

การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยราดถนนด้วยผงยาง
จากยางรถยนต์



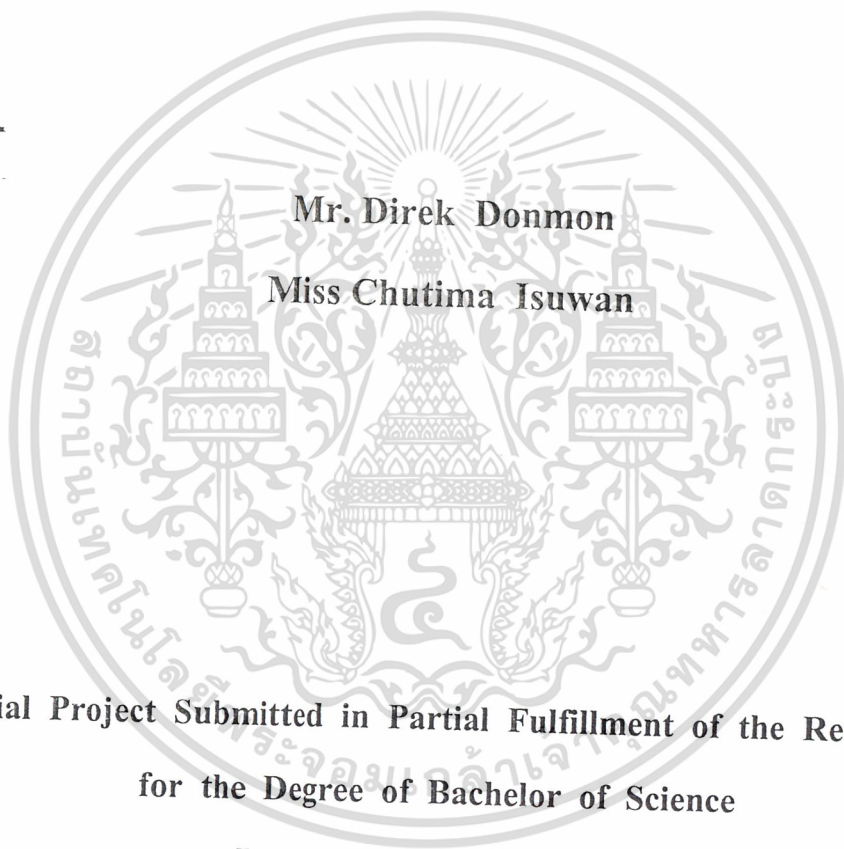
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 40072
วัน, เดือน, ปี..... 24 ก.ค. 2544

.b.....
.i.....

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Property Modification of Asphalt Cement
(AC 60/70) by Ground Rubber Tire (GRT)**



**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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยราดถนนด้วยผงยางจากยางรถยนต์		
นักศึกษา	นางสาวสุติมา ไอยสุวรรณ	รหัส	40052008
	นายดิเรก คอนมอญ	รหัส	40052015
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นายไกรศรี ดวงพัตรา บริษัท BAMCO จำกัด		
ภาควิชา	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2543		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา พัฒนาและปรับปรุงสมบัติยางมะตอย (Asphalt cement, AC60/70) ด้วยผงยางจากยางรถยนต์ (Ground rubber tires, GRT) ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Fillers) และสารช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการให้กับยางมะตอยเช่น การรับแรงกระแทกและเพิ่มอายุการใช้งานของถนนเป็นต้น โดยทำการศึกษาดังต่อไปนี้ ได้แก่ ผลของขนาดผงยาง (10 20 30 และ 40 เมส) ผลของปริมาณผงยางที่ใส่ (5 10 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก) และผลของสารตัวเติม ได้แก่ สารเชื่อมโยง ที่มีต่อสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของยางมะตอยผสม ในการทดสอบนี้ยางมะตอยและผงยางถูกผสมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอาศัยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาที แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางในยางมะตอยจะทำให้ยางมะตอยแข็งขึ้นมีค่าเพนนิเตอร์ชันลดลง ยึดตัวได้น้อยลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และมีจุดวาบไฟลดลง ในขณะที่ขนาดอนุภาคของผงยางไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อสมบัติของยางมะตอย ดังนั้นปริมาณของผงยางที่เหมาะสมคือ 30 เมส และใช้ปริมาณผงยาง 10 % โดยน้ำหนัก จากการใช้สารเชื่อมโยง ได้แก่ ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ทั้งในรูปแบบของแข็งและสารละลาย เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยผสมผงยาง พบว่าเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) เพิ่มขึ้น ยางมะตอยมีความแข็งเพิ่มขึ้น ค่าเพนนิเตอร์ชันลดลง แต่สมบัติอื่นๆ เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งกรณีของ DCP ของแข็งและสารละลาย ทั้งนี้เนื่องจาก DCP ที่ใช้ (0-3 %w/w of GRT) มีปริมาณน้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Property Modification of Asphalt Cement (AC 60/70) by Ground Rubber Tire (GRT)
Author Names	Miss Chutima Isuwan Mr.Direk Donmon
Special Project Advisor	Asst.Prof.Dr.Ittipol Jangchud
Special Project Co-advisor	Mr.Krisri Duangpatra BAMCO Co Ltd
Department	Chemistry
Academic Year	2000

ABSTRACT

This research work involved development and modification of asphalt cement (AC 60/70) properties by mixing with ambient-ground rubber tire (GRT). The GRT can act not only as a filler but also property modifiers, such as, impact modifier, aging resistor etc.. Several parameters affected asphalt properties were studied in this work, i.e., GRT particle size (10, 20, 30, and 40 mesh), % GRT loading (5, 10, 15, and 20%w/w) and effect of a crosslinking agent (dicumyl peroxide, DCP). Those parameters were expected to affect properties of the asphalt, e.g., physical, mechanical and thermal properties. In this research work, GRT was mixed with the AC60/70 by using a high-speed mixer at rotor speed of 700 rpm at the temperature of 180°C for 1 hour. As % GRT loading increased, the penetration, ductility, and flash point of the asphalt were decreased, whereas the density was increased. The results were revealed that GRT particle size had insignificant effect on the asphalt properties. By adding DCP as the crosslinking agent to improve the interfacial bonding, it was found that both DCP solid form and DCP solution had no noticeable effect on the properties of AC60/70 since low amount of DCP loading (0-3 %w/w of GRT) was used.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณไกรศรี ดวงพัตรา บริษัท BAMCO Ltd. ที่ได้ให้คำปรึกษาและความอนุเคราะห์อย่างมตะตอย AC 60/70 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านงบประมาณในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณทัศนีย์ สุวรรณมงคล และเจ้าหน้าที่ฝ่ายตรวจสอบวิเคราะห์ยางมะตอย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบสมบัติต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธุ์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณบรรณารักษ์และเจ้าหน้าที่ห้องสมุดกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านเอกสารและมาตรฐานการทดสอบสมบัติต่างๆ ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณบรรณารักษ์และเจ้าหน้าที่ศูนย์สารสนเทศ กรมวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านเอกสาร ที่จำเป็นสำหรับการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ คุณบุญหาญ อุ่อดมยิ่ง บริษัท Sang Thai Rubber Factory Co.,Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงยาง GRT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากซึ่งมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายดิเรก คอามมถญ

นางสาวชุตินา โปยสุวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	5
1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน	6
1.7 สถานที่ทำการวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	8
2.1 แอสฟัลท์หรือยางมะตอย (Asphalt)	8
2.1.1 องค์ประกอบของแอสฟัลท์	8
2.1.2 แอสฟัลท์สำหรับงานก่อสร้างผิวถนน	10
2.2 ยางรถยนต์	17
2.2.1 ผงยางจากเศษยางรถยนต์ (Ground Rubber Tires,GRT)	17
2.2.2 ยางรีเคลม (Reclaim)	19
2.3 การทำงานของเครื่องมือ	21
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	29
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	30
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	36
4.1 อัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอย (AC 60/70) ต่อผงยางจากเศษยางรถยนต์ (GRT)	36
4.2 ผลของขนาดผงยางจากเศษยางรถยนต์ที่มีต่อสมบัติของ ยางมะตอย	40
4.3 ผลของสารเชื่อมโยง (DCP) ที่มีต่อสมบัติของยางมะตอย	47
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	60



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	7
ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน	
ตารางที่ 3.1	30
สมบัติยางมะตอย (AC 60/70)	
ตารางที่ 3.2	31
สมบัติสารไดคิวมิลฟอร์มมาไมด์ (Dicumyl formamide ,DMF)	
ตารางที่ ก-1	62
มาตรฐานแอสฟัลท์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt cement,PMA) ที่ใช้ราดถนน ของกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม	
ตารางที่ ข-1	64
ผลการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน ตอนที่ 1	
ตารางที่ ข-2	64
ผลการทดสอบความสามารถในการดิ่งยึด ตอนที่ 1	
ตารางที่ ข-3	65
ผลการทดสอบจุดวาบไฟ ตอนที่ 1	
ตารางที่ ข-4	65
ผลการทดสอบความหนาแน่น ตอนที่ 1	
ตารางที่ ข-5	66
ผลการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน ตอนที่ 2	
ตารางที่ ข-6	66
ผลการทดสอบความสามารถในการดิ่งยึด ตอนที่ 2	
ตารางที่ ข-7	67
ผลการทดสอบจุดวาบไฟ ตอนที่ 2	
ตารางที่ ข-8	67
ผลการทดสอบความหนาแน่น ตอนที่ 2	
ตารางที่ ข-9	68
ผลการทดสอบจุดอ่อนตัว ตอนที่ 2	
ตารางที่ ข-10	68
ผลการทดสอบความหนืด ตอนที่ 2	
ตารางที่ ข-11	69
ผลการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปสารละลาย)	
ตารางที่ ข-12	70
ผลการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)	
ตารางที่ ข-13	71
ผลการทดสอบความสามารถในการดิ่งยึด ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปสารละลาย)	
ตารางที่ ข-14	71
ผลการทดสอบความสามารถในการดิ่งยึด ตอนที่ (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)	
ตารางที่ ข-15	72
ผลการทดสอบความหนาแน่น ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปสารละลาย)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข-16 ผลการทดสอบความหนาแน่น ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)	73
ตารางที่ ข-17 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัว ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปสารละลาย)	73
ตารางที่ ข-18 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัว ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)	74
ตารางที่ ข-19 ผลการทดสอบความหนืด ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปสารละลาย)	74
ตารางที่ ข-20 ผลการทดสอบความหนืด ตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1.1	ภาพถ่ายกองขยะเศษยางจากยางรถยนต์	2
รูปที่ 1.2	การเสียดสีภาพของผิวถนนยางมะตอย	3
รูปที่ 2.1	โครงสร้างแบบไมเซลล์ของยางมะตอย	10
รูปที่ 2.2	ส่วนประกอบการปูถนน	12
รูปที่ 2.3	การผสมยางมะตอยแบบอิมัลชัน	14
รูปที่ 2.4	ลักษณะอิมัลชันที่เกิดขึ้นในยางมะตอยแบบอิมัลชัน	15
รูปที่ 2.5	เครื่องบดยางที่อุณหภูมิต่ำ	18
รูปที่ 2.6	แผนผังเครื่องบดยางที่อุณหภูมิต่ำของบริษัท Line Company	19
รูปที่ 2.7	กระบวนการผลิตยางรีเคิลมจากยางรถบรรทุก และรถโดยสารที่ใช้แล้วโดยเครื่องตัดยางรถยนต์	21
รูปที่ 2.8	เครื่องทดสอบค่าเพนนิเตอร์ชัน	23
รูปที่ 2.9	เครื่องทดสอบความเหนียว	25
รูปที่ 2.10	แบบสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบความเหนียว	25
รูปที่ 2.11	เครื่อง Ring and Ball	27
รูปที่ 2.12	เครื่อง Cleveland open cup	28
รูปที่ 2.13	แบบใส่ตัวอย่างของ Brookfield Thermosel Apparatus	29
รูปที่ 2.14	เครื่อง Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance	29
รูปที่ 4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับ ค่าเพนนิเตอร์ชัน ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมส ที่ปริมาณต่าง ๆ	38
รูปที่ 4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับ ความหนาแน่น ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมส ที่ปริมาณต่าง ๆ	39
รูปที่ 4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับ ค่าการยืดตัว ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมส ที่ปริมาณต่าง ๆ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับ จุดวาบไฟ ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมส ที่ปริมาณต่าง ๆ	41
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับค่าเพนนิเตอร์ชันของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่าง ๆ ปริมาณ 10 %w/w	42
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับ ความหนาแน่นของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่าง ๆ ปริมาณ 10 %w/w	43
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับ ค่าการยึดตัวของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่าง ๆ ปริมาณ 10 %w/w	44
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับ จุดวาบไฟของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่าง ๆ ปริมาณ 10 %w/w	45
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับ จุดอ่อนตัวของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่าง ๆ ปริมาณ 10 %w/w	46
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับ ความหนืดของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่าง ๆ ปริมาณ 10 %w/w	47
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับ ค่าเพนนิเตอร์ชันของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	48
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับ ความหนาแน่นของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับ ค่าการยึดตัวของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	50
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับ จุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	51
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับ ความหนืดของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	52
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับ ค่าเพนิเตรชันของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	53
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับ ความหนาแน่นของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	54
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับ ค่าการยึดตัวของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	55
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับ จุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	56
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับ ความหนืดของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 %w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจขึ้นอย่างมาก ดังนั้นการขนส่งจึงเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะการขนส่งทางบก จำนวนรถยนต์และรถบรรทุกจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้ปริมาณของยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเพิ่มมากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 1.1 ยางรถยนต์เหล่านี้ไม่สามารถกำจัดทิ้งได้ง่ายเหมือนวัสดุเหลือใช้ชนิดอื่นๆ เนื่องจากยางรถยนต์เป็นพอลิเมอร์พวเทอร์โมเซต (Thermoset) มีโครงสร้างร่างแหสามมิติไม่สามารถหลอมเหลวขึ้นรูปใหม่ได้ ถึงแม้ว่าจะสามารถใช้อยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ แต่ก็พบว่าเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะมีการปลดปล่อยก๊าซบางชนิดที่ไม่ต้องการและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ฯลฯ เนื่องจากจำนวนรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการสร้างถนนเพื่อเพิ่มเส้นทางในการขนส่งและเพื่อขยายความเจริญออกสู่ชนบท พบว่าตลอดเวลาที่ผ่านมาในอดีตการจราจรและน้ำหนักรถบรรทุกยังไม่สูงมากเช่นทุกวันนี้ ผิวทางที่ใช้ยางมะตอยธรรมดาเป็นส่วนผสมจึงไม่มีปัญหา แต่ในปัจจุบันนี้ในสายทางหลักๆ ภายในประเทศมีการจราจรและน้ำหนักรถบรรทุกสูงขึ้นมาก การใช้ยางมะตอยธรรมดาเป็นส่วนผสมของผิวทางแบบยางมะตอยคอนกรีต (Asphalt concrete) เริ่มมีปัญหามากขึ้น ผิวทางจะชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทางสูงมาก ผิวทางยางมะตอยคอนกรีตชำรุดที่พบมีหลายลักษณะดังรูปที่ 1.2 ได้แก่

1. ผิวทางมียางเยิ้ม (*Bleeding*) เป็นปรากฏการณ์ที่ยางมะตอยในผิวทางยางมะตอยคอนกรีตทะลักขึ้นมารวมกันอยู่ที่ผิวหน้า เมื่อแดดร้อนจะไหลเยิ้ม ทำให้ผิวทางลื่นซึ่งเกิดจากยางมะตอย มีค่าความหนืดต่ำ (*Viscosity*) และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (*Temperature susceptibility*) เร็วมาก

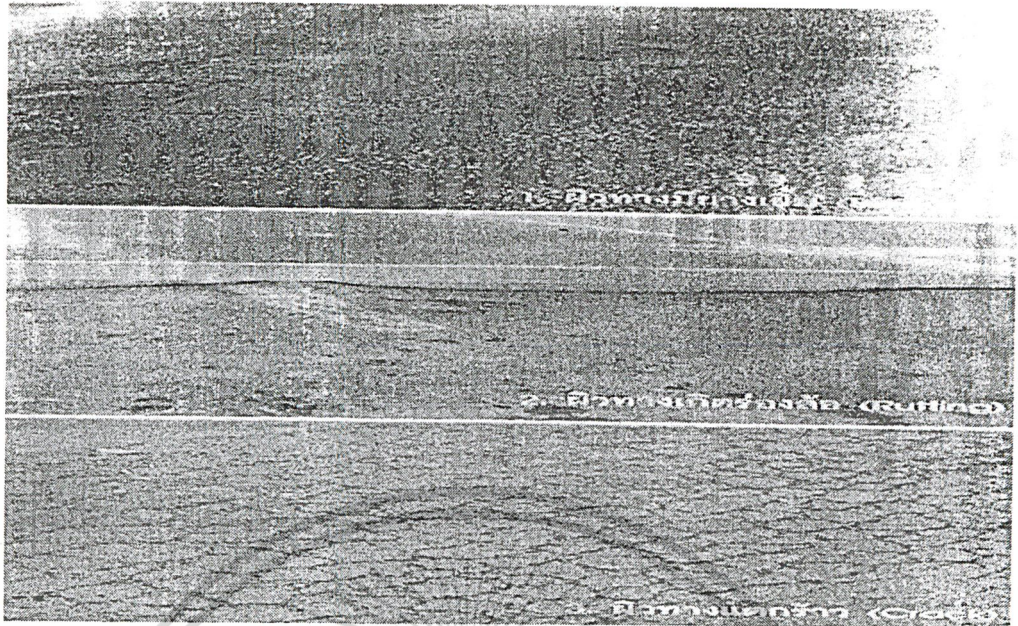
2. ผิวทางเกิดร่องล้อ (*Rutting*) คือปรากฏการณ์ที่ผิวทางยุบตัวเป็นร่องตามแนวที่ล้อรถแล่นทับ ส่วนมากมักจะเกิดขึ้นหลังจากผิวทางมียางเยิ้มที่ผิว สาเหตุเกิดขึ้นจากผิวทางไม่มั่นคงแข็งแรงพอจึงเกิดการยุบตัว และผิวทางขาดคุณสมบัติยืดหยุ่น (*Elastic*) เมื่อเกิดการยุบตัวแล้วไม่กลับคืน

3. ผิวทางแตกร้าว (*Cracking*) มีสาเหตุมาจากผิวทางมีสภาพแข็งเปราะ ขาดความยืดหยุ่น เมื่อน้ำหนักล้อรถกระทำซ้ำซาก (*Repeated load*) ผิวทางจะล้า (*Fatigue*) ทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่เรียกว่า รอยแตกจากการล้า (*Fatigue crack*)

4. ผิวทางมีผิวหน้าหลุดเป็นขี้ว้าง (*Raveling*) เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อนเพราะวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของยางมะตอยคอนกรีตถูกแรงเสียดสีจากล้อรถตะกุกตะกักจนหลุดออกทำให้ผิวทางมีลักษณะหยาบขรุขระมีหินใหญ่โผล่



รูปที่ 1.1 ภาพถ่ายกองขยะเศษยางจากขางรถยนต์



รูปที่ 1.2 การเสียดสภาพของผิวถนนยางมะตอย¹

จากลักษณะการชำรุดของผิวทางยางมะตอยคอนกรีตที่กล่าวมาทั้งหมด ถ้าจะแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในทางสายที่มีปริมาณการบรรทุกสูง จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของยางมะตอย (Asphalt) ให้มีสมบัติดังนี้

- เพิ่มความหนืด (Viscosity)
- เพิ่มค่าเพนนิเตรชัน (Penetration index)
- ลดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility)
- เพิ่มจุดอ่อนตัว (Softening point)
- เพิ่มความยืดหยุ่น (Elasticity)
- เพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)
- เพิ่มอายุการใช้งาน (Aging resistance)

จากการศึกษานิววิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การปรับปรุงคุณภาพยางมะตอยเพื่อให้มีสมบัติดังกล่าวดีขึ้นคือ การใช้พอลิเมอร์ผสมลงในยางมะตอย ซึ่งเรียกว่า *ยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์* (Polymer Modified Asphalt) หรือเรียกย่อๆ ว่า “PMA” ซึ่งก็คือ ยางมะตอยที่มีการใช้พอลิเมอร์บางชนิดเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ มีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กในยางมะตอย โดยผ่านเครื่องบดที่มีแรงเฉือนสูง จึงทำให้พอลิเมอร์กระจายตัวและคงสภาพอยู่ได้ในยางมะตอย สำหรับพอลิเมอร์ที่นำมาใช้จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ยาง (Elastomers) มีสมบัติที่ยืดหยุ่นได้ดี เช่น สไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน (SBS)
2. พลาสติก (Plastics) เช่น เอทิลไวนิลอีซีเทท (EVA) พอลิเอทิลีน (PE)

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วในรูปของผงยาง (Ground Rubber Tire, GRT) มาผสมในยางมะตอย (Asphalt Cements, AC) เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) และช่วยปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยอาศัยสมบัติเด่นของยางคือ มีความคงตัวสูง มีความยืดหยุ่น และความต้านทานการล้าได้ดี

1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Perret et. al.² ได้ทำการศึกษาผลของการเติมผงยางและพอลิเมอร์ร่วมระหว่างแอลฟาโอเลฟิน และอีพอกไซด์ที่ไม่อิ่มตัวลงในยางมะตอย ที่มีต่อความเสถียรในการเก็บรักษายางมะตอยเพื่อใช้ในการลาดถนน โดยใช้ผงยาง 7-13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมกับยางสังเคราะห์และพอลิเมอร์ร่วมที่ประกอบด้วยหน่วยของอีพอกไซด์ 1-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ร่วม แล้วนำมาทดสอบความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความหนืดน้อยกว่า 1150 mPa.s และทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิการทดสอบแบบวงแหวนและลูกบอล (Ring-and-ball temperature) ของของผสมที่เก็บในหลอด Vertical 3 วัน โดยทำการทดสอบความแตกต่างตรงส่วนบนของขวดกับก้นขวดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่ามีความแตกต่างเกิดขึ้นน้อยกว่า 5 องศาเซลเซียส และวัดค่าเพนิเตรชัน (Penetration) ของของผสมได้ประมาณ 15-35 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของยางมะตอยเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

Azemi Bin Samsuri³ ได้นำยางมะตอยมาผสมกับผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้ยางมะตอย AC 80/100 ผสมกับผงยางขนาด 40 เมส ปริมาณ 2.57 และ 10 ส่วนต่อยางมะตอย 100 ส่วน ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบหาจุดอ่อนตัว ค่าเพนิเตรชัน ความทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากความล้า พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป และความหนืด พบว่าเมื่อปริมาณของผงยางที่เติมเพิ่มขึ้นจะทำให้จุดอ่อนตัว ความทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากความล้า พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าเพนิเตรชันมีค่าลดลง

Michael W. Rouse⁴ ได้ศึกษาถึงการนำยางมะตอยผสมกับผงยางจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เพื่อใช้เป็นยางลาดถนน โดยผสมยางมะตอยกับผงยางรถยนต์ขนาด 80 เมส ปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการผสมจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 300-400 องศาฟาเรนไฮต์ ผสมนานเป็นเวลา 25 นาที และสามารถทำการผสมได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ต้องใช้เวลาจนถึง 96 ชั่วโมง

Yong-Joon Lee⁵ ได้นำยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย (AC -10 และ AC -20) ที่มีผลต่อสมบัติการไหล สมบัติทางความร้อนของของผสม และการกระจายตัวของ SBR ในยางมะตอย โดยใช้ Rotational viscometer, Dynamic shear rheometer, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TGA และ Laser scanning microscope (LSM) พบว่ายางมะตอยที่ผสม SBR จะมีความหนืดและความต้านทานต่อการล้าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ SBR เพิ่มขึ้น ปริมาณของ SBR ที่สามารถกระจายตัวได้ดีในยางมะตอยคือ 1-3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณของ SBR ที่ทำให้สมบัติการไหลของยางมะตอยได้ดีที่สุดประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของ SBR ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อจุดอ่อนตัวของของผสมที่เตรียมได้

Bernard J. Burns⁶ ได้ศึกษาสมบัติของยางมะตอยที่ผสมกับผงยางรถยนต์ ขนาด 90 เมส ปริมาณ 0.5-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพอลิออกทีนนาเมอร์ 0.01-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ายางมะตอยผสมที่ได้มีจุดหลอมเหลว 129 องศาฟาเรนไฮน์ เมื่อประกอบด้วยพอลิออกทีนนาเมอร์ที่มีตำแหน่งทรานส์ (Trans) อยู่ประมาณ 86 เปอร์เซ็นต์ และยางมะตอยผสมจะมีสมบัติในการยึดเกาะกับหินและวัสดุที่ใช้ในการลาดถนนดีที่สุดเมื่อทำการผสมที่อุณหภูมิ 280-330 องศาฟาเรนไฮน์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

Borger et.al.⁷ ทำการศึกษาสารเติมแต่งที่เป็นเส้นใยเพื่อใช้ผสมยางมะตอยลาดถนน โดยใช้เส้นใยที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจากวัสดุเหลือทิ้งที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนเทอพทาเลท 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เส้นใย เส้นใยแต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5 เมื่อนำยางมะตอยที่ผสมเส้นใยไปทดสอบความเสถียรในโครงสร้างด้วย TP Min-StB Part 6.3.2 พบว่าประกอบด้วยอนุภาคขนาดน้อยกว่า 0.71 มิลลิเมตร 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทอพทาเลทมีความเสถียรสูง ความเป็นผลึกสูงและมีการจัดเรียงตัวสูง จึงทำหน้าที่เป็นเชื้อปกคลุมบนยางมะตอยได้ดี เมื่อเวลาผ่านไปนานๆก็ไม่เกิดการรวมตัวกัน มีผลทำให้ยางมะตอยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างที่ใช้ลาดถนน

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างยางมะตอยกับผงยางจากยางรถยนต์ (GRT)
2. เพื่อศึกษาผลของขนาดของผงยางที่มีต่อสมบัติต่างๆของยางมะตอย
3. เพื่อศึกษาผลของสารตัวเติม ได้แก่ สารเชื่อมโยง (Dicumyl peroxide, DCP) ต่อสมบัติต่างๆของยางมะตอย

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาถึงมาตรฐานและลักษณะการใช้งานยางมะตอยในประเทศ
- 2. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอยชนิด AC 60/70 กับผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) รวมทั้งผลของขนาดอนุภาค GRT สารตัวเติม เช่น สารเชื่อมโยง DCP เพื่อให้ได้ยางมะตอยที่มีสมบัติดีขึ้น
3. ศึกษาสมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ผ่านการปรับปรุง เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) การยืดตัว (Ductility) จุดวาบไฟ (Flash point) ความหนาแน่น (Density) จุดอ่อนตัว (Softening point) ความหนืด (Viscosity) เป็นต้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วกับยางมะตอยที่ให้สมบัติที่ดีที่สุด
2. ทราบผลของปริมาณและขนาดอนุภาคผงยาง GRT รวมทั้งผลของสารเชื่อมโยงที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของยางมะตอย
3. สามารถปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยที่ใช้ลาดถนนเพื่อให้มีความทนทานและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น
4. เพื่อลดปริมาณขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้วในประเทศให้มีปริมาณน้อยลง

1.6 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 2 วางแผนดำเนินงานวิจัย จัดซื้ออุปกรณ์และสารเคมี

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนของผงยางจากยางรถยนต์กับยางมะตอยที่ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาขนาดของผงยางจากยางรถยนต์ที่ผสมกับยางมะตอยแล้วให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาปริมาณและสถานะของสารเชื่อมโยง DCP ที่ผสมกับยางมะตอยและผงยางจากยางรถยนต์ที่ให้สมบัติที่ดี

ขั้นตอนที่ 6 รวบรวมผลงานวิจัย วิเคราะห์ผลงานวิจัย สรุปผลงานวิจัย พร้อมข้อเสนอแนะ

ขั้นตอนที่ 7 จัดพิมพ์รูปเล่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

เดือน \ ขั้นตอน	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค
1	████████████████████											
2		████████████████										
3				████████████████████								
4						████████████████████						
5								██				
6										████████████████		
7											████████	

1.7 สถานที่ทำการวิจัย

- ห้องปฏิบัติการเคมี ชั้น 5 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ห้องวิเคราะห์ยางมะตอย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม
- ห้องปฏิบัติการเคมี บริษัท BAMCO Limited นิคมอุตสาหกรรมบางปู จังหวัดสมุทรปราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ยางมะตอยหรือแอสฟัลท์ (Asphalt) ⁸

ยางมะตอยหรือแอสฟัลท์ คือส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Residual Material) หรือที่เรียกว่า Topped Crude ยังมีลักษณะค่อนข้างเหลวเนื่องจากยังมีส่วนที่เป็นน้ำมันต่างๆ เหลืออยู่พอสมควร ถ้าน้ำมันเหล่านี้ถูกแยกออกไป ส่วนที่เหลือก็คือแอสฟัลท์ซึ่งเมนต์ที่จะมีความข้นเหลวหรือแข็งมากน้อยตามต้องการได้โดยให้ผ่านกระบวนการผลิตต่อไป ซึ่งปัจจุบันนี้จะใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างและมีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากสมบัติที่สำคัญๆ 4 ประการคือ

- 1) สมบัติในการยึดและประสาน (Cementing)
- 2) สมบัติในการป้องกันน้ำซึม (Water Proofing)
- 3) สมบัติที่เปลี่ยนเป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง หรือสมบัติของวัสดุเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)
- 4) สมบัติในการทนกรดและด่างอ่อนๆ

จากสมบัติที่กล่าวมา ทำให้ยางมะตอยถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น

- ใช้เป็นตัวประสานเพื่อเกาะยึดวัสดุต่างๆ เช่น หินย่อยในการทำผิวจราจรต่างๆ
- ใช้สำหรับคาดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ผิวหน้าของเขื่อนดิน เพื่อป้องกันน้ำซึมและป้องกันการกัดกร่อนของผิวดิน
- ในวงการอุตสาหกรรม ยางมะตอยได้ถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ มากมาย เช่น ทำสีกันสนิม ทำกระดาษป้องกันความชื้น เป็นต้น

2.1.1 องค์ประกอบของยางมะตอย (Asphalt Composition)

ส่วนประกอบใหญ่ๆ สามารถที่จะแยกให้แตกต่างกันออกไปมี 3 ส่วน คือ

1) สารอิ่มตัว (Saturates)

ส่วนประกอบนี้จะมีความเหนียวคล้ายจาระบี ไม่มีสี เป็นสารพาราฟินิก (Parafinic Materials) ที่บางส่วนมีโครงสร้างเป็นวงแหวนแนฟทานิก (Naphthanic ring) และบางส่วนเป็นโครงสร้างสายโซ่ตรง (Long straight chains) หรือ แวกซ์ (Wax) ซึ่งสามารถที่จะตกผลึกได้ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300-2000

2) สารอะโรมาติก (Aromatics)

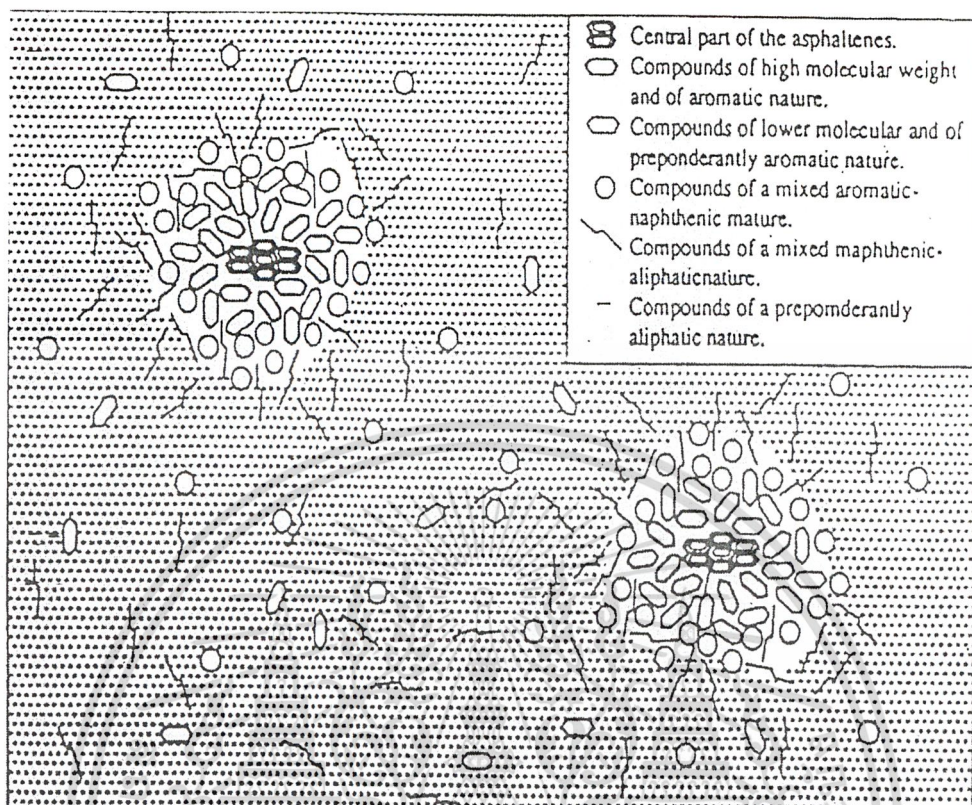
ส่วนประกอบนี้เป็นน้ำมันเหนียวที่มีสีน้ำตาลดำและมีโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic rings) ต่อกันเป็นจำนวนมาก มีคาร์บอน 25-30 เปอร์เซ็นต์อยู่ในโครงสร้างอะโรมาติก โดยจะมีจำนวนของ O_2 และ N_2 น้อย จนถึง 3 เปอร์เซ็นต์ มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 300-2000

3) สารอะโรมาติกมีขี้ว (Polar Aromatics)

ส่วนประกอบนี้จะประกอบด้วยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกเชื่อมต่อกัน (Condensed aromatic rings) ในโมเลกุล (ประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน) และคาร์บอนอะตอมที่ยังเหลือจะมีโครงสร้างเป็นแนฟทานิกและพาราฟินิก ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนและออกซิเจน ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์และมีกำมะถันประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ และยังมีสารที่มีโครงสร้างที่มีขี้วไฟฟ้ (ประจุ) อยู่ด้วย เช่น หมูไฮดรอกซิล คาร์บอนิลและอะมิโน ส่วนต่างๆ เหล่านี้จะมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับ การละลายในสารนอร์มัล-เฮปเทน (n-Heptane) ดังนี้

3.1 เรซิน (Resins) ตัวเรซินเหล่านี้จะละลายใน n-Heptane จะเป็นส่วนที่เป็นของแข็งสีดำ ซึ่งจะอ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-50000 และสัดส่วนอะตอมของ ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) จะเป็น 1:1

3.2 ยางมะตอยหิน (Asphaltenes) ส่วนนี้จะไม่ละลายใน n-Heptane จะเป็นสีเทาดำ และ จะสลายตัวเมื่อถูกความร้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-100000 และสัดส่วนของอะตอม H/C จะเป็น 1:1 สัดส่วนของสารอิ่มตัวต่อสารอะโรมาติก (Saturates/Aromatics) สามารถจะเป็นตัว พาสารอะโรมาติกมีขี้ว ซึ่งจะแสดงสมบัติที่แท้จริงของยางมะตอย คือ เหนียวและยืดหยุ่น ได้ดีที่อุณหภูมิปกติ สมบัตินี้จะเกี่ยวกับ โมเลกุลดังกล่าว (สารที่มีขี้วทั้งหมด) ทำให้มีโครงสร้างที่ ใหญ่ ในบางกรณีอาจเป็นรูปสามมิติเรียกว่า 'Gel Type Bitumen' ความเกี่ยวพันนี้จะเกี่ยวข้องกับ อุณหภูมิ การกระจายตัว และน้ำหนักโมเลกุลของสารอะโรมาติกมีขี้ว และขึ้นกับความสามารถใน การละลายของสารอิ่มตัว และสารอะโรมาติก ถ้าความเข้มข้นของยางมะตอยหิน และน้ำหนัก โมเลกุลค่อนข้างน้อย ผลก็คือจะเป็นสารที่เรียกว่า 'Sol Type Bitumen' ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างไมเซลล์ของยางมะตอย¹⁰

2.1.2 ยางมะตอยสำหรับงานก่อสร้างผิวจราจร (Paving Asphalt Materials)

ยางมะตอยที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวจราจรนั้นมีหลายชนิด ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของงานและสภาพของดินฟ้าอากาศแต่ละแห่ง ตลอดจนให้เหมาะสมกับวิธีการนำไปใช้งาน โดยแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้คือ ยางมะตอย (Asphalt cement) และ ยางมะตอยชนิดเหลว (Liquid asphalt)

1. ยางมะตอย (Asphalt cements, AC)

ยางมะตอยสำหรับงานสร้างผิวจราจรนั้นจะมีลักษณะครึ่งอ่อนครึ่งแข็งที่อุณหภูมิธรรมดา และมีเกรดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่แข็งมากจนถึงอ่อนมาก ในการนำไปใช้งานจะต้องให้ความร้อนจนเหลว ให้ได้อุณหภูมิประมาณ 200 – 300 องศาฟาเรนไฮน์ โดยทั่ว ๆ ไปยางมะตอยแบ่งเป็นเกรดต่าง ๆ ตามความอ่อนแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเพนิเตรชัน (Penetration) ของแอสฟัลท์ซีเมนต์ คือ จำนวนหน่วยของระยะ (ซึ่งหนึ่งหน่วย = 0.1 มิลลิเมตร) ที่เพิ่มมาตรฐานถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัมจมลงไปในยางมะตอยในระยะเวลา 5 วินาที ในขณะที่ยางมะตอยมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น

เพิ่มจมลงไปเป็นระยะทาง 10 มิลลิเมตร จะมีค่า = $10/0.1$

= 100 เพนิเตรชัน

จะเห็นได้ว่ายางมะตอยที่แข็งกว่าจะมีค่าเพนิเตรชันน้อย เนื่องจากเพิ่มจมลงไปได้น้อย และยางมะตอยที่อ่อนจะมีค่าเพนิเตรชันสูง การที่ผลิตยางมะตอยให้มีค่าเพนิเตรชันหลายค่านั้นก็เพื่อให้สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานและสภาพของดินฟ้าอากาศของแต่ละส่วนของโลก เช่น ในภูมิภาคที่มีอากาศร้อนก็จะใช้ยางมะตอยที่มี เพนิเตรชันเกรด 60/70 ในประเทศหนาวอาจจะใช้ เพนิเตรชันเกรด 120/150 เป็นต้น

ยางมะตอยแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามผู้ผลิต คือ

1. เกรดเพนิเตรชัน (Penetration grade) เป็นยางมะตอยที่ได้จากการกลั่นน้ำมันโดยตรง ตัวอย่างเช่น A/C 60/70 หรือ Mexphalt 60/70 โดย

A/C หมายถึง ยางมะตอยมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี 60/70 คือ ค่าเพนิเตรชันอยู่ในช่วง 60-70 เป็นตัวเลขที่ใช้บอกความแข็งของยาง วัต โดยเพิ่มมาตรฐานและมีน้ำหนักกด 100 กรัมกดลงไปในเนื้อยางที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที หน่วยของค่าที่วัดได้เป็น 1/10 มิลลิเมตร ดังนั้นยาง 60/70 คือยางที่ถูกเพิ่มกดจมลงไปได้ 6-7 มิลลิเมตร

2. เกรดเป่า (Blown grade) คือยางที่ได้จากการนำเอายางเกรดเพนิเตรชัน ไปเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 250 – 300 องศาเซลเซียส ทำให้คุณสมบัติของยางดีขึ้นในด้านการทนความร้อนและความแข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในยางมะตอย โดยทำให้ได้ยางมะตอยที่ทนในเนื้อยางสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น R.85/25, R.85/40, R.115/15, R.135/10, R.115/7 โดย

- R หมายถึง ส่วนที่คล้ายยาง (Rubber) บ่งบอกว่ามีคุณสมบัติบางส่วนคล้ายยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์

- 85 หมายถึง ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดอ่อนตัวของยาง (Softening point) ในหน่วยองศาเซลเซียส วัดโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบลูกบอล (Ring and Ball Test) นั่นคือยางชนิดนี้จะอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส

- 25 หมายถึง ค่าเพนิเตรชันเฉลี่ยของยาง วัต โดยใช้เพิ่มมาตรฐานที่มีน้ำหนัก 100 กรัมกดลงไปในเนื้อยางที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที หน่วยของค่าที่วัดได้เป็น 1/10 มิลลิเมตร นั่นคือยางชนิดนี้จะถูกเพิ่มกดจมลงไปได้ลึก 2-3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

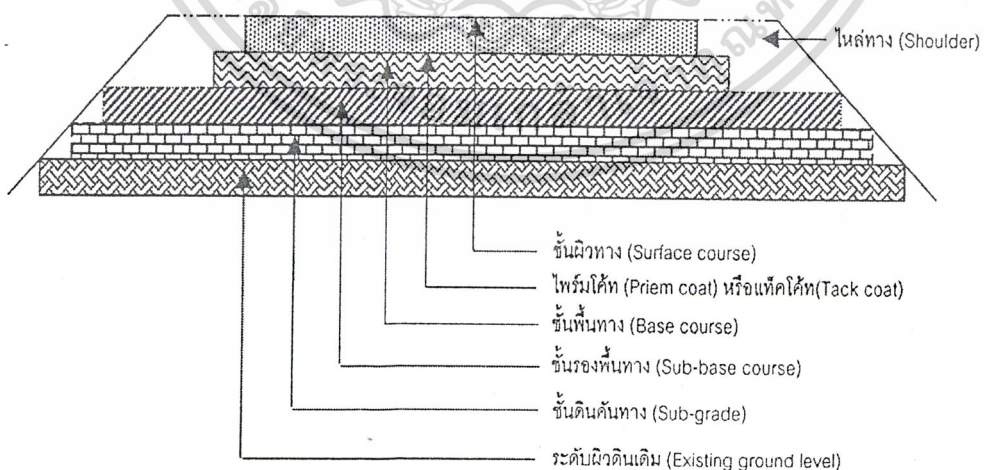
3. เกรดแข็ง (Hard grade) คืออย่างที่ได้อาจการนำเอาเกรดเพนนิเตรชัน ไปกลั่นต่อ ภายใต้อุณหภูมิสูง ทำให้ส่วนที่เบาว่าระเหยออกไปได้อีก จึงทำให้ยางที่ได้มีความ แข็งมกยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น H 80/90 โดย

- H หมายถึง แข็ง (Hard)

- 80/90 หมายถึง ค่าอุณหภูมิที่อ่อนตัว ยางชนิดนี้จะอ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศา เซลเซียส ส่วนค่าความแข็งอยู่ในช่วง 6-12 คือ เจ็มกคได้ 0.6-1.2 มิลลิเมตรเท่านั้น

ส่วนประกอบของถนนประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยส่วน สำคัญดังนี้

1. ชั้นผิวทาง (Surface dressing) คือชั้นบนสุดของทางที่เป็นผิวจราจร วัสดุที่นิยมเลือกใช้มีอยู่ 3 แบบคือ Asphalt concrete, Surface treatment และ Penetration macadam
2. โพร้มโค้ท (Prime coat) คือส่วนของยางมะตอยเหลวที่ราดบนผิวทางเพื่อยึดเชื่อมผิวทาง
3. ชั้นพื้นทาง (Base course) คือชั้นของวัสดุที่มีสมบัติดี เช่น หินโม่ หรือกรวดโม่ที่มีขนาดคละ กันสม่ำเสมอจากใหญ่มาหาเล็กหรือเป็น Asphalt concrete แบบเดียวกับผิวทางก็ได้ซึ่งบดทับ แน่นบนชั้นรองพื้นทาง ความหนาตามกำหนดที่ออกแบบไว้
4. ชั้นรองพื้นทาง (Sub-base course) คือส่วนวัสดุรองใต้พื้นทาง นิยมใช้ลูกรังหรือดินที่มีสมบัติดี บดอัดแน่นบนคันทาง
5. ไหล่ทาง (Shoulder) คือส่วนที่เสริมด้านท้ายริมสุดของผิวทางและพื้นทางทั้งสองข้างให้แน่น และได้ระดับเท่าผิวทาง วัสดุที่ใช้เหมือนรองพื้นทาง
6. ชั้นดินคันทาง (Sub-grade course) คือวัสดุที่บดอัดแน่นบนผิวดินเดิม



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของถนน⁸

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ยางมะตอยชนิดเหลว (Liquid Asphalt) ⁸

2.1 ยางมะตอยชนิดคัทแบค (Cutback asphalt) : ยางมะตอยชนิดนี้ทำได้โดยการผสมยางมะตอยกับสารละลาย ได้แก่ น้ำมันต่างๆ เช่น Naptha, Kerosine และ Diesel น้ำมันต่างๆ ที่ใช้เป็นสารละลายนี้เรียกรวมๆ ว่า Diluent หรือ Cutter stock ยางมะตอยชนิดนี้มักนิยมเรียกว่า Cutback asphalts ซึ่งจะมีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิธรรมดา โดยนำไปใช้งานในการทำผิวจราจรเมื่อราดแล้ว น้ำมันที่ใช้ผสมจะระเหยตัวไปคงเหลือแต่ยางมะตอย ยางมะตอยชนิดนี้ในอุณหภูมิปกติจะมีลักษณะข้นจนกระทั่งเหลว ซึ่งจะข้นเหลวมากขึ้นขึ้นอยู่กับเกรดเพนนิเตรชัน ของยางมะตอยที่นำมาใช้เป็นส่วนผสม

2.2 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวเร็ว (Rapid Curing Liquid Asphalts (RC)) : เป็นยางมะตอยประเภทที่แข็งตัวเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมระหว่างเนพทา (Naptha) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ระเหยง่ายกับยางมะตอยเกรด 80/100 หรือ 60/70 ยางมะตอยชนิด RC นี้ทั่วๆ ไปใช้ในงานก่อสร้างประเภท Surface treatment, Penetration macadam และ Open-grade paving mixtures และชนิดของสารละลายตลอดจนสัดส่วนระหว่างสารละลายกับยางมะตอย ยางมะตอยประเภทที่เหลวมากอาจนำไปใช้งานได้โดยตรงโดยไม่ต้องให้ความร้อนหรือให้เพียงเล็กน้อยก็พอ สำหรับประเภทที่เหลวปานกลาง โดยปกติให้ความร้อน 150-200 องศาฟาเรนไฮน์ ก็เพียงพอในการทำงาน สำหรับชนิดที่ข้นมากอาจจะต้องให้ความร้อนระหว่าง 200-350 องศาฟาเรนไฮน์

2.3 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวปานกลาง (Medium Curing Liquid Asphalts (MC)) : ยางมะตอยชนิดนี้ผลิตได้โดยผสมยางมะตอยเกรด 60/70 กับ เคโรซีน (Kerosine) ฉะนั้นยางมะตอยชนิดนี้จึงใช้เวลาในการแข็งตัว (Setting) นานกว่า RC เนื่องจาก Kerosine แข็งตัวได้ช้ากว่า Naptha ยางมะตอยชนิดนี้ใช้งานที่ต้องการระยะเวลาบ่มตัวนาน เช่น ในการทำงาน Prime coat ทั้งนี้เพื่อให้ MC มีโอกาสซึมลงไปใต้พื้นผิว Base course ได้มากหรือใช้ในการทำ Dense grade paving mixtures

2.4 ยางมะตอยชนิดแข็งตัวช้า (Slow Curing Liquid Asphalts (SC)) : โดยทั่วไปผลิตได้โดยผสมยางมะตอยเกรด 60/70 Penetration กับพวกน้ำมันหนัก เช่น Diesel fuel oil หรืออาจผลิตได้จากการกลั่นโดยตรง SC asphalt นิยมเรียกว่า 'Road oils' เป็นชนิดที่ไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

2.5 ยางมะตอยชนิดอิมัลชัน (Emulsified Asphalts or Asphalt Emulsions) : คือยางมะตอยที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ (Colloidal particles) โดยกระจายอยู่ในน้ำที่มีอิมัลซิฟายเออร์ (Emulsified) ผสมอยู่เล็กน้อย

Asphalt emulsion ผลิตได้โดยใช้ยางมะตอยที่อุณหภูมิประมาณ 250°F (120°C) ผสมกับน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 170°F (77°C) โดยมีสารเคมีที่ช่วยในการทำให้อนุภาคของยางมะตอยกระจายตัวเรียกว่า อิมัลซิฟายเออร์ ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ผสมอยู่ น้ำและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางมะตอยจะถูกตีด้วยเครื่องตีทำให้ยางมะตอยแตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ และจะคงอยู่ในสภาพนี้ได้ สมบัติของยางมะตอยอิมัลชันนี้โดยทั่ว ๆ ไปประกอบด้วยยางมะตอยประมาณ 60 – 65 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือจะเป็นน้ำ

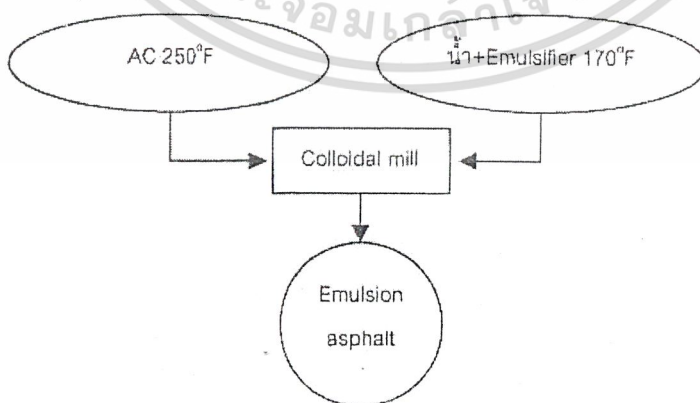
Asphalt Emulsion แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก (Cationic Asphalt Emulsion) คือ อนุภาคของยางมะตอยซึ่งกระจายตัวอยู่ในน้ำ มีประจุเป็นบวก
2. ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic Asphalt Emulsion) คือ อนุภาคของยางมะตอยที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ มีประจุเป็นลบ
3. ยางมะตอยอิมัลชันชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Asphalt Emulsion) คือ อนุภาคของยางมะตอยที่กระจายตัวอยู่ในน้ำไม่มีประจุ

2.5.1 ส่วนประกอบหลักของยางมะตอยอิมัลชัน

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลัก 3 ชนิดคือ ยางมะตอย น้ำและสารเพิ่มเสถียรภาพอิมัลชันไฟเออร์ (Emulsifying agent) เป็นที่รู้จักกันว่ายางมะตอยกับน้ำไม่สามารถทำให้เข้ากันได้ เว้นแต่ทำให้อยู่ในสภาวะที่มีการควบคุมและใช้สารเคมีช่วย การผสมยางมะตอยกับน้ำมีลักษณะคล้ายกับการล้างกรีส (Grease) ที่ติดมือให้ออกด้วยน้ำเปล่า ซึ่งจะล้างไม่ออกจนกว่าจะมีการใช้สบู่หรือผงซักฟอกเข้าช่วย โดยอนุภาคของสบู่จะล้อมรอบอนุภาคของกรีสเม็ดเล็กๆ ซึ่งเป็นการทำลายแรงที่พื้นผิว (Surface tension) ทำให้สารทั้งสองชนิดเข้ากันได้ การทำยางมะตอยแบบอิมัลชันก็สามารถพิจารณาได้ในแบบเดียวกัน

การทำยางมะตอยแบบอิมัลชัน (รูปที่ 2.3) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของยางมะตอยในน้ำอย่างมีเสถียรภาพต่อการผสม การขนส่ง รวมถึงการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามอิมัลชันที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 อาจถูกทำลายลงได้หากมีสภาวะที่ไม่เหมาะสม



รูปที่ 2.3 การผสมยางมะตอยแบบอิมัลชัน⁸

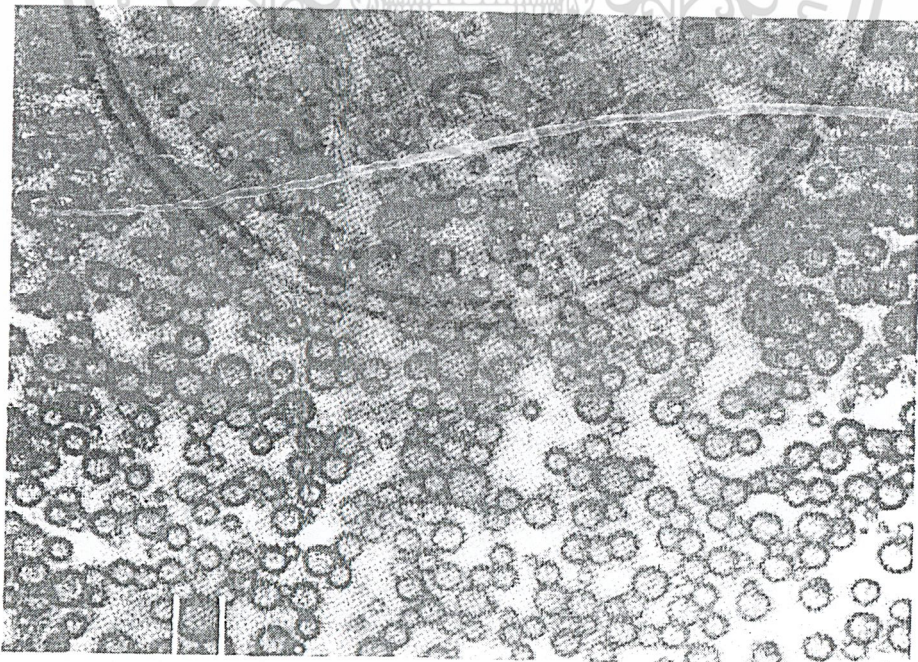
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. **ยางมะตอย** เป็นส่วนผสมชั้นพื้นฐาน ปกตินิยมใช้ยางมะตอยที่มีค่าเพนนิเตรชันระหว่าง 100-200 ในอัตราส่วน 55-77 เปอร์เซนต์ของอิมัลชันทั้งหมด เนื่องจากยางมะตอยเป็นสารที่มีองค์ประกอบหลากหลายแตกต่างกันไปจึงไม่มีสูตรผสมที่แน่นอน ในการทำอิมัลชันจึงขึ้นกับสมบัติที่ต้องการ และความเข้ากันได้ของสารเคมีที่ใช้รวมถึงสภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้ด้วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่ายางมะตอยประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ก็คือส่วนกระจายตัว ได้แก่ ยางมะตอยที่ขึ้นเป็นส่วนแสดงความแข็งของยางมะตอย และส่วนต่อเนื่อง (Continuous phase) เป็นส่วนมีผลต่อสมบัติความเหนียว (Ductile properties) การยึดเกาะ (Adhesion) และความหนืด ด้วยสาเหตุนี้เองเป็นเหตุผลว่าทำไมไม่สามารถระบุปริมาณที่แน่นอนของยางมะตอยได้

2. **น้ำ** เป็นส่วนประกอบหลักอีกอย่างที่มีความสำคัญมากในการทำอิมัลชัน โดยน้ำที่ใช้ต้องไม่มีผลทำให้สมบัติของอิมัลชันที่ได้น้อยลง น้ำตามธรรมชาติมีส่วนประกอบที่ไม่เหมาะสมต่อการทำอิมัลชันเนื่องจากมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากและมีประจุที่แตกต่างกันไป

3. **สารเสริมเสถียรภาพอิมัลชันไฟเออร์** สารเคมีที่ใช้ในการทำอิมัลชันมีผลต่อสมบัติของอิมัลชันที่ได้อย่างมาก เช่นการใช้อิมัลชันไฟเออร์ทำให้เกิดพื้นผิวที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Surface active agent) ทำใหยางมะตอยเกิดเป็นอนุภาคเล็กๆ และควบคุมเวลาในการแตกตัว (Breaking time) โดยอิมัลชันไฟเออร์จะเปลี่ยนค่าแรงที่พื้นผิวระหว่างเฟสทั้ง 2 แต่ในการเลือกใช้ต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ของอิมัลชันไฟเออร์กับยางมะตอย

สำหรับอิมัลชันชนิดประจุลบนิยมใช้กรดไขมัน (Fatty acid) ที่เป็นอนุพันธ์จากเปลือกไม้ เช่น เรซิน (Resin) และลิกนิน (Lignin) เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ลักษณะอิมัลชันที่เกิดขึ้นในยางมะตอยแบบอิมัลชัน¹⁰

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออย่างมะตอยแบบอิมัลชัน

1. สมบัติทางเคมีและปริมาณของยางมะตอยที่ใช้
2. ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์
3. สภาพการผลิต เช่น อุณหภูมิ ความดัน แรงเฉือน เป็นต้น
4. ชนิดของเครื่องผสม
5. ความเข้ากันได้ของยางมะตอยกับอิมัลซิไฟเออร์
6. สารเติมแต่งอื่น ๆ
7. ลำดับการใส่ส่วนผสม

2.5.3 สมบัติที่สำคัญในการทำยางมะตอยแบบอิมัลชัน

1. เสถียรภาพของอิมัลชัน (Stability of emulsion) ต่อการขนส่งและเคลื่อนย้าย โดยอิมัลชันต้องไม่จับตัวเป็นก้อน (Coagulate) หรือเกิดการแยกชั้น (Phase separation) ทั้งนี้ความคงตัวของอิมัลชันขึ้นกับขนาดอนุภาคของอิมัลชัน ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ ค่า pH ความเป็นขั้วของตัวกลางและค่าความตึงผิวเฉพาะ เป็นต้น

2. การยึดติด (Adhesion) เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่สามารถบอกถึงความทนทานของยางมะตอยได้ เนื่องจากการใช้งานยางมะตอยต้องมีการสัมผัสกับวัสดุอื่นๆ และยึดเกาะอยู่ที่ผิวสัมผัสไม่หลุดหรือเกิดการแยกตัวออกมา ซึ่งจะช่วยให้ยางมะตอยเกิดการเชื่อมสภาพได้รวดเร็ว แต่หากยางมะตอยที่ผลิตได้มีการยึดติดมากเกินไปอาจเกิดปัญหาในการปู (Paving) หรือทำให้เป็นแผ่นที่มีความสม่ำเสมอ ในการผลิตจึงต้องมีการควบคุมการยึดติดของยางมะตอยให้มีค่าเหมาะสม (Critical surface tension of wetting) กับการใช้งาน

3. ความหนืด (Viscosity) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการใช้งานยางมะตอย ซึ่งส่งผลโดยตรงกับความยากง่ายในการใช้งาน โดยปกติยางมะตอยที่ผลิตได้มักมีความหนืดสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

2.5.4 ข้อดีของการทำยางมะตอยแบบอิมัลชัน

1. หลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิสูง
2. ง่ายต่อการเตรียมยางมะตอยชนิดเหลว
3. มีการกระจายตัวของยางมะตอยอย่างสม่ำเสมอ
4. เวลาในการแข็งตัวเร็วกว่ายางมะตอยชนิดเหลว
5. ปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ยางรถยนต์ (Tires)

ส่วนประกอบของยางรถยนต์แต่ละส่วนจะผลิตจากยางหลายชนิด ขึ้นกับสมบัติของยาง เช่น¹

- ส่วนของหน้ายาง (Tread) ต้องการยางที่มีความทนทานต่อการขัดสี (Wear resistance) มีความร้อนที่เกิดจากการได้รับแรงอย่างต่อเนื่อง (Heat buildup) ต่ำ จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติ (Natural Rubber ; NR) ยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอิน (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR)

- ส่วนของยางใน (Liner) ต้องการยางที่มีการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ต่ำ จึงเลือกใช้ยางบิวทิล (Butyl Rubber; BR)

- ส่วนของผนังด้านข้างของยาง (Side wall) ต้องการยางที่สามารถทนทานต่อการพับไปมาได้ดี (Flex resistance) มีฮีสเทอรีซิส (Hysteresis) ต่ำ จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene Butadiene Rubber; SBR) เป็นต้น

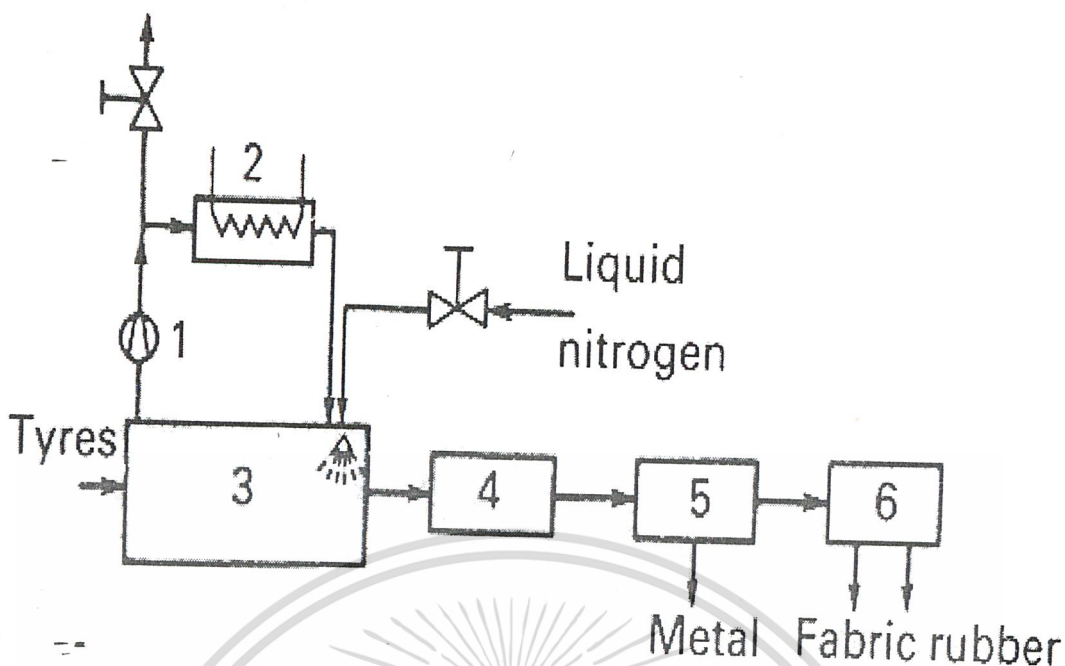
2.2.1 ผงยางจากยางรถยนต์ (Ground rubber tires ; GRT)

การผลิตผงยางจากยางรถยนต์สามารถทำได้ 2 วิธี¹¹

1. การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Grinding)

เทคนิคนี้เป็นการแยกยาง โลหะ และสิ่งทอ ออกจากเศษยางรถยนต์ โดยทำการตัดชิ้นยางให้มีขนาด 50-150 มิลลิเมตร แล้วนำมาให้ความเย็นในห้องให้ความเย็น (Cryogenic chamber) ที่อุณหภูมิต่ำ -60 ถึง -100 องศาเซลเซียส และทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยใช้เครื่องบดแบบค้อน (Hammer mill) ขนาดของเศษยางที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่า 19 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการแยกโลหะออก โดยใช้สนามแม่เหล็ก ในส่วนที่แยกออกมาได้จะมีโลหะ 99 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนที่เป็นยางกับลวด 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ไม่ถูกแยกด้วยสนามแม่เหล็กจะผ่านเข้าไปสู่โต๊ะแกรงร่อน (Sifter table) ของตัวแยกผงหมุนปฐุมภูมิ (Cyclone separator) ซึ่งมีแผ่นแยกขนาดอยู่ 3 แผ่น โดยมีขนาด 1.41-2.38 มิลลิเมตร และ 0.7-0.9 มิลลิเมตร วัสดุที่อยู่ในแผ่นแรกจะถูกนำเข้าสู่เครื่องบด (Grinding mill) และนำกลับเข้าสู่การแยกโดยใช้ไซโคลน (Cyclone) และวัสดุที่อยู่ในแผ่นที่สอง จะนำไปแยกโดยใช้เครื่องสั่นปฐุมภูมิ (First vibration table) ซึ่งจะถูกแยกออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่เบาจะเข้าสู่เครื่องผสมแบบปิดชนิดลูกกลิ้ง เพื่อทำการแยกให้ลวดออกจากยาง และนำกลับเข้าไปแยกโดยไซโคลนอีกครั้ง ส่วนที่หนักจะเข้าไปสู่การแยกโดยใช้สนามแม่เหล็ก ทำการแยกโลหะออกจากยางบริสุทธิ์ นำยางบริสุทธิ์ที่ได้เข้าสู่ห้องให้ความเย็นทุติยภูมิ ยางที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่า 0.127 มิลลิเมตร ส่วนวัสดุในชั้นที่สามจะถูกนำเข้าสู่เครื่องสั่นทุติยภูมิ (Secondary vibration table) และนำกลับเข้ามาแยกขนาด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6¹² แผนผังแสดงตัวอย่างเครื่องบดที่อุณหภูมิต่ำของบริษัท Line Company : 1. ตัวเพิ่มความดัน (Compressor) 2. เครื่องระเหย (Evaporator) 3. อุโมงค์ให้ความเย็น 4. ตัวบด 5. ตัวแยกด้วยสนามแม่เหล็ก 6. เครื่องแยกขนาดและตัวแยกโดยใช้อากาศ

2. การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Ambient grinding)

เป็นเทคนิคการผลิตผงยางจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยกระบวนการบดเชิงกลและการแยกขนาดที่อุณหภูมิต่ำ ขบวนการนี้จะทำการตัดยางเป็นชิ้นๆ โดยใช้ Tire splitter จากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบดยางมีร่องแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll grooved rubber mill) หรือเครื่องบดแบบค้อน (Hammer mill) ส่วนที่เป็นลวดโลหะจะถูกแยกออกด้วยมือหรือแม่เหล็ก ส่วนที่เป็นเส้นใยจะถูกแยกออกในระหว่างกระบวนการบด และการแยกขนาดโดยใช้ Air table

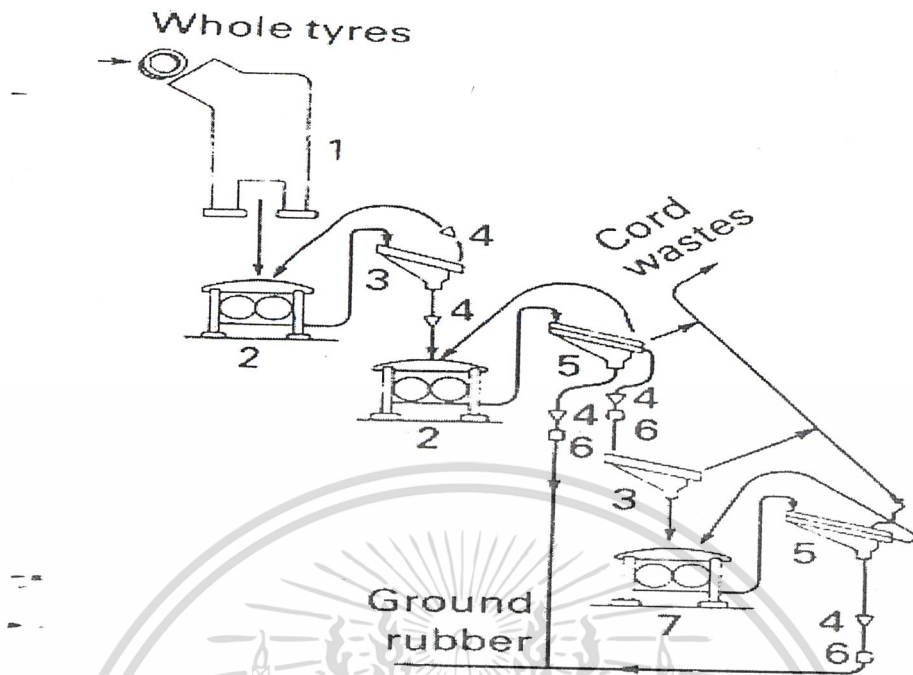
เทคนิคนี้จะคล้ายกับเทคนิคการบดที่อุณหภูมิต่ำ ต่างกันที่ไม่ต้องใช้ไนโตรเจนเหลว เพื่อให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) เทคนิคนี้จะให้ยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า พื้นที่ผิวน้อยกว่า และมีการกระจายของขนาดโมเลกุลมากกว่าเทคนิคการบดที่อุณหภูมิต่ำนี้ ถ้าต้องการให้ได้อนุภาคยางที่มีขนาดเล็กสามารถทำได้โดยเพิ่มขั้นตอนกระบวนการบดหลายๆ ครั้ง เพื่อลดขนาดอนุภาค

2.2.2 ยางรีเคลม (Reclaim)

ยางรีเคลมเป็นยางที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ยางที่เสียแล้ว เช่น ยางล้อรถหรือจากผลิตภัณฑ์ยางที่เสียระหว่างกระบวนการผลิต ยางเหล่านี้เป็นยางที่คงรูปแล้ว ซึ่งการนำไปผลิตเป็นยางรีเคลม จะมีขั้นตอนการกำจัดวัสดุอื่นที่ไม่ใช่ยาง เช่น โลหะ เส้นใยต่างๆ ออกก่อน ทำโดยการให้ความร้อนกับยางคงรูปที่อุณหภูมิประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลายชั่วโมง สามารถทำให้ยางเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมี (Depolymerize) เป็นวัตถุดิบยางที่เรียกว่า “ยางรีเคลม” ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับยางสภาพใหม่ที่ไม่ได้ผ่านการใช้งานมาก่อน

การทำยางรีเคลม (รูปที่ 2.7) สามารถทำได้จากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ สารเคมีที่ใช้ช่วยในระหว่างการบดยางรีเคลม ได้แก่ สารเคมีกลุ่ม Peptising agents เช่น Pentachlorothiophenol (PCTP), Zinc salts (ZnPCTP), Dibenzamidediphenyl disulphide โดยเฉพาะ PCTP ใช้ได้ดีกับยางคงรูปจาก SBR และ NBR ส่วน ZnPCTP จะใช้ได้ดีกับยางคงรูปจากยางธรรมชาติ และยาง IR นอกจากนี้ยังอาจใช้ Reclaim oil เช่น Mineral oil ร่วมกับ Resins และสาร Peptizing agents ข้างต้น

การนำยางรีเคลมไปใช้ประโยชน์สาม เกรดใช้ได้อย่างกว้างขวางในด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพไม่สูงมากนัก ซึ่งอาจใช้ร่วมกับยางใหม่หรือใช้ยางรีเคลมล้วนๆ และยังสามารถให้ข้อได้เปรียบด้านราคาต้นทุนการผลิต



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตยางรีเคลมจากยางรถบรรทุกและรถโดยสารที่ใช้แล้ว โดยเครื่องตัดยางรถยนต์¹² 1. เครื่องตัดยางรถยนต์ออกเป็นชิ้น 2. บดอัดด้วยลูกกลิ้ง 3. กรองด้วยตะแกรงร้อนแบบสั้นขั้นตอนเดียว 4. เครื่องแยกแบบแม่เหล็ก 5. กรองด้วยตะแกรงร้อนแบบสั้นสองขั้นตอน 6. เครื่องแยกแบบถ่วงน้ำหนัก 7. เครื่องบดเป็นผง

ผลของขนาดอนุภาคผงยางจากยางรถยนต์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ

โดยทั่วไปแล้วพบว่าค่าความแข็งแรงดิ่งจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใส่ผงยางและเพิ่มขนาดของอนุภาคผงยาง ส่วนค่าความแข็งแรงต่อความล้าของยางที่ใส่ผงยางจากยางรถยนต์จะมากกว่าที่ไม่ได้ใส่ผงยางจากยางรถยนต์ 25 ส่วนใน 100 ส่วนจะให้ค่าความแข็งแรงต่อความล้าสูงที่สุด โดยเฉพาะกับยางสไตรีนบิวตะไดอิน ถ้ากรณีของยางไนไตรล์ที่ตกผลึก ค่าความแข็งแรงต่อความล้าจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางจากยางรถยนต์

ได้มีผู้ทำการวิจัย พบว่าขนาดของอนุภาคผงยางจากยางรถยนต์ยิ่งเล็กจะยิ่งทำให้มีสมบัติที่ดีขึ้น จากการศึกษาสัมมนาวิทยาของยางสไตรีนบิวทาไดอินผสมกับผงยางจากยางรถยนต์พบว่า การเสียดสภาพของยางเกิดที่ระหว่างอนุภาคผงยางจากยางรถยนต์กับเมตริกซ์ โดยผงยางแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อขนาดของผงยางจากยางรถยนต์ลดลงจะทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเรียบขึ้น เนื่องจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมีน้อยลง สมบัติเชิงกลของยางที่เติมผงยางจากยางรถยนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีสมบัติที่ดีกว่า และมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่า มีข้อเสนอแนะคือ การผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดี ควรใช้ผงยางที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมครอน การผสมมีผลต่อการลดลงของขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ โดยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้นขนาดอนุภาคจะเล็กลง เมื่อเมตริกซ์ แข็งกว่าส่วนกระจายตัว (Disperse phase)

2.3 การทำงานของเครื่องมือ

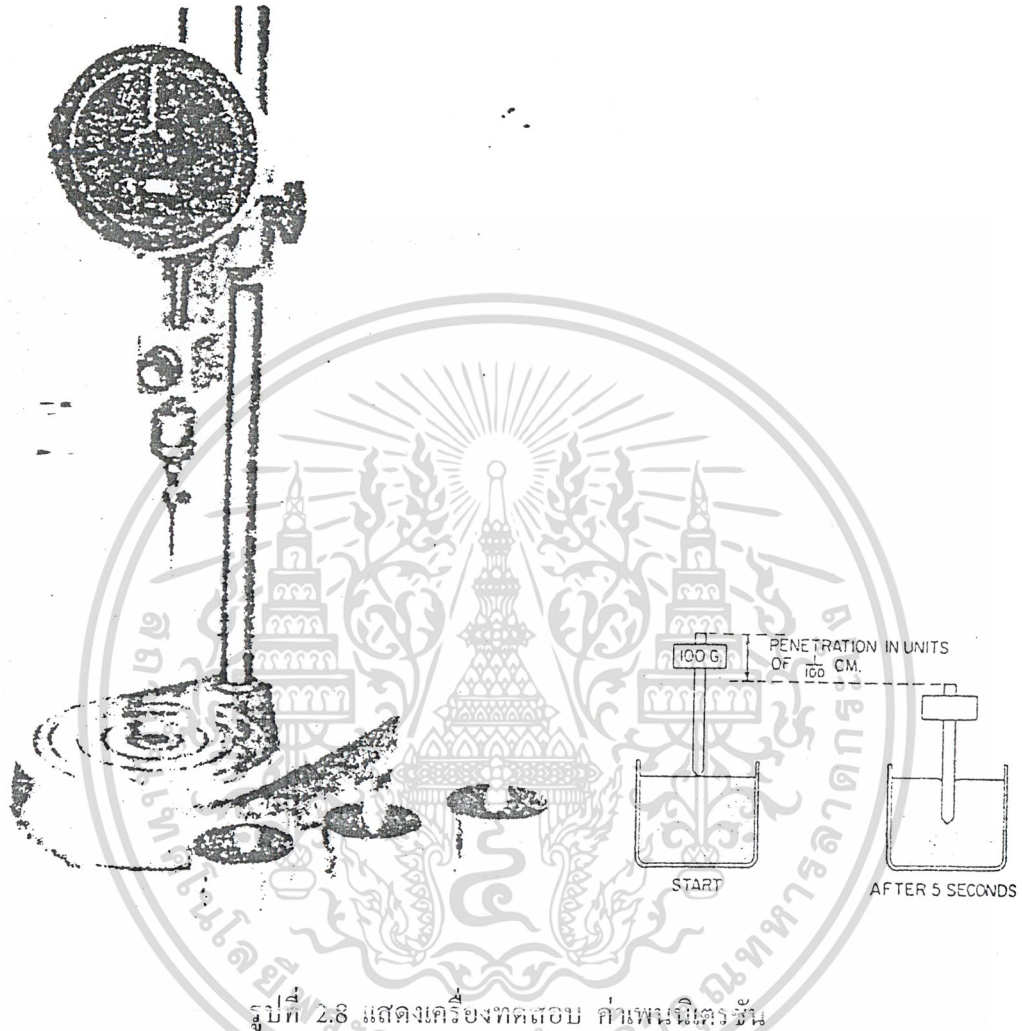
2.3.1 เครื่องทดสอบค่าเพนนิเตรชัน

เป็นเครื่องมือทดสอบหาระยะทางที่เข็มมาตรฐานแทรกลงในตัวอย่างวัสดุใด ๆ ตามแนวตั้ง ภายใต้น้ำหนัก เวลา และอุณหภูมิที่กำหนด 1 เพนนิเตรชัน เท่ากับ 1 ใน 10 ของมิลลิเมตร ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือ แสดงในรูปที่ 2.8

1. เครื่องทดลอง เพนนิเตรชัน ประกอบด้วยแกนที่เคลื่อนขึ้นลงได้ตามแนวตั้ง โดยมีความเสียดทานน้อยที่สุด และอ่านได้ถึง 1 เพนนิเตรชัน เข็มมาตรฐานจะประกอบติดกับแกน โดยมีปากจับ น้ำหนักของแกนเท่ากับ 47.50 ± 0.05 กรัม เมื่อรวมน้ำหนักของเข็มมาตรฐานแล้ว ต้องหนัก 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 มีค่าความแข็งเบรริออคเวล จาก C 57 ถึง C 60 ยาวประมาณ 50.80 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00-1.02 มิลลิเมตร ปลายข้างหนึ่งแหลมแหลมเป็นรูปกรวย มีมุมแหลม 8.67 องศา ถึง 9.67 องศา ปลายกรวยแหลมนี้ตัดในแนวตั้งฉากกับแกนของเข็ม โดยลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 องศา ให้ปลายตัดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.14 – 0.16 มิลลิเมตร มุมที่ปลายตัดต้องคมและปราศจากรอยบิน ผิวของปลายตัดต้องมีความเรียบ ถึง 8 ไมโครนิ้ว ปลายอีกข้างหนึ่งของเข็มมาตรฐาน อาจจะฝังยึดกับแท่งโลหะทรงกระบอกที่โตกว่า แท่งทรงกระบอกนี้จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.18 มิลลิเมตร ยาว 38.1 มิลลิเมตร โดยประมาณ ทำด้วยทองเหลือง หรือเหล็กไร้สนิม

เข็มกับแท่งทรงกระบอกจะต้องฝั่งยึดติดกันแน่น และอยู่ในแกนเดียวกัน โดยเข็มโผล่ออกจากแท่งทรงกระบอก ยาวประมาณ 41.26 มิลลิเมตร น้ำหนักรวมของเข็มและแท่งทรงกระบอกเท่ากับ 2.50 ± 0.05 กรัม



รูปที่ 2.8 แสดงเครื่องทดสอบ ค่าเพนนิตรชัน

3. ภาชนะบรรจุตัวอย่าง ทำด้วยโลหะหรือแก้ว ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกก้นแบน ถ้าใช้บรรจุตัวอย่างยางมะตอยที่มีค่า เพนนิตรชัน ไม่มากกว่า 200 จะต้องมีความจุ 3 ออนซ์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มิลลิเมตร ลึก 35 มิลลิเมตร วัสดุยางมะตอยที่มีค่าเพนนิตรชัน มากกว่า 200 จะต้องมีความจุ 6 ออนซ์ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 70 มิลลิเมตร ลึก 85 มิลลิเมตร

4. อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ เป็นอ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้โดยมีค่าอุณหภูมิของน้ำคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1 องศาเซลเซียส มีความจะไม่น้อยกว่า 10 ลิตร มีชั้นโป๊วสูง 50 มิลลิเมตร สำหรับวางตัวอย่างและต้องให้น้ำท่วมตัวอย่างได้ไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร น้ำที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำมันหรือสิ่งสกปรกปะปน อาจใช้น้ำเกลือแทนน้ำได้ในกรณีที่ต้องการทดลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าต้องการทดลองโดยไม่ย้ายตัวอย่างออกจากน้ำ ต้องจัดหาที่สำหรับวางเครื่องทดสอบ เพนนิเตรชัน ที่มั่นคงแข็งแรงพอ

5. ภาชนะย้ายตัวอย่าง ควรเป็นภาชนะทรงกระบอกก้นแบนทำด้วยแก้ว โลหะ หรือพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่น้อยกว่า 90 มิลลิเมตร และลึกไม่น้อยกว่า 55 มิลลิเมตร ภาชนะนี้ต้องมีที่กั้นกับภาชนะบรรจุตัวอย่างเคลื่อนไปมาในเวลาทดลอง

6. เทอร์โมมิเตอร์ ในที่นี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส ในช่วง 19 – 20 องศาเซลเซียส และตัวเทอร์โมมิเตอร์ต้องจุ่มลงในน้ำ 150 ± 15 มิลลิเมตร

7. นาฬิกาจับเวลา ชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 วินาที อาจใช้นาฬิกาจับเวลาให้เสียงสัญญาณ ใช้กับเครื่องทดสอบเพนนิเตรชัน แบบใช้มือควบคุม หรือเครื่องจับเวลาอัตโนมัติประกอบเพื่อควบคุมเครื่องทดลองเลยก็ได้

2.3.2 เครื่องทดสอบการยืดตัว

การยืดตัว (Ductility) ของวัสดุยางมะตอย วัดได้จากระยะที่ยางมะตอยสามารถยืดออกไปได้ก่อนขาด โดยที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างนั้นยึดอยู่ในแบบมาตรฐาน แล้วดึงให้ยืดออกด้วยอัตราเร็วและอุณหภูมิที่กำหนด เครื่องมือทดสอบความเหนียวมีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 2.9

1. แม่แบบ (Mold) มีขนาดและลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำด้วยทองเหลือง ส่วนปลาย b และ b' เรียกว่า ตัวยึด ส่วนปลาย a และ a' เรียกว่า ส่วนข้างของแบบ แบบนี้จะต้องมีขนาดที่จะทำให้ยางมะตอย ที่หล่อออกมาจากแบบแล้ว 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

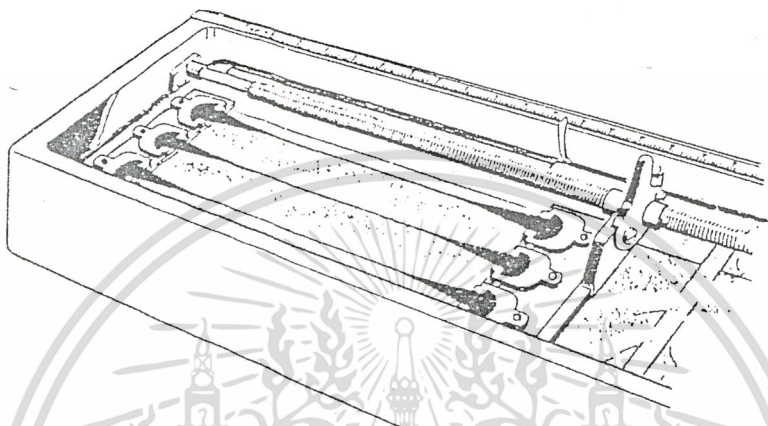
2. อ่างน้ำรับอุณหภูมิ เป็นอ่างน้ำที่สามารถรับอุณหภูมิให้คงที่ได้ โดยให้อุณหภูมิของน้ำคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1 องศาเซลเซียส มีความจุไม่น้อยกว่า 10 ลิตร มีชั้นโปรงสูง 50 มิลลิเมตร สำหรับวางตัวอย่าง และต้องให้น้ำท่วมตัวอย่างได้ไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตรน้ำที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำมันหรือสิ่งสกปรกปะปน ในกรณีที่ต้องการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ อาจใช้น้ำเกลือแทนน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

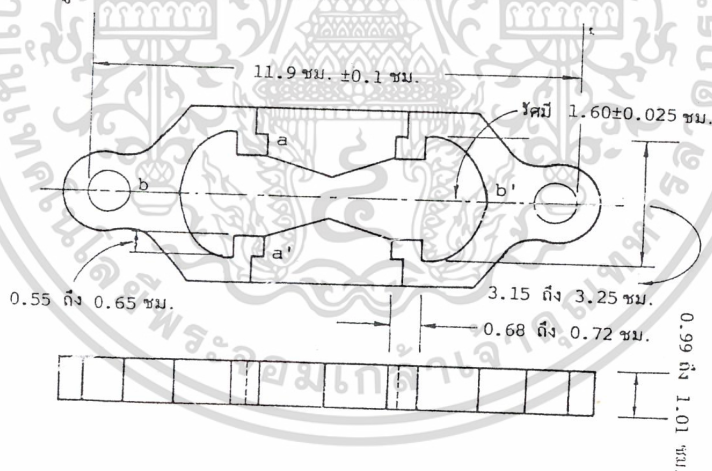
3. เครื่องดึง สำหรับดึงตัวอย่างที่หล่อแล้ว อาจจะใช้เครื่องมือใดก็ได้ที่สามารถดึงให้ตัวอย่างยึดสองข้างแยกออกจากกันได้ด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอตามที่กำหนด โดยไม่มีการสั่นสะเทือน และในขณะที่ทดลองตัวอย่างจะต้องจมอยู่ในน้ำตลอดเวลา

4. แผ่นทองเหลืองสำหรับวางแบบหล่อตัวอย่าง ต้องเป็นแผ่นแบน และเรียบสนิท เพื่อให้ด้านล่างของแบบเมื่อวางลงบนแผ่นทองเหลืองนี้แล้วสัมผัสกับแผ่นทองเหลืองได้แนบสนิท

5. ตะแกรงเบอร์ 50



รูปที่ 2.9 เครื่องทดสอบการยึดตัว



รูปที่ 2.10 แบบสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบการยึดตัว

2.3.3 เครื่องทดสอบจุดอ่อนตัว : เครื่อง Ring-and-Ball

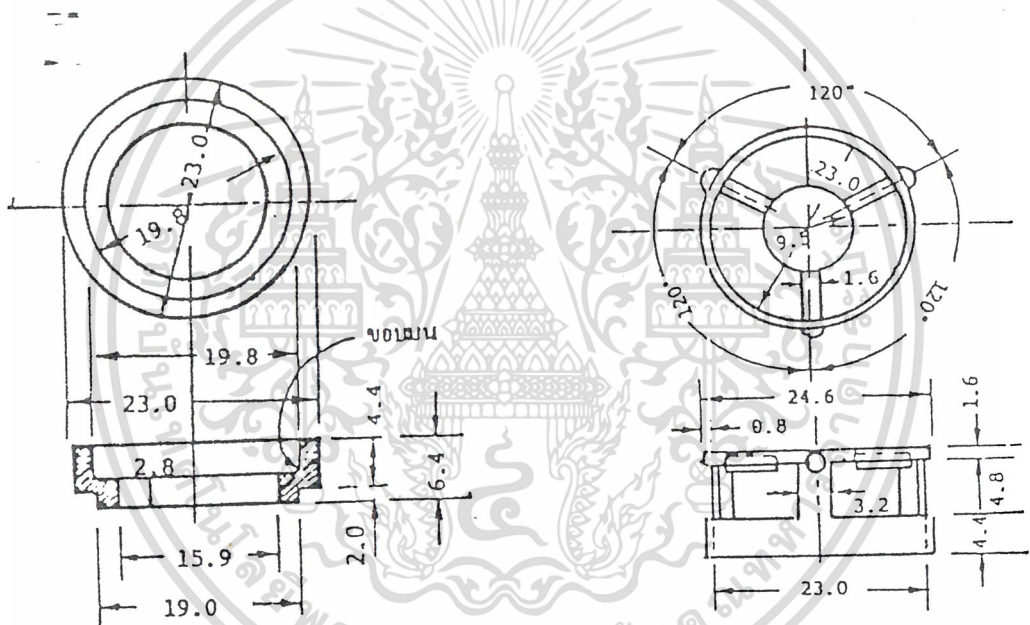
เครื่อง Ring-and-Ball มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. วงแหวน (Rings) วงแหวนสองวงมีขนาดและรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก)
2. แผ่นรอง (Pouring plate) แผ่นทองเหลือง แบนเรียบ ขนาดประมาณ 50 คูณ

75 มิลลิเมตร ใช้รองรับในขณะที่เทตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

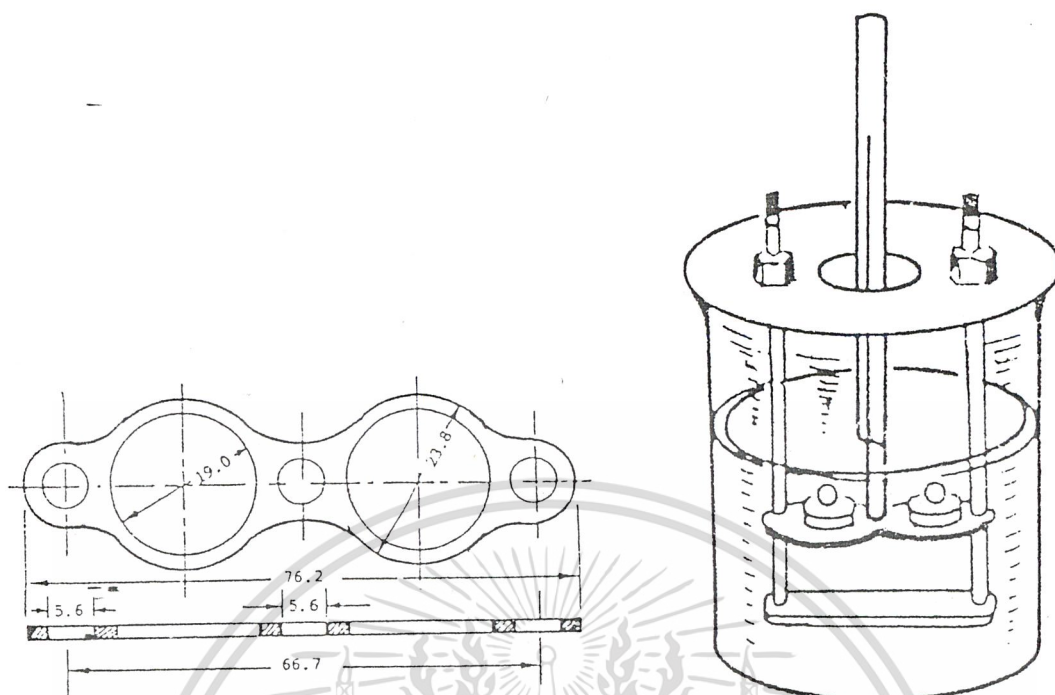
3. ลูกกลม (Balls) ลูกเหล็กกลมสองลูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร น้ำหนักแต่ละลูก 3.50 ± 0.05 กรัม
4. เครื่องจัดลูกกลมให้อยู่ตรงกลาง (Ball-Centering Guides) ทำด้วยทองเหลือง ใช้สำหรับจัดลูกกลมให้อยู่ตรงกลางวงแหวน 2.10 (ข)
5. บีกเกอร์หรือกระบอบอกแก้ว ทำด้วยแก้วทนความร้อนสูง ขนาดจุ 800 มิลลิลิตร
6. แท่นยึดวงแหวนและส่วนประกอบ (Ring Holder and Assembly) แท่นยึด ทำด้วยทองเหลืองใช้รองรับวงแหวน ให้อยู่ในแนวราบ มีรูปร่างลักษณะดังรูปที่ 2.10(ค) ส่วนประกอบของเครื่องมือมีลักษณะดังรูปที่ 2.10(ง)
7. เทอร์โมมิเตอร์ขนาด $100\text{ }^{\circ}\text{C}$



ก. วงแหวน

ข. เครื่องจัดลูกกลมให้อยู่ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค. แผ่นยึดวงแหวน

ง. ส่วนประกอบใช้วงแหวน 2 วง

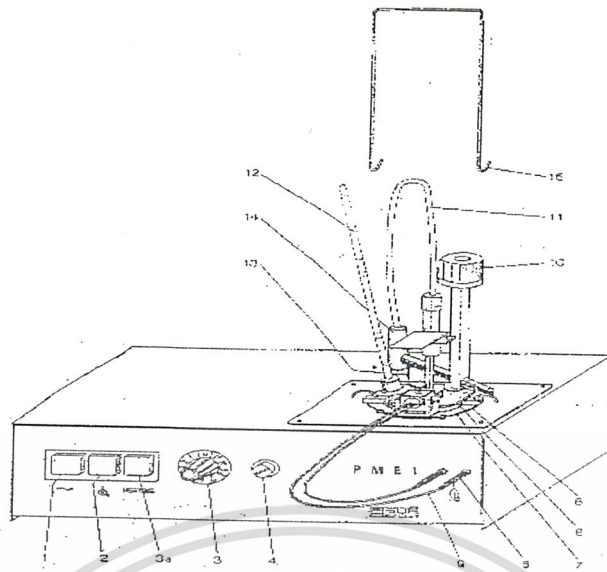
รูปที่ 2.11 ขนาดและส่วนประกอบของเครื่อง Ring-and-Ball

2.3.4 เครื่องทดสอบจุดวาบไฟ : Cleveland open cup

Cleveland open cup มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. ถ้วยทดสอบทำด้วยทองเหลือง ดังรูป 2.11
2. ที่จุดเปลวไฟทดลอง อาจเป็นแบบใดก็ได้ที่เหมาะสม ตรงปลายควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.6 มิลลิเมตร และมีรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.8 มิลลิเมตร
3. เครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ
4. เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดได้ละเอียดถึง 1°C และวัดได้สูงสุดถึง 360°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

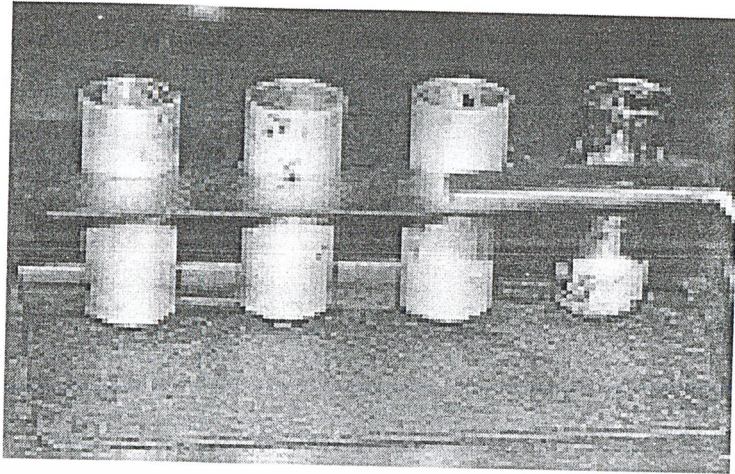


รูปที่ 2.12 เครื่องทดสอบจุดวาบไฟ

2.3.5 เครื่องทดสอบความหนืด : Brookfield Thermosel Apparatus

เครื่อง Brookfield thermosel มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. เข็มมาตรฐานเบอร์ 21
2. แม่แบบ (Mould) รูปทรงกระบอกสำหรับใส่ตัวอย่างทำ ด้วยอะลูมิเนียมดังรูป 2.12
3. ระบบให้ความร้อน (Thermosel system)
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)

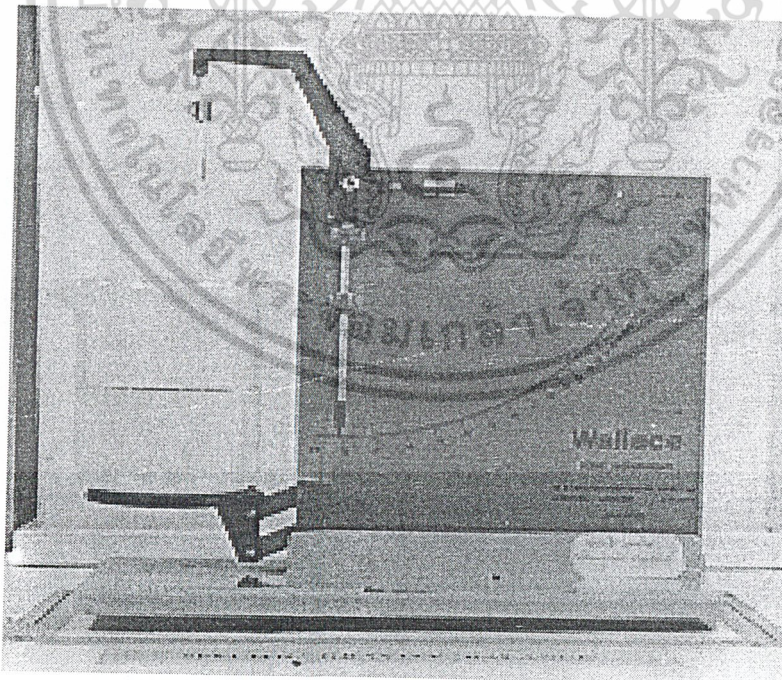


รูปที่ 2.13 แบบใส่ตัวอย่างของ Brookfield Thermosel Apparatus

2.3.6 เครื่องทดสอบความหนาแน่น : The Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance

เครื่อง Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance มีส่วนประกอบที่

สำคัญดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่อง Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ยางมะตอย (AC 60/70) จากบริษัท BAMCO Limited มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.1 สมบัติยางมะตอย (AC 60/70)

สมบัติ	ยางมะตอย
Penetration at 25 °C, 100 gm., 5sec	60-70
Softening point, Ring and Ball	48.9 °C
Ductility at 13 °C , 5 cm/min	>150
Brookfield viscosity, shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21 at 135 °C	420 cP
Storage stability at 165 °C , 120 hrs Difference in softening point	1.75
Density at 25 °C	1.027g/cm ³
Flash point, Cleveland Open Cup	248 °C

3.1.2 ผงยางจากยางรถยนต์ ขนาด 10 20 30 และ 40 เมส (Ground rubber tire , GRT) ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) จาก บริษัท Saeng Thai Rubber Factory Co., Ltd.

3.1.3 สารเชื่อมโยงไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide, DCP)

3.1.4 ตัวทำละลาย

1. น้ำมันสน
2. ไดมethylฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide , DMF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติไดเมทิลฟอร์มามิด (Dimethylformamide, DMF)ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	ค่า
ชื่อเคมี	N,N-Dimethylformamide
ชื่อทางการค้า	DMF
สูตรโครงสร้าง	C_3H_7NO
น้ำหนักโมเลกุล	73.11
จุดเยือกแข็ง	$-61^{\circ}C$
อุณหภูมิการสลายตัว	$153^{\circ}C$
ความหนาแน่น	0.944 g/cm
การละลาย	ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์
ลักษณะ	ของเหลวใส

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าเพนนิเตอร์ (Penetrometer) ตามมาตรฐาน NLT-181
2. เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Thermosel Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM D 4402
3. เครื่องทดสอบจุดวาบไฟ (Pensky – Martens flash-point tester, Petrotest Instruments GmbH & Co KG.) ตามมาตรฐาน ASTM D 92
4. เครื่องทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Machine) ตามมาตรฐาน DH-T 405
5. เครื่องทดสอบจุดอ่อนตัว (Ring-and-Ball) ตามมาตรฐาน ASTM D 36
6. เครื่องปั่นกวน (Labo – Stirrer Model LR-4 ID, Yamata)
7. เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Balance, Croylon-England CR 92 HR)
8. ตู้อบ (Oven)
9. แพนให้ความร้อน (Hot plate)
10. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) 300 องศาเซลเซียส
11. บีกเกอร์ (Beaker)
12. เครื่องชั่ง
13. แท่งแก้วคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอย (AC 60/70) ต่อผงยางจากยางรถยนต์ (GRT)

1.1 การเตรียมตัวอย่าง AC 60/70 ผสม GRT 5% w/w

- 1) ชั่ง GRT ขนาด 30 เมส จำนวน 25 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) นำยางมะตอยไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) ชั่งยางมะตอยในขณะที่ยังร้อนอยู่ 475 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 4) นำไปให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 180-190 องศาเซลเซียส
- 5) เติมผงยางรถยนต์ที่ชั่งไว้ลงในยางมะตอย พร้อมกับปั่นจนตลอดเวลาด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 6) นำยางมะตอยที่เตรียมได้มาเก็บไว้ในที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเตรียมไว้ทดสอบสมบัติต่างๆ
- 7) เตรียมยางมะตอยผสมผงยางรถยนต์ที่อัตราส่วน 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำในทำนองเดียวกัน

1.2 ทดสอบสมบัติของยางมะตอยที่ผสมผงยางจากยางรถยนต์ ดังต่อไปนี้

- 1) วัดค่าเพนิเตรชันด้วยเครื่อง Penetrometer
- 2) วัดความหนาแน่นด้วยเครื่อง Specific Gravity Balance
- 3) วัดความสามารถในการดึงยืด ด้วยเครื่องทดสอบ Ductility Machine
- 4) ทดสอบหาจุดควาปไฟด้วยเครื่อง Flash-point tester

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อสมบัติของยางมะตอย

2.1 การเตรียมตัวอย่างยางมะตอยผสมผงยางขนาด 10 เมส

- 1) เลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 มาทำการทดลองโดยเปลี่ยนขนาดของผงยางเป็น 10 เมส 20 เมส และ 40 เมส
- 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1 ข้อ 1.1
- 3) เปลี่ยนขนาดของผงยางเป็น 20 เมส และ 40 เมส แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1 ข้อ 1.1 เช่นเดียวกัน

2.2 ทดสอบสมบัติของยางมะตอยที่ผสมผงยางจากยางรถยนต์ ดังต่อไปนี้

- 1) วัดค่าเพนิเตรชันด้วยเครื่อง Penetrometer
- 2) วัดความหนาแน่นด้วยเครื่อง Specific Gravity Balance
- 3) วัดความสามารถในการยืดตัว ด้วยเครื่องทดสอบ Ductility Machine
- 4) ทดสอบหาจุดควาปไฟด้วยเครื่อง Flash-point tester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ทดสอบหาจุดอ่อนตัวด้วยเครื่อง Ring and Ball
- 6) วัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Thermosel Apparatus

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของสารเชื่อมโยง ไคลิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ที่มีต่ออย่างมะตอยที่ผสมพวยจากยางรถยนต์ในสูตรที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 และตอนที่ 2

3.1 การเตรียมตัวอย่างยางมะตอยผสมพวยจากยางรถยนต์และ DCP ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของพวยยางทั้งหมด

3.1.1 การใช้ DCP ในรูปสารละลาย

- 1) เลือกสูตรการผสมจากตอนที่ 1 และตอนที่ 2 ที่ให้สมบัติดีที่สุด
- 2) เตรียมสารละลาย DCP 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของ DMF
- 3) ผสมพวยกับสารละลาย DCP ด้วยเครื่องผสมชนิดความเร็วสูงความเร็วด้วยรอบ 3000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที
- 4) นำของผสมที่ได้จากข้อ 3) มาผสมกับยางมะตอย ที่อุณหภูมิ 180 °C ด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 5) เตรียมตัวอย่างตามขั้นตอน 1) - 4) โดยเปลี่ยนปริมาณของ DCP เป็น 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของพวยยางทั้งหมด

3.1.2 การใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด

- เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 3.1.1 โดย DCP ที่มีสถานะเป็นของแข็งบดละเอียดที่อุณหภูมิห้องแทนสารละลาย DCP

3.2 นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 1) วัดค่าเพนนิเตรชันด้วยเครื่อง Penetrometer
- 2) วัดความหนาแน่นด้วยเครื่อง Specific Gravity Balance
- 3) วัดความเสถียรในการดึงยืด ด้วยเครื่องทดสอบ Ductility Machine
- 4) ทดสอบหาจุดอ่อนตัวด้วยเครื่อง Ring and Ball
- 5) วัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Thermosel Apparatus

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

1 ทดสอบค่าเพนนิเตรชันด้วยเครื่อง Penetrometer

- 1.1 นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 1.2 เทตัวอย่างใส่แบบจนเต็มในขณะที่ตัวอย่างยังร้อนอยู่ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 1.3 นำตัวอย่างไปแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่ 25 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 1.4 นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ แล้วเช็ดน้ำที่ผิวหน้าตัวอย่างออกให้หมด
- 1.5 เตรียมเข็มมาตรฐานหนัก 100 ± 0.05 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.6 ตั้งหน้าปิดให้อ่านค่าทดลองที่ศูนย์
- 1.7 เปิดปุ่มทำงานปล่อยให้เข็มแทรกกลงไปในตัวอย่างเป็นเวลา 5 วินาที
- 1.8 บันทึกค่าที่อ่านได้จากหน้าปิดของเครื่องมือ
- 1.9 ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

2 ทดสอบหาความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield viscosity

- 2.1 นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2.2 เทตัวอย่างลงในแบบ 8-10 กรัม
- 2.3 เปิดสวิตช์ของ Thermosel
- 2.4 ตั้งอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ที่ 135°C
- 2.5 นำตัวอย่างที่อยู่ในแบบใส่ลงในกระบอก Thermosel จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ 135°C
- 2.6 เลื่อนเข็มเบอร์ 21 จุ่มลงในตัวอย่าง หมุนด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที และอัตราความเร็ว 18.6 ต่อวินาที ทดลองเป็นเวลา 90 นาที
- 2.7 บันทึกค่าความหนืดบนหน้าปิดของเครื่องทุก 2 นาที
- 2.8 เลือกค่าความหนืดที่คงที่ที่สุดหรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

3 ทดสอบความสามารถในการดึงยืดด้วยเครื่อง Ductility

- 3.1 ใช้สับจู๊าบลงบนแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างของแบบทางด้านใน (ส่วน a และ a' ดังรูปที่ 2.10) บางๆ จากนั้นประกอบแบบทั้งหมดลงบนแผ่นทองเหลือง
- 3.2 นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3.3 เทตัวอย่างลงในแบบที่ประกอบไว้ จนกระทั่งตัวอย่างเต็มล้นออกจากแบบเล็กน้อย
- 3.4 ปล่อยให้ตัวอย่างเย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 ถึง 40 นาที
- 3.5 นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 30 นาที
- 3.6 นำส่วนทั้งหมดขึ้นจากน้ำใช้มีดบางๆ หรือเกียงซึ่งอังไฟให้ร้อนพอประมาณ ตัดปาดตัวอย่างส่วนที่เกินออกจากแบบให้ผิวหน้าตัวอย่างเรียบเต็มแบบพอดี
- 3.7 นำตัวอย่างที่ปาดเรียบเรียบร้อยแล้วไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 13°C เป็นเวลา 90 นาที
- 3.8 ยกตัวอย่างขึ้นจากอ่างเอาแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างทั้งสองของแบบออก
- 3.9 เอาห่วงที่ปลายของตัวยึดทั้งสองข้างใส่ลงในขอเกี่ยวของเครื่องดึงแล้วเดินเครื่องดึงตัวยึดให้แยกออกจากกันด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ 5 เซนติเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างที่ยึดเป็นเส้นขาดออกจากกัน
- 3.10 วัดระยะที่ตัวอย่างยืดออกจนขาดจากกันในหน่วยเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 ทดสอบหาจุดวาบไฟด้วยเครื่อง Flash point tester

- 4.1 นำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4.2 เทตัวอย่างลงในถ้วยทองเหลืองจนถึงขีดกำหนด
- 4.3 เสียบเทอร์โมมิเตอร์ขนาด 300°C และที่ปั่นกวกลงในถ้วยทองเหลือง จุดไฟที่ที่จุดเปลวไฟทดลอง และปรับให้เปลวไฟนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.2-4.8 มิลลิเมตร
- 4.4 ให้ความร้อนกับตัวอย่าง ในระยะแรกให้มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 14-15 องศาเซลเซียสต่อนาที และเมื่อตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดวาบไฟที่คาดไว้ประมาณ 60°C ให้ลดอัตราการเพิ่มความร้อนลงเป็น 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดวาบไฟประมาณ 30°C
- 4.5 เริ่มต้นใช้เปลวไฟผ่านถ้วยทดลอง และให้เปลวไฟผ่านทุกครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2°C โดยเปลวไฟจะผ่านไปทางหนึ่งก่อนแล้วผ่านกลับมา ระยะเวลาที่เปลวไฟผ่านถ้วยทดลองประมาณ 1 วินาที
- 4.6 เมื่อเกิดไฟวาบขึ้นที่จุดหนึ่งจุดใดบนผิวหน้าของตัวอย่าง อ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ แล้วบันทึกเป็นจุดวาบไฟ

5 การวัดจุดอ่อนตัวโดยใช้เครื่อง Ring-and-Ball Apparatus

- 5.1 นำตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 5.2 ใช้ส้อมจุ่มลงบนแผ่นทองเหลืองอย่างบางๆ แล้ววางแบบวงแหวนทองเหลืองลงบนแผ่นทองเหลือง
- 5.3 เทตัวอย่างลงในแบบวงแหวนทองเหลืองให้ล้นเล็กน้อย แล้วปล่อยให้เย็นลงตามอุณหภูมิจึงแวดล้อมอย่างน้อย 30 นาที
- 5.4 ใช้มีดบางหรือเกียงซึ่งอังไฟให้ร้อนแล้วตัดตัวอย่างส่วนเกินออกจนเรียบเสมopakขอบวงแหวน
- 5.5 เติมน้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 800 มิลลิลิตรจนถึงขีดประมาณ 105 ± 3 มิลลิเมตร และเลือกใช้เทอร์โมมิเตอร์ขนาด 100°C
- 5.6 ประกอบเครื่องมือพร้อมด้วยวงแหวนบรรจุตัวอย่าง วางลูกกลมให้อยู่ตรงจุดศูนย์กลางวงแหวน พร้อมทั้งจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ลงในบีกเกอร์
- 5.7 ให้ความร้อนที่ก้นของบีกเกอร์ด้วยเครื่องให้ความร้อน โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 5.8 บันทึกอุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ เมื่อลูกกลมตกลงกระทบก้นบีกเกอร์

ซึ่งจะมีตัวเซนเซอร์บอกสัญญาณเตือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 การทดสอบหาความหนาแน่น ด้วยเครื่อง Wallace Direct Reading Specific Gravity Balance

- 6.1 นำตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 6.2 เทตัวอย่างลงในแบบสี่เหลี่ยม 5-10 กรัม ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 6.3 นำตัวอย่างออกจากแบบเพื่อเตรียมไปทดสอบ
- 6.4 เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ขนาด 800 มิลลิลิตร ประมาณ 600 มิลลิลิตร
- 6.5 เทียบมาตรฐานเครื่องมือ
- 6.6 ใส่ชิ้นงานที่ปลายเข็ม
- 6.7 ปรับคัมน์น้ำหนักแขนยาวให้ชี้ที่ 'A'
- 6.8 จุ่มชิ้นงานลงในบีกเกอร์ให้น้ำท่วมพอดี อย่าให้มีฟองอากาศติดชิ้นงาน
- 6.9 อ่านค่าจากตัวเครื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

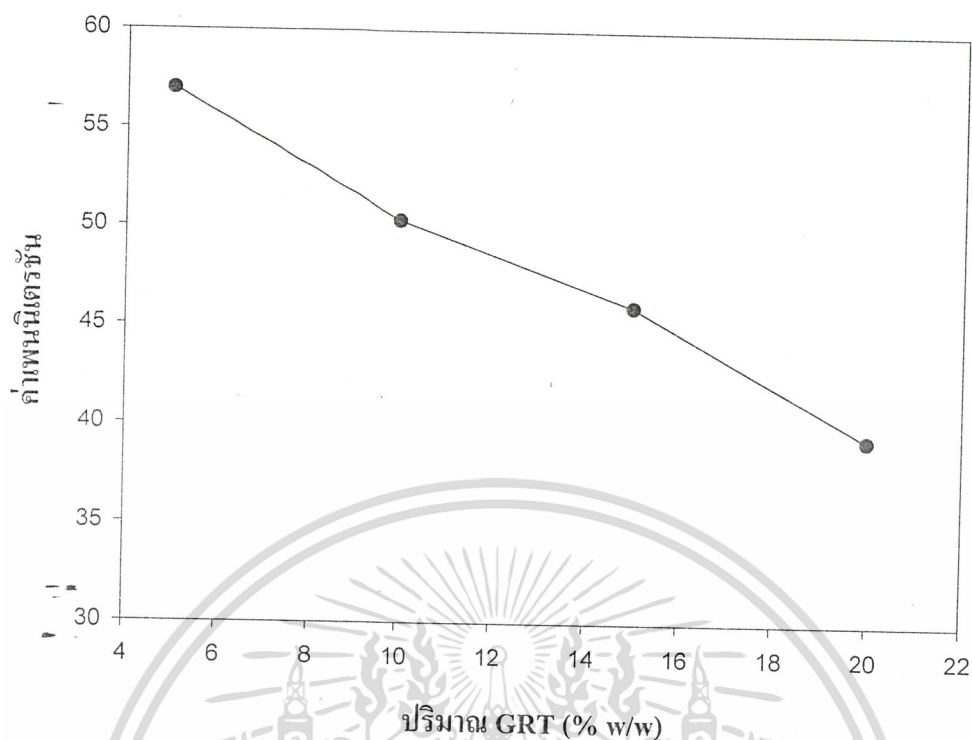
ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการดำเนินการวิจัยศึกษาพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยด้วยผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) โดยการผสมผงยางรถยนต์กับยางมะตอยด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดความเร็ว 700 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วศึกษาผลของปริมาณผงยาง (0-20% โดยน้ำหนัก) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคผงยาง (10 20 30 และ 40 เมส) และผลของสารเชื่อมโยงไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ในปริมาณต่าง ๆ (0-3 % ของปริมาณผงยาง) โดยการศึกษสมบัติต่างๆ เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) การยืดตัว (Ductility) และจุดวาชไฟ (Flash point) มีผลการทดลองแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอย (AC 60/70) ต่อผงยางจากยางรถยนต์ (GRT)

4.1.1 เพนนิเตรชัน (Penetration)

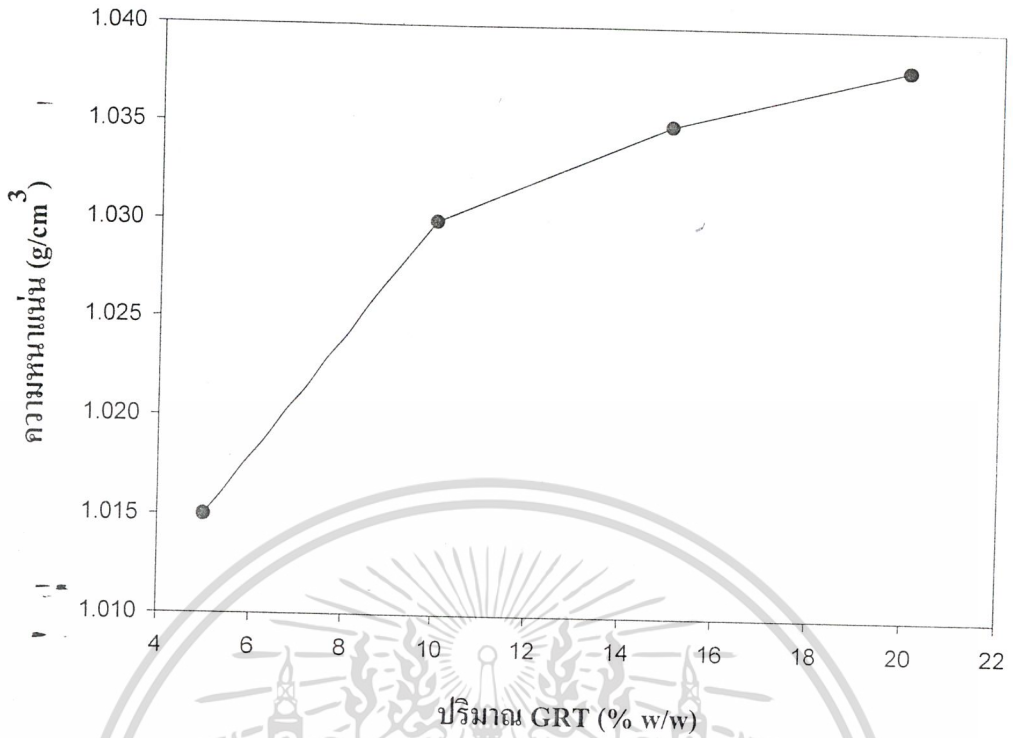
การทดสอบค่าเพนนิเตรชัน คือ การวัดความแข็งของยางมะตอยโดยใช้วิธีวัดระยะที่เข็มมาตรฐานจมลงไปนยางมะตอยเมื่อถูกกดด้วยน้ำหนักที่กำหนดไว้ในระยะเวลาและอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากการทดลองพบว่า ค่าเพนนิเตรชันมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ GRT เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่า GRT ซึ่งมีความแข็งหรือค่ามอดุลัส (Modulus) มากกว่ายางมะตอย และทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมจำพวกสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) ในยางมะตอย เมื่อปริมาณของ GRT ซึ่งมีความแข็งมากกว่ายางมะตอยเพิ่มขึ้นทำให้ยางมะตอยผสมที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture) จึงทำให้ค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยมีค่าลดลง



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับค่าเพนนิเตรชัน ของยางมะตอย AC 60/70 ผสมผงยางรถยนต์ ขนาด 30 mesh ที่ปริมาณต่างๆ

4.1.2 ความหนาแน่น (Density)

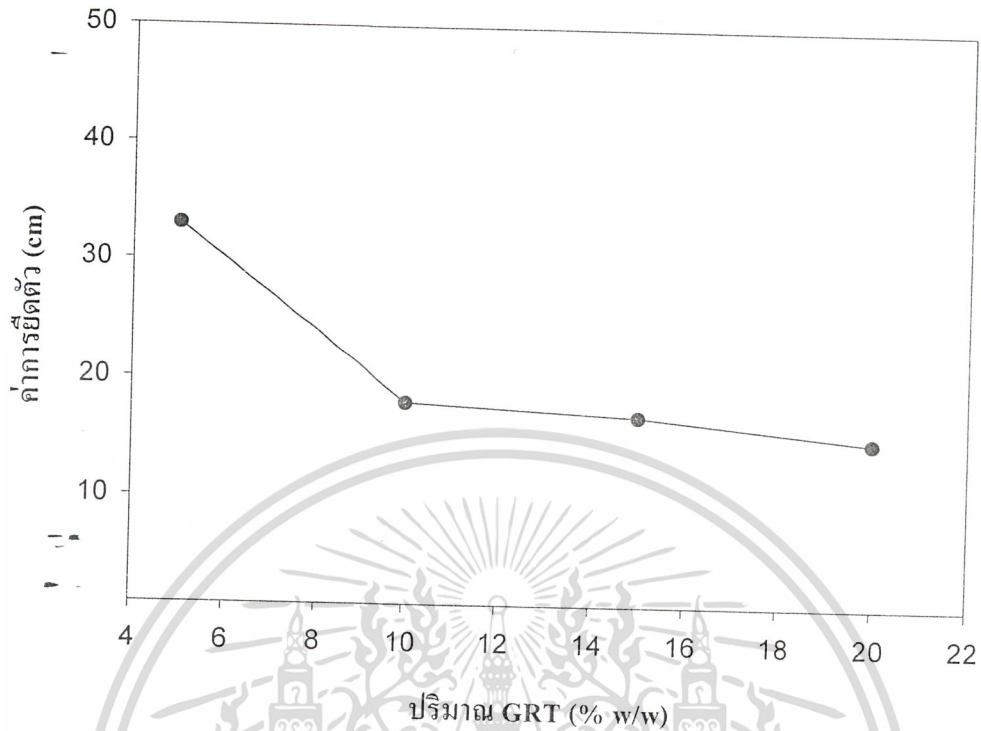
จากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ GRT ที่ผสม เนื่องจาก GRT มีความหนาแน่นประมาณ 1.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมากกว่ายางมะตอยที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.027 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อปริมาณของ GRT ในยางมะตอยเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของยางมะตอยผสมมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับความหนาแน่นของยางมะตอยผสมผงยางรถยนต์ ขนาด 30 mesh ที่ปริมาณต่างๆ

4.1.3 การยืดตัว (Ductility)

ค่าการยืดตัวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของยางมะตอย ยางมะตอยที่มีค่าการยืดตัวดีจะเหนียวและมีคุณสมบัติในการยืดเกาะที่ดี จากการทดลองพบว่า ค่าการยืดตัวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ GRT เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 คาดว่าเนื่องจากปริมาณของ GRT ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง GRT และยางมะตอยเพิ่มขึ้น ซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสนี้ทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดกันลดลงเมื่อเทียบกับการไม่มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง GRT กับยางมะตอย เมื่อทำการดึงยืดยางมะตอยที่ผสม GRT ในปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้ยางมะตอยขาดออกจากกันได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าการยืดตัวลดลง



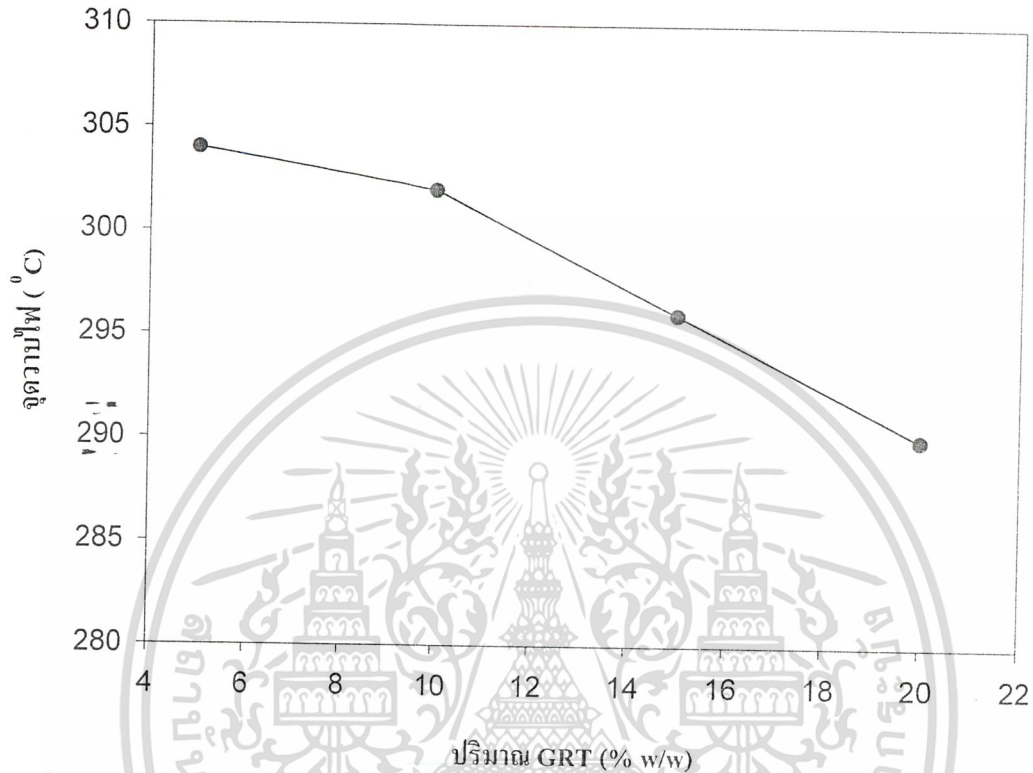
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับค่าการยึดตัวของยางมะตอยผสมผงยาง ขนาด 30 mesh ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.1.4 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟเป็นตัวที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ยางมะตอยปลอดภัยจากการลุกวาบ (Instantaneous Flash) เมื่อถูกเปลวไฟ จากการทดลองทดลองพบว่า จุดวาบไฟลดลงเมื่อปริมาณของ GRT เพิ่มขึ้น คาดว่าเนื่องจากใน GRT อาจมีสารประเภทน้ำมันที่ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) หลงเหลืออยู่ เมื่อของผสมได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นน้ำมันดังกล่าวจะระเหยออกมา จึงทำให้เกิดจุดวาบไฟที่อุณหภูมิต่ำลง ดังรูปที่ 4.4

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาสมบัติต่างๆ ของยางมะตอยผสมผงยางจากยางรถยนต์พบว่ายางมะตอยมีสมบัติบางอย่างดีขึ้น เมื่อเติมผงยาง GRT ที่ปริมาณการเติมผงยาง GRT 10% โดยน้ำหนักพบว่า ค่าการยึดตัวลดลงอย่างรวดเร็ว แต่มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณของผงยางมากกว่านี้ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้ผงยาง GRT ผสมในปริมาณที่มากที่สุดที่ทำให้สมบัติของยางมะตอยดีขึ้น หรือน้อยลงแต่ควรอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากค่า

เพนนิเตรชัน ความหนาแน่น ค่าการยึดตัว และจุดวาบไฟ (จากรูปที่ 4.1-4.4) จึงเลือกปริมาณผงยาง GRT 10 % โดยน้ำหนักเพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย

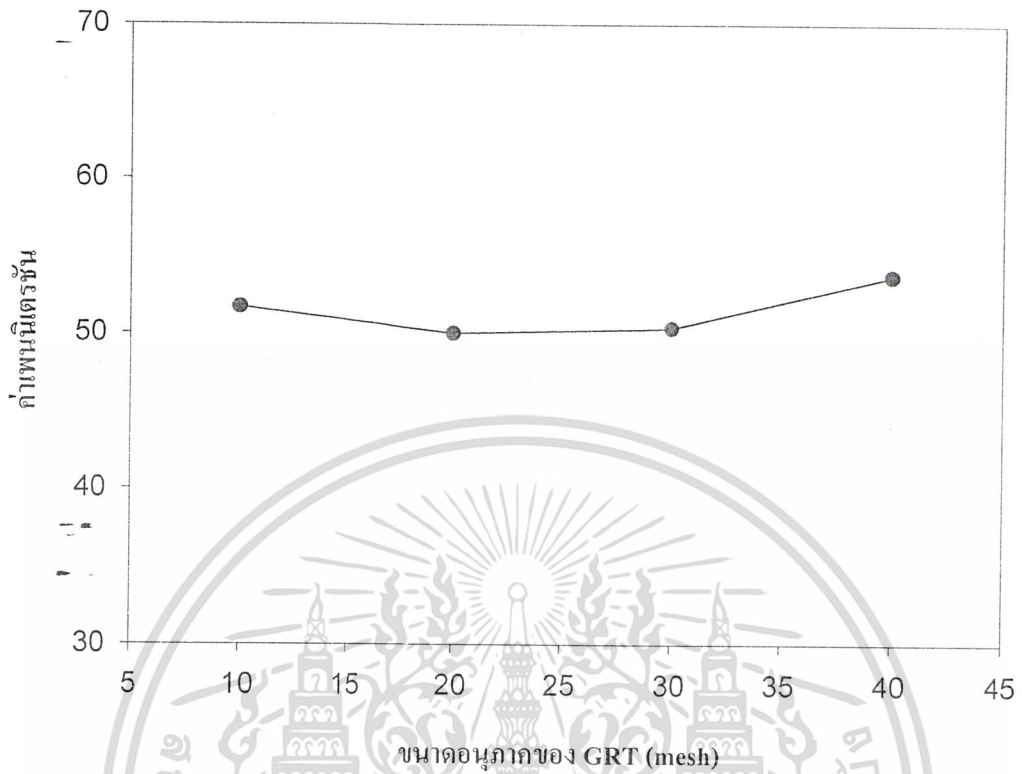


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GRT กับจุดวาบไฟของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ที่ปริมาณต่างๆ

4.2 การศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อสมบัติของยางมะตอย

4.2.1 เพนนิเตรชัน (Penetration)

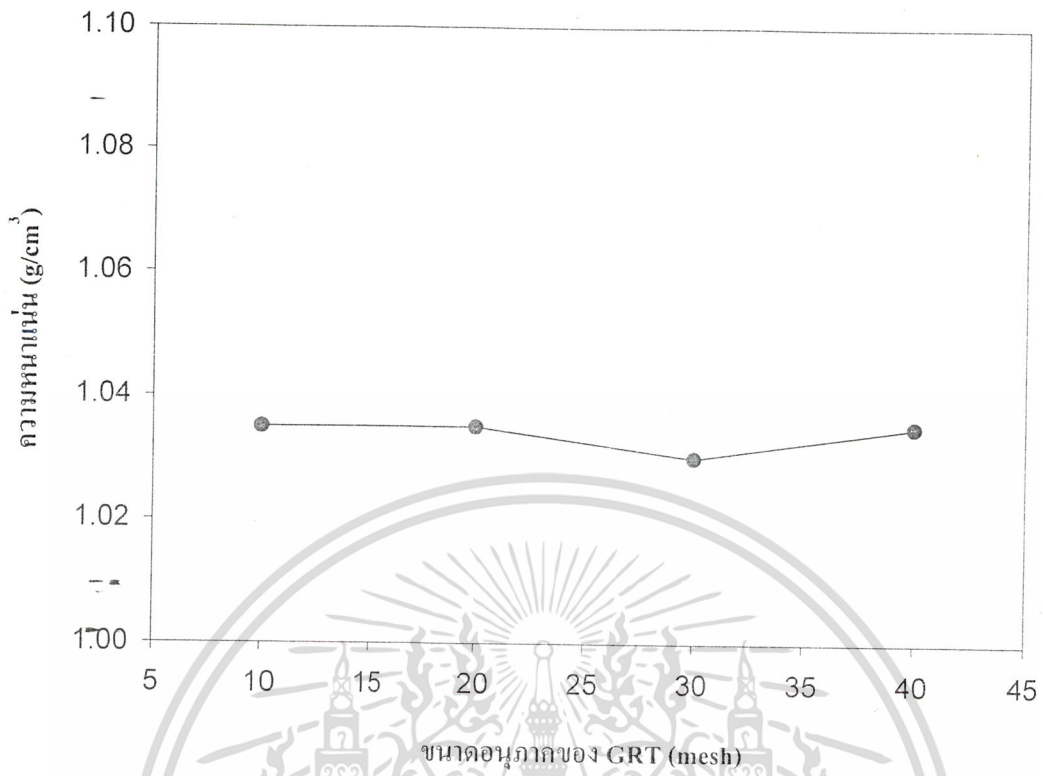
จากการศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อค่าเพนนิเตรชัน โดยใช้ผงยางจากยางรถยนต์ขนาดต่างๆ กัน (10-40 เมส) ผสมในยางมะตอย AC 60/70 ปริมาณ 10% w/w ที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยมีค่าอยู่ในช่วง 50-53 กล่าวคือ ขนาดของผงยางมีผลต่อค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยผสมเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากช่วงขนาดของผงยางที่ศึกษานั้นมีขนาดต่างกันไม่มากและผงยางที่ผสมในยางมะตอยมีปริมาณน้อย จึงมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความแข็งหรือเพนนิเตรชันของยางมะตอย



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับค่าพินิตเรชันของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่าง ๆ ปริมาณ 10 %w/w

4.2.2 ความหนาแน่น (Density)

จากการศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อความหนาแน่น พบว่า ความหนาแน่นของยางมะตอยผสมเปลี่ยนแปลงน้อยมากดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากผงยางที่ผสมในยางมะตอยมีขนาดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทำให้ความหนาแน่นของผงยางแตกต่างกันไม่มากนักจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของยางมะตอยผสมเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยนั่นคือขนาดของผงยางมีผลต่อความหนาแน่นน้อยมาก

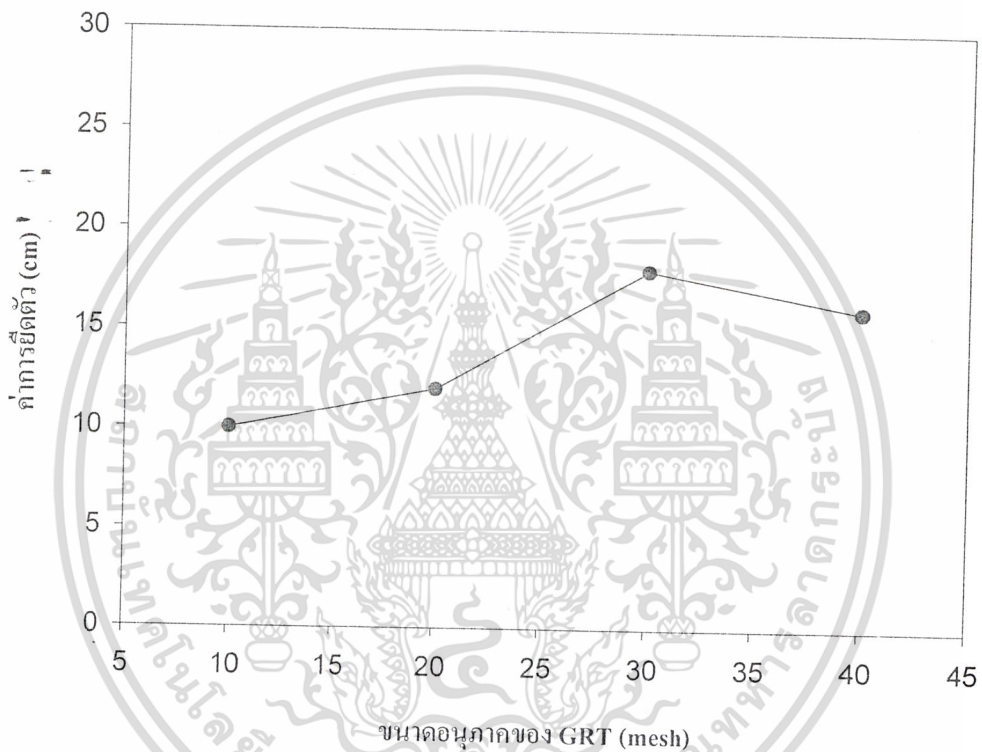


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับความหนาแน่นของยางมะตอย เมื่อผสมผงยางขนาดต่างๆ ปริมาณ 10 % w/w

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ค่าการยืดตัว (Ductility)

จากการศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อค่าการยืดตัวของยางมะตอยผสมพบว่า เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้ความสามารถในการยืดตัวของยางมะตอยผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กลงทำให้ผงยางมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับยางมะตอยมากขึ้นความสามารถในการยึดเกาะจึงดีขึ้น ทำให้ดึงยืดได้ดีขึ้น แต่ถ้าขนาดอนุภาคเล็กเกินไปอาจทำให้ผงยางบวมตัว(Swell) ได้ดีอาจเป็นเหตุให้สารประเภทสารหล่อลื่นหรือสารตัวเติมต่างๆ ที่ผสมอยู่หลุดออกมาทำให้ความสามารถในการดึงยืดลดลง

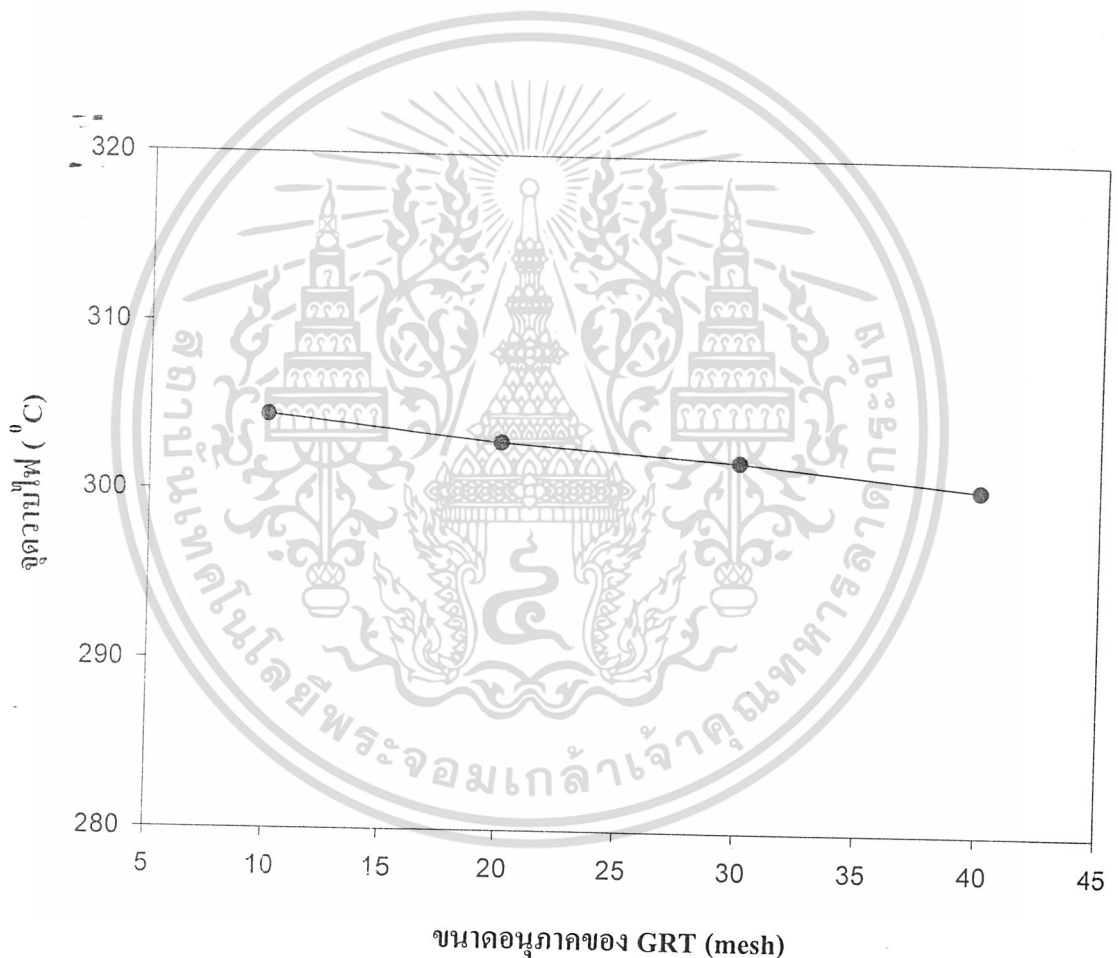


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ GRT กับค่าการยืดตัวของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่างๆ ปริมาณ 10% w/w

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 จุดวาบไฟ (Flash point)

จากการศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อจุดวาบไฟของยางมะตอยผสม พบว่าเมื่อขนาดของผงยางเล็กลงทำให้จุดวาบไฟลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากเมื่อขนาดของผงยางเล็กลงการบวมตัวของผงยางในยางมะตอยเมื่อผสมที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น เป็นเหตุให้สารประเภทน้ำมันหรือสารหล่อลื่นที่อยู่ในผงยางระเหยออกมาทำให้จุดวาบไฟลดลง นอกจากนี้ผงยาง GRT ประกอบด้วยยางชนิดต่างๆ ได้แก่ ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) และ ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR)¹³ ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สามารถติดไฟได้ง่ายกว่ายางมะตอยที่เป็นของเหลือจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นเมื่อเติมผงยางในยางมะตอยจึงเป็นสาเหตุให้จุดวาบไฟของวัสดุลดลง

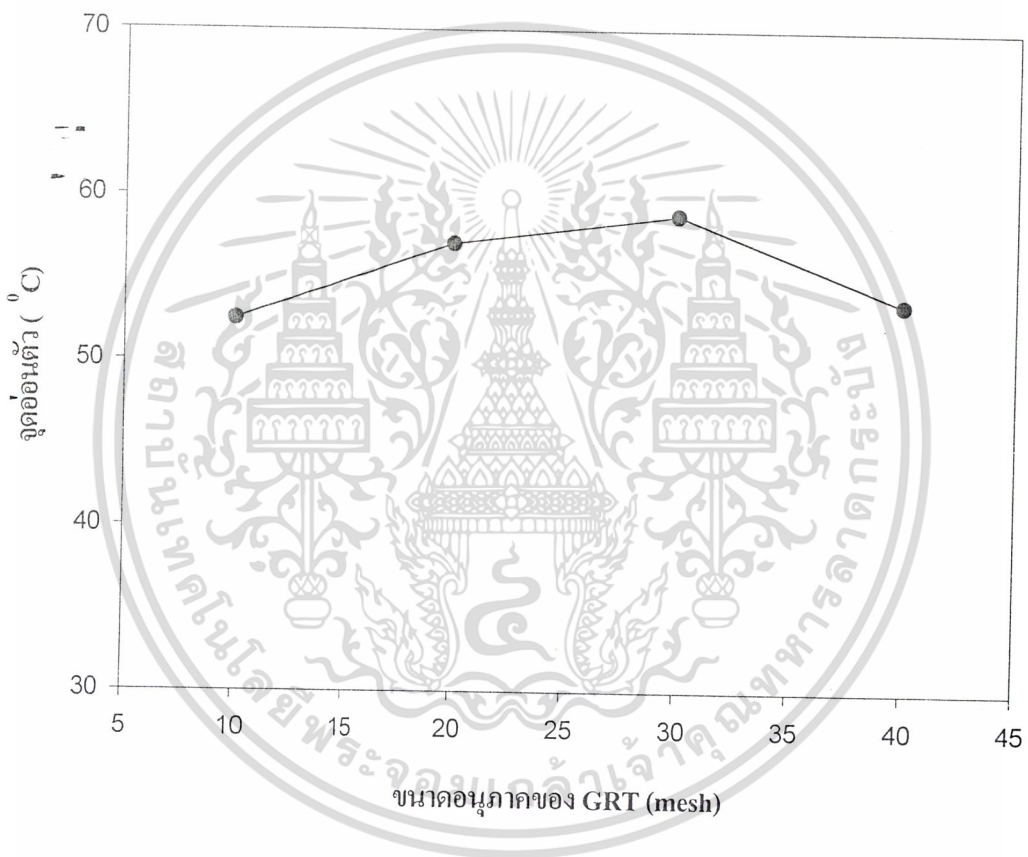


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับจุดวาบไฟของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่างๆ ปริมาณ 10 %w/w

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 จุดอ่อนตัว (Softening point)

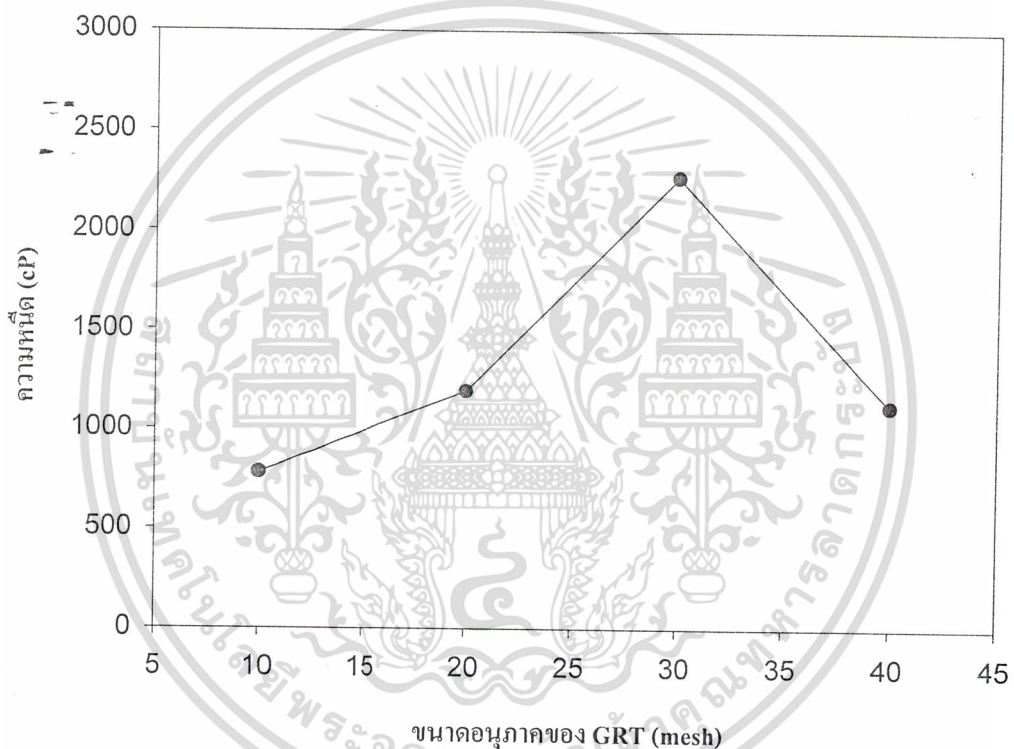
จากการศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อจุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสม พบว่าเมื่อขนาดของผงยางเล็กลงทำให้จุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสมเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากขนาดผงยางที่เล็กลงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับยางมะตอยมากขึ้นส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างผงยางกับยางมะตอยเพิ่มขึ้นจุดอ่อนตัวจึงเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของผงยางเล็กลงเกินไปเมื่อผสมกับยางมะตอยที่อุณหภูมิสูงผงยางก็สามารถบวมตัวในยางมะตอยได้ดีขึ้น ทำให้สารหล่อลื่นหรือสารตัวเติมที่อยู่ในผงยางระเหยออกมาทำให้จุดอ่อนตัวลดลง



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาค GRT กับจุดอ่อนตัวของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่างๆ ปริมาณ 10%w/w

4.2.6 ความหนืด (Viscosity)

จากการศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อความหนืดของยางมะตอยผสม พบว่าเมื่อขนาดของผงยางเล็กลงทำให้ค่าความหนืดของยางมะตอยผสมที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากผงยางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับยางมะตอยได้มากขึ้นจึงทำให้การยึดเกาะระหว่างผงยางกับยางมะตอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าผงยางมีขนาดเล็กมากก็จะสามารถในการบวมตัวได้ดีในยางมะตอยเมื่อทำการผสมที่อุณหภูมิสูงเป็นเหตุให้สารหล่อลื่นหรือสารตัวเติมที่ผสมอยู่ในผงยางระเหยออกมาแทรกตัวอยู่ระหว่างผงยางกับยางมะตอยความหนืดของยางมะตอยผสมจึงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของ GRT กับความหนืดของยางมะตอยเมื่อผสมผงยางขนาดต่างๆ ปริมาณ 10%w/w

จากผลการทดลองศึกษาผลของขนาดผงยางที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยพบว่า เมื่อขนาดของผงยางที่ผสมกับยางมะตอยเพิ่มขึ้น มีผลทำให้สมบัติบางอย่างของยางมะตอยผสมดีขึ้น เช่น ค่าเพนนิเตอร์ชัน ค่าการยึดตัว จุดอ่อนตัว และความหนืด แต่สมบัติเหล่านี้จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อผงยางที่ผสมในยางมะตอยมีขนาดใหญ่กว่า 30 เมส ถึงแม้ว่าจุดวาบไฟและความหนาแน่นของยางมะตอยจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดของ GRT แต่ยังคงถือว่ามีความอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30 เมส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

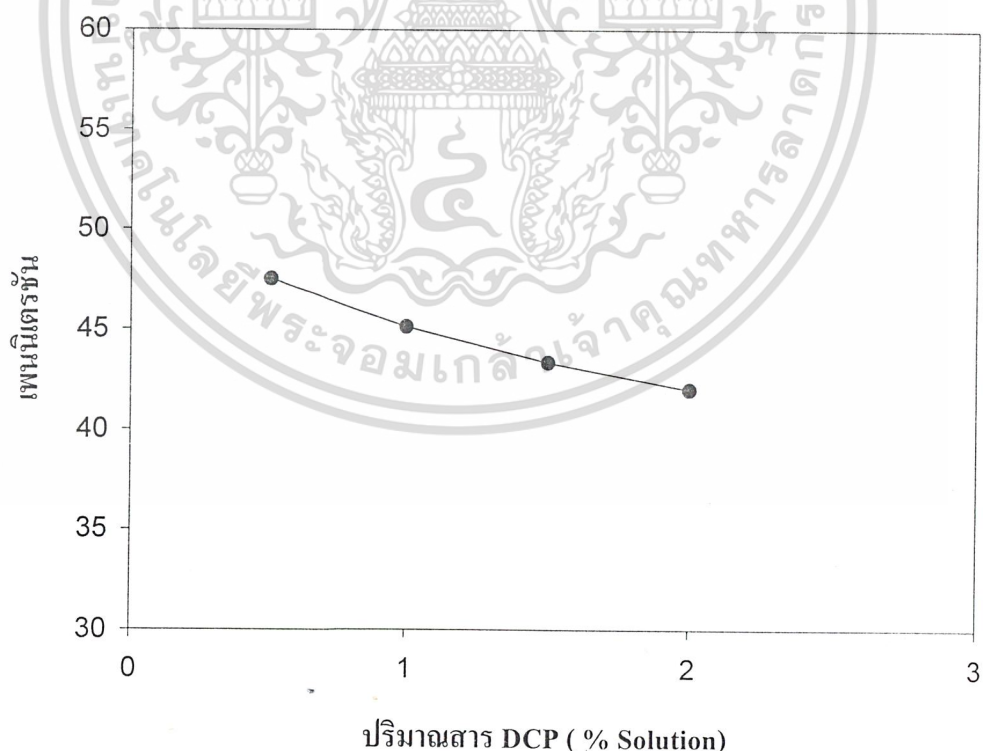
4.3 การศึกษาผลของสารเชื่อมโยงไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)

4.3.1 การใช้สาร DCP ในรูปสารละลาย

จากการทดลองผสมสารเชื่อมโยง คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ในปริมาณต่างๆ (0-2 % โดยน้ำหนักของผงยางทั้งหมด) โดยใช้ในรูปของสารละลาย DCP ในตัวทำละลาย DMF ทำการทดลองโดยผสมสารละลาย DCP เพิ่มขึ้น 10 % ของ DMF ให้เคลื่อนบนผิวของผงยาง GRT ก่อนแล้วจึงนำไปผสมกับยางมะตอยในปริมาณ 0-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงยางทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาที ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังแสดงต่อไปนี้

4.3.1.1 เพนนิเตรชัน (Penetration)

จากการทดลองพบว่า ค่าเพนนิเตรชันมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสาร DCP เพิ่มขึ้น เนื่องจากสาร DCP ช่วยในการเชื่อมโยงระหว่างส่วนที่ไม่อิมตัวของยางมะตอยเองหรือยางมะตอยกับ GRT ทำให้ยางมะตอยมีความแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณของสาร DCP เพิ่มขึ้น การเกิดการเชื่อมโยงของยางมะตอยกับ GRT จึงเพิ่มขึ้น ทำให้ยางมะตอยมีความแข็งเพิ่มขึ้น ค่าเพนนิเตรชันจึงลดลง แสดงดังรูปที่ 4.11

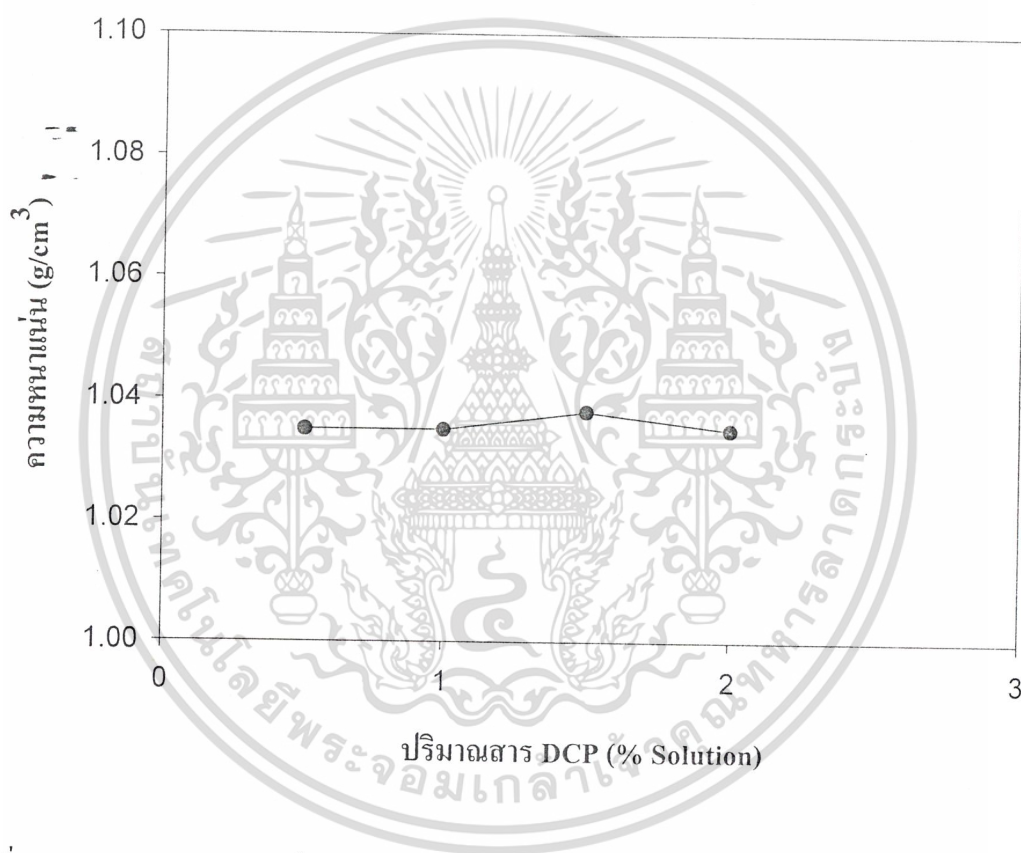


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับค่าเพนนิเตรชันของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 mesh ปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 ความหนาแน่น (Density)

จากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของยางมะตอยมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อปริมาณสาร DCP เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนของยางมะตอยต่อ GRT ที่ใช้เท่ากัน และปริมาณ DCP ที่ใช้น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของผสมทั้งหมด คิดคิดเป็น 0.2 % เท่านั้น และความหนาแน่นของ DCP มีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของผงยางและยางมะตอยมาก ดังนั้น DCP ที่เติมลงไปจึงมีผลต่อความหนาแน่นของยางมะตอยเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP(%solution) กับ ความหนาแน่นของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมสปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่าง ๆ

4.3.1.3 การยืดตัว (Ductility)

จากการทดลองพบว่า ค่าการยืดตัวมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 11-13 เซนติเมตรแม้ว่า ปริมาณสาร DCP จะเพิ่มขึ้นก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของ DCP ที่เติมลงในยางมะคดย น้อยเกินไปทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้น้อย ค่าการยืดตัวจึงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.13

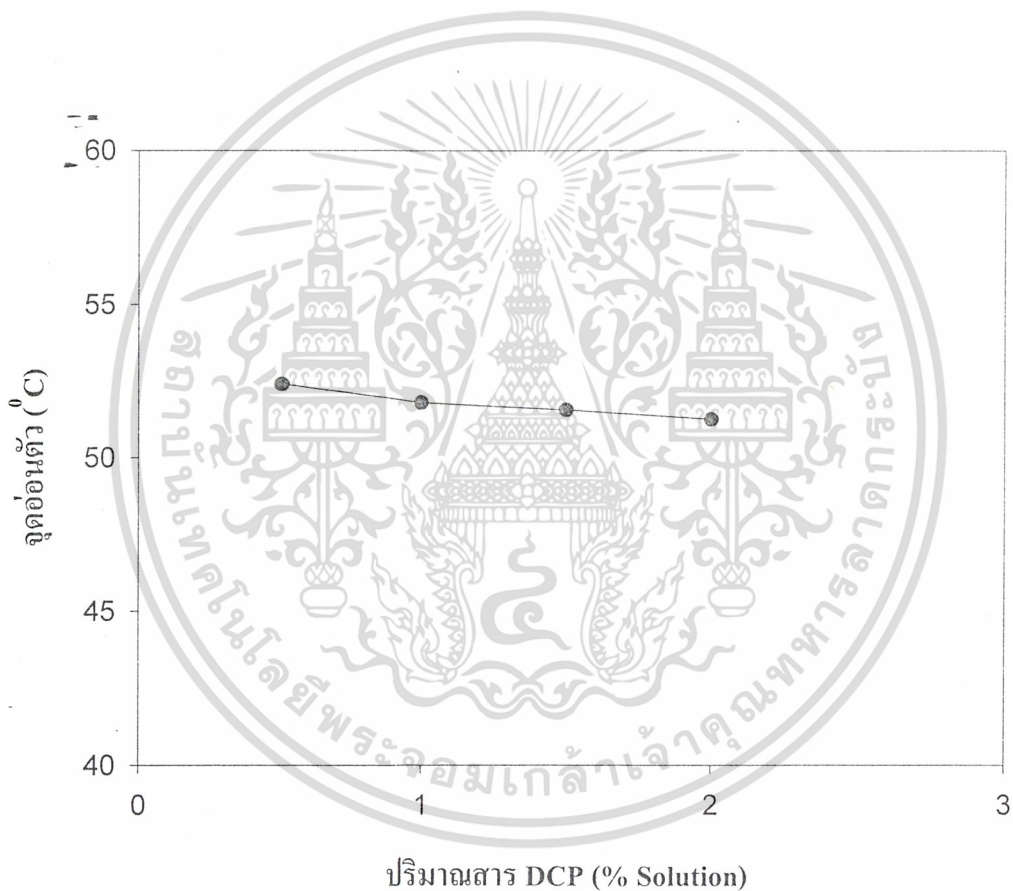


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับการยืดตัวของยางมะคดยผสมผสมผงยางขนาด 30 เมสปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.4 จุดอ่อนตัว (Softening point)

จากการทดลองพบว่า จุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสมผงยางมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณสาร DCP เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.14 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวทำละลาย DMF ที่ใช้ละลาย DCP ซึ่งมีจุดเดือดค่อนข้างสูง (153°C) ระเหยออกจากยางมะตอยผสมดังกล่าวไม่หมดแม้ว่าจะทำการผสมผงยางในยางมะตอยที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจึงเป็นสาเหตุให้จุดอ่อนตัวของยางมะตอยลดลง

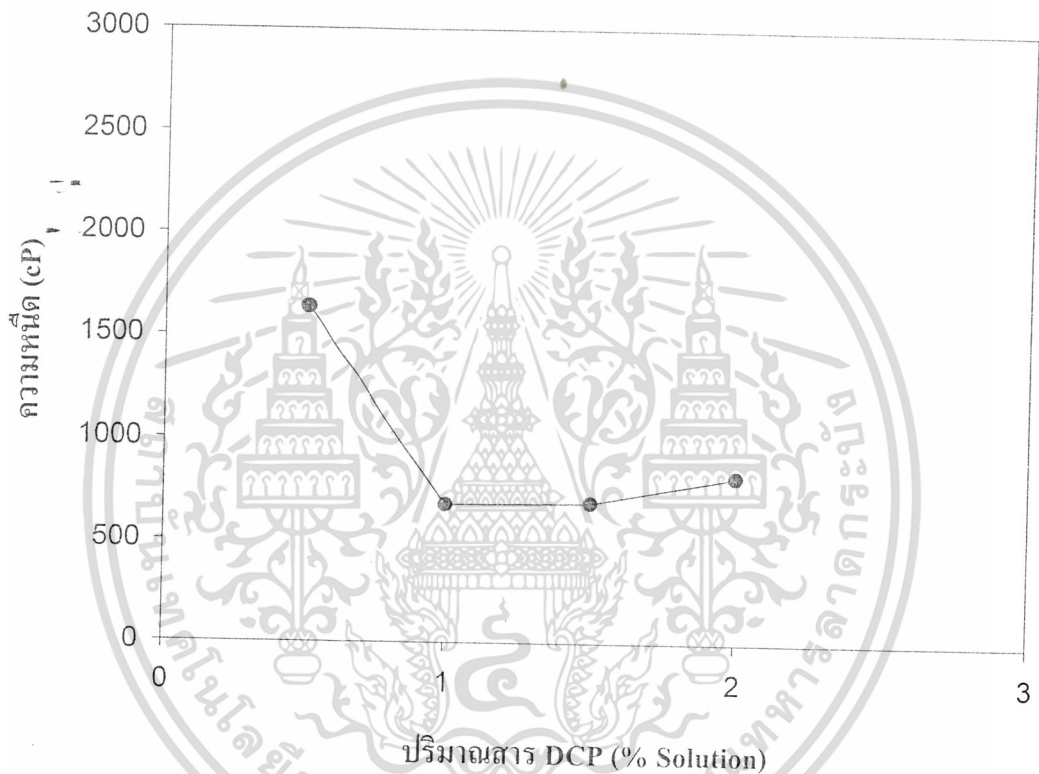


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับจุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมสปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.5 ความหนืด (Viscosity)

จากการทดลองพบว่า ความหนืดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสาร DCP เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากอาจมีตัวทำละลาย DMF ซึ่งมีจุดเดือดสูง (153°C) ระเหยออกจากยางมะตอยผสมผงยางดังกล่าวไม่หมด จึงเป็นสาเหตุให้ความหนืดของยางมะตอยผสมลดลง

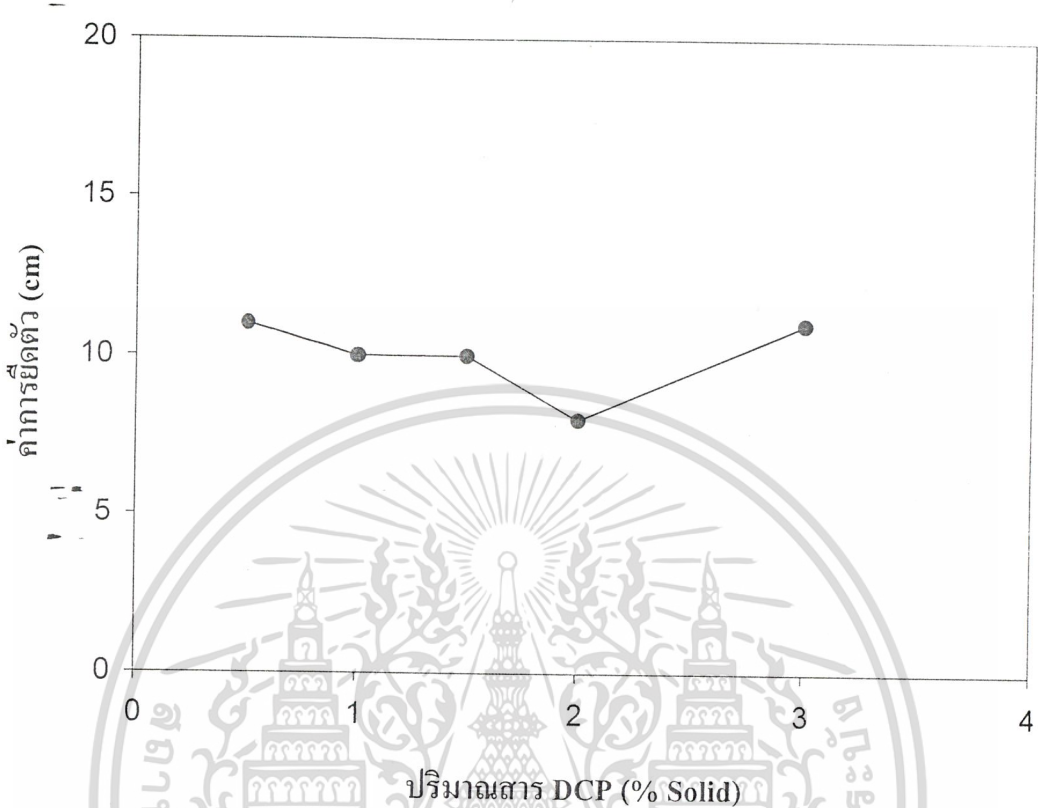


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solution) กับความหนืดของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมสปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่าง ๆ

4.3.2. การใช้สาร DCP ในรูปของแข็ง

เนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้นี้พบว่า ตัวทำละลาย (DMF) ของ DCP อาจมีผลทำให้ผลการทดลองผิดพลาด เนื่องจากการตกค้างของ DMF ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ DCP ในรูปของแข็งอนุภาคขนาดเล็กซึ่งน่าจะมีการกระจายตัวที่ดีและไม่มีผลของตัวทำละลาย

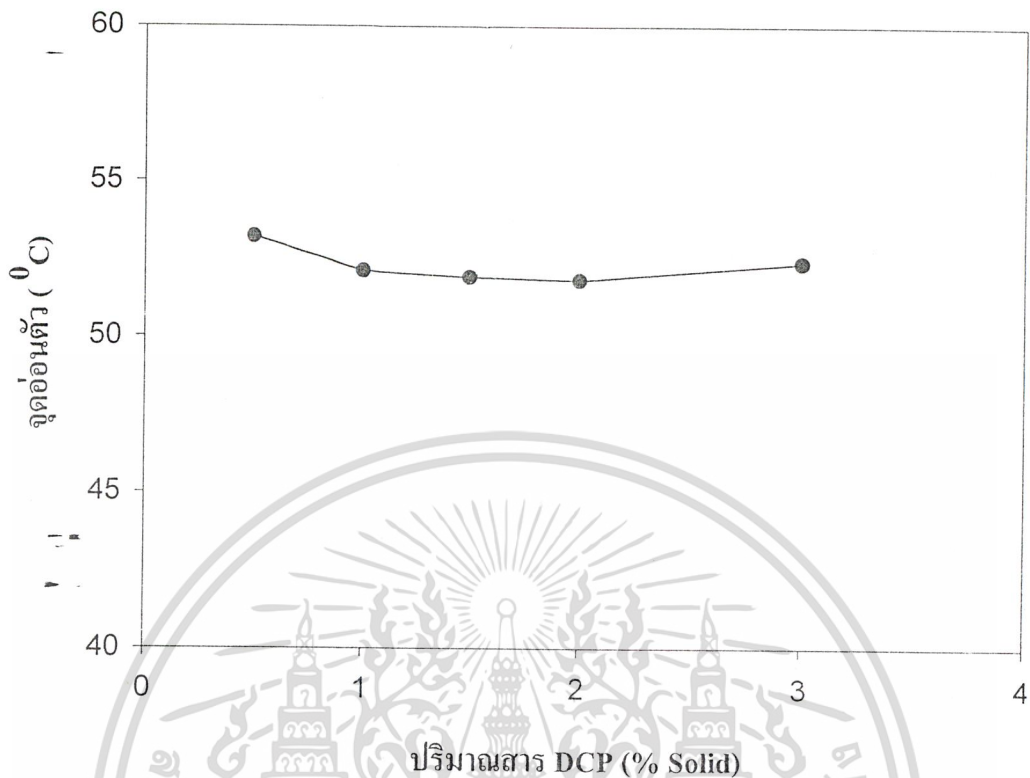
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับการยัดตัวของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่าง ๆ

3.2.4 จุดอ่อนตัว (Softening point)

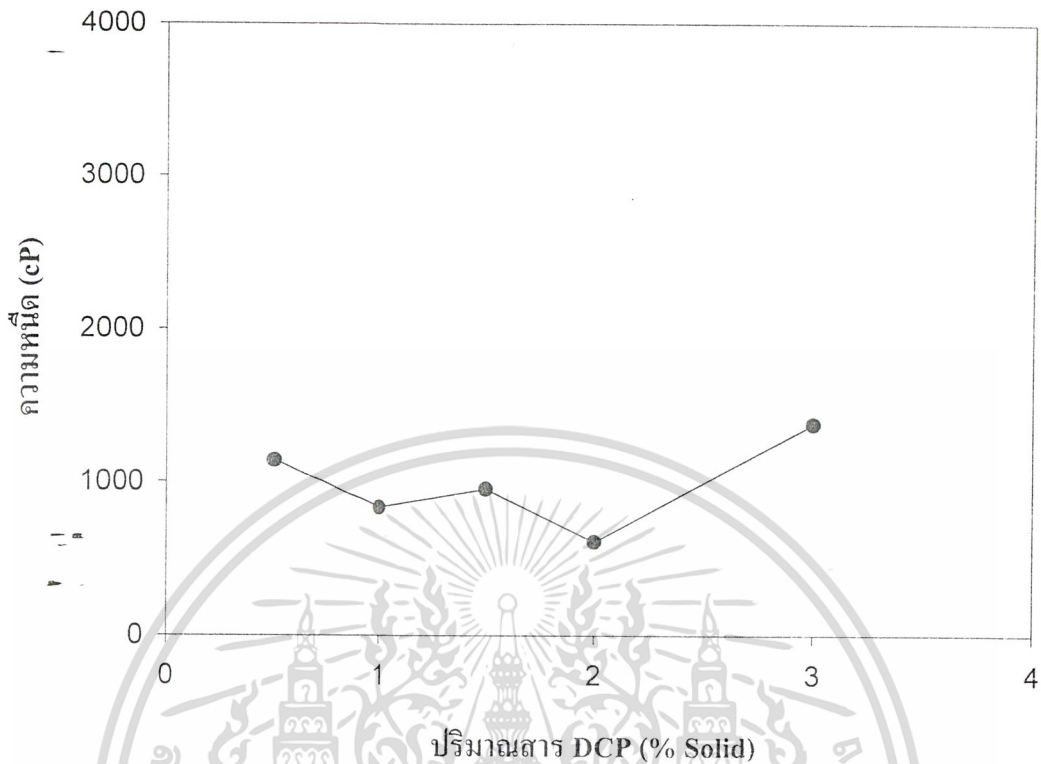
จากการทดลองพบว่า จุดอ่อนตัวมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณสาร DCP เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมโยงที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยเกินไป ทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้น้อยมาก จึงเป็นสาเหตุให้จุดอ่อนตัวมีค่าใกล้เคียงกัน หรือกล่าวได้ว่าสารเชื่อมโยงที่เติมลงในยางมะตอยผสมนั้นไม่มีผลต่อจุดอ่อนตัว



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับจุดอ่อนตัวของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ

3.2.5 ความหนืด (Viscosity)

จากการทดลองพบว่า ความหนืดมีค่าไม่แน่นอนเมื่อปริมาณสาร DCP เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เนื่องจาก ปริมาณสารช่วยเชื่อมโยงที่เติมลงไปอาจมีปริมาณน้อยเกินไปทำให้เกิดการเชื่อมโยงน้อยมาก จึงทำให้ไม่มีผลต่อความหนืด แต่ความหนืดที่วัดได้ถือว่ามีค่าไม่ต่างกันมาก



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร DCP (%solid) กับความหนืดของยางมะตอยผสมผงยางขนาด 30 เมส ปริมาณ 10 % w/w และ DCP ปริมาณต่างๆ

จากผลการทดลองศึกษาผลของสารเชื่อมโยง (DCP) ที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยพบว่า เมื่อปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ผสมกับยางมะตอยเพิ่มขึ้น มีผลทำให้สมบัติบางอย่างของยางมะตอยผสมดีขึ้น เช่น ค่าเพนนิเคอร์ชัน แต่สมบัติอื่นๆเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งกรณีของการใช้ DCP ในรูปของแข็งและสารละลาย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก DCP ที่ใช้ (0-3 % w/w ของ GRT) มีปริมาณน้อยเกินไป

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยศึกษาพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยด้วยผงยางจากยางรถยนต์ (GRT) โดยการผสมผงยางรถยนต์กับยางมะตอยด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดความเร็ว 700 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วศึกษาผลของปริมาณผงยาง (0-20% โดยน้ำหนัก) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคผงยาง (10 20 30 และ 40 เมส) และผลของสารเชื่อมโยงไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ในปริมาณต่าง ๆ (0-3 % ของปริมาณผงยาง) โดยการศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น ค่าเพนนิเตรชัน (Penetration) การยืดตัว (Ductility) ความหนาแน่น (Density) และจุดวาบไฟ (Flash point) สรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อปริมาณผงยางจากยางรถยนต์ในยางมะตอยเพิ่มขึ้น ค่าเพนนิเตรชัน ความหนาแน่น ค่าการยืดตัวและจุดวาบไฟมีแนวโน้มลดลง ปริมาณของผงยางจากยางรถยนต์ที่เติมลงในยางมะตอยที่เหมาะสมคือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. เมื่อขนาดของอนุภาคผงยางจากยางรถยนต์ลดลง ทำให้ค่าการยืดตัว จุดอ่อนตัว และความหนืดเพิ่มขึ้น แต่จุดวาบไฟลดลง และมีผลต่อค่าเพนนิเตรชันและความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย
3. ขนาดอนุภาคของผงยางจากยางรถยนต์ที่เหมาะสมคือ 30 เมส
4. การใช้สารช่วยเชื่อมโยงใน 2 ลักษณะ คือ การทำเป็นสารละลายโดยใช้ ไดเมทิลฟอร์มามิด (Dimethylformamide, DMF) เป็นตัวทำละลายและการใช้ในรูปของแข็งบดละเอียด แต่การใช้สารเชื่อมโยงทั้งสองวิธีมีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุผสม น้อยมากอาจเนื่องจากปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ใช้น้อยเกินไป
5. เมื่อเติมสารช่วยเชื่อมโยงในรูปสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าเพนนิเตรชัน จุดอ่อนตัว และความหนืดลดลง แต่มีผลต่อความหนาแน่นและการยืดตัวเพียงเล็กน้อย
6. เมื่อเติมสารช่วยเชื่อมโยงในรูปของแข็งบดละเอียด ค่าเพนนิเตรชันจะลดลง แต่มีผลต่อความหนาแน่นเล็กน้อย และไม่มีผลต่อการยืดตัว จุดอ่อนตัวและความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะผิวของอนุภาคผงยางจากยางรถยนต์ที่มีผลต่อการยึดเกาะกับอนุภาคของยางมะตอยรวมทั้งการกระจายตัวของผงยาง
2. ทดลองเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการผสมผงยางจากยางรถยนต์กับยางมะตอย เช่น อุณหภูมิในการผสม ความเร็วการปั่นกวน และเวลาในการผสม
3. ทำการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง เช่น การคืนตัว (Torsional recovery) เสถียรภาพในการเก็บรักษา (Storage stability) การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (Solubility in Trichloroethylene) เป็นต้น
4. ทดลองผลของสารเติมแต่งชนิดอื่นที่อาจมีผลต่อยางมะตอยผสมผงยางจากยางรถยนต์ เช่น กรดออกซาลิก (Oxalic acid) ยางธรรมชาติเหลว (Liquid natural rubber, LNR) เป็นต้น
5. ทดลองเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ผสมในยางมะตอยกับผงยางจากยางรถยนต์รวมทั้งการเปรียบเทียบผลของการใช้สารเชื่อมโยงชนิดอื่น เช่น กำมะถัน
6. ทดลองใช้ราดถนนจริง

บรรณานุกรม

1. M.Pittolo and R.P. Burford, *Rubber Chemistry and Technology*, 58,1984, 97.
2. P.P. Serquigny, J.L. Evreux and G.M. Berney, *U.S. No. Patent 5,990,207*, June 23, 1998, Assigned to Elf Atochem S.A., France.
3. A. B. Samsuri, Rubber Research Institute of Malaysia, *J. nat. Rubb.*, 11(3), 166-182.
4. M.W. Rouse, *U.S. No. Patent 5,525,653*, July 28, 1994.
5. Y.J. Lee, L.M. France and M.C. Hawley, *Rubber Chem. Technol.*, 1997, 70, 256-263.
6. B.J. Burns, *U.S. No. Patent 5,936,015*, October 16, 1998.
7. H.W. Borger and P. Knobloch, *U.S. No. Patent 5,897,950*, May 14, 1997.
8. ไกรศรี ดวงพัตรา, เอกสารบริษัทเชลล์ ประเทศไทย, 4-17.
9. L.H. Lewandowski, *Polymer Modification of Paveing Asphalt Binders*, 67, 1994, 451.
10. Asphalt Institute, *A Basic Asphalt Emulsion Manual*, Series No. 19, 2nd ed. USA., 14, 44, 60.
11. M. Tipanna and D.D. Kale, *Rubber Chemistry and Technology*, 70, 1997, 815.
12. V.M. Makarov and V.F. Drozdovski, *Reprocessing of Tyers and Rubber Wastes Recycling from the Rubber Products Industry*, 1st ed., Ellis Horwood Limited, 1991, 55, 153, 155.
13. J.E. Mark, B. Erman and F.R. Erich, *Science and Technology of Rubber*, 2nd ed., Academic Press, San Diego, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ⁰ C , 100 gm. 5 sec	0.1 mm.	60	70	DH-T 403
2.	Softening point , Ring and Ball	⁰ C	70	-	ASTM D 36
3.	Penetration Index	-	+3	-	NLT -181*
4.	Ductility at 13 ⁰ C , 5 cm/min	cm.	55	-	DH-T 405
5.	Torsional recovery at 25 ⁰ C	%	70	-	NLT- 329*
6.	Float test at 60 ⁰ C	Sec	3,000	-	ASTM D 139
7.	Toughness/Tenacity test, 25 ⁰ C				EST NE - 31**
	Toughness	Kg.cm.	200	-	
	Tenacity	Kg.cm.	100	-	
8.	Brookfield viscosity, shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21 at 135 ⁰ C at 165 ⁰ C	CP CP	1,000 300		ASTM D4402
9.	Storage stability at 165 ⁰ C , 120 hrs Difference in softening point	⁰ C	-	5	NLT - 328
10.	Density at 25 ⁰ C	gm/cc	1.00	1.05	ASTM D70
11.	Flash point, Cleveland Open Cup	⁰ C	220	-	ASTM D92
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 D17
14.	Retained penetration at 25 ⁰ C	%	70	-	DH-T 405
15.	Variation in softening point	⁰ C	4	6	ASTM D36
16.	Ductility at 13 ⁰ C, 5 cm/min	Cm	40	-	DH-T 405
17.	Torsional recovery at 25 ⁰ C	%	60	-	NLT- 329

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

** Refer to Elpidio Sanchez Marcos, Spain

กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

- ตารางผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยผงยางจากยางรถยนต์

1. ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางมะตอยต่อผงยางจากยางรถยนต์

ตารางที่ ข-1 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน จากการทดลองตอนที่ 1

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ค่าเพนนิเตรชัน			ค่าเพนนิเตรชันโดยเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	AC60/70+ GRT 30 mesh 5 %	58	58	55	57.00
2	AC60/70+ GRT 30 mesh 10%	50	50	51	50.33
3	AC60/70+ GRT 30 mesh 15%	46	44	48	46.00
4	AC60/70+ GRT 30 mesh 20%	39.5	38.5	40	39.33

ตารางที่ ข-2 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความสามารถในการดิ่งยัด จากตอนที่ 1

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ระยะทางที่ดิ่งยัด ณ จุดขาด (ซม.)
1	AC60/70+ GRT 30 mesh 5 %	33
2	AC60/70+ GRT 30 mesh 10%	18
3	AC60/70+ GRT 30 mesh 15 %	17
4	AC60/70+ GRT 30 mesh 20 %	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบจุดวาบไฟ จากตอนที่ 1

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	จุดวาบไฟ (°C)
1	AC60/70+ GRT 30 mesh 5 %	304
2	AC60/70+ GRT 30 mesh 10%	302
3	AC60/70+ GRT 30 mesh 15 %	296
4	AC60/70+ GRT 30 mesh 20 %	290

ตารางที่ ข-4 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบความหนาแน่น จากตอนที่ 1

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	AC60/70+GRT 30 mesh 5%	1.018	1.014	1.016	1.016
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10%	1.020	1.030	1.025	1.030
3	AC60/70+GRT 30 mesh 15%	1.035	1.040	1.030	1.035
4	AC60/70+GRT 30 mesh 20%	1.038	1.036	1.040	1.038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการศึกษาขนาดของ GRT ที่มีต่อสมบัติของยางมะตอย

ตารางที่ ข-5 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน จากการทดลองตอนที่ 2

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ค่าเพนนิเตรชัน			ค่าเพนนิเตรชันโดยเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	AC60/70+GRT 10 mesh 10%	48	52	55	51.67
2	AC60/70+GRT 20 mesh 10%	49	48	49	48.67
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%	50	50	51	50.33
4	AC60/70+GRT 40 mesh 10%	53	54	54	53.67

ตารางที่ ข-6 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความสามารถในการดัดงัด จากตอนที่ 2

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ระยะทางที่ดัดงัด ณ จุดขาด (ซม.)
1	AC60/70+GRT 10 mesh 10%	10
2	AC60/70+GRT 20 mesh 10%	12
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%	18
4	AC60/70+GRT 40 mesh 10%	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบจุดวาบไฟ จากตอนที่ 2

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	จุดวาบไฟ ($^{\circ}\text{C}$)
1	AC60/70+GRT 10 mesh 10%	304.5
2	AC60/70+GRT 20 mesh 10%	303.0
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%	302.0
4	AC60/70+GRT 40 mesh 10%	300.5

ตารางที่ ข-8 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบความหนาแน่น จากตอนที่ 2

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	AC60/70+GRT 10 mesh 10%	1.030	1.040	1.035	1.035
2	AC60/70+GRT 20 mesh 10%	1.035	1.035	1.035	1.035
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%	1.030	1.030	1.030	1.030
4	AC60/70+GRT 40 mesh 10%	1.035	1.030	1.040	1.035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบจุดอ่อนตัว จากตอนที่ 2

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	จุดอ่อนตัว ($^{\circ}\text{C}$)
1	AC60/70+GRT 10 mesh 10%	52.50
2	AC60/70+GRT 20 mesh 10%	57.10
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%	58.85
4	AC60/70+GRT 40 mesh 10%	53.50

ตารางที่ ข-10 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความหนืด จากตอนที่ 2

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ความหนืด (cP)
1	AC60/70+GRT 10 mesh 10%	782.50
2	AC60/70+GRT 20 mesh 10%	1192.50
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%	2267.50
4	AC60/70+GRT 40 mesh 10%	1120.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการศึกษาสารช่วยเชื่อมโยงที่มีผลต่ออย่างมะตอยที่ผสม GRT

ตารางที่ ข-11 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน จากการทดลองตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของสารละลาย)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ค่าเพนนิเตรชัน			ค่าเพนนิเตรชัน โดยเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 0.5%	48.0	47.5	47.0	47.50
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.0%	44.5	45.0	46.0	45.12
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.5%	44.0	44.0	42.0	43.33
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 2.0	41.5	43.0	41.5	42.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-12 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าเพนนิเตรชัน จากการทดลองตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)

ตัวอย่างที่	สูตรผสม	ค่าเพนนิเตรชัน			ค่าเพนนิเตรชันโดยเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 0.5%	41	41	43	41.67
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.0%	42	40	40	40.67
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.5%	42	39	40	40.33
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 2.0%	40	39	39	39.33
5	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 3.0%	38	38	38	38.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความสามารถในการดิ่งยึด จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของสารละลาย)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ระยะทางที่ดิ่งยึด ณ จุดขาด (ซม.)
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 0.5%	11
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.0%	12
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.5%	11
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 2.0%	13

ตารางที่ ข-14 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความสามารถในการดิ่งยึด จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ระยะทางที่ดิ่งยึด ณ จุดขาด (ซม.)
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 0.5%	11
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.0%	10
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.5%	10
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 2.0%	8
5	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 3.0%	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-15 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบความหนาแน่น จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของสารละลาย)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 0.5%	1.035	1.040	1.030	1.035
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.0%	1.035	1.035	1.035	1.035
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.5%	1.040	1.038	1.036	1.038
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 2.0%	1.034	1.036	1.034	1.035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-16 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความหนาแน่น จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 0.5%	1.045	1.040	1.038	1.040
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.0%	1.035	1.030	1.040	1.035
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.5%	1.050	1.050	1.050	1.050
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 2.0%	1.040	1.042	1.036	1.040
5	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 3.0%	1.032	1.025	1.035	1.030

ตารางที่ ข-17 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบจุดอ่อนตัว จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของสารละลาย)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	จุดอ่อนตัว (°C)
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 0.5%	52.40
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.0%	51.80
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.5%	51.55
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 2.0%	51.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-18 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบจุดอ่อนตัว จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของแข็งบดละเอียด)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	จุดอ่อนตัว ($^{\circ}\text{C}$)
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 0.5%	53.2
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.0%	52.1
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 1.5%	51.9
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 2.0%	51.8
5	AC60/70+GRT 30 mesh 10% + DCP 3.0%	52.35

ตารางที่ ข-19 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความหนืด จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP ในรูปของสารละลาย)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ความหนืด (cP)
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 0.5%	1637.50
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.0%	680.00
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.5%	690.00
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 2.0%	820.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-20 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบค่าความหนืด จากตอนที่ 3 (ใช้ DCP
 ในรูปของแข็งบดละเอียด)

ตัวอย่างที่	สูตรการผสม	ความหนืด (cP)
1	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 0.5%	1137.50
2	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.0%	832.50
3	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 1.5%	952.50
4	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 2.0%	610.00
5	AC60/70+GRT 30 mesh 10%+ DCP 3.0%	1375.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้