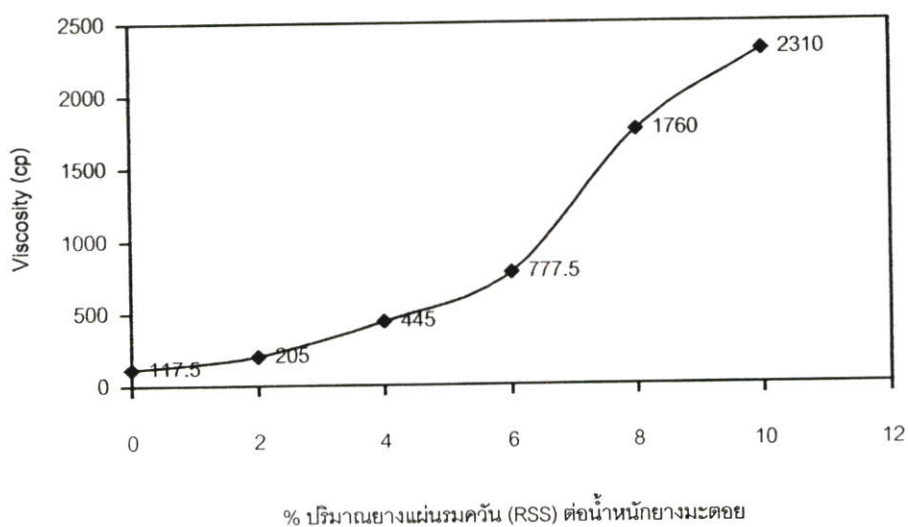
ยางธรรมชาติน้อย ยางสามารถละลายได้ดีในยางมะตอยที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากในยางมะตอยมีองค์ประกอบที่เป็นน้ำมัน (Oil constituents) และไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงจำพวกพาราฟิน (Parafinic materials) ทำให้ละลายและกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน แม้ว่าเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้องอย่างไรก็ดีเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติลงในยางมะตอย ยางอาจละลายได้ในยางมะตอยร้อน แต่เมื่อยางมะตอยเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง ความสามารถในการละลาย (Solubility) ลดลง ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของวัสดุในที่สุด

จากภาพถ่ายแสดงสัญญาณวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อนำมาพิจารณาประกอบกับผลการทดสอบค่าความหนืดที่วัดด้วยเครื่อง Thermal Brookfield viscometer ที่อุณหภูมิ 135 °C และ 165 °C พบว่า เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วน 2, 4 และ 6 % คือน้ำหนักยางมะตอย จะทำให้ค่าความหนืดสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันอยู่ประมาณ 1.7, 3.7 และ 6.6 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วน 8 และ 10 % นั้นจะทำให้ค่าความหนืดสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันอยู่ถึงประมาณ 14.5 และ 19.2 เท่า ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 อาจอธิบายได้ว่า การใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วน 2, 4 และ 6 % ผสมลงในยางมะตอยนั้น โอกาสที่ยางแผ่นรมควันจะสามารถซึมซับน้ำมันที่เป็นส่วนประกอบในยางมะตอยเกิดได้มากกว่าการใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วน 8 และ 10 ซึ่งการซึมซับน้ำมันได้คือนั้น จะทำให้ยางแผ่นรมควันเกิดการบวมตัวได้มาก นั่นก็แสดงว่าสายโซ่โมเลกุลในยางแผ่นรมควันเกิดการคลายตัวจากการเกี่ยวพันกันแบบยุ่งเหยิงได้ดี ซึ่งทำให้แต่ละสายโซ่สามารถไถลผ่านกันได้ง่ายขึ้น เมื่อนำมาทำการผสมด้วยเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง ก็จะทำให้มีความสามารถในการกระจายตัวในยางมะตอยได้ดีกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนของยางแผ่นรมควันจาก 2 เป็น 4 และ 6 % ตามลำดับนั้น จะเห็นว่าค่าความหนืดที่สูงขึ้นนั้นจะเป็นสัดส่วนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณยางแผ่นรมควันที่มากขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณยางแผ่นรมควันจาก 6 % คือน้ำหนักยางมะตอย เป็น 8 % คือน้ำหนักยางมะตอยนั้น จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดนั้นมากกว่าความหนืดของยางมะตอยผสมเมื่อมีการเพิ่มปริมาณยางแผ่นรมควันจาก 4 % เป็น 6 % คือน้ำหนักยางมะตอย (จาก 6.6 เท่า เป็น 14.5 เท่า) ซึ่งการที่ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเพิ่มปริมาณยางแผ่นรมควันเป็นอัตราส่วน 8 และ 10 % นั้น อาจเกิดจากความสามารถในการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยจะลดน้อยลงเมื่อปริมาณยางแผ่นรมควันเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค (Phase separation) ระหว่างส่วนของยางแผ่นรมควันกับส่วนของยางมะตอย โดยส่วนของยางแผ่นรมควันจะเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนลอยอยู่ที่ผิวหน้าของยางมะตอย และบางส่วนจะเกาะติดอยู่ในบริเวณแกนของเครื่องผสม เนื่องจากยางแผ่นรมควันมีความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ 0.9 g/cm^3) เทียบกับความหนาแน่นของยางมะตอย (ประมาณ $1.01\text{-}1.04 \text{ g/cm}^3$)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าความหนืด (Brookfield Viscosity) ที่อุณหภูมิที่ 135 °C ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง



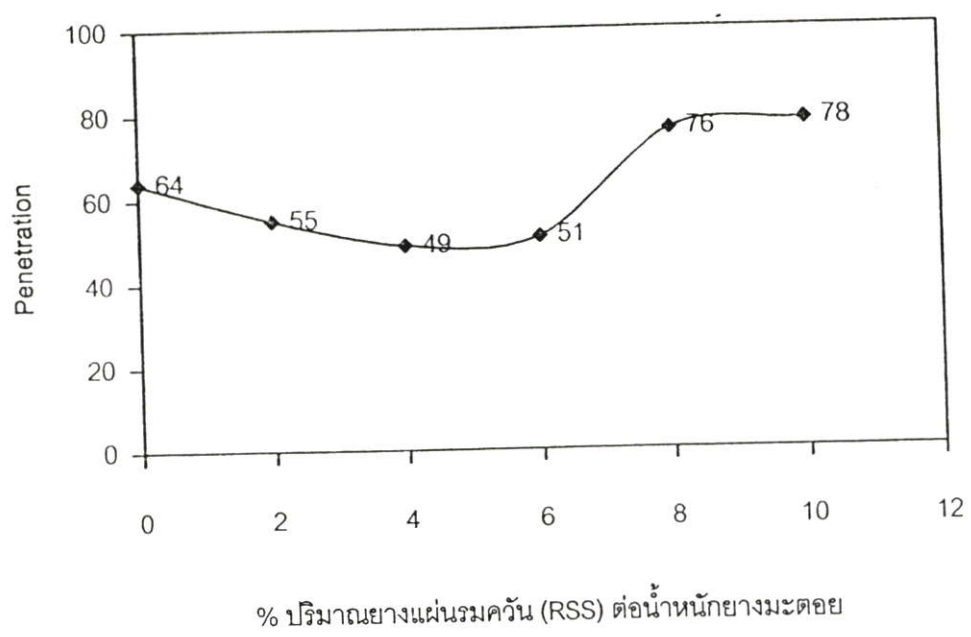
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าความหนืด (Brookfield Viscosity) ที่อุณหภูมิที่ 165 °C ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่าผลของปริมาณยางธรรมชาติที่มีต่อค่าความหนืดของยางมะตอยผสมยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 135 °C และ 165 °C มีผลการทดลองที่สอดคล้องกันมีแนวโน้มเหมือนกัน โดยที่อุณหภูมิสูง (165 °C) ยางมะตอยผสมมีความหนืดต่ำกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (135 °C)

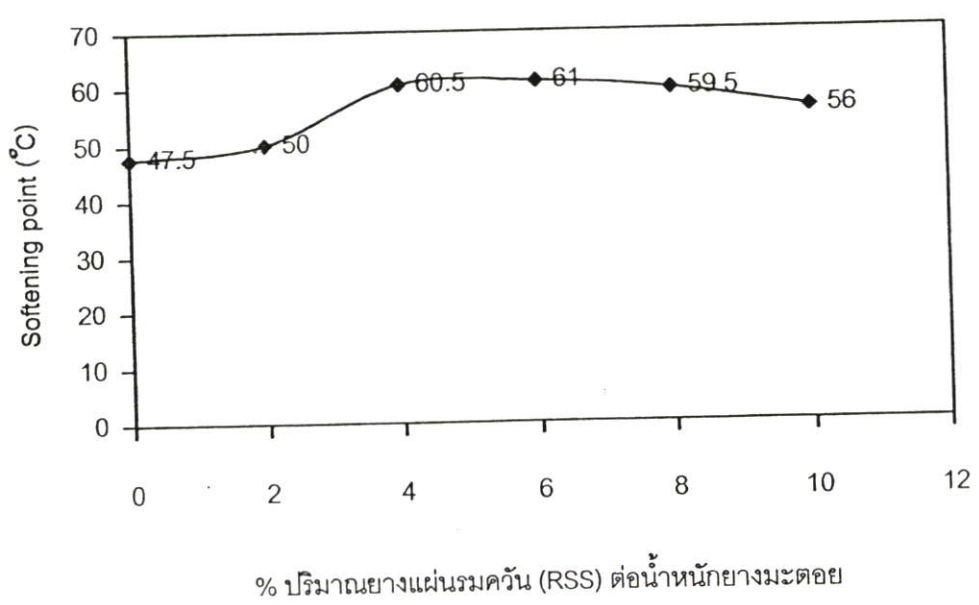
4.2.2 การทดสอบสมบัติต่างๆ

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆในการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างยางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันกับยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วน 2, 4, 6, 8 และ 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย ตามลำดับ โดยสมบัติต่างๆที่ทำการทดสอบมีดังนี้

- ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งอ่อนของยางมะตอยวัดได้จากความลึกของเข็มมาตรฐานของเครื่องเพนิโตรมิเตอร์ ที่จมลึกลงในยางมะตอย ภายใต้น้ำหนักกด 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 5 วินาที โดยยางมะตอยที่มีความแข็งกว่าจะมีค่าเพนิเทรชันต่ำกว่ายางมะตอยที่มีความอ่อนกว่า ซึ่งยางมะตอยที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้เป็นยางมะตอยที่มีค่าเพนิเทรชันเท่ากับ 64 (ตารางที่ 3.1) อยู่ในช่วง 60-70 (เกรด AC 67/70) เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงด้วยปริมาณอัตราส่วน 2, 4 และ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย จะทำให้ค่าเพนิเทรชันลดลงจากเดิม คือ 55, 49 และ 51 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 แสดงว่าการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงมีแนวโน้มที่จะทำให้ยางมะตอยมีความแข็งมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนยางแผ่นรมควันเป็น 8 และ 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย ค่าเพนิเทรชันที่ได้กลับเพิ่มจากเดิมเป็น 76 และ 78 ตามลำดับนั้น แสดงว่าถ้าใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันในอัตราส่วนที่มากเกินไปจนเกินความสามารถที่จะทำให้การกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยเกิดขึ้นได้ดี เกิดการแยกวัฏภาค (Phase separation) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาสถานะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังที่กล่าวมาแล้วทำให้ยางมะตอยผสมยางแผ่นรมควันที่ได้จะมีค่าเพนิเทรชันสูงขึ้นนั่นคือยางมะตอยจะอ่อนตัวลง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าเพนิเทรชัน (Penetration) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง

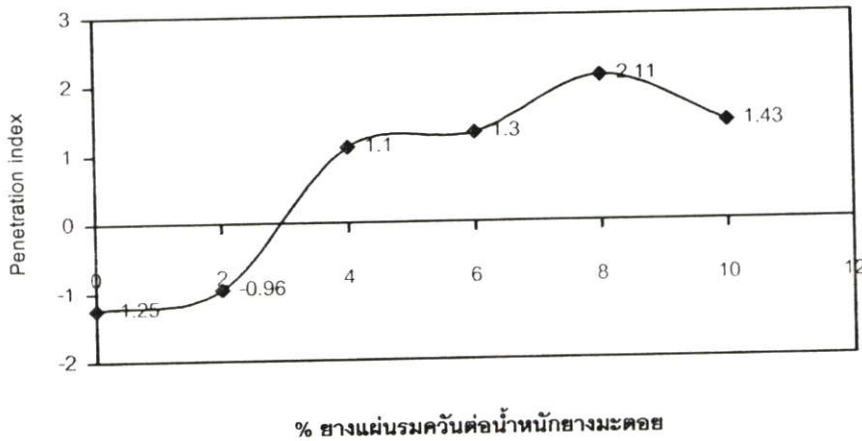
● ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) เป็นค่าที่บอกลักษณะของอุณหภูมิที่สามารถจะทำให้ยางมะตอยเกิดการอ่อนตัวลง อันอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวทางที่นำยางมะตอยนั้นไปใช้งานเกิดยางแข็งขึ้นได้ ซึ่งผลการทดสอบสมบัติค่าจุดอ่อนตัวจากการทดลองนี้ พบว่า การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่ปริมาณอัตราส่วน 2, 4, 6, 8 และ 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอยนั้น จะทำให้อุณหภูมิที่ทำให้ยางมะตอยเกิดการอ่อนตัวมีค่าสูงขึ้นและค่อยๆลดลงตามลำดับคือ 50.0, 60.5, 61.0, 59.5 และ 56.0 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่า การผสมยางแผ่นรมควันที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีสายโซ่โมเลกุลยาว มีการเกี่ยวพันกันของแต่ละสายโซ่แบบยุ่งเหยิง ลงในยางมะตอยที่มีส่วนประกอบเป็น สารอะโรมาติกแบบมีขั้ว (Polar Aromatic) ซึ่งเป็นของแข็งที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ที่จะอ่อนตัวและมีบางส่วนละลายตัวเมื่อถูกความร้อน กระจายตัวอยู่ในสารอิ่มตัว (Saturated) จำพวกพาราฟิน (Paraffin materials) และสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) ที่มีลักษณะเป็นน้ำมันเหนียวสีน้ำตาลค่านั้น การเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลยางแผ่นรมควันที่กระจายตัวอยู่ในยางมะตอย อาจจะมีส่วนทำให้การอ่อนตัวลงของยางมะตอยเกิดได้ยากขึ้นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ที่ปริมาณยางสูง (8 และ 10 %) เกิดการแยกวัฏภาค ซึ่งยืนยันจากผลการศึกษาด้านฐานวิทยา ทำให้มีแรงยึดระหว่างวัฏภาคของยางมะตอยและยางธรรมชาติต่ำ เป็นผลให้จุดอ่อนตัวลดลงใกล้เคียงกับยางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงมากขึ้น

● Penetration index (PI) เป็นค่าที่บอกลักษณะความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางมะตอย โดยค่า PI จะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ

1. กลุ่มที่ค่า PI มากกว่า +1 จะเป็นยางมะตอยที่ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ
2. กลุ่มที่ค่า PI น้อยกว่า -1 จะเป็นยางมะตอยที่ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้างสูง
3. กลุ่มที่มีค่า PI อยู่ระหว่าง -1 และ +1 จะมีลักษณะกึ่งกลางระหว่าง 2 กลุ่มข้างต้น

จากผลการทดสอบและการคำนวณจากสมการพบว่า การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง จะทำให้ยางมะตอยมีความแข็งมากขึ้น และเกิดการอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำขึ้น ซึ่งเมื่อนำทั้ง 2 ค่ามาคำนวณด้วยสมการข้างต้น พบว่า ค่า Penetration index ที่บอกลักษณะความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงจะมีค่าสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน ดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่า PI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ โดยมีค่าเป็นบวกเมื่อผสมยางแผ่นรมควันในยางมะตอยที่อัตราส่วนมากกว่า 3 % ซึ่งก็หมายความว่า การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงเป็นการลดความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางมะตอย โดยเฉพาะที่ปริมาณการเติมยางแผ่นรมควันมากกว่า 3 % และที่ปริมาณการเติมยางแผ่นรมควัน 8 % มี

ค่า PI สูงสุด (ประมาณ +2) อย่างไรก็ตาม ค่า PI มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางแผ่นรมควันเป็น 10 % ซึ่งอาจอธิบายได้จากเหตุการณ์แยกวัฏภาคคล้ายกับเหตุผลอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

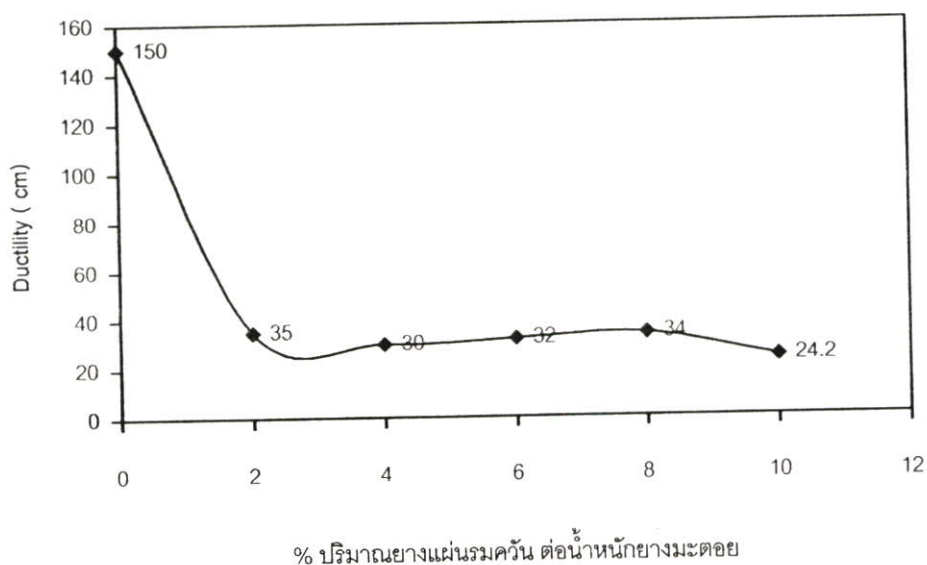


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง

- การยืดดึง (Ductility) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการยืด (Elongation)

ของยางมะตอย เมื่อถูกดึงในอัตราเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 13 °C โดยวัดเป็นความยืดสูงสุดของชิ้นตัวอย่างทดสอบก่อนขาดออกจากกัน ยางมะตอยที่ได้จากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันก็จะมีค่าการยืดดึงที่ต่างกัน โดยทั่วไปแล้วค่าการยืดดึงจะบอกถึงความเหนียว และความสามารถในการยึดเกาะ (Adhesion) ของยางมะตอย ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการยืดดึง คือ การใช้อุณหภูมิที่สูงมากระหว่างการเตรียมยางมะตอยแบบผสมร้อน การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) เนื่องจากสภาพอากาศและระยะเวลาในการเก็บรักษายางมะตอย และอีกปัจจัยที่มีความสำคัญ คือ ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ของยางมะตอย จากผลการทดสอบค่าการยืดดึงเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่ปริมาณอัตราส่วนต่างๆ พบว่า ค่าการยืดดึงที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าการยืดดึงของยางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากความเป็นเนื้อเดียวกันของยางมะตอยลดน้อยลงเนื่องจากมีส่วนของยางแผ่นรมควันเข้าไปผสม โดยที่การกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยอาจเกิดได้ไม่ดี และอีกสาเหตุก็คือในสถานะในการผสมกันระหว่างยางแผ่นรมควันกับยางมะตอยนั้นใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงซึ่งอาจจะเป็นผลที่ทำให้ค่าการยืดดึงลดลงได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดการระเหยของส่วนที่เป็นน้ำมันออกไปมากหรืออาจเกิดการเสถียรภาพ (Degradation) ของ

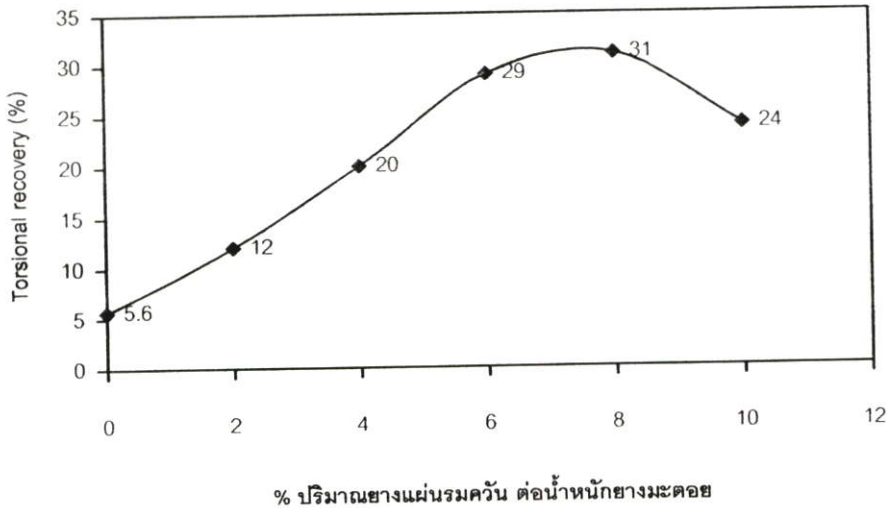
ยางมะตอย เกิดการละลายสลายตัวเปลี่ยนแปลงสภาพขององค์ประกอบจำพวกแอสฟัลทีน (Asphaltenes) ของยางมะตอยที่อุณหภูมิสูงขณะผสม



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าการยืดดึง (Ductility) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง

- การคืนตัวกลับ (Torsional recovery) เป็นการทดสอบเพื่อดูความยืดหยุ่น (Elasticity) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง โดยการวัดองศาที่คืนกลับของแกนโลหะทรงกระบอกที่อยู่กึ่งกลางตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดแน่นอน เมื่อบิดแกนโลหะทรงกระบอกไป 180 องศา จากตำแหน่งเดิมแล้วปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที การที่ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันควรจะมีค่าการคืนตัวกลับสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันนั้น เนื่องจากยางแผ่นรมควันจัดเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นยางหรืออีลาสโตเมอร์ (Elastomers) ที่สามารถถูกยืดออกได้หลายเท่า และสามารถหดกลับคืนสู่รูปร่างขนาดเดิมได้เมื่อปล่อยแรงดึง ดังนั้นเมื่อผสมยางแผ่นรมควันลงในยางมะตอย ก็น่าจะทำให้ยางมะตอยที่ได้มีสมบัติความเป็นอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน พบว่า ค่าการคืนตัวกลับจะสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน โดยค่าการคืนตัวกลับที่เพิ่มขึ้นนั้น จะเป็นสัดส่วนค่อนข้างคงที่สัมพันธ์กับปริมาณอัตราส่วนยางแผ่นรมควันที่เพิ่มขึ้น คือ ปริมาณอัตราส่วนยางแผ่นรมควันที่ 2, 4, 6 และ 8 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย หลังจากนั้นค่าการคืนตัวกลับจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณยางแผ่นรมควันเป็น 10 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย ดังรูปที่ 4.12 สาเหตุที่ค่าการคืนตัวกลับค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่ม

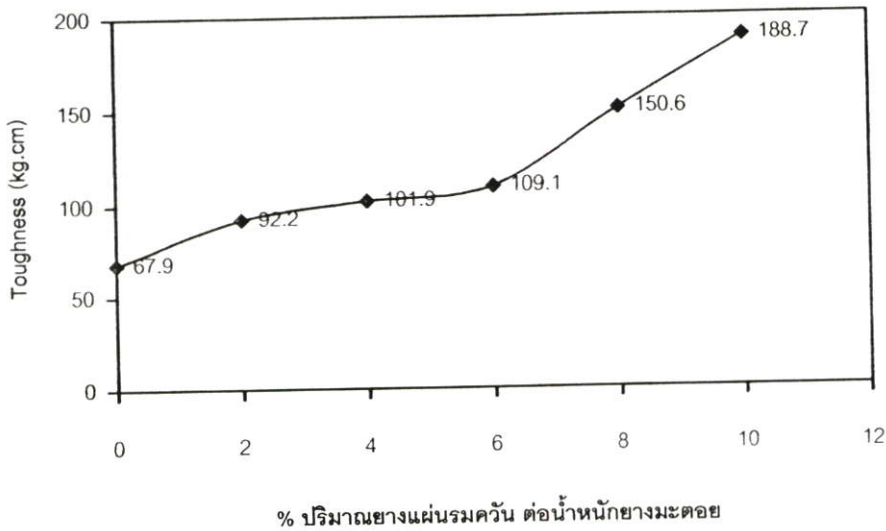
ปริมาณยางแผ่นรมควันเป็น 10 % นั้น เนื่องจากการใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันที่มากนั้นจะทำให้เกิดปัญหาในการผสม โดยการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยอาจจะเกิดได้ไม่คืนัก ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างยางมะตอยกับยางแผ่นรมควัน อันเป็นเหตุให้ค่าการคืนตัวกลับค่อยๆลดลง



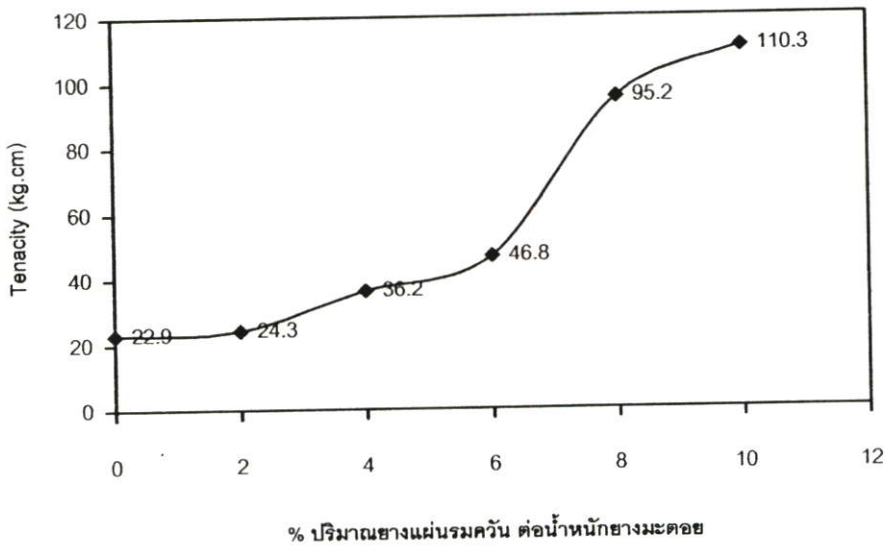
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง

- ค่า Toughness-Tenacity เป็นการตรวจสอบความเหนียวของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติ Toughness และ Tenacity โดยที่ Toughness หมายถึง พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบขาดอย่างสมบูรณ์ภายใต้แรงเค้น และ Tenacity หมายถึง งาน (Work) ที่กระทำจากจุดรับแรงสูงสุดจนกระทั่งตัวอย่างขาด การทดสอบทำได้โดยการจุ่มหัวเครื่องวงกลมของอุปกรณ์การทดสอบลงในตัวอย่าง และทำการยึดดึงด้วยความเร็วของการเคลื่อนที่ออกให้คงที่ด้วยความเร็ว 500 ± 5 มิลลิเมตรต่อ นาที จนตัวอย่างแยกขาดจากกัน บันทึกผลค่าระหว่างแรง (Force) กับ การยืด (Elongation) จากผลการทดสอบ พบว่า ค่า Toughness-Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงนั้น จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ยางแผ่นรมควันที่ปริมาณอัตราส่วน 2, 4 และ 6 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของยางแผ่นรมควันเป็นอัตราส่วน 8 และ 10 % ค่อน้ำหนักยางมะตอย ลักษณะการเพิ่มของค่า Toughness-Tenacity จะเป็นแบบรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณยางแผ่นรมควัน เป็น 8 และ 10 % นั้นทำให้การกระจายตัวของยางแผ่นรมควันใน

ยางมะตอยเกิดได้ไม่คืนัก และมีความเหนียวค่อนข้างสูง (จากรูปที่ 4.7 และ 4.8) จึงทำให้ต้องใช้แรงดึงในการรื้อออกมากกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน 2, 4 และ 6 %



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางแผ่นรมควันกับค่า Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อม โยง

4.3 การศึกษาสมบัติยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน ที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Prevulcanized compound) ที่อัตราส่วนต่างๆ

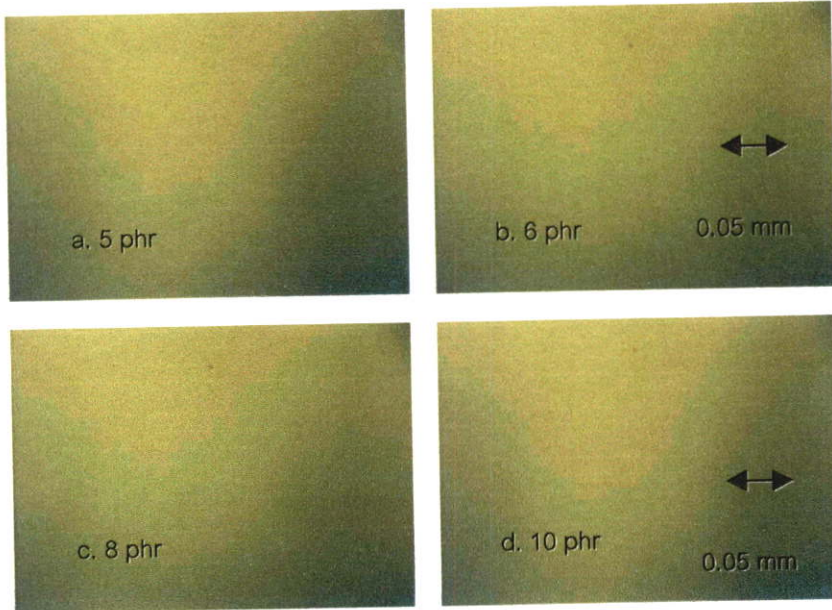
จากผลการทดสอบสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ปริมาณอัตราส่วนต่างๆในหัวข้อที่ 4.2 พบว่า การใช้ปริมาณอัตราส่วนยางแผ่นรมควันที่ 6 % ค่อนำหนักยางมะตอย น่าจะเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำมาปรับปรุงสมบัติยางมะตอย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ กับการใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอย ที่อัตราส่วนอื่นๆ เพราะว่ามันนอกจากจะทำให้สมบัติต่างๆ เช่น ค่าเพนิเทรชัน ค่าจุดอ่อนตัว ค่าการยืดดึง ค่าการคืนตัวกลับ และ ค่า Toughness-Tenacity ที่ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆแล้ว ความหนืดของยางมะตอยผสมยางแผ่นรมควันที่ได้ก็ยังไม่มากเกินไป จนทำให้เกิดปัญหาในการผสม คือ การกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอย และการแยกส่วนกันระหว่างยางมะตอยกับยางแผ่นรมควัน ดังนั้น ในหัวข้อที่ 4.3 นี้ จึงใช้ยางแผ่นรมควันที่ปริมาณอัตราส่วน 6 % ค่อนำหนักยางมะตอย ในการศึกษาสมบัติยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Prevulcanized compound) ที่อัตราส่วนต่างๆ

การใช้ยางแผ่นรมควันที่มีการเชื่อมโยง (Crosslinking) บางส่วนด้วยกำมะถันก่อนที่ผสมลงในยางมะตอย น่าจะเป็นการทำให้สมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงดีกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง เนื่องจากการที่ยางหรืออีลาสโตเมอร์สามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้อย่างสมบูรณ์เมื่อปล่อยแรง โมเลกุลจะต้องมีการเชื่อมโยงเป็นร่างแห โดยเชื่อมโยงทุก 100 หน่วยโดยประมาณ เพื่อป้องกันการเลื่อนผ่านอย่างไม่กลับคืน (Irreversible sliding) ของสายโซ่ยาง โดยในการทดลองนี้ทำได้ การเตรียมยางแผ่นรมควันให้อยู่ในรูปที่มีการเชื่อมโยงเป็นบางส่วน (Prevulcanized compound) ก่อน โดยการบดผสมยางแผ่นรมควันกับกำมะถันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนผสมกับยางมะตอยที่อุณหภูมิประมาณ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บบ่มในตู้อบเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ส่วนที่ยังไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงเกิดการเชื่อมโยงและกระจายตัวในยางมะตอย

4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ปริมาณอัตราส่วน 5, 6, 8 และ 10 phr (part per hundred rubber หรือนำหนักต่อ 100 กรัมของยาง) เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายประมาณ 40 เท่า พบว่ามีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายกับยางมะตอยชนิด AC 60/70 ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยยางมะตอย (รูปที่ 4.1) แสดงว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่มีการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยาง

แผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน แต่ก็ยังไม่เป็นการแน่ชัดว่า ความเป็นเนื้อเดียวกันนี้เกิดจากการที่ยางแผ่นรมควันสามารถกระจายตัวได้ดีในยางแผ่นรมควัน หรืออาจเกิดจากสาเหตุอื่น เช่น เกิดปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันกับยางมะตอยและยางแผ่นรมควัน



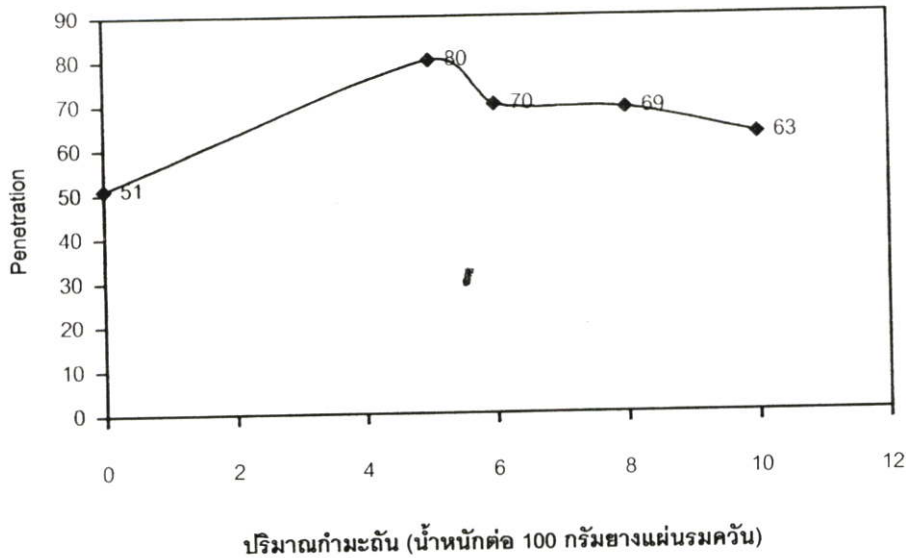
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของยางมะตอย (AC 60/70) ผสมยางแผ่นรมควัน (6% ต่อน้ำหนักยางมะตอย) ที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน a) 5 phr b) 6 phr c) 8 phr d) 10 phr

4.3.2 การทดสอบสมบัติต่างๆ

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆในการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ปริมาณอัตราส่วน 5, 6, 8 และ 10 phr กับยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ที่ปริมาณอัตราส่วนยางแผ่นรมควัน 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย โดยสมบัติต่างๆที่ทำการทดสอบมีดังนี้

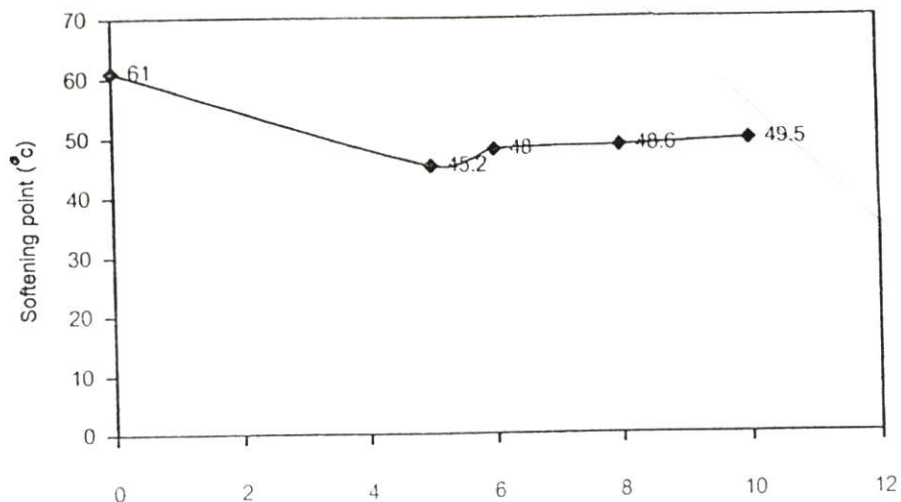
- เพนิเทรชัน (Penetration) จากผลการทดสอบ พบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จะมีค่าเพนิเทรชันที่สูงกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.17 นั่นก็คือ ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันจะมีความอ่อนตัวมากกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วถ้ายางแผ่นรมควันเกิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันและสามารถกระจายตัวได้ดีในยางมะตอย ซึ่งเมื่อคุณลักษณะทางสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 40 เท่า จะเห็นมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันนั้น ยางมะตอยน่าจะมีความแข็ง

มากขึ้นมากกว่าที่จะอ่อนตัวลง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่า การที่ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง อาจจะไม่ได้อาจเกิดจากการกระจายตัวที่ดีในยางมะตอย แต่เกิดจากการที่ยางมะตอยเกิดปฏิกิริยากับกำมะถัน กล่าวคือกำมะถันอาจจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของยางมะตอยที่ไม่อิ่มตัว หรือ โครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันในยางมะตอย



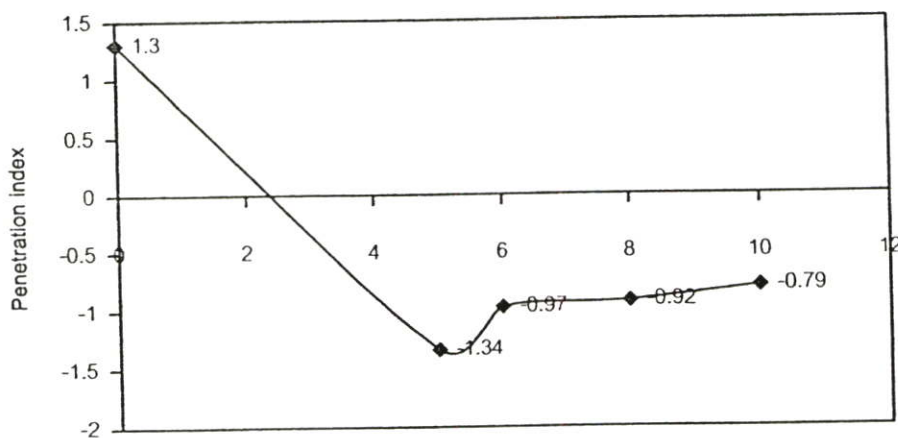
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าเพนิเทรชัน (Penetration) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน (6%) ที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

- ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) จากผลการทดสอบพบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จะมีค่าจุดอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.18
- Penetration index (PI) จากผลการทดสอบ พบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จะมีค่า PI ต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.19



ปริมาณกำมะถัน (น้ำหนักต่อ 100 กรัมของผงแห้ง)

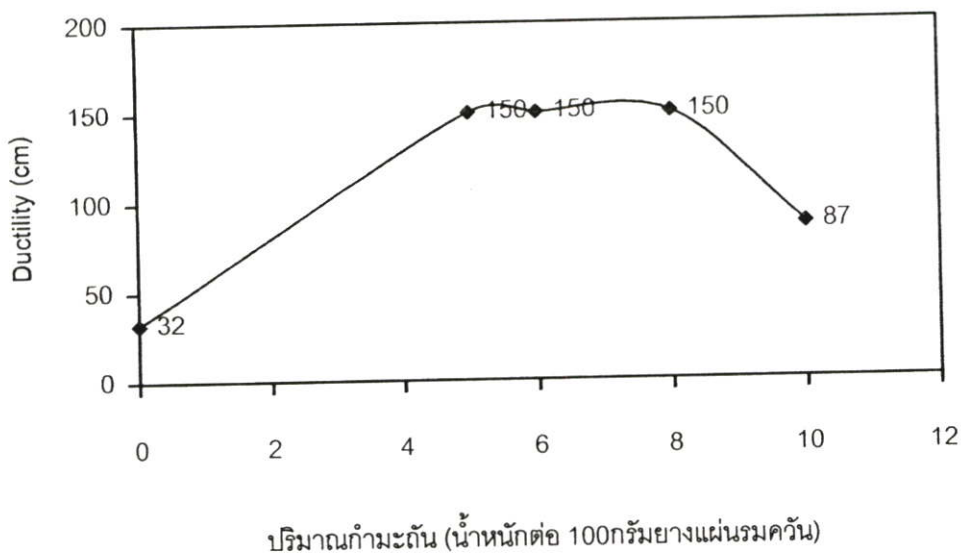
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน (6%) ที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน



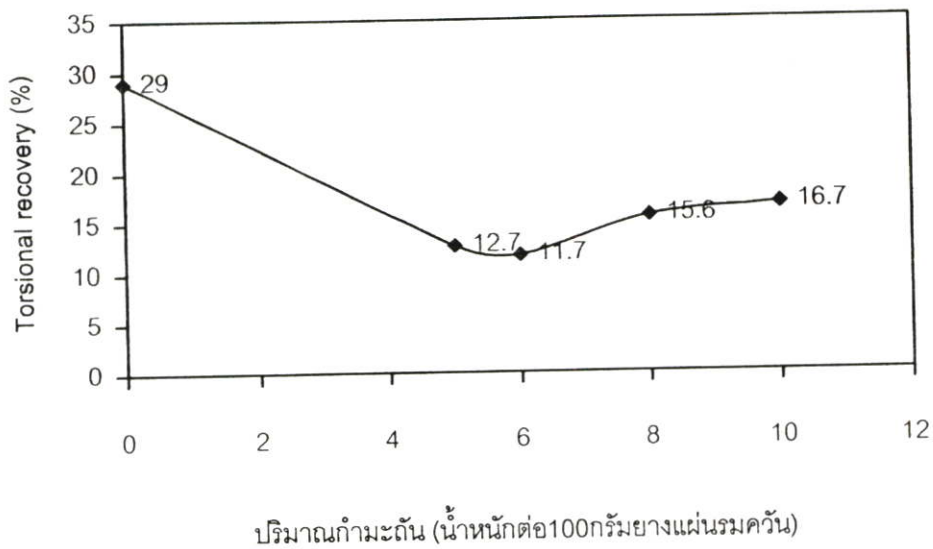
ปริมาณกำมะถัน (น้ำหนักต่อ 100 กรัมของผงแห้ง)

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน (6%) ที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

● การยืดดึง (Ductility) จากผลการทดสอบค่าการยืดดึงของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ค่าการยืดดึงสูงกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งอาจเกิดจากการที่ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างยางแผ่นรมควันกับยางมะตอย

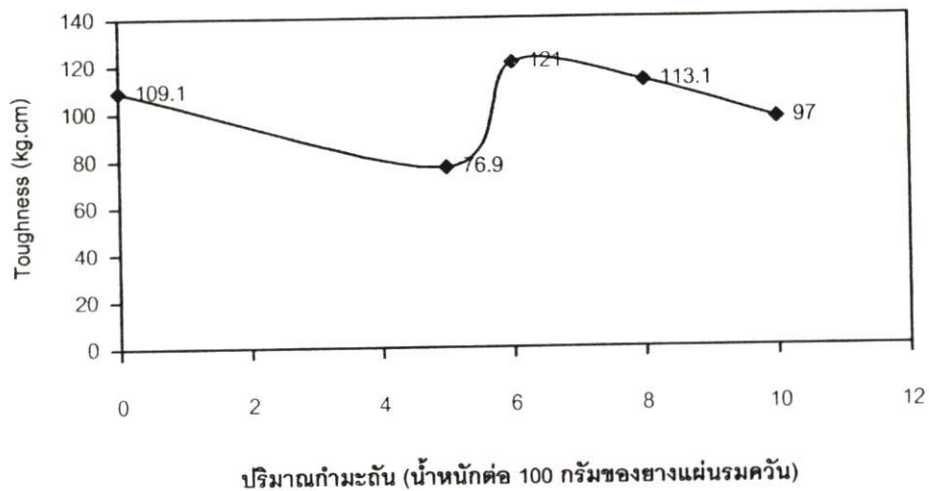


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าการดึงยืด (Ductility) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

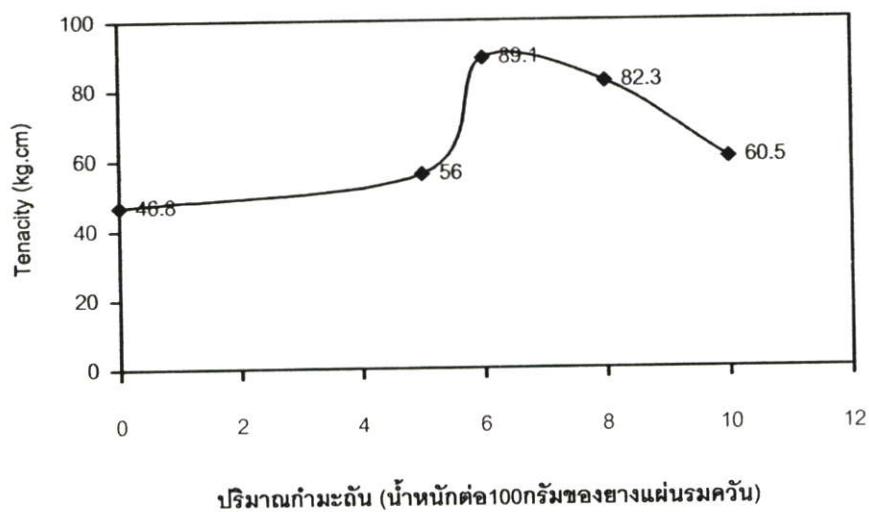


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันกับค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน (6 %) ที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

- การคืนตัวกลับ (Torsional recovery) จากผลการทดสอบ พบว่า ค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จะมีค่าต่ำกว่าค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.21
- ค่า Toughness-Tenacity จากผลการทดสอบพบว่า ค่า Toughness-Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ปริมาณอัตราส่วนต่าง ๆ นั้น ค่าต่างๆที่ได้เป็นไปได้ ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23 คือ ค่า Toughness จะลดลงเมื่อใช้ปริมาณกำมะถัน 5 phr และเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกำมะถัน 6 phr จากนั้นจะค่อยๆลดลงเมื่อใช้ปริมาณกำมะถัน 8 และ 10 phr ตามลำดับ ในขณะที่ค่า Tenacity จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกำมะถัน 5 และ 6 phr และค่อยๆลดลงเมื่อใช้ปริมาณกำมะถัน 8 และ 10 phr ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก้ำมะถันกับค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน (6%) ที่เชื่อมโยงด้วยก้ำมะถัน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก้ำมะถันกับค่า Tenacity ของยางแผ่นรมควัน (6%) ที่เชื่อมโยงด้วยก้ำมะถัน

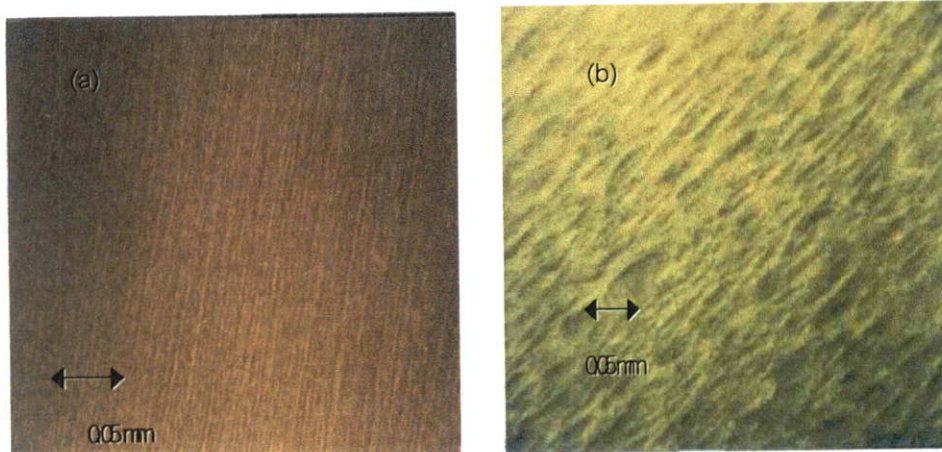
จากผลการทดสอบสมบัติยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Prevulcanized compound) จะเห็นว่าสมบัติบางประการ เช่น ค่าจุดอ่อนตัว และค่าการคืนตัวกลับ มีค่าต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง ทั้งนี้ตามหลักการแล้วควรมีค่ามากกว่า เพราะยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันจะมีความเป็นอีลาสโตเมอร์มากกว่ายางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง การที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ อาจมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันกับยางมะตอย

4.4 การศึกษาผลของสารช่วยการกระจายตัว (Oxalic acid) ที่มีต่อสมบัติยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน

ในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควันนั้น การที่จะทำให้สมบัติยางมะตอยดีขึ้นนั้น นอกจากอัตราส่วนของยางแผ่นรมควันที่เหมาะสมแล้ว การกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยก็เป็นสาเหตุสำคัญที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของยางมะตอย ดังนั้นในหัวข้อที่ 4.4 นี้จะเป็นการทดสอบสมบัติยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย) ที่ใช้สารช่วยผสมในการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอย โดยสารช่วยกระจายตัวที่ใช้คือ กรดออกซาลิก (Oxalic acid) ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัว (Decomposition) ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เกิดเป็นฟองอากาศขณะผสมทำให้มีการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างยางมะตอยกับยางแผ่นรมควันช่วยเพิ่มกระจายตัวของยางธรรมชาติในยางมะตอย การเตรียมยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันและใช้สารช่วยการกระจายตัว ทำโดยการนำยางแผ่นรมควันมาผสมกับกำมะถัน และ Oxalic acid ปริมาณ 5 phr ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.4.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงและมีการใช้สารช่วยกระจายตัว เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายประมาณ 40 เท่า มีลักษณะดังรูปที่ 4.24 (a) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.24 (b) ซึ่งเป็นลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงและไม่มีการใช้สารช่วยการกระจายตัว พบว่าจะมีลักษณะกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยที่ดีกว่า มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่แยกวัฏภาคเหมือนในกรณีไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว



รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควัน (6 %) ที่ไม่เชื่อมโยง
 a) ใช้สารช่วยกระจายตัว (กรดออกซาลิก 5 phr) b) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว

4.4.2 การทดสอบสมบัติต่างๆ

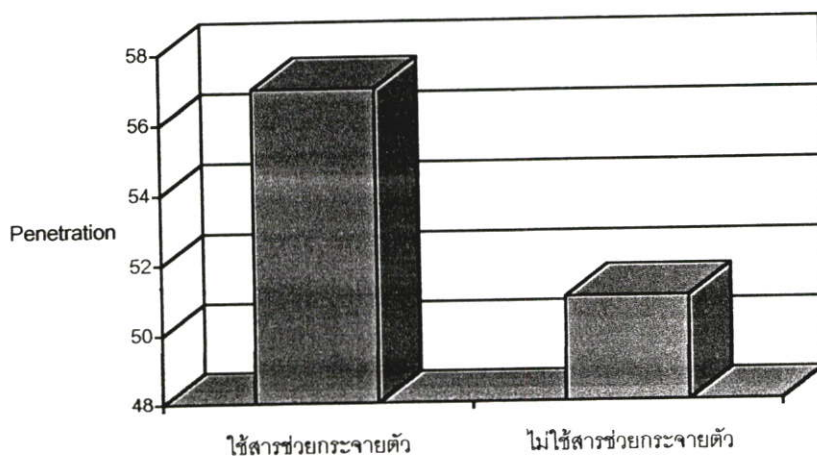
ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ในการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่ใช้สารช่วยกระจายตัวกับยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว โดยสมบัติต่างๆ ที่ทำการทดสอบมีดังนี้

- ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) จากผลการทดสอบพบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงและใช้สารช่วยกระจายตัว จะมีค่าเพนิเทรชันสูงกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว ดังรูปที่ 4.25 นั่นก็คือ สารช่วยกระจายตัวจะช่วยทำให้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงมีความนิ่มตัวมากขึ้น
- ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) จากผลการทดสอบพบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นที่ไม่เชื่อมโยงที่ใช้สารช่วยกระจายตัว จะมีค่าจุดอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวอยู่ประมาณ 4°C ดังรูปที่ 4.26
- Penetration index จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเพนิเทรชันและค่าจุดอ่อนตัวของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่ใช้สารช่วยกระจายตัวพบว่า ค่า Penetration index ต่ำกว่าการไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.27
- ค่าการยืดดึง (Ductility) จากผลการทดสอบพบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติ

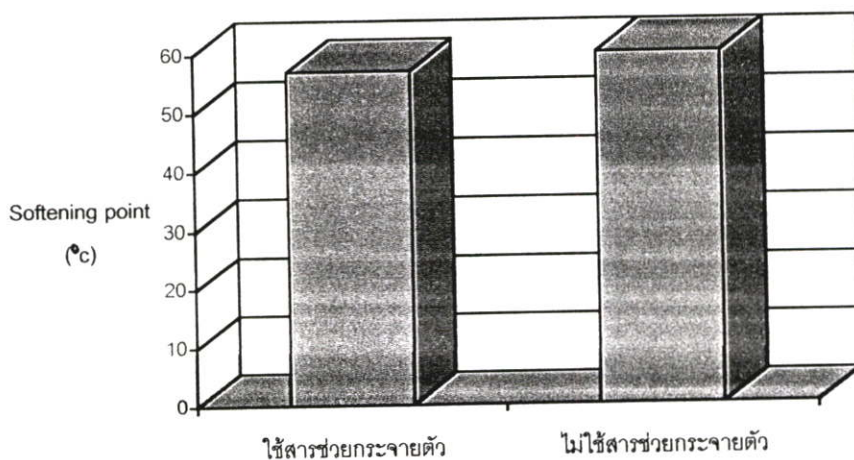
ด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่ใช้สารช่วยกระจายตัว มีค่าการยึดดึงสูงกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวอยู่ 25.5 cm ดังรูปที่ 4.28 และเมื่อพิจารณาประกอบกับรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงลักษณะทางสัญญาณวิทยาของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว จะเห็นว่าสารช่วยกระจายตัวช่วยให้ยางแผ่นรมควันกระจายตัวในยางมะตอยได้มากขึ้น

- ค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงและใช้สารช่วยกระจายตัว มีค่าต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า การกระจายตัวที่ดีของยางแผ่นรมควันในยางมะตอยเกิดจากการที่สายโซ่คลายตัวออกจากกันได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าการคืนตัวกลับต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวอยู่เล็กน้อย

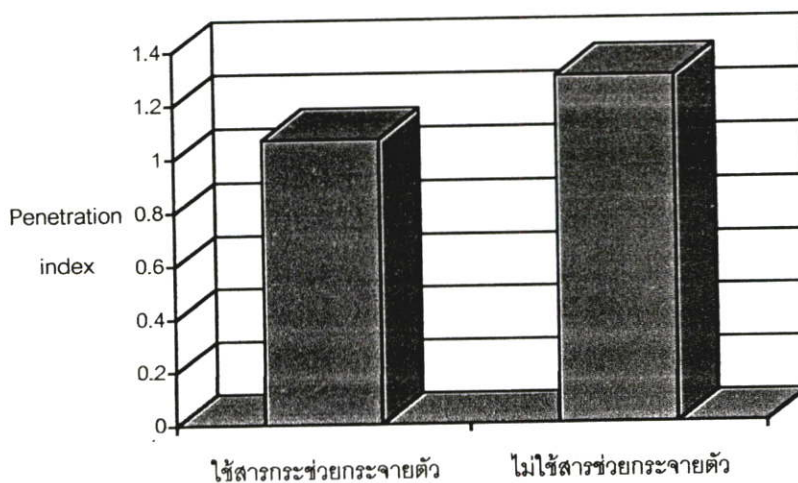
- ค่า Toughness- Tenacity จากผลการทดสอบพบว่า ค่า Toughness และค่า Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่ใช้สารช่วยกระจายตัว มีค่ามากกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวอยู่มาก ดังรูปที่ 4.29 นั้น อาจอธิบายได้ว่า สารช่วยกระจายตัวทำให้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จึงทำให้การยึดเหนี่ยวกันเอง(Cohesion) มีมากขึ้น



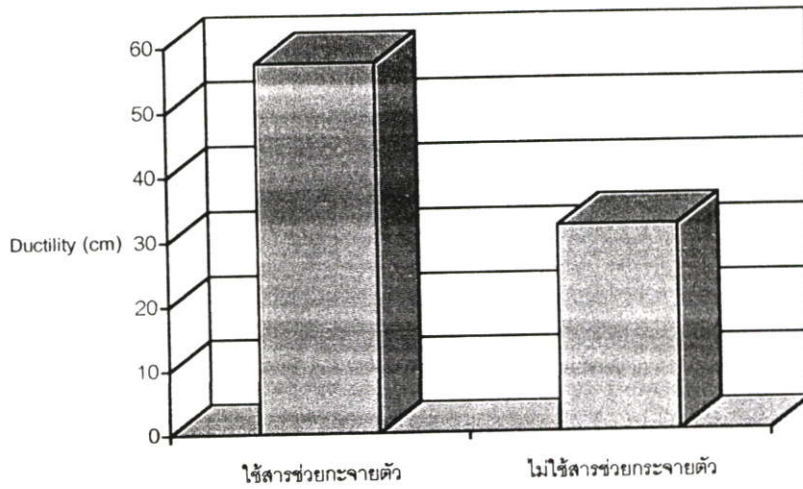
รูปที่ 4.25 ค่าเพนิเทรชันของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง (6%) เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว



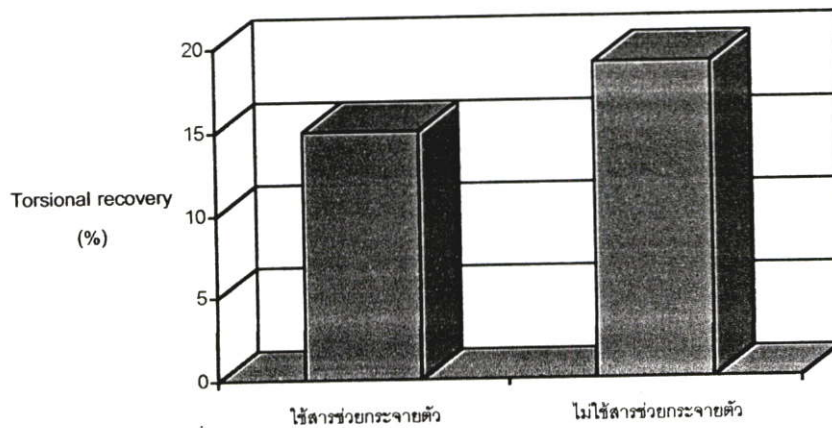
รูปที่ 4.26 ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง (6%) เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว



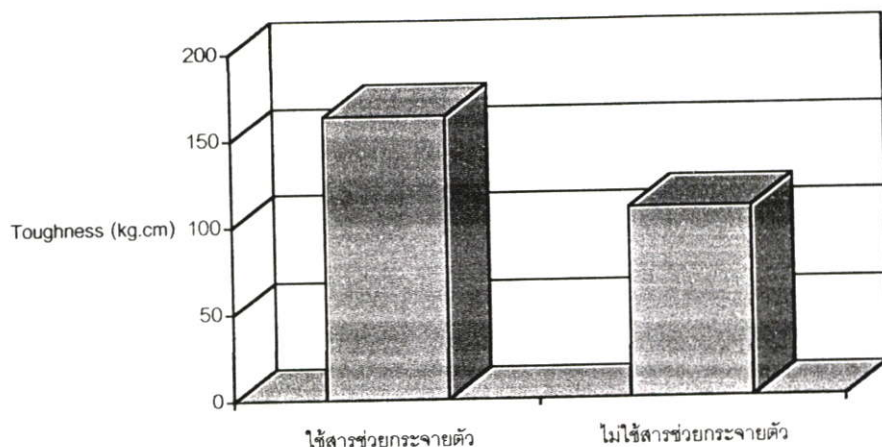
รูปที่ 4.27 ค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันไม่ที่เชื่อมโยง (6%) เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว



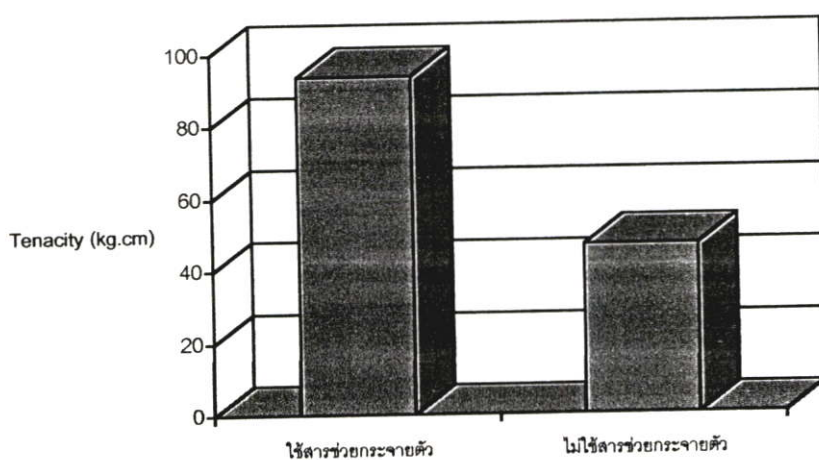
รูปที่ 4.28 ค่า การยืดดึง (Ductility) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง (6 %) เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยกระจายตัวและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว



รูปที่ 4.29 ค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง (6 %) เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารช่วยการกระจายและไม่ใช้สารช่วยการกระจาย



รูปที่ 4.30 ค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง (6 %) เปรียบเทียบระหว่างการใส่สารช่วยกระจายตัวและไม่ใส่สารช่วยกระจายตัว



รูปที่ 4.31 ค่า Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง (6 %) เปรียบเทียบระหว่างการใส่สารช่วยกระจายตัวและไม่ใส่สารช่วยกระจายตัว

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง และใช้สารช่วยกระจายตัว (กรคออกซาลิก) อาจสรุปได้ว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวทำให้ยางแผ่นรมควันสามารถกระจายตัวในยางมะตอยได้ดีขึ้น มีความเป็นเนื้อกันมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากค่าการยึดดึงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า

Toughness-Tenacity พบว่า ยังเพิ่มความเหนียวหรือความสามารถในการยึดเกาะกันเอง (Cohesion) อีกด้วย

4.5 การศึกษาผลของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

การเปลี่ยนรูปยางดิบ (ยางแผ่นรมควัน) ให้เป็นยางที่รักษารูปร่างได้ มีความยืดหยุ่น (Elastic) หรือแข็ง โดยให้มีการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันนั้น อาจจะใช้เวลาในการเชื่อมโยงหรือการวัลคาไนชันนานถึง 6 ชั่วโมง แต่ถ้ามีการใช้สารตัวเร่ง ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนชันของยางเกิดเร็วขึ้นจากเดิม เดิมลงไปนั้นก็จะทำให้เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนชันสั้นลงเป็นเพียง 10-30 นาทีเท่านั้น ซึ่งการที่ยางแผ่นรมควันเกิดการเชื่อมโยงกับกำมะถันได้เร็วขึ้น ก็น่าจะเป็นการลดการทำปฏิกิริยากับกำมะถันกับยางมะตอยในระหว่างทำการผสมยางแผ่นรมควันลงในยางมะตอย ยางแผ่นรมควันเกิดการเชื่อมโยงกับกำมะถันได้มากขึ้น ซึ่งน่าจะมีผลทำให้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันและใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงนั้น มีความแข็งแรงขึ้น และมีความเป็นอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น การเตรียมยางแผ่นรมควันสำหรับการทดลองนี้ทำได้โดยทำการผสมยางแผ่นรมควันกับกำมะถัน 5 phr และ สารเร่งการเชื่อมโยง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ TMTD (Tetramethyl thiuram disulphide) และ MBT (2-mercaptobenzo thiazole) ที่อัตราส่วนต่างๆ โดย TMTD [27] เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มไธยูเรม (Thiuram) เป็นสารเร่งที่เกิดปฏิกิริยาเร็วอย่างมาก และสารเร่ง TMTD นี้สามารถใช้ในปริมาณเล็กน้อย คือ ปริมาณ 0.5 phr ร่วมกับกำมะถัน สารเร่งในกลุ่มไธยูเรมเป็นสารเร่งที่ไม่มีรสไม่มีกลิ่น สามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใส สีขาว หรือสีต่างๆ ได้ ส่วน MBT เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มไทอาโซล (Thiazole) เป็นสารเร่งที่นิยมใช้มากที่สุด เป็นสารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วปานกลาง ให้ยางที่มีสมบัติหลังจากการ Aging ดีมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง มีมอดูลัสสูง ไม่ติดสี ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่โปร่งแสง นอกจากนี้ MBT ยังเป็นตัวช่วยให้ยางนุ่มในการผสมยาง จึงช่วยในการแปรรูปยางได้ดี มักใส่ลงในยางขณะเริ่มต้นผสม

4.5.1 การทดสอบสมบัติต่างๆ

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆในการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันและใช้สารเร่งการเชื่อมโยงกับยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยไม่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง โดยสมบัติต่างๆที่ทำการทดสอบมีดังนี้

- ค่าเพนิเทรชัน จากผลการทดสอบ พบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันและสารเร่งการเชื่อมโยง จะมีค่าเพนิเทรชันต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันโดยไม่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง ดังตาราง

ที่ 4.1 โดยค่าเพนิเทรชันจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TMTD เป็น 0.5, 1 และ 1.5 phr ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเพนิเทรชันลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ MBT เป็น 1 และ 1.5 phr และสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 2 phr ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่า การใช้สารเร่งการเชื่อมโยงทำให้ยางแผ่นรมควันเกิดการเชื่อมโยงกันโดยกัมมะถันมากขึ้น เป็นเหตุให้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกัมมะถันและใช้สารเร่งการเชื่อมโยงมีความแข็งแรงมากกว่า

ตารางที่ 4.1 ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นที่เชื่อมโยงด้วยกัมมะถันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ

| Accelerator | TMTD | | | | MBT | | |
|--------------|------|----|-----|----|-----|----|-----|
| | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| ปริมาณ (phr) | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| Penetration | 80 | 74 | 69 | 71 | 74 | 70 | 69 |

- ค่าจุดอ่อนตัว จากผลการทดสอบค่าจุดอ่อนตัวของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกัมมะถันและใช้สารเร่งการเชื่อมโยง พบว่า มีค่าจุดอ่อนตัวสูงกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกัมมะถันโดยไม่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง เมื่อปริมาณสารเร่งเพิ่มขึ้นจะทำให้จุดอ่อนตัวสูงขึ้น แต่มีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อมีปริมาณสารเร่งสูง โดยปริมาณ TMTD ที่ทำให้ได้ค่าจุดอ่อนตัวสูงสุดในการทดลองนี้ คือ 1.5 phr และปริมาณ MBT ที่ทำให้ได้ค่าจุดอ่อนตัวสูงสุด คือ 1 phr ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของยางแผ่นดิบที่เชื่อมโยงด้วยกัมมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ

| Accelerator | TMTD | | | | MBT | | |
|----------------------|------|------|------|----|------|------|-----|
| | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| ปริมาณ (phr) | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| Softening point (°C) | 45.2 | 46.5 | 49.5 | 47 | 47.7 | 49.2 | 49 |

- ค่า Penetration index จากผลการคำนวณสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าจุดอ่อนตัวและค่าเพนิเทรชันของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกัมมะถันและใช้สารเร่งการเชื่อมโยง พบว่า มีค่า Penetration index สูงกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกัมมะถันโดยไม่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า Penetration index ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ

| Accelerator | TMTD | | | | MBT | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ปริมาณ (phr) | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| Penetration index | -1.34 | -1.17 | -0.52 | -1.13 | -0.52 | -0.56 | -0.65 |

● ค่าการยึดดึง จากผลการทดสอบ ค่าการยึดดึงของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง พบว่า ค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกับค่าการยึดดึงของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันโดยไม่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง คือ ยังมีค่าสูงถึง 150 cm ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการยึดดึง (Ductility) ของยางมะตอยที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ

| Accelerator | TMTD | | | | MBT | | |
|-------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ปริมาณ (phr) | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| Ductility at 13 °C 5 cm/min (cm) | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |

● ค่าการคืนตัวกลับ จากผลการทดสอบค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง พบว่า การใช้สารเร่งการเชื่อมโยง ซึ่งในการทดลองนี้ คือ TMTD และ MBT ที่ปริมาณอัตราส่วน 1.5 และ 1 phr ตามลำดับนั้น จะมีผลทำให้ค่าการคืนตัวกลับสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่การใช้ปริมาณสารเร่งการเชื่อมโยงที่ปริมาณอัตราส่วนอื่นๆ จะทำให้ค่าการคืนตัวกลับลดต่ำลงเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ

| Accelerator | TMTD | | | | MBT | | |
|------------------------|------|------|------|-----|-----|------|------|
| ปริมาณ (phr) | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| Torsional recovery (%) | 12.7 | 11.7 | 17.2 | 9.4 | 8.9 | 13.9 | 11.7 |

● ค่า Toughness-Tenacity จากผลการทดสอบ พบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง จะมีค่า Toughness-Tenacity สูงขึ้นเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 โดยแนวโน้มของค่า Toughness จะเป็นในลักษณะที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเร่งการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น จนถึงปริมาณ TMTD ที่ 1.5 phr และ MBT 1 phr และจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณ TMTD 2 phr และ MBT 1.5 phr ในขณะที่ ค่า Tenacity จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ MBT จนถึง 1.5 phr แล้วมีแนวโน้มที่จะคงที่ ในส่วนของ TMTD ค่า Tenacity จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณ 1 และ 1.5 phr และลดลงเมื่อใช้ปริมาณ 2 phr

ตารางที่ 4.6 ค่า Toughness ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่อัตราส่วนต่างๆ

| Accelerator | TMTD | | | | MBT | | | |
|-------------------|--------------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| | ปริมาณ (phr) | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| Toughness (kg.cm) | | 76.9 | 105.2 | 109.1 | 84.3 | 71.3 | 96.2 | 100.9 |

ตารางที่ 4.7 ค่า Tenacity ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยยางมะตอยที่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง

| Accelerator | TMTD | | | | MBT | | | |
|------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | ปริมาณ (phr) | 0 | 1 | 1.5 | 2 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| Tenacity (kg.cm) | | 56.2 | 71.5 | 77.3 | 57.6 | 43.4 | 66.5 | 64.7 |

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันและใช้สารเร่งการเชื่อมโยง พบว่า สมบัติต่างๆ ดีขึ้นกว่าการไม่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยงเพียงเล็กน้อย โดยปริมาณสารเร่งการเชื่อมโยงที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดในการทดลองครั้งนี้คือ TMTD 1.5 phr และ MBT 1 phr

จากงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นได้ว่า สามารถนำยางธรรมชาติมาปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยได้ อย่างไรก็ตาม ยังมีสมบัติบางประการที่ค่อยๆลดลงเมื่อทำการผสมยางธรรมชาติในยางมะตอย ซึ่งต้องมีการศึกษา เพื่อปรับปรุงสมบัติเหล่านี้ต่อไป ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาบางปัจจัยที่ผลการทดลองไม่เป็นแนวโน้มที่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก

- วัสดุคิยางมะตอย AC 60/70 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่ใช่ยางมะตอยดั้งเดิมยกเว้นตลอดสมบัติและองค์ประกอบของยางมะตอยอาจไม่เท่ากัน เป็นผลให้ค่าการทดสอบที่ได้ไม่คงที่มีค่าการเบี่ยงเบนสูง

- องค์ประกอบหนึ่งในยางมะตอย คือ แอสฟัลต์ทีน (Asphaltenes) ซึ่งไม่เสถียรต่ออุณหภูมิสูง เมื่อได้รับความร้อนนานๆ อาจเสื่อมสลาย (Degradation) งานวิจัยที่ผ่านมาควรควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาการผสมอย่างแม่นยำให้เท่ากันตลอดงานวิจัย เพื่อให้ยางมะตอยมีประสบการณ์ทางความร้อนที่เหมือนกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควัน โดยวิธีการทำยางแผ่นรมควันให้อยู่ในรูปสารละลายก่อนทำการผสมกับยางมะตอย และอีกวิธีคือทำการผสมยางแผ่นรมควันกับยางมะตอยด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง ที่อุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 วัน แล้วศึกษาผลของปริมาณยางแผ่นรมควัน ผลของปริมาณสารเชื่อมโยง ผลของสารช่วยกระจายตัว และผลของสารเร่งการเชื่อมโยง โดยศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติต่างๆ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การทำยางแผ่นรมควันให้อยู่ในรูปสารละลายโดยใช้น้ำมันสนไม่เหมาะสม เนื่องจากยางมะตอยผสมที่ได้จะมีความอ่อนตัวมากเกินไป และมีความเสี่ยงต่อความปลอดภัยในการใช้งาน เนื่องจากการคลุกผสมระหว่างยางมะตอยกับหินนั้นต้องใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ปริมาณน้ำมันสนที่ยังตกค้างอยู่เป็นจำนวนมาก อาจเกิดการติดไฟได้และไอระเหยของน้ำมันสนก็เป็นอันตรายต่อผู้ทำงาน

2. จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงที่ปริมาณอัตราส่วนต่างๆ สรุปได้ว่า อัตราส่วน 6 % คือน้ำมันยางมะตอยเหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาจาก ค่าจุดอ่อนตัว ค่าการคืนตัวกลับ ค่า Toughness-Tenacity และ ค่า Penetration index ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ความหนืดที่เกิดขึ้นก็ไม่มากจนทำให้เกิดปัญหาในขณะที่ทำการผสม แต่ปัญหาที่พบก็คือค่าการดึงยึดลดลงอย่างมากเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางมะตอยและยางแผ่นรมควัน

3. จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงและใช้สารช่วยกระจายตัว คือ กรดออกซาลิก ปริมาณ 5 phr พบว่าทำให้ยางมะตอยผสมที่ได้มีการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันดีขึ้น มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยพิจารณาจากค่าการดึงยึดที่สูงขึ้น

4. จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ยางแผ่นรมควันที่ทำให้อยู่ในรูป Pre-vulcanized compound พบว่าค่าจุดอ่อนตัว ค่า Penetration index และค่าการคืนตัวกลับ ต่ำกว่าการใช้ยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงในการปรับปรุงสมบัติ ซึ่งอาจเกิดจากผลของปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันกับยางมะตอยที่ทำให้โครงสร้างของยางมะตอยเปลี่ยนแปลงไป

5. จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่

เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน 5 phr และใช้สารเร่งการเชื่อมโยงปริมาณต่างๆ (TMTD 1, 1.5, 2 phr และ MBT 0.5, 1, 1.5 phr) พบว่า สมบัติต่างๆ เช่น ค่าจุกอ่อนตัว ค่า Penetration index มีค่าสูงกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถันโดยไม่ใช้สารเร่งเพียงเล็กน้อย และมีค่าต่ำกว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยง

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันแล้ว ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ พบว่า ปริมาณยางแผ่นรมควันที่เหมาะสมในการนำมาปรับปรุงสมบัติยางมะตอย คือ 6 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย เนื่องจากทำให้ได้ค่าของสมบัติต่างๆที่ดีขึ้น โดยไม่เกิดปัญหาในระหว่างการผสมเนื่องจากความหนืดที่สูงเกินไป ในขณะที่ถึงแม้ว่าการใช้ยางแผ่นรมควัน 8 % ต่อน้ำหนักยางมะตอย จะทำให้สมบัติบางอย่าง เช่น การคืนตัวกลับ ค่า Toughness-Tenacity สูงกว่าการใช้ปริมาณยางแผ่นรมควัน 6 % ก็จริงอยู่ แต่พบว่าเกิดปัญหาในระหว่างการผสมเนื่องจากความหนืดที่สูงมาก จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ และการนำกำมะถันมาใช้ในการเชื่อมโยงยางแผ่นรมควัน โดยทำให้อยู่ในรูป Prevulcanized compound ก่อนนำมาผสมกับยางมะตอยนั้นก็ยังไม่เหมาะสม เนื่องจากจะเกิดการแข่งขันกันระหว่างปฏิกิริยาของกำมะถันกับยางมะตอยและกำมะถันกับยางแผ่นรมควัน ถ้าจะใช้ควรทำให้ยางแผ่นรมควันอยู่ในรูปที่มีการเชื่อมโยงแล้วให้มากที่สุดและเหลือกำมะถันที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาให้น้อยที่สุด หรืออาจจะใช้สารเชื่อมโยงตัวอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญมากในการปรับปรุงยางมะตอยด้วยยางแผ่นรมควัน คือ การทำให้ยางแผ่นรมควันสามารถกระจายตัวในยางมะตอยได้มากที่สุดจนมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อที่สมบัติที่ได้จะดีขึ้นและมีความสม่ำเสมอของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเครื่องผสมแรงเฉือนสูงที่ใช้เป็นเครื่องที่เหมาะสมสำหรับการใช้ผสมยางมะตอยกับพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมพลาสติก ทำให้การผสมกันระหว่างยางมะตอยกับยางแผ่นรมควันเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างยาก ควรมีการออกแบบเครื่องผสมระหว่างยางมะตอยกับยางแผ่นรมควันหรือยางธรรมชาติโดยตรง
2. ศึกษาเพิ่มเติมยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่เชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงชนิดอื่นนอกเหนือจากกำมะถัน เช่น เปอร์ออกไซด์
3. ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางแผ่นรมควันที่ได้ นอกจากจะมีการศึกษาสมบัติต่างๆในห้องปฏิบัติการแล้ว ควรมีการนำไปออกแบบคลุกผสมกับหินเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ ทางด้านวิศวกรรม และลาดถนนจริง

เอกสารอ้างอิง

1. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2544. สถิติยางประเทศไทย. ฉบับที่ 1. กรุงเทพฯ: ฝ่ายถ่ายทอดเทคโนโลยี สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.
2. ชัยวัฒน์ ศรีวรรณวัฒน์. 2543. “สารความรู้เกี่ยวกับยางมะตอย.” เส้นทางสัมพันธ์ บริษัททิบโก แอสฟัลต์จำกัด (มหาชน). 1(4) : 4-5.
3. ชิต ทศนกุล และ คณะ(2510). เอกสารรายงานจัดทำโดยกลุ่มประมวลผลและรายงานด้านยางของคณะกรรมการสำรวจการทำมาหากินของราษฎรในจังหวัดภาคใต้ 20 พฤศจิกายน 2510. สำนักงานนายกรัฐมนตรี.
4. Rogge, D.F., Terrel, R.L., and George, A.J. “Polymer Modified Hot Asphalt Oregon Experience.” *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
5. Fleckenstein, L.J., Mahboub, K. และ Allen, D.L. “Performance of Polymer Modified Asphalt Mixes in Kentucky.” *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
6. Serfass, J.P., Joly, A. และ Samanos, J. “SBS-Modified Asphalt for Surface Dressing- A Comparison Between Hot- Applied and Emulsified Binders.” *Polymer Modified Asphalt Biners. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
7. Newcomb, D.E., Stroup-Gardiner, M. and Epps, J.A. “Laboratory and Field Studies of Polyolefin and Latex Modified for Asphalt mixtures.” *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
8. Dhalaan, M.A., Balghunnain, F., Dhubaib, I.A. and Noureldin, S.A. “Field Trials with Polymer Modified Asphalt in Saudi Arabia” *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
9. Nair, N.R., Mathew, N.M., Thomas, S., Chatterjee, P. and Siddqui, M.A. “Physical and Rheological Characteristics of Liquid Natural Rubber Modified Bitumen” *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.

10. Narusawa, S., Kumisawa, S. and Asao, M. "Rubberised Bitumen from Rubber-Bitumen Masterbatch" *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
11. Fernando, M.J., and Nadarajah, M. "Use of Natural Rubber Latex in Road Construction" *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
12. Choques, F.S., and Ista, E.J. "The Determination of SBS, EVA and APP Polymer Modified in Bitumen." *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
13. Merlier, D., Jacqueline;Leveque, J. and Curchod, J. "The Elasticity of Rubber-Bitumen Binders for Used in Roads" *Rubber Chemistry and Technology*, Vol 37(2) : 1964, p 457-476.
14. Shelburne, T.E., and Sheppe, R.L. "Field Experiments with Powdered Rubber in Bituminous Road Construction" *Rubber Age*, Vol 66(5), p 531-538.
15. Ista, E.J. and Choquet, F.S. "The Determination of Bitumen and Recycle Tire Rubber Content in Rubberized Asphalt Road Mixtures." *Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108*, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
16. ไกรศรี ควงพัตรา, "Asphalt" เอกสารบริษัทเชลล์ ประเทศไทย, หน้า 4-7.
17. Arnold J. Hoiberg (Editor). Bituminous Materials: Asphalt, Tar, and Pitches, United State of America, John Wiley and Sons Inc, 1964.
18. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2541. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง มอก. 851-2532. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
19. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2536. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบเพนิเทรชันของวัสดุยางมะตอย มอก. 1201-2536. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
20. ASTM, D 5- 97, Test Method for Penetration of Bituminous Materials, 2000
21. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2536. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบความยืดดึงของวัสดุยางมะตอย มอก. 1202-2536. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
22. ASTM, D 113- 99, Test Method for Ductility of Bituminous Materials, 2000

23. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2537. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบปิโตรเลียมและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม จุดวาบไฟและจุดติดไฟโดยถ้วยเปิดคลีฟแลนด์ มอก. 1182 เล่ม 2-2537. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
24. ASTM, D 92- 98, Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup, 2000
25. ASTM, D 2042-097, Test Method for Solubility of Asphalt Material in Trichloroethylene, 2000
26. ASTM, D 1754-97, Test Method for Effect of Heat and Air on Asphalt Materials (Thin –Film Oven Test), 2000
27. Lewandowski, L.H., “ Polymer Modification of Paving Asphalt Binders” The Goodyear Tire & Rubber Company, 142 Goodyear Boulevard, Akron, OH 44305.
28. ASTM, D 4402- 87, Viscosity Determination of Unfilled Asphalt Using the Brookfield Thermosel Apparatus, 2000
29. กระทรวงอุตสาหกรรม 2537. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุยางมะตอยโดยใช้เครื่องวงแหวนกับลูกปืน มอก. 1216-2537. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
30. ASTM, D 36-95, Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring and Ball Apparatus), 2000
31. ASTM, D 6084- 97, Test Method for Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer, 2000
32. ASTM, D 5801- 95, Test Method for Toughness-Tenacity of Bituminous Materials, 2000
33. พลชิต บัวแก้ว. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. เอกสารประกอบการบรรยายในการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียาง กรกฎาคม 2541.
34. บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย และ ปรีชา ป็องภัย, สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตรยาง. 1. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
35. อิทธิพล แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนเรื่องพอลิเมอร์ฟิสิกส์. 1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์

ตารางที่ ก-1 มาตรฐานยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt cement, PMA) กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

| Item No | Properties | Unit | Min | Max | Test Method |
|---------|---|----------|--------------|--------|-------------|
| 1. | Penetration at 25°C, 100 gm 5 sec | 0.1 mm | 60 | 70 | ASTM D5 |
| 2. | Softening point, Ring and Ball | °C | 70 | - | ASTM D36 |
| 3. | Penetration Index | - | +3 | - | NLT-181 |
| 4. | Ductility at 13°C, 5 cm/min | cm | 55 | - | ASTM D113 |
| 5. | Torsional recovery at 25°C | % | 70 | - | ASTM D6084 |
| 6. | Float Test at 60°C | sec | 3,000 | - | ASTM D 139 |
| 7. | Toughness/Tenacity test at 25°C | | | | ASTM D5801 |
| | Toughness | Kg.cm | 200 | - | |
| | Tenacity | Kg.cm | 100 | - | |
| 8. | Brookfield viscosity, shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21 at 135°C at 165°C | CP CP | 1,000 300 | - - | ASTM D 4402 |
| 9. | Storage stability at 165°C, 120 hrs Difference in softening point | °C | - | 5 | NLT-328 |
| 10. | Density at 25°C | g/cc | 1.00 | 1.05 | ASTM D70 |
| 11. | Flash point, Cleveland Open Cup | °C | 220 | - | ASTM D92 |
| 12. | Solubility in Trichloroethylene | % wt | 99.0 | - | ASTM D2042 |
| | Test on Residue form Thin Film Oven Test | | | | |
| 13. | Weight loss | % wt | - | 0.5 | ASTM D17 |
| 14. | Retained Penetration at 25°C | % | 70 | - | ASTM D5 |
| 15. | Variation in Softening point | °C | 4 | 6 | ASTM D36 |
| 16. | Ductility at 13°C, 5 cm/min | Cm | 40 | - | ASTM D113 |
| 17. | Torsional recovery at 25°C | % | 60 | - | ASTM D6084 |

ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบสมบัติยางมะตอย

1. วิธีทดสอบเพนิเทรชัน (Penetration) มาตรฐานการทดสอบเทียบเท่า ASTM D 5

1.1 ภาวะการทดสอบ

- หากมิได้กำหนดเป็นอย่างอื่น ให้ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้น้ำหนักกด 100 กรัม เป็นเวลา 5 วินาที สำหรับการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์เฉพาะอาจใช้ภาวะทดสอบอื่น

1.2 เครื่องมือ

- เครื่องทดสอบเพนิเทรชันที่วัดได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร ประกอบด้วยแกนที่เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวตั้งโดยมีความเสียดทานน้อยที่สุด มวลของแกนเท่ากับ 47.5 ± 0.05 กรัม และ 100 ± 0.05 กรัม กดเพื่อให้ได้น้ำหนักกด 100 กรัม และ 200 กรัม ตามลำดับ แกนและเข็มมาตรฐานต้องทำมุมประมาณ 90 องศากับพื้นราบที่ใช้เป็นฐานรองรับตัวอย่าง แกนต้องถอดออกได้โดยง่ายเพื่อตรวจสอบมวล
- เข็มมาตรฐาน ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมชั้นคุณภาพ 440 -C หรือเทียบเท่า ชุบแข็งให้มีความแข็งรอกเวลล์อยู่ในช่วง 54 ถึง 60 HRC ยางประมาณ 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 ถึง 1.02 มิลลิเมตร ปลายข้างหนึ่งแหลมเป็นรูปกรวยมีมุม 8 องศา 40 ลิปดา ถึง 9 องศา 40 ลิปดา แกนของตัวเข็มและแหลมเป็นแกนเดียวกัน โดยจะมีความคลาดเคลื่อนระหว่างแกนเข็มกับแกนของปลายแหลม ณ ภาคตัดระหว่างตัวเข็มกับปลายแหลมไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร ปลายสุดตัดตรงและตั้งฉากกับแกนเข็มและคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 องศา เส้นผ่าศูนย์กลางของปลายตัด 0.14 ถึง 0.16 มิลลิเมตร ปลายของเข็มมาตรฐานต้องเรียบและปราศจากเสี้ยน ความขรุขระเฉลี่ยของผิวด้านข้างปลายเข็มอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.3 ไมโครเมตร เมื่อทดสอบตาม American National Standard B 46.1 โคนเข็มมาตรฐานฝังในตัวยัดทำด้วยทองเหลือง หรือเหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 ± 0.05 มิลลิเมตร ยาว $38 \pm$ มิลลิเมตร โดยให้แกนของเข็มและแกนของตัวยัดเป็นแกนเดียวกัน ให้เข็มโผล่ออกจากตัวยัด 40 ถึง 45 มิลลิเมตร มวลรวมของเข็มและตัวยัดเท่ากับ 2.5 ± 0.05 กรัม
- ถ้วยใส่ตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยโลหะหรือแก้วมีขนาดดังนี้

1. ถ้วยขนาดเล็กสำหรับวัสดุที่มีค่าเพนิเทรชันต่ำกว่า 200

| | | |
|----------------------|----|-----------|
| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง | 55 | มิลลิเมตร |
| ความลึก | 35 | มิลลิเมตร |
2. ถ้วยขนาดเล็กสำหรับวัสดุที่มีค่าเพนิเทรชันในช่วง 200 ถึง 350

| | | |
|----------------------|----|-----------|
| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง | 70 | มิลลิเมตร |
| ความลึก | 45 | มิลลิเมตร |

- อ่างน้ำ จูไม่น้อยกว่า 100 ml สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 ± 0.1 °C หรืออุณหภูมิทดสอบที่กำหนด มีชั้นโปรงสำหรับวางตัวอย่างทดสอบสูงจากก้นอ่างไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร และเมื่อวางตัวอย่างทดสอบแล้ว น้ำต้องท่วมตัวอย่างทดสอบไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร ถ้าทดสอบในอ่างต้องจัดหาชั้นสำหรับวางเครื่องทดสอบเพนิเทรชันที่มั่นคงแข็งแรงพอ
- อ่างเล็ก จูอย่างน้อย 350 ml และลึกพอที่จะให้น้ำท่วมตัวอย่างทดสอบ อ่างนี้ต้องมีที่รองรับใส่ด้วยตัวอย่างทดสอบเพื่อให้อยู่กับที่และไม่โคลงเคลงในขณะที่ทดสอบ
- นาฬิกาตั้งเวลา อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 วินาที คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 0.1 วินาทีต่อวินาที
- เทอร์โมมิเตอร์ซึ่งได้สอบเทียบแล้ว ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 °C

1.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- ทำตัวอย่างให้เหลวพอเทได้โดยให้ความร้อนไม่เกิน 30 นาที และต้องคนตัวอย่างสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้จุดใดจุดหนึ่งร้อนมากเกินไป ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ และไม่ให้อุณหภูมิของตัวอย่างสูงกว่าจุดอ่อนตัวเกิน 90 °C
- เทตัวอย่างลงในถ้วยตัวอย่างทดสอบ 2 ใบ ให้มีปริมาณมากพอ โดยเมื่อเย็นลงจนถึงอุณหภูมิที่จะทดสอบและคาดว่าเมื่อเริ่มทดสอบแล้วปลายเข็มมาตรฐานจะอยู่เหนือก้นถ้วยอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร
- ปิดด้วยใส่ตัวอย่างทดสอบเพื่อป้องกันฝุ่นปล่องให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ถึง 1.5 ชั่วโมง สำหรับถ้วยขนาดเล็ก และ 1.5 ถึง 2 ชั่วโมง สำหรับถ้วยขนาดใหญ่ แล้วแช่ด้วยทดสอบลงในอ่างน้ำซึ่งมีอุณหภูมิ 25 ± 0.1 °C หรืออุณหภูมิทดสอบที่กำหนดเป็นเวลา 1 ถึง 1.5 ชั่วโมง สำหรับถ้วยขนาดเล็ก และ 1.5 ถึง 2 ชั่วโมง สำหรับถ้วยขนาดใหญ่

1.4 วิธีทดสอบ

- ตรวจสอบแกนและปลอกบังคับของเครื่องทดสอบเพนิเทรชันให้แน่ใจว่าไม่มีน้ำและวัตถุอื่นติดอยู่ ใช้โทลูอีนหรือตัวทำละลายอื่นที่เหมาะสมทำความสะอาดเข็มมาตรฐาน ใช้ผ้าสะอาดเช็ดให้แห้ง ประกอบเข็มมาตรฐานเข้ากับแกนของเครื่องทดสอบเพนิเทรชัน หากมิได้มีกำหนดเป็นอย่างอื่นให้เพิ่มน้ำหนักเป็น 50 กรัมบนแกนเพื่อให้ได้น้ำหนักรวม 100 ± 0.1 กรัม วิธีทดสอบมี 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 เครื่องทดสอบเพนิเทรชันอยู่ในอ่างน้ำใส่ตัวอย่างทดสอบอยู่ในฐานรองรับตัวอย่างซึ่งจมอยู่ในน้ำ

วิธีที่ 2 เครื่องทดสอบเพนิเทรชันอยู่ภายนอกอ่างน้ำด้วยใส่ตัวอย่างทดสอบอยู่ในอ่างเล็กซึ่งมีน้ำจากอ่างน้ำอยู่เต็ม และอ่างเล็กวางอยู่บนฐานรองรับตัวอย่าง

ทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ต้องปรับเครื่องทดสอบให้เข็มมาตรฐานที่มีน้ำหนักกดตามที่ระบุสัมพันธ์กับผิวของตัวอย่างพอดี ทำได้โดยปรับปลายเข็มให้ชนกับปลายเข็มนั้น ซึ่งเกิดจากการสะท้อนมาจากผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ เมื่อตั้งเครื่องทดสอบให้รับแสงสว่างให้พอเหมาะ บันทึกค่าที่อ่านได้จากสเกลบนหน้าปัดเครื่องทดสอบ หรือตั้งเข็มชี้บนสเกลไว้ที่ศูนย์แล้วปล่อยให้เข็มมาตรฐานที่มกลงในตัวอย่างทดสอบและจมลงไปเรื่อยๆ เป็นเวลา 5 วินาที หรือเวลาอื่นที่กำหนดให้ทดสอบ และอ่านค่าระยะทางที่เข็มมาตรฐานจมลงในตัวอย่างทดสอบให้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร ถ้าด้วยใส่ตัวอย่างเคลื่อนที่ขณะที่ปล่อยให้เข็มมาตรฐานจมลงในตัวอย่างที่ทดสอบ ให้ยกเลิกการทดสอบแล้วทดสอบใหม่

- ให้ทดสอบตัวอย่างทดสอบแต่ละตัวอย่างอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยให้ตำแหน่งที่ทดสอบแต่ละตำแหน่งอยู่ห่างกันอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร ถ้าใช้อ่างเล็ก เมื่อทดสอบเสร็จแต่ละครั้งให้นำอ่างเล็กและด้วยใส่ตัวอย่างทดสอบไปปรับอุณหภูมิในอ่างน้ำ ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ก่อนที่จะทดสอบใหม่ทุกครั้ง การทดสอบแต่ละครั้งให้ใช้เข็มมาตรฐานสะอาด แต่ถ้าค่าเพนิเทรชันมากกว่า 200 ขึ้นไป ให้ใช้เข็มใหม่ทุกครั้งที่ทดสอบ และทิ้งเข็มไว้ในตัวอย่างทดสอบหลังการทดสอบแต่ละตำแหน่ง จนกระทั่งได้จำนวนค่าเพนิเทรชันตามต้องการ

1.5 การรายงานผล

- ให้รายงานค่าเฉลี่ยจากการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง เป็นเลขจำนวนเต็มและระบุภาวะทดสอบ (อุณหภูมิ น้ำหนักกด และเวลา) ด้วย โดยที่ผลต่างระหว่างค่าเพนิเทรชันสูงสุดและต่ำสุดของตัวอย่างทดสอบนั้นไม่เกินที่กำหนด

2 การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening point) มาตรฐานการทดสอบเทียบเท่า ASTM D36

2.1 ภาวะการทดสอบ

- การทดสอบนี้กำหนดการหาจุดอ่อนตัวของยางมะตอยในช่วง 30 ถึง 157 °C โดยใช้เครื่องวงแหวนกับลูกปืน และแช่ในน้ำกลั่น (ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 80 °C) ในกลีเซอริน (ช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 157 °C)

2.2 เครื่องมือ

- เครื่องวงแหวนกับลูกปืนประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้
 1. วงแหวนทองเหลืองมีบ่าในตั้งฉาก 2 วง
 2. ลูกปืนเหล็กกล้าเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร และหนัก 3.5 ± 0.05 กรัม จำนวน 2 ลูก
 3. ตัวนำศูนย์ (Ball – centering guide) บังคับลูกปืนให้อยู่ในวงแหวน ทำด้วยทองเหลืองจำนวน 2 อัน
 4. แผ่นทองเหลืองราบและเรียบขนาดประมาณ 50 มิลลิเมตร x 75 มิลลิเมตร สำหรับรองรับวงแหวนขณะเตรียมตัวอย่างทดสอบ
 5. ชุดวางวงแหวน (Ring holder and assembly) ทำด้วยทองเหลือง ผิวล่างของวงแหวนสูงจากผิวบนของแผ่นรองรับ (Bottom plate) 25 มิลลิเมตร และผิวล่างของแผ่นรองรับนี้อยู่สูงจากแก้วทนความร้อน 16 ± 3 มิลลิเมตร
 6. แก้วทนความร้อน จุประมาณ 800 ml เส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 85 มิลลิเมตร และลึกไม่น้อยกว่า 120 มิลลิเมตร
 7. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

2.3 สารเคมี

1. น้ำกลั่น ควรใช้น้ำกลั่นใหม่ๆ เพื่อไม่ให้มีฟองอากาศเกาะบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ

2. กลีเซอริน

3. สารกันติด ไซซันซิลิโคน กลีเซอริน ผสมกับ เดกซ์ทีน ทัลคัมหรือ ดินขาว ใช้ ฉาบแผ่นทองเหลืองเพื่อกันตัวอย่างทดสอบติดแผ่นทองเหลือง

2.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- ให้ความร้อนกับตัวอย่างเป็นเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมงจนเหลวพอเทได้ ขณะให้ความร้อนคนตัวอย่างบ่อยๆ เพื่อไม่ให้ส่วนใดส่วนหนึ่งร้อนมากเกินไป ระวังอย่าให้มี ฟองอากาศและอุณหภูมิของตัวอย่างต้องไม่สูงกว่าจุดอ่อนตัวที่คาดไว้เกิน 110°C หากจำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างทดสอบเพิ่มเติมหลังจากที่ตัวอย่างนี้เย็นลงแล้ว ให้ใช้ ตัวอย่างใหม่ ห้ามนำตัวอย่างนี้ไปหลอมแล้วใช้ซ้ำอีก
- ให้ความร้อนกับวงแหวนจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของตัวอย่าง แล้ววางบน แผ่นทองเหลืองที่เคลือบสารกันติดไว้แล้ว เทตัวอย่างลงในวงแหวนทั้งสอง จนปริ่ม จวนล้น
- ปลดตัวอย่างที่ทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เย็นกว่าจุดอ่อนตัวที่คาดไว้อย่างน้อย 10°C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที และต้องทดสอบให้เสร็จภายในเวลา 4 ชั่วโมง นับตั้งแต่เทตัวอย่างลงในวงแหวน
- หลังจากที่ตัวอย่างเย็นแล้ว ใช้มีดหรือพายที่ทำให้ร้อนเล็กน้อย ปาดส่วนเกินที่ปาก วงแหวนออก

2.5 วิธีทดสอบ

- เลือกของเหลวที่จะใช้เป็นตัวกลางแช่ตัวอย่างทดสอบและเทอร์โมมิเตอร์ ให้เหมาะสมกับจุดอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบดังนี้
 1. ถ้าจุดอ่อนตัวอยู่ในช่วง 30 ถึง 80°C ให้ใช้น้ำกลั่นอุณหภูมิเริ่มต้น $5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ และเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -2 ถึง 80°C
 2. ถ้าจุดอ่อนตัวมากกว่า 80 ถึง 157°C ให้ใช้กลีเซอรินอุณหภูมิเริ่มต้น $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 30 ถึง 200°C
- จัดวงแหวนทั้งสอง เทอร์โมมิเตอร์ และตัวนำศูนย์เข้าตำแหน่ง เดิมของเหลวที่ได้ ปรับอุณหภูมิตามที่กำหนดแล้ว ลงในแก้วทนความร้อน ให้มีระดับสูงประมาณ 105 ± 3 มิลลิเมตร หย่อนลูกปืน 2 ลูกลงไปที่ยกแก้วทนความร้อน แช่แก้วทนความร้อน ในอ่างที่ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้ของเหลวในแก้วทนความร้อนมีอุณหภูมิคงที่ที่

อุณหภูมิเริ่มต้น เป็นเวลา 15 นาที ยกเครื่องทดสอบออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ใช้ปากคีบคีบลูกปืนที่แช่ไว้นั้น วางลงในช่องตัวนำศูนย์

- เพิ่มอุณหภูมิของเหลวในแก้วทนความร้อนให้สูงขึ้นด้วยอัตรา 5°C ต่อ นาที

2.6 การรายงานผล

- ในกรณีที่ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่มีช่วงอุณหภูมิ -2 ถึง 80°C ให้รายงานค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิให้ละเอียดถึง 0.2°C
- ในกรณีที่ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่มีช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 200°C ให้รายงานค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิให้ละเอียดถึง 0.5°C
- ให้ระบุชนิดของของเหลวที่ใช้
- การหาจุดอ่อนตัวโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง จะได้จุดอ่อนตัวต่ำกว่าเมื่อใช้กลีเซอริน ความแตกต่างนี้จะมีความสำคัญเมื่อจุดอ่อนตัวสูงกว่า 80°C เล็กน้อย การเปลี่ยนตัวกลางจากน้ำเป็นกลีเซอริน สำหรับการหาจุดอ่อนตัวที่สูงกว่า 80°C จะได้ค่าไม่ต่อเนื่อง
- ในกรณีที่ใช้กลีเซอริน จุดอ่อนตัวที่ยอมรับให้รายงานได้ต้องไม่ต่ำกว่า 84.5°C ถ้าจุดอ่อนตัวในกลีเซอรินต่ำกว่านี้ให้แปลงเป็นจุดอ่อนตัวในน้ำ โดยลบจุดอ่อนตัวที่หาได้ด้วย 4.2°C ในกรณีการทดสอบตัดสินหรือในกรณีที่ค่าเฉลี่ยจุดอ่อนตัว 2 ค่าที่หาได้ในกลีเซอรินต่ำกว่า 80°C ให้ทดสอบซ้ำในน้ำ
- การแปลงจุดอ่อนตัวที่มากกว่า 80°C เล็กน้อย จากในน้ำเป็นกลีเซอริน ให้บวกจุดอ่อนตัวที่หาได้ด้วย 4.2°C กรณีการทดสอบตัดสินหรือในกรณีที่ค่าเฉลี่ยจุดอ่อนตัว 2 ค่าที่หาได้ในน้ำมีค่า 85.0°C ให้ทดสอบซ้ำในกลีเซอริน

3.วิธีทดสอบความยืดดึง (Ductility) มาตรฐานการทดสอบเทียบเท่า D 113

3.1 นิยาม

- ความยืดดึง หมายถึง สมบัติของวัตถุขึงเมื่อถูกดึงให้ยืดในอัตราเร็วและอุณหภูมิที่กำหนด วัดเป็นความยืดสูงสุดของชิ้นทดสอบก่อนขาดออกจากกัน

3.2 เครื่องมือ

- แบบหล่อชิ้นทดสอบทำด้วยทองเหลือง ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ส่วนข้าง A และ A' และส่วนปลาย B และ B' ซึ่งทำหน้าที่เป็นหัวจับชิ้นทดสอบด้วย มีขนาดและลักษณะดังต่อไปนี้

| | |
|--|--------------------|
| ความยาวทั้งหมด | 75 ± 0.5 มิลลิเมตร |
| ระยะระหว่างหัวจับขึ้นทดสอบ | 30 ± 0.2 มิลลิเมตร |
| ความกว้างที่ปากหัวจับขึ้นงาน | 20 ± 0.2 มิลลิเมตร |
| ความกว้างของส่วนที่แคบที่สุด | |
| (ที่ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นทดสอบ) | 10 ± 0.1 มิลลิเมตร |
| ความหนา | 10 ± 0.1 มิลลิเมตร |

- อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ ที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่อุณหภูมิที่ทดสอบ โดยอุณหภูมิของน้ำจะเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 0.1 °C จากอุณหภูมิที่ทดสอบ จุไม่น้อยกว่า 10 ml มีชั้นโปร่งสำหรับวางขึ้นทดสอบสูงจากกันอ่างไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร น้ำที่ใช้ต้องปราศจากน้ำมันหรือ สิ่งสกปรก
- เครื่องตั้งขึ้นทดสอบ สามารถตั้งขึ้นทดสอบโดยปราศจากการสัมผัสขณะขึ้นทดสอบจมอยู่ในน้ำลึกจากผิวน้ำและสูงจากกันอ่างไม่น้อยกว่า 250 มิลลิเมตร ด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ 5 เซนติเมตรต่อนาที และคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ร้อยละ 5
- เทอร์โมมิเตอร์ ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -8 ถึง 32 °C
- แผ่นทองเหลืองเรียบ สำหรับรองรับแบบหล่อ
- ตะแกรง 300 ไมโครเมตร

3.3 การเตรียมขึ้นทดสอบ

- เคลือบสารกันติด เช่น กลีเซอรินผสมกับเดกซ์ทีน ทัลคัม หรือดินขาว ลงบนแผ่นทองเหลือง และส่วนข้างของแบบหล่อด้านในแล้วประกอบแบบหล่อทั้งหมดลงบนแผ่นทองเหลือง ก่อนเคลือบสารกันติด ถ้าสังเกตเห็นแผ่นทองเหลืองและแบบหล่อสกปรกให้ทำความสะอาดก่อน
- ให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิค่าสุดที่จะทำให้ตัวอย่างเหลวจนเทได้ ขณะให้ความร้อนคนตัวอย่างบ่อยๆ เพื่อไม่ให้ส่วนใดส่วนหนึ่งร้อนมากเกินไป
- กรองตัวอย่างด้วยตะแกรงและคนตัวอย่างให้ทั่วอีกครั้งก่อนเทลงแบบ เทตัวอย่างเป็นสายเล็กๆ จากปลายข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่งไปมา จนตัวอย่างปริ่มจนล้น ระหว่างเทตัวอย่างต้องระวังไม่ให้แต่ละส่วนของหล่อเคลื่อนที่
- ปลดปล่อยให้ขึ้นทดสอบในแบบหล่อเย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 ถึง 40 นาที แล้วนำแบบหล่อพร้อมขึ้นทดสอบไปแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ ซึ่งมีอุณหภูมิ 25 ± 0.5 °C เป็นเวลาประมาณ 30 นาที นำขึ้นทดสอบพร้อมแบบหล่อขึ้นจากน้ำ ใช้มีดหรือ

พายที่ทำให้ร้อนเล็กน้อยขาดส่วนเกินออกจากแบบหล่อให้ผิวหน้าของชิ้นทดสอบเต็มพอดีขอบแบบหล่อ

- แخذชิ้นทดสอบพร้อมแบบหล่อในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิอีกครั้งเป็นเวลา 85 ถึง 95 นาที ยกขึ้นจากน้ำ เอาแผ่นทองเหลืองและแผ่นข้างทั้งสองของแบบหล่อออก แล้วนำไปทดสอบทันที

3.4 วิธีทดสอบ

- หากมิได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น ให้ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 ± 0.5 °C จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน
- สวมปลายหัวจับชิ้นทดสอบทั้งสองข้างเข้ากับขอ หรือสลักของเครื่องดึงชิ้นทดสอบ แล้วเดินเครื่อง ดึงหัวจับชิ้นทดสอบออกจากกันด้วยอัตราเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที ในขณะที่ชิ้นทดสอบอยู่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 ± 0.5 °C จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน
- อ่านระยะยึดทันทีที่ชิ้นทดสอบขาด เป็นเซนติเมตร ผลการทดสอบจะถือว่าเป็นปกติเมื่อชิ้นทดสอบยึดออกเป็นเส้นเล็กมากจนขาดออกจากกัน
- ถ้าในระหว่างดึงชิ้นทดสอบเส้นของชิ้นทดสอบลอยขึ้นมาถึงผิวน้ำ หรือจมลงก้นอ่างน้ำ ให้ถือว่า การทดสอบนั้นใช้ไม่ได้ ต้องยกเลิกแล้วทดสอบใหม่ โดยปรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของน้ำในอ่างด้วยการเติมเมทานอลในกรณีที่เส้นของชิ้นทดสอบลอยขึ้นหรือเติมโซเดียมคลอไรด์ในกรณีที่เส้นของชิ้นทดสอบจมลง

4. วิธีทดสอบหาความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer มาตรฐานการทดสอบเทียบเท่า ASTM D 4402

- นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เทตัวอย่างลงในแบบ 8-10 กรัม
- เปิดสวิตช์ของ Thermosel
- ตั้งอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ที่ 135 °C
- นำตัวอย่างที่อยู่ในแบบใส่ลงในกระบอก Thermosel จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ 135 °C
- เลื่อนเข็มเบอร์ 21 จุ่มลงในตัวอย่าง หมุนด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที และอัตราความเหนียว 18.6 ต่อวินาที ทดลองเป็นเวลา 90 นาที

- บันทึกค่าความหนืดบนหน้าปัดของเครื่องทุก 2 นาที
- เลือกค่าความหนืดที่คงที่ที่สุดหรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

5. วิธีทดสอบการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) มาตรฐานการทดสอบเทียบเท่า

ASTM D 6084

5.1 ขอบเขต

- การทดสอบนี้จะใช้ถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดแน่นอน ซึ่งมีตัวอย่างบรรจุอยู่เต็มจนถึงระดับที่วัดได้ โดยมีแกนโลหะทรงกระบอกที่ปิดอยู่กึ่งกลางตัวอย่าง จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) เพื่อให้ได้อุณหภูมิคงที่ เมื่อปิดแกนโลหะทรงกระบอกไป 180 องศา จากตำแหน่งเดิม และปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที วัดมุมที่หมุนกลับของแกนทรงกระบอกจากปลายเข็มชี้ที่สเกลอ่านมุม

5.2 เครื่องมือและวัสดุ

- แท่งบิด เป็น โลหะก้านสนิมที่ใช้ในการบิด (แรงบิดตัว)
- อ่างทดสอบ เป็นอ่างโลหะไร้สนิมมีสเกลรูปครึ่งวงกลม 180 องศา และมีขีดบอกองศาได้ 0 ถึง 180
- ถ้วยใส่ตัวอย่างพร้อมขาตั้งแท่งบิด ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างทดสอบ
- เข็มชี้ ใช้สำหรับวัดองศาของการคืนตัวกลับของตัวอย่าง
- อ่างน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 ± 0.1 °C และเทอร์โมมิเตอร์สำหรับควบคุมอุณหภูมิของอ่างน้ำ
- นาฬิกาจับเวลา ใช้จับเวลาในช่วง 30 นาที ± 1 วินาที

5.3 การเตรียมเครื่องมือทดสอบ

- ให้ความร้อนกับตัวอย่างและคอนอย่างสม่ำเสมอ หรือจนกระทั่งเหลวพอเทได้ (ปกติไม่เกิน 110 °C เหนือจุดที่คาดว่าจะเป็จุดอ่อนตัว) และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบต้องเป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่มีการปะปนของวัสดุอื่นๆ
- เทตัวอย่างลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง จนกระทั่งถึงขีดระดับที่ทำเครื่องหมายไว้หรือจนกระทั่งแท่งบิดจมอยู่ในตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิเมตร แล้วเลื่อนถ้วยใส่ตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางแท่งบิด
- ปล่อยตัวอย่างไว้ให้เย็นเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

ที่มีอุณหภูมิคงที่ 25 ± 0.1 °C เป็นเวลา 90 นาทีให้ระดับน้ำสูงกว่าตัวอย่างอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร

- เมื่อครบกำหนด 90 นาที นำตัวอย่างพร้อมแท่งบีดใส่ลงในอ่างทดสอบ และใส่เข็มชี้ลงในแท่งบีด ล็อกแท่งบีดให้แน่น ปรับปลายเข็มชี้ไปที่ 180 องศา ล็อกเข็มชี้ให้แน่น เสียบแขนหมุนลงในรูของแท่งบีด หมุนแท่งบีดไป 180 องศา ให้ปลายเข็มชี้ที่ 0 องศา ภายในช่วงเวลา 3-5 วินาที ทันทีที่ถึงมุม 0 องศา ให้เอาแขนหมุนออกทันที และเริ่มจับเวลา หลังจากปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที \pm 15 วินาที ให้อ่านค่ามุมที่เข็มชี้บนสเกลที่หมุนไปจาก 0 ถึง 180 องศา ค่าที่อ่านได้นี้เป็นค่าคืนตัวกลับของตัวอย่าง หน่วยเป็นองศาหมุน

5.4 ผลการทดสอบ

- รายงานผลที่ได้จากผลการทดสอบนี้ เป็นเปอร์เซ็นต์ขององศาที่หมุนกลับ เมื่อเทียบกับการหมุนไป 180 องศาในตอนแรก

$$R = \frac{L \times 100}{180}$$

$$180$$

R = การคืนตัวกลับของการบีด

L = มุมของการคืนตัวกลับ

6. วิธีทดสอบ Toughness – Tenacity มาตรฐานการทดสอบเทียบเท่า ASTM D 5801

6.1 ขอบเขต

- การทดสอบนี้เป็นการตรวจสอบสมบัติการยืดออกได้ (Tensile property) ของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA)

6.2 คำจำกัดความ

- Toughness หมายถึง พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบขาดอย่างสมบูรณ์ภายใต้แรงเค้น (Stress) และในแผนผัง (Diagram) ของแรงกับการยืดตัว (Force vs Elongation) ได้แก่ พื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นกราฟ (Curve)
- Tenacity หมายถึง งาน (Work) ที่กระทำจากจุดรับแรง (Load) สูงสุดจนกระทั่งตัวอย่างขาด และในแผนผัง (Diagram) ของแรงกับการยืดตัว (Force vs Elongation) ได้แก่ พื้นที่ภายใต้เส้นกราฟทางด้านขวาของเส้นสัมผัส (Tangent line)

6.3 หลักการ

- ชุ่มหัวครึ่งวงกลมลงในตัวอย่าง และภาคได้สภาวะที่กำหนด ยึดติดด้วยความเร็วคงที่ จนขาดจากกัน

6.4 เครื่องมือ

- เครื่องทดสอบ ต้องสามารถควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่ออกให้คงที่ด้วยความเร็ว 500 ± 5 มิลลิเมตรต่อนาที และเครื่องบันทึกค่าของแรงและการยึดตัว
- แบบหล่อขึ้นทดสอบ ประกอบด้วย
 1. ถ้วยใส่ตัวอย่าง
 2. หัวดึง (Tensile head)
 3. ขาสำหรับยึดหัวดึง (Spider assembly)
 4. เกลียวปรับระดับ (Lowering screw) ใช้สำหรับปรับระดับหัวดึง
- อ่างน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 25 ± 0.1 °C
- ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 163 ± 5 °C
- เทอร์โมมิเตอร์
- อุปกรณ์ยึดติดแบบ (Mold) ให้ติดกับส่วนของเครื่องทดสอบ

6.5 การเตรียมเครื่องมือ

- นำถ้วยใส่ตัวอย่าง หัวดึง ขาสำหรับยึดหัวดึง และเกลียวปรับระดับ ไปอบที่อุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิตัวอย่างนาน 15 นาที

6.6 วิธีการทดสอบ

- ให้ความร้อนกับตัวอย่างโดยการอบ และคนอย่างสม่ำเสมอ หรือจนกระทั่งเหลวพอเทได้ (ปกติไม่เกิน 80 °C เหนือจุดที่คาดว่าจะเป็จุดอ่อนตัว)
- เทตัวอย่างประมาณ 50 กรัม ลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง หย่อนหัวดึงลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง โดยให้ระดับตัวอย่างอยู่ที่เส้นผ่าศูนย์กลางของครึ่งวงกลม การปรับระดับหัวดึงทำได้โดย ปรับเกลียวปรับระดับ
- ปล่อยให้ตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องนาน 60 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิคงที่ 25 ± 0.1 °C นาน 60 นาที
- เมื่อครบกำหนด 60 นาที นำตัวอย่าง (ให้มีน้ำอยู่ในชั้นทดสอบ เพื่อจะช่วยให้ความเย็นลดลงจากผิวของตัวอย่างในขณะทดสอบ) ทำการทดสอบ โดยการยึดติดด้วยความเร็วคงที่ จนตัวอย่างแยกขาดจากกัน

6.7 การคำนวณ

- ในการวิเคราะห์กราฟ เส้นสัมผัสจะถูกขยายออกไปทางด้านขวาของกราฟ ระหว่างแรงและการยืดตัว ในขณะที่เส้นกราฟ (Curve) จะลดลงจากค่าสูงสุด ตรวจสอบดังนี้
 1. วัดค่า Toughness ได้แก่พื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นกราฟ หน่วยเป็น kg.cm
 2. วัดค่า Tenacity ได้แก่ พื้นที่ภายใต้เส้นกราฟ ทางด้านขวาของเส้นสัมผัส หน่วยเป็น kg.cm

6.8 การรายงานผลการทดสอบ

- ให้รายงานผลอุณหภูมิขณะทดสอบ ถ้าไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่นให้ทดสอบที่ 25 °C
- ประเภทของการขาด มีดังนี้
 1. Cohesive เป็นการขาดของตัวอย่าง
 2. Adhesive เป็นการขาดโดยการหลุดออกจาก หัวดึง (Tensile head)
 3. ถ้าการขาดที่นอกเหนือจากนี้ ให้รายงานเพิ่ม
- ค่า Toughness
- ค่า Tenacity

ประวัติผู้เขียน

นางสาว จรัสศรี พันธุ์ไม้ เกิดเมื่อวันที่ 5 กันยายน 2509 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตร
วิชาการพยาบาลและผดุงครรภ์ จากวิทยาลัยพยาบาลนราธิวาส ปีการศึกษา 2529 สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2538 ปัจจุบันรับราชการใน
ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ ศูนย์วิจัยยางมะเขือเทศ สังกัดกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตร
และสหกรณ์