สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยเส้นใยไนลอน 6 จากส่วนเสริมแรง (พลาย) ของยางรถยนต์ใช้แล้ว

T043883

นายปฏิเวธ ล้ำเลิศ
นายวราวิทย์ รัตนพฤติกุล
นายวีรชาติ ภักดีโชติ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43883
วัน, เดือน, ปี 17 ต.ค. 2545
.b.....
.i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Property Modification of Asphalt Cement by Waste Nylon-6 Fibers from Ply of Worm-out Tire

Mr. Pativat Lamlert

Mr. Warawit Rattanaprutikun

Mr. Veerachart Pakdeechote

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

For the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติยางมะตอย ด้วยเส้นใยไนลอน 6 จากส่วนเสริมแรง (พลาย) ของยางรถยนต์ใช้แล้ว
นักศึกษา	นายปฏิเวธ ล้ำเลิศ
	นายวราวิทย์ รัตนพฤติกุล
	นายวีรชาติ ภักดีโชติ
ภาควิชา	เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด
	นายไกรศรี ดวงพัตรา

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) หัวหน้าภาคเคมี

คณะกรรมการผู้ตรวจสอบโครงงานพิเศษ

.....
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) ประธานกรรมการ

.....
(ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์) กรรมการ

.....
(ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด) กรรมการ

.....
(นายไกรศรี ดวงพัตรา) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยเส้นใยไนลอน 6 จากส่วนเสริมแรง (พลาย) ของยางรถยนต์ใช้แล้ว

นักศึกษา นายปฏิเวธ ล้ำเลิศ
นายวราวิทย์ รัตนพฤติกุล
นายวีรชาติ ภักดีโชติ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นายไกรศรี ดวงพัตรา
บริษัท BAMCO จำกัด

ภาควิชา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

งายวิจัยนี้เป็นการศึกษา เพื่อปรับปรุงสมบัติยางมะตอย (Asphalt cement, AC 60/70) ด้วยเส้นใยไนลอน 6 ที่เหลือจากส่วนของพลาย (Ply) ของยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เส้นใยธรรมชาติยูคาลิปตัสและผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Filler) เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการให้กับยางมะตอย โดยทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอย เช่น ปริมาณเส้นใยที่เติม ปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ และผลของสารเชื่อมโยง ในการทดลองนี้ ยางมะตอยและเส้นใยจะถูกผสมเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องปั่นกวนแบบใบพัดด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 180 ^{o}C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) การยืดตัว (Ductility) ความหนาแน่น (Density) จุดอ่อนตัว (Softening point) ค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) ความหนืดแบบบรู๊คฟิลด์ (Brookfield viscosity) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทั้งเส้นใยไนลอนและเส้นใยยูคาลิปตัสในยางมะตอยจะทำให้ยางมะตอยแข็งขึ้นมีค่าเพนนิเตรชันลดลง ยืดตัวได้น้อยลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าการคืนตัวกลับลดลง ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมในการผสมกับยางมะตอย คือ 1 phr เมื่อผสมผงยางรถยนต์ในยางมะตอยร่วมกับเส้นใยไนลอน 6 ปริมาณ1phr พบว่าไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อสมบัติของยางมะตอย จากการใช้สารเชื่อมโยงกรดแนฟทานิก ในปริมาณ 1phr พบว่าทำให้ค่าเพนนิเตรชันเพิ่มขึ้น จุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น การยืดตัวเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Property Modification of Asphalt Cement by Waste Nylon-6 Fibers from Ply of Worm-out Tire
Student Names	Mr. Pativat Lamlert
	Mr. Warawit Rattanaprutikun
	Mr. Veerachart Pakdeechote
Special Project Advisor	Assi.Prof.Dr.Ittipol Jangchud
Special Project Co – Advisor	Mr. Krisri Duangpatra
	BAMCO Co.,Ltd
Department	Chemistry
Academic Year	2001

Abstract

This research work involved a modification of asphalt cement (AC 60/70) properties by adding waste Nylon-6 fibers from ply of worm-out tire, Eucalyptus fibers and ambient-ground rubber tire (GRT). The fibers and GRT can act as filler. Some parameters affecting asphalt properties were studied in this work including amount of fiber loading, GRT loading and effect of a crosslinking agent. In this work, the fibers were mixed with the AC 60/70 by using a high-speed mixer at rotor speed of 2000 rpm at the temperature of 180 $^{\circ}$C for 1 hour. The examples were tested for some properties, such as, the penetration, ductility, density, softening point, torsional recovery and brookfield viscosity. As amount of both fibers increased, the penetration, ductility and torsional recovery of the asphalt were decreased, whereas the density were increased. The results were revealed that amount of GRT had insignificant effect on the asphalt properties since low amount of GRT was used. By adding napthanic acid (1 phr) as the crosslinking agent to improve the interfacial bonding, the penetration, softening point and ductility were increased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานพิเศษนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ คุณไกรศรี ดวงพัตรา บริษัท BAMCO Ltd ที่ได้ให้คำปรึกษาและความอนุเคราะห์ยางมะตอย AC 60/70 ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงงานพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณบุญหาญ อู่อุดมยิ่ง บริษัท Seang Thai Rubber Factory CO.,Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) และเส้นใยไนลอน 6

ขอขอบพระคุณ คุณทัศนีย์ สุวรรณมงคล และเจ้าหน้าที่ฝ่ายตรวจสอบวิเคราะห์ยางมะตอย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และ ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงงานฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ของขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และความช่วยเหลือให้คำปรึกษางานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณบรรณารักษ์และเจ้าหน้าที่ศูนย์สารสนเทศ กรมวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านเอกสาร ที่จำเป็นสำหรับการดำเนินโครงงานพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจโดยตลอด

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากซึ่งมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายปฏิเวธ ล้ำเลิศ
นายวราวิทย์ รัตนพฤติกุล
นายวีรชาติ ภักดีโชติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ	3
1.5 สถานที่ทำการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (Asphalt)	4
2.1.1 องค์ประกอบของแอสฟัลต์ (Asphalt Composition)	5
2.1.2 น้ำมันดิบที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์ (Crude Oil)	6
2.1.3 กระบวนการผลิตแอสฟัลต์ในอุตสาหกรรม	6
2.1.4 แอสฟัลต์สำหรับงานก่อสร้างผิวจราจร (Paving asphalt materials)	6
2.1.5 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของถนนราดยางมะตอย	10
2.1.6 อันตรายที่เกิดจากยางมะตอยและการป้องกัน	11
2.1.7 ข้อควรระวังในการปฏิบัติงาน	11
2.2 เส้นใย (Fibers)	12
2.3 ยางรถยนต์ (Tire)	17
2.3.1 ผงยางจากยางรถยนต์ (Ground rubber tire;GRT)	18
2.4 การทำงานของเครื่องมือ	21
2.5 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	32
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	34
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	34
3.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	40
4.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอย (AC60/70) ต่อเส้นใยไนลอน 6	40
4.2 ศึกษาปริมาณของเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีต่อสมบัติของยางมะตอย	46
4.3 การศึกษาปริมาณของผงยางจากยางรถยนต์ที่มีผลต่อสมบัติยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน 1phr	51
4.4 การศึกษาผลของสารเชื่องโยงที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอย	57
4.5 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM)	59
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในยางมะตอยที่ได้จากแหล่งต่างกัน 4 แหล่ง	10
ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของไนลอน 6	13
ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางมะตอยที่ใช้ในการทดลอง	32
ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน	39
ตารางที่ 4-1 การเปรียบเทียบระหว่างยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 1phr ที่มีการเติมสารเชื่อมโยง 1phr และที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมโยง	57
ตารางที่ 4-2 การเปรียบเทียบระหว่างยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส 1phr ที่มีการเติมสารเชื่อมโยง 1phr และที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมโยง	58
ตารางที่ ก-1 มาตรฐานยางมะตอยปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt cement,PMA) ที่ใช้ราดถนนของกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพถ่ายขยะยางรถยนต์ 2

รูปที่ 2.1 โครงสร้างไมเซลล์ของยางมะตอย 7

รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบการปูถนน 10

รูปที่ 2.3 เส้นกราฟความเค้น- ความเครียด ของเส้นใยชนิดต่าง ๆ 12

รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์ nylon 6 13

รูปที่ 2.5 ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส 14

รูปที่ 2.6 รูปถ่ายลักษณะของเส้นใยไม้ยูคาลิปตัส TMP ขนาดต่าง ๆ 16

รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางรถยนต์ 17

รูปที่ 2.8 เครื่องบดยางที่อุณหภูมิต่ำ 19

รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตผงยางชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง 20

รูปที่ 2.10 (ก) ส่วนประกอบของเครื่องเพนนิโตรมิเตอร์ 22

รูปที่ 2.10 (ข) การทำงานของเครื่องเพนนิโตรมิเตอร์ 22

รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบการยืดตัว 24

รูปที่ 2.12 แบบสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบการยืดตัว 24

รูปที่ 2.13 (ก) วงแหวน 25

รูปที่ 2.13 (ข) แท่นยึดวงแหวน 26

รูปที่ 2.13 (ค) เครื่องจัดลูกกลมให้อยู่ตรงกลาง 26

รูปที่ 2.13 (ง) ส่วนประกอบของเครื่อง Ring-and-ball 27

รูปที่ 2.14 เครื่อง Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance 28

รูปที่ 3.1 เส้นใยไนลอน 6 33

รูปที่ 3.2 เส้นใยยูคาลิปตัส 33

รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอน6กับค่าเพนนิเตรชัน ของยางมะตอย AC60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 6 ที่ปริมาณต่าง ๆ 41

รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอน 6 กับค่าจุดอ่อนตัว ของยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน 6 ที่ปริมาณต่าง ๆ 42

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอน 6 กับค่าความหนาแน่น ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 6 ที่ปริมาณต่าง ๆ 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยไนลอน 6 กับค่าความหนืดของยางมะตอย AC 60/70 ผสมกับเส้นใยไนลอน 6 ที่ปริมาณต่าง ๆ 44

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอน 6 กับค่าการยืดตัว ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมกับเส้นใยไนลอน 6 ที่ปริมาณต่าง ๆ 45

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าเพนนิเตรชัน ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ 46

รูปที่4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับจุดอ่อนตัว ของยางมะตอยAC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่างๆ 47

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าการยืดตัว ของยางมะตอย AC60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ 48

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าการคืนตัวกลับ ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ 49

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าความหนืด ของยางมะ ตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ 50

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ กับค่าเพนนิเตรชัน ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 6 1 phr ที่ปริมาณต่าง ๆ 51

รูปที่4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์กับจุดอ่อนตัว ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 6 1 phr ที่ปริมาณต่าง ๆ 52

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์กับค่าการดึงยืด ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 6 1 phr ที่ปริมาณต่าง ๆ 53

รูปที่4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ กับค่าการคืนตัวกลับ ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 6 1 phr ที่ปริมาณต่าง ๆ 54

รูปที่4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์กับค่าความหนืด ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 6 1 phr ที่ปริมาณต่าง ๆ 55

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายเส้นใยไนลอน 6 59

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายการจัดเรียงตัวเส้นใยไนลอน 6 ในยางมะตอย 60

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายเส้นใยยูคาลิปตัส 61

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายการจัดเรียงตัวของเส้นใยยูคาลิปตัสในยางมะตอย 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันการขนส่งทางบกเป็นเส้นทางที่มีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน และยังคงมีความต้องการเส้นทางการขนส่งใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นโดยอาจอยู่ในรูปการขยายเส้นทาง หรือสร้างถนนเพิ่มขึ้นเพื่อกระจายความเจริญไปสู่ชนบท ดังนั้นจึงมีความต้องการวัสดุในการก่อสร้างปริมาณมาก วัสดุที่สำคัญที่สุดในการสร้างถนนคือยางมะตอยซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ปูที่ผิวทางเนื่องจาก มีความเรียบมีสมบัติเชิงกลที่ดี และให้ความสะดวกสบายขณะรถวิ่ง ประกอบกับปริมาณการใช้ท้องถนนโดยเฉพาะรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ยางมะตอยที่ใช้ทำผิวถนนมีความเสียหายอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการซ่อมแซมแต่ละครั้งต้องใช้งบประมาณจำนวนมาก ซึ่งลักษณะความเสียหายของยางมะตอยที่พบได้แก่

1. *ผิวทางแตกร้าว (Thermal and Fatigue cracking)* คือปรากฏการณ์ที่เกิดรอยร้าวขึ้นที่ผิวหน้าของยางมะตอย มีสาเหตุจากผิวทางมีสภาพแข็งเปราะ ขาดความยืดหยุ่น เมื่อมีน้ำหนักกระทำซ้ำ ๆ (Repeat load) หรืออยู่ภายใต้การใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจึงเกิดรอยแตกร้าวขึ้นที่ผิวทาง

2. *ผิวทางเยิ้ม (Bleeding)* คือปรากฏการณ์ที่ยางมะตอยซึมขึ้นมารวมกันที่ผิวทาง เมื่อได้รับความร้อนยางที่ซึมขึ้นมาจะไหลเยิ้มทำให้ผิวทางลื่น สาเหตุเกิดจากยางมะตอยที่ใช้มีความหนืด (Viscosity) สูง และความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) ต่ำ

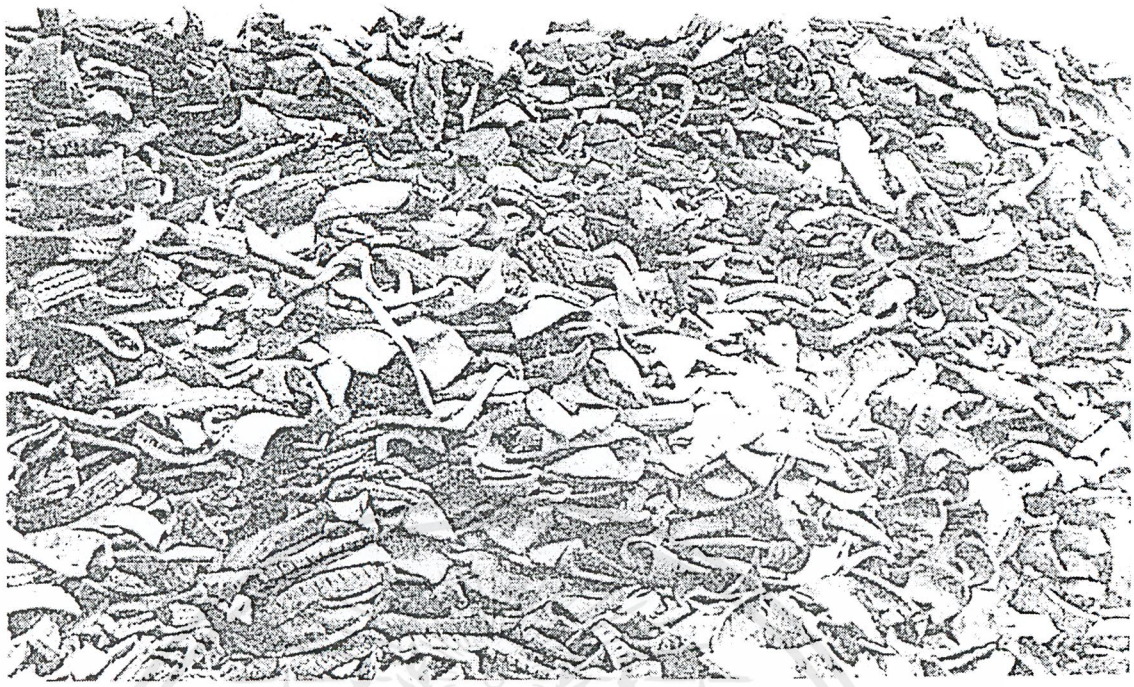
3. *ผิวทางเกิดร่องล้อ (Rutting)* คือปรากฏการณ์ที่ผิวยางมะตอยยุบตัวเป็นร่องตามแนวล้อที่แล่นทับ ส่วนมากมักเกิดหลังจากผิวทางมียางเยิ้ม สาเหตุเกิดจากผิวทางไม่แข็งแรงและขาดสมบัติยืดหยุ่น (Elastic) ทำให้เกิดการยุบตัวแบบไม่กลับคืนเมื่อได้รับแรง

4. *ผิวหน้าทางหลุดเป็นข้าวตัง (Reveling)* คือปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อน เนื่องจากวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของยางมะตอยถูกแรงเฉือน (Shear force) จากล้อรถตะกรุยจนหลุดออกทำให้ผิวทางมีลักษณะขรุขระ

เนื่องจากยางรถยนต์มีอายุการใช้งานจำกัด และยางเป็นวัสดุประกอบจำพวกเทอร์โมเซตที่มีวัสดุหลายประเภทเป็นองค์ประกอบ เช่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ เขม่าดำ เส้นใยสังเคราะห์เสริมแรง เส้นใยโลหะ ฯลฯ ทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดยางรถยนต์ใช้แล้ว

โครงงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ประโยชน์เศษเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เช่น เส้นใยสังเคราะห์เสริมแรงหรือพลาย (Ply) จำพวกเส้นใยไนลอน 6 (Nylon 6) และผงจากยางรถยนต์ (Ground rubber tire,GRT) ใช้เป็นสารเติมแต่ง (Additives) ในยางมะตอย (Asphalt,AC60/70) สำหรับงานราดถนน หรือวัสดุอุดรอยรั่ว (Sealant) เพื่อเพิ่มสมบัติบางประการของยางมะตอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ภาพถ่ายขยะยางรถยนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอยที่ทำการเติมเส้นใยที่เหลือจากยางรถยนต์ใช้แล้ว
2. เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอยที่ทำการเติมเส้นใยยูคาลิปตัส
3. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยเส้นใย เช่น ชนิดของเส้นใย ปริมาณการเติม ผลของการเติมสารเพิ่มเนื้อผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) และสารเชื่อมโยง เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไนลอน จากยางรถยนต์ใช้แล้ว และเส้นใยยูคาลิปตัส ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอย
2. ศึกษาผลของสมบัติของยางมะตอยที่ผ่านการปรับปรุงเช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) การยืดตัว (Ductility) ความหนืดแบบบรู๊คฟิลด์ (Brookfield viscosity) จุดอ่อนตัว (Softening point)
3. ศึกษาผลของสารเติมแต่ง (Additives) ได้แก่ผงยางจากยางรถยนต์ (Ground rubber tire,GRT) และสารเชื่อมโยง ที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอยผสมเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ

1. สามารถปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยให้ดีขึ้น โดยใช้เส้นใยจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว รวมทั้งเส้นใยที่เหลือใช้อื่น ๆ เช่น เส้นใยธรรมชาติยูคาลิปตัส
2. ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ของการผสมเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอย
3. เพิ่มการใช้ประโยชน์เส้นใยจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วและเส้นใยที่เหลือใช้อื่น ๆ เพื่อลดต้นทุนการผลิต
4. สามารถใช้ความรู้ที่ได้ในการประยุกต์ในการเติมเส้นใยหรือวัสดุเสริมแรงชนิดอื่นกับยางมะตอย

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ชั้น5 อาคารจุฬาภรณวลัยลักษณ์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ห้องวิเคราะห์ยางมะตอย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม
3. ห้องปฏิบัติการเคมี บริษัท BAMCO Limited นิคมอุตสาหกรรมบางปู จังหวัดสมุทรปราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (Asphalt) [1]

ยางมะตอยเป็นสารผสมที่มีโมเลกุลสลับซับซ้อนมีส่วนประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปมากเหมือนกับน้ำหนักโมเลกุลของมัน

แอสฟัลต์ หรือยางมะตอย เป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งมนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่สมัยโบราณ และได้มีการใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญ 4 ประการคือ

1. สมบัติในการยึดประสาน (Cementing)
2. สมบัติในการป้องกันน้ำซึม (Water proofing)
3. สมบัติที่เปลี่ยนเป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง (Thermoplastic)
4. สมบัติในการทนกรดและด่างอ่อน ๆ

สมบัติทั้ง 4 ดังกล่าวทำให้แอสฟัลต์ถูกนำไปใช้ในงานต่าง ๆ เช่น

- ใช้เป็นตัวประสานเพื่อเกาะยึด (Cementing and Binding) วัสดุต่าง ๆ เช่น หินย่อย ในการทำผิวจราจรต่าง ๆ
- ใช้สำหรับลาดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ผิวหน้าของเขื่อนดิน เพื่อป้องกันน้ำซึม และป้องกันการกัดกร่อนของผิวดิน
- ในวงการอุตสาหกรรม แอสฟัลต์ได้ถูกนำไปใช้ในการต่าง ๆ มากมาย เช่น ทำสีกันสนิม ทำกระดาษป้องกันความชื้น ผสมกับทรายทำอิฐสำหรับงานก่อสร้าง ทำสารพอกใต้ท้องรถยนต์เพื่อเก็บเสียงและกันสนิม ทำแบตเตอรี่รถยนต์ที่เราใช้กันอยู่ก็มีแอสฟัลต์เป็นส่วนผสมอยู่ด้วย

แอสฟัลต์ได้ถูกนำมาใช้ในงานสร้างถนนเป็นแห่งแรกที่นครปารีสเมื่อปี ค.ศ. 1852 โดยใช้หินแอสฟัลต์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เรียกว่า “Val de Traverse Rock” ซึ่งเป็นหินปูนที่มีแอสฟัลต์ซึมอยู่อิ่มตัว พบในประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ถนนสายแรกที่สร้างในอเมริกาที่เมือง New York เมื่อปี ค.ศ. 1870 ก็สร้างด้วยหินแอสฟัลต์ ในปัจจุบันนี้ทั่วโลกได้ผลิตและนำแอสฟัลต์มาใช้งานไม่น้อยกว่าปีละ 40,000,000 เมตริกตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 องค์ประกอบของแอสฟัลต์ (Asphalt Composition)

แอสฟัลต์ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงได้มีการผลิตแอสฟัลต์ชนิดต่าง ๆ มากมาย เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะและสภาพของงานที่นำแอสฟัลต์ไปใช้แอสฟัลต์บางชนิดจะนิ่มหรือเหลวในอุณหภูมิปกติ บางชนิดต้องให้ความร้อนถึง 200-300 องศาฟาเรนไฮต์ จึงจะเหลว บางชนิดต้องให้ความร้อนสูงถึง 400 องศาฟาเรนไฮต์ จึงจะเหลวพอเพื่อนำไปใช้งานได้ ส่วนบางชนิดในอุณหภูมิปกติจะแข็งจนเปราะ จนสามารถบดให้เป็นผงละเอียดได้

ส่วนประกอบส่วนใหญ่ สามารถที่จะแยกให้แตกต่างกันออกไปมี 3 ส่วน คือ

1.) สารอิ่มตัว (Saturates)

ส่วนประกอบนี้จะเป็นพวกที่มีความเหนียวคล้ายจารบี ไม่มีสี จะมีพวกพาราฟินิก (Parafinic materials) มีบางส่วนเป็นวงแหวนแนฟทานิก (Napthanic ring) และบางส่วนเป็นโครงสร้างสายโซ่ตรง (Long straight chains) หรือ แวกซ์ (Wax) ซึ่งสามารถที่จะตกผลึกได้ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300-2000

2.) สารอะโรมาติก (Aromatics)

ส่วนประกอบนี้เป็นน้ำมันเหนียวที่มีสีน้ำตาลดำและมีโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic rings) ต่อกันเป็นจำนวนมาก มีคาร์บอน 25-30 เปอร์เซ็นต์อยู่ในโครงสร้างอะโรมาติก โดยจะมีจำนวนของ O_2 และ N_2 น้อย จนถึง 3 เปอร์เซ็นต์ มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 300-2000

3.) สารอะโรมาติกมีขั้ว (Polar Aromatics)

ส่วนประกอบนี้จะประกอบด้วยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกเชื่อมต่อกัน (Condensed aromatic rings) ในโมเลกุล (ประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน) และคาร์บอนอะตอมที่ยังเหลือจะมีโครงสร้างเป็นแนฟทานิกและพาราฟินิก ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนและออกซิเจนประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์และมีกำมะถันประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ และยังมีสารที่มีโครงสร้างที่มีขั้วไฟฟ้า (ประจุ) อยู่ด้วย เช่น หมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอนิลและอะมิโน ส่วนต่าง ๆ เหล่านี้จะมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับการละลายในสารนอร์มัล-เฮปเทน (n-Heptane) ดังนี้

3.1) เรซิน (Resin) ตัวเรซินเหล่านี้จะละลายใน n-Heptane จะเป็นส่วนที่เป็นของแข็งสีดำ ซึ่งจะอ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-50000 และสัดส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) จะเป็น 1:1

3.2) แอสฟัลต์ทีน (Asphaltenes) ส่วนนี้จะไม่ละลายใน n-Heptane จะเป็นสีเทาดำ และจะสลายตัวเมื่อถูกความร้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-100000 และสัดส่วนของอะตอม H/C จะเป็น 1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 น้ำมันดิบที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์ (Crude Oil)

แอสฟัลต์เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมชนิดหนึ่งซึ่งผลิตจากน้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันดิบที่ได้มาจากแหล่งต่าง ๆ ทั่วโลกนั้นจะมีลักษณะและส่วนประกอบแตกต่างกันออกไป ซึ่งแยกความแตกต่างที่เด่นชัดออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

- Parafin (or wax) Base Crude
- Mixed Base Crude
- Asphalt Base Crude

2.1.3 กระบวนการผลิตแอสฟัลต์ในอุตสาหกรรม

การเตรียมหรือกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมโดยทั่ว ๆ ไปนั้น จะมีวิธีการโดยย่อคือ น้ำมันดิบจากถังเก็บจะได้รับความร้อนที่ Tube heater จนได้อุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วไหลผ่านต่อไปยังหอคอยสำหรับกลั่น (Tower distillation) ที่หอคอยนี้ความดันภายในจะถูกลดลงจนเป็นสุญญากาศ ซึ่งทำให้ส่วนประกอบของน้ำมันดิบที่เบากว่าหรือระเหยง่ายกว่าจะระเหยเป็นไอลอยกันเป็นชั้น ๆ ตามความหนักเบา และไอเหล่านี้เมื่อถูกลดอุณหภูมิลงก็จะกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลวที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยแยกชนิดกัน ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการต่อไปก็จะได้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซโซลีน (Gasoline) น้ำมันดีเซล (Diesel oil) เป็นต้น ส่วนที่เหลือจากการกลั่นซึ่งเป็นส่วนที่ข้นและระเหยยากนั้นจะเหลืออยู่ที่ก้น ซึ่งส่วนที่เหลือนี้อาจใช้เป็นน้ำมันเตา (Residual fuel oil) ได้

ส่วนที่เหลือจากการกลั่น ยังมีลักษณะค่อนข้างเหลวเนื่องจากยังมีส่วนที่เป็นน้ำมัน ต่าง ๆ เหลืออยู่พอสมควร ถ้าน้ำมันเหล่านี้ถูกแยกออกไป ส่วนที่เหลือก็คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) ที่จะมีความข้นเหลว หรือแข็งมากน้อยตามต้องการได้โดยให้ผ่านกระบวนการผลิตที่ต่างกัน

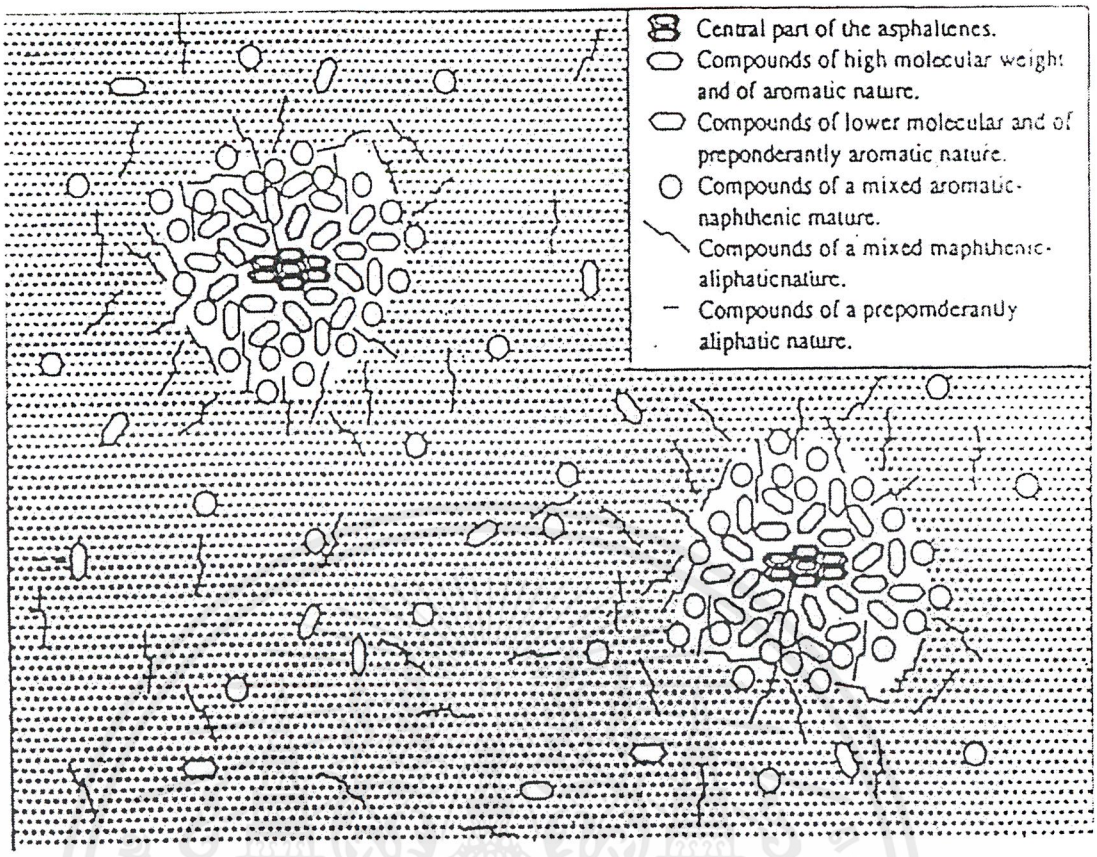
กระบวนการผลิตแอสฟัลต์ในอุตสาหกรรมปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีคือ

1.) รีดักชันแบบสุญญากาศ (Vacuum reduction)
2.) ออกซิเดชัน (Oxidation)
3.) โพรเพนพรีซิพริเตชัน (Propane precipitation)

2.1.4 แอสฟัลต์สำหรับงานก่อสร้างผิวจราจร (Paving asphalt materials)

แอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวจราจรนั้นมีชนิดต่าง ๆ มากมาย ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของงานและสภาพของดินฟ้าอากาศของแต่ละแห่ง ตลอดจนให้เหมาะกับวิธีการนำไปใช้งาน โดยแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cements) และ แอสฟัลต์ชนิดเหลว (Liquid aphalt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างไมเซลล์ของยางมะตอย[2]

1. แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement; AC) [1]

แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานสร้างผิวจราจรนั้นจะมีลักษณะครึ่งอ่อนครึ่งแข็งที่อุณหภูมิธรรมดา และมีเกรดต่าง ๆ กันตั้งแต่แข็งมากจนถึงอ่อนมาก ในการนำไปใช้งานจะต้องต้มให้เหลวให้ได้อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาฟาเรนไฮต์ ทั่ว ๆ ไปแอสฟัลต์ซีเมนต์แบ่งเป็นเกรดต่าง ๆ ตามความอ่อนแข็งได้ดังนี้

ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ คือ จำนวนหน่วยของระยะ (ซึ่งหนึ่งหน่วย = 0.1 มิลลิเมตร) ที่เข็มมาตรฐานถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัมจมลงไปในยางมะตอยในระยะเวลา 5 วินาที ในขณะที่ยางมะตอยมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น

เข็มจมลงไปเป็นระยะทาง 10 มิลลิเมตร จะมีค่า = 10/0.1

= 100 เพนิเตรชัน

จะเห็นได้ว่ายางมะตอยที่แข็งกว่าจะมีค่าเพนนิเตรชันน้อย เนื่องจากเข็มจมลงไปได้น้อย และยางมะตอยที่อ่อนจะมีค่าเพนนิเตรชันสูง การที่ผลิตยางมะตอยให้มีค่าเพนนิเตรชันหลายค่านั้นก็เพื่อให้สามารถเลือกใช้เหมาะสมกับงานและสภาพของดินฟ้าอากาศของแต่ละส่วนของโลก เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภูมิภาคที่มีอากาศร้อนก็จะใช้ยางมะตอยที่มี เพนนิเตรชันเกรด 60/70 ในประเทศหนาวอาจจะใช้เพนนิเตรชันเกรด 120/150 เป็นต้น

ยางมะตอยแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามผู้ผลิต คือ

1. เกรดเพนนิเตรชัน (Penetration grade) เป็นยางมะตอยที่ได้จากการกลั่นน้ำมันโดยตรง ตัวอย่างเช่น AC 60/70 หรือ Mexphalt 60/70

AC หมายถึง ยางมะตอย (Asphalt cement) มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี

60/70 คือ ค่าเพนนิเตรชันอยู่ในช่วง 60-70 เป็นตัวเลขที่ใช้บอกความแข็งของยาง วัดโดยเข็มมาตรฐานและมีน้ำหนักกด 100 กรัมกดลงไปบนเนื้อยางที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที หน่วยของค่าที่วัดได้เป็น 1/10 มิลลิเมตร ดังนั้นยาง 60/70 คือยางที่ถูกเข็มกดจมลงไปได้ 6-7 มิลลิเมตร

2. โบลนเกรด หรือเกรดเป่า (Blown grade) คือยางที่ได้จากการนำเอายางเกรดเพนนิเตรชันไปเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส ทำให้สมบัติของยางดีขึ้นในด้านการทนความร้อนและความแข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในยางมะตอย โดยทำให้ได้แอสฟัลต์ทีนในเนื้อยางสูงขึ้น ได้แก่ R.85/25, R.85/40, R.11/10, R.155/7

- R หมายถึง ส่วนที่คล้ายยาง (Rubbery) บ่งบอกว่ามีคุณสมบัติบางส่วนคล้ายยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์
- 85 หมายถึง ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดอ่อนตัวของยาง (Softening point) ในหน่วยองศาเซลเซียส วัดโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบวงแหวนและลูกบอล (Ring and ball test) นั่นคือยางชนิดนี้จะอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส
- 25 หมายถึง ค่าเพนนิเตรชันเฉลี่ยของยาง วัดโดยใช้เข็มมาตรฐานที่มีน้ำหนัก 100 กรัมกดลงไปบนเนื้อยางที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที หน่วยของค่าที่วัดได้เป็น 1/10 มิลลิเมตร นั่นคือยางชนิดนี้จะถูกเข็มกดลงไปได้ลึก 2-3 มิลลิเมตร

3. ฮาร์ดเกรดหรือเกรดแข็ง (Hard grade) คือยางที่ได้จากการนำเอายางเกรดเพนนิเตรชันไปกลั่นต่อภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้ส่วนที่เบากว่าระเหยออกไปได้อีก จึงทำให้ยางที่ได้มีความแข็งมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น H 80/90 โดย

- H หมายถึง แข็ง (Hard)
- 80/90 หมายถึง ค่าอุณหภูมิที่อ่อนตัว ยางชนิดนี้จะอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส ส่วนค่าความแข็งอยู่ในช่วง 6-12 คือ เข็มกดได้ 0.6-1.2 มิลลิเมตรเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตยางมะตอย (Manufacture bitumen)

ผลิตโดยการกลั่นภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งพวกน้ำมันเบาได้ออกไปก่อนแล้วโดยการกลั่นที่สุญญากาศ จะช่วยให้ได้พวกน้ำมันก๊าดมากขึ้น จนกระทั่งได้ยางมะตอยตามคุณสมบัติที่ต้องการ

ยางที่มีจุดอ่อนตัวสูง สามารถทำได้โดยการเป่าลมผ่านไปในยางมะตอยที่ร้อนประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส การออกซิเดชันหรือกระบวนการเป่าลมลงไปจะทำให้ได้ยางที่มีแอสฟัลต์ทีนสูง และสามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงขึ้น ซึ่งยางมะตอยชนิดนี้จะเอาไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น

2. แอสฟัลต์ชนิดเหลว (Liquid asphalt) [1]

2.1 ยางมะตอยชนิดคัทแบค (Cutback asphalt) : ยางมะตอยชนิดนี้ทำได้โดยการผสมยางมะตอยกับสารละลาย ได้แก่น้ำมันต่าง ๆ เช่น Naptha, Kerosine และ Diesel น้ำมันต่าง ๆ ที่ใช้เป็นสารละลายนี้เรียกรวม ๆ ว่า Diluent หรือ Cutter stock ยางมะตอยชนิดนี้มักนิยมเรียกว่า Cutback asphalt ซึ่งจะมีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิธรรมดา โดยนำไปใช้งานในการทำผิวจราจรเมื่อราดแล้วน้ำมันที่ใช้ผสมจะระเหยไปคงเหลือแต่ยางมะตอย ยางมะตอยชนิดนี้ในอุณหภูมิปกติจะมีลักษณะข้นจนกระทั่งเหลว ซึ่งจะข้นเหลวมากน้อยขึ้นอยู่กับเกรดเพนิเตรชันของยางมะตอยที่นำมาใช้เป็นส่วนผสม

2.2 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวเร็ว (Rapid curing liquid asphalt (RC)) : เป็นยางมะตอยประเภทที่แข็งตัวเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมระหว่างแนพทา (Naptha) ซึ่งเป็นน้ำมันระเหยง่ายกับยางมะตอยเกรด 80/100 หรือ 60/70 ยางมะตอยชนิด RC นี้ทั่ว ๆ ไปใช้ในงานก่อสร้างประเภท Surface treatment, Penetration macadum และ Open-grade paving mixtures และชนิดของสารละลายตลอดจนสัดส่วนระหว่างสารละลายกับยางมะตอย ยางมะตอยประเภทที่เหลวมาก อาจนำไปใช้งานได้โดยตรงโดยไม่ต้องให้ความร้อนหรือให้เพียงเล็กน้อยก็พอ สำหรับประเภทที่เหลวปานกลาง โดยปกติให้ความร้อน 150-200 องศาฟาเรนไฮต์ ก็เพียงพอในการทำงาน สำหรับชนิดที่ข้นมากอาจจะต้องให้ความร้อนระหว่าง 200-350 องศาฟาเรนไฮต์

2.3 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวปานกลาง (Medium curing liquid asphalt (MC)) : ยางมะตอยชนิดนี้ได้โดยผสมยางมะตอยเกรด 60/70 กับ เคโรซีน (Kerosine) ฉะนั้นยางมะตอยชนิดนี้จึงใช้เวลาในการแข็งตัว (Setting) นานกว่า RC เนื่องจาก Kerosine แข็งตัวได้ช้ากว่า Naptha ยางมะตอยชนิดนี้ใช้ในงานที่ต้องการระยะเวลาบ่มตัวนาน เช่น ในการทำงาน Prime coat ทั้งนี้เพื่อให้ MC มีโอกาสซึมลงไปใต้พื้นผิว Base course ได้มากหรือใช้ในการทำ Dense grade paving mixtures

2.4 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวช้า (Slow curing liquid asphalt (SC)) : โดยทั่วไปผลิตได้โดยผสมยางมะตอยเกรด 60/70 Penetration กับพวกน้ำมันหนัก เช่น Diesel fuel oil หรืออาจผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

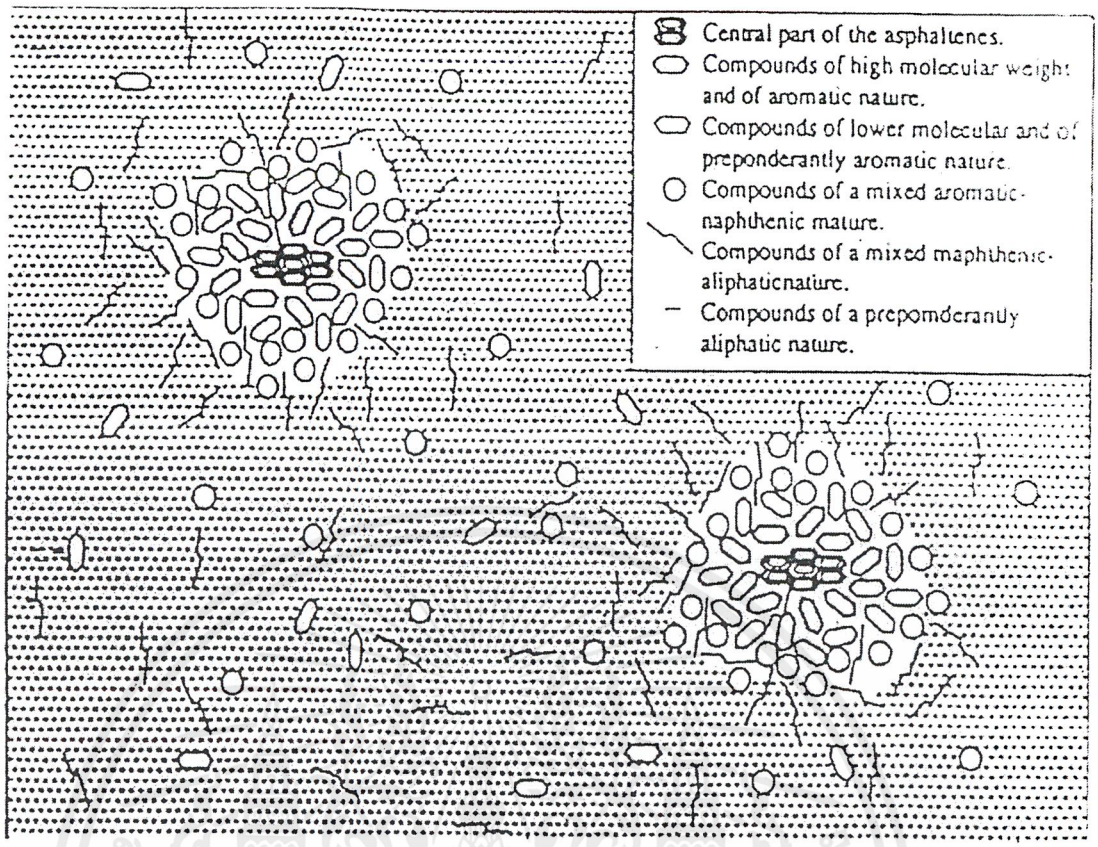
จากการกลั่นโดยตรง SC asphalt นิยมเรียกว่า "Road oil" เป็นชนิดที่ไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

2.5 ยางมะตอยชนิดอิมัลชัน (Emulsified asphalts or asphalt emulsion) : คือยางมะตอยที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ หรือคอลลอยด์ (Colloid particles) โดยกระจายอยู่ในน้ำที่มีอิมัลซิฟายเออร์ (Emulsifier) ผสมอยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 2.1 แสดงธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในยางมะตอยที่ได้จากแหล่งต่างกัน 4 แหล่ง

Element	Mexican blend	Louisiana	Boston	California
Carbon	83.77%	85.78%	82.90%	86.77%
Hydrogen	9.910%	10.19%	10.45%	10.93%
Nitrogen	0.280%	0.260%	0.780%	1.100%
Sulfur	5.250%	3.410%	5.430%	0.990%
Oxygen	0.770%	0.360%	0.290%	0.200%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างไมเซลล์ของยางมะตอย[2]

1. แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement; AC) [1]

แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานสร้างผิวจราจรนั้นจะมีลักษณะครึ่งอ่อนครึ่งแข็งที่อุณหภูมิธรรมดา และมีเกรดต่าง ๆ กันตั้งแต่แข็งมากจนถึงอ่อนมาก ในการนำไปใช้งานจะต้องต้มให้เหลวให้ได้อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาฟาเรนไฮต์ ทั่ว ๆ ไปแอสฟัลต์ซีเมนต์แบ่งเป็นเกรดต่าง ๆ ตามความอ่อนแข็งได้ดังนี้

ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ คือ จำนวนหน่วยของระยะ (ซึ่งหนึ่งหน่วย = 0.1 มิลลิเมตร) ที่เข็มมาตรฐานถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัมจมลงไปในยางมะตอยในระยะเวลา 5 วินาที ในขณะที่ยางมะตอยมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น

เข็มจมลงไปเป็นระยะทาง 10 มิลลิเมตร จะมีค่า = 10/0.1

= 100 เพนิเตรชัน

จะเห็นได้ว่ายางมะตอยที่แข็งกว่าจะมีค่าเพนนิเตรชันน้อย เนื่องจากเข็มจมลงไปได้น้อย และยางมะตอยที่อ่อนจะมีค่าเพนนิเตรชันสูง การที่ผลิตยางมะตอยให้มีค่าเพนนิเตรชันหลายค่านั้นก็เพื่อให้สามารถเลือกใช้เหมาะสมกับงานและสภาพของดินฟ้าอากาศของแต่ละส่วนของโลก เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภูมิภาคที่มีอากาศร้อนก็จะใช้ยางมะตอยที่มี เพนนิเตรชันเกรด 60/70 ในประเทศหนาวอาจจะใช้เพนนิเตรชันเกรด 120/150 เป็นต้น

ยางมะตอยแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามผู้ผลิต คือ

1. เกรดเพนนิเตรชัน (Penetration grade) เป็นยางมะตอยที่ได้จากการกลั่นน้ำมันโดยตรง ตัวอย่างเช่น AC 60/70 หรือ Mexphalt 60/70

AC หมายถึง ยางมะตอย (Asphalt cement) มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี

60/70 คือ ค่าเพนนิเตรชันอยู่ในช่วง 60-70 เป็นตัวเลขที่ใช้บอกความแข็งของยาง วัดโดยเข็มมาตรฐานและมีน้ำหนักกด 100 กรัมกดลงไปบนเนื้อยางที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที หน่วยของค่าที่วัดได้เป็น 1/10 มิลลิเมตร ดังนั้นยาง 60/70 คือยางที่ถูกเข็มกดจมลงไปได้ 6-7 มิลลิเมตร

2. โบลนเกรด หรือเกรดเป่า (Blown grade) คือยางที่ได้จากการนำเอายางเกรดเพนนิเตรชันไปเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส ทำให้สมบัติของยางดีขึ้นในด้านการทนความร้อนและความแข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในยางมะตอย โดยทำให้ได้แอสฟัลต์ทีนในเนื้อยางสูงขึ้น ได้แก่ R.85/25, R.85/40, R.11/10, R.155/7

- R หมายถึง ส่วนที่คล้ายยาง (Rubbery) บ่งบอกว่ามีคุณสมบัติบางส่วนคล้ายยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์
- 85 หมายถึง ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดอ่อนตัวของยาง (Softening point) ในหน่วยองศาเซลเซียส วัดโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบวงแหวนและลูกบอล (Ring and ball test) นั่นคือยางชนิดนี้จะอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส
- 25 หมายถึง ค่าเพนนิเตรชันเฉลี่ยของยาง วัดโดยใช้เข็มมาตรฐานที่มีน้ำหนัก 100 กรัมกดลงไปบนเนื้อยางที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที หน่วยของค่าที่วัดได้เป็น 1/10 มิลลิเมตร นั่นคือยางชนิดนี้จะถูกเข็มกดลงไปได้ลึก 2-3 มิลลิเมตร

3. ฮาร์ดเกรดหรือเกรดแข็ง (Hard grade) คือยางที่ได้จากการนำเอายางเกรดเพนนิเตรชันไปกลั่นต่อภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้ส่วนที่เบากว่าระเหยออกไปได้อีก จึงทำให้ยางที่ได้มีความแข็งมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น H 80/90 โดย

- H หมายถึง แข็ง (Hard)
- 80/90 หมายถึง ค่าอุณหภูมิที่อ่อนตัว ยางชนิดนี้จะอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส ส่วนค่าความแข็งอยู่ในช่วง 6-12 คือ เข็มกดได้ 0.6-1.2 มิลลิเมตรเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตยางมะตอย (Manufacture bitumen)

ผลิตโดยการกลั่นภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งพวกน้ำมันเบาได้ออกไปก่อนแล้วโดยการกลั่นที่สุญญากาศ จะช่วยให้ได้พวกน้ำมันก๊าดมากขึ้น จนกระทั่งได้ยางมะตอยตามคุณสมบัติที่ต้องการ

ยางที่มีจุดอ่อนตัวสูง สามารถทำได้โดยการเป่าลมผ่านไปในยางมะตอยที่ร้อนประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส การออกซิเดชันหรือกระบวนการเป่าลมลงไปจะทำให้ได้ยางที่มีแอสฟัลต์ทีนสูง และสามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงขึ้น ซึ่งยางมะตอยชนิดนี้จะเอาไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น

2. แอสฟัลต์ชนิดเหลว (Liquid asphalt) [1]

2.1 ยางมะตอยชนิดคัทแบค (Cutback asphalt) : ยางมะตอยชนิดนี้ทำได้โดยการผสมยางมะตอยกับสารละลาย ได้แก่น้ำมันต่าง ๆ เช่น Naptha, Kerosine และ Diesel น้ำมันต่าง ๆ ที่ใช้เป็นสารละลายนี้เรียกรวม ๆ ว่า Diluent หรือ Cutter stock ยางมะตอยชนิดนี้มักนิยมเรียกว่า Cutback asphalt ซึ่งจะมีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิธรรมดา โดยนำไปใช้งานในการทำผิวจราจรเมื่อราดแล้วน้ำมันที่ใช้ผสมจะระเหยไปคงเหลือแต่ยางมะตอย ยางมะตอยชนิดนี้ในอุณหภูมิปกติจะมีลักษณะข้นจนกระทั่งเหลว ซึ่งจะข้นเหลวมากน้อยขึ้นอยู่กับเกรดเพนิเตรชันของยางมะตอยที่นำมาใช้เป็นส่วนผสม

2.2 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวเร็ว (Rapid curing liquid asphalt (RC)) : เป็นยางมะตอยประเภทที่แข็งตัวเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมระหว่างแนพทา (Naptha) ซึ่งเป็นน้ำมันระเหยง่ายกับยางมะตอยเกรด 80/100 หรือ 60/70 ยางมะตอยชนิด RC นี้ทั่ว ๆ ไปใช้ในงานก่อสร้างประเภท Surface treatment, Penetration macadum และ Open-grade paving mixtures และชนิดของสารละลายตลอดจนสัดส่วนระหว่างสารละลายกับยางมะตอย ยางมะตอยประเภทที่เหลวมาก อาจนำไปใช้งานได้โดยตรงโดยไม่ต้องให้ความร้อนหรือให้เพียงเล็กน้อยก็พอ สำหรับประเภทที่เหลวปานกลาง โดยปกติให้ความร้อน 150-200 องศาฟาเรนไฮต์ ก็เพียงพอในการทำงาน สำหรับชนิดที่ข้นมากอาจจะต้องให้ความร้อนระหว่าง 200-350 องศาฟาเรนไฮต์

2.3 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวปานกลาง (Medium curing liquid asphalt (MC)) : ยางมะตอยชนิดนี้ได้โดยผสมยางมะตอยเกรด 60/70 กับ เคโรซีน (Kerosine) ฉะนั้นยางมะตอยชนิดนี้จึงใช้เวลาในการแข็งตัว (Setting) นานกว่า RC เนื่องจาก Kerosine แข็งตัวได้ช้ากว่า Naptha ยางมะตอยชนิดนี้ใช้ในงานที่ต้องการระยะเวลาบ่มตัวนาน เช่น ในการทำงาน Prime coat ทั้งนี้เพื่อให้ MC มีโอกาสซึมลงไปใต้พื้นผิว Base course ได้มากหรือใช้ในการทำ Dense grade paving mixtures

2.4 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวช้า (Slow curing liquid asphalt (SC)) : โดยทั่วไปผลิตได้โดยผสมยางมะตอยเกรด 60/70 Penetration กับพวกน้ำมันหนัก เช่น Diesel fuel oil หรืออาจผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

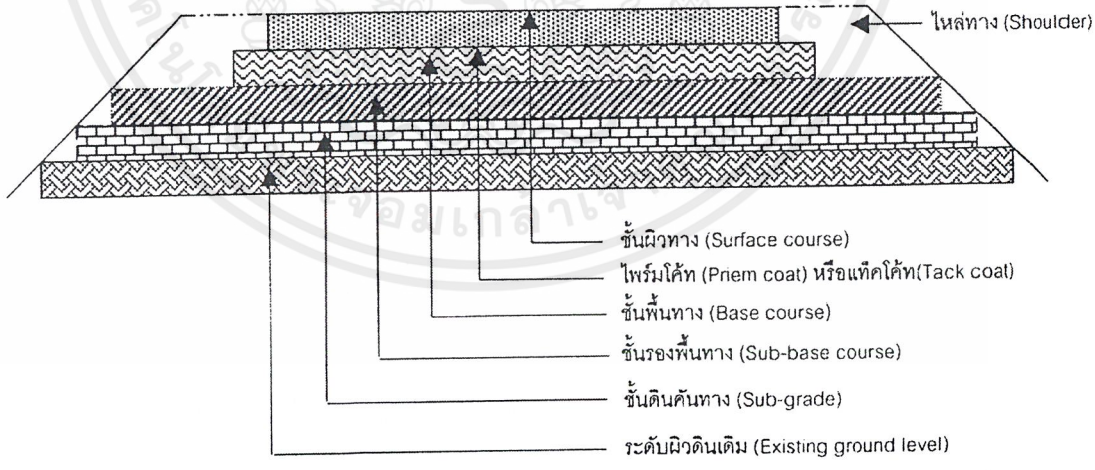
จากการกลั่นโดยตรง SC asphalt นิยมเรียกว่า "Road oil" เป็นชนิดที่ไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

2.5 ยางมะตอยชนิดอิมัลชัน (Emulsified asphalts or asphalt emulsion) : คือยางมะตอยที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ หรือคอลลอยด์ (Colloid particles) โดยกระจายอยู่ในน้ำที่มีอิมัลซิฟายเออร์ (Emulsifier) ผสมอยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 2.1 แสดงธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในยางมะตอยที่ได้จากแหล่งต่างกัน 4 แหล่ง

Element	Mexican blend	Louisiana	Boston	California
Carbon	83.77%	85.78%	82.90%	86.77%
Hydrogen	9.910%	10.19%	10.45%	10.93%
Nitrogen	0.280%	0.260%	0.780%	1.100%
Sulfur	5.250%	3.410%	5.430%	0.990%
Oxygen	0.770%	0.360%	0.290%	0.200%
Vanadium (ppm)	180.0	7.000	1380	4.000
Nickel (ppm)	22.00	0.400	109.0	6.000

2.1.5 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของถนนราดยางมะตอย



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบการปูถนน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) ชั้นผิวทาง (Surface dressing) คือชั้นบนสุดของทางที่เป็นผิวจราจร วัสดุที่นิยมเลือกใช้มีอยู่ 3 แบบคือ แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) แบบมีการปรับปรุงพื้นผิว (Surface treatment) และแบบชนิดหินโรย (Penetration macadam)

2.) ไพร์มโค้ท (Prime coat) คือส่วนของยางมะตอยเหลวที่ราดบนผิวทางเพื่อยึดเชื่อมผิวทางให้ติดกับโครงสร้างอื่น ๆ

3.) ชั้นพื้นทาง (Base course) คือชั้นของวัสดุที่มีสมบัติดี เช่นหินโม่ หรือกรวดโม่ซึ่งมีขนาดคล้ายกันตั้งแต่ใหญ่มาถึงเล็ก หรือใช้แอสฟัลต์คอนกรีตแบบเดียวกับที่ผิวทาง

4.) ชั้นรองพื้นทาง (Sub-base course) คือส่วนวัสดุรองใต้พื้นทาง นิยมใช้ลูกรัง หรือดินที่มีสมบัติดี บดอัดแน่นบนคันทาง

5.) ไหล่ทาง (Shoulder) คือส่วนที่เสริมด้านท้ายริมสุดของผิวทาง และพื้นทางทั้งสองข้างให้แน่น ได้ระดับเท่ากับผิวทาง วัสดุที่ใช้เหมือนชั้นรองพื้นทาง

6.) ชั้นดินคันทาง (Sub-grade course) เป็นวัสดุเกรดดี บดอัดแน่นบนผิวดินเดิม

2.1.6 อันตรายที่เกิดจากยางมะตอยและการป้องกัน

ยางมะตอยส่วนใหญ่มักมีจุดวาบไฟสูงกว่า 100 $^{\circ}$C ซึ่งจัดว่าเป็นน้ำมันที่มีจุดวาบไฟสูง จึงมีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ดีหากมีการผสมยางมะตอยกับตัวทำละลายที่ติดไฟได้ง่าย ก็จะทำให้มีความเสี่ยงเพิ่มขึ้น อันตรายที่มักเกิดขึ้นกับผู้ ปฏิบัติงานส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปยางมะตอยเป็นผลิตภัณฑ์และการสัมผัส เช่นถูกยางมะตอยร้อนลวกผิวหนัง การสัมผัสกับภาชนะ หรือเครื่องมือที่ร้อนและการล้างยางมะตอยที่ติดออกจากผิวหนัง เป็นต้น

2.1.7 ข้อควรระวังในการปฏิบัติงาน

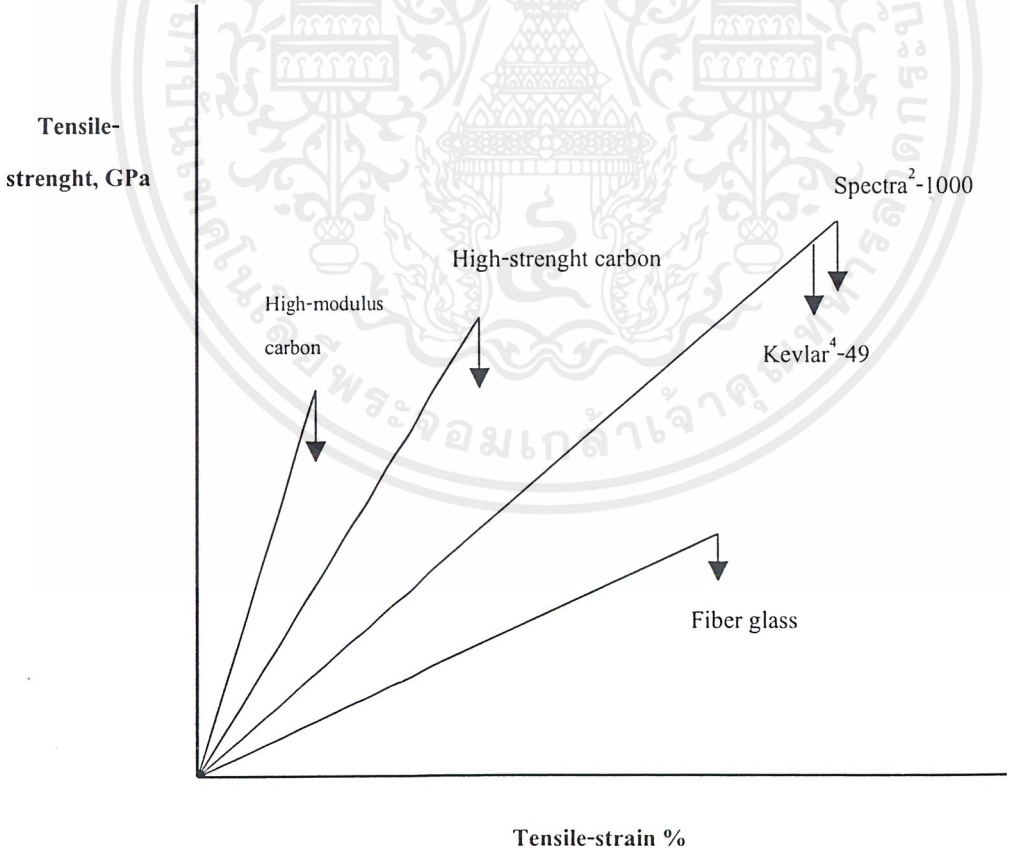
1.) ไม่ควรให้ยางมะตอยร้อนอยู่ใกล้กับสารที่มีไอระเหย หรือติดไฟได้ง่าย
2.) อย่าให้น้ำเข้ามาถูกกับยางมะตอยร้อนเป็นอันขาด เพราะยางมะตอยร้อนอาจพุ่งขึ้นมาถูกผู้ปฏิบัติงานได้
3.) ระวังไอระเหยจากการผสมยางมะตอยกับสารเคมีชนิดอื่น ๆ
4.) ควรสวมใส่ถุงมือหนัง แว่น หรืออุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ ทุกครั้งที่ปฏิบัติงาน
5.) ไม่ควรล้างยางมะตอยที่ติดผิวหนังออกด้วยน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันเบนซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เส้นใย (Fibers) [3]

เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรง (Strength) และมอดุลัส (Modulus) สูง อาจอยู่ในรูปเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers or filaments) เส้นใยสั้น (Short or Chopped fibers) หรือวิสเกอร์ (Whiskers) เส้นใยที่นิยมใช้ในวัสดุคอมโพสิตได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (Carbon) เส้นใยแก้ว (Glass) เส้นใยอะรามิดหรือเคฟลาร์ (Aramid or Kevlar®) เส้นใยโบรอน (Boron) และเส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกันตั้งแต่ไม่กี่ไมครอนจนถึงร้อยไมครอน อาจมีความยาวต่อเนื่องหรือเป็นเส้นใยถูกตัดสั้นไม่กี่เซนติเมตร

รูปที่ 2.3 แสดงเส้นกราฟความเค้นความเครียด (Stress-strain curve) ของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ได้แก่เส้นใยคาร์บอน แก้ว อะรามิด (Aramid or Kevlar) และพอลิเอทิลีน (เส้นใย Spectra®, Ultrahigh-molecular weight polyethylene, UHMWPE) เส้นใยแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน จะมีความแข็งแรงจำเพาะและมอดุลัสจำเพาะสูง แต่มีแนวโน้มที่จะเปราะหักง่าย (เปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำ) ความหนาแน่นแตกต่างกัน ที่ต่ำที่สุดได้แก่ เส้นใยพอลิเอทิลีน รองมาคือเส้นใยเคฟลาร์ คาร์บอน แก้ว และซิลิกอนคาร์ไบด์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 เส้นกราฟความเค้น- ความเครียด ของเส้นใยชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ไนลอน (Nylon) [3]

เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่นิยมทำเป็นเส้นใย ไนลอนที่พบในปัจจุบันใช้ในเครื่องนุ่งห่ม แต่ก็จะอยู่ในรูปของเทอร์โมพลาสติกด้วย แท้จริงครั้งแรกไนลอนถูกใช้ทำเป็นถุงน่องที่ยาวขึ้นมาถึงเข่าของสตรี ในปี 1940 ในปีถัดมาอเมริกาเข้าร่วมสงครามโลกครั้งที่ 2 และไนลอนได้ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุใช้ในสงคราม เช่น ร่มชูชีพ เชือก เป็นต้น

ไนลอนเป็นชื่อการค้าของ พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) ได้ด้วย เพราะมีหมู่เอไมด์ใน backbone chain หมู่เอไมด์นี้มีความเป็นขั้วมากและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่อื่น ๆ ได้

สายโซ่ไนลอนมีความสม่ำเสมอและสมมาตรกัน ไนลอนจึงเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดผลึกได้ ความเป็นผลึกทำให้ไนลอนมีสมบัติด้านความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง ความทนต่อความร้อนที่ดี ไนลอนทุกตัวดูดน้ำได้และสามารถทำเส้นใยได้ดีมาก

ไนลอน 6 สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring opening polymerization) จาก มอนอเมอร์คาโปรแลกแทม (Caprolactam) ดังรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์ nylon 6

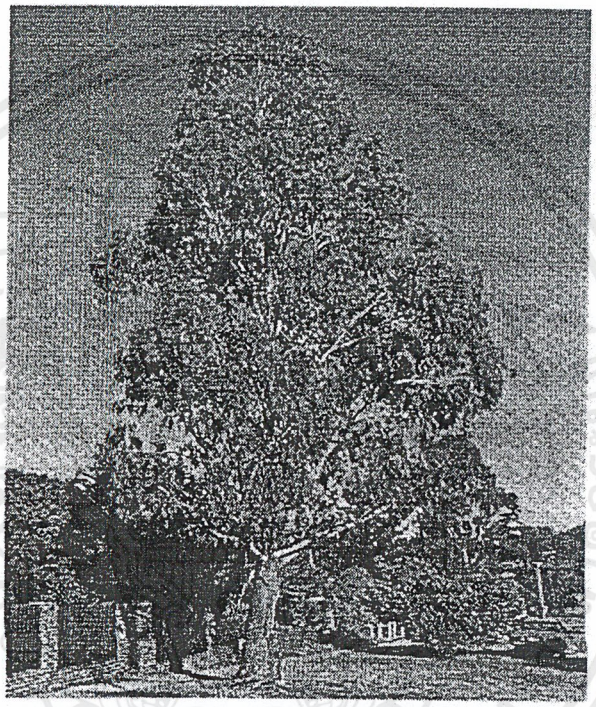
ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของไนลอน 6

สมบัติ	ค่าที่วัดได้	หน่วย
ความหนาแน่น	1.08-1.23	g/cm^3
T_g	46-60	$^{\circ}C$
T_m	223	$^{\circ}C$
Tensile modulus	1.9	GPa
Stress at break	75	MPa
Elongation at break	300	%
Izod Impact Strength	25	J/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ยูคาลิปตัส (Eucalyptus)

ไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้ที่สำคัญมากในปัจจุบัน โดยต้นยูคาลิปตัสจะมีลักษณะสูง โตง่าย ปลูกได้ในทุก ๆ สภาพดิน มีความทนทาน เมื่อปลูกแล้วสามารถตัดได้ 2-3 ครั้งโดยไม่ต้องปลูกใหม่ ด้วยเหตุดังกล่าว ไม้ยูคาลิปตัสจึงได้เป็นที่นิยมปลูก และใช้งาน โดยลักษณะของต้นยูคาลิปตัสจะเป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส

การเตรียมเยื่อไม้

เยื่อยูคาลิปตัสสามารถเตรียมได้ 2 วิธี คือ เยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP) และเยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากขบวนการทางเคมี(Chemical pulp; CP) ซึ่งสามารถเตรียมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP)

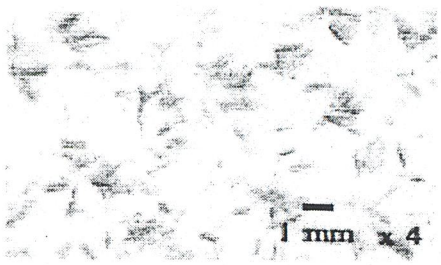
เป็นการแยกเยื่อโดยวิธีความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulping) ซึ่งเป็นวิธีดัดแปลงมาจากวิธีการผลิตเยื่อทางกลโดยการบด เริ่มจากการนำชิ้นไม้หรือชิ้นวัตถุดิบ เข้านึ่งไอน้ำภายใต้ความดันไอ จนอุณหภูมิไอน้ำสูงกว่า 140 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ลิกนินอ่อนตัว เรียกว่า จุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือ จุดนิ่มตัว แล้วจึงทำการบดชิ้นไม้ให้แยกออกจากกันภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงเป็นเส้นใยหรือกลุ่มของเส้นใย การบดใช้วิธีการเสียดสี ของเครื่อง Defibrators หรือ Attrition mills ซึ่งประกอบด้วยจานบดที่มีผิวหยาบเป็นร่อง 2 จาน โดยจานหนึ่ง หรือ 2 จาน หมุนสวนทางเสียดสีกันให้ชิ้นไม้ที่อยู่ระหว่างจานทั้งสองแตกแยกออกเป็นกลุ่มเยื่อ ผลผลิตของเยื่อที่ได้ประมาณ 90-95% ขึ้นอยู่กับสภาวะในการแยกเยื่อ ได้แก่ อุณหภูมิหรือความดันไอน้ำ เวลาในการนึ่งชิ้นไม้และเวลาในการบดเยื่อ จะมีความแปรผันไปขึ้นอยู่กับชนิดไม้หรือวัตถุดิบ ความหนาแน่นของไม้หรือวัตถุดิบ ความชื้น และรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นไม้

2. เยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากขบวนการทางเคมี (Chemical pulp; CP)

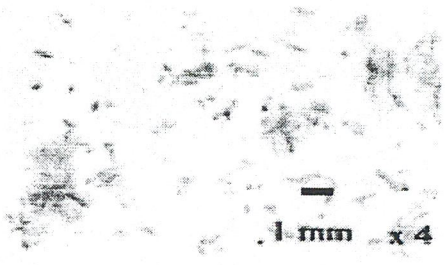
เป็นการแยกเยื่อโดยวิธีทางเคมี ที่ทำการแยกเยื่อในถังปฏิกรณ์ ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงประมาณ 125-180 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีขบวนการเชิงกลในการแยก แต่ใช้สารประกอบเคมีที่มีสภาวะเป็นด่าง เรียกว่า Alkaline process หรือสารประกอบเคมีที่มีสภาวะเป็นกรด เรียกว่า Acidic (sulfite) process เข้าทำปฏิกิริยาละลายลิกนินที่อ่อนตัวแล้วออกจากชิ้นไม้หรือชิ้นวัตถุดิบ จนได้เป็นเส้นใย ขบวนการนี้จะให้ผลผลิตต่ำเพียง 40-60% ระยะเวลาที่ใช้ในการแยกเยื่อก็จะมากกว่า 1-5 ชั่วโมง ต้นทุนสูง แต่เยื่อที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มากกว่า เนื่องจาก ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะถูกแยกออกเกือบทั้งหมด ลักษณะของเส้นใยจะยุบและอ่อนตัวจากเดิมที่มีความแข็งกระด้างและรูปร่างทรงกลม กลายเป็นลักษณะคล้ายโบริบบิ้น ที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเพื่อการเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการของขบวนการทำกระดาษ

หลังจากเตรียมเส้นใยเสร็จแล้ว นำเส้นใยไม้ที่บดเสร็จแล้วไปล้างด้วยน้ำ หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน โดยก่อนการทดลอง ต้องทำการคัดแยกขนาดอนุภาคเส้นใย โดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาด ร่อนให้ได้เส้นใยที่มีขนาด 20-35 35-50 50-80 80-120 และมากกว่า 120 mesh แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสอีก 1 วัน เพื่อเป็นการทำให้ความชื้นในผงไม้หมดไป นำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ โดยลักษณะของเส้นใยไม้ที่เตรียมได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



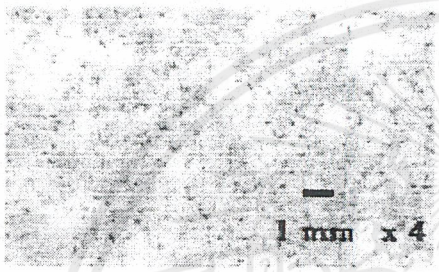
3 cm



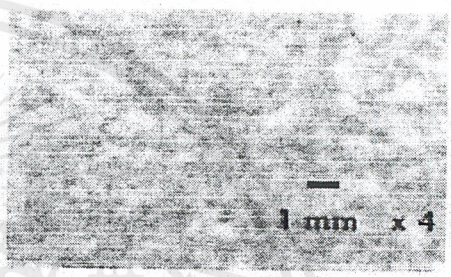
(ขยาย 100 เท่า)

(a) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 20-35 mesh

(b) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 35-50 mesh



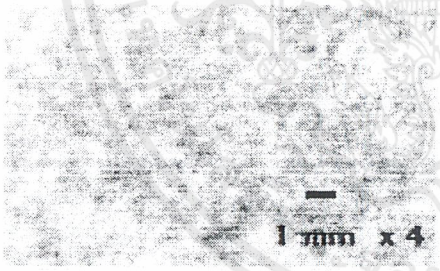
3 cm



(ขยาย 100 เท่า)

(c) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 50-80 mesh

(d) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 80-120 mesh



3 cm

(ขยาย 100 เท่า)

(e) เส้นใยไม้ TMP ขนาดมากกว่า 120 mesh

(f) เส้นใยไม้ TMPไม่ได้แยกขนาด

รูป 2.6 รูปถ่ายลักษณะของเส้นใยไม้ยูคาลิปตัส TMP ขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3 ยางรถยนต์ (Tire)

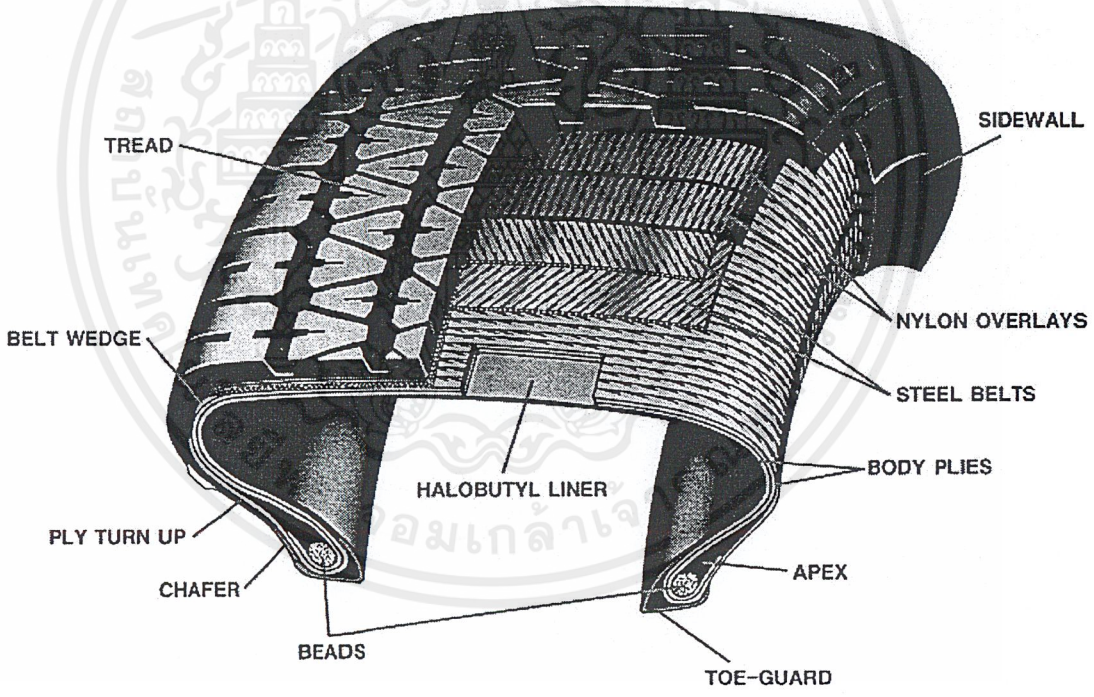
ส่วนประกอบของยางรถยนต์แต่ละส่วนจะผลิตจากยางหลายชนิด ขึ้นกับสมบัติของยาง เช่น

-ส่วนของหน้ายาง (Tread) ต้องการยางที่มีความทนทานต่อการขัดสี มีความร้อนที่เกิดจากการได้รับแรงอย่างต่อเนื่องต่ำจึงเลือกใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) ยางอะคริโลไนไทรบิวตะไดอีน (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR)

-ส่วนของยางใน (Liner) ต้องการยางที่มีการซึมผ่านของก๊าซต่ำ จึงเลือกใช้ยางบิวทิล (Butyl Rubber; IIR)

-ส่วนของผนังด้านข้างของยาง (Side wall) ต้องการยางที่สามารถทนทานต่อการพับไปมาได้ดี มีฮีสเทอรีซีสต่ำ จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber; SBR) เป็นต้น

- พลาย (Ply) เป็นส่วนเสริมแรงของยางรถยนต์ ทำจากเส้นใยไนลอน 6 นำมาถักเป็นลักษณะร่างแห



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
43883

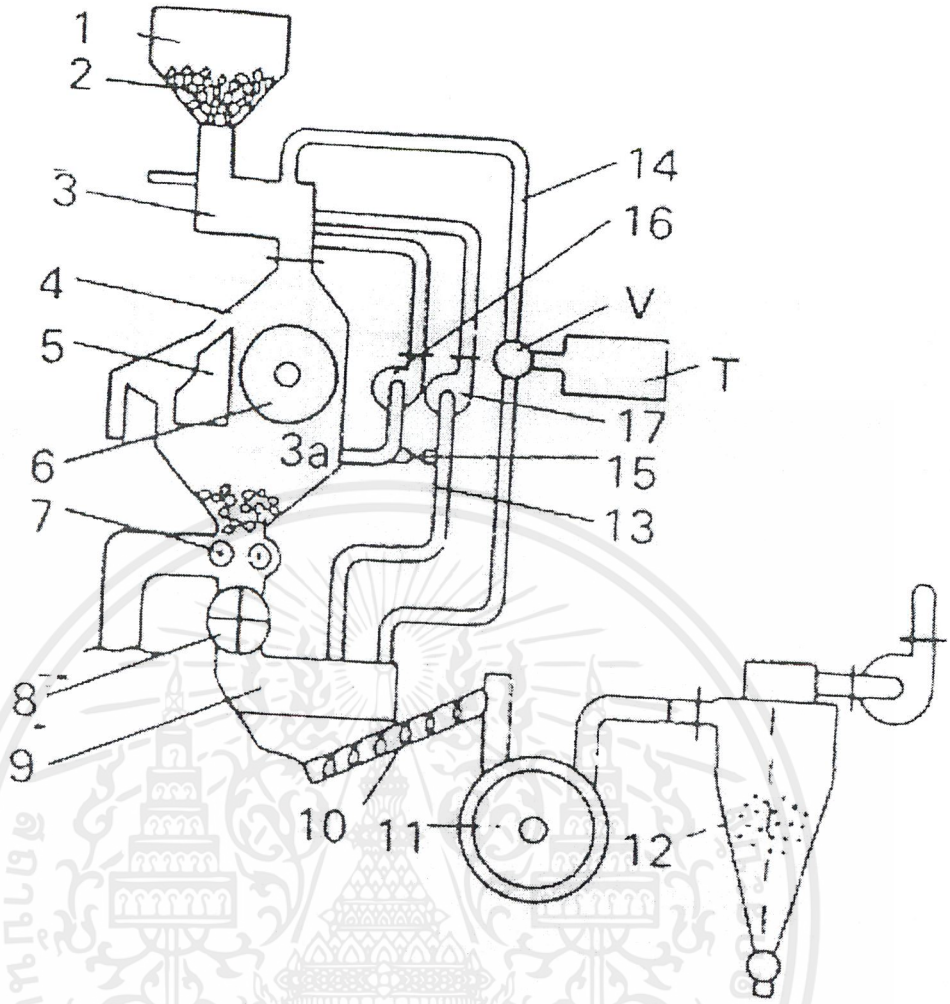
2.3.1 ผงยางจากยางรถยนต์ (Ground rubber tire; GRT)

การผลิตผงยางจากยางรถยนต์สามารถทำได้ 2 วิธี[5]

1. การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

เทคนิคนี้เป็นการแยกยาง โลหะ และสิ่งทอ ออกจากเศษยางรถยนต์ โดยทำการตัดชิ้นยางให้มีขนาด 50-150 มิลลิเมตร แล้วนำมาให้ความเย็นในห้องให้ความเย็น ที่อุณหภูมิ –60 ถึง –100 องศาเซลเซียส และทำให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยใช้เครื่องบดแบบค้อน ขนาดของเศษยางที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่า 19 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการแยกโลหะออก โดยใช้สนามแม่เหล็ก ในส่วนที่แยกออกมาได้จะมีโลหะ 99 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนที่เป็นยางกับลวด 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ไม่ถูกแยกด้วยสนามแม่เหล็กจะผ่านเข้าไปสู่ตะแกรงร่อน ของตัวแยกหมุนปฐมภูมิ ซึ่งมีแผ่นแยกขนาดอยู่ 3 แผ่น โดยมีขนาด 1.41-2.38 มิลลิเมตร และ 0.7-0.9 มิลลิเมตร วัสดุที่อยู่ในแผ่นแรกจะถูกนำเข้าสู่เครื่องบด และนำกลับเข้าสู่การแยกโดยใช้ไซโคลน และวัสดุที่อยู่ในแผ่นที่สอง จะนำไปแยกโดยใช้เครื่องสั่นปฐมภูมิ ซึ่งจะถูกแยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่เบาจะเข้าสู่เครื่องผสมแบบปิดชนิดลูกกลิ้ง เพื่อทำการแยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่เบาจะเข้าสู่เครื่องผสมแบบปิดชนิดลูกกลิ้ง เพื่อทำการแยกให้ลวดออกจากยาง และนำกลับเข้าไปแยกโดยไซโคลนอีกครั้ง ส่วนที่หนักจะเข้าไปสู่การแยกโดยใช้สนามแม่เหล็ก ทำการแยกโลหะออกจากยางบริสุทธิ์ นำยางบริสุทธิ์ที่ได้เข้าสู่ห้องให้ความเย็นทุติยภูมิ ยางที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่า 0.127 มิลลิเมตร ส่วนวัสดุในชั้นที่สามจะถูกนำเข้าเครื่องสั่นทุติยภูมิ และนำกลับเข้ามาแยกขนาด ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



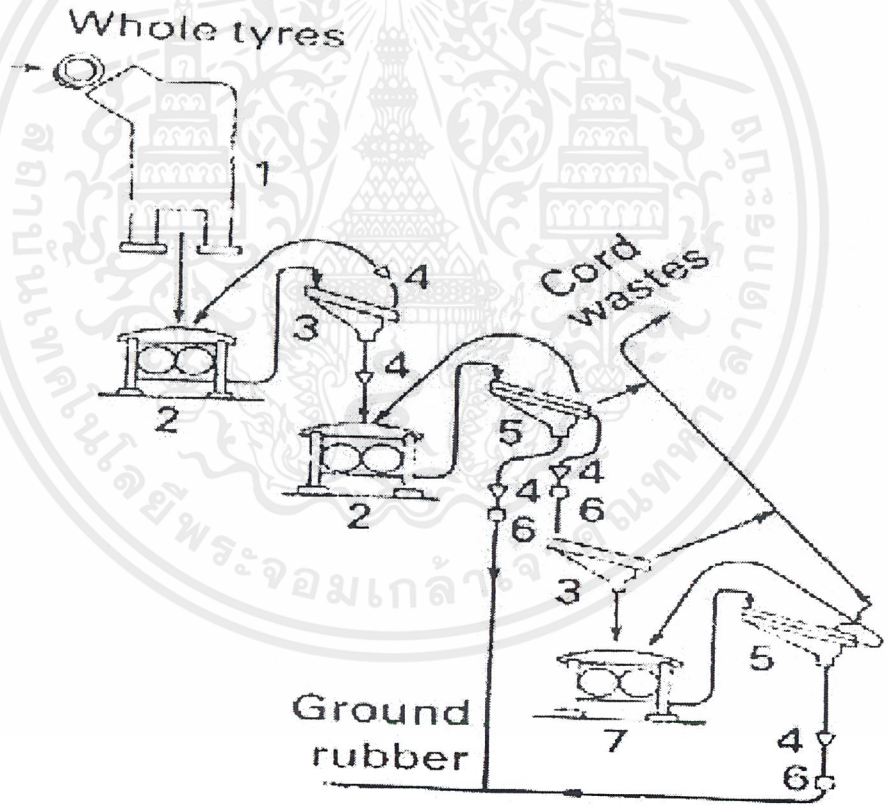
รูปที่ 2.8 เครื่องบดยางที่อุณหภูมิต่ำ[6] 1. ส่วนป้อนวัสดุ 2. วัตถุดิบ-ยางบดหยาบ 3. ห้องให้ความเย็นปฐมภูมิ 4. ห้องบดแบบหยาบ 5. ตัวแยก 6. เครื่องบดแบบหยาบ 7. เครื่องแยกด้วยแม่เหล็ก 8. วาล์วสำหรับป้อนวัตถุดิบ 9. ห้องพักหลังจากให้ความเย็น 10. สกรูนำพา 11. ห้องหลังบด 12. ตัวแยกด้วยลมหมุน 13. ที่นำพาสารให้ความเย็น 14. ท่อนำก๊าซเย็นเคลื่อนที่ด้วยพัดลม 15. จุดเชื่อมให้อุณหภูมิของห้องบดและห้องให้ความเย็นมีอุณหภูมิเท่ากัน 16,17. พัดลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding)

เป็นเทคนิคการผลิตผงยางจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยการบดเชิงกลและการแยกขนาดที่อุณหภูมิห้อง ขบวนการนี้จะทำการตัดยางเป็นชิ้น ๆ โดยใช้ Tire splitter จากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบดยางมีร่องแบบสองลูกกลิ้ง หรือเครื่องบดแบบค้อน ส่วนที่เป็นลวดโลหะจะถูกแยกออกด้วยมือหรือแม่เหล็ก ส่วนที่เป็นเส้นใยจะถูกแยกออกในระหว่างกระบวนการบด และการแยกขนาดโดยใช้ Air table

เทคนิคนี้จะคล้ายกับเทคนิคการบดที่อุณหภูมิต่ำ ต่างกันที่ไม่ต้องใช้ไนโตรเจนเหลว เพื่อทำให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เทคนิคนี้จะให้ยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า พื้นที่ผิวน้อยกว่า และมีการกระจายของขนาดโมเลกุลมากกว่าเทคนิคการบดที่อุณหภูมิห้องนี้ ถ้าต้องการให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถทำได้โดยเพิ่มขั้นตอนกระบวนการบดหลาย ๆ ครั้ง เพื่อลดขนาดอนุภาค



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตผงยางชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การทำงานของเครื่องมือ

2.4.1 เครื่องทดสอบค่าเพนนิเตรชัน (Penetration Test)

Penetration test คือการวัดความเหนียว (Consistency) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยใช้วิธีวัดระยะเข็มมาตรฐานจะจมลงไปในแอสฟัลต์เมื่อถูกกดด้วยน้ำหนักที่กำหนดไว้ในระยะเวลาและอุณหภูมิที่กำหนดไว้ เป็นดัชนีบ่งบอกความเหนียวของแอสฟัลต์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือ แสดงดังรูป 2.6(ก)

1. *เครื่องทดสอบเพนนิโตรมิเตอร์* ประกอบด้วยแกนที่เคลื่อนขึ้นลงได้ตามแนวดิ่ง โดยมีความเสียดทานน้อยที่สุด และอ่านได้ถึง 1 เพนนิเตรชัน เข็มมาตรฐานจะประกอบติดกับแกนโดยมีปากจับ น้ำหนักของแกนเท่ากับ 47.50 ± 0.05 กรัม เมื่อรวมน้ำหนักของเข็มมาตรฐานแล้วต้องหนัก 50.00±0.10 กรัม เครื่องทดลองจะต้องมีน้ำหนักถ่วง 50.00±0.05 กรัม และ 100.00±0.05 กรัม เพื่อให้ได้น้ำหนักกด 100 กรัม และ 200 กรัม ตามความประสงค์ของการทดลอง

2. *เข็มมาตรฐาน* ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็ง มีค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness) จาก C 57 ถึง C 60 ยาวประมาณ 50-80 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00-1.02 มิลลิเมตร ปลายข้างหนึ่งเสี้ยมแหลมเป็นกรวย มีมุมแหลม 8.67 องศา ถึง 9.67 องศา ปลายกรวยแหลมนี้ตัดในแนวตั้งฉากกับแกนของเข็ม โดยคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 องศา ให้ปลายตัดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.14-0.16 มิลลิเมตร มุมที่ปลายตัดต้องคมและปราศจากรอยบิ่น ผิวของปลายตัดต้องมีความเรียบถึง 8 ไมโครนิ้ว ปลายอีกข้างหนึ่งของเข็มมาตรฐาน อาจจะฝังยึดกับแท่งโลหะทรงกระบอกที่โตกว่า แท่งทรงกระบอกนี้จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.18 มิลลิเมตร ยาว 38.1 มิลลิเมตร โดยประมาณ ทำด้วยทองเหลือง หรือเหล็กไร้สนิม เข็มกับแท่งทรงกระบอกจะต้องฝังยึดติดกันแน่น และอยู่ในแกนเดียวกัน โดยเข็มโผล่ออกจากแท่งทรงกระบอก ยาวประมาณ 41.26 มิลลิเมตร น้ำหนักรวมของเข็มและแท่งทรงกระบอกเท่ากับ 2.50±0.05 กรัม

3. *ภาชนะบรรจุตัวอย่าง* ทำด้วยโลหะหรือแก้ว ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกก้นแบน ถ้าใช้บรรจุตัวอย่างยางมะตอยที่มีค่า เพนนิเตรชัน ไม่มากกว่า 200 จะต้องมีความจุ 3 ออนซ์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มิลลิเมตร ลึก 35 มิลลิเมตร วัสดุยางมะตอยที่มีค่าเพนนิเตรชันมากกว่า 200 จะต้องมีความจุ 6 ออนซ์ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 70 มิลลิเมตร ลึก 85 มิลลิเมตร

4. *อ่างน้ำปรับปรุงอุณหภูมิ* เป็นอ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้โดยมีค่าอุณหภูมิของน้ำคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1 องศาเซลเซียส มีความจุไม่น้อยกว่า 10 ลิตร มีชั้นโปร่งสูง 50 มิลลิลิตร สำหรับวางตัวอย่างและต้องให้น้ำท่วมตัวอย่างได้ไม่น้อยกว่า 100 มิลลิลิตร น้ำที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำมันหรือสิ่งสกปรกปะปน อาจใช้น้ำเกลือแทนน้ำได้ในกรณีที่ต้องการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าต้องการทดลองโดยไม่ย้ายตัวอย่างออกจากน้ำ ต้องจัดหาที่สำหรับวางเครื่องเพนนิโตรมิเตอร์ (Penetrometer) ที่มั่นคงแข็งแรงพอ

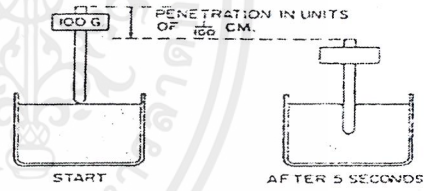
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. *ภาชนะย้ายตัวอย่าง* ควรเป็นภาชนะทรงกระบอกก้นแบนทำด้วยแก้ว โลหะ หรือพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่น้อยกว่า 90 มิลลิเมตร และไม่น้อยกว่า 55 มิลลิเมตร ภาชนะนี้ต้องมีที่ก้นกับภาชนะบรรจุตัวอย่างเคลื่อนไปมาในเวลาทดลอง

6. *เทอร์โมมิเตอร์* ในที่นี้ทำการทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส ในช่วง 19-20 องศาเซลเซียส และตัวเทอร์โมมิเตอร์ต้องจุ่มลงในน้ำ 150±15 มิลลิเมตร

7. *นาฬิกาจับเวลา* ชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 วินาที อาจใช้นาฬิกาจับเวลาให้เสียงสัญญาณใช้กับเครื่องเพนนิโตรมิเตอร์ แบบใช้มือควบคุม หรือเครื่องจับเวลาอัตโนมัติประกอบเพื่อควบคุมเครื่องทดลองโดยตรง

รูปที่ 2.10 (ก) ส่วนประกอบของเครื่องเพนนิโตรมิเตอร์



รูปที่ 2.10 (ข) การทำงานของเครื่องเพนนิโตรมิเตอร์

จากรูป 2.10 (ข) นำตัวอย่างของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่จะทำการทดสอบใส่ถ้วยมาตรฐาน และนำไปแช่ในน้ำซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ที่ 77 °F ประมาณ 1 ถึง 1.5 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาวางที่แท่นของเครื่องมือ Penetrometer ปล่อยเข็มมาตรฐานซึ่งถูกถ่วงด้วยน้ำหนัก 100 กรัม ปล่อยให้จมลงในแอสฟัลต์เป็นเวลา 5 วินาที ระยะที่เข็มจมลงไปจากผิวหน้าของแอสฟัลต์โดยจะอ่านค่าเป็น Penetration จากหน้าปัดของเครื่อง Penetrometer (ซึ่ง 1 Penetration - 0.1 มิลลิเมตร) เช่น เข็มจมลงไปเป็นระยะ 10 มิลลิเมตรก็จะมีค่าเท่ากับ 10 + 0.1 = 100 Penetration จะเห็นได้ว่าแอสฟัลต์ ที่อ่านจะมีค่า Penetration มากและแอสฟัลต์ที่แข็งจะมีค่า Penetration น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 เครื่องทดสอบการยืดตัว

การยืดตัว (Ductility) ของวัสดุยางมะตอย วัดได้จากระยะที่ยางมะตอยสามารถยืดออกไปได้ก่อนขาด โดยที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างนั้นยืดอยู่ในแบบมาตรฐาน แล้วดึงให้ยืดออกด้วยอัตราเร็วและอุณหภูมิที่กำหนด เครื่องมือทดสอบความเหนียวมีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 2.7

1. *แม่แบบ* (Mold) มีขนาดเล็กและลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.8 ทำด้วยทองเหลืองส่วนปลาย b และ b′ เรียกว่า ตัวยึด ส่วนปลาย a และ a′ เรียกว่า ส่วนข้างของแบบ แบบนี้จะต้องมีขนาดที่จะทำให้ยางมะตอย ที่หล่อมาจากแบบแล้ว มีขนาดดังต่อไปนี้

ความยาวทั้งหมด	75±0.5	มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างตัวยึด	30±0.3	มิลลิเมตร
ความกว้างที่ปากตัวยึด	20±0.2	มิลลิเมตร
ความกว้างของส่วนที่แคบที่สุด (ที่ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างตัวยึด)	10±0.1	มิลลิเมตร
ความหนา	10±0.1	มิลลิเมตร

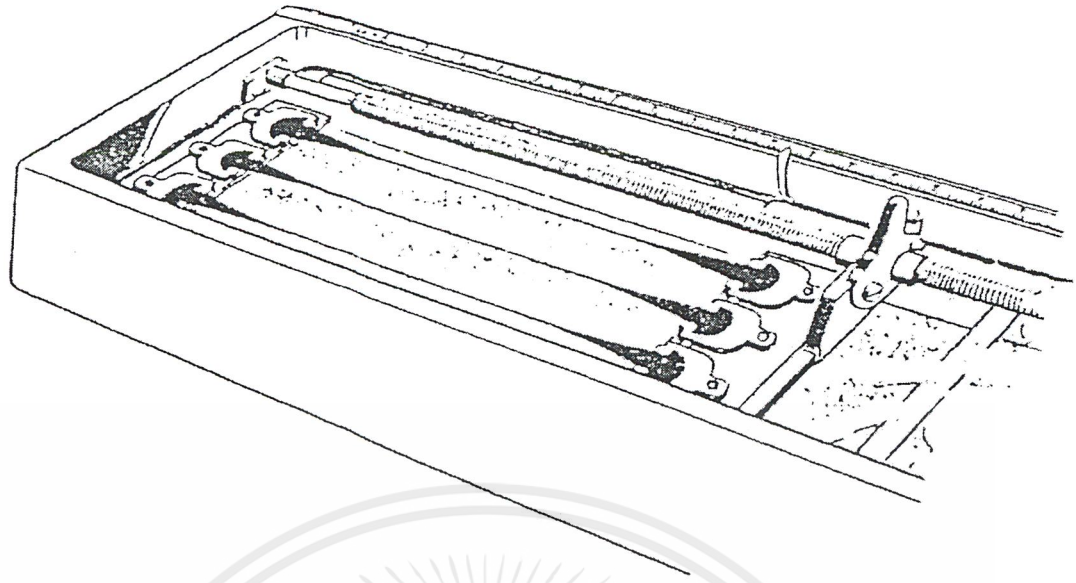
2. *อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ* เป็นอ่างน้ำที่สามารถปรับอุณหภูมิให้คงที่ได้ โดยให้อุณหภูมิของน้ำคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1 องศาเซลเซียส มีความจุไม่น้อยกว่า 10 ลิตร มีชั้นโปร่งสูง 50 มิลลิเมตร สำหรับวางตัวอย่าง และต้องให้น้ำท่วมตัวอย่างได้ไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร น้ำที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำมันหรือสิ่งปรกปะปน ในกรณีที่ต้องการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ อาจใช้น้ำเกลือแทนน้ำได้

3. *เครื่องดึง* สำหรับดึงตัวอย่างที่หล่อแล้ว อาจจะใช้เครื่องมือใดก็ได้ที่สามารถดึงให้ตัวอย่างยืดสองข้างแยกออกจากกันได้ด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอตามที่กำหนด โดยไม่มีการสั่นสะเทือน และในขณะทดลองตัวอย่างจะต้องจมอยู่ในน้ำตลอดเวลา

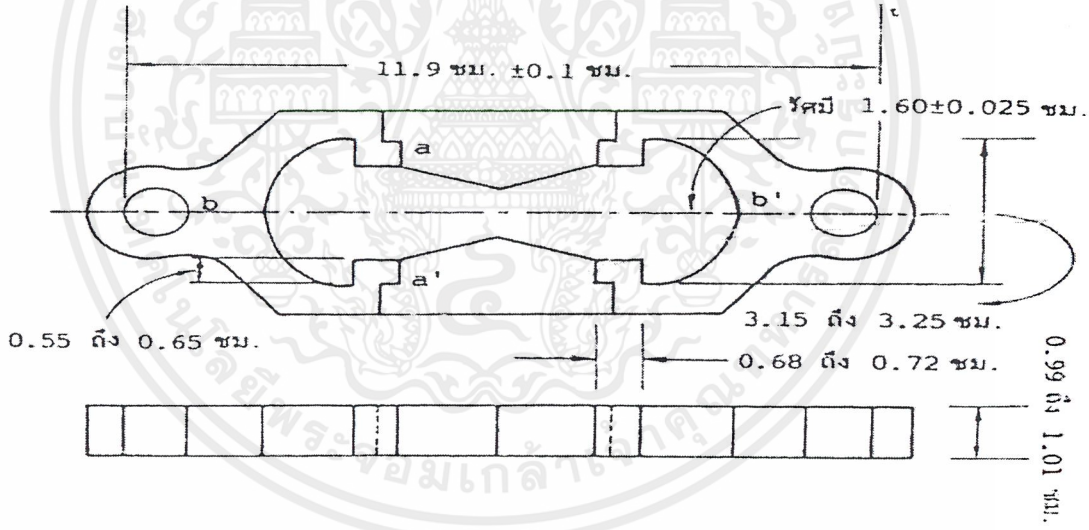
4. *แผ่นทองเหลืองสำหรับวางแบบหล่อตัวอย่าง* ต้องเป็นแผ่นแบน และเรียบสนิทเพื่อให้ด้านล่างของแบบเมื่อวางลงบนแผ่นทองเหลืองนี้แล้วสัมผัสกับแผ่นทองเหลืองได้แนบสนิท

5. *ตะแกรงเบอร์ 50* การทำงานของเครื่องโดยนำตัวอย่างแอสฟัลต์มาหล่อให้ได้รูปร่างและขนาดตามที่กำหนดไว้ โดยหล่อใน "Briquette" ของเครื่องมือ แล้วนำเครื่องแช่ลงในน้ำที่มีอุณหภูมิคงที่ที่ 77 องศาฟาเรนไฮต์ จากนั้น Briquette อีกซีกหนึ่งจะถูกดึงออกมาในอัตราที่กำหนดไว้ (โดยทั่ว ๆ ไป ดึงออกด้วยความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที) จนกระทั่งแอสฟัลต์ที่ยืดออกมาขาดจากกัน ระยะที่ยืดจนขาดกันเป็นเซนติเมตร คือค่าการยืดตัวของแอสฟัลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบการยืดตัว



รูปที่ 2.12 แบบสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบการยืดตัว

2.4.3 เครื่องทดสอบจุดอ่อนตัว : เครื่อง Ring-and-Ball

เครื่อง Ring-and-Ball มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. *วงแหวน (Rings)* วงแหวนสองวงมีขนาดและรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.13ก

2. *แผ่นรอง (Pouring plate)* แผ่นทองเหลือง แบนเรียบ ขนาดประมาณ 50×75 มิลลิเมตร ใช้รองรับในขณะที่เทตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

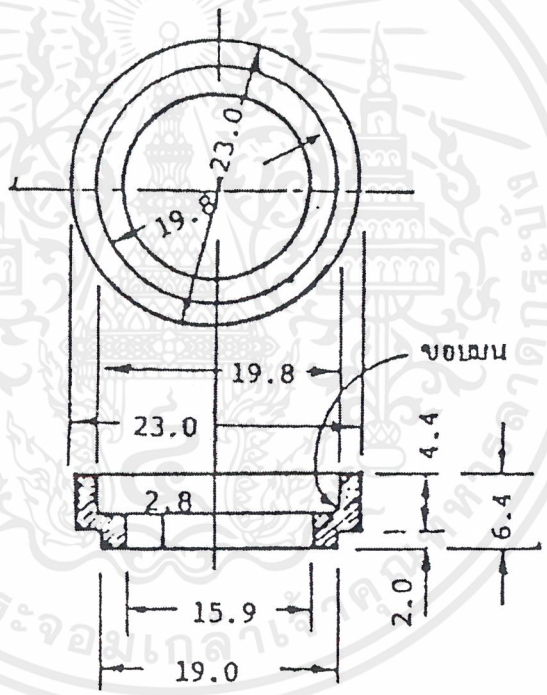
3. *ลูกกลม (Balls)* ลูกเหล็กกลมสองลูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตรน้ำหนักแต่ละลูก 3.50±0.05 กรัม

4. *เครื่องจัดลูกกลมให้อยู่ตรงกลาง (Ball-centering guides)* ทำด้วยทองเหลืองใช้สำหรับจัดลูกกลมให้วางอยู่ตรงกลางวงแหวน 2.13(ข)

5. *บีกเกอร์หรือกระบอกแก้ว* ทำด้วยแก้วทนความร้อนสูง ขนาดจุ 800 มิลลิลิตร

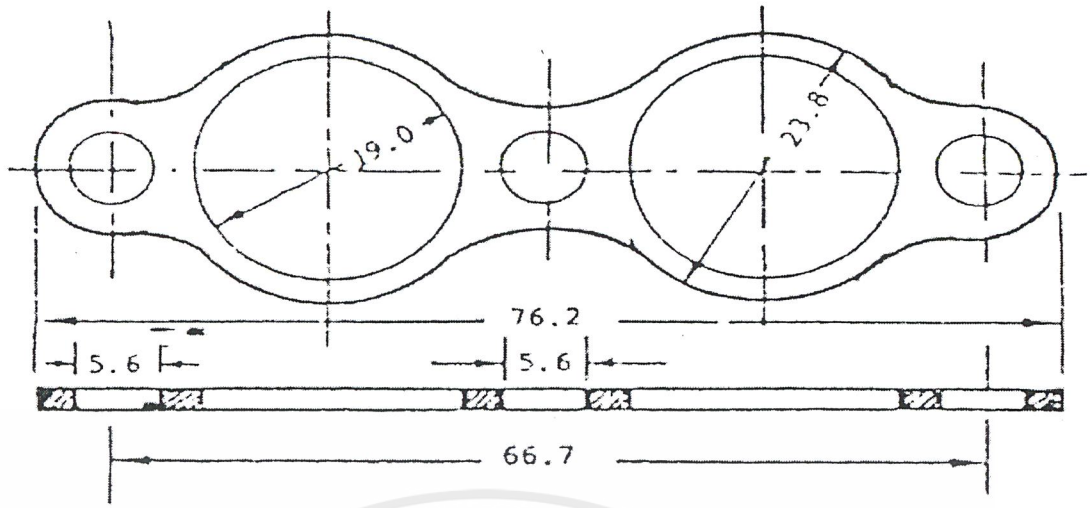
6. *แท่นยึดวงแหวนและส่วนประกอบ (Ring holder and assembly)* แทนยึดทำด้วยทองเหลืองใช้รองรับวงแหวน ให้วางอยู่ในแนวราบ มีรูปร่างลักษณะดังรูปที่ 2.9ค ส่วนประกอบของเครื่องมือมีลักษณะดังรูปที่ 2.13(ง)

7. *เทอร์โมมิเตอร์* ขนาด 100 องศาเซลเซียส

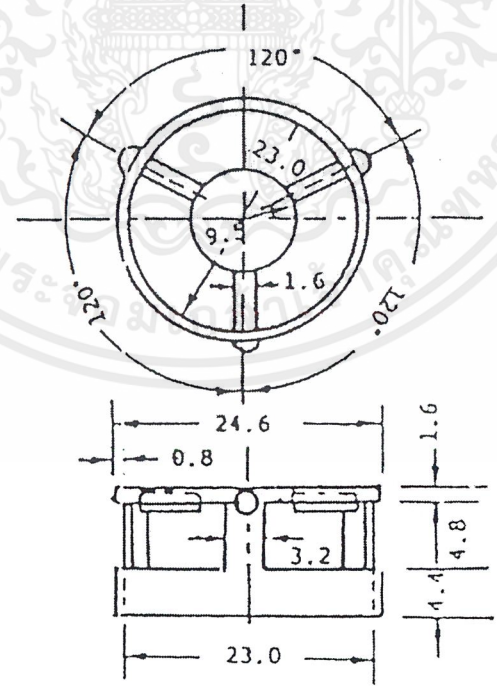


รูปที่ 2.13 (ก) วงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

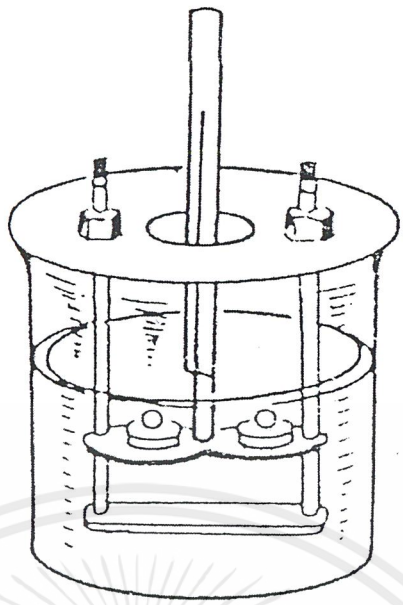


รูปที่ 2.13 (ข) แท่นยึดวงแหวน



รูปที่ 2.13(ค) เครื่องจัดลูกกลมให้อยู่ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13(ง) ส่วนประกอบของเครื่อง Ring-and-ball

2.4.4 เครื่องทดสอบความหนืด : Brookfield thermosel apparatus

จุดประสงค์ในการทดสอบนี้ก็เพื่อต้องการวัดความหนืด (Viscosity) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในช่วงอุณหภูมิที่จะนำไปใช้งาน สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์นั้น "The Asphalt Institute" กำหนดว่าควรวัดที่อุณหภูมิ 275 องศาฟาเรนไฮต์ (135 องศาเซลเซียส) เพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในงานก่อสร้าง

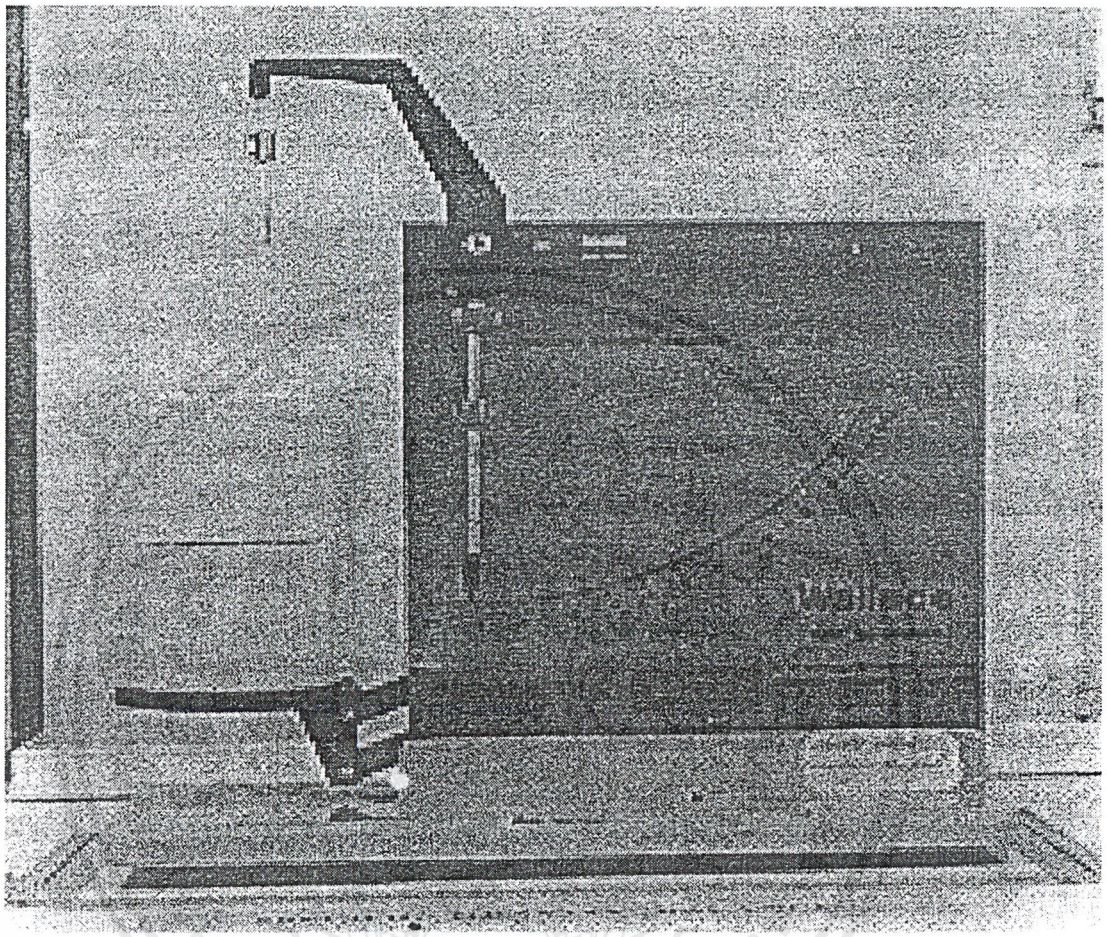
เครื่อง Brookfield thermosel มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. *เข็มมาตรฐานเบอร์ 21*
2. *แม่แบบ (Mold)* รูปทรงกระบอกสำหรับใส่ตัวอย่างทำด้วยอะลูมิเนียม
3. *ระบบให้ความร้อน (Thermosel system)*
4. *เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ: The Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance

เครื่อง The Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance มีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่อง Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance

2.4.6 การทดสอบค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery)

เป็นการทดสอบเพื่อดูความยืดหยุ่นของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติ โดยการวัดองศาที่คืนตัวกลับของแกนโลหะทรงกระบอกที่อยู่กึ่งกลางตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดแน่นอน เมื่อบิดแกนโลหะทรงกระบอกไป 180 องศา จากตำแหน่งเดิมแล้วปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

*** R.C. Evers and D.F. Lynch**[7] ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ เส้นใยพอลิเอสเทอร์ (Polyester Fiber) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางมะตอย โดยเรียก Polyester Fiber ที่ใช้ในการทดลองว่า BoniFiber® B โดย BoniFiber® B จะทำให้คุณสมบัติความต้านทานการแตกหัก (Reflection cracking) , การแตกหักจากอุณหภูมิ (Themal cracking) , Rutting , Shoving และ Pot hole formation โดยที่สมบัติของ BoniFiber® B ที่ใช้เป็นดังนี้

- ความยาว 6.35 มิลลิเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.020 มิลลิเมตร
- ความหนาแน่น 1.32 ถึง 1.40 g/cm^3
- อุณหภูมิในการหลอมเหลว > 249 องศาเซลเซียส
- การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) 33%

โดยใส่ Polyester เป็นจำนวน 2.50 - 3.75 กิโลกรัมต่อตัน (kg/t) ของจำนวนยางมะตอยที่ใช้

***R.C. Evers and D.F. Lynch**[8] ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย โดยเรียกเส้นใยเซลลูโลส ที่ใช้ในการทดลองว่า ARBOCEL® ZZ 8/1 โดยการผสมแบบร้อน (Hot mix) เพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่น (Flexibility) ในอากาศหนาว , ความต้านทานการแตกหัก (Cracking) และ Rutting เนื่องจาก Cellulose fiber มีโครงสร้างเป็นแบบสามมิติ (3 - D) โดยที่ Cellulose fiber มีคุณสมบัติดังนี้

- Cellulose Content 75 - 80%
- ความยาวสูงสุด ประมาณ 5.0 มิลลิเมตร
- ความยาวโดยเฉลี่ย ประมาณ 1.1 มิลลิเมตร
- ความหนาแน่น 0.025 ถึง 0.030 g/cm^3
- ค่าความเป็นกรด - เบส 7.5$\pm$1

โดยใช้ Cellulose fiber เป็นจำนวน 3.0 กิโลกรัมต่อตัน (kg/t) ของจำนวนยางมะตอยที่ใช้

***A. Coomarasamy**[9] ศึกษาการใช้เศษของยางรถยนต์ (Tire rubber) มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย โดยการทดลองทำโดยใช้ยางมะตอย 2 เกรดคือ 150 - 200 กับ 85 - 100 และมีการใช้ crumb rubber 3 ชนิดคือ 30 mash (~600 microns) , 80 mash (~180 microns) และส่วนของ Tire rubber ที่ยังไม่สุกตัว ลงไปซึ่งจะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย Tire rubber โดยเติมเป็นจำนวน 10% โดยน้ำหนักของ Crumb rubber ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส$\pm$10 องศาเซลเซียส ด้วยค่าความแรงเฉือนปานกลาง

*** Perret et. al.**[10] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมผงยางและพอลิเมอร์ร่วม ระหว่างแอลฟาโอเลฟิน และอีพอกไซด์ที่ไม่อิ่มตัวลงในยางมะตอย ที่มีต่อความเสถียรในการเก็บรักษายางมะตอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อใช้ในการราดถนน โดยใช้ผงยาง 7-13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมกับยางสังเคราะห์และพอลิเมอร์ร่วมที่ประกอบด้วยหน่วยของอีพอกไซด์ 1-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ร่วม แล้วนำมาทดสอบความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscosity) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความหนืดน้อยกว่า 1150 mPa.s และทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิการทดสอบแบบวงแหวนและลูกบอล (Ring-and-ball temperature) ของของผสมที่เก็บในหลอด Vertical 3 วัน โดยทำการทดสอบความแตกต่างเกิดขึ้นน้อยกว่า 5 องศาเซลเซียส และวัดค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) ของของผสมได้ประมาณ 15-35

* **A. B. Samsuri**[11] ได้นำยางมะตอยมาผสมกับผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้ยางมะตอย AC 80/100 ผสมกับผงยางขนาด 40 เมส ปริมาณ 2 5 7 และ 10 ส่วนต่อยางมะตอย 100 ส่วน ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบหาจุดอ่อนตัว ค่าเพนนิเตรชัน ความทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากความล้า พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปและความหนืด พบว่าเมื่อปริมาณของผงยางที่เติมเพิ่มขึ้นจะทำให้จุดอ่อนตัว ความทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากความล้า พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าเพนนิเตรชันมีค่าลดลง

* **M.W. Rouse**[12] ได้ศึกษาถึงการนำยางมะตอยผสมกับผงยางจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเพื่อใช้เป็นยางลาดถนน โดยผสมยางมะตอยกับผงยางรถยนต์ขนาด 80 เมส ปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าการผสมจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 300-400 องศาฟาเรนไฮต์ ผสมนานเป็นเวลา 25 นาที และสามารถทำการผสมได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ต้องใช้เวลานานถึง 96 ชั่วโมง

* **Yong-Joon Lee**[13] ได้นำยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย (AC -10 และ AC -20) ที่มีผลต่อสมบัติการไหล สมบัติทางความร้อนของของผสม และการกระจายตัวของ SBR ในยางมะตอย โดยใช้ Rotational viscometer, Dynamic shear rheometer, TGA และ Laser scanning microscope (LSM) พบว่ายางมะตอยที่ผสม SBR จะมีความหนืดและความต้านทานต่อการล้าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ SBR เพิ่มขึ้น ปริมาณของ SBR ที่สามารถกระจายตัวได้ดีในยางมะตอยคือ 1-3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของ SBR ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อจุดอ่อนตัวของของผสมที่เตรียมได้

* **B. J. Burns**[14] ได้ศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ผสมกับผงยางรถยนต์ ขนาด 90 เมส ปริมาณ 0.5-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพอลิออกทินนาเมอร์ 0.01-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่ายางมะตอยผสมที่ได้มีจุดหลอมเหลว 129 องศาฟาเรนไฮต์ เมื่อประกอบด้วยพอลิออกทินนา-เมอร์ที่มีตำแหน่งทรานส์ (Trans) อยู่ประมาณ 86 เปอร์เซ็นต์ และยางมะตอยผสมจะมีสมบัติในการยึดเกาะกับหินและวัสดุที่ใช้ในการราดถนนดีที่สุดเมื่อทำการผสมที่อุณหภูมิ 280-330 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* **Borger et.al.**[15] ทำการศึกษาสารเติมแต่งที่เป็นเส้นใยเพื่อใช้ผสมยางมะตอยราดถนน โดยใช้เส้นใยที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจากวัสดุเหลือทิ้งที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนเทอพทาเลต 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เส้นใย เส้นใยแต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5 เมื่อนำยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไปทดสอบความเสถียรในโครงสร้างด้วย TP Min - StB Part 6.3.2 พบว่าประกอบด้วยอนุภาคขนาดน้อยกว่า 0.71 มิลลิเมตร 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทอพทาเลตมีความเสถียรสูง ความเป็นผลึกสูงและมีการจัดเรียงตัวสูง จึงทำหน้าที่เป็นเยื่อปกคลุมบนยางมะตอยได้ดีเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ก็ไม่เกิดการรวมตัวกัน มีผลทำให้ยางมะตอยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างที่ใช้ราดถนน

* **ดิเรก ดอนมอญ และชุติมา ไอยสวรรณ์** [16] ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยด้วยผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) โดยการผสมผงยางรถยนต์กับยางมะตอยด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดความเร็ว 700 รอบ/นาที ที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วศึกษาผลของปริมาณผลยาง (0-20% โดยน้ำหนัก) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคผงยาง (10 20 30 และ 40 เมส) และผลของสารเชื่อมโยงไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ในปริมาณต่าง ๆ (0-30% ของปริมาณผงยาง) โดยการศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) การยืดตัว (Ductility) ความหนาแน่น (Density) และจุดวาบไฟ (Flash point) โดยขนาดอนุภาคของผงยางจากยางรถยนต์ที่เหมาะสมคือ 30 เมส ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ในยางมะตอยเพิ่มขึ้น ค่าเพนนิเตรชัน ความหนาแน่น ค่าการยืดตัว และจุดวาบไฟ มีแนวโน้มลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (ชนิดเพนนิเตรชันเกรด (AC 60/70)) มีลักษณะครึ่งแข็งครึ่งอ่อนที่อุณหภูมิปกติ ได้จากการกลั่นน้ำมันจากบริษัท แบมโก้ จำกัด (BAMCO Ltd.) สมบัติบางประการของยางมะตอยแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางมะตอยที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	ผลการทดสอบ
Penetration at 25°C, 100 g., 5 sec	60 - 70
Softening point, Ring and Ball	48.9°C
Flash point, Cleveland open cup	248°C
Ductility at 13°C	> 150 cm
Density at 25°C	1.027 g/cm^3
Storage stability at 165°C, 120 Hrs difference in softening point	1.75
Brookfield viscosity, shear rate 18.6 s^{-1}, spindle 21 at 135°C	420 cP

3.1.2 เส้นใยไนลอน 6 (Nylon 6 Fiber) จากบริษัท Saeng Thai Rubber Factory Co., Ltd. เป็นเส้นใยสั้นได้จากการบดตัดย่อยเส้นใยไนลอนจากส่วนพลาย (Ply) ซึ่งเป็นส่วนเสริมแรงในยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เป็นเศษเหลือจากขบวนการผลิตยางรีเครม (Reclaimed rubber) จากขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว รูปถ่ายเส้นใยไนลอน ดังแสดงรูปที่ 3.1

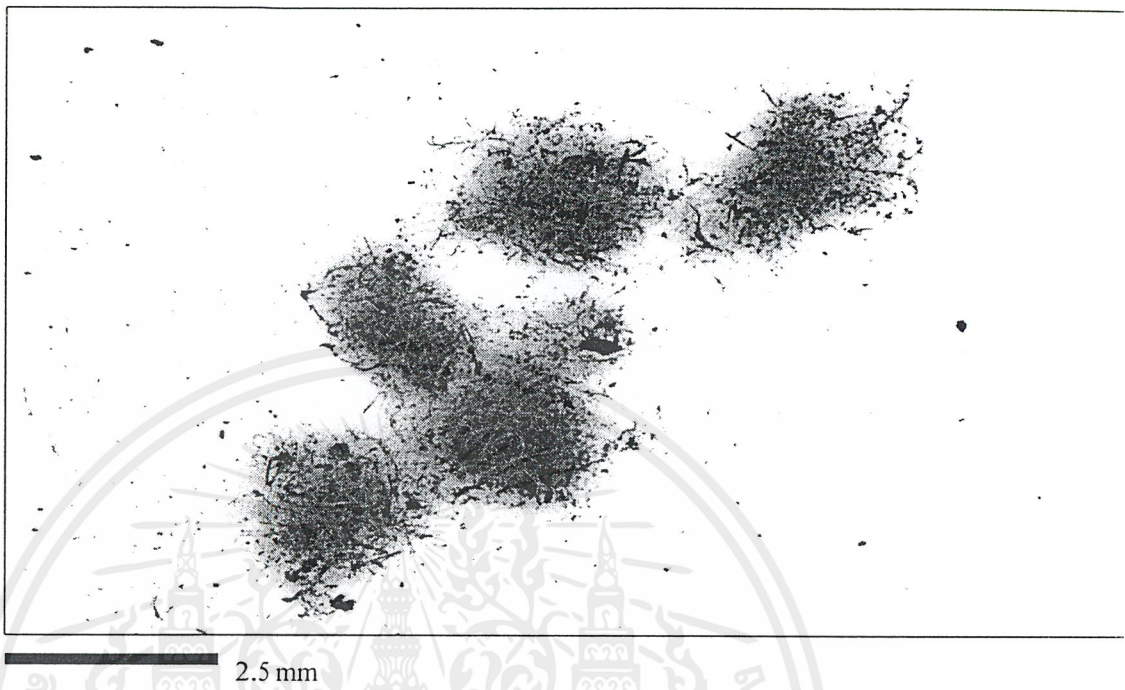
3.1.3 เส้นใยไม้ยูคาลิปตัส ที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp, TMP) ไม่แยกขนาด จากกรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

3.1.4 ผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) ขนาด 30 เมส จากบริษัท Saeng Thai Rubber Factory Co., Ltd.

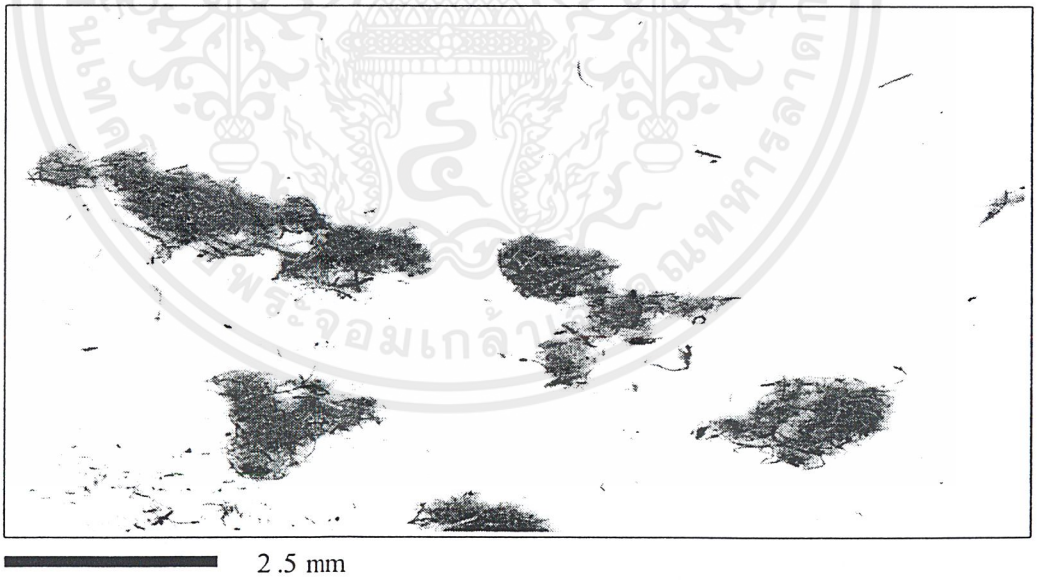
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 น้ำมันก๊าด

3.1.6 สารเชื่อมโยงกรดแนฟทานิก (Napthanic acid) เกรด SN 60



รูปที่ 3.1 เส้นใยไนลอน 6



รูปที่ 3.2 เส้นใยยูคาลิปตัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าเพนนิเตรชัน (Penetrometer) ตามมาตรฐาน NLT-181
2. เครื่องวัดความหนืดแบบบรู๊คฟิลด์ (Brookfield Viscometer Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM D 4402
3. เครื่องทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Machine) ตามมาตรฐาน DH-T 405
4. เครื่องทดสอบจุดอ่อนตัว (Ring-and-Ball) ตามมาตรฐาน ASTM D 36
5. เครื่องปั่นกวน (Labo - Stirrer Model LR-4 ID, Yamaha)
6. เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Balance, Croylon-England CR92 HR)
7. เครื่องทดสอบค่าคืนตัวกลับ Torsional recovery
8. ตู้อบ (Oven)
9. แท่นให้ความร้อน (Hot plate)
10. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) 200 องศาเซลเซียส
11. บีกเกอร์ (Beaker)
12. เครื่องชั่ง
13. แท่งแก้วคน
14. ช้อนตักสาร

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

ตอนที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอย (AC 60/70) ต่อเส้นใยไนลอน 6

1.1 การเตรียมตัวอย่าง AC 60/70 ผสม เส้นใยไนลอน 6

1. นำยางมะตอยไปให้ความร้อนจนกระทั่งหลอม จากนั้นทำการชั่งยางมะตอยให้ได้น้ ประมาณ 500 กรัม
2. ชั่งเส้นใยไนลอน 6 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่กำหนดที่ต้องการจะศึกษา ได้แก่ 0.25 0.5 0.75 1.0 2.0 และ 4.0 phr ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. นำยางมะตอยไปให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส
4. เติมเส้นใยไนลอน 6 ที่ชั่งลงไปในยางมะตอย พร้อมทั้งทำการปั่นกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำยางมะตอยที่เตรียมได้มาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเตรียมไว้ทดสอบสมบัติต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ทดสอบสมบัติของยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไนลอน 6 ดังต่อไปนี้

1. วัดค่าเพนนิเตรชันด้วยเครื่องวัดเพนนิโตรมิเตอร์ (Penetrometer) ตามมาตรฐาน NLT-181
2. วัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Brookfield Thermosel Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM D 4402
3. วัดความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่อง Specific Gravity Balance
4. วัดความสามารถในการยืดตัว ด้วยเครื่องทดสอบ Ductility Machine
5. ทดสอบหาจุดอ่อนตัวด้วยเครื่อง Ring and Ball
6. ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope ; OM)

ตอนที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอย (AC 60/70) ต่อเส้นใยยูคาลิปตัส

2.1 การเตรียมตัวอย่าง AC 60/70 ผสม เส้นใยยูคาลิปตัส

1. ทำการเตรียมตัวอย่างเหมือนกับเส้นใยไนลอน 6 แต่ใช้เส้นใยธรรมชาติยูคาลิปตัสแทน
2. เตรียมยางมะตอยผสมเส้นใยยูคาลิปตัสที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 1.0 2.0 และ 4.0 phr โดยทำเหมือนกับข้างต้น

2.2 ทดสอบสมบัติของยางมะตอยที่ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ดังต่อไปนี้

1. ทดสอบสมบัติเหมือนตอนที่ 1.2
2. ทดสอบค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery)

ตอนที่ 3 ศึกษาผลการเติมผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) ที่มีต่อยางมะตอย AC60/70 ที่ผสมเส้นใยไนลอน 6 ปริมาณ1 phr

3.1 การเตรียมตัวอย่าง AC 60/70 ผสม เส้นใยไนลอน 6 ปริมาณ 1 phr ที่มีการเติมผงยางจากยางรถยนต์ (GRT)

1. นำยางมะตอยไปให้ความร้อนจนกระทั่งหลอม จากนั้นทำการชั่งยางมะตอยให้ได้น้ำหนัก ประมาณ 500 กรัม
2. ชั่งเส้นใยไนลอน 6 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1 phr
3. ชั่งผงยางจากยางรถยนต์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่กำหนดที่ต้องการจะศึกษา ได้แก่ 0.25 0.5 0.75 1.0 และ 2.0 phrใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. นำยางมะตอยไปให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เติมผงยางจากยางรถยนต์และเส้นใยไนลอน 6 ที่ชั่งได้ลงไปในยางมะตอย พร้อมทั้งทำการปั่นกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

6. นำยางมะตอยที่เตรียมได้มาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเตรียมไว้ทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.2 ทดสอบสมบัติของยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไนลอน 6 ปริมาณ 1 phr ที่มีการเติมผลยางจากยางรถยนต์ในปริมาณต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ทดสอบสมบัติเหมือนตอนที่ 2.2

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของสารเชื่อมโยงที่มีต่อยางมะตอย AC60/70 ที่ใส่เส้นใยไนลอน 6 เส้นใยยูคาลิปตัส ปริมาณ 1phr

4.1 การเตรียมตัวอย่าง AC 60/70 ผสม เส้นใยไนลอน 1 phr ที่มีการเติมสารเชื่อมโยง

1. นำยางมะตอยไปให้ความร้อนจนกระทั่งหลอม จากนั้นทำการชั่งยางมะตอยให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ในปริมาณมากเกินพอ (ประมาณ 500 กรัม)

2. ชั่งเส้นใยไนลอน ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1 phr

3. ชั่งกรดแนฟทานิก ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 1 phrใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

4. นำยางมะตอยไปให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส

5. เติมกรดแนฟทานิกและเส้นใยไนลอน ที่ชั่งได้ลงไปในยางมะตอย พร้อมทั้งทำการปั่นกวนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

6. นำยางมะตอยที่เตรียมได้มาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเตรียมไว้ทดสอบสมบัติต่าง ๆ

7. เตรียมยางมะตอยผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่มีการเติมสารเชื่อมโยงดังวิธีการข้างต้น

4.2 ทดสอบสมบัติของยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไนลอน 1 phr ที่มีการเติมผลยางจากยางรถยนต์ในปริมาณต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ทดสอบสมบัติเหมือนกับตอนที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

1. **ทดสอบค่าเพนิเตรชันด้วยเครื่อง Penetrometer**
   1.1 นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
   1.2 เทตัวอย่างใส่แบบจนเต็มในขณะที่ตัวอย่างยังร้อนอยู่ ทิ้งไว้ให้เย็นที่ อุณหภูมิห้อง
   1.3 นำตัวอย่างไปแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
   1.4 นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ แล้วเช็ดน้ำที่ผิวหน้าตัวอย่างออกให้หมด
   1.5 เตรียมเข็มมาตรฐานหนัก 100±0.05 กรัม
   1.6 ตั้งหน้าปัดให้อ่านค่าทดลองที่ศูนย์
   1.7 เปิดปุ่มทำงานปล่อยให้เข็มแทรกลงไปในตัวอย่างเป็นเวลา 5 วินาที
   1.8 บันทึกค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดของเครื่องมือ
   1.9 ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
2. **ทดสอบหาความหนืดด้วย Brookfield Viscometer**
   2.1 นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
   2.2 เทตัวอย่างลงในแบบ 8-10 กรัม
   2.3 เปิดสวิตซ์ของ Thermosel
   2.4 ตั้งอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ที่ 135 องศาเซลเซียส
   2.5 นำตัวอย่างที่อยู่ในแบบใส่ลงในกระบอก Thermosel จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส
   2.6 เลื่อนเข็มเบอร์ 21 จุ่มลงในตัวอย่าง หมุนด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที และอัตราเฉือน 18.6 ต่อวินาที ทดลองเป็นเวลา 90 นาที
   2.7 บันทึกค่าความหนืดบนหน้าปัดของเครื่องทุก 2 นาที
   2.8 เลือกค่าความหนืดที่คงที่ที่สุดหรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด
3. **ทดสอบความสามารถในการดึงยืดด้วยเครื่อง Ductility**
   3.1 ใช้สบู่ฉาบลงบนแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างของแบบทางด้านใน (ส่วน a และ a′ ดังรูปที่ 2.5) บาง ๆ จากนั้นประกอบแบบทั้งหมดลงบนแผ่นทองเหลือง
   3.2 นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
   3.3 เทตัวอย่างลงในแบบที่ประกอบไว้ จนกระทั่งตัวอย่างเต็มล้นออกจากแบบเล็กน้อย
   3.4 ปล่อยให้ตัวอย่างเย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 ถึง 40 นาที
   3.5 นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
   3.6 นำส่วนทั้งหมดขึ้นจากน้ำใช้มีดบาง ๆ หรือเกียงซึ่งอังไฟให้ร้อนพอประมาณตัดปาดตัวอย่างส่วนที่เกินออกจากแบบให้ผิวหน้าตัวอย่างเรียบเต็มแบบพอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 นำตัวอย่างที่ปาดเรียบร้อยแล้วไปแช่น้ำอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 13 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

3.8 ยกตัวอย่างขึ้นจากอ่างแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างทั้งสองของแบบออก

3.9 เอาห่วงที่ปลายของตัวยึดทั้งสองข้างใส่ลงในขอเกี่ยวของเครื่องดึงแล้วเดิน เครื่องดึงตัวยึดให้แยกออกจากกันด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ 5 เซนติเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างที่ยืดเป็นเส้นขาดออกจากกัน

3.10 วัดระยะที่ตัวอย่างยืดออกจนขาดจากกันในหน่วยเซนติเมตร

4. การวัดจุดอ่อนตัวโดยใช้เครื่อง Ring-and-Ball Apparatus

4.1 นำตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2 ใช้สบู่ฉาบลงบนแผ่นทองเหลืองอย่างบาง ๆ แล้ววางแบบวงแหวนทองเหลืองลงบนแผ่นทองเหลือง

4.3 เทตัวอย่างลงในแบบวงแหวนทองเหลืองให้ล้นเล็กน้อย แล้วปล่อยให้เย็นลงตามอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอย่างน้อย 30 นาที

4.4 ใช้มีดบางหรือเกียงซึ่งอังไฟร้อนแล้วตัดตัวอย่างส่วนเกินออกจนเรียบเสมอปากขอบวงแหวน

4.5 เติมน้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 800 มิลลิลิตร จนลึกประมาณ 105±3 มิลลิลิตร และเลือกใช้เทอร์โมมิเตอร์ขนาด 100 องศาเซลเซียส

4.6 ประกอบเครื่องมือพร้อมด้วยวงแหวนบรรจุตัวอย่าง วางลูกกลมให้อยู่ตรงจุดศูนย์กลางวงแหวน พร้อมทั้งจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ลงในบีกเกอร์

4.7 ให้ความร้อนที่ก้นของบีกเกอร์ด้วยเครื่องให้ความร้อน โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.8 บันทึกอุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ เมื่อลูกกลมตกลงกระทบกันบีกเกอร์ซึ่งจะมีตัวเซนเซอร์บอกสัญญาณเตือน

5. การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ ด้วยเครื่อง Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance

5.1 นำตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.2 เทตัวอย่างลงในแบบสี่เหลี่ยม 5-10 กรัม ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

5.3 นำตัวอย่างออกจากแบบเพื่อเตรียมไปทดสอบ

5.4 เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์เพื่อเตรียมทดสอบ

5.5 เทียบมาตรฐานเครื่องมือ

5.6 ใส่ชิ้นงานที่ปลายเข็ม

5.7 ปรับตุ้มน้ำหนักแขนยาวให้ชี้ที่ "A"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 จุ่มชิ้นงานลงในบีกเกอร์ให้น้ำท่วมพอดี อย่าให้ฟองอากาศติดชิ้นงาน

5.9 อ่านค่าจากตัวเครื่อง

6. การทดสอบค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery)

เป็นการทดสอบเพื่อดูความยืดหยุ่นของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติ โดยการวัดองศาที่คืนตัวกลับของแกนโลหะทรงกระบอกที่อยู่กึ่งกลางตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดแน่นอน เมื่อบิดแกนโลหะทรงกระบอกไป 180 องศา จากตำแหน่งเดิมแล้วปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที

7. กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope ; OM)

7.1 เตรียมแผ่นสไลด์ โดยนำยางมะตอยผสมเส้นใยที่หลอมเหลวหยดลงในแผ่น Cover glass

7.2 ทำการปาดยางมะตอยผสมเส้นใยให้เรียบและสามารถให้แสงส่องผ่านได้

7.3 นำ Cover glass อีกแผ่นมาประกบติดกับแผ่นแรก โดยอย่าให้มีฟองอากาศ

7.4 เตรียมกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope , OM) โดยเลือกใช้เลนส์วัตถุกำลังขยายขนาด 10 เท่า และเลนส์ตาขยาย 10 เท่า

7.5 ปรับโฟกัส (Focus) ให้ได้รูปที่ชัดเจน

7.6 ถ่ายรูป

3.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

ขั้นตอนการวิจัย	ระยะเวลาในการวิจัย
1. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	มิ.ย.-ก.ค.44
2. วิธีการเตรียมและศึกษาเส้นใยวัตถุดิบ เช่น ขนาดการกระจายตัว	ส.ค.-ต.ค.44
3. ศึกษาการเพิ่มปริมาณเส้นใยไนลอน 6 เพื่อหา ปริมาณที่เหมาะสม ในการเพิ่มคุณสมบัติของยางมะตอย	ต.ค.-พ.ย.44
4. ศึกษาการเพิ่มปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอย	ธ.ค.44
5. ศึกษาผลของ additive ต่าง ๆ	ม.ค.45
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	ก.พ.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

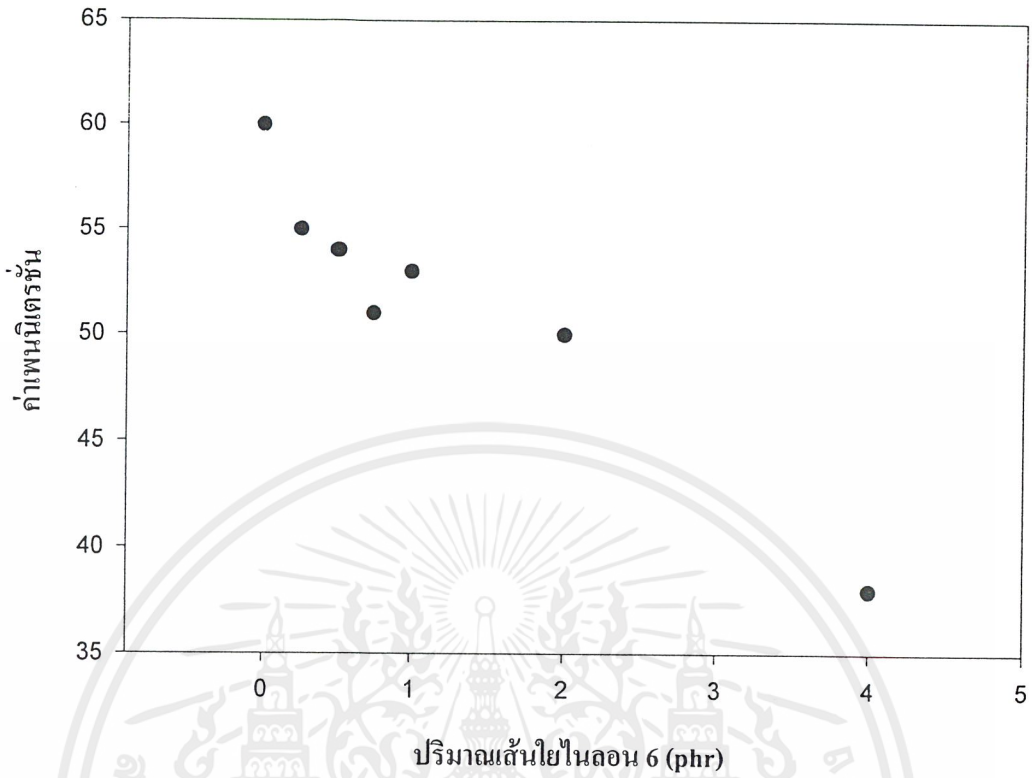
จากการดำเนินการวิจัยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยด้วยเส้นใยไนลอน เส้นใยยูคาลิปตัส ผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) โดยการผสมเส้นใยไนลอน เส้นใยยูคาลิปตัส ผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) กับยางมะตอยด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไนลอน (0.25 – 4 phr) ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส (0.25 – 4 phr) ศึกษาผลของปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) ในยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไนลอน 1 phr และศึกษาผลของสารเชื่อมโยง (DCP) โดยการศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) ค่าการยืดตัว (Ductility) จุดวาบไฟ (Flash point) จุดอ่อนตัว (Softening point) ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope , OM) จากการทดลอง สามารถแสดงผลงานวิจัยได้ดังนี้

4.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอย (AC60/70) ต่อเส้นใยไนลอน

4.1.1 เพนนิเตรชัน (Penetration)

การทดสอบค่าเพนนิเตรชัน คือ การวัดความแข็งของยางมะตอยโดยใช้วิธีวัดระยะที่เข็มมาตราฐานจมลงไปในยางมะตอยเมื่อถูกกดด้วยน้ำหนักที่กำหนดในระยะเวลา และอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากการทดลองพบว่ายางมะตอยขณะที่ยังไม่ได้เติมเส้นใยไนลอน จะมีค่าเพนนิเตรชันเท่ากับ 60 เมื่อปริมาณเส้นใยไนลอน เพิ่มขึ้นค่าเพนนิเตรชันมีค่าลดลง โดยเฉพาะการทดสอบค่าเพนนิเตรชันเมื่อเติมเส้นใยไนลอน ปริมาณ 4 phr ค่าเพนนิเตรชันมีค่าลดลงจาก 60 เป็น 38 ดังรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่า เส้นใยไนลอน เป็นวัสดุที่มีความแข็งหรือค่ามอดุลัส (Modulus) มากกว่ายางมะตอย ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมจำพวกสารเพิ่มเนื้อชนิดเสริมแรง (Reinforcing) ในยางมะตอย เมื่อปริมาณเส้นใยไนลอน ซึ่งมีความแข็งมากกว่ายางมะตอยเพิ่มขึ้น ทำให้ยางมะตอยผสมที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) จึงทำให้ค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

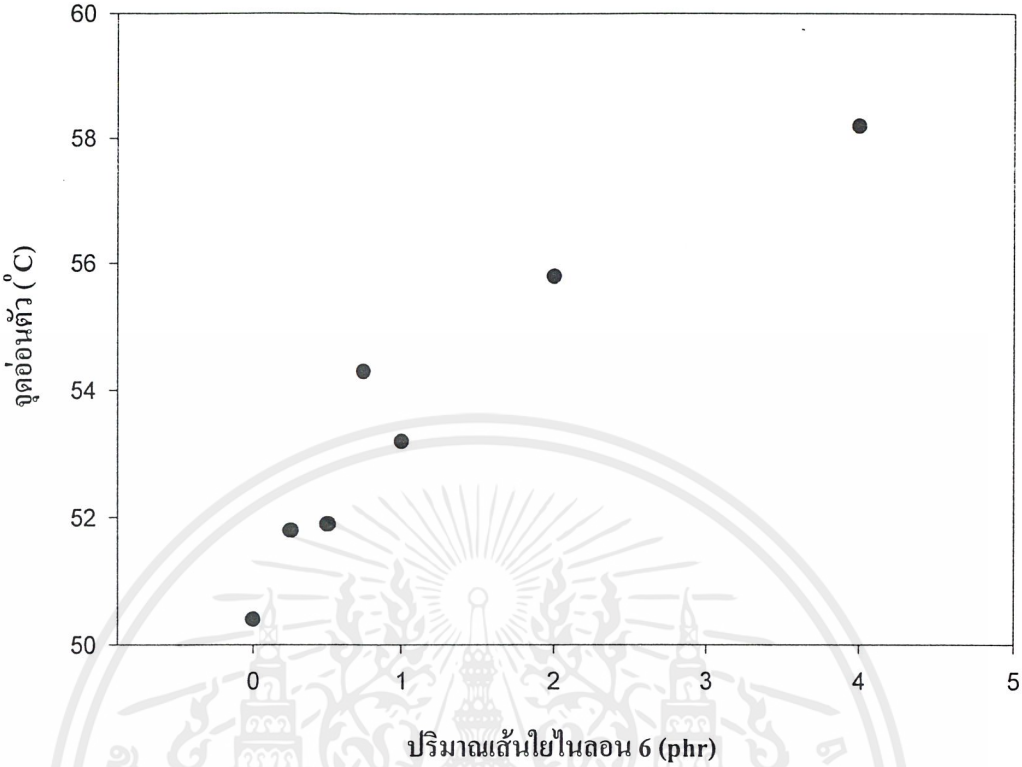


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอนกับค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอย AC60/70 ผสมเส้นใยไนลอนที่ปริมาณต่าง ๆ

4.1.2 จุดอ่อนตัว (Softening point)

จากการทดลองพบว่า จุดอ่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไนลอน ดังรูปที่ 4.2 กล่าวคือ มีจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นประมาณ 8 °C เมื่อเติมเส้นใยไนลอน ปริมาณ 4 phr อธิบายได้ว่า เส้นใยไนลอน ที่เติมลงไปนั้นทำให้ยางมะตอยมีความแข็งขึ้น และเส้นใยไนลอน ที่เติมช่วยในการรับแรงกดของการทดสอบทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวของวัสดุมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

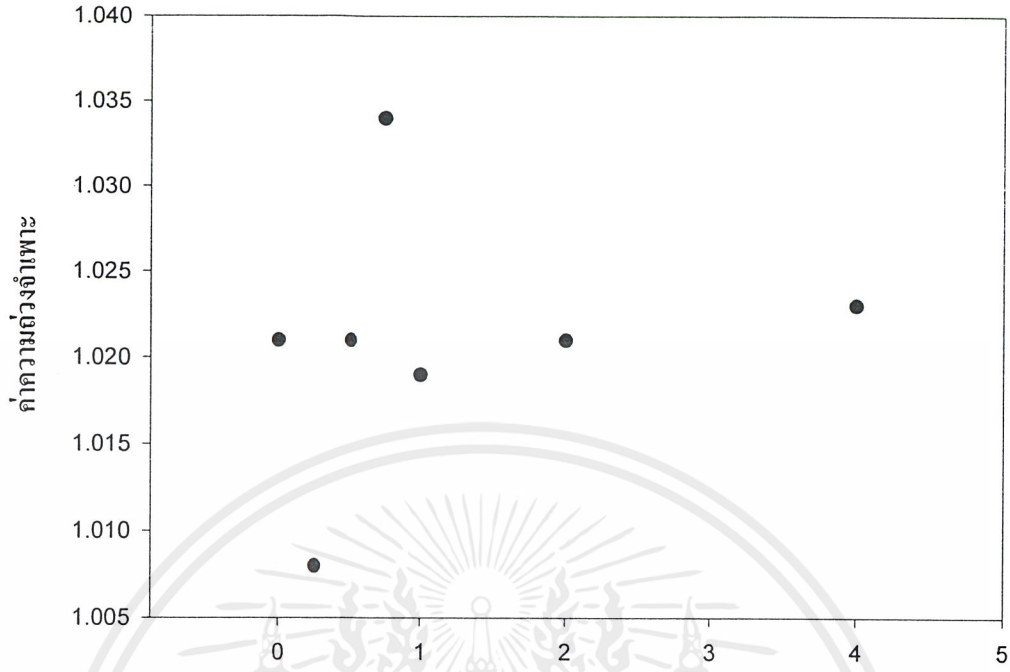


รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอนกับค่าจุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอนที่ปริมาณต่าง ๆ

4.1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

จากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณเส้นใยไนลอนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก เส้นใยไนลอน มีความหนาแน่นประมาณ 1.08 – 1.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมากกว่ายางมะตอยที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.027 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อปริมาณของเส้นใยไนลอน ในยางมะตอยเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของยางมะตอยที่ทำการผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

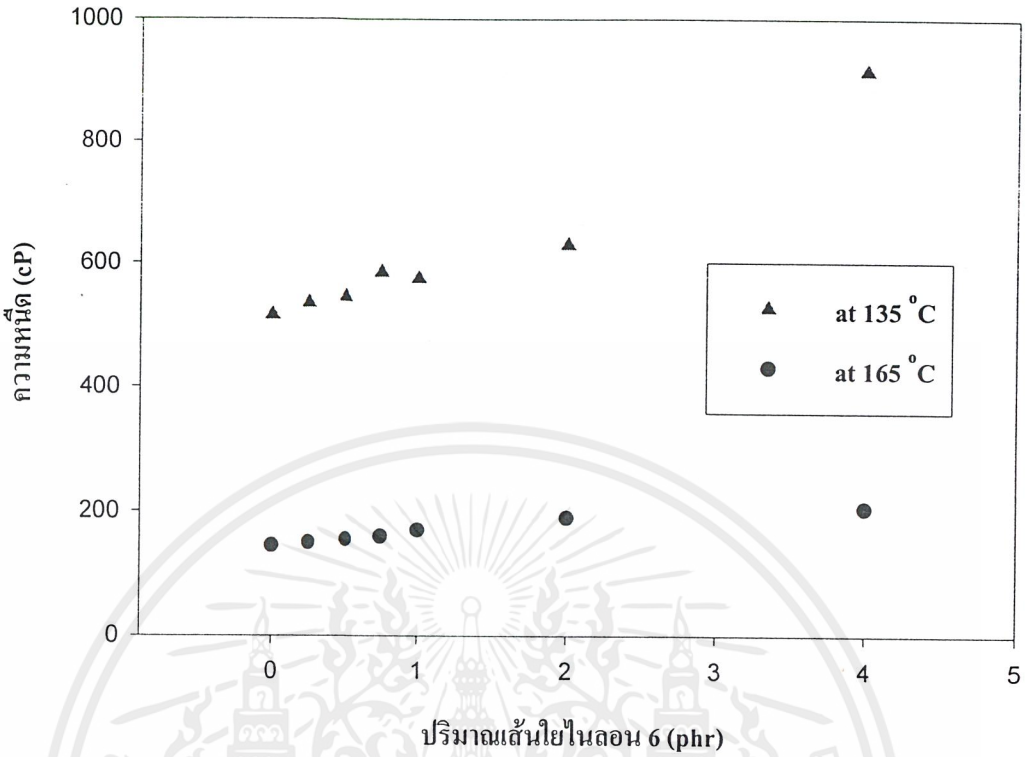


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอนกับค่าความถ่วงจำเพาะของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอนที่ปริมาณต่าง ๆ

4.1.4 ความหนืด (Viscosity)

จากการทดลองพบว่า ค่าความหนืดของยางมะตอยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไนลอน โดยเฉพาะการทดสอบความหนืดที่อุณหภูมิ 135 ^{o}C ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 500 cP เป็น 900 cP เมื่อใช้เส้นใยไนลอน ปริมาณ 4 phr แต่ความหนืดที่อุณหภูมิ 165 ^{o}C ผลของเส้นใยที่เติมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดเพียงเล็กน้อย สามารถอธิบายได้ว่า ที่อุณหภูมิ 165 ^{o}C ยางมะตอยเกิดการหลอมเหลวเป็นของไหลเกือบจะสมบูรณ์ โดยมีส่วนที่เป็นลักษณะของแข็งหลงเหลืออยู่น้อยมาก ทำให้มีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน โดยเส้นใยที่เติมลงไปมีผลต่อความหนืดน้อยมาก โดยผลของเส้นใยที่เติมลงไปที่มีผลต่อความหนืดของยางมะตอย เนื่องจาก เส้นใยที่เพิ่มไปนั้นเป็นของแข็งขณะที่ยางมะตอยเป็นของไหลเมื่อผสมกันแล้วทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) มากขึ้นทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของยางมะตอย ทำให้ความหนืดของของผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

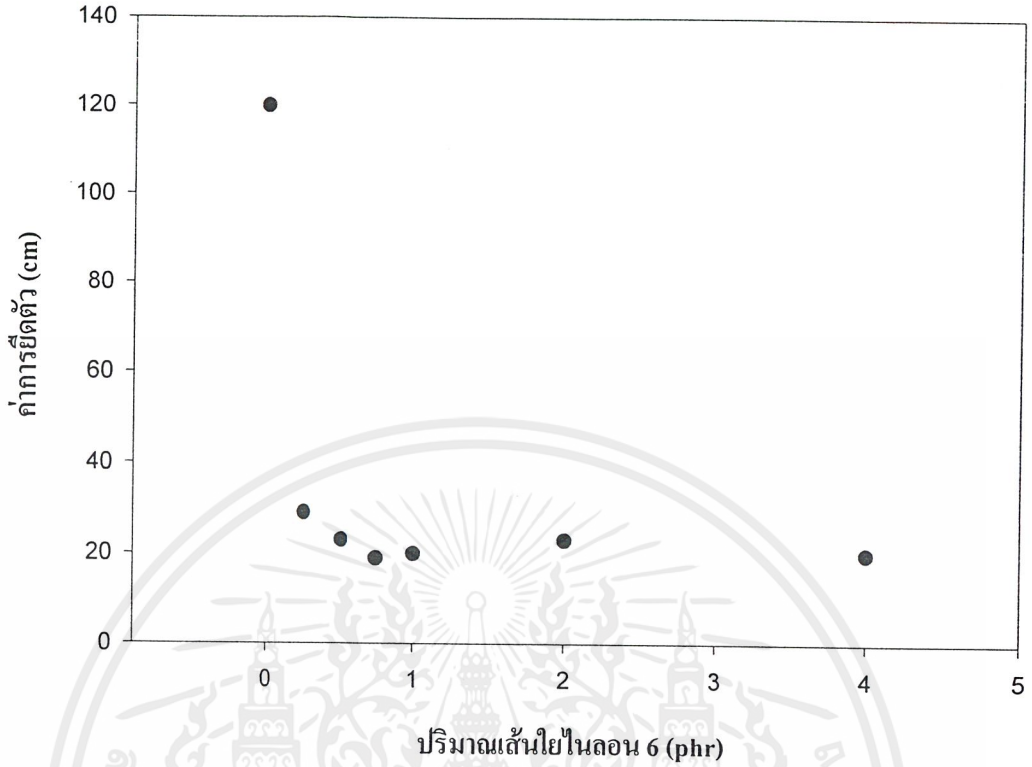


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยไนลอน กับค่าความหนืดของยางมะตอย AC 60/70 ผสมกับเส้นใยไนลอน ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.1.5 ค่าการยืดตัว (Ductility)

จากการทดลองพบว่า ค่าการยืดตัวมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไนลอน มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค หรืออินเตอร์เฟส (Interphase) เป็นบริเวณที่ไม่แข็งแรงเทียบกับทั้งเส้นใยและส่วนที่เป็นเมตริกซ์ (ยางมะตอย) การเพิ่มปริมาณของเส้นใยไนลอน มีค่ามากขึ้นทำให้การแบ่งเป็น 2 วัฏภาคมีมากขึ้น มีพื้นที่รอยต่อหรืออินเตอร์เฟสมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดลดลงเมื่อเทียบกับการไม่มีเส้นใยซึ่งไม่มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยไนลอน กับยางมะตอย เมื่อทำการดึงยืดยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไนลอน ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ยางมะตอยขาดออกจากกันได้ง่าย เป็นผลให้ค่าการยืดตัวลดลง ดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยไนลอน กับค่าการยืดตัว ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมกับเส้นใยไนลอน ที่ปริมาณต่าง ๆ

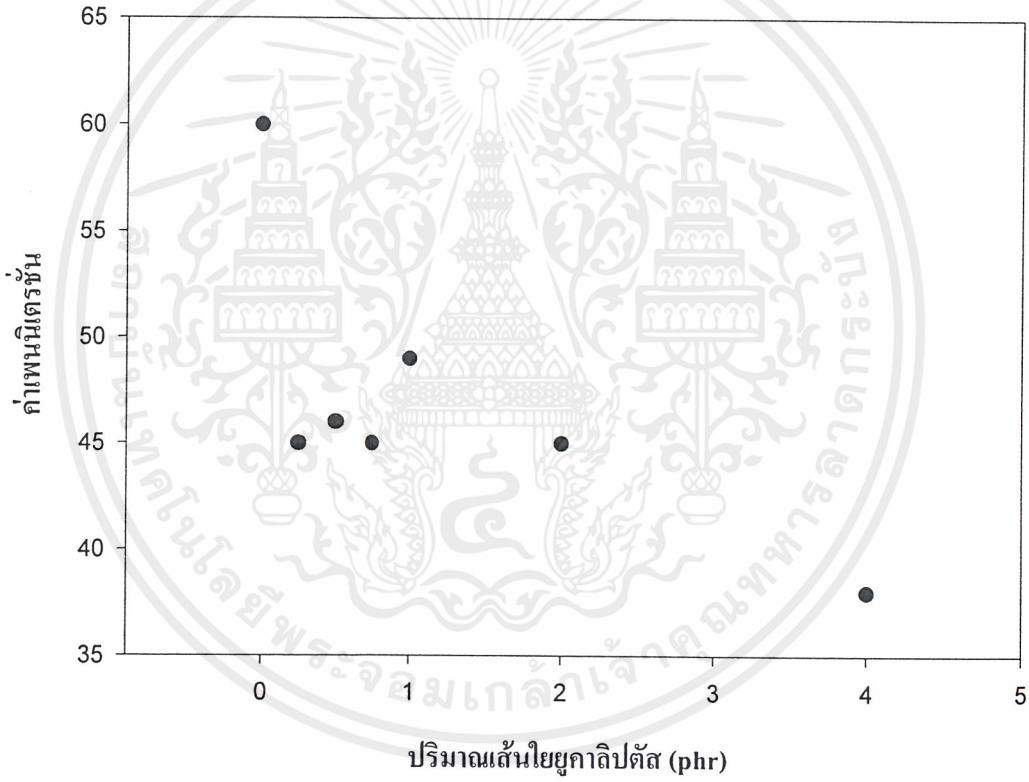
จากผลการทดลองศึกษาสมบัติของยางมะตอย เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไนลอน ที่เหลือทิ้งจากยางรถยนต์ใช้แล้ว อาจสรุปได้ว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน มีสมบัติดีขึ้น ยางมะตอยมีความแข็งแรงสูงขึ้น เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) จุดอ่อนตัว (Softening point) และค่าความหนืด (Viscosity) อย่างไรก็ตาม ค่าการดึงยืด (Ductility) มีค่าลดลงอย่างมาก อาจเนื่องจากปัญหาการยึดติดระหว่างวัฏภาค หรืออินเตอร์เฟส(Interphase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ศึกษาปริมาณของเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีต่อสมบัติของยางมะตอย

4.2.1 เพนนิเตรชัน (Penetration)

จากการทดลองพบว่า ค่าเพนนิเตรชันมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส มากขึ้นดังรูปที่ 4.6 ซึ่งคล้ายกับในกรณีการเติมเส้นใยไนลอน อธิบายได้ว่า เส้นใยยูคาลิปตัส ซึ่งมีความแข็งหรือค่ามอดุลัส (Modulus) มากกว่ายางมะตอย และทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมจำพวกสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) ในยางมะตอย เมื่อปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส ซึ่งมีความแข็งมากกว่ายางมะตอยเพิ่มขึ้นทำให้ยางมะตอยผสมที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) จึงทำให้ค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยมีค่าลดลง

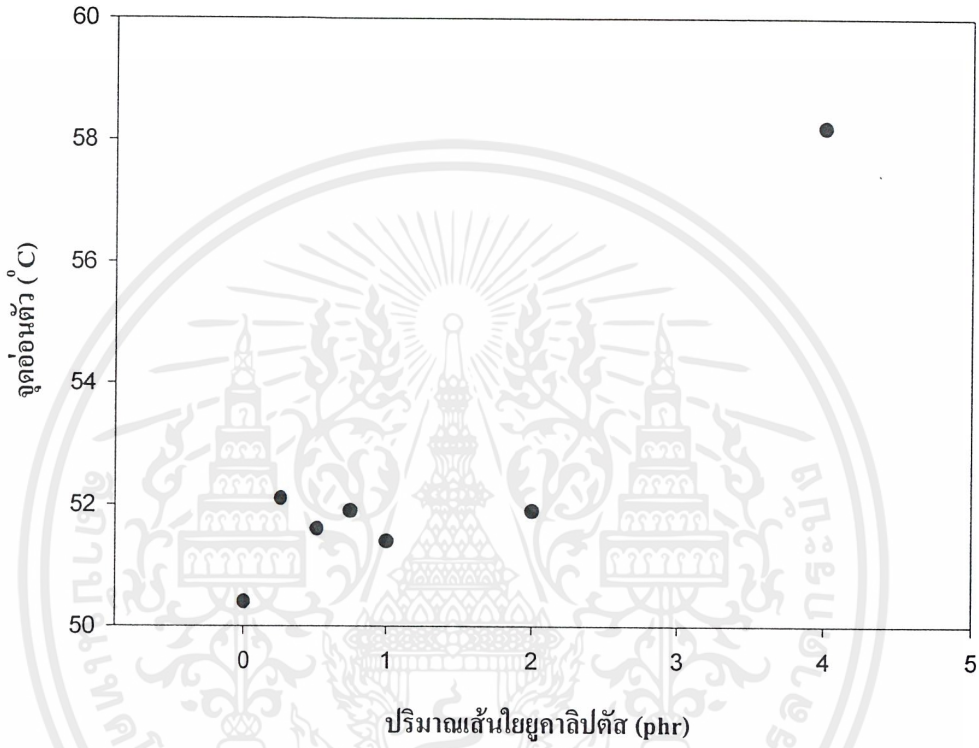


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 จุดอ่อนตัว (Softening point)

จากการทดลองพบว่า จุดอ่อนตัวของยางมะตอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยยูคาลิปตัสมีความสามารถในการทนอุณหภูมิ สูงกว่ายางมะตอย นอกจากนี้เส้นใยยังช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ทำให้ยางมะตอยมีความแข็งแรงขึ้น ทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณของเส้นใยยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นจึงทำให้จุดอ่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7

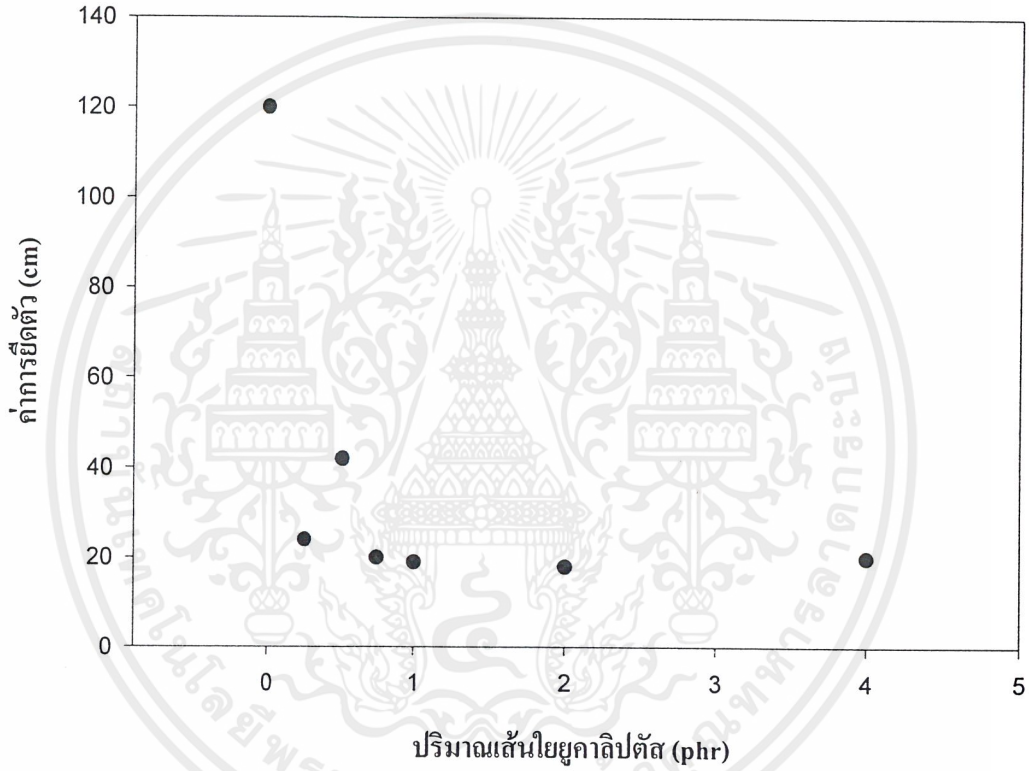


รูปที่4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับจุดอ่อนตัว ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ค่าการยืดตัว (Ductility)

จากการทดลองพบว่า ค่ายืดตัวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเส้นใยยูคาลิปตัส ที่มากขึ้นทำให้เกิดการแบ่งเป็น 2 วัฏภาคมีมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดกันลดลงเมื่อเทียบกับการที่ยางมะตอยไม่ผสมเส้นใยมีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียว กัน ไม่มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยยูคาลิปตัสกับยางมะตอย เมื่อทำการดึงยืดยางมะตอยที่ผสมเส้นใยยูคาลิปตัสในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ยางมะตอยขาดออกจากกันได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าการยืดตัวลดลง ดังรูปที่ 4.8

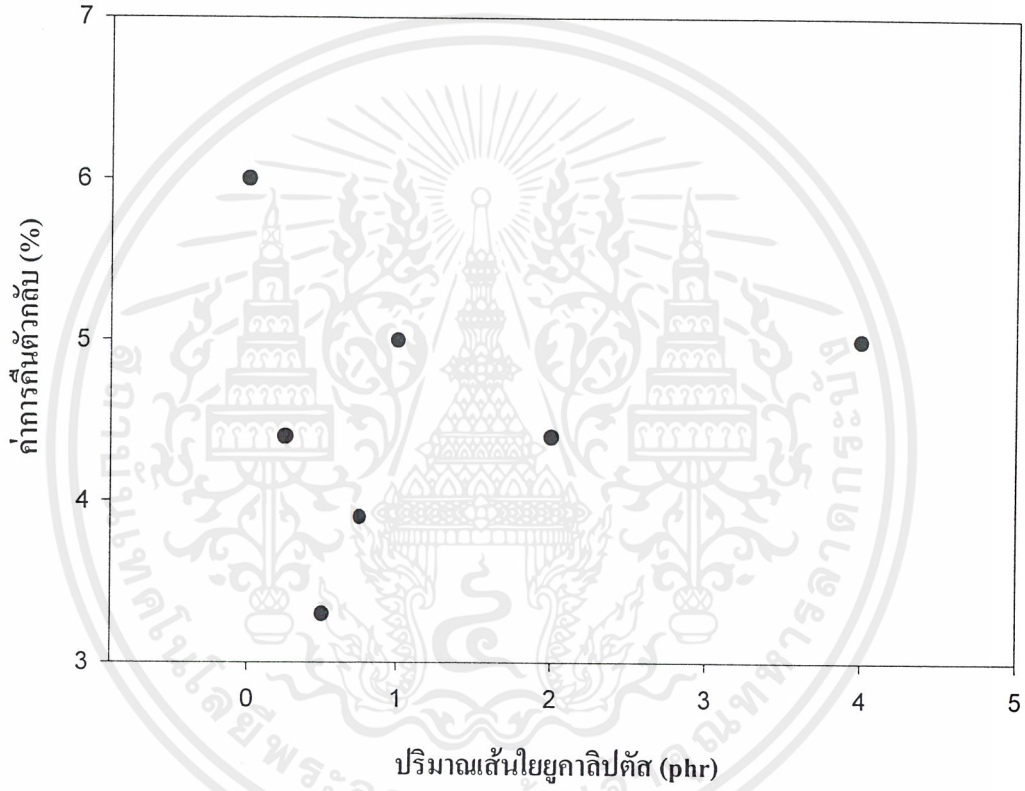


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าการยืดตัวของยางมะตอย AC60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery)

จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของเส้นใยยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการคืนตัวกลับมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่คงที่โดยมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสภาพของส่วนประกอบบางชนิดในยางมะตอย คือ เมื่อยางมะตอยได้รับความร้อนและถูกปั่นกวนตลอดเวลา ทำให้ยางมะตอยสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจึงทำให้ส่วนประกอบของยางมะตอยคือ แอสฟัลต์ทีน เกิดปฏิกริยาออกซิเดชั่น ทำให้แอสฟัลต์ทีนขยายตัว ส่วนประกอบของยางมะตอยจึงเสียสมดุล ค่าการคืนตัวกลับจึงลดลง และอาจเกิดจากปัญหาระหว่างวัฏภาค(Interphase)

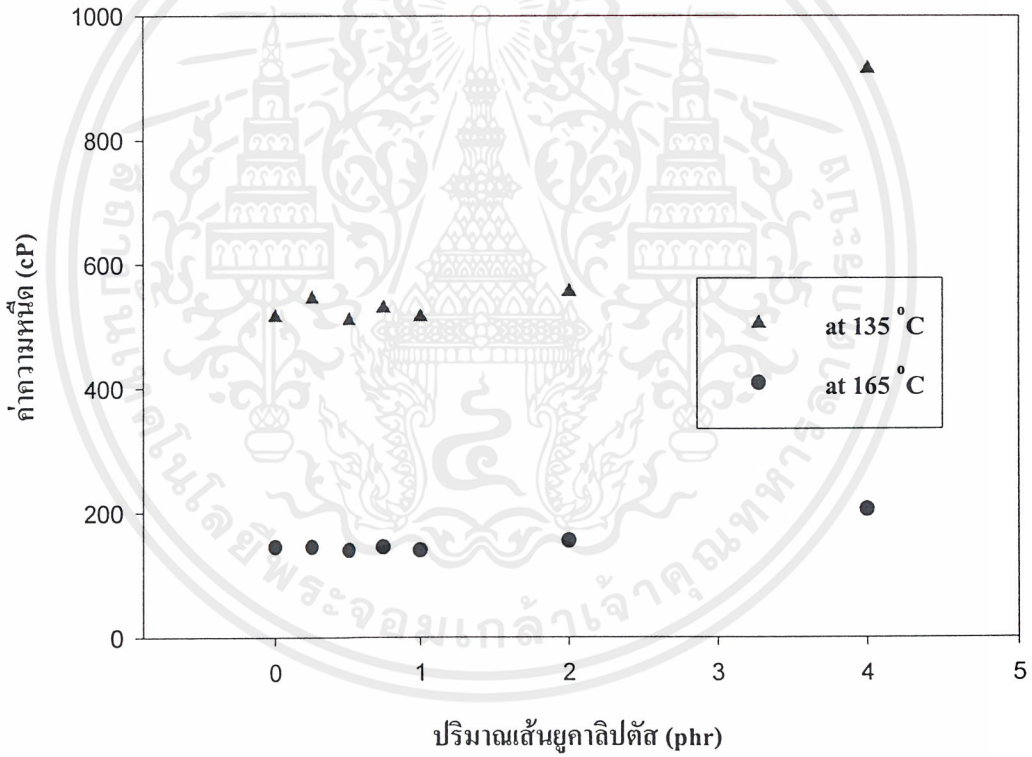


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าค่าการคืนตัวกลับของ ยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ความหนืด (Viscosity)

จากการทดลองพบว่า ค่าความหนืดของยางมะตอยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส โดยเฉพาะการทดสอบความหนืดที่อุณหภูมิ 135 °C ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 500 cP เป็น 900 cP เมื่อใช้เส้นใยยูคาลิปตัส ปริมาณ 4 phr แต่ความหนืดที่อุณหภูมิ 165 °C ผลของเส้นใยที่เติมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดเพียงเล็กน้อย สามารถอธิบายได้ว่า ที่อุณหภูมิ 165 °C ยางมะตอยเกิดการหลอมเหลวเป็นของไหลเกือบจะสมบูรณ์ โดยมีส่วนที่เป็นลักษณะของแข็งหลงเหลืออยู่น้อยมาก ทำให้มีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน โดยเส้นใยที่เติมลงไปมีผลต่อความหนืดน้อยมาก โดยผลของเส้นใยที่เติมลงไปที่มีผลต่อความหนืดของยางมะตอย เนื่องจาก เส้นใยที่เพิ่มไปนั้นเป็นของแข็งขณะที่ยางมะตอยเป็นของไหลเมื่อผสมกันแล้วทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) มากขึ้นทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของยางมะตอย



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัส กับค่าความหนืดของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ปริมาณต่าง ๆ

จากผลการทดลองศึกษาสมบัติของยางมะตอย เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยยูคาลิปตัส อาจสรุปได้ว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางมะตอยผสมเส้นใยยูคาลิปตัส มีสมบัติดีขึ้น ยางมะตอยมีความแข็งแรงสูงขึ้น เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) จุดอ่อนตัว (Softening point) และค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนืด (Viscosity) อย่างไรก็ตาม ค่าการดึงยืด (Ductility) มีค่าลดลงอย่างมาก อาจเนื่องจากปัญหาการยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interphase) เช่นเดียวกับเส้นใยไนลอน

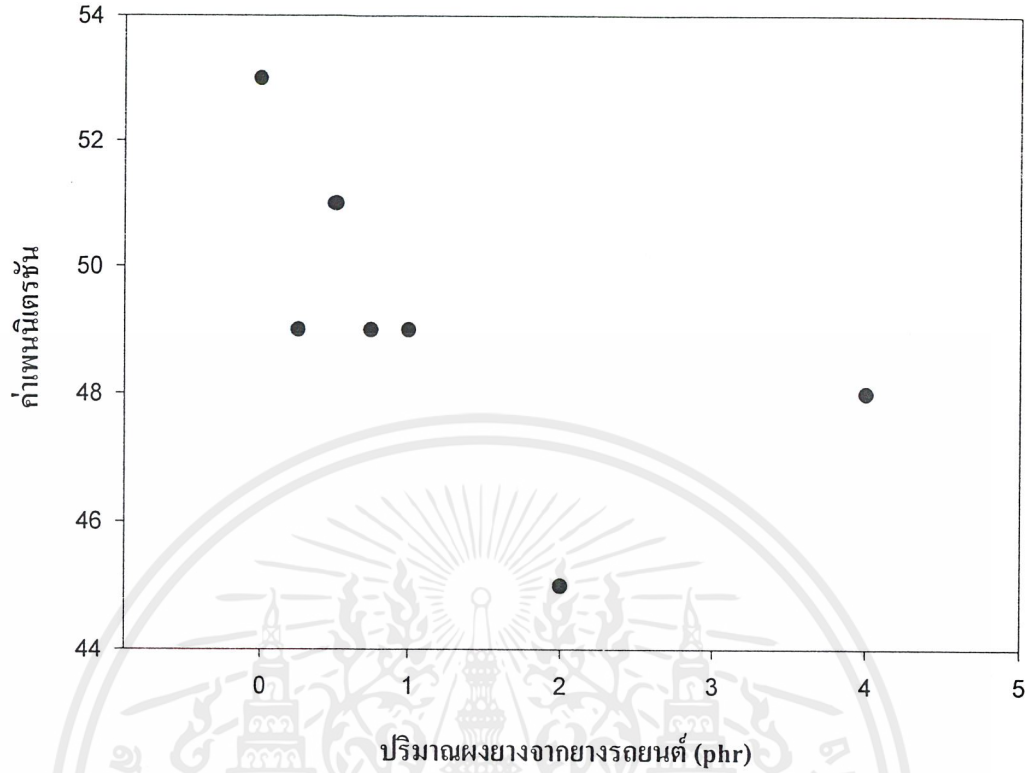
4.3 การศึกษาปริมาณของผงยางจากยางรถยนต์ที่มีผลต่อสมบัติยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน 1phr

การทดลองตอนนี้เป็นการศึกษาถึงปริมาณของผงยางจากยางรถยนต์(Ground rubber tire, GRT) ที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน ปริมาณ 1 phr เนื่องมาจาก เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการทำการทดลอง ไม่หนืดมากจนเกินไป รวมทั้งสมบัติเชิงกลต่าง ๆ โดยรวมที่ทำการทดสอบในตอนที่ 4.1 ปริมาณไนลอน ที่ 1 phr ดีที่สุด จึงเลือกผสมผงยางที่ปริมาณเส้นใยไนลอนคงที่ที่ 1phr

4.3.1 เพนนิเตรชัน (Penetration)

จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมผงยาง GRT ค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยมีค่าลดลง กล่าวคือยางมะตอยมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงยางรถยนต์ ซึ่งมีความแข็งหรือค่ามอดุลัส (Modulus) มากกว่ายางมะตอย และทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมจำพวกสารเพิ่มเนื้อแบบไม่เสริมแรง (Non – reinforcing fillers) ในยางมะตอย เมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ทำให้ยางมะตอยผสมที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) จึงทำให้ค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณการใส่ผงยางรถยนต์ 2 phr มีค่าเพนนิเตรชันลดลงอย่างมาก จาก 53 เป็น 45 อาจเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

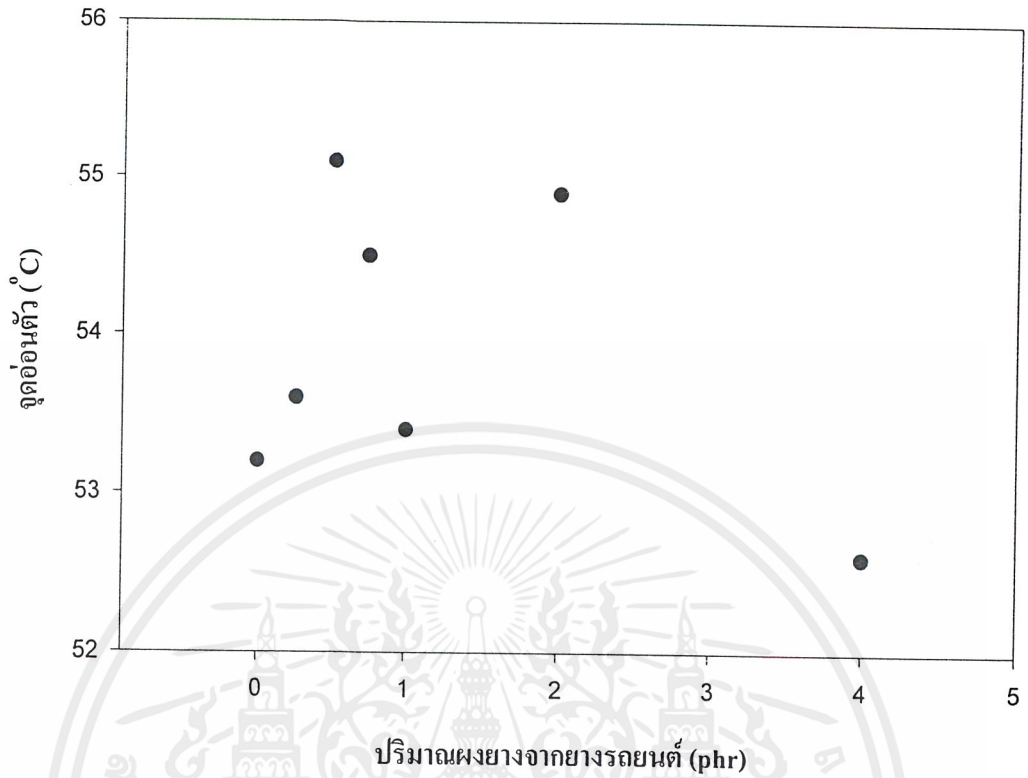


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ กับค่าเพนนิเตรชัน ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 1phr ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.2 จุดอ่อนตัว (Softening point)

จากการทดลองพบว่า จุดอ่อนตัวมีค่าไม่แน่นอน แต่มีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 53 – 55 ^{o}C) ค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ GRT 0 ถึง 2 phr แต่มีจุดอ่อนตัวลดลงที่ 4 phr ดังรูป 4.14 อธิบายได้ว่า ผงยางจากยางรถยนต์ ที่เติมลงไปนั้นทำให้ยางมะตอยมีความแข็งขึ้น และเส้นใยไนลอน ที่เติมอาจช่วยในการรับแรงกดของการทดสอบค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

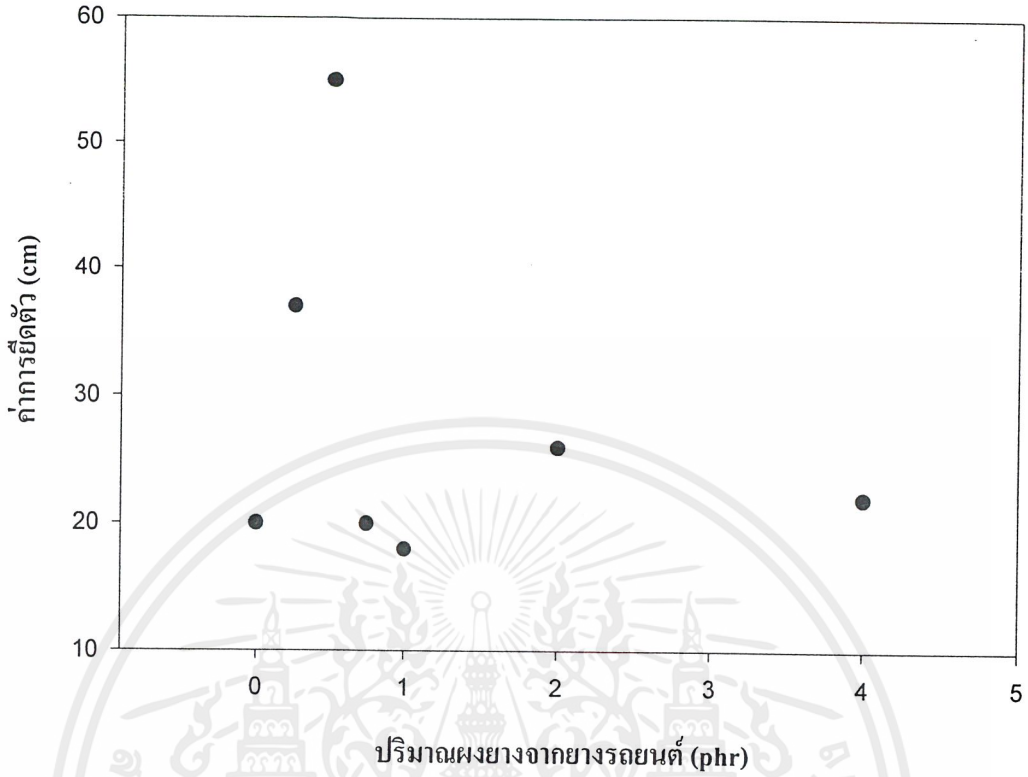


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ กับจุดอ่อนตัว ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 1phr ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.3 ค่าการยืดตัว (Ductility)

จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงยางในยางมะตอยผสมเส้นใยค่าการยืดตัวไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สามารถสรุปได้ เนื่องจากปริมาณผงยางรถยนต์ที่เติมลงไปในยางมะตอยมีปริมาณน้อยจึงไม่ค่อยมีผลต่อค่าการยืดตัว ค่าที่แปรปรวนของผลการทดลองอาจเนื่องมาจากการเสื่อมสลายของส่วนแอสฟัลทีน ในยางมะตอย เนื่องจากเกิดข้อผิดพลาดในการทดลองบางประการที่ยางมะตอยผสมแต่ละสูตรไม่ได้รับประสบการณ์ความร้อน (Thermal history) ที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

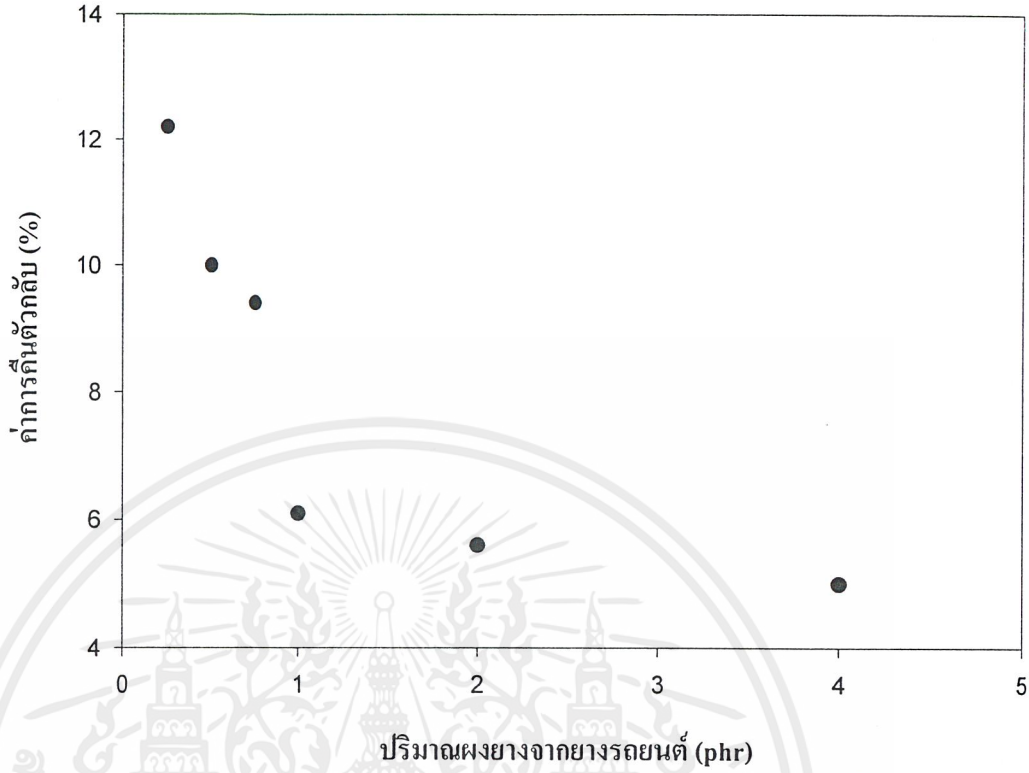


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์กับค่าการดึงยืดของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 1phr ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.4 ค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery)

จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของผงยางจากยางรถยนต์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการคืนตัวกลับมีค่าลดลงเนื่องจากว่าเกิดการเปลี่ยนสภาพของส่วนประกอบบางส่วนในยางมะตอย คือเมื่อยางมะตอยได้รับความร้อนและถูกปั่นกวนตลอดเวลา ทำให้ยางมะตอยสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจึงทำให้ส่วนประกอบของยางมะตอยคือ แอสฟัลต์ทีน เกิดปฏิกริยาออกซิเดชั่น ทำให้แอสฟัลต์ทีนขยายตัว ส่วนประกอบของยางมะตอยจึงเสียสมดุล ค่าการคืนตัวกลับจึงลดลง และอาจเกิดจากปัญหาระหว่างวัฏภาค(Interphase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

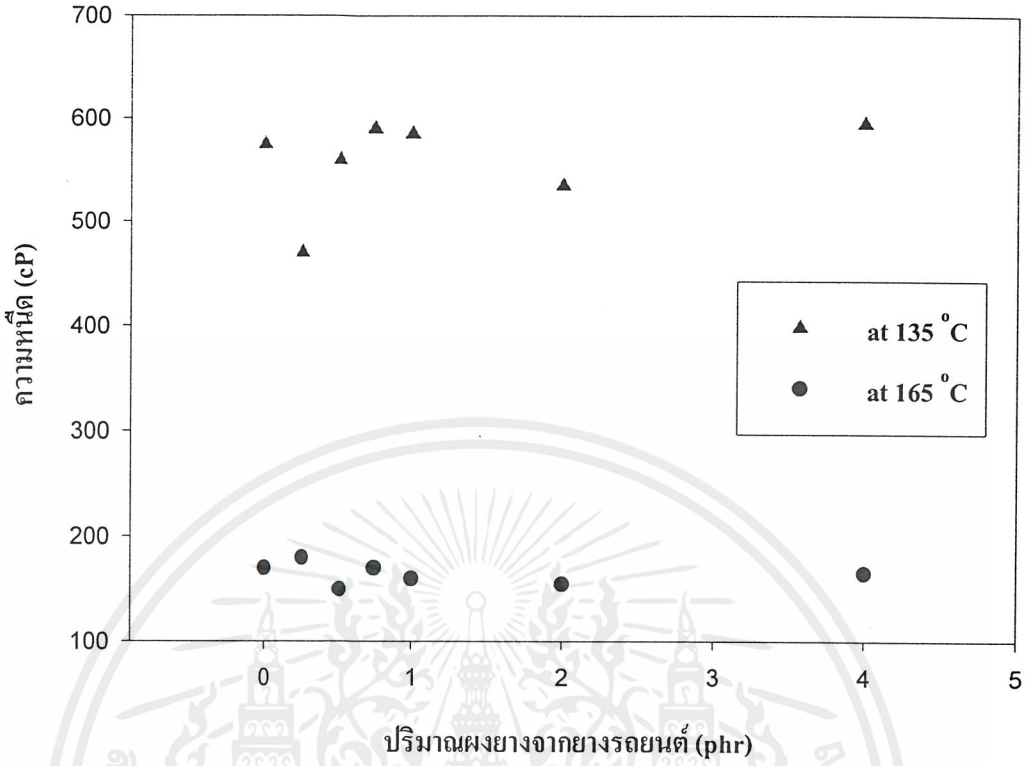


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ กับค่าการคืนตัวกลับของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 1phr ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.5. ความหนืด (Viscosity)

จากการทดลองพบว่า ความหนืดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณผงยางจากยางรถยนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ผงยางจากยางรถยนต์ที่เพิ่มไปนั้นมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับยางมะตอยจึงมีผลต่อค่าความหนืดน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ กับค่าความหนืดของยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 1phr ที่ปริมาณต่าง ๆ

จากผลการทดลองศึกษาสมบัติของยางมะตอย เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไนลอน ปริมาณ 1 phr ที่เหลือทิ้งจากยางรถยนต์ใช้แล้ว และผงยางจากยางรถยนต์ อาจสรุปได้ว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน มีสมบัติที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของผงยางรถยนต์ที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณยางมะตอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาผลของกรดแนฟทานิกที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอย

4.4.1 ยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน ที่ใสกรดแนฟทานิก

จากการทดลองพบว่า กรดแนฟทานิก จะทำให้สมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไนลอน ปริมาณ 1 phr ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าการยืดตัว (Ductility) เนื่องจาก กรดแนฟทานิกจะไปช่วยให้ยางมะตอยเข้าสู่คุณสมบัติเดิม โดยการเข้าไปเติมแต่งเรซิน (Resin) ของยางมะตอยที่เสียไปเนื่องจากการสูญเสียเรซิน (Resin) ในการเกาะยึดกับเส้นใย อย่างไรก็ตามค่าเพนนิเตรชั่นและค่าความหนืดมีค่าลดลงเล็กน้อยไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบระหว่างยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยไนลอน 1 phr ที่มีการเติมสารเชื่อมโยง 1 phr และที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมโยง

สมบัติต่าง ๆ	สูตรการผสม	
	Asphalt AC 60/70 + Nylon 6 1 phr	**Asphalt AC 60/70 + Nylon 6 1 phr + กรดแนฟทานิก 1 phr**
1. Penetration	53	56
2. Softening point (^{o}C)	53.2	55
3. Ductility (cm)	20	32
4. Viscosity (cP)		
135 ^{o}C	575	475
165 ^{o}C	170	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ใส่กรดแนฟทานิก

จากการทดลองพบว่า กรดแนฟทานิก จะทำให้สมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอยที่ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส ปริมาณ 1 phr ดีขึ้นคล้ายผลของการเติมเส้นใยไนลอนและสารเชื่อมโยง โดยเฉพาะค่าการยืดตัว (Ductility) เนื่องจาก กรดแนฟทานิก กรดแนฟทานิกจะไปช่วยให้ยางมะตอยเข้าสู่คุณสมบัติเดิม โดยการเข้าไปเติมแต่งเรซิน(Resin) ของยางมะตอยที่เสียไปเนื่องจากการสูญเสียเรซิน (Resin) ในการเกาะยึดกับเส้นใยทำให้ของผสมมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น คือ ค่าจุดอ่อนตัวและค่าการยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ดีค่าเพนนิเตรชันและค่าความหนืดมีค่าลดลงเล็กน้อยไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้ยางมะตอยที่ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส มีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถรับแรงได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างยางมะตอย AC 60/70 ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส 1 phr ที่มีการเติมสารเชื่อมโยง 1 phr และที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมโยง

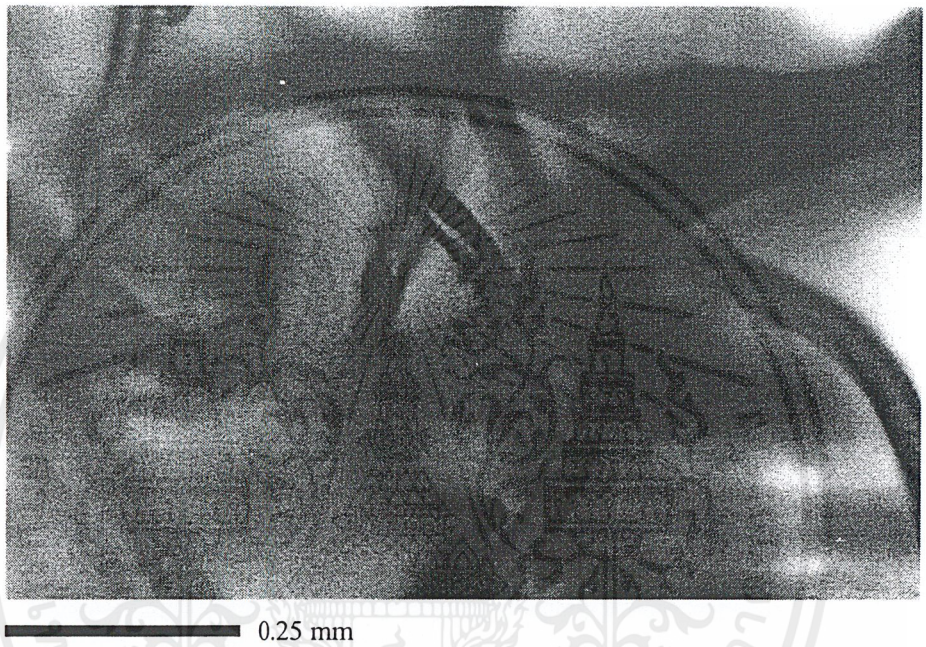
สมบัติต่าง ๆ	สูตรการผสม	
	Asphalt AC 60/70 + เส้นใยยูคาลิปตัส 1 phr	**Asphalt AC 60/70 + เส้นใยยูคาลิปตัส 1 phr + กรดแนฟทานิก 1phr**
1. Penetration	49	55
2. Softening point (^{o}C)	51.4	55
3. Ductility (cm)	19	46
4. Viscosity (cP) 135 ^{o}C 165 ^{o}C	 515 140	 470 135
5. Torsional recovery (%)	5.0	2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope; OM)

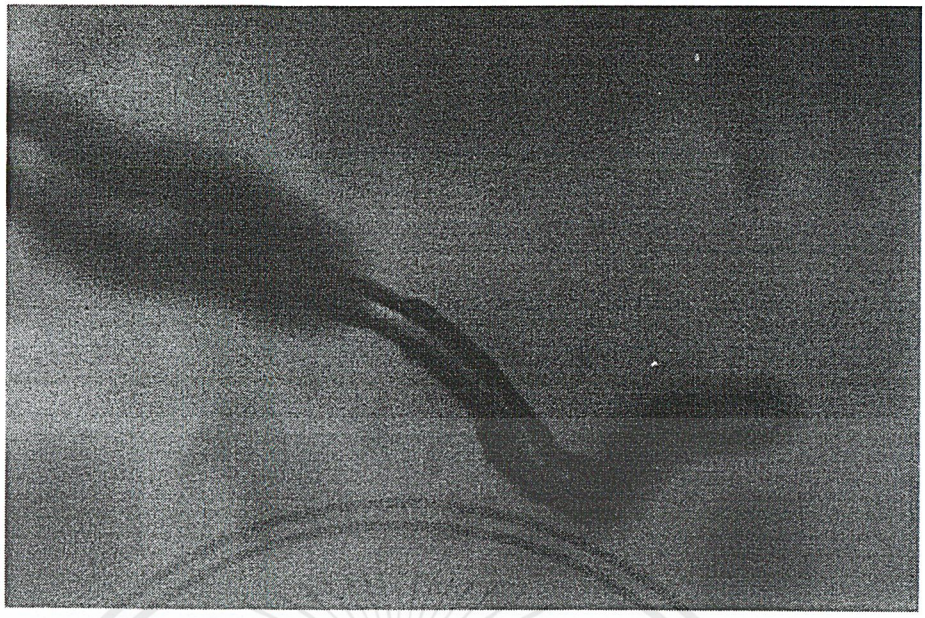
เพื่อศึกษาลักษณะผิวของอนุภาคผงยาง เส้นใย ที่มีผลต่อการยึดเกาะอนุภาคของยางมะตอย รวมทั้งการกระจายตัวของเส้นใยและผงยาง ตอนต่อไปจึงเป็นการนำเสนอผลการนำเสนอผลการศึกษาสัณฐาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า เตรียมตัวอย่างของผสมบนแผ่นสไลด์แล้วส่องผ่านแสง (Transmission) สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยไนลอน 6 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (กำลังขยาย 100 เท่า)

จากรูปที่ 4.16 พบว่า ลักษณะของเส้นใยไนลอน 6 มีความใส มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่า ๆ กัน เนื่องจาก เส้นใยไนลอน 6 เป็นเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers) ที่นำมาทำงานวิจัยได้มาจากส่วน Ply ของยางรถยนต์ ซึ่งในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ต้องกำหนดขนาดของเส้นใยไนลอน 6 ให้เท่า ๆ กันเพื่อคุณภาพของยางรถยนต์

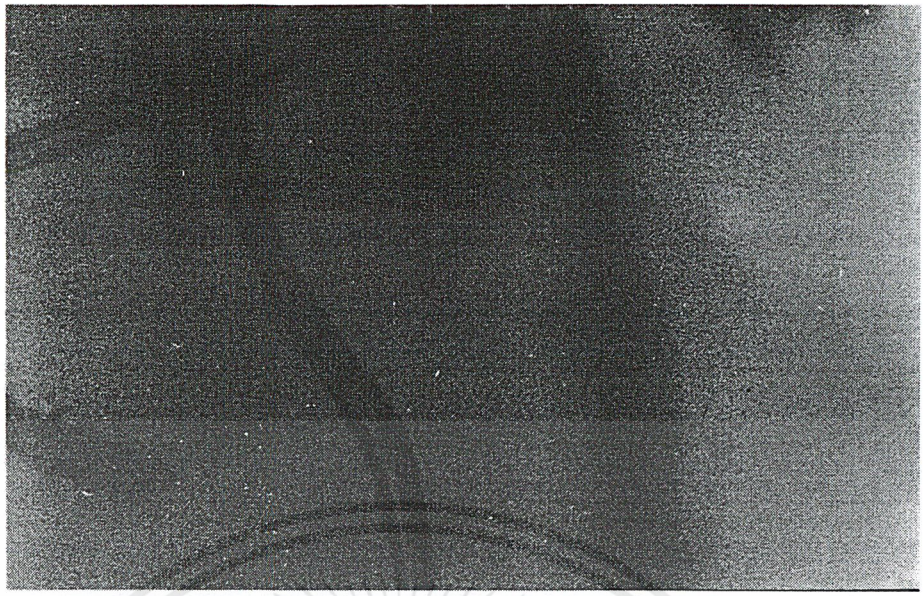
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แสดงการยึดติดของยางมะตอยบนเส้นใยไนลอน (ขยาย 100 เท่า)

จากรูปที่ 4.17 สามารถอธิบายได้ว่ายางมะตอย จะยึดติดดีกับเส้นใยไนลอนอยู่บริเวณรอบนอกของเส้นใยเท่านั้น ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยไนลอน 6 ในยางมะตอยเป็นแบบสุ่ม (Random) บริเวณรอบ ๆ ของเส้นใยจะเต็มไปด้วยยางมะตอย ความยาวของเส้นใยไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

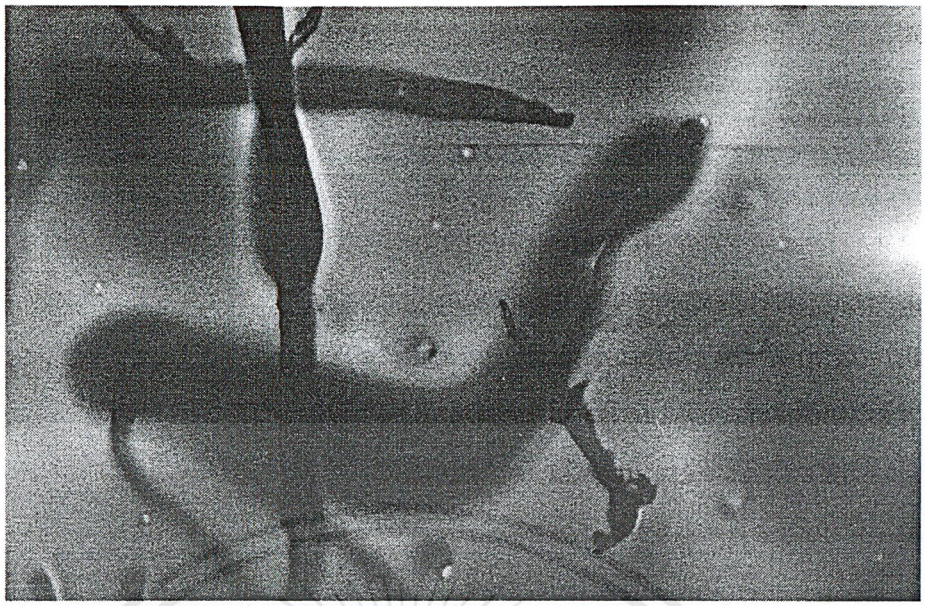


0.25 mm

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยยูคาลิปตัส ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (กำลังขยาย 100 เท่า)

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ลักษณะของเส้นใยยูคาลิปตัสมีขนาดและความยาวไม่เท่ากัน เนื่องจากการเป็นเส้นใยธรรมชาติ เตรียมจากการแยกเยื่อด้วยความร้อนเชิงกล ไม่สามารถควบคุมขนาดและความยาวของเส้นใยได้เหมือนกับเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ จากรูปพบว่ายางมะตอยสามารถยึดติดได้ดีบนเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



0.25 mm

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แสดงการยึดติดของยางมะตอยบนเส้นใยยูคาลิปตัส (ขยาย 100 เท่า)

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า ยางมะตอยสามารถยึดติดบริเวณรอบนอกเส้นใยยูคาลิปตัสได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากยางมะตอยมีความหนืดต่ำและเป็นวัสดุที่มีการยึดประสานที่ดี เหนียวติดกับวัสดุอื่นได้ดี จึงไม่มีปัญหายึดติดกับวัสดุอื่น เช่น เส้นใยต่าง ๆ ที่ใส่เข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยศึกษาพัฒนา และปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยด้วยเส้นใยไนลอนจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เส้นใยยูคาลิปตัส และผงยางจากยางรถยนต์ โดยการผสมเส้นใยต่าง ๆ และผงยางจากยางรถยนต์กับยางมะตอยด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไนลอน และเส้นใยยูคาลิปตัส (0.25 – 4 phr) ศึกษาผลของปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) ที่มีต่อยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน ปริมาณ 1 phr ศึกษาผลของกรดแนฟทานิก (Napthanic acid) ในปริมาณ 1phr ที่มีผลต่อยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน และยูคาลิปตัส โดยการศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) การยืดตัว (Ductility) การคืนตัวกลับ (Torsional recovery) จุดอ่อนตัว (Softening point) ความหนืดแบบบรู๊คฟิลด์ (Brookfield viscosity) และความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) สรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไนลอน และเส้นใยยูคาลิปตัส ในยางมะตอยจะทำให้ยางมะตอยแข็งขึ้น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) ลดลง จุดอ่อนตัวสูงขึ้น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ค่าการยืดตัว (Ductility) มีแนวโน้มลดลง พบว่าปริมาณของเส้นใยไนลอนและเส้นใยยูคาลิปตัสที่เติมลงไปในยางมะตอยที่เหมาะสมคือ 1 phr เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไนลอน 6 และเส้นใยยูคาลิปตัส พบว่ามีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปในทางเดียวกัน

2. เมื่อเพิ่มปริมาณของผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) ในยางมะตอยผสมเส้นใยไนลอน จะทำให้ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) ความหนาแน่น (Density) ค่าการยืดตัว (Ductility) มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อสมบัติของยางมะตอย

3. เมื่อเติมกรดแนฟทานิก (Napthanic acid) ปริมาณ 1 phr ลงในยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไนลอน และเส้นใยยูคาลิปตัส ทำให้ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) จุดอ่อนตัว (Softening point) ค่าการยืดตัว (Ductility) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับยางมะตอยผสมเส้นใยที่ไม่ได้มีการผสมกรดแนฟทานิก

4. การใส่สารประเภทเส้นใย เช่น ไนลอน เซลลูโลส พอลิเอสเทอร์ ลงในยางมะตอย ผลที่ได้จะช่วยให้ Rheology ของยางมะตอยดีขึ้น คือ ค่าเพนนิเตรชั่นลดลง จุดอ่อนตัวสูงขึ้น ทำให้ลดการเกิด Bleeding ของยางมะตอย จึงเหมาะกับการทำ Sealant และ Waterproof

5. จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้เส้นใยไนลอนที่เหลือทิ้งจากเศษยางรถยนต์และเส้นใยธรรมชาติยูคาลิปตัส เป็นสารเพิ่มเนื้อและช่วยเสริมแรงให้ยางมะตอยทำให้สมบัติของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มะตอยบางประการดีขึ้น เช่น ความแข็ง จุดอ่อนตัว และความหนืด แต่สมบัติบางประการลดลง เช่น ค่าการยืดตัว (Ductility) อย่างไรก็ดีไม่สามารถใส่เส้นใยปริมาณมากได้ เนื่องจากเส้นใยเบา ฟูตัว นอกจากนี้เส้นใยปริมาณมากอาจเกิดปัญหาเส้นใยพันใบพัดขณะผสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของยางมะตอยผสมเส้นใยเพิ่มเติม เช่น เสถียรภาพในการเก็บรักษา (Storage stability) ความต้านทานการแตกหัก (Cracking resistance) เป็นต้น

2. ศึกษาผลของสารเติมแต่งชนิดอื่น ที่อาจมีผลต่อยางมะตอยผสม เช่น กรดออกซาลิก (Oxalic acid) สารช่วยผสม (Compatibilizer) เป็นต้น

3. ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลงานวิจัยกับเส้นใยชนิดอื่นๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เป็นต้น

4. ทดลองใช้งานจริง เช่น ใช้เป็นสารอุดรอยรั่ว (Sealant) ฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา ราดถนนจริง ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ไกรศรี ดวงพัตรา, *เอกสารบริษัทเชลล์ ประเทศไทย* , 4 – 17
2. Asphalt Institute, *A Basic Asphalt Emulsion manaul*, series NO.19, 2 nd ed. U.S.A., 14, 44, 60
3. ผศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด, *พอลิเมอร์คอมโพสิต*,เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2544 หน้า 23-26
4. สมภพ เลิศลักขณากุล, *ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์(พีวีซี)และเส้นใยยูคาลิปตัส*, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ปีการศึกษา 2544 หน้า 22, 32 – 34
5. M.Tipanna and D.D. Kale,*Rubber Chemistry and Technology*, 70, **1997**, 815
6. V.M. Makarov and V.F. Drozdovski, *Reprocessing of Tyres and Rubber Wastes Recycling from the rubber Products Industry*, 1 st ed, Ellis Horrood Limited, **1991**, 55, 153, 155
7. R.C. Evers and D.F. Lynch, *เอกสารบริษัทเชลล์ ประเทศไทย*,1-3
8. R.C. Evers and D.F. Lynch,*เอกสารบริษัทเชลล์ ประเทศไทย*, 4-6
9. A. Commarasamy, Ontario Ministry of Transportation and S.A.M. Hesp, Queens University, kingston, Ontario
10. Periet et.al, *Polymer Modification of Paveing Asphalt Binders*, 69, **1994**, 451
11. A.B. Samsuri, Rubber Research Institute of Malaysia, *J. nat. Rubb.*, 11(3), 166 – 182
12. M.W. Rouse, *U.S No. Patent 5,525,653*, July 28, **1994**
13. Y.J. Lee, L.M. France and M.C. Hawley, *Rubber chem. Technol.*, **1997**, 70, 256 – 263
14. B.J. Burns, *U.S. No. Patent 5,936,015* , October 16, **1998**
15. H.W. Borger and P. Knobloch, *U.S. No. Patent 5,897,950*, May 14, **1997**
16. ดิเรก ดอนมอญ และ ชุติมา ไอยสุวรรณ์, *การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยราดถนนด้วยผงยางจากยางรถยนต์*, โครงงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 มาตรฐานยางมะตอยปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt cement,PMA) ที่ใช้ราดถนนของกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

Item NO	Properties	Unit	Min.	Max.	Test Method
1	Penetration at 25 °C , 100 gm. 5sec	0.1 mm.	60	70	DH-T 403
2	Softening point , Ring and Ball	°C	70	-	ASTN D 36
3	Penetration Index		+3	-	NLT - 181*
4	Ductility at 13 °C , 5 cm/min	cm.	55	-	DH-T 405
5	Torsional recovery at 25° C	%	70	-	NLT - 329*
6	Float test at 60° C	Sec	3000	-	ASTN D 139
7	Toughness/Tenacity test, 25° C				EST NE - 31**
	Toughness	Kg.cm.	200	-	
	Tenacity	Kg.cm.	100	-	
8	Brookfield viscosity , shear rate 18.6s - 1 , Spindle 21				ASTM D 4402
	at 135 ° C	cP	1000	-	
	at 165° C	cP	300	-	
9	Storage stability at 165° C , 120 hrs				NLT - 328
	Difference in Softening point	°C	-	5	
10	Density at 25 °C	gm/cc	1.00	1.05	ASTM D 70
11	Flash point, Cleveland Open Cup	°C	220	-	ASTM D 92
12	Solubility in trichloroethylene	% wt.	99.0	-	DH-T 409
	Test on Residue form Thin Film Oven Test				
13	Weight loss	% wt.	-	0.5	ASTM D 17
14	Retained penetration at 25° C	%	70	-	DH-T 405
15	Variation in softening point	°C	4	6	ASTN D36
16	Ductility at 13 °C , 5 cm/min	cm.	40	-	DH-T 405
17	Torsion recovery at 25° C	%	60	-	NLT - 359

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note *** Refer to the National Laboratory of Transportation Madrid , Spain**

**** Refer to Elpidio Sanchez Marcos, Spain**

กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้