



การศึกษาขงมะตอยน้ำที่ใช่น้ำขงธรรมชาติคงรูปเป็นสารเชื่อมโยง
และการประกยุกต์ใช้เป็นผิวกาง

โดย

นางสาวเสาวรศ มะลิกอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษายางมะตอยน้ำที่ใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูปเป็นสารเชื่อมโยง
และการประยุกต์ใช้เป็นผิวทาง

โดย

นางสาวเสาวรส มะลิตอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**THE STUDY OF EMULSIFIED BITUMEN USING PRE-VULCANIZED NATURAL
RUBBER LATEX AS BINDER AND THEIR APPLICATION PAVEMENT**

By

Saovaros Malithong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาสมบัติของยางมะตอยน้ำที่ใช้ในทางธรรมชาติลงรูปเป็นสารเชื่อมโยงและการประยุกต์ใช้เป็นผิวทาง” เสนอโดยนางสาวเสาวรส มะลิตอง เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตริภพนาถกุล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)

...../...../.....

50402240 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : น้ำยางธรรมชาติ/ยางมะตอยอิมัลชัน/ผิวทาง

เสาวรส มะลิทอง : การศึกษายางมะตอยน้ำที่ใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูปเป็นสารเชื่อมโยง และการประยุกต์ใช้เป็นผิวทาง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น. 109 หน้า.

บิทูเมนหรือยางมะตอยเป็นวัสดุที่ใช้เป็นผิวทางของถนน แต่ยางมะตอยมีสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน การเติมพอลิเมอร์เข้าไปในยางมะตอยสามารถปรับปรุงสมบัติการใช้งานของยางมะตอยได้ โดยผิวทางยางมะตอยที่มีการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์จะมีสมบัติการต้านทานการแตกร้าว และการเกิดร่องล้อที่สูงขึ้น อีกทั้งลดการลื่นและสมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ ปัจจุบันยางมะตอยอิมัลชันหรือยางมะตอยน้ำนั้นนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีกระบวนการใช้งานที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม น้ำยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์หลักของประเทศ และอยู่ในรูปของลาเทกซ์จึงมีความกันได้สูงกับยางมะตอยอิมัลชัน การผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์บางส่วนยอมทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนที่สูงขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูปในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน โดยตรวจสอบค่าระดับการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของน้ำยางคงรูปด้วยค่าอัตราการบวมตัว และศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ที่มีต่อสมบัติของกากของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ อีกทั้งศึกษาสัญญาณวิทยาของยางกากของยางมะตอยด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากผลการทดลองพบว่าน้ำยางธรรมชาติคงรูปสามารถปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันได้ โดยทำให้ค่าจุดอ่อนตัวและค่าการต้านทานการเจาะทะลุของกากของยางมะตอยมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มสารเคมีที่ใช้วัลคาไนซ์ยังช่วยเพิ่มค่าจุดอ่อนตัวอีกด้วย ที่ปริมาณยางธรรมชาติคงรูปต่ำนั้นจะพบว่าการกระจายตัวของยางธรรมชาติในวัฏภาคที่ต่อเนื่องของบิทูเมน และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้นจะเกิดวัฏภาคที่ต่อเนื่องกันของยางธรรมชาติ สูตรที่ดีที่สุดของน้ำยางธรรมชาติคงรูปถูกเลือกมาใช้ในการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชัน โดยผลิตด้วยเครื่องคอลลอยด์มิลล์ และศึกษาหาความเป็นไปได้ในการใช้ยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปนี้ เป็นผิวทางจริง ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปนี้มีสมบัติใกล้เคียงกับผิวทางประเภทพาราเลลริซของแผนกผิวทางกรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

50402240 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : NATURAL RUBBER LATEX/EMULSIFIED BITUMEN/MODIFIED ASPHALT
EMULSION/ROAD PAVEMENT

SAOVAROS MALITHONG : THE STUDY OF EMULSIFIED BITUMEN USING
PRE-VULCANIZED NATURAL RUBBER LATEX AS BINDER AND THEIR APPLICATION ON
PAVEMENT. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.CHANCHAI THONGPIN, Ph.D. 109 pp.

Bitumen or Asphalt has been used in road pavement as the binder of aggregate. Unfortunately, high-temperature rutting and low temperature cracking of asphalt or coating layer, due to severe temperature susceptibility, limit its further application. The addition of polymer to asphalt has shown to improve its performance. Pavement with modification exhibited greater resistance to rutting and thermal cracking and decreased fatigue damage stripping and temperature susceptibility. Asphalt emulsion is manufactured by emulsification of asphalt, and it is an energy-saving, ecologically safe material because it does not need any heating processes which can emit gas and fire hazard in its use. Natural rubber is considered to be a significant economic plant in Thailand for its number one producer and exporter of natural rubber in the world. Natural rubber in latex form was high compatibility with asphalt emulsion. The purpose of this study is to elucidate the feasibility on using pre-vulcanized natural rubber latex as an admixture for asphalt emulsion in order to improve thermal stability and useful mechanical properties of the asphalt emulsion. The crosslink density of pre-vulcanized natural rubber latex was determined by swell ratio. The effect of vulcanizing agent on residue properties of modified asphalt emulsions was studied. The morphology properties of the modified asphalt were also investigated by using an optical microscope. The mechanical and physical properties of the dried asphalt emulsion were very well modified by the vulcanized rubber phase. The residue properties of modified asphalt with natural rubber and pre-vulcanized natural rubber latex, including softening point and penetration was improved. The increase in vulcanizing agent could also increase softening point. At low polymer contents, the samples reveal the existence of dispersed polymer particles in a continuous bitumen phase, whereas at high polymer contents a continuous polymer phase was observed. The best formula of pre-vulcanized natural rubber latex was selected for produce the best pre-vulcanized natural rubber latex modified asphalt emulsion and mixing design formulation of emulsified bitumen was also investigated. It found that, pre-vulcanized natural rubber latex modified asphalt could provide a standard asphalt emulsion and applicable for highway construction application

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากการได้รับความอนุเคราะห์จากหลากหลายฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการสนับสนุนด้านเงินทุน อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัย และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา สำหรับการสนับสนุนเงินทุนการวิจัยและการสัมมนาทางวิชาการ

ขอกราบขอบพระคุณสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม สำหรับการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์การตรวจสอบสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ บริษัทราแลนด์ประเทศไทย สำหรับความอนุเคราะห์สารเคมี เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทน์ฉาย ทองปิ่น อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางในการศึกษา วิเคราะห์ พร้อมให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งด้วยความเอาใจใส่มาโดยตลอด ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงพระคุณของท่านอาจารย์ตลอดไป ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุก ๆ ท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คุณธรรมและศีลธรรมให้แก่ผู้ศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งคณาจารย์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ให้ความเมตตาอบรม สั่งสอน แก่ผู้ศึกษาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณคุณพินิจ เกียนระลึก และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการเบิกจ่ายวัสดุอุปกรณ์ และประสานงานในด้านต่าง ๆ ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาที่เสมอมา และผู้วิจัยขอขอบคุณพี่น้องชาวศิลปากร สำหรับการใช้ชีวิตอยู่ร่วมกันอย่างมีความสุข ตลอดระยะเวลาในการศึกษาเล่าเรียน พระพุทธศาสนาที่คอยขัดเกลาจิตใจ ให้สงบยามที่มีทุกข์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณครอบครัว ที่คอยส่งเสริมและให้โอกาสทางการศึกษา คอยเป็นที่ปรึกษาทางใจ ให้มีกำลังใจเข้มแข็งและพร้อมที่จะเผชิญกับปัญหา จนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
แนวทางและขั้นตอนการวิจัย.....	3
ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เจริญโยบาย เชิงสาธารณะและการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ถนนผิวลาดยาง.....	5
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับยางมะตอย.....	9
ชนิกพื้นฐานของยางมะตอยที่ใช้ทำผิวถนนลาดยาง.....	11
ประวัติของยางมะตอยน้ำ.....	11
ยางมะตอยอิมัลชัน (Bitumen Emulsion).....	13
การแตกตัวและการบ่มตัว (Breaking and Curing).....	17
ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Emulsified Bitumen).....	19
การใช้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติในประเทศไทย.....	21
ยางธรรมชาติ.....	25
น้ำยางธรรมชาติกึ่งรูป (Pre-vulcanized natural rubber latex).....	29
ส่วนประกอบของ Latex compounding.....	30

บทที่	หน้า
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 37
	วัสดุและสารเคมี..... 37
	เครื่องมือ..... 38
	การเตรียมน้ำยางธรรมชาติคั่งรูป..... 38
	การเตรียมน้ำยางมะตอยน้ำและยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ..... 40
	การศึกษาผลของน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปและปริมาณสารเคมีในการคั่งรูป ที่มีต่อสมบัติของกากของยางมะตอย 42
	การศึกษาสภาวะการเตรียมน้ำยางมะตอยน้ำและยางมะตอยที่ปรับปรุง ด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปด้วย Colloid mill..... 44
	การทดสอบสมบัติของยางมะตอยน้ำที่เตรียมจากเครื่อง Colloid mill..... 47
	การศึกษานำยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคั่งรูปไปใช้จริง..... 57
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 60
	ผลของการเตรียมน้ำยางคั่งรูปและการวิเคราะห์ผลของสารตัวเติมที่มีต่อการบวมตัว ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติคั่งรูป..... 61
	การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยาง ธรรมชาติคั่งรูป (PVNR Modified Asphalt Emulsion) โดยการเตรียมในถังปฏิกรณ์..... 64
	การผลิตยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูป ด้วยเครื่อง Colloid mill 75
	การทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการใช้งานจริงของยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูป..... 81
	ผลการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานของยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุง ด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปในผิวทางพาราเลลเรีชีลประเภทที่สอง..... 87
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 92
	สรุปผลการทดลอง..... 92
	ข้อเสนอแนะ..... 94

	หน้า
บรรณานุกรม.....	95
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก การนำเสนอและตีพิมพ์งานวิจัยบางส่วนในงานประชุมวิชาการ	99
ประวัติผู้วิจัย.....	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในยางมะตอยอิมัลชันชนิดต่างๆ.....	15
2 โครงสร้างทางเคมีของอิมัลซิไฟเออร์บางชนิด.....	15
3 แสดง Specification for Elastomeric Modified Asphalt Emulsion ตามมาตรฐาน DH-SP.405/2538.....	22
4 ขนาดคละของมวลรวมปริมาณเนื้อยางแอสฟัลต์ และอัตราการฉาบพาราสเลอร์ซีล.....	24
5 แสดงเกลือบางชนิดของ substituted dithiocarbamic acids ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของ sulphur-vulcanization ที่สำคัญ ของยางโอเลฟินที่ไม่อิมตัวในรูปของลาเทกซ์.....	33
6 แสดงปริมาณสารเคมีในน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR 1-10.....	39
7 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ ในการเตรียมยางมะตอยน้ำ ที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติคงรูป.....	41
8 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยน้ำ.....	45
9 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยน้ำ.....	47
10 แสดงส่วนประกอบของสารเคมีในน้ำยางธรรมชาติคงรูป และค่าการบวมตัวของสูตร PVNR1-PVNR10.....	62
11 แสดงส่วนประกอบของสารเคมีและปริมาณที่ใช้ผลิตยางมะตอยน้ำ ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางคงรูป.....	64
12 แสดงตารางค่าเพนิตรชันและจุดอ่อนตัวเทียบกับอัตราการบวมตัวของยางมะตอย ซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR1-PVNR10.....	66
13 แสดงส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยน้ำ.....	76
14 แสดงผลการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอดิไฟด์แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับงานทาง (มอก. 2157-2547) ชนิด CRS-1P ของยางมะตอยอิมัลชันสูตร A และสูตร G.....	77
15 แสดงส่วนประกอบของยางมะตอยน้ำสูตร A และ 3PA	79

ตารางที่	หน้า
16	แสดงผลการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอดิไฟด์แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับงานทาง (มอก. 2157-2547) ชนิด CRS-1P สูตร A และสูตร 3PA 80
17	แสดงส่วนประกอบและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในยางมะตอยอิมัลชัน สูตร 1-16 และค่าเวลาในการผสมของยางมะตอยอิมัลชันกับมวลรวม 84
18	แสดงส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบของยางมะตอยอิมัลชัน สูตร AE, 3NAE, 3PAE และ 5PAE 87
19	แสดงค่าเวลาในการผสม (Mixing time) และค่า Wet track abrasion ของยางมะตอยอิมัลชันสูตร AE, 3NAE, 3PAE และ 5PAE 89

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	แสดงโครงสร้างของถนนผิวลาดยาง.....	5
2	ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุล (ก) สารอิมัลชัน และ (ข) สารอะโรมาติก.....	10
3	ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของแอสฟัลต์.....	10
4	ภาพแสดงลักษณะประจุที่ผิวของอนุภาคยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก และประจุลบ.....	14
5	แสดงลักษณะและการกระจายตัวของอนุภาคยางมะตอยในยางมะตอยอิมัลชัน.....	16
6	แสดงลักษณะของการผลิตยางมะตอยอิมัลชัน โดยใช้ Colloid mill.....	16
7	แสดงกลไกการแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชันเมื่อสัมผัสกับมวลรวม.....	18
8	โครงสร้างของยางธรรมชาติ.....	27
9	แสดงโครงสร้างทั่วไปของ substituted dithiocarbamic acids.....	32
10	แสดงสูตรโครงสร้างของ sodium 2-mercaptobenzthiazole (SMBT) (I) และ Zinc 2-mercaptobenzthiazolate (ZMBT) (II).....	34
11	แสดงเครื่อง colloid mill จากบริษัทเจริญทัศน์.....	38
12	แสดงขั้นตอนการผลิตน้ำยางรูป.....	40
13	แสดงขั้นตอนการผลิตยางมะตอยน้ำซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติรูป และการทดสอบ.....	42
14	แสดงการเตรียมตัวอย่างกากยางมะตอยสำหรับใช้ส่องด้วยกล้อง microscope.....	43
15	แสดงลักษณะของการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลวง.....	43
16	แสดงวิธีการทดสอบ Softening point.....	44
17	แสดงขั้นตอนการผลิตยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติรูป และการทดสอบสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้.....	46
18	การทดสอบหาความหนืดแบบเซย์โบลต์ฟูโรล.....	48
19	แสดงการทดสอบประจุอนุภาค.....	51
20	แสดงการทดสอบการกลั่นยางมะตอยน้ำ.....	51
21	แสดงลักษณะของแบบหล่อตัวอย่างและชุดเครื่องมือทดสอบการหาค่า Ductility.....	52
22	แสดงตัวอย่างการทดสอบความเหนียวและเทนซิตี.....	54

รูปที่	หน้า
23	แสดงตัวอย่างกราฟค่าความเหนียวและเทนซิตี ของอีลาสโตเมอร์มอดิไฟด์แอสฟัลต์..... 55
24	แสดงอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ Cure time และ Wet track abrasion..... 58
25	แสดงเครื่อง a) cohesive tester และ b) Wet track abrasion tester..... 58
26	แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติ (a) น้ำยางธรรมชาติคั่งรูป (b) จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า..... 61
27	แสดงลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชัน (a) และยางมะตอยอิมัลชันที่ ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูป PVNR1 ปริมาณ 3% DRC (b) จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า..... 65
28	แสดงค่าเพนิเตอร์ชันและจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติ ด้วยน้ำยางธรรมชาติ (NR) น้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR 1-PVNR5 เทียบกับกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ..... 67
29	แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของกากของยางมะตอยและกากของยางมะตอย ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR1-PVNR5 จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า..... 73
30	แสดงค่าเพนิเตอร์ชันและจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติ ด้วยน้ำยางธรรมชาติ (NR) น้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR 6-PVNR10 เทียบกับกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ..... 70
31	แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของกากของยางมะตอยและกากของยางมะตอยที่ ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR 6-PVNR10 จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า..... 72
32	แสดงค่าเพนิเตอร์ชันและจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติ ด้วย 3% DRC น้ำยางธรรมชาติ น้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR 1 3%DRC และ 5%DRC เทียบกับกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ..... 74
33	แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของกากของยางมะตอยและกากของยางมะตอย ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR1 3%DRC และ 5% DRC จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า..... 75

รูปที่	หน้า
33	แสดงค่าเพนิเตรชันและจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วย 3% DRC น้ำยางธรรมชาติ น้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR 1 3%DRC และ 5%DRC เทียบกับกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ..... 74
34	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของยางมะตอยน้ำซึ่งใช้ปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ต่างชนิดกัน คือ a) oleylamine b) Gernamin TAB 100 ด้วยกล้อง Microscopeที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 76
35	แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาเปรียบเทียบของยางมะตอยน้ำโดย a) คือยางมะตอยน้ำที่ไม่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติคงรูป b) คือยางมะตอยน้ำที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติคงรูปเพื่อปรับปรุงสมบัติ ด้วยกล้อง Microscope ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 79
36	แสดงการเคลือบของยางมะตอยอิมัลชันบนผิวของมวลรวมหิน หลังจากการแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชัน ; a) สูตร 3, b) สูตร 6, c) สูตร 8, d) สูตร 9, e) สูตร 15, f) สูตร 16..... 86
37	แสดงภาพของยางมะตอยอิมัลชันสูตร AE (a) 3NAE (b) 3PAE (c) 5PNE (d) ที่ได้จากกล้อง Microscope ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 88
38	แสดงชิ้นงานสำหรับทดสอบ Wet track abrasion a) แสดงชิ้นงานก่อนทดสอบ b) แสดงชิ้นงานหลังการทดสอบ..... 90
39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่า torque ที่ได้จากเครื่อง cohesive tester ของส่วนผสมมวลรวมหินกับยางมะตอยอิมัลชันสูตร 5PAE..... 91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประชากรโลกในปัจจุบันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความจำเป็นต้องพัฒนาการคมนาคมขนส่งให้ดีขึ้นเพื่อรองรับการจราจรที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นทางคมนาคมหลักที่ใช้คือ ถนน โดยทั่วไปการสร้างถนนมีเพียงสองทางเลือก คือ ปูคอนกรีตหรือลาดยางมะตอย ผิวถนนคอนกรีตจะแข็งทนทานแต่ราคาค่อนข้างแพง ทั่วโลกจึงนิยมสร้างถนนลาดยางมะตอยซึ่งยืดหยุ่น และถูกกว่า [1] ถนนผิวลาดยาง เป็นโครงสร้างถนนที่มีผิวทางก่อสร้างด้วยวัสดุยางมะตอยเคลือบและประสานกับมวลรวมแล้วรองรับด้วยชั้นต่าง ๆ ได้ชั้นผิวทาง ซึ่งยางมะตอยซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ปูผิวทางแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ คัทแบคแอสฟัลต์ และแอสฟัลต์อิมัลชันหรือยางมะตอยน้ำ [2] ยางมะตอยน้ำมีข้อดีกว่ายางมะตอยชนิดอื่นคือ สะดวกในการใช้งานและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่มีตัวทำละลายระเหยออกมา แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของยางมะตอยยังเป็นปัญหา โดยเมื่ออุณหภูมิสูงยางมะตอยจะอ่อนนุ่มและเมื่ออุณหภูมิต่ำจะแข็งเปราะ (Brittle) และแตก สูญเสียคุณสมบัติในการเป็นตัวประสาน ปัจจุบันถนนถูกใช้งานมากขึ้น ทุก ๆ ปีมีการจราจรหนาแน่นมากขึ้น มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก มีความขาดแคลนมวลรวม (Aggregate) ที่มีคุณภาพ และความแปรปรวนของสภาพอากาศ ซึ่งเพิ่มการทำลายผิวทางทำให้ผิวทางชำรุด [3] ซึ่งปัญหาที่พบบ่อย คือ [4]

- ผิวทางเยิ้ม (Bleeding) คือปรากฏการณ์ที่ยางมะตอยซึมขึ้นมารวมกันที่ผิวทางเมื่อได้รับความร้อน ยางที่ซึมขึ้นมาทำให้ผิวทางลื่น เกิดจากยางมะตอยที่ใช้มีความหนืด และความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) ต่ำ

- ผิวเกิดร่องล้อ (Rutting) คือปรากฏการณ์ที่ผิวยางมะตอยยุบตัวเป็นร่องตามแนวล้อที่แล่นทับ ส่วนมากเกิดหลังจากผิวทางมียางเยิ้ม เกิดจากผิวทางไม่แข็งแรง และขาดสมบัติการยืดหยุ่น ทำให้เกิดการยุบตัวแบบถาวรเมื่อได้รับแรง

- ผิวทางแตกร้าว (Crack) คือปรากฏการณ์ที่เกิดรอยร้าวขึ้นที่ผิวหน้าของยางมะตอย เกิดจากผิวทางมีสภาพแข็งเปราะ ขาดความยืดหยุ่น (Elasticity) มีสถานะแข็งเปราะ เมื่อมีน้ำหนักกดทับซ้ำ ๆ ผิวเกิดความล้า (Fatigue) จึงเกิดรอยแตกร้าว

- ผิวทางหลุดร่อน(Reveling) คือปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อนหลุดร่อนออกเป็นเม็ดเล็กๆ เนื่องจากวัสดุส่วนที่ผิวหน้าของยางมะตอยถูกแรงเฉือน (Shear force) จากล้อรถตะกั่วจนหลุดออก

เมื่อถนนชำรุด สภาพถนนที่เป็นหลุมเป็นบ่อจะก่อให้เกิดอุบัติเหตุ การซ่อมแซมต้องใช้งบประมาณสูงและยังทำให้การจราจรติดขัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของผิวถนนเพื่อยืดอายุการใช้งานของถนน โดยการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยให้เป็นตัวประสานที่ดีขึ้น มีความยืดหยุ่น (Elasticity) อุณหภูมิที่จุดอ่อนตัว (Softening point) แรงยึดเหนี่ยวในตัวเอง (Cohesive) ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal susceptibility) ที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของยางมะตอยได้โดยใช้พอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt) แต่พอลิเมอร์มีราคาค่อนข้างสูง ประกอบกับประเทศไทยเองมีการปลูกยางพารามาก และเป็นผู้ส่งออกยางพาราอันดับหนึ่งของโลก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) เป็นสารปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย โดยศึกษาการปรับปรุงยางมะตอยน้ำชนิดประจุบวก (Cationic asphalt emulsion) ซึ่งยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทานต่อการฉีกขาดและการสึกหรอ ดังนั้นการใช้น้ำยางธรรมชาตินี้จึงน่าจะปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยให้ดีขึ้น ลดปัญหาผิวทางชำรุดและยืดอายุการใช้งานของถนนผิวลาดยาง อีกทั้งเพิ่มปริมาณการใช้น้ำยางธรรมชาติในประเทศอีกด้วย

ยางธรรมชาติที่เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลแล้วจะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น และไม่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งการทำให้ยางธรรมชาติในรูปน้ำยางเกิดการเชื่อมโยงสามารถทำได้เช่นกัน แนวทางหนึ่งที่ทำให้ น้ำยางเกิดการเชื่อมโยงในรูปน้ำยาง โดยการใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ คือ การทำให้เป็นน้ำยางคงรูป

(Pre-vulcanized natural rubber latex) ซึ่งน้ำยางธรรมชาติคงรูปนั้นสามารถทำให้คงรูปภายในอนุภาคได้โดยไม่ทำลายลักษณะที่เป็นสารแขวนลอย กล่าวคือพอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วยังสามารถกระจายตัวอยู่ได้ การใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูปในการปรับปรุงยางมะตอยมีลักษณะเป็นแนวคิดของงานวิจัยนี้ ซึ่งน้ำยางธรรมชาติคงรูปซึ่งอยู่ในรูปอิมัลชันเช่นเดียวกับยางมะตอย จะไม่ส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของยางมะตอย อีกทั้งยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคงรูปนี้จะมีสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้นมากกว่าการใช้น้ำยางธรรมชาติอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติของยางมะตอยน้ำซึ่งใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูปเป็นสารปรับปรุง

2. เพื่อศึกษารูปแบบการผสมยางแบบน้ำ (prevulcanization) ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยน้ำ
3. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผสม Bitumen กับสูตรผสมที่ผลิตขึ้น

1.3 แนวทางและขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดสอบ
3. ดำเนินงานวิจัย
 - 3.1 เตรียมตัวอย่างยางรูปจากน้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia natural rubber latex) ศึกษาผลของสารคงรูปที่มีต่ออัตราการคงรูป ทดสอบระดับการคงรูปโดยทดสอบอัตราการบวมตัว (Swell ratio)
 - 3.2 เตรียมยางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติสูตรต่าง ๆ ด้วยการผสมในถังปฏิกรณ์ ศึกษาสมบัติการกระจายของยางมะตอยที่เตรียมได้ คือ ค่าเพนิเตรชัน (Penetration test ตามมาตรฐาน DH-T 403) และค่าจุดอ่อนตัว (Softening point ตามมาตรฐาน ASTM D 36) วิเคราะห์ผลการทดสอบ และเลือกน้ำยางธรรมชาติสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองขั้นต่อไป
 - 3.3 ศึกษาหาสถานะการเตรียม และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการเตรียมยางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติ คือ ปริมาณกรดอิมัลซิไฟเออร์ บิทูเมน และสารเติมแต่งอื่น ๆ จากนั้นเตรียม Polymer Emulsified Bitumen โดยผสมน้ำยางธรรมชาติคงรูปกับ น้ำ กรด และอิมัลซิไฟเออร์ ก่อนผสมกับบิทูเมนโดยเครื่อง colloid mill ทดสอบเสถียรภาพของยางมะตอยน้ำที่เตรียมได้ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 244 ดังนี้
 - ความหนืดเซย์โบลต์ ที่ 25 °C และ ที่ 50 °C
 - เสถียรภาพต่อการเก็บที่ 24 ชั่วโมง
 - การแยกชั้น (Settlement) หลังจาก 5 วัน
 - อัตราการรวมตัวของอนุภาคแอสฟัลต์ (Demulsibility test)

- ปริมาณที่ค้างบนราง 850 ไมโครเมตร (Sieve test, 20 เมช)
- ประจุนุภาค (Particle charge test)
- กากที่เหลือจากการกลั่น (Residue from distillation)

และทดสอบสมบัติของกากของยางมะตอยน้ำที่เตรียมได้ โดยทำการทดสอบ ดังนี้

- ความยืดดึง (Ductility) ตามมาตรฐาน DH-T 405
- จุดอ่อนตัว (Softening point) ตามมาตรฐาน ASTM D 36
- ค่าเพนิเทรชัน (Penetration test) ตามมาตรฐาน DH-T 403
- การคืนสภาพยืดหยุ่นหลังการดึงยืด (Elastic Recovery)
- ความเหนียวและทนเชิ็ด (Toughness and Tenacity)
- ความสามารถในการละลายในโทลูอิน

3.4 ศึกษาการนำยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางคงรูปไปใช้จริง โดยการผสมกับมวลรวม (Aggregates) โดยทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอยอิมัลชันกับมวลรวมดังนี้

- เวลาในการผสม (Mixing time)
- ค่า Wet track abrasion
- เวลาในการบ่มตัว (Set time)
- เวลาในการบ่มตัว (Cure time)

4. นำเสนองานวิจัย

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เจริญนโยบาย เจริญสาธารณะ และการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์

1. สามารถผลิตยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคงรูป ซึ่งมีสมบัติเหมาะสมสามารถใช้งานได้จริงได้
2. สามารถใช้ยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบภายในประเทศผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า และมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศได้มากขึ้น

บทที่ 2

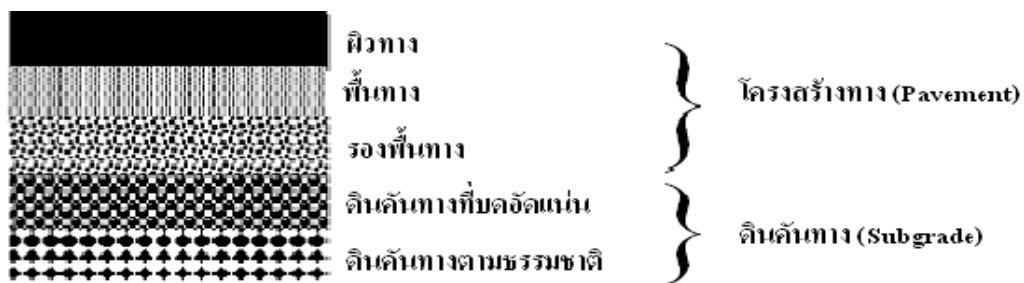
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถนนผิวลาดยาง [2]

2.1.1 ส่วนประกอบของโครงสร้างถนนผิวลาดยาง

โครงสร้างถนนผิวลาดยาง (Asphalt Pavement) หมายถึงโครงสร้างถนนที่มีชั้นผิวทางก่อสร้างด้วยวัสดุยางมะตอยเคลือบและประสานกับมวลรวม แล้วรองรับด้วยชั้นต่างๆ ได้ชั้นผิวทางซึ่งมีอยู่หลายแบบด้วยกัน ได้แก่

- ชั้นพื้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) ประกอบด้วยวัสดุผสมระหว่างมวลรวมกับยางมะตอย
- ชั้นหินคลุก ตะกรัน หรือกรวด ชั้นคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- ชั้นอิฐหรือชั้นก้อนหิน



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของถนนผิวลาดยาง [2]

องค์ประกอบหลักของโครงสร้างทาง คือ

1. ผิวทาง (Surface)
2. พื้นทาง (Base)
3. รองพื้นทาง (Subbase)
4. ดินคั่นทางที่บดอัดแน่น (Compacted subgrade)
5. ดินคั่นทางตามธรรมชาติ (Natural subgrade)

โครงสร้างถนนผิวลาดยางประกอบด้วยชั้นต่างๆ วางอยู่บนชั้นดินเดิม ชั้นที่จัดเตรียมไว้บนสุดคือ ชั้นผิวทางยางมะตอย ซึ่งอาจมีความหนาน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) หรืออาจมากกว่า 75 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่างๆ และสภาพแวดล้อม ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางของโครงสร้างถนนผิวลาดยางมีหลายชนิด โดยทั่วไปแล้วประกอบด้วยวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดบดอัดแน่น เช่น หินคลุก ตะกรัน กรวด ทราย หรืออาจใช้ดินที่ปรับปรุงคุณภาพก็ได้ ข้อดีประการหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดเจนของโครงสร้างถนนผิวลาดยางก็คือ สามารถประหยัดได้โดยการนำวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาใช้ในการก่อสร้าง

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีลักษณะเม็ดที่ใช้เป็นชั้นพื้นทางนั้น มักได้รับการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ได้แก่ การผสมยางมะตอยกับวัสดุเม็ด เพื่อทำชั้นพื้นทางยางมะตอย ซึ่งพบว่าชั้นพื้นทางที่ใช้วัสดุเม็ดผสมยางมะตอยที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) มีคุณสมบัติในการรับน้ำหนักบรรทุกได้เทียบเท่ากับชั้นพื้นทางที่ใช้วัสดุเม็ดธรรมดาไม่มีการปรับปรุงคุณภาพหนา 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) หรือมากกว่า

ในอดีตโดยทั่วไป ถนนมีชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเป็นชนิดที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ แต่ในปัจจุบันปริมาณการจราจรสูงขึ้นและถนนต้องรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น การออกแบบถนนที่มีชั้นพื้นทางแบบเดิมจึงใช้กับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำและรับน้ำหนักบรรทุกน้อยเท่านั้น

สำหรับโครงสร้างถนนทั้งหมดซึ่งอยู่เหนือชั้นดินเดิม ถ้าประกอบด้วยวัสดุผสมยางมะตอยตลอดความลึกจะเรียกว่า โครงสร้างถนนผิวลาดยางแบบฟูลดีปท์ (full-depth asphalt pavement) และถือว่าเป็นแบบสมัยใหม่ที่เหมาะสมกับสภาพการจราจรในยุคปัจจุบัน

ความหมายของคำว่า ฟูลดีปท์นี้รับรองโดย The Asphalt Institute จดทะเบียนกับ The U.S. Patent Office ใช้บ่งบอกถึงโครงสร้างถนนที่ก่อสร้างชั้นต่างๆ ทุกชั้นเหนือชั้นดินเดิม หรือชั้นดินเดิมที่ปรับปรุงแล้วด้วยวัสดุผสมยางมะตอย โครงสร้างถนนผิวลาดยางแบบฟูลดีปท์นี้ใช้ลาดทับโดยตรงลงบนชั้นดินเดิมที่จัดเตรียมไว้แล้ว

บางครั้งอาจใช้วัสดุอื่นในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเม็ดหรือดินของชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ถ่านหิน น้ำมันดิบ แคลเซียมคลอไรด์ หรือเกลือ

2.1.2 แนวคิดพื้นฐาน

แนวคิดพื้นฐานในการสร้างถนนหรือสถานที่จอดรถสำหรับทุกสภาพลมฟ้าอากาศ คือ การเตรียมดินเดิมหรือคันทางที่เหมาะสม จัดให้มีการระบายน้ำที่จำเป็น และก่อสร้างโครงสร้างถนนให้มีความหนาและความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร มีการป้องกันการแทรกซึมหรือการสะสมความชื้นภายในโครงสร้างถนน และมีผิวชั้นบนเรียบ ด้านทางการสิ้น

ไถลและต้านทานต่อการสึกหรอ การบิดเบี้ยว และการทำให้เสื่อมสภาพลงจากลมฟ้าอากาศและเคมีภัณฑ์

ชั้นดินเดิมเป็นชั้นล่างสุดที่รองรับน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร ดังนั้นหน้าที่หลักของโครงสร้างถนนก็คือการรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะบนผิวทางของโครงสร้างถนน แล้วถ่ายน้ำหนักและกระจายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ชั้นดินเดิม โดยไม่เกินกำลังที่จะทนได้ไม่ว่าจะเป็นกำลังของชั้นเดิมหรือกำลังภายในตัวโครงสร้างของถนนลาดยางเอง

2.1.3 คุณสมบัติที่สำคัญของผิวทางลาดยาง

ชั้นผิวทางของโครงสร้างถนนผิวลาดยาง เป็นชั้นที่รองรับการจราจรของ ยวดยานโดยตรง ต้องมีความทนทานต่อการบิด มีผิวเรียบสำหรับการขับขี่ที่สบาย สามารถกันน้ำได้ มีความลาดเอียงแนวขวางเพื่อระบายน้ำบนผิวทางลงสู่ด้านข้างถนน ป้องกันความชื้นไม่ให้กัดเซาะโครงสร้างถนนและดินเดิม มีความต้านทานการสึกหรอจากการจราจรและรักษาคุณสมบัติด้านการลื่นไถล นอกจากนี้ต้องยึดเหนี่ยวอย่างดีกับชั้นที่อยู่ข้างล่าง

2.1.4 หน้าที่ของพื้นทางและรองพื้นทาง

ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทางเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างถนนอยู่ข้างล่างต่อจากชั้นผิวทางเรียงลงมาตามลำดับ จุดประสงค์เพื่อกระจายน้ำหนักบรรทุกจากล้อลงไปยังชั้นดินเดิมหรือฐานราก ดังนั้นพื้นทางและรองพื้นทางต้องมีกำลังแข็งแรงภายในตัวเพื่อการรับน้ำหนักดังกล่าว ประการนี้โครงสร้างถนนผิวลาดยางแบบปูลาดผิว จึงมีประโยชน์เหนือกว่าโครงสร้างถนนผิวลาดยางที่มีชั้นพื้นทางซึ่งใช้วัสดุเม็ด ชั้นของโครงสร้างถนนซึ่งก่อสร้างด้วยส่วนผสมที่มียางมะตอยจะมีกำลังดึงและกำลังอัดในการต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้น แต่ชั้นพื้นทางที่ก่อสร้างด้วยวัสดุเม็ดธรรมดาที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพจะไม่มีกำลังในการรับแรงดึง เพราะฉะนั้นพื้นทางยางมะตอยจึงกระจายน้ำหนักบรรทุกล้อลงบนพื้นที่กว้างกว่าพื้นทางวัสดุเม็ดที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ จากผลดังกล่าวโครงสร้างถนนผิวลาดยางที่มีพื้นทางยางมะตอยจึงต้องการความหนาน้อยกว่า

2.1.5 ยางมะตอย

ยางมะตอยราดถนนที่อุณหภูมิบรรยากาศปกติจะมีสีดำเหนียวหนืดกึ่งแข็ง และเป็นวัสดุที่มีความหนืดสูง ประกอบด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อนและอะตอมอื่น ๆ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เนื่องจากยางมะตอยราดถนนเหนียวหนืดจึงยึดเกาะกับอนุภาคของมวลรวมได้ดี ใช้เป็นตัวประสานสำหรับยางมะตอยคอนกรีต นอกจากนี้ยางมะตอยราดถนนยังมีคุณสมบัติในการกันน้ำได้ และไม่มีผลกระทบกระเทือนจากกรด ด่าง และเกลือ อาจเรียกว่า วัสดุเทอร์โมพลาสติก เพราะจะค่อยๆ อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นและจะแข็งตัวเมื่อ

เย็นลง บางครั้งก็เรียกโครงสร้างถนนผิวลาดยางว่าโครงสร้างถนนแบบยืดหยุ่น (flexible pavement) อาจเป็นเพราะยางมะตอยมีลักษณะของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่เหนียวหนืด

ในปัจจุบันยางมะตอยที่ใช้ส่วนใหญ่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม มีการใช้ยางมะตอยที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติอยู่บ้างเล็กน้อย ยางมะตอยที่ได้จากปิโตรเลียมจะทนทานได้ดีเท่าเทียมตามธรรมชาติ และยังมีข้อดีกว่าในการกลั่นให้ได้คุณภาพสม่ำเสมอปราศจากสารอินทรีย์หรือสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่พึงประสงค์ ในขณะที่ยางมะตอยตามธรรมชาติอาจมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอและมีวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ปนอยู่ด้วย

2.1.6 การประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการพ่นยางมะตอย

ยางมะตอยเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวชั่วคราวสามารถนำมาพ่นลงบนถนนอย่างสม่ำเสมอและควบคุมปริมาณได้ การพ่นยางมะตอยบนถนนมีหลายลักษณะเช่น

เซอร์เฟซทรีตเมนต์และซีลโคท การทำเซอร์เฟซทรีตเมนต์ คือการพ่นยางมะตอยสำหรับชั้นผิว ชั้นรองพื้นทาง โดยมีหรืออาจไม่มีมวลรวมปกคลุมอยู่ ตามนิยามแล้ว เซอร์เฟซทรีตเมนต์มีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) หรือน้อยกว่า เซอร์เฟซทรีตเมนต์อาจทำตั้งแต่การก่อสร้างครั้งแรก หรืออาจก่อสร้างกับโครงสร้างถนนเดิมที่ครบอายุการบริการและก่อนที่จะผิวทางจะเสื่อมสึกหรอเนื่องจากการกระทำของการจราจรและขบวนการของสภาพภูมิอากาศ ยางมะตอยที่พ่นลงไปนอกจากจะบำรุงและปฏิสังขรณ์สภาพการกันซึมของผิวทางแล้ว จะยังช่วยป้องกันการหลุดลอกของผิวทางอีกด้วย หลังจากพ่นยางมะตอยแล้วจะนำมวลรวมมาเกลี่ยปิดหน้าแล้วบดทับเพื่อซ่อมแซมและแก้ไขความต้านทานการลื่นไถลของผิวหน้าถนน

เซอร์เฟซทรีตเมนต์หลายชั้น ประกอบด้วยการพ่นยางมะตอยสลับด้วยการลงมวลรวมปิดทับตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป

ซีลโคท หมายถึง การทำเซอร์เฟซทรีตเมนต์ที่มีจุดประสงค์หลักเพื่อการกันน้ำซึมผ่านหรือปรับปรุงคุณภาพเนื้อถนน หรือทั้งสองอย่าง

เซอร์เฟซทรีตเมนต์ชั้นเดียวหรือหลายชั้น ซึ่งมีชั้นมวลรวมปกคลุมอาจก่อสร้างบนชั้นวัสดุเม็ดยของถนนเพื่อเลื่อนระดับให้ดีขึ้นสำหรับการจราจร เซอร์เฟซทรีตเมนต์ช่วยกำจัดฝุ่น ป้องกันน้ำซึมและทำให้ผิวจราจรราบเรียบขยับจีบสาย ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงผิวถนนที่เป็นวัสดุเม็ดยให้ทนทานต่อสภาพภูมิอากาศได้ในราคาถูก แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความสามารถในการรองรับปริมาณการจราจร โดยเหมาะสำหรับเส้นทางที่มีปริมาณการจราจรเบาบาง หรือเส้นทางที่คาดหมายได้ก่อนแล้วว่าระยะเวลาบริการของถนนอยู่ในวงจำกัด

แทคโคทและไพรม์โคท ในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนนผิวลาดยางควรมีการยึดเกาะกันอย่างดี ซึ่งทำให้สำเร็จได้ด้วยการพ่นยางมะตอยบางๆ เคลือบบนผิวของชั้นที่อยู่ข้างล่างเพื่อให้

ยึดกับชั้นที่อยู่บน การพ่นยางมะตอยบางๆ เพื่อจุดประสงค์นี้เรียกว่า แทคโคท (Tack coat) การทำแทคโคทนี้มักใช้เพื่อยึดชั้นทางยางมะตอยเข้ากับชั้นพื้นทางปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต หรือกับโครงสร้างถนนเดิมที่เป็นยางมะตอย อิฐ หรือก้อนหิน

เมื่อจะทำการก่อสร้างผิวทางยางมะตอยหรือทำเซอร์เฟดทรีตเมนต์บนชั้นพื้นทางวัสดุเม็ด เริ่มแรกต้องพ่นยางมะตอยเหลวให้แทรกซึมเข้าไปในชั้นพื้นทาง จุดประสงค์เพื่อยึดชั้นวัสดุเม็ดเข้ากับชั้นผิวทางยางมะตอยและเป็นการป้องกันน้ำซึมผ่านลงสู่ชั้นพื้นทางวัสดุเม็ด การพ่นยางมะตอยเพื่อทรีตเมนต์อย่างนี้ เรียกว่า ไพรม์โคท (Prime coat) ไพรม์โคทต่างกับแทคโคททั้งในการใช้ชนิดยางมะตอยและปริมาณยางมะตอย

2.1.7 สัดส่วนในการผสมยางมะตอยกับมวลรวม

การใช้สัดส่วนระหว่างยางมะตอยกับมวลรวมอย่างถูกต้อง และการควบคุมส่วนขนาดคละของมวลรวมเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการก่อสร้างถนนให้ได้โครงสร้างที่ดี ถ้าใช้ยางมะตอยปริมาณมากเกินไปมีผลให้โครงสร้างถนนขาดเสถียรภาพภายในและบิดเบี้ยวภายใต้การจราจร ถ้าใช้ยางมะตอยปริมาณน้อยเกินไปโครงสร้างถนนมีแนวโน้มที่จะหลุดหลุ่คร่อนได้ง่าย ทั้งยังขาดคุณภาพในการกันน้ำและความทนทาน จุดประสงค์ในการออกแบบวัสดุผสมก็เพื่อหาอัตราส่วนที่แน่นอนระหว่างยางมะตอยต่อมวลรวมให้ได้วัสดุผสมที่มีเสถียรภาพเพียงพอและความทนทานสูงสุด ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและควบคุมคุณภาพวัสดุผสมยางมะตอย

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับยางมะตอย [2]

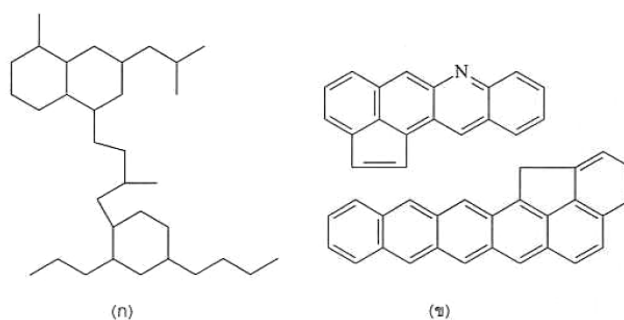
ยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ คือวัสดุประสานสีน้ำตาลแก่ถึงดำ มีสารบิทูเมน (Bitumen) เป็นส่วนประกอบหลัก ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือได้จากการกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม

บิทูเมน หมายถึง สารที่ประกอบด้วยโมเลกุลพวกไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) มีคุณสมบัติยึดประสาน อยู่ในสถานะของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือเหนียวหนืด สีดำหรือค่อนข้างดำ ละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือได้จากการผลิต

ส่วนประกอบหลักในยางมะตอย [5]

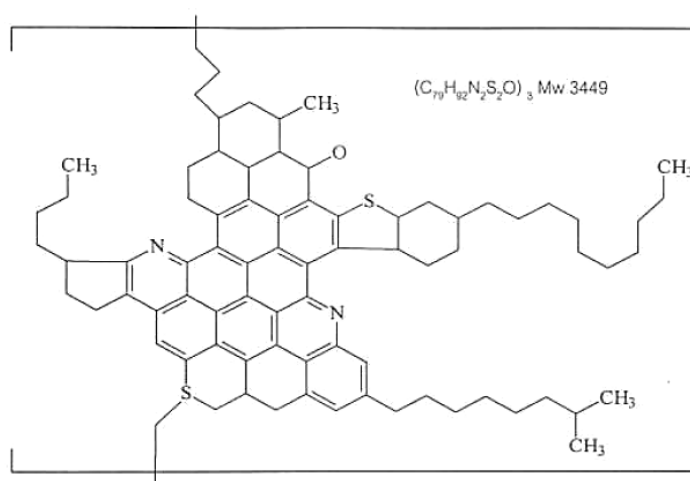
1. สารอิ่มตัว (Saturated) ประกอบด้วยสารที่มีโครงสร้างหลักคล้ายสารพาราฟิน (Paraffin) วงแหวนแนฟทานิก (Naphthanic ring) และไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงที่มีความยาว (Long straight chain hydrocarbon) มีลักษณะเหนียวคล้ายจารบี

2. สารอะโรมาติก (Aromatics) ส่วนประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) ประมาณ 25-30% และมีออกซิเจนหรือไนโตรเจนอยู่เล็กน้อย มีลักษณะข้นเหนียวเป็นสีดำ



รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุล (ก) สารอิมัลชัน และ (ข) สารอะโรมาติก [5]

3. สารอะโรมาติกที่มีขั้ว (Polar aromatics) ได้แก่ แอสฟัลต์ทีน (Asphaltene) และเรซิน (resin) ส่วนประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอะโรมาติกเป็นส่วนประกอบประมาณ 35-40 % มีออกซิเจนหรือไนโตรเจนมากกว่า 1% และอาจมีกำมะถันถึง 8 % รวมถึงมีโครงสร้างแสดงความเป็นประจุไฟฟ้า เช่นหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) และหมู่อะมิโน (Amino group) เป็นต้น มีลักษณะข้นเหนียวเป็นสีดำ



รูปที่ 3 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของแอสฟัลต์ทีน [5]

2.3 ชนิดพื้นฐานของยางมะตอยที่ใช้ทำผิวถนนลาดยาง [6]

โดยทั่วไปยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ที่ใช้ในประเทศไทย เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ ซึ่งผลิตออกมาหลายชนิด และหลายเกรดมีช่วงตั้งแต่ของแข็งที่แข็งและเปราะไปจนถึงของเหลวใส แอสฟัลต์ซีเมนต์ คือพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ ซึ่งนำมาทำให้เป็นของไหลสำหรับใช้ในงานก่อสร้างโดยให้ความร้อน หรือโดยการเติมตัวทำละลาย หรือโดยการทำให้เป็นอิมัลชัน ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

1. แอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ โดยมีการผลิตเป็นเกรดของความหนืดต่าง ๆ กัน เกรดที่ใช้กันมากคือ AC 2.5, AC 5, AC 10, AC 20 และ AC 40 ซึ่งสอดคล้องกับเกรดของเพนิเตอร์ชัน 200-300, 120-150, 85-100, 60-70 และ 40-50 ตามลำดับ เกรดของความหนืดเป็นความหนืดที่วัดในหน่วย 1 ใน 100 ส่วนของพอยส์ ± 20 % ที่อุณหภูมิ 60°C (140° F)

2. คัทแบคแอสฟัลต์ เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับตัวทำละลายเพื่อลดความหนืด ซึ่งจะทำให้การใช้งานง่ายขึ้นที่อุณหภูมิปกติ ในการพ่นบนวัสดุมวลรวมอาจจะมีการให้ความร้อนถ้าต้องการ เมื่อตัวทำละลายระเหยไปจะเกิดการบ่มตัวทำให้มีลักษณะแข็งขึ้น และจะยึดแน่นกับอนุภาคของมวลรวม ชนิดและเกรดของคัทแบคแอสฟัลต์ขึ้นกับชนิดของตัวทำละลาย ซึ่งจะควบคุมความหนืดอัตราของการระเหย และการแห้งตัว ชนิด RC (Rapid Curing บ่มตัวเร็ว) ใช้แก๊สโซลีนเป็นตัวทำละลาย ชนิด MC (Medium Curing บ่มตัวปานกลาง) ใช้คีโรซีนเป็นตัวทำละลาย และชนิด SC (Slow Curing บ่มตัวช้า) ใช้้ำมันดีเซลเป็นตัวละลาย หรืออาจจะผลิตได้โดยตรงจากการกลั่นน้ำมัน ปริมาณตัวทำละลายทั่วไปใช้ประมาณ 15 % ถึง 40 % ของทั้งหมด

3. แอสฟัลต์อิมัลชันหรือยางมะตอยน้ำ เป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์กับน้ำ แต่เนื่องจากองค์ประกอบของทั้งสองไม่สามารถรวมกันได้โดยตรงจะต้องมีการเติมสารอิมัลซิไฟด์ (Emulsifier) ลงไปในส่วนผสม ส่วนของสารอิมัลซิไฟด์จะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์แตกตัวออก และกระจายออกในรูปของหยดที่มีขนาดเล็กมากในน้ำ เมื่อใช้งานอิมัลชันจะมีการก่อตัวในขณะที่น้ำระเหยไป โดยทั่วไปอิมัลชันจะประกอบด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์ 55-75 % และสารอิมัลซิไฟด์ 3 % เป็นอย่างมากแล้วเติมน้ำให้ครบส่วน ในบางกรณีอาจบรรจุสารผสมเพิ่ม (Additive) อย่างอื่นด้วย เช่น สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) สารบำรุงการเคลือบ (Coating improvers) สารต่อต้านการหลุดลอก (Antistrips) หรือสารควบคุมการแตกตัว (Break control agents)

2.4 ประวัติของยางมะตอยน้ำ [6]

ยางมะตอยน้ำหรืออาจจะเรียกทับศัพท์ว่า แอสฟัลต์อิมัลชัน ไม่ใช่ของใหม่ในวงการก่อสร้างและบำรุงรักษาดถนน เนื่องจากการพัฒนาเป็นครั้งแรกในช่วงต้น ๆ ของทศวรรษ ค.ศ. 1920 มีการนำไปใช้งานเกี่ยวกับการทำผิวถนน การใช้งานช่วงแรก ๆ เป็นการพ่นยางมะตอยน้ำเพื่อบรรเทาปัญหาเรื่องฝุ่นบนถนน การเติบโตของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันเป็นไปอย่างช้า ๆ และจำกัดโดยชนิดของแอสฟัลต์ที่มีในขณะนั้น อีกทั้งยังขาดความรู้เกี่ยวกับวิธีการนำไปใช้งาน การพัฒนาชนิดและเกรดใหม่ ๆ ของแอสฟัลต์อิมัลชันควบคู่ไปกับการปรับปรุงเครื่องมือและวิธีการก่อสร้างในปัจจุบันช่วยให้สามารถเลือกใช้น้ำยางมะตอยน้ำได้กว้างขวางยิ่งกว่าเดิมมาก โดยทั่ว ๆ ไป แอสฟัลต์อิมัลชันสามารถใช้ได้กับข้อกำหนดของถนนต่าง ๆ ได้ การเลือกใช้ที่เหมาะสมและถูกวิธีจะช่วยให้ประหยัดและเป็นประโยชน์ต่อสภาพแวดล้อมอีกด้วย

จากบันทึกการใช้งานที่ผ่านมาเผยให้เห็นว่าการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แต่สม่ำเสมอในช่วงระหว่างปีทศวรรษ ค.ศ. 1930 กับช่วงกลางของทศวรรษ ค.ศ. 1950 หลังจากสงครามโลกครั้งที่2 น้ำหนักบรรทุกและปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจนผู้ออกแบบถนนเริ่มที่จะคัดค้านการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันให้น้อยลง โดยระบุว่าให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เท่านั้นในการผลิตแอสฟัลต์ชนิดผสมร้อน (HMA) ในขณะที่ปริมาณการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี ค.ศ. 1953 และการใช้ผลิตภัณฑ์แอสฟัลต์อื่น ๆ แทบจะคงที่ แต่ทว่าปริมาณการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันกลับเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

การใช้งานแอสฟัลต์อิมัลชันส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับถนนมีดังนี้

- เซอร์เฟซทรีตเมนต์ (surface treatments)
- ปะซ่อมและปูทับอย่างบางบนถนนผิวทางเดิม (patching and thin overlays)
- การเพิ่มเสถียรภาพ (stabilization)
- การทำสลอรี่ซีล (slurry sealing)

นอกจากนั้นยังใช้แอสฟัลต์อิมัลชันในส่วนผสมของชั้นพื้นทาง (base course) และชั้นผิวทาง (surface course) ด้วย

มีปัจจัยหลายประการที่เพิ่มความสนใจในการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน คือ

1. สถานะวิกฤตทางพลังงานในช่วงทศวรรษ ค.ศ. 1970 มีการอนุรักษ์ห้ามส่งน้ำมันของตะวันออกกลางโดย U.S. Federal Energy Administration เนื่องจากแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นยางมะตอยที่ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายประเภทปิโตรเลียม ในการทำให้เป็นของเหลว และยังสามารถนำไปใช้ได้เกือบทุกกรณีโดยไม่ต้องใช้ความร้อนเพิ่มเติม

2. การใช้แอสฟัลต์อิมัลชันช่วยลดมลพิษในบรรยากาศ เพราะมีเพียงไฮโดรคาร์บอนจำนวนเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกปล่อยออกมาจากแอสฟัลต์อิมัลชัน
 3. แอสฟัลต์อิมัลชันสามารถเคลือบผิวมวลรวมที่เปียกชื้นได้ ช่วยลดการใช้พลังงานสำหรับทำให้มวลรวมร้อนและแห้ง เป็นการประหยัดพลังงาน
 4. การผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดใหม่ ๆ จากสูตรใหม่ ๆ และการปรับปรุงกระบวนการผลิตช่วยให้มีการพัฒนาสมบัติให้ได้ตามความต้องการของการออกแบบ และการก่อสร้าง
 5. แอสฟัลต์อิมัลชันสามารถใช้ได้กับวัสดุที่เย็นที่สถานที่ที่อยู่ห่างไกลได้
 6. การใช้แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับการบำรุงรักษาเพื่อป้องกัน ช่วยเพิ่มอายุการให้บริการการจราจรจากความเสียหายเล็กน้อยของผิวทางที่เป็นอยู่
 7. ประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากใช้พลังงานน้อย
- และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญมาก 2 ประการคือ การอนุรักษ์พลังงานและมลพิษทางบรรยากาศ เป็นสิ่งกระตุ้นให้มีการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันแทนการใช้คัทแบคแอสฟัลต์

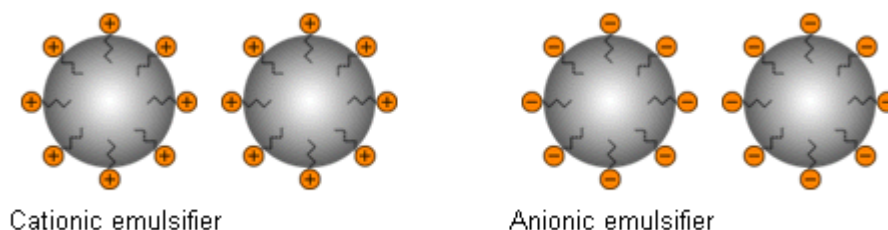
ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตแอสฟัลต์เองกำลังมีการเปลี่ยนแปลง หลายปีเมื่อเร็ว ๆ นี้เทคโนโลยียางมะตอยน้ำได้ผลิตยางมะตอยน้ำชนิดใหม่ ๆ ให้มีสมบัติได้ตรงตามสภาพการจราจรที่เพิ่มขึ้นด้วยงบประมาณที่น้อยลงและรักษาสภาพแวดล้อมดีขึ้นกว่าเดิม เช่น การผลิตยางมะตอยชนิดดัดแปร (modified asphalt emulsions) ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้ยางมะตอยน้ำว่าทำไมต้องใช้ และใช้อย่างไรจะช่วยให้แน่ใจว่าการใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด การใช้ยางมะตอยน้ำที่เหมาะสมถูกต้องจะส่งผลทำให้ผิวทางเป็นผิวทางที่มีสมรรถนะสูงและประหยัด แต่สามารถบำรุงรักษาได้คล่องตัว

2.4 ยางมะตอยอิมัลชัน (Bitumen Emulsion) [6]

ยางมะตอยอิมัลชันคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ หรือคอลลอยด์ (Colloidal particle) กระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่มีอิมัลซิไฟเออร์ผสมอยู่เล็กน้อย ผลิตได้โดยผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิ 120 °C กับน้ำที่มีอิมัลซิไฟเออร์ผสมอยู่ 1-2 % ที่อุณหภูมิ 77 °C แล้วตีส่วนผสมที่ได้ด้วยเครื่องคอลลอยด์มิล (Colloid mill) ทำให้ยางมะตอยแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ภายใต้สภาวะที่ควบคุมความเป็นกรด-ด่าง โดยทั่วไปนิยมให้มีปริมาณยางมะตอยอยู่ 30-70 % ยางมะตอยอิมัลชันแบ่งตามประจุได้ 3 ประเภทดังรูป 4 คือ

- ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก (Cationic asphalt emulsion) คืออนุภาคยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำโดยมีประจุบวกของอิมัลซิไฟเออร์ล้อมรอบอนุภาค

- ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic asphalt emulsion) คืออนุภาคยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำโดยมีประจุลบของอิมัลซิไฟเออร์ล้อมรอบอนุภาค
- ยางมะตอยอิมัลชันชนิดไม่มีประจุ (Non-ionic asphalt emulsion) คืออนุภาคของยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำโดยที่ผิวของอนุภาคไม่มีประจุ



รูปที่ 4 ภาพแสดงลักษณะประจุที่ผิวของอนุภาคยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก และประจุลบ [7]

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามความเร็วในการแตกตัว (Breaking time) ได้เป็นยางมะตอยชนิดแข็งตัวเร็ว แข็งตัวปานกลาง และแข็งตัวช้า (Rapid, Medium and Slow setting asphalt emulsion) คือยางมะตอยที่แข็งตัวได้เร็วหรือช้าต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ ตัวทำละลายที่นำมาใช้ว่าระเหยได้เร็วหรือช้า และชนิดของงานที่ต้องการ

โดยทั่วไปการทำยางมะตอยอิมัลชันมีส่วนประกอบหลัก 3 ชนิดคือ ยางมะตอย น้ำหรือตัวกลางและสารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying agents หรือ Emulsifier) เป็นที่รู้กันดีว่ายางมะตอยกับน้ำไม่เข้ากันเว้นแต่ทำให้อยู่ในสภาวะที่มีการควบคุมและใช้สารเคมีช่วย การผสมยางมะตอยกับน้ำมีลักษณะคล้ายกับการล้างกรีส (Grease) ที่ติดมือให้ออกด้วยน้ำเปล่า ซึ่งจะล้างไม่ออกจนกว่าจะมีการใช้สบู่หรือผงซักฟอกเข้าช่วย โดยอนุภาคของสบู่จะล้อมรอบอนุภาคกรีสเม็ดเล็กๆ (Globule) ซึ่งเป็นการลดแรงตึงผิว (Surface tension) ทำให้สารทั้ง 2 ชนิดเข้ากันได้ การทำยางมะตอยอิมัลชันก็สามารถพิจารณาได้ในแบบเดียวกัน ส่วนประกอบหลักของยางมะตอยอิมัลชันสามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้ [5]

1. ยางมะตอย เป็นส่วนประกอบขึ้นพื้นฐานปกตินิยมใช้ยางมะตอยที่มีค่าเพนิเทรชันระหว่าง 100-250 ในอัตราส่วน 55-70% โดยน้ำหนักของยางมะตอยอิมัลชัน เนื่องจากยางมะตอยเป็นสารที่มีส่วนประกอบหลากหลายแตกต่างกันจึงไม่มีสูตรผสมที่แน่นอนขึ้นกับสมบัติยางมะตอยอิมัลชันที่ต้องการและความเข้ากันได้ของสารเคมีที่ใช้ รวมถึงสภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้ด้วย
2. ตัวกลางหรือน้ำ (Medium or Water) เป็นส่วนประกอบอีกอย่างที่มีความสำคัญมากใน

การทำยางมะตอยอิมัลชันโดยน้ำที่ใช้ต้องไม่มีผลทำให้สมบัติของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ด้อยลง

3. สารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying agent) เป็นส่วนที่ทำให้ยางมะตอยผสมเข้ากับน้ำได้โดยการลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสทั้งสอง การเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์แต่ละชนิดมีผลอย่างมากต่อสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ เช่นการใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว (Surface active agent) ช่วยให้เกิดการแตกตัวของยางมะตอยได้ดี และยังสามารถควบคุมเวลาในการแตกตัว (Breaking time) ได้ ตัวอย่างชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ ปริมาณที่ใช้ และโครงสร้างทางเคมีของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในการทำยางมะตอยอิมัลชันแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

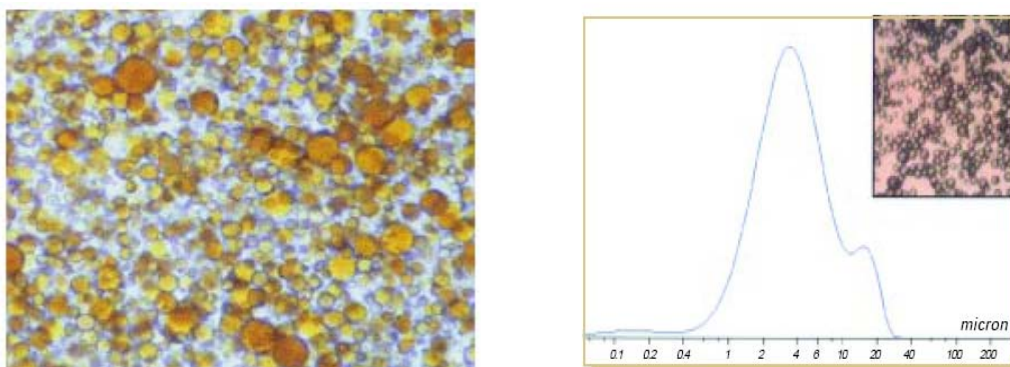
ตารางที่ 1 แสดงชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในยางมะตอยอิมัลชันชนิดต่างๆ [8]

CRS		CSS		Anionic RS		Anionic SS	
Asphalt	65	Asphalt	60	Asphalt	65	Asphalt	60
Tallowdiamine	0.2	Tallow diquaternary ammonium chloride	0.6	Tall Oil	0.3	Ethoxylated nonyl phenol	0.5
Hydrochloric acid, 35%	0.15			Sodium hydroxide	0.2	Lignins	0.5
Soap pH	1.5-2.5	Soap pH	3-7	Soap pH	11-12	Soap pH	10-12
Water	to 100	Water	to 100	Water	to 100	Water	to 100

ตารางที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของอิมัลซิไฟเออร์บางชนิด [8]

Lipophilic Portion	Head Group	Counterion	Head Group Charge, pH 2	Head Group Charge, pH 11
Tallowalkyl-	$[-NH_2CH_2CH_2CH_2NH_3]^{2+}$	$2Cl^-$	Positive	Neutral
Tallowalkyl-	$[-N(CH_3)_3]^+$	Cl^-	Positive	Positive
Nonylphenyl-	$[-O(CH_2CH_2O)_{100}H]$	None	Neutral	Nonionic
Tall oil-	$[-COO]^-$	Na^+	Neutral	Negative
Alkylbenzene	$[-SO_3]^-$	Na^+	Negative	Negative

อนุภาคของยางมะตอยอิมัลชันโดยทั่วไปจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-20 ไมครอน การกระจายตัวของยางมะตอยในน้ำที่มีอิมัลซิไฟเออร์แสดงดังรูปที่ 5

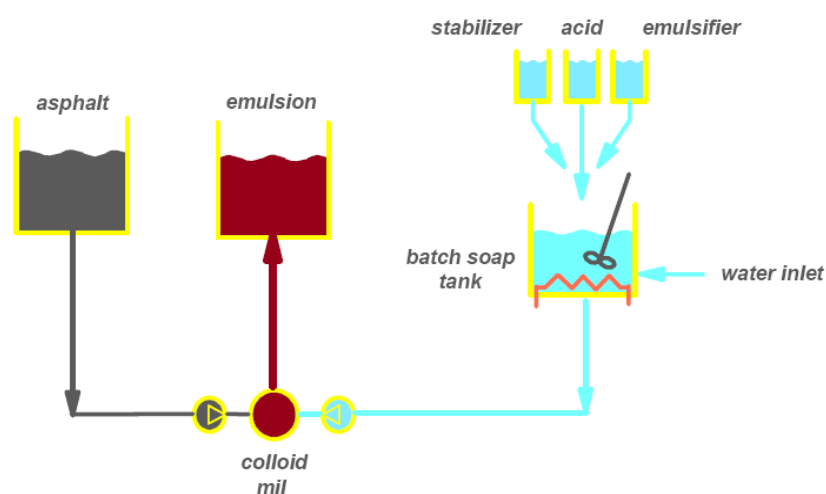


(a) ภาพแสดงลักษณะของอนุภาคยางมะตอย [8] (b) การกระจายของขนาดอนุภาคยางมะตอย [8]

รูปที่ 5 แสดงลักษณะและการกระจายตัวของอนุภาคยางมะตอยในยางมะตอยอิมัลชัน

การทำยางมะตอยอิมัลชันมีวัตถุประสงค์เพื่อ ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของยางมะตอยในน้ำและมีเสถียรภาพต่อการผสม การขนส่ง รวมถึงการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามยางมะตอยอิมัลชันที่เกิดขึ้นอาจถูกทำลายได้หากมีสภาวะที่ไม่เหมาะสม ปัจจัยที่มีผลต่อยางมะตอยอิมัลชันได้แก่

1. สมบัติทางเคมีและปริมาณยางมะตอยที่ใช้
2. ชนิด และปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์
3. สภาวะการผลิต เช่น อุณหภูมิ ความดัน และแรงเฉือน เป็นต้น
4. ความเข้ากันได้ของยางมะตอย อิมัลซิไฟเออร์ และพอลิเมอร์ที่ใช้
5. สารเติมแต่งชนิดอื่น
6. ชนิดของเครื่องผสม และลำดับการใส่ส่วนผสม



รูปที่ 6 แสดงลักษณะของการผลิตยางมะตอยอิมัลชันโดยใช้ Colloid mill [8]

ข้อดีของการใช้ยางมะตอยอิมัลชันคือ

1. หลีกเลียงการใช้อุณหภูมิสูง
2. มีการกระจายตัวของยางมะตอยอย่างสม่ำเสมอ
3. สามารถกำหนดเวลาในการแข็งตัวได้
4. ปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะได้ง่าย

2.5 การแตกตัวและการบ่มตัว (Breaking and Curing) [6]

2.5.1 การแตกตัว

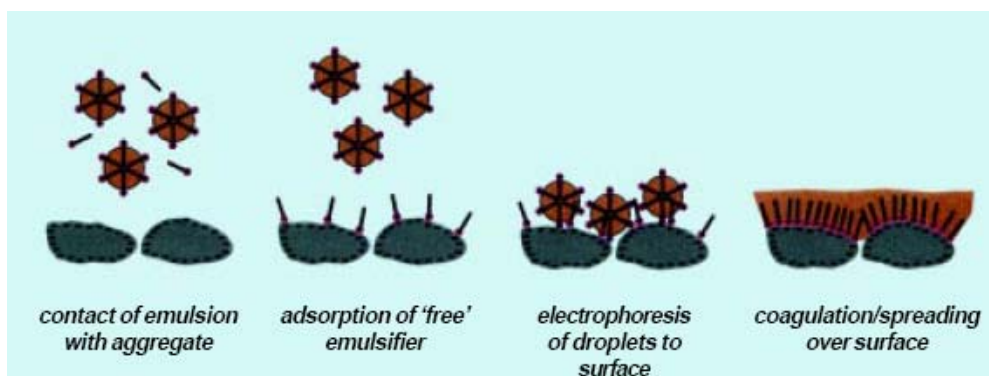
ยางมะตอยอิมัลชันจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างมวลรวมได้ ขณะนั้นน้ำจะต้องแยกตัวออกจากเฟสของยางมะตอยและน้ำจะระเหยไป การแยกตัวระหว่างน้ำกับยางมะตอยในลักษณะนี้เรียกว่า การแตกตัว (Breaking) ในการนำยางมะตอยอิมัลชันไปใช้ในงานลักษณะเซอร์เฟซทรีตเมนต์และซีลนั้นผู้ผลิตจะผลิตให้อิมัลชันเกิดการแตกตัวเชิงเคมีเมื่อยางมะตอยอิมัลชันสัมผัสสารชนิดอื่นๆ เช่น มวลรวมหรือผิวถนน การใช้แอนไอออนิกและแคทไอออนิกชนิดก่อตัวเร็วและก่อตัวปานกลางพื้นเม็ดละอองของยางมะตอยบนมวลรวมจะเกิดการยึดเกาะตามปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าเคมี

สำหรับอิมัลชันชนิดก่อตัวช้า กลไกที่สำคัญคือการระเหยของน้ำ จะใช้กับงานที่ต้องใช้เวลาในผสมและปูผิวถนนเป็นเวลานาน ซึ่งต้องใช้อิมัลชันชนิดมีการแตกตัวช้า ส่วนอิมัลชันชนิดก่อตัวเร็วจะมีช่วงเวลาการแตกตัวสั้นมากภายในหนึ่งถึงห้านาทีหลังจากใช้งาน

2.5.2 การบ่มตัว

การบ่มตัว (Curing) หมายถึง การพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ผลสุดท้ายคือชั้นบางๆ เหมือนแผ่นฟิล์ม ที่ยึดเกาะอย่างต่อเนื่องซึ่งทำหน้าที่ยึดประสานมวลรวมให้อยู่เกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างแข็งแรง สำหรับปรากฏการณ์เช่นนี้ จำเป็นต้องให้น้ำระเหยออกอย่างสมบูรณ์และอนุภาคของยางมะตอยอิมัลชันมารวมตัวกันและยึดติดมวลให้เกาะอยู่ด้วยกัน น้ำจะถูกขจัดไปโดยการระเหยและโดยความดันจากการบดอัด รวมทั้งการดูดซึมของมวลรวมด้วย

การระเหยของน้ำสามารถกระทำได้รวดเร็วภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม แต่ถ้าในสภาวะที่มีความชื้นสูง อุณหภูมิต่ำ หรือมีฝนตกหลังใช้งานเล็กน้อยก็จะเป็นอุปสรรคต่อการบ่มตัวที่เหมาะสม เมื่อใช้ยางมะตอยอิมัลชันชนิดก่อตัวปานกลางและชนิดก่อตัวช้าในการทำส่วนผสมสำหรับปูผิวถนนลาดยางควรใช้มวลรวมที่ชื้นเล็กน้อยเพื่อความสะดวกในกระบวนการผสม และเคลือบ การบ่มตัวของยางมะตอยอิมัลชันชนิดก่อตัวช้าส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับกระบวนการระเหยและการดูดซึม



รูปที่ 7 แสดงกลไกการแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชันเมื่อสัมผัสกับมวลรวม [8]

องค์ประกอบบางประการที่มีผลต่อการแตกตัวและการบ่มตัวของยางมะตอยอิมัลชันมีดังต่อไปนี้

1. การดูดซึม มวลรวมที่มีรูพรุน ผิวหยาบขรุขระ จะช่วยเร่งการก่อตัวโดยการดูดซึมน้ำจากอิมัลชัน
2. ความชื้นของมวลรวม มวลรวมที่เปียกชื้นจะช่วยอำนวยความสะดวกในการเคลือบแต่มีแนวโน้มทำให้กระบวนการก่อตัวช้าลงโดยการเพิ่มเวลาในการระเหย
3. สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม มีผลต่ออัตราการระเหยของการย้ายออกของอิมัลซิไฟเออร์ และการไล่น้ำออกไป การแตกตัวมักจะเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า ในปัจจุบันสารเคมีบางชนิดได้รับการพัฒนาให้สามารถแตกตัวได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำด้วย
4. แรงเชิงกล ความดันจากการบดอัดโดยตรงและจากการบดทับอย่างซ้ำๆ จากการจราจร จะช่วยขับน้ำออกจากส่วนผสมและช่วยให้ส่วนผสมยึดเกาะ บ่ม และเสถียรภาพ
5. พื้นที่ผิว มวลรวมที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งจำพวกมวลรวมละเอียดและมวลรวมสกปรกจะช่วยเร่งการแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชัน
6. สภาพเคมีของผิว ความเข้มข้นของประจุที่ผิวของมวลรวมกับความเข้มข้นของประจุตัวอิมัลซิไฟเออร์ช่วยเพิ่มอัตราการก่อตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแคทไอออนิกอิมัลชัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่บนผิวของมวลรวมสามารถทำปฏิกิริยาและลดเสถียรภาพแอนไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์บางชนิดได้
7. อุณหภูมิของอิมัลชันและมวลรวม เมื่ออิมัลชันและมวลรวมมีอุณหภูมิต่ำจะหน่วงการก่อตัว
8. ชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการผลิต

2.6 ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Emulsified Bitumen)

การเติมพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสายโซ่ที่มีหน่วยโมเลกุลซ้ำ ๆ ลงในแอสฟัลต์สามารถช่วยปรับปรุงระดับการใช้งานได้ ผิวทาง (Pavement) ที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่ม การต้านทานผิวเกิดร่องล้อ (Rutting) และการแตกร้าวจากความร้อน (Thermal cracking) และลดความเสียหายจากความล้า (Fatigue damage) การเกิดรื้อ (Stripping) และการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) ตัวประสานที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified binders) ใช้งานได้ดีในบริเวณที่ต้องรับน้ำหนักมาก เช่น ทางแยกที่มีการจราจรหนาแน่น สนามบิน และจุดตรวจวัดน้ำหนัก พอลิเมอร์ที่มักใช้ในการปรับปรุงยางมะตอยประกอบด้วย สไตรีน-บิวตะไดอิน-สไตรีน(SBS) ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน(SBR) ยางธรรมชาติ เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (EVA) พอลิเอทิลีน และอื่น ๆ ลักษณะของตัวประสานที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าฟื้นตัวกลับ (Elastic recovery) ค่าความหนืด (Viscosity) ค่าแรงยึดเหนี่ยวในตัวเอง (Cohesive strength) และค่าการดึงยืด (Ductility) มากขึ้น อีกทั้งมีค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) เพิ่มขึ้นด้วย [9]

การใช้พอลิเมอร์เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติยางมะตอยทำให้ได้อย่างมะตอยที่หลากหลายตามต้องการ ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นกับชนิดของยางมะตอยที่ใช้ ชนิดของพอลิเมอร์ สภาพะในการผสม และความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์กับยางมะตอย อย่างไรก็ตามการใช้พอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยมีข้อจำกัดเช่นกัน เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกับยางมะตอยอย่างมาก ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับยางมะตอยโดยไม่ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค (Phase separation) [9]

X. Lu และ U. Isacsson [10] ศึกษาสมบัติการไหลของบิตูเมนที่ปรับปรุงด้วยสไตรีน-บิวตะไดอิน โคพอลิเมอร์ (SBS) ซึ่งเตรียมจากเครื่องผสมในห้องทดลอง โดยใช้บิตูเมน 5 ชนิดจาก 4 แหล่งผลิตและผสมที่ปริมาณพอลิเมอร์ต่าง ๆ กัน สมบัติการไหลตรวจสอบโดยใช้ Dynamic mechanical analysis ที่อุณหภูมิและความถี่ต่าง ๆ กัน พบว่าการเติมพอลิเมอร์ SBS ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของตัวประสาน (Binder elasticity) ที่อุณหภูมิสูง และปรับปรุงความยืดหยุ่นได้ของตัวประสาน (Binder flexibility) ที่อุณหภูมิต่ำ การปรับปรุงโดย SBS ทำให้ความว่องไวต่ออุณหภูมิของบิตูเมนลดลง แต่อย่างไรก็ตามสมบัตินี้ไม่สามารถประเมินค่าได้จากตัวแปรเพียงค่าเดียว ระดับของการปรับปรุงจะสัมพันธ์กับสมบัติการไหลของตัวประสานซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และความถี่ และขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา เกรดของบิตูเมนและพอลิเมอร์

Xiaohu Lu และ Ulf Isacsson [11] เตรียม Polymer modified bitumens โดยการผสมบิตูเมนกับเทอร์โมพลาสติกต่างชนิดกันคือ สไตรีน-บิวตะไดอิน โคพอลิเมอร์ (SBS) สไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน โคพอลิเมอร์ (SEBS) เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (EVA) และเอทิลีนบิวทิลอะครีเลต

(EBA) โดยศึกษาสมบัติพื้นฐาน คือ ลักษณะอณูพื้นฐาน (Morphology) ลักษณะการไหล (Rheology) และการบ่ม (Ageing) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ลักษณะอณูพื้นฐานและสมบัติการไหลของสารประสานที่ปรับปรุงแล้วมีอิทธิพลจาก ลักษณะเฉพาะ และปริมาณของพอลิเมอร์ และธรรมชาติของบิพูเมน เมื่อเกิดวิกฤตที่ต่อเนื่องของพอลิเมอร์ที่ปริมาณพอลิเมอร์สูง ๆ (ประมาณ 6%) สมบัติการไหลของสารประสานดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สมบัติหลังจากการบ่มขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ส่วนมากสมบัติการไหลจะเปลี่ยนแปลงระหว่างการบ่ม ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดออกซิเดชันของบิพูเมน หรือการสลายตัวของพอลิเมอร์

Haiying Fu และคณะ [12] ศึกษาเสถียรภาพและความเข้ากันได้ของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วย SBS และ SBS ที่เชื่อมด้วยมอนอเมอร์ (Methacrylic acid) หรือ SBS-g-M พบว่าการเติม SBS-g-M มีระดับการผสมที่มีร่างแหที่สมบูรณ์กว่า ทำให้สารประสานมีระดับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น และมีความว่องไวต่ออุณหภูมิลดลง

งานวิจัยส่วนมากมักผสมพอลิเมอร์กับยางมะตอยที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ยางมะตอยและพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวและกระจายตัวเข้ากันได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้พอลิเมอร์ปรับปรุงยางมะตอยในรูปแบบยางมะตอยน้ำยังมีน้อยมาก L.E. Chavez-Valencia และคณะ [13] ปรับปรุงยางมะตอยผสมเย็นหรือ Cold-mix asphalt (CMA) ชนิด บ่มตัวเร็วประจุบวก (Cationic quick set emulsified asphalt) โดยการเติมพอลิไวนิลอะซิเตดอิมัลชัน (Polyvinyl acetate emulsion) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิขนาดไมโครเมตรของพอลิไวนิลอะซิเตดกระจายตัวอย่างดีอยู่ในยางมะตอยแมทริกซ์ และค่าแรงกดอัด (Compressive strengths) เพิ่มขึ้น 31% เมื่อเทียบกับยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุง

ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบที่มีในประเทศ และสามารถปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยน้ำได้ โดยมีการใช้ยางชนิดต่าง ๆ เช่น ยางผง ยางที่ผ่านกระบวนการ (Vulcanized) และไม่ผ่านการกระบวนการ (Unvulcanized) ตลอดจนน้ำยาง มาผสมกับยางมะตอย และศึกษาวิธีการผสม ปริมาณที่เหมาะสม และสมบัติของยางมะตอยที่เปลี่ยนแปลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมยางธรรมชาติจำนวนเล็กน้อยไม่เกินกว่า 5% ทำให้ยางมะตอยมีจุดอ่อนตัวสูงขึ้น ทนทานต่ออุณหภูมิสูงและต่ำ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการชำรุด นอกจากนี้ยังเพิ่มคุณภาพอื่น ๆ เช่น ความเหนียว ความแน่น ความคงตัว ความยืดหยุ่น การยึดเกาะกับวัสดุเช่นหินได้ดีขึ้น ผลการทดลองในการลาดถนนช่วยลดการแตกร้าว การบวม การลอกและการเสียรูป ส่วนผสมของยาง 2.5 % โดยน้ำหนักทำให้ถนนทนทานขึ้น 40-50% โดยปัจจัยสำคัญในการผสมยางมะตอยกับยางคือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับระยะเวลาในการเก็บนั้นขึ้นกับอุณหภูมิ จากยางชนิดต่าง ๆ ที่นำมาทดลองพบว่าน้ำยางมีประสิทธิภาพดีที่สุดแต่ผสมยาก [1]

ทวิศักดิ์ ชัยยังธรรมกุลและคณะ [5] ศึกษาการเติมน้ำยางธรรมชาติลงในยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic asphalt emulsion) เพื่อนำไปใช้ในงานลาดถนนตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยทำการศึกษาสัณฐานวิทยาและตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อยางมะตอยอิมัลชันคือ ชนิดและปริมาณน้ำยางธรรมชาติได้แก่ น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียมาก (HA-Latex) และน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียน้อย (LA-Latex) ที่ 3.5–10 เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (%DRC) ชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ จากการศึกษาพบว่าการใช้ยางชั้นช่วงปริมาณ 5–7.5 %DRC ให้สมบัติยางมะตอยอิมัลชันที่ดี น้ำยางชั้นทั้งสองชนิดให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ ยางมะตอยอิมัลชันมีความหนืด เหนียวข้น จืดอ่อนตัว และความชื้นตัวเพิ่มขึ้น แต่ค่าเสถียรภาพลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติ พบว่าความคงยึดมีค่าสูงสุดเมื่อเติมน้ำยางธรรมชาติ 7.5 %

2.7 การใช้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติในประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนายางมะตอยนำโดยการปรับปรุงสมบัติด้วยยางธรรมชาติและเรียกผิวทางซึ่งใช้ยางมะตอยชนิดนี้ว่า วิธีการฉาบผิวทางแบบพาราสเลอรี่ซีล (Para Slurry Seal)

วิธีการฉาบผิวทางแบบพาราสเลอรี่ซีล (Para Slurry Seal) ตามมาตรฐาน DH-S 415-46

พาราสเลอรี่ซีลเป็นวิธีการฉาบผิวทางชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยพาราแอสฟัลต์อิมัลชัน (Para Asphalt Emulsion) มวลรวม (Aggregate) วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler) และสารผสมเพิ่ม (Additive) มีลักษณะแข็งแรง ช่วยให้ผิวทางมีความคงทนสูง ลักษณะผิวหน้าไม่ลื่น ทนต่อการแปรเปลี่ยนของดินฟ้าอากาศและป้องกันน้ำซึม ในการก่อสร้างสามารถเปิดการจราจรได้รวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับพื้นที่ก่อสร้างทั่วไปและย่านชุมชน ใช้สำหรับฉาบเป็นชั้นผิวทาง ผิวไหล่ทาง ด้วยจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของส่วนผสมที่นำมาใช้

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ทำชั้นพาราสเลอรี่ซีลประกอบด้วย

แอสฟัลต์ แอสฟัลต์ที่ใช้คือพาราแอสฟัลต์อิมัลชันที่เป็น Polymer Modified Asphalt Emulsion ชนิด Quick Set ซึ่งผลิตขึ้นมาจากแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 หรือ CSS-1h ผสมกับยางธรรมชาติ (Natural Rubber โดยมีคุณภาพตาม ทล.ก. 405 “Specification for Elastomeric Modified Asphalt Emulsion” ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดง Specification for Elastomeric Modified Asphalt Emulsion ตามมาตรฐาน

DH-SP.405/2538

Item No.	Properties	Unit	Elastomeric Modified CSS-1 or CSS-1h (Quick set)		Test Method
			Minimum	Maximum	
	<u>Test on Emulsion</u>				
1.	Viscosity, Saybolt Furol at 25 C	Sec.	20	100	DH-T. 407
2.	Settlement 7 Days*	% Wt.	-	15	ASTM D 244
3.	Storage Stability Test, 24 hrs**	% Wt.	-	1.5	ASTM D 244
4.	Sieve Test (Retained on 20 Mesh)	% Wt.	-	0.1	ASTM D 244
5.	Particle Charge Test	-	Positive		ASTM D 244
6.	Asphalt Content by Evaporation	% Wt.	60	-	ASTM D 244
7.	Solid Polymer Content	% Wt.	3.5	-	ASTM D 244
	<u>Test on Residue</u>				
8.	Softening point	°C	60	-	ASTM D 36
9.	Elastic Recovery	%	30	-	NLT 329/91***
10.	Penetration, 25 °C, 100 g, 5 sec	0.1mm.	40	100	DH-T 403
11.	Ductility at 25 °C, 5 cm/min	cm.	40	-	DH-T405
12.	Solubility in Trichloroethylene	% Wt.	97.5	-	DH-T 409

หมายเหตุ * การทดสอบ settlement อาจยกเว้นได้ถ้าวัสดุภายใน 7 วัน

** การทดสอบอาจยกเว้นได้ถ้าวัสดุผลิตขึ้นใช้หน้าสนาม (จากมาตรฐาน ASTM D 2397-94) วัสดุสามารถยอมรับได้ถ้าผ่านมาตรฐาน ASTM D 1664 “Standard Test Method Coating and Stripping-mixture”

*** อ้างอิง National Laboratory of Transportation Madrid, Spain.

สารผสมเพิ่ม (Additives) สารผสมเพิ่มใช้เพื่อทำให้แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัวเร็วขึ้นหรือช้าลง หรือใช้เพื่อให้แอสฟัลต์อิมัลชันเคลือบมวลรวมได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณที่ใช้ต้องพอเหมาะเพื่อให้สามารถเปิดการจราจรได้ภายในเวลาที่ต้องการ สารผสมเพิ่มนี้จะใช้หรือไม่ก็ได้แล้วแต่การออกแบบ ซึ่งจะต้องได้รับการเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

น้ำ น้ำที่ใช้ต้องใสสะอาดปราศจากสิ่งเจือปนที่จะก่อให้เกิดผลเสียต่อพาราสเลอร์ซีล

มวลรวม (Aggregate) มวลรวมต้องเป็นหินโมซึ่งแข็ง คงทน สะอาด ปราศจากดินหรือวัสดุไม่พึงประสงค์อื่นใด อาจมีวัสดุผสมแทรกด้วยก็ได้ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติไว้เป็นอย่างอื่น มวลรวมต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีค่า Sand Equivalent เมื่อทดลองตาม ทล.-ท.203 “วิธีทดลองหาค่า Sand Equivalent” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60
- มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตาม ทล.-ท. 202 “วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่มากกว่าร้อยละ 35
- มีค่าส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตาม ทล.-ท. 213 “วิธีการทดลองหาความคงทน(Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ ไม่มากกว่าร้อยละ 9

วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler) วัสดุผสมแทรก เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมต้องใช้ในปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น จะใช้เมื่อต้องการปรับปรุงความสะดวกในการทำงาน (Workability) หรือปรับปรุงขนาดคละ (Gradation)

การใช้งาน

พาราสเลอร์ซีลใช้สำหรับฉาบผิวทางแบ่งเป็น 3 ชนิด มีลักษณะแตกต่างกันตามที่กำหนดในตารางที่ 4 ซึ่งจะแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ขนาดคละของมวลรวม ปริมาณเนื้อยางที่ใช้และอัตราการใช้วัสดุ การที่จะกำหนดให้ฉาบผิวพาราสเลอร์ซีลชนิดใดขึ้นอยู่กับสภาพผิวทางเดิม ปริมาณการจราจรและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน การฉาบผิวพาราสเลอร์ซีลจะต้องเลือกชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งแบ่งได้ดังต่อไปนี้

พาราสเลอร์ซีลชนิดที่ 1 เป็นชนิดที่สามารถแทรกซึมรอยแตกได้ดี ใช้สำหรับฉาบผิวทาง โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ยารอยแตก
- ฉาบเป็นผิวทาง กรณีต้องการปรับปรุง Texture ของผิวทางเดิมเล็กน้อย
- ฉาบป้องกันการเกิด Oxidation หรือ Weathering บนผิวทางเดิม

พาราสเลอร์ซีลชนิดที่ 2 เป็นชนิดที่มีผิวหน้าหยาบกว่าชนิดที่ 1 ใช้สำหรับฉาบผิวทาง หรือผิวไหล่ทาง โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพิ่ม Skid Resistance ของผิวทางเดิม

- ให้ผิวทางระบายน้ำออกไปได้รวดเร็ว
 - ฉาบป้องกันการเกิด Oxidation หรือ Weathering บนผิวทางเดิม
- พาราสเลอรีซีลชนิดที่ 3 เป็นชนิดที่มีผิวหน้าหยาบที่สุด ใช้สำหรับฉาบผิวทาง หรือผิวไหล่ทางโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้
- เพิ่ม Skid Resistance ของผิวทางเดิม
 - ให้ผิวทางระบายน้ำออกไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น
 - ฉาบป้องกันการเกิด Oxidation หรือ Weathering บนผิวทางเดิม
 - ฉาบปรับระดับได้เล็กน้อย
 - ปรับแก้ Crown Slope ได้เล็กน้อย
 - ฉาบปิดผิวทางเดิมที่หลุด (Raveling)

ตารางที่ 4 ขนาดคละของมวลรวม ปริมาณเนื้อยางแอสฟัลต์ และอัตราการฉาบพาราสเลอรีซีล

ผ่านตะแกรงขนาด	ชนิดของพาราสเลอรีซีล		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
	ปริมาณผ่านตะแกรงร้อยละโดยมวล		
9.5 มม. (3/8 นิ้ว)	-	100	100
4.75 มม. (เบอร์ 4)	100	90 – 100	70 – 90
2.36 มม. (เบอร์ 8)	90 – 100	65 – 90	45 – 70
1.18 มม. (เบอร์ 16)	65 – 90	45 – 70	28 – 50
0.600 มม. (เบอร์ 30)	40 – 65	30 – 50	19 – 34
0.300 มม. (เบอร์ 50)	25 – 42	18 – 30	12 – 25
0.150 มม. (เบอร์ 100)	15 – 30	10 – 21	7 – 18
0.075 มม. (เบอร์ 200)	10 – 20	5 – 15	5 – 15
Residue ของแอสฟัลต์ ร้อยละโดยมวลของมวลรวมแห้ง	10.0 – 16.0	7.5 – 13.5	6.5 – 12.0
อัตราการฉาบ เป็น กก./ตร.ม.	3.0 – 5.5	5.5 – 10.0	10.0 – 16.0

ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมพาราสเลอรีซีล

คุณภาพของวัสดุที่จะใช้ออกแบบจะต้องผ่านการทดลองคุณภาพให้ใช้ได้ แล้ว การออกแบบส่วนผสมจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยส่วนผสมพาราสเลอรีซีลต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- เวลาในการผสม (Mix Time) ที่ 25 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 120 วินาที
- ค่า Flow อยู่ระหว่าง 10-20 มิลลิเมตร
- Initial Set ไม่นานกว่า 30 นาที
- เวลาในการบ่ม (Cure Time) ไม่นานกว่า 2 ชั่วโมง
- ค่า Wet Track Abrasion Loss ไม่นานกว่า 500 กรัมต่อตารางเมตร
- ค่า Hubbard Field Stability ที่ 25 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 11.8 กิโลนิวตัน (1,200 กิโลกรัมแรง)

2.8 ยางธรรมชาติ [15, 16]

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้จากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea Brazilliensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ต่อมาได้มีผู้นำมาปลูกที่ทวีปยุโรปและเอเชีย เนื่องจากต้นยางพาราชอบอากาศร้อน ชื้น ดินทรายร่วน ระบายน้ำดี จึงนิยมปลูกแถวเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางทั้งสิ้นประมาณ 12 ล้านไร่ กระจายอยู่ในพื้นที่ 18 จังหวัด ซึ่งถือเป็นผู้ผลิตยางพารารายใหญ่ของโลก น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30 % โดยน้ำหนัก แขนงลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ อายุ และฤดูกาลที่กรีดยาง โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

2.8.1 น้ำยาง (Latex)

เนื่องจากน้ำยางสดที่ได้มาจากการกรีดยางมีน้ำมากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสด จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางที่ได้นี้ว่า น้ำยางสด (concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น โปรตีน และฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถย่อยสลายได้ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ หรือเชื้อแบคทีเรีย ได้เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน

หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบดเน่าส่งกลั่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมแอมโมเนียลงไป หรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่น ๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางชั้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นถึง 0.7% เรียกว่า high ammonia latex (HA latex) และน้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นเพียง 0.2% จะเรียกว่า low ammonia latex (LA latex) อีกทั้งจำเป็นต้องใส่สารเคมีอื่นเพิ่มด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือใช้กรดบอริก 0.2% เป็นต้น

- *ยางแห้ง* เตรียมได้จากการนำน้ำยางสดที่กรีดได้มาเติมกรด เพื่ออนุภาคของยางจับตัวกันเป็นก้อนแข็งแยกตัวออกจากน้ำ จากนั้นจึงทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

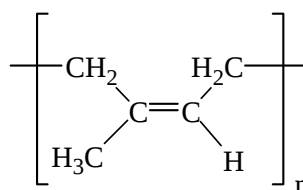
- *ยางแผ่น* เป็นการนำยางแห้งด้วยด้วยเครื่องรีด แล้วทำให้แห้งโดยการนำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น โดยเรียกยางที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (air dried sheet, ADS) หรือหากนำแผ่นยางที่ได้ไปอบรมควันต่อที่อุณหภูมิ 60-70 °C จะเรียกว่า ยางแผ่น

- *ยางเครฟ* เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดในเครื่องเครฟ (creping machine) พร้อมกับทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อเอาสิ่งสกปรกออกจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำไปผึ่งลมให้แห้ง

- *ยางแท่ง* ได้จากการนำยางมาทำให้เป็นก้อนเล็ก ๆ และอบให้แห้งด้วยอากาศร้อน และนำไปอัดเป็นแท่ง ยางแท่งจะมีคุณภาพเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟ เนื่องจากผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ ซึ่งพิจารณาจากปริมาณสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยาง โดยประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานสำหรับยางแท่งซึ่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR)

- *ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่หรือยาง CV (Constant Viscosity)* เนื่องจากยางแห้งเมื่อเก็บไว้นาน ๆ ยางจะเริ่มแข็งขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า storage hardening ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดจากหมู่อัลดีไฮด์ (aldehyde group) ที่มีอยู่ในยางธรรมชาติเข้าไปทำปฏิกิริยาควบนั่นกันเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ดังนั้นจึงป้องกันโดยการเติมสารเคมี เช่น ไฮดรอกซิลลามีน (hydroxylamine) ลงไปในน้ำยางก่อนเติมกรด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์นี้ ทำใหยางที่ได้ค่าความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา

2.8.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ



รูปที่ 8 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส 1,4 พอลิไอโซพรีน (cis 1,4 polyisoprene) ดังรูปที่ 8 กล่าวคือในโมเลกุลของยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง โดยทั่วไปยางธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C และอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72°C

2.8.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ความยืดหยุ่น (elasticity) สมบัติด้านความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกมากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม

ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติ มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความหนืดสูงทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (*dynamic properties*) ของธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (*fatigue resistance*) ที่สูงมากด้วย

ความต้านทานต่อการขัดถู (*abrasion resistance*) ของธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (*insulation*) ของธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (*specific resistivity*) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (*liquid and chemical resistance*) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้ายางเกิดการคงรูป จากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น แต่ยางจะสามารถทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางยังสามารถทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดในتركและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (*aging properties*) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนเป็นเวลานานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางที่ยึดตัวของยาง

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (*low temperature flexibility*) ของธรรมชาติยังคงรักษาสสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก

การยุบจม (*compression set*) ธรรมชาติมีค่าการยุบจมค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง แต่ที่อุณหภูมิต่ำยางธรรมชาติจะมีค่าการยุบจมที่สูงขึ้น เนื่องมาจากการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงยางธรรมชาติจะไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ค่าการยุบจมจึงสูงขึ้น

การกระด้างกระดอน (*rebound resilience*) ของธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง และในระหว่างการเล่นแปรงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำ เมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิต

ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่นยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 ถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่ถ้าอุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะต้องลดลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในการออกสูตรผสมสารเคมียางที่เหมาะสม ยางธรรมชาติอาจสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 หรือ 100°C

อย่างไรก็ตาม ยางดิบยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อได้รับความร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วุลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ จะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย

ประเทศในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีการปลูกยางพารามาก ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีปริมาณการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก โดยในช่วงห้าปีที่ผ่านมา (ปี พ.ศ. 2545-2552) ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตยางธรรมชาติประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณการส่งออกทั่วโลก ยางธรรมชาติจึงจัดเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่เป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญมากของประเทศไทย [18]

2.9 น้ำยางธรรมชาติคงรูป (Pre-vulcanized natural rubber latex) [18]

น้ำยางธรรมชาติคงรูปเป็นการปรับปรุงทางเคมีที่สำคัญของอุตสาหกรรมน้ำยาง ซึ่งส่วนมากมักเป็นการคงรูปด้วยซัลเฟอร์ของน้ำยางธรรมชาติ กระบวนการคงรูปเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนยางจากวัสดุพลาสติกที่ไวต่ออุณหภูมิ (Plastic temperature-sensitive materials) ไปเป็นวัสดุอีลาสติก (Elastic materials) ที่มีประโยชน์ น้ำยางธรรมชาติเป็นน้ำยางประเภทไดอีน (Diene-rubber latex) ซึ่งสามารถทำให้คงรูปภายในอนุภาคได้โดยไม่ทำลายลักษณะที่เป็นสารแขวนลอยคือพอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วยังสามารถกระจายตัวอยู่ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้เรียกว่า น้ำยางคงรูป (Pre-vulcanized latex) ซึ่งถ้าเป็นน้ำยางธรรมชาติจะเรียกว่า PVNR latex หรือ PVNRL

น้ำยางธรรมชาติคงรูปจะเกิดลักษณะพิเศษ 2 ลักษณะ คือ

1. กรณีคงรูปด้วยซัลเฟอร์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำยางจะเกิดมากกว่าที่ได้จากการคงรูปด้วยซัลเฟอร์กับยางแห้ง
2. เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์ในแต่ละอนุภาคนั้น ถูกขัดขวางโดยการเชื่อมขวาง เมื่อน้ำยางธรรมชาติคงรูปแห้ง จะไม่ได้ฟิล์มที่ยึดติดกันแข็งแรงอย่างที่คาดหมายไว้ เพราะฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับฟิล์มที่ได้จากการคงรูปเพียงบางส่วนของยางแห้งหรือจากน้ำยางธรรมชาติหลังการคงรูปแล้ว(Postvulcanization)

น้ำยางธรรมชาติคงรูปจะมีอนุภาคคล้ายกับน้ำยางที่ไม่ผ่านการคงรูป การเชื่อมโยงจะเกิดในแต่ละอนุภาคแยกกัน โดยไม่มีการทำปฏิกิริยากับอนุภาคอื่น ๆ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะการกระจายตัวของอนุภาคอีกด้วย ดังนั้นอนุภาคของน้ำยางธรรมชาติคงรูปจะมีรูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดเหมือนกับน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูป นอกจากนี้อนุภาคของน้ำยางคงรูปยังคงเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion)

การเตรียมน้ำยางธรรมชาติคงรูปมี 3 วิธี คือ

1. ให้อนุภาคของน้ำยางทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาออร์แกนิกสำหรับการคงรูป (Organic vulcanization accelerators) 1 ชนิด หรือมากกว่านั้น และอาจใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาอินออร์แกนิกสำหรับการคงรูป (Inorganic vulcanization activator) ร่วมด้วย
2. โดยการให้ความร้อนน้ำยางกับสารประกอบเช่น ออร์แกนิก เปอร์ออกไซด์ (Organic peroxide) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) และอาจใช้สารกระตุ้นสำหรับสารประกอบประเภทนี้ร่วมด้วย
3. โดยการฉายแสงพลังงานสูงจากอิเล็กตรอน หรือจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) กับน้ำยาง

2.10 ส่วนประกอบของ Latex compounding [18]

2.10.1 สารวัลคาไนซยาง (ซัลเฟอร์)

ซัลเฟอร์เป็นสารวัลคาไนซ์ที่ได้กันอย่างแพร่หลายสำหรับยางและสำหรับยางสังเคราะห์เกือบทั้งหมดที่มีโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์ด้วย ไม่ว่าพอลิเมอร์นั้นจะอยู่ในรูปของลาเท็กซ์หรืออยู่ในรูปของยางแห้งก็ตาม ยางโอเลฟินสังเคราะห์ไม่มียางที่สำคัญได้แก่ synthetic polyisoprene rubber, styrene-butadiene rubber, acrylonitrile-butadiene rubber และ polybutadiene

rubber สำหรับยางโอเลฟินซึ่งไม่อิ่มตัวในรูปของลาเทกซ์มักจะเติมซัลเฟอร์ 1-2 phr โดยซัลเฟอร์ที่ใช้ต้องมีคุณภาพดีและมีการกระจายตัวที่ดีในตัวกลางที่เป็นของเหลว

รายละเอียดทางด้านเคมีและทางด้านเทคโนโลยีเกี่ยวกับ sulphur-vulcanization ของยางนั้นมีการศึกษามานานแล้ว แต่การศึกษาเกือบทั้งหมดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านเคมีของ sulphur-vulcanization ของยางธรรมชาติมักจะศึกษาในรูปแบบของ bulk polymer หรือ ในรูปแบบของสารละลาย แต่อย่างไรก็ตามเชื่อกันว่าแนวคิดที่ค่อย ๆ พัฒนาจากการศึกษานี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับยางธรรมชาติในรูปของลาเทกซ์ได้ และสามารถประยุกต์ใช้ได้กับยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวทั่ว ๆ ไปไปไม่ว่าจะเป็นในรูป bulk polymer หรือ latices ก็ตาม และเป็นที่รู้กันว่า crosslink ที่เกิดขึ้นระหว่าง sulphur-vulcanization ของยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวนั้นแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ monosulphidic, disulphidic และ polysulphidic คำคุณศัพท์นี้ออกเป็นนัยถึงเกณฑ์พื้นฐานที่ใช้แบ่งประเภทคือ จำนวนอะตอมของซัลเฟอร์ที่มีในหนึ่งการ crosslink อัตราส่วนสัมพัทธ์ของ sulphur crosslink ทั้งสามนี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติเชิงกลและ ageing behavior ของยางหลังวัลคาไนซ์แล้ว แม้ว่า polysulphidic crosslink จะให้ค่า tensile strength ที่สูงกว่าที่ทุก ๆ ปริมาณการ crosslink แต่ monosulphidic crosslink จะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า ในกรณีของการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ของยางในรูปลาเทกซ์วิธีการและสภาวะที่ใช้ vulcanization มักจะทำให้เกิด polysulphidic crosslink ในตอนแรก แต่อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ที่บางส่วนจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ไปเป็นชนิดอื่น ๆ เกิดขึ้นระหว่าง post-treatment ของยางที่วัลคาไนซ์แล้ว มีปัจจัยสองปัจจัยที่ทำให้เกิด polysulphidic crosslink ในช่วงแรกมากกว่าการเกิด monosulphidic และ disulphidic crosslink ในการวัลคาไนซ์ในรูปแบบลาเทกซ์ของยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัว โดยปัจจัยแรกคืออัตราส่วนของ vulcanization accelerator ต่อซัลเฟอร์ซึ่งมักจะอยู่ในช่วงที่นักเทคโนโลยียางเรียกว่า conventional มากกว่าจะเป็น efficient vulcanization system ดังนั้นอัตราส่วนของ accelerator ต่อซัลเฟอร์จึงสูงกว่า อีกปัจจัยหนึ่งที่เกิด polysulphidic crosslink มากกว่าคืออุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำมาก

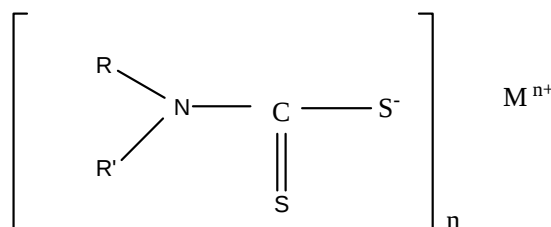
2.10.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยาง

มีสารตัวเร่งปฏิกิริยามากมายที่ใช้ใน sulphur vulcanization ของยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีเพียงตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงที่สุดเท่านั้น ที่มีความสำคัญสำหรับเทคโนโลยีของยางลาเทกซ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์นั้นต่ำมาก ตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สำคัญมากที่สุดคือเกลือของ dithiocarbamic acid ที่มีหมู่แทนที่ซึ่งหลากหลาย เมื่อพิจารณาไอออนบวกของเกลือชนิดนี้ จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ metal ions และ substituted ammonium ions ที่รู้จักกันดีคือเกลือของ dialkyldithiocarbamic acids แต่เกลือที่แทนที่ด้วยกรดอื่น

ๆ ก็ยังเป็นที่สนใจ และ Thiazoles และ thiurum sulphides มักถูกใช้เป็น secondary accelerator ร่วมกับ dithiocarbamates

2.10.2.1 Dithiocarbamates

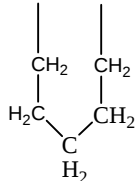
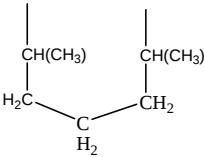
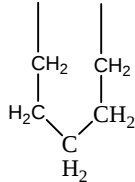
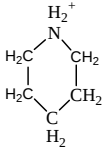
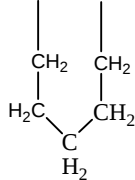
โครงสร้างทั่วไปของเกลือที่แทนที่ด้วย dithiocarbamic acids แสดงดังรูปที่ 9 โดยที่หมู่แทนที่แทนด้วย R และ R' อาจเป็นหมู่ alkyl ซึ่งจะเป็น *n*-alkyl หรือ aromatic ก็ได้ โดยหมู่ทั้งสองมักจะเหมือนกันหรือต่างกันได้ และบางครั้งทั้งหมูนี้อาจเป็นวงที่มีอะตอมของไนโตรเจนอยู่ด้วย ไอออนบวกเป็นได้ทั้ง metal ions หรือ substituted ammonium ion โดยไอออนบวกที่นิยมใช้มากที่สุดคือ zinc (II) ส่วน Sodium และ piperidinium เป็น 2 ชนิดที่รองลงมาของไอออนที่มักพบใน dithiocarbamate vacanization accelerator



รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างทั่วไปของ substituted dithiocarbamic acids [18]

ตัวอย่างของเกลือของ substituted dithiocarbamates ซึ่งเป็น vulcanization accelerator ในเทคโนโลยีของน้ำยางแสดงดังตารางที่ 5 โดยตัวเร่งที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุดคือ zinc diethyldithiocarbamate และรองลงมาคือ zinc di-*n*-butyldithiocarbamate และโดยทั่วไปแล้วความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาของ zinc dialkyldithiocarbarmates ของ sulphur vulcanization ในฟิล์มจากยางลาเทกซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายโซ่ของ alkyl group เพิ่มขึ้น เหตุผลหลักของผลของความยาวของ alkyl chain ที่มีต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาของ sulphur vulcanization คือ ความสามารถในการละลายของ zinc dialkyldithiocarbarmates ในยางซึ่งมีมากขึ้นเมื่อขนาดของหมู่ alkyl เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพฤติกรรมเป็น vulcanization accelerator ในฟิล์มที่ได้จากยางลาเทกซ์นี้ จะมีผลกระทบจากสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ยางหลากหลายชนิดที่มีอยู่ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แอมโมเนียที่เติมเพื่อเป็นสารกันเสีย ดังนั้น zinc diethyldithiocarbamate จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวมากกว่า zinc di-*n*-butyldithiocarbamate ในฟิล์มที่เตรียมจาก de-ammoniated natural rubber latex

ตารางที่ 5 แสดงเกลือบางชนิดของ substituted dithiocarbamic acids ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของ sulphur-vulcanization ที่สำคัญของยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวในรูปของลาแทกซ์ [18]

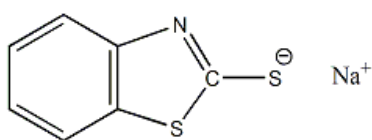
Full name	Abbreviations	M	n	R	R'	I or S*
Zinc dimethyldithiocarbamate	ZDMC, ZDMDC	Zinc(II)	2	-CH ₃	-CH ₃	I
Zinc diethyldithiocarbamate	ZDC, ZDEDC	Zinc(II)	2	-CH ₂ CH ₃	-CH ₂ CH ₃	I
Zinc di-n-butylthiocarbamate	ZDB, ZDBDC	Zinc(II)	2	-CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	-CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	I
Zinc ethylphenylthiocarbamate	ZEPC, ZEPDC	Zinc(II)	2	-CH ₂ CH ₃	-C ₆ H ₅	I
Zinc dibenzylthiocarbamate	ZBEC, ZDBEC	Zinc(II)	2	-C ₆ H ₅	-C ₆ H ₅	I
Zinc pentamethylenedithiocarbamate	ZPD, ZPMDC	Zinc(II)	2			I
Zinc lupetidinedithiocarbamate	ZL, ZLDC	Zinc(II)	2			I
Sodium diethyldithiocarbamate	SDEC	Sodium (I)	1	-CH ₂ CH ₃	-CH ₂ CH ₃	S
Sodium pentamethylene-dithiocarbamate	SPMC, SPMDC	Sodium (I)	1			S
Piperidinium pentamethylene-dithiocarbamate	PPD, PPMDC		1			S

*I=Insoluble in water, S=Soluble in water

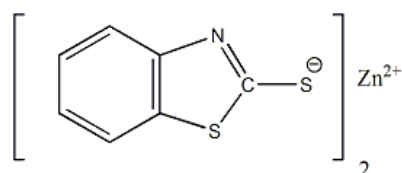
ปริมาณของซัลเฟอร์และ zinc dithiocarbamate accelerator ที่ใช้ในการออกสูตร น้ำยางนั้นมีหลากหลาย ด้วยวิธีนี้จะได้ช่วงของสมบัติที่ต้องการ โดยปริมาณซัลเฟอร์จะอยู่ในช่วง 1-2 pphr และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.5-1.5 pphr การเพิ่มปริมาณทั้งสองส่วนประกอบจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของทั้งอัตราการเกิดการวัลคาไนซ์ และระดับของการวัลคาไนซ์ทุกสภาวะของการวัลคาไนซ์ zinc compound ซึ่งไม่ละลายน้ำโดยเฉพาะ zinc oxide ถูกใช้อย่างแพร่หลายใน rubber latex compound ร่วมกับซัลเฟอร์และ zinc dithiocarbamate accelerator ในปริมาณระหว่าง 0.5-5 pphr โดยมีหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์

2.10.2.2 Thiazoles

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจของ Thiazoles สำหรับ sulphur-vulcanization ของยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวในรูปแบบของลาแทกซ์คือ ทุกอนุพันธ์ของ 2-mercaptobenzthiazole หรือที่เรียกว่า benzthiazole-2-thiol อนุพันธ์ที่สำคัญคือ sodium 2-mercaptobenzthiazole (SMBT) (sodium benzthiazole-2-thiolate) ซึ่งละลายน้ำได้ และ zinc 2-mercaptobenthiozolate (ZMBT) (zinc benzthiazole-2-thiolate) ซึ่งไม่ละลายน้ำ โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 10 สารประกอบทั้งสองนี้มีความว่องไวไม่เพียงพอที่จะใช้ในลาแทกซ์ ประโยชน์หลักคือเป็น secondary accelerator ร่วมกับ dithiocarbamates ซึ่งเป็น primary accelerator ตัว 2-mercaptobenzthiazole เองสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใน latex compound ได้ แต่ต้องระมัดระวังในการใช้ การมีโมเลกุลของ acidic thiol group อยู่ในส่วนผสมสามารถจะเข้าทำปฏิกิริยากับ alkali ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในลาแทกซ์ซึ่งผลของการเกิด alkali 2-mercaptobenthiozolate จะทำให้ค่า pH ลดลง เสถียรภาพของคอลลอยด์ของลาแทกซ์จะลดลงตามในที่สุด ในกรณีร้ายแรงมาก การเติม 2-mercaptobenthiozole จะเกิด thickening หรือ coagulation หรือ gelation ของ carboxylate-stabilized latex และเสถียรภาพเชิงกลของ ammonia-preserved natural rubber latex จะลดลง อย่างไรก็ตามมีการใช้ 2-mercaptobenthiozole ซึ่งเป็นกรดในส่วนผสมบางกรณีโดยเฉพาะในการผลิตโฟมยางซึ่งต้องทำให้เป็นเจลหลังการเติม silicofluoride



I



II

รูปที่ 10 แสดงสูตรโครงสร้างของ sodium 2-mercaptobenzthiazole (SMBT) (I) และ zinc 2-mercaptobenthiozolate (ZMBT) (II) [18]

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าประโยชน์หลักของ thiazole ในเทคโนโลยียางลาเทกซ์คือ เป็น secondary accelerator ที่ทำงานร่วมกับ dithiocarbamates ซึ่งเป็น primary accelerator หลากหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ dithiocarbamates ซึ่งเป็น primary accelerator ซึ่งมีความว่องไวมากด้วย thiazole ซึ่งมีความว่องไวน้อยกว่านั้นมีแนวโน้มทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของระดับของการวัลคาไนซ์หลังจากให้ปฏิกิริยาดำเนินไป และเพิ่มอัตราการแทรกของ crosslinks เข้าไปในโครงร่างตาข่ายของยางด้วย อีกทั้งยังมีหลักฐานยืนยันได้ว่าดังเร่งปฏิกิริยาทั้งสองนี้มีผลส่งเสริมซึ่งกันและกัน (Synergistic effect)

2.10.3 Rubber vulcanization activator

ยางธรรมชาติในรูปแบบของลาเทกซ์นั้น สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยซัลเฟอร์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฟังก์ชันเป็นองค์ประกอบ เช่น zinc thiocarbamate เพียงชนิดเดียว แต่อย่างไรก็ตามจะพบได้ว่าการมีสารประกอบซิงค์ด้วยจะเกิดได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะซิงค์ออกไซด์ ซึ่งประกอบอยู่ด้วยเพื่อเป็นตัวกระตุ้นการวัลคาไนซ์ (vulcanization activator) ผลกระทบของตัวกระตุ้น คือ เพิ่มสมบัติต่าง ๆ เช่น tensile strength และ modulus โดยอัตราการวัลคาไนซ์ได้รับผลเพียงเล็กน้อยจากซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นแต่ค่า tensile strength เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มปริมาณของซิงค์ออกไซด์ ผลกระทบนี้ไม่สามารถพิจารณาให้ซิงค์ออกไซด์มีพฤติกรรมเป็นเหมือนสารเสริมแรงในยางได้ เนื่องจากเติมลงไปปริมาณที่น้อยมากผลกระทบด้านการเสริมแรงจึงไม่น่าจะปรากฏให้เห็น ถ้าต้องการให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความใสมากที่สุด ปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์อย่างน้อยที่สุด 0.5 pphr สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีมอดูลัสสูงและมีค่าการต้านทานการเกิด over-vulcanization ที่ดีควรเติมอย่างน้อย 2.5 pphr

จันทร์ฉาย ทองปิ่น และบุญจิต ศรีนวลสุข [19] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต polymer-emulsified bitumen โดยใช้ยางเหลวอีพอกไซด์ซึ่งสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยแสงยูวี และศึกษาเปรียบเทียบกับการใช้ยางธรรมชาติ น้ำยางเหลว และน้ำยางอีพอกไซด์ โดยทำการทดสอบสมบัติด้านเสถียรภาพและสมบัติของกาก รวมทั้งศึกษาปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโดยแสงยูวีของยางเหลวอีพอกไซด์ในยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งเมื่อผสมน้ำยางชนิดต่างๆ ลงในยางมะตอยอิมัลชันพบว่าระบบอิมัลชันยังคงมีเสถียรภาพดี ส่วนสมบัติของกากยางมะตอยพบว่ายางมะตอยที่ผสมน้ำยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีที่สุด เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับยางมะตอยมากที่สุด การเติมน้ำยางเหลวอีพอกไซด์ในปริมาณมากขึ้น พบว่าระบบอิมัลชันยังคงมีเสถียรภาพแต่จะเกิดการแยกวัฏภาคมากขึ้นด้วย และหลังการฉายแสงยูวีพบว่าสมบัติของกากไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากยางเหลวอีพอกไซด์เกิดการเชื่อมโยงได้น้อยมาก

ดังที่กล่าวมาแล้วน้ำยางธรรมชาติคงรูป เป็นการทำให้ยางธรรมชาติคงรูปในรูปของน้ำยาง ซึ่งทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุล เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนสภาพจากค่อนข้างอ่อน มีความเป็นพลาสติกสูง ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น [20] การปรับปรุงยางมะตอย น้ำด้วยน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปแล้ว ทำใหยางมะตอยมีสมบัติดีขึ้นกล่าวคือ มีความยืดหยุ่นสูง มีแรงยึดเหนี่ยวสูงเป็นตัวประสานที่ดีขึ้น และมีสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของถนนผิวลาดยางมะตอยได้

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูปเป็นสารปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยโดยศึกษาการปรับปรุงยางมะตอยน้ำชนิดประจุบวก (Cationic asphalt emulsion) ทำใหถนนที่มีผิวทางเป็นยางมะตอยชนิดนี้มีคุณภาพ และมีความคงทนมากขึ้น ลดปัญหาผิวทางชำรุดและยืดอายุการใช้งานของถนนผิวลาดยาง อีกทั้งเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติในประเทศอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. น้ำยางธรรมชาติ (Dry Rubber Content, DRC = 60%) ซื้อมาจาก ศูนย์วิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. Polyoxyethylene(40) nonylphenyl ether (Igepal co-890) ใช้เป็นสารปรับเสถียรภาพ น้ำยางได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท คาร์ดิแนล เฮลท์ 222 (ประเทศไทย) จำกัด
3. 50 % Sulphur dispersion ซื้อมาจาก ศูนย์วิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. 50 % zinc oxide (ZnO) dispersion ซื้อมาจาก ศูนย์วิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5. 50 % zinc 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT) dispersion ซื้อมาจาก ศูนย์วิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. 50 % zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC) dispersion ซื้อมาจาก ศูนย์วิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
7. โทลูอีน (Toluene) เกรด commercial บริษัทรีเอเจนท์ เคมีคัล อินดัสทรี จำกัด
8. กรดอะซิติก (Acetic acid Glacial) ซื้อมาจากบริษัท Lab-scan analytical science
9. ยางมะตอยเกรด AC 60/70 ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยลูบเบส จำกัด (มหาชน)
10. เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethylammonium bromide) ซื้อมาจาก บริษัท Fluka
11. โอเลิล เอมีน (Oleyl amine) 70% เกรด Technical บริษัท Fluka
12. เจอนามีน TAP 100 (GENAMIN TAP 100) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทคลาเรียนท์ ประเทศไทย
13. ซิลิโคน แอนติโฟม (Silicone antifoam) ซื้อมาจากบริษัท Aldrich
14. กรดไฮโดรคลอริก 37% เกรด Analytical บริษัท Lab-scan analytical science
15. แคลเซียมคลอไรด์ 97% บริษัท Fluka
16. มวลรวมของโรงโม่หินศิลาพรานกระต่าย ได้รับความอนุเคราะห์จากแผนกผิวทาง สำนักวิเคราะห์และการตรวจสอบ กรมทางหลวง

3.2 เครื่องมือ

1. เครื่องกวนผสม (mechanical stirrer) ยี่ห้อ KIKA WERKE ความเร็วสูงสุด 2,000 รอบ/นาที
2. เครื่อง colloid mill ผลิตโดยบริษัทเจริญทัศน์



รูปที่ 11 แสดงเครื่อง colloid mill จากบริษัทเจริญทัศน์ [21]

3.3 การเตรียมน้ำยางธรรมชาติคงรูป

น้ำยางชั้น 60% DRC จะถูกตรวจสอบหาปริมาณยางแห้ง (%DRC) เริ่มต้นตามมาตรฐาน ASTM D 1076-02 ก่อนนำมาเติมสารเคมีต่าง ๆ ดังตารางที่ 6 โดยลำดับของสารเคมี คือ เติม สารเพิ่มเสถียรภาพ Igepal CO-890 ก่อน จากนั้นจึงเติมตัวกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ ตัวเร่ง ZEDC หรือ ZMBT และซัลเฟอร์ ตามลำดับ โดยเติมสารเคมีแต่ละตัวห่างกัน 5 นาที จากนั้นกวนอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนผสม ด้วยความเร็วรอบ 300 rpm ที่อุณหภูมิห้องและปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณสารเคมีในน้ำยางธรรมชาติสูตรปฐุตร PVNR 1-10

Formula	ZnO (phr)	ZDEC (phr)	ZMBT (phr)	Sulphur (phr)
PVNR 1	1	1	-	1
PVNR 2	1	1	-	2
PVNR 3	1	1	-	1
PVNR 4	1	2	-	1
PVNR 5	1	0.5	0.5	1
PVNR 6	0.5	0.5	-	0.5
PVNR 7	1.5	1.5	-	1.5
PVNR 8	2	2	-	2
PVNR 9	2	2	-	1.5
PVNR 10	2	2	-	0.5

หลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยา น้ำยางธรรมชาติสูตรปฐุตรที่ได้จะถูกตรวจสอบหาค่าการบวมตัว (Swell ratio) และหา % ยางแห้ง (% DRC) ที่แท้จริง ขั้นตอนการเตรียมน้ำยางสูตรและการทดสอบสมบัติของน้ำยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 12 และวิธีการหาปริมาณยางแห้ง (% DRC) และการบวมตัวมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การหาปริมาณยางแห้ง (%DRC) ตามมาตรฐาน ASTM 1076-02

นำน้ำยางประมาณ 10 กรัม ใส่ลงบนจานเพาะเชื้อ เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีเนื้อยางแห้งประมาณ 25 % ค่อย ๆ หยดกรดอะซิติกเข้มข้น 2% w/w ลงไปคนให้เข้ากัน โดยหยดกรดอะซิติกลงไปทั้งหมดประมาณ 80 cm³ นำไปให้ความร้อนด้วยไอน้ำนาน 15-30 นาทีหรือจนยางจับเป็นก้อนทั้งหมด แต่ไม่ควรเกิน 30 นาที จากนั้นนำยางที่จับก้อนแล้วมาล้างโดยให้น้ำไหลผ่าน แล้วรีดเป็นแผ่นหนาไม่เกิน 2 mm นำแผ่นยางที่ได้อบที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 16 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักของยางแห้งที่ได้ และหาปริมาณยางแห้ง (Dry rubber content) จากสมการ ดังนี้

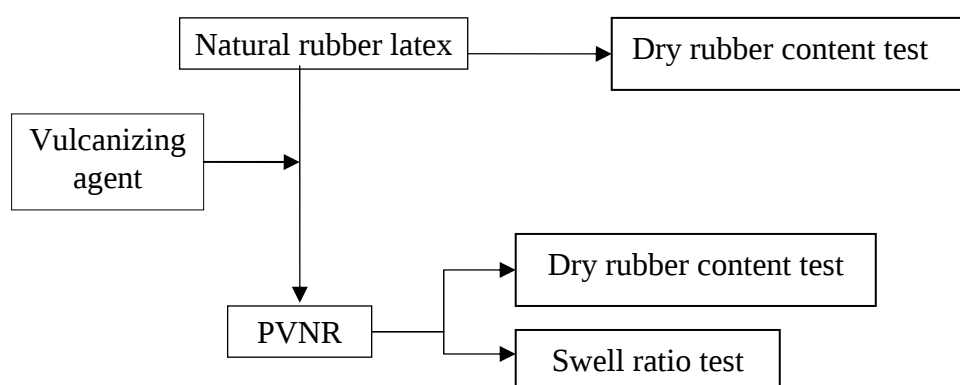
$$\text{Dry rubber content, \%} = \frac{\text{mass of dry coagulum}}{\text{mass of sample}} \times 100$$

3.3.2 การหาค่าการบวมตัว (Swell ratio)

นำน้ำยางธรรมชาติคงรูป 10 กรัม เทลงในจานเพาะเชื้อและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จนได้เป็นฟิล์มยาง นำฟิล์มยางที่ได้ตัดเป็นเป็นรูปทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 เซนติเมตร นำแผ่นฟิล์มยางที่ตัดได้แช่ในโทลูอินเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยชั่งน้ำหนักของแผ่นฟิล์มยางทั้งก่อนและหลังแช่โทลูอิน และค่าการบวมตัว (Swell ratio) สามารถหาได้ดังสมการ

$$\text{อัตราการบวมตัว} = \frac{W_2}{W_1}$$

โดยที่ W_1 คือน้ำหนักของแผ่นฟิล์มยางแห้งก่อนแช่โทลูอิน
 W_2 คือน้ำหนักของแผ่นฟิล์มยางแห้งหลังแช่โทลูอิน



รูปที่ 12 แสดงขั้นตอนการผลิตน้ำยางคงรูป

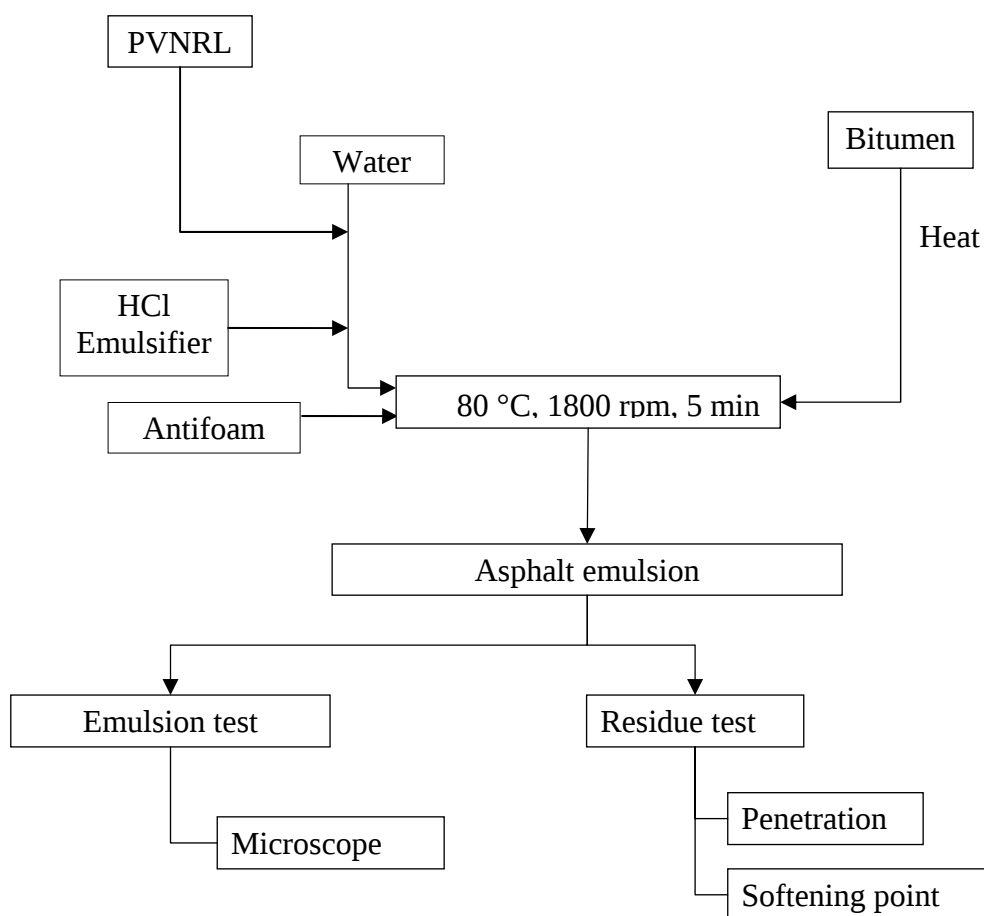
3.4 การเตรียมยางมะตอยน้ำและยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ

ผสม น้ำ อิมัลซิไฟเออร์กรดไฮโดรคลอริก และน้ำยางธรรมชาติคงรูปตามปริมาณในตารางที่ 7 จนเข้ากันโดยจะเรียกส่วนนี้ว่า soap ให้ความร้อนกับยางมะตอยที่อุณหภูมิ 120 °C จนหลอม ซึ่งยางมะตอยที่หลอมแล้วปริมาณ 150 g เเทลงในถังปฏิกรณ์ซึ่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C กวนด้วยความเร็ว 350 rpm เทส่วนของ soap ลงในถังปฏิกรณ์ ค่อย ๆ เพิ่มความเร็วเป็น 1200 rpm โดยใช้เวลากวน 5 นาที จากนั้นเติมสารลดการเกิดฟอง พร้อมกับลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิห้อง แล้วกวนต่อด้วยความเร็ว 500 rpm นาน 5 นาที จะได้ยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ สำหรับยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติและยางมะตอยน้ำที่ไม่ได้ปรับปรุงจะเตรียมถูกขึ้นด้วยวิธีการลักษณะเดียวกันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 7 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ ในการเตรียมยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติคงรูป

Composition	Content (w%)
Asphalt	60
Oleylamine	4.5
HCl	0.6
Latex (% DRC)	3
Antifoam	0.04
Water	31.86

หลังจากนั้นยางมะตอยน้ำและกากของยางมะตอยน้ำที่ได้จะถูกทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังรูปที่ 13 เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารเคมีต่าง ๆ ที่เติมลงในน้ำยางคงรูปที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยน้ำ และได้สูตรของน้ำยางคงรูปที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยน้ำ อีกทั้งเพื่อศึกษาการเพิ่มปริมาณน้ำยางคงรูปที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยน้ำที่ได้



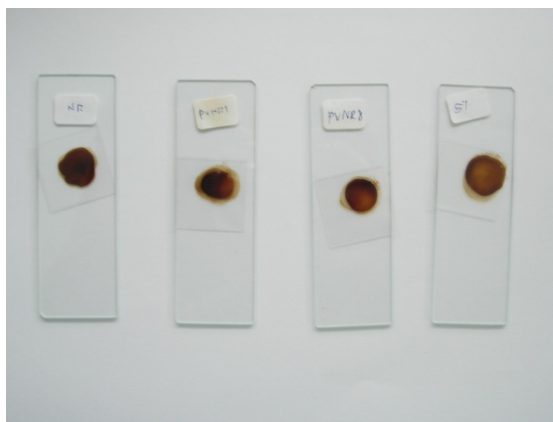
รูปที่ 13 แสดงขั้นตอนการผลิตยางมะตอยน้ำซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปและการทดสอบ

3.5 การศึกษาผลของน้ำยางธรรมชาติคงรูปและปริมาณสารเคมีในการคงรูปที่มีต่อสมบัติของกากของยางมะตอย

หลังจากเตรียมยางมะตอยน้ำและยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคงรูปแล้ว ยางมะตอยน้ำจะถูกนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ และจากนั้นยางมะตอยน้ำและยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคงรูปแล้วจะถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยการเตรียมเป็นฟิล์มของยางมะตอย จากนั้นตรวจสอบลักษณะพื้นฐาน ค่าเพนิเตรชันและจุดอ่อนตัว ดังนี้

3.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของกากยางมะตอย

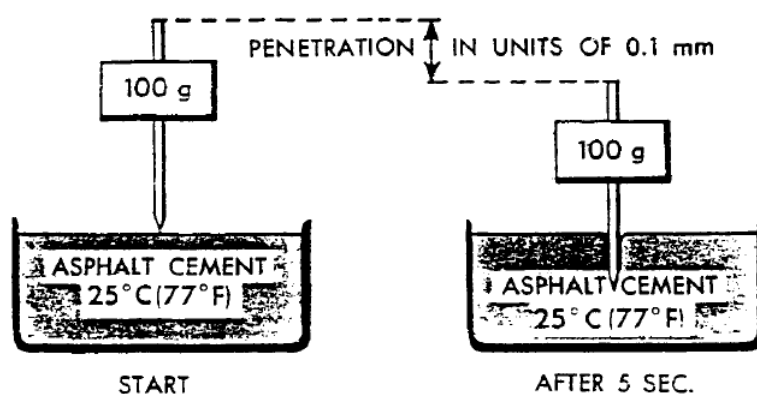
การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพทำได้โดย การให้ความร้อนกับยางมะตอยจนหลอม จากนั้นหยดยางมะตอยลงบนแผ่นกระจก ใช้กระจกอีกแผ่นประกบกดให้เรียบดังรูปที่ 14 นำฟิล์มของยางมะตอยที่เตรียมได้บนกระจกนี้ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 14 แสดงการเตรียมตัวอย่างกากยางมะตอยสำหรับใช้ส่องด้วยกล้อง microscope

3.5.2 ค่าเพนิเทรชัน (Penetration test) ตามมาตรฐาน DH-T 403

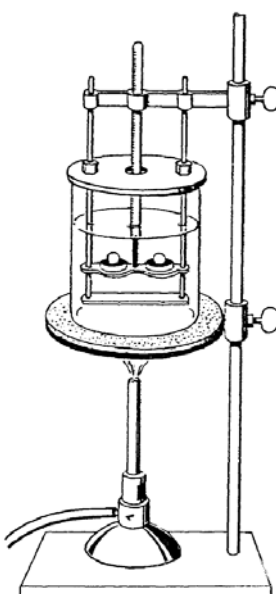
นำตัวอย่างที่ได้จากการหาปริมาณกากมาให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เทตัวอย่างใส่แบบจนเต็มในขณะที่ตัวอย่างยังร้อนอยู่ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แล้วเช็ดน้ำที่ผิวตัวอย่างออกให้หมด เตรียมเข็มมาตรฐานหนัก 100 ± 0.05 กรัม ตั้งหน้าปิดเครื่องทดสอบให้อ่านค่าทดสอบที่ศูนย์ เปิดปุ่มทำงานปล่อยให้เข็มมาตรฐานแทรกลงในตัวอย่างเป็นเวลา 5 วินาที บันทึกค่าที่อ่านได้จากหน้าปิดเครื่องทดสอบ ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงลักษณะของการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลวง [22]

3.5.3 จุดอ่อนตัว (Softening point) ตามมาตรฐาน ASTM D 36

นำตัวอย่างที่ได้จากการหาปริมาณกากมาให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้สบู่อาบบนแผ่นทองเหลืองบางๆ แล้ววางแบบวงแหวนทองเหลืองมาตรฐานลงบนแผ่นทองเหลือง เทตัวอย่างลงในวงแหวนทองเหลืองมาตรฐานให้ล้นออกมาเล็กน้อย ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ใช้มีดบางๆหรือเกียงที่อังไฟให้ร้อนปาดตัวอย่างส่วนที่เกินออกจากแบบให้ผิวตัวอย่างเรียบเสมอกับขอบวงแหวนมาตรฐาน เติมน้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 800 มิลลิลิตร จนมีความสูงประมาณ 105 ± 3 มิลลิเมตร ประกอบเครื่องมือพร้อมด้วยวงแหวนบรรจุตัวอย่าง โดยวางลูกบอลเหล็กมาตรฐานให้อยู่ตรงจุดศูนย์กลางวงแหวนมาตรฐาน และจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ขนาด 100°C ลงในบีกเกอร์ ให้ความร้อนที่ก้นบีกเกอร์โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ 5°C ต่อ นาที บันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์เมื่อลูกบอลเหล็กมาตรฐานตกกระทบก้นบีกเกอร์ ซึ่งจะมีเซนเซอร์บอกสัญญาณเตือนติดอยู่ ลักษณะการตั้งอุปกรณ์และการทดสอบแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงวิธีการทดสอบ Softening point [22]

3.6 การศึกษาสถานะการเตรียมยางมะตอยน้ำและยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติลงรูปด้วย Colloid mill

3.6.1 การศึกษาผลของสารอิมัลซิไฟเออร์

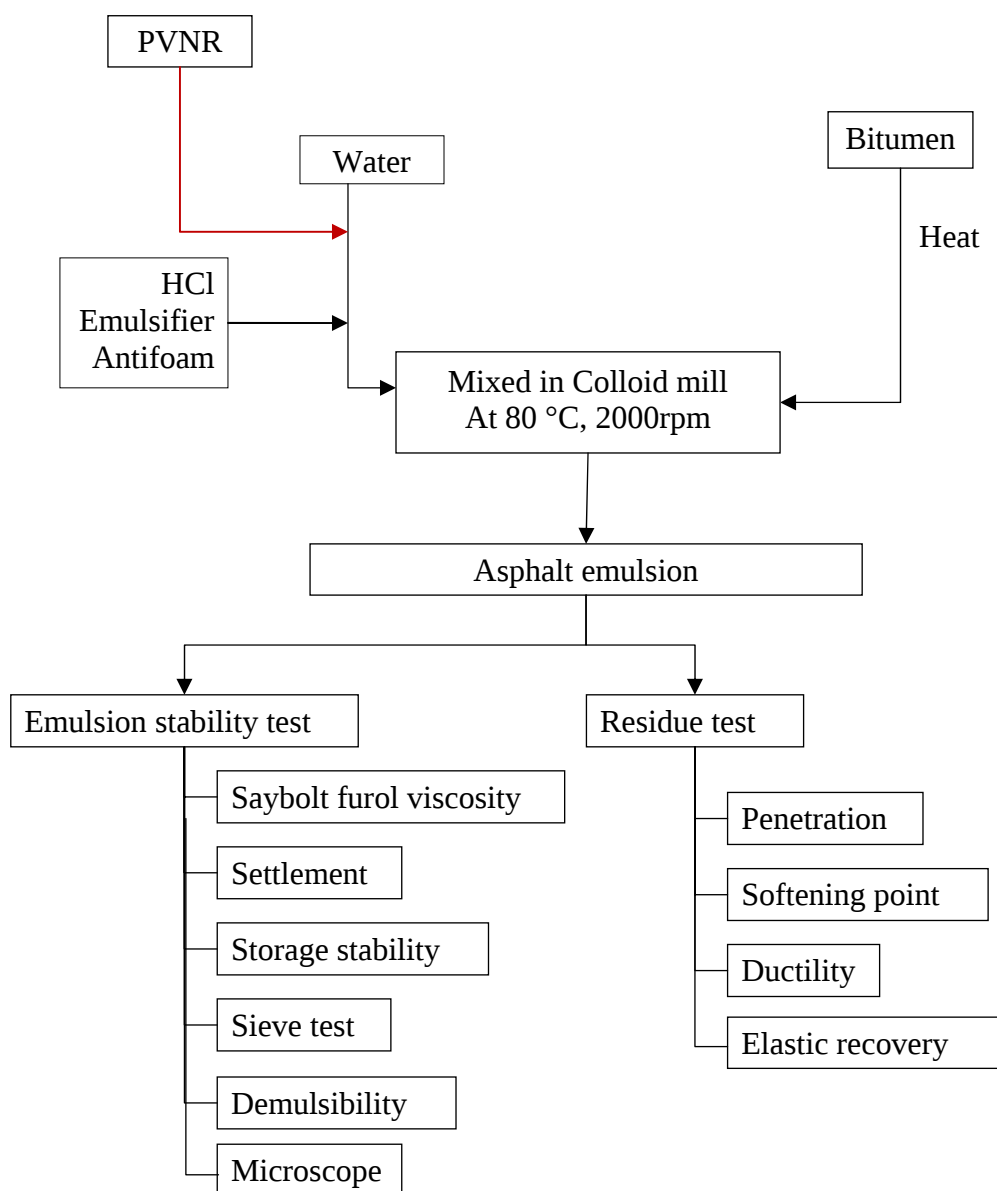
หลังจากได้ผลการทดลองจากตอนที่ 1 ขึ้นต่อไปจะเตรียมยางมะตอยและยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติสูตรที่ดีที่สุด ด้วยเครื่อง colloid mill โดยขั้นแรกจะศึกษาผลของ

ชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยน้ำก่อน ซึ่งสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ศึกษาคือ Oleyamine และ Gernamin TAB 100 โดยส่วนประกอบปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยน้ำ

Fomular Compositions (w/w%)	A	G
Bitumen	60	60
Emusifier		
1.Oleyamine	1.5	-
2.Genamin TAB 100	-	1.5
HCl	0.5	0.5
Antifoam	0.04	0.04
Water	37.96	37.94

การเตรียมยางมะตอยน้ำด้วยเครื่อง colloid mill ทำได้โดยผสมส่วนผสมต่าง ๆ คือ น้ำอิมัลซิไฟเออร์ และกรดไฮโดรคลอริกตามปริมาณในตารางที่ 8 จนเข้ากันโดยจะเรียกส่วนนี้ว่า soap ขณะเดียวกันให้ความร้อนกับยางมะตอยที่อุณหภูมิ 120 °C จนหลอม ซึ่งยางมะตอยที่หลอมแล้วปริมาณ 150 g เทส่วน soap ลงในเครื่อง colloid mill ปั่นด้วยความเร็ว 1600 rpm จากนั้นเทยางมะตอยที่หลอมแล้วลงใน colloid mill เพิ่มความเร็วรอบเป็น 2000 rpm ปั่นจนเป็นเวลา 2 นาทีจะได้ยางมะตอยน้ำ โดยรูปที่ 17 จะแสดงให้เห็นขั้นตอนการผลิตและการทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 17 แสดงขั้นตอนการผลิตยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคิงรูปและการทดสอบสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้

3.6.2 การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยน้ำด้วยน้ำยางธรรมชาติคิงรูป

ทำการเตรียมยางมะตอยน้ำตามส่วนประกอบดังตารางที่ 9 ด้วยเครื่อง colloid mill ตามวิธีดังที่ได้กล่าวมาแล้วและทำการทดสอบเช่นเดียวกัน โดยรายละเอียดของการทดสอบมีดังนี้

ตารางที่ 9 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยน้ำ

Fomular Compositions (w/w%)	A	3PA
Bitumen	60	60
Emusifier		
1.Oleylamine	1.5	1.5
HCl	0.5	0.5
Antifoam	0.04	0.04
PVNRL (%DRC)	-	3
Water	37.96	34.94

3.7 การทดสอบสมบัติของยางมะตอยน้ำที่เตรียมจากเครื่อง Colloid mill

3.7.1 การทดสอบยางมะตอยน้ำ (Test on Emulsion)

3.7.1.1 การทดสอบหาความหนืดแบบเซย์โบลต์ฟูร์ลด ตามมาตรฐาน DH-T 407

กวนตัวอย่างให้ทั่วโดยไม่ให้เกิดฟองแล้วเทตัวอย่างลงในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร แช่ตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วเทตัวอย่างผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 850 ไมครอนลงในเครื่องหาความหนืด กวนตัวอย่างด้วยแท่งแก้วเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ และบันทึกอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ปลูกจุลที่ก้นเครื่องทดสอบพร้อมจับเวลา จนตัวอย่างเต็มเซลล์ บันทึกเวลาที่ได้เป็นวินาที ลักษณะของเครื่องและการทดสอบแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การทดสอบหาความหนืดแบบเซย์โบลต์ฟูร์ลด [22]

3.7.1.2 เสถียรภาพต่อการเก็บ ที่ 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D244

วิธีทดสอบทำโดยคนตัวอย่างให้เข้ากันจากนั้นใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงทั้ง 2 ใบ ใบละ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปิดจุก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่ถูกรบกวน ใช้ปิเปต ค่อยๆ คูดตัวอย่างประมาณ 55 ลูกบาศก์เซนติเมตรของส่วนบนของกระบอกตวงแต่ละใบ ระวังไม่ให้กระเทือนตัวอย่างที่เหลือในกระบอกตวงใส่ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ คนให้เข้ากัน แล้วชั่งตัวอย่างแต่ละส่วนนี้มา 50 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์แต่ละใบที่ทราบมวลแน่นอนแล้ว แล้วนำไปหาปริมาณกากที่เหลือจากการระเหย หลังจากคูดตัวอย่างส่วนบนออกแล้ว ใช้ปิเปตคูดตัวอย่าง 390 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากส่วนบนที่เหลือในกระบอกตวงออก เขย่าตัวอย่างที่เหลืออยู่ในกระบอกตวงแต่ละใบให้เข้ากันแล้ว ชั่งตัวอย่างแต่ละส่วนนี้มา 50 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์แต่ละใบที่ทราบมวลที่แน่นอนแล้ว นำไปหาปริมาณกากที่เหลือจากการระเหย

วิธีคำนวณ

คำนวณการนอนกันเป็นร้อยละจากสูตร

การนอนกัน (24 ชั่วโมง) ร้อยละ = $m_2 - m_1$

เมื่อ m_1 คือ ปริมาณกากที่เหลือของตัวอย่างส่วนบนของกระบอกตวง เป็นร้อยละ

m_2 คือปริมาณการที่เหลือของตัวอย่างส่วนล่างของกระบอกตวง เป็นร้อยละ

3.7.1.3 การแยกชั้น (Settlement) หลังจากเวลา 5 วัน ตามมาตรฐาน ASTM D244

วิธีทดสอบทำโดยคนตัวอย่างให้เข้ากันใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงทั้ง 2 ใบ ใบละ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปิดจุก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน โดยไม่ถูกรบกวน ใช้ปิเปต ค่อยๆ คูดตัวอย่างประมาณ 55 ลูกบาศก์เซนติเมตรของส่วนบนของกระบอกตวงแต่ละใบ ระวังไม่ให้กระเทือนตัวอย่างที่เหลือในกระบอกตวงใส่ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ คนให้เข้ากัน แล้วชั่งตัวอย่างแต่ละส่วนนี้มา 50 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์แต่ละใบที่ทราบมวลแน่นอนแล้ว แล้วนำไปหาปริมาณกากที่เหลือจากการระเหย หลังจากคูดตัวอย่างส่วนบนออกแล้ว ใช้ปิเปตคูดตัวอย่าง 390 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากส่วนบนที่เหลือในกระบอกตวงออก เขย่าตัวอย่างที่เหลืออยู่ในกระบอกตวงแต่ละใบให้เข้ากัน แล้วชั่งตัวอย่างแต่ละส่วนนี้มา 50 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์แต่ละใบที่ทราบมวลที่แน่นอนแล้ว นำไปหาปริมาณกากที่เหลือจากการระเหย

วิธีคำนวณ

คำนวณการนอนกันเป็นร้อยละจากสูตร

การนอนกัน (5 วัน) ร้อยละ = $m_2 - m_1$

เมื่อ m_1 คือ ปริมาณกากที่เหลือของตัวอย่างส่วนบนของกระบอกตวง เป็นร้อยละ

m_2 คือปริมาณการที่เหลือของตัวอย่างส่วนล่างของกระบอกตวง เป็นร้อยละ

3.7.1.4 การรวมตัวของอนุภาคแอสฟัลต์ ตามมาตรฐาน ASTM D244

วิธีทดสอบทำโดยคนตัวอย่างให้เข้ากันแล้วชั่งตัวอย่างในบีกเกอร์ทั้ง 3 ใบ ใบละ 100 ± 0.1 กรัม ทำให้ตัวอย่างและสารละลายไดออกทิลโซเดียมซัลไฟซิกซินิก มีอุณหภูมิ 25 ± 0.5 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมสารละลายไดออกทิลโซเดียมซัลไฟซิกซินิก 35 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในบีกเกอร์แต่ละใบภายในเวลา 2 นาที ขณะเติมสารละลายไดออกทิลโซเดียมซัลไฟซิกซินิกให้คนตัวอย่างแรงๆ อย่างต่อเนื่อง ถ้ามีส่วนที่เป็นก้อน ให้บีบกับผนังบีกเกอร์และเมื่อเติมสารละลายไดออกทิลโซเดียมซัลไฟซิกซินิกหมดให้บีบต่ออีกประมาณ 2 นาที (ในกรณีของแอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชัน ให้ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จำนวน 35 ลูกบาศก์เซนติเมตร แทนสารละลายไดออกทิลโซเดียมซัลไฟซิกซินิก) รินส่วนที่ยังคงเป็นอิมัลชันลงบนแผ่นตะแกรง ล้างตัวอย่างที่ค้างอยู่ในบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่น ใช้น้ำกลั่นฉีดตัวอย่างบีบส่วนที่เป็นก้อนที่ยังคงเหลืออยู่ ล้างตัวอย่าง บีกเกอร์ แท่งโลหะรวมทั้งตะแกรงจนกระทั่งน้ำล้างใส ใส่แผ่นตะแกรงลงในบีกเกอร์ ซึ่งมีตัวอย่างและแท่งโลหะอยู่แล้ว อบพร้อมกันในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 163 ± 5 องศาเซลเซียส จนมวลคงที่

วิธีคำนวณ

คำนวณหาการรวมตัวของแอสฟัลต์เป็นร้อยละโดยน้ำหนัก จากสูตร

$$\text{การรวมตัวของแอสฟัลต์ ร้อยละโดยน้ำหนัก} = \frac{m_1}{m_2} \times 100$$

เมื่อ m_1 คือ มวลค่าเฉลี่ยของกากที่เหลือทั้ง 3 ค่า เป็นกรัม

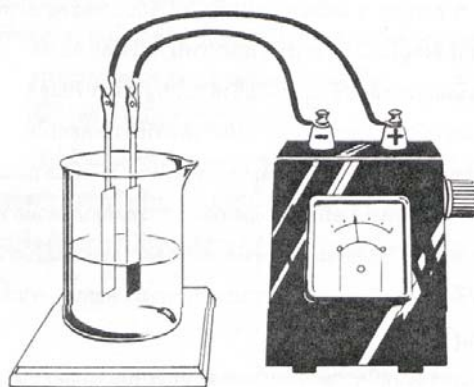
m_2 คือ มวลของกากที่เหลือจากการกลั่น เป็นกรัม

วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณส่วนที่ค้างบนแรงร้อยละ} = \frac{(m_2 - m_1)}{10}$$

m_1 คือ มวลของแรง จานรองโลหะและส่วนที่ค้ำบนแรง เป็นกรัม

การทดสอบประจุนุภาค ใช้ในการระบุขั้วของขั้วนำชนิดแคโทดไอออนิก ทำโดย
การจุ่มขั้วไฟฟ้าบวกหรือแอโนด (Anode) และขั้วไฟฟ้าลบหรือแคโทด (Cathode) ลงในตัวอย่าง
ขั้วและเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงดังแสดงในรูปที่ 19 จากนั้นสังเกตที่
ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ตรวจสอบว่าถ้าเป็นขั้วของขั้วนำชนิดแคโทดไอออนิกก็จะไปเกาะติดอยู่ที่ขั้วแคโทดซึ่ง
เป็นขั้วลบ



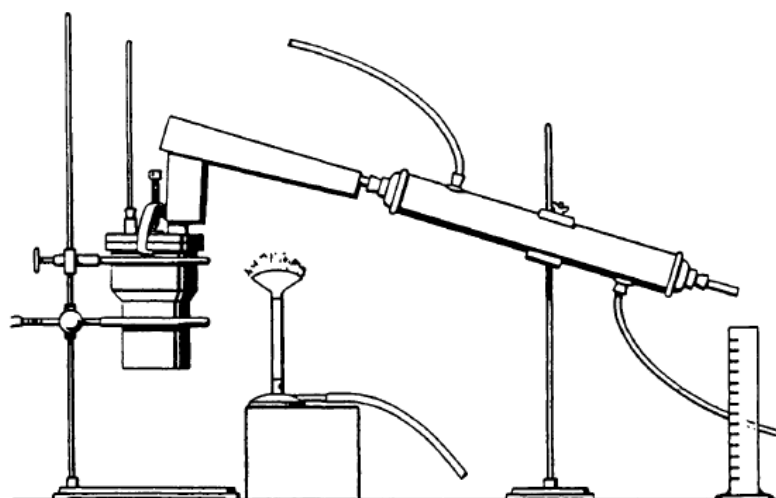
รูปที่ 19 แสดงการทดสอบประจุอนุภาค [6]

3.7.1.7 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยน้ำ

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยน้ำนั้น มีวิธีการเตรียมตัวอย่าง คือ ให้ความร้อนกับยางมะตอยจนหลอม หยดตัวอย่างของยางมะตอยน้ำลงบนกระจกเรียบแล้วปิดประกบด้วยกระจกเรียบอีกแผ่น จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.7.1.8 การทดสอบกาที่เหลือจากการกลั่น

การกลั่นใช้เพื่อแยกน้ำออกจากยางมะตอย สัดส่วนสัมพัทธ์ของยางมะตอยกับน้ำ ในยางมะตอยน้ำก็สามารถวัดค่าได้หลังจากที่ทำการกลั่นเสร็จสิ้นแล้ว อาจมีการทดสอบเพิ่มเติมกับส่วนที่เหลือซึ่งเป็นยางมะตอยเพื่อหาค่าสมบัติทางกายภาพของยางมะตอยที่ใช้งานขึ้นสุดท้าย ในวิธีการทดสอบการกลั่นสำหรับยางมะตอยจะใช้หม้อกลั่นเป็นโลหะอลูมิเนียมผสม และเตาเผาแบบวงแหวนดังรูปที่ 20 โดยทั่วไปแล้วการกลั่นจะทำที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 15 นาที

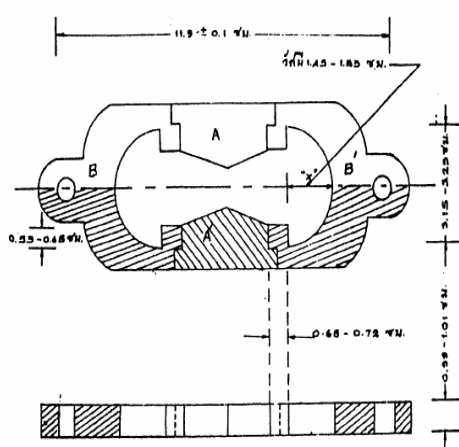


รูปที่ 20 แสดงการทดสอบการกลั่นยางมะตอยน้ำ[6]

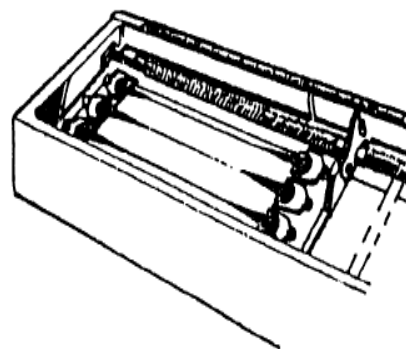
3.7.2 การทดสอบสมบัติของกากยางมะตอย (Test on Residue)

3.7.2.1 ความยืดดึง (Ductility) ตามมาตรฐาน DH-T 405

ทาสบุนแผ่นทองเหลือง และส่วนข้างของแบบหล่อตัวอย่างทางด้านในบางๆ จากนั้นประกอบแบบหล่อตัวอย่างทั้งหมดลงบนแผ่นทองเหลืองดังรูปที่ นำตัวอย่างที่ได้จากการหาปริมาณกากมาให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เทตัวอย่างลงในแบบที่ประกอบไว้ จนกระทั่งตัวอย่างล้นออกมาจากแบบเล็กน้อย ทิ้งตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที นำตัวอย่างแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแล้วใช้มีดบางๆ หรือเกียงที่อังไฟให้ร้อนปาดตัวอย่างส่วนที่เกินออกมาจากแบบให้ผิวหน้าตัวอย่างเรียบเต็มแบบพอดี นำตัวอย่างที่ปาดแล้วไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 13°C เป็นเวลา 90 นาที นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แล้วเอาแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างทั้งสองของแบบออก เอาห่วงที่คล้องปลายของตัวยึดทั้งสองข้างใส่ลงในขอเกี่ยวของเครื่องดึงเค้นเครื่องดึงยึดตัวอย่างด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ 5 เซนติเมตรต่อนาที จนตัวอย่างขาดออกจากกัน บันทึกระยะที่ตัวอย่างยึดจนกระทั่งขาดในหน่วยเซนติเมตร



(a) ลักษณะของแบบหล่อตัวอย่าง



(b) ลักษณะเครื่องมือทดสอบ

รูปที่ 21 แสดงลักษณะของแบบหล่อตัวอย่างและชุดเครื่องมือทดสอบการหาค่า Ductility [6]

3.7.2.2 การคืนสภาพยืดหยุ่นหลังการดึงยึด (Elastic Recovery) ตามมาตรฐาน DH-T 415-48

การคืนสภาพยืดหยุ่นหลังการดึงยึด ใช้วัดความสามารถของหินอย่างในการคืนสภาพกลับสู่ความยาวดั้งเดิมหลังจากการดึงยึดด้วยเครื่องมือการดึงยึด ซึ่งเป็นเครื่องมือเดียวกับ

เครื่องมือเดียวกันกับเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการดึงยืด (Ductility) วิธีการทดสอบทำได้โดยการดึงยืดตัวอย่างจนยืดขาดออกเหมือนเส้นด้ายที่อุณหภูมิกำหนดคือ 25 °C ด้วยอัตราการดึงที่สม่ำเสมอคือ 5 เซนติเมตรต่อนาที ให้ได้ระยะยืด $10 + 0.25$ เซนติเมตร (E) ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงจากที่กำหนดได้ไม่เกิน + ร้อยละ 5 จากนั้นหยุดเครื่องมือไม่ให้มีการยืดของตัวอย่างต่อไป และรีบใช้กรรไกรตัดตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนโดยแบ่งครึ่งที่จุดกึ่งกลาง ปลอຍให้ตัวอย่างทดลองอยู่ในเครื่องดึงตัวอย่างทดลองต่อไปโดยไม่มีการรบกวนที่อุณหภูมิทดลองเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นค่อย ๆ เคลื่อนหัวจับเครื่องดึงกลับมาที่ตำแหน่งที่ปลายของตัวอย่างทดลองเริ่มแตกกัน ถ้าปลายของตัวอย่างทดลองโค้งลง ให้ค่อย ๆ ยกปลายขึ้นมาอยู่ที่ระดับเดิมก่อนที่จะปรับให้ปลายทั้งสองมาแตกกัน แล้วบันทึกระยะยืดกลับของตัวอย่างทดลองที่ปลายทั้งสองเริ่มแตกกัน (X) ในขณะที่ทำการทดลองนั้น น้ำในอ่างน้ำของเครื่องดึงจะต้องท่วมตัวอย่างทดลองทั้งผิวบนและล่างอย่างน้อย 2.5 เซนติเมตร และอุณหภูมิของน้ำจะต้องคงที่ที่อุณหภูมิที่กำหนด คลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.5 องศาเซลเซียสในระหว่างดึงตัวอย่างทดลอง ถ้าเส้นของตัวอย่างทดลองลอยขึ้นหรือจมลงให้ถือว่าทำการทดลองนั้นใช้ไม่ได้ ต้องยกเลิกแล้วทดลองใหม่ โดยปรับความถ่วงจำเพาะของน้ำในอ่างด้วยการเติมเมทานอลในกรณีที่เส้นของตัวอย่างทดลองลอยขึ้น หรือเติมโซเดียมคลอไรด์ในกรณีที่เส้นของตัวอย่างทดลองจมลง จากนั้นตัดชิ้นส่วนบริเวณตรงกลางแล้วจับเวลาตามที่กำหนด จากนั้นวัดตัวอย่างที่เหมือนเส้นด้ายว่าหดกลับเข้าสู่ตำแหน่งดั้งเดิมอย่างไร แล้วรายงานค่าเป็นร้อยละของการคืนสภาพยืดหยุ่น

วิธีการคำนวณ คำนวณค่าร้อยละของความยืดหยุ่นกลับดังนี้

ความยืดหยุ่นกลับ ร้อยละ

เมื่อ E = ระยะยืดเริ่มต้นของตัวอย่างทดลอง เป็นเซนติเมตร

X = ระยะยืดกลับของตัวอย่างทดลองที่ปลายทั้งสองเริ่มแตกกัน เป็นเซนติเมตร

หาค่าเฉลี่ยจากการทดลองปกติ 3 ครั้ง เป็นค่าความยืดหยุ่นกลับของตัวอย่าง

3.7.2.3 ความเหนียวและทนเชิ่ติ (Toughness and Tenacity) ตามมาตรฐาน DH-T.416-48

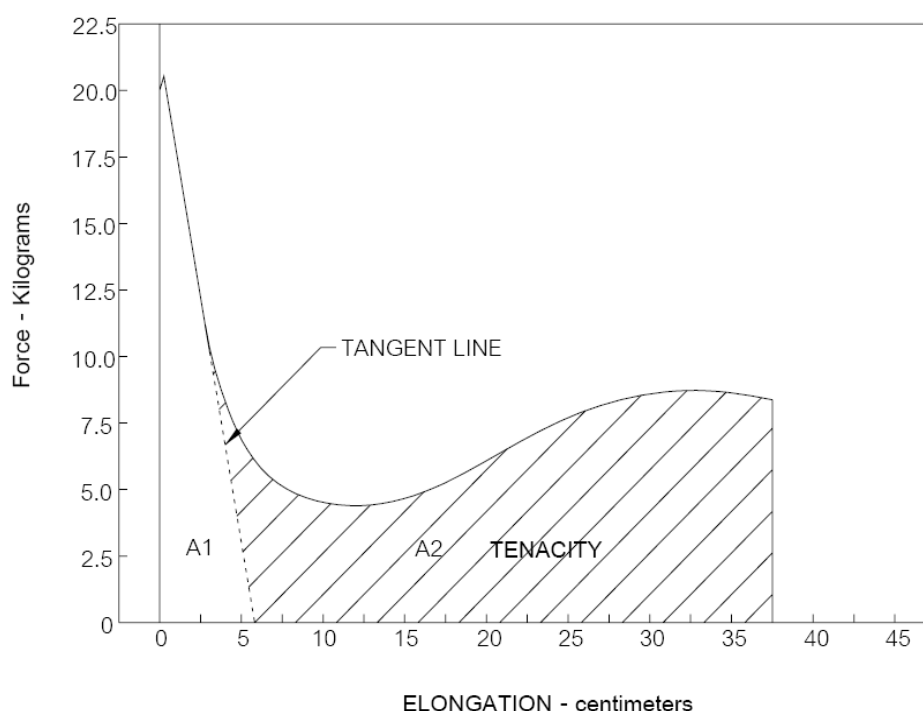
เตรียมตัวอย่างให้อุณหภูมิเหลวพอที่จะเทได้ โดยนำตัวอย่างที่อยู่ในภาชนะบรรจุที่มีฝาปิดอย่างหลวม ๆ ไปอบในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 163 °C จนกระทั่งตัวอย่างเหลวพอที่จะเทได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการให้ความร้อนสูงเฉพาะที่กับตัวอย่าง คนตัวอย่างในภาชนะบรรจุอย่างระมัดระวังโดย

ไม่ให้เกิดฟองอากาศ จนกระทั่งตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน เทตัวอย่างลงในภาชนะใส่ตัวอย่าง ให้ได้มวลตัวอย่าง 36 ± 0.5 กรัม ในแต่ละภาชนะ จำนวน 3 ภาชนะ ระบายหัวคิงที่ประกอบติดตรงกึ่งกลางของอุปกรณ์รองรับหัวคิงลงในภาชนะใส่ตัวอย่างแต่ละภาชนะ ลดระดับของหัวคิงลงโดยหมุนสกรูปรับระดับ (Lowering Screw) ที่มีเกลียว จนกระทั่งขอบระนาบเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวคิงอยู่สูงกว่าระดับตัวอย่างประมาณ 1 มิลลิเมตร นำภาชนะใส่ตัวอย่างพร้อมหัวคิงและอุปกรณ์รองรับหัวคิงเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 163°C เป็นเวลา 15 นาที นำภาชนะใส่ตัวอย่างออกจากตู้อบ ลดระดับของหัวคิงลงจนกระทั่งตัวอย่างอยู่ที่ระดับขอบระนาบเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวคิง ปล่อยให้ตัวอย่างเย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 75 ± 5 นาที นำภาชนะใส่ตัวอย่างวางในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 75 ± 5 นาที เตรียมเครื่องคิงให้สามารถคิงได้ด้วยอัตราเร็ว 50 เซนติเมตรต่อนาที ปรับการบันทึกผลให้เริ่มต้นที่ตำแหน่งศูนย์ นำภาชนะใส่ตัวอย่างออกจากอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ และรีบนำไปวางในเครื่องคิง อาจจำเป็นต้องนำอุปกรณ์รองรับหัวคิงที่อยู่ตรงกลางออกก่อนที่จะวางตัวอย่างในเครื่องคิง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ คิงหัวคิงออกจากตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 50 เซนติเมตรต่อนาที บันทึกเส้นกราฟระหว่างแรงกับระยะที่ยืดออก คิงต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างขาด หรือแรงกลับมายุ่งที่ศูนย์ หรือถึงระดับขีดจำกัดการยืดออกของเครื่องคิง เวลาที่ใช้ในการนำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำปรับอุณหภูมิจนกระทั่งเริ่มคิง จะต้องไม่เกิน 3 นาที ในขณะที่นำภาชนะใส่ตัวอย่างออกจากอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ ถ้าให้มีน้ำอยู่ที่ผิวบนของภาชนะใส่ตัวอย่าง จะช่วยรักษาอุณหภูมิที่ผิวบนของตัวอย่าง



รูปที่ 22 แสดงตัวอย่างการทดสอบความเหนียวและเทนซิตี [23]

โดยความเหนียวของตัวอย่าง หมายถึง งานที่เกิดขึ้นจากแรงที่ใช้ดึงหวัคิงภายใต้ ภาวะทดลองที่กำหนดซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดระหว่างแรงกับระยะที่ยืดออก ส่วน เทนซิตีของตัวอย่าง หมายถึง งานที่เกิดขึ้นในการยืดตัวอย่างออกหลังจากที่ได้ผ่านจากความต้านทานแรงดึงเริ่มต้น ซึ่งคำนวณได้จากการลากเส้นสัมผัสต่อของกราฟระหว่างแรงกับระยะที่ยืดออก จากแรงที่มีค่าสูงสุดและลดลงจนกระทั่งเส้นสัมผัสตัดกับแกนของแรงที่มีค่าเป็นศูนย์ พื้นที่ใต้ กราฟไปทางขวาของเส้นสัมผัสเป็นค่าเทนซิตีของตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างของกราฟระหว่างแรงกับ ระยะที่ยืดออกของอิลาสโตเมอร์มอดิฟายด์เอสฟลด์ตัวอย่างหนึ่งได้แสดงในรูปที่ 23 ในรูปนี้ได้ แสดงตัวอย่างของวิธีการลากเส้นสัมผัสเพื่อคำนวณค่าเทนซิตี หาค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง เป็นค่าความเหนียวและเทนซิตีของตัวอย่าง ถ้าตัวอย่างทดลอง 1 ใน 3 มีการขาดก่อนเมื่อเทียบกับ เส้นกราฟอีก 2 ตัวอย่าง จะไม่นำค่านั้นมาพิจารณา และให้รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ ถูกต้อง 2 คำนั่น



รูปที่ 23 แสดงตัวอย่างกราฟค่าความเหนียวและเทนซิตีของอิลาสโตเมอร์มอดิฟายด์เอสฟลด์
พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด ($A1 + A2$) คือ ค่าความเหนียว
พื้นที่ใต้กราฟไปทางขวาของเส้นสัมผัส ($A2$) คือ ค่าเทนซิตี [24]

3.7.2.4 ความสามารถในการละลายในโทลูอิน ตามมาตรฐาน ASTM D 5546-01

วิธีนี้เป็นการทดสอบปริมาตรการละลายของยางมะตอยในโทลูอิน โดยใช้การแยกโดยการปั่นเหวี่ยง (centrifugal separation) การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยให้ความร้อนกับตัวอย่างจนหลอมแต่ไม่ควรมากกว่าจุดอ่อนตัว (softening point) เกิน 100°C เทตัวอย่างประมาณ 2 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL โดยบันทึกน้ำหนักที่แท้จริงของตัวอย่างให้ถึงหน่วยมิลลิกรัม ค่อย ๆ เติมโทลูอิน 100 mL พร้อมกับเขย่าอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งก้อนยางมะตอยหายไปและไม่มีตัวอย่างติดที่ภาชนะ ปิดภาชนะแล้วทิ้งไว้ 15 นาที เทสารละลายลงในหลอดปั่นเหวี่ยง 2 หลอดที่ทราบน้ำหนักแล้ว ใช้ตัวทำละลายล้างหลอดเพื่อให้แน่ใจว่าสารที่ไม่ละลายได้ถูกเทลงในหลอดปั่นเหวี่ยงทั้งหมดแล้ว จากนั้นเติมตัวทำละลายจนเต็ม 100 mL ปิดหลอดให้แน่น นำหลอดทั้งสองวางในเครื่องปั่นในตำแหน่งตรงข้ามกันเพื่อความสมดุล และปั่นนาน 10 นาทีด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสมซึ่งก่อให้เกิดแรงขนาด 700 ด้วยการคำนวณโดยให้ความเร็วที่ต้องการในหน่วยรอบต่อนาที (r/min) สามารถหาค่าได้จาก

$$r/min = 1335 \frac{\sqrt{rcf}}{d}$$

โดยที่ rcf = relative centrifugal force (700)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของการเหวี่ยง (mm) ซึ่งวัดระหว่างจุดปลายของหลอดที่อยู่ตรงข้ามกันเมื่ออยู่ในตำแหน่งหมุน

หลังจากปั่นเหวี่ยงตัวอย่างแล้วตรวจสอบแต่ละหลอด แล้วรินของเหลวที่ได้ออกจากหลอดปั่นเหวี่ยงโดยไม่รบกวนระบบ เติมโทลูอินลงในหลอดเพื่อล้างตะกอนที่เกิดขึ้น ทำการปั่นเหวี่ยงและล้างอีกครั้ง จากนั้นนำหลอดปั่นเหวี่ยงพร้อมกับตะกอนที่ล้างแล้วนั้นอบที่อุณหภูมิ 130 °C นาน 20 นาที ปล่อยให้เย็นใน desiccator อย่างน้อย 30 นาทีแล้วชั่งน้ำหนัก อบและชั่งซ้ำจนน้ำหนักคงที่

คำนวณเปอร์เซ็นต์การละลายในโทลูอินดังนี้

$$\% \text{ soluble} = 100 - \left(\frac{A}{B} \times 100 \right)$$

โดยที่ A = น้ำหนักของวัสดุทั้งหมดที่ไม่ละลายน้ำ
 B = น้ำหนักของตัวอย่าง

3.7.2.5 ค่าเพนิเทรชัน (Penetration test) ตามมาตรฐาน DH-T 403 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.2

3.7.2.6 และจุดอ่อนตัว (Softening point) ตามมาตรฐาน ASTM D 36 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.3

3.8 การศึกษาการนำยางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคงรูปไปใช้จริง

การศึกษาการนำยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคงรูปไปใช้จริง สามารถทำได้โดยการนำยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคงรูปผสมกับมวลรวม (Aggregate) หรือหินซึ่งมีคุณภาพตามที่กำหนดและทดสอบหา Mixing time, Set time, Cure time และ Wet track abrasion ดังนี้

3.8.1 Mixing time

ทำการทดลองโดยใช้มวลรวม (Aggregate rock) ชนิดพาราสเลอริซิลชนิดที่ 2 ปริมาณ 200 กรัม และสารตัวเติมคือ Portland cement ปริมาณ 2 กรัม เติมนลงในภาชนะกวนจนเข้ากัน จากนั้นเติมน้ำปริมาณ 10 กรัม กวนให้เข้ากันนาน 30 วินาที จากนั้นเติมยางมะตอยอิมัลชันปริมาณ 21 กรัม กวนด้วยมือในอัตรา 60-70 ครั้งต่อนาที จนกระทั่งยางมะตอยอิมัลชันแตกตัว Mixing time คือเวลาเริ่มต้นตั้งแต่เริ่มกวนส่วนผสมทั้งหมดจนถึงเวลาที่ยางมะตอยแตกตัว (Breakdown) การแตกตัวของยางมะตอยนั้น สังเกตได้จากยางมะตอยอิมัลชันซึ่งเป็นของเหลวจะเปลี่ยนเป็นของแข็งเคลือบบนผิวของมวลรวมคล้ายกับบอล โดยแผนกผิวทางของกรมทางหลวงกำหนดให้ Mixing time ของพาราสเลอริซิลชนิดที่ 2 อยู่ในช่วง 2 ถึง 4 นาที

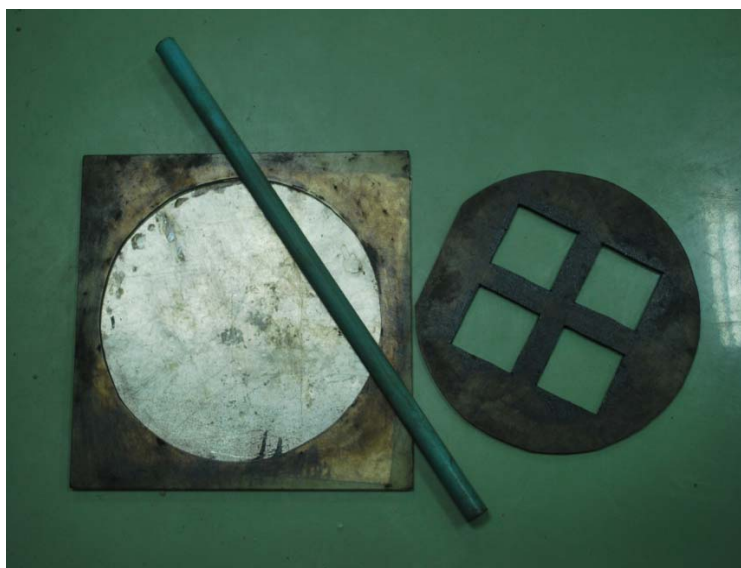
3.8.2 Set time ตามมาตรฐาน ASTM D 3910-98

Set time จะทดสอบโดยใช้วิธี paper blot method โดยใช้ส่วนประกอบเช่นเดียวกับการทดสอบ Mixing time คือมวลรวม 200 กรัมผสมกับสารตัวเติม 2 กรัม กวนให้เข้ากัน เติมน้ำ 10 กรัม

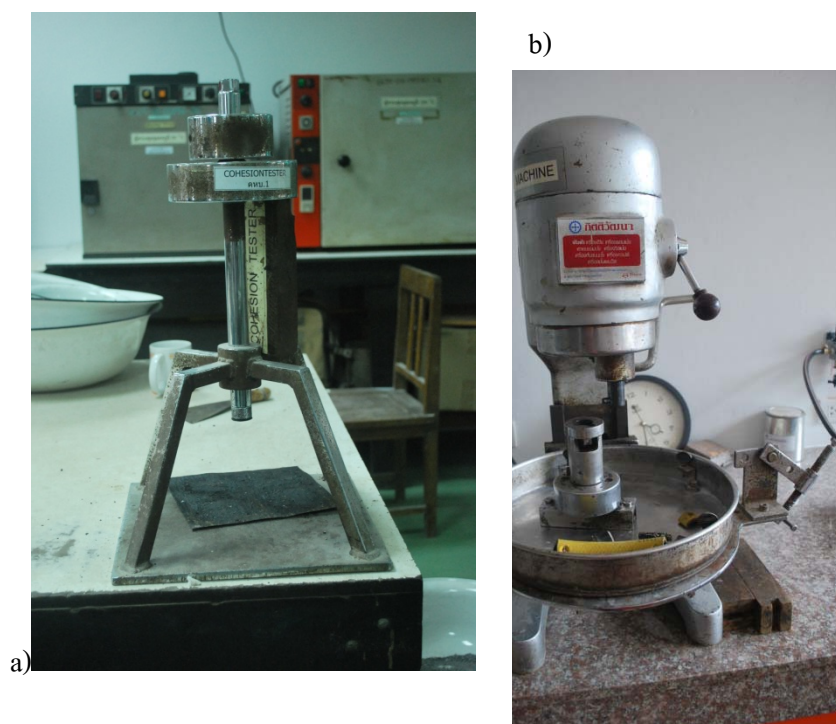
ลงไป กวนนาน 30 วินาที จากนั้นเติมยางมะตอยอีมีลชันปริมาณ 21 กรัมลงไปกวนให้เข้ากันนาน 1 นาที จากนั้นเทส่วนผสมทั้งหมดลงในแม่พิมพ์ขนาดกว้าง 6 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว ลึก $\frac{1}{4}$ นิ้ว ปาดให้เรียบ ใช้กระดาษทิชชูสีขาวซับผิวหน้าทุก ๆ 5 นาที เมื่อไม่มีสีน้ำตาลของยางมะตอยอีมีลชันติดมากับกระดาษทิชชูให้ถือว่าเป็นเวลาที่ยางมะตอยอีมีลชันเซต และให้เวลาที่ได้นั้นเป็น Set time โดยการทดสอบทำที่อุณหภูมิ $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %

3.8.3 Cure time ตามมาตรฐาน ASTM D 3910-98

สเลอรี่จะเกิดการบ่มตัว (Cure) ก็ต่อเมื่อยางมะตอยและมวลรวมประสานกันอย่างสมบูรณ์ เครื่องทดสอบการยึดติด (Cohesion tester) ถึงถูกนำมาใช้ทดสอบ Cure time หลังจากทดสอบ Set time แล้ววางชิ้นงานที่ Set แล้วไว้ได้ rubber foot ของเครื่อง cohesion tester หมุน hand torque tester แล้วอ่านค่า torque สูงสุดที่ได้ ทำซ้ำทุก ๆ 15-30 นาที จนได้ค่า torque สูงสุดที่คงที่ Cure time คือเวลาที่ได้อ่านค่า torque สูงสุดที่คงที่หรือจนกระทั่ง rubber foot หมุนได้อย่างอิสระโดยก้อนหินไม่เคลื่อนที่แยกออก



รูปที่ 24 แสดงอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ Cure time และ Wet track abrasion



รูปที่ 25 แสดงเครื่อง a) cohesive tester และ b) Wet track abrasion tester

3.8.4 Wet track abrasion test ตามมาตรฐาน ASTM D 3910-98

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ Wet track abrasion นั้นจะใช้ส่วนผสมเช่นเดียวกับการทดสอบ Mixing time, Set time และ Cure time แต่เพิ่มอัตราส่วนขึ้น คือ ใช้มวลรวม 800 กรัมผสมสารตัวเติม 8 กรัมกวนให้เข้ากัน เติมน้ำ 40 กรัม กวนนาน 1 นาที จากนั้นจึงเติมยางมะตอยอีมีลชัน 84 กรัม กวนนาน 30 วินาที เทส่วนผสมทั้งหมดลงในแม่พิมพ์ poly(methyl) methacrylate (PMMA) รูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 286 mm (11¼ in) ปาดส่วนที่เกินออก ปล่อยให้ชิ้นงานตัวอย่างเซตตัวแล้วจึงยกแม่พิมพ์ออก จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 15 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน นำชิ้นงานที่เย็นแล้วแช่ในอ่างน้ำ 1 ชั่วโมงแล้วนำชิ้นงานวางลงในจานรองของเครื่องขัดลอคชิ้นงานให้แน่น เติมน้ำสูงประมาณ 6 mm (1/4 in) ล็อคหัวขัดของเครื่องซึ่งเป็นท่อยางให้แน่น ปรับระดับของท่อยางให้สัมผัสกับชิ้นงานพอดี เปิดเครื่องให้ขัดชิ้นงานนาน 5 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ขัดแล้วล้างเศษที่หลุดออกมาให้หมดแล้วนำไปอบที่ 25°C นาน 15 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่สูญเสียไปซึ่งคิดในหน่วยกรัมต่อตารางเมตรหรือตารางฟุตจะเรียกว่า wear value (WTAT)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตยางมะตอยอิมัลชัน (Asphalt emulsion or Emulsified bitumen) ซึ่งโดยทั่วแล้วการผลิตยางมะตอยอิมัลชันนั้นมักจะมีการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์หลากหลายชนิด เช่น ด้วยสไตรีน-บิวตะไดอิน โคพอลิเมอร์ (SBS) สไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน โคพอลิเมอร์ (SEBS) เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) และเอทิลีนบิวทิลอะครีเลต (EBA) ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย และมีความเป็นไปได้สูงในการนำยางธรรมชาติซึ่งอยู่ในรูปลาแทกซ์มาเป็นสารปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอยอิมัลชัน ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [19] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต polymer-emulsified bitumen โดยใช้น้ำยางเหลืองพอกไซค์ซึ่งสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยแสงยูวี และศึกษาเปรียบเทียบกับการใช้ยางธรรมชาติ น้ำยางเหลือง และน้ำยางพอกไซค์ โดยทำการทดสอบสมบัติด้านเสถียรภาพและสมบัติของกาก รวมทั้งศึกษาปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโดยแสงยูวี ของยางเหลืองพอกไซค์ในยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งเมื่อผสมน้ำยางชนิดต่าง ๆ ลงในยางมะตอยอิมัลชันพบว่าระบบอิมัลชันยังคงมีเสถียรภาพดี ส่วนสมบัติของกากยางมะตอยพบว่ายางมะตอยที่ผสมน้ำยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะใช้น้ำยางคงรูป (Pre-vulcanized Natural Latex, PVNRL) เนื่องจากมีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลแล้วบางส่วน ทำให้มีสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอตามลำดับดังนี้

- ผลของการเตรียมน้ำยางคงรูป และการวิเคราะห์ผลของสารตัวเติมที่มีต่อการบวมตัวของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติคงรูป
- การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน ด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป (PVNR Modified Asphalt Emulsion) โดยการเตรียมในถังปฏิกรณ์
- การผลิตยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปด้วยเครื่อง colloid mill

- การทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการใช้งานจริงของยางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป
- ผลการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานของยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปในผิวทางพาราเลลเลอร์ซีลประเภทที่สอง

4.1 ผลของการเตรียมน้ำยางคงรูปและการวิเคราะห์ผลของสารตัวเติมที่มีต่อการบวมตัวของน้ำยางธรรมชาติคงรูป

ลักษณะทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคงรูปแสดงดังรูปที่ 26 ซึ่งจะเห็นได้ว่า หลังจากผ่านกระบวนการ vulcanization บางส่วนแล้วลักษณะทางกายภาพของน้ำยางทั้งสองยังมีลักษณะไม่แตกต่างกัน แสดงว่าน้ำยางธรรมชาติคงรูปยังมีลักษณะเป็นตาแตกซ์ที่มีเสถียรภาพเช่นเดียวกับน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากน้ำยางธรรมชาตินั้นมีขนาดอนุภาคเล็กมากไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้อง Microscope

a)



b)



รูปที่ 26 แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติ (a) น้ำยางธรรมชาติคงรูป (b) จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 50 เท่า

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการคงรูปของน้ำยางธรรมชาตินั้น มีผลอย่างมากต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางธรรมชาติคงรูปนั้น ทั้งสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และตัวเสริมแรงต่าง ๆ [17] ฉะนั้นการศึกษา

ชนิดและปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ จึงมีความสำคัญ ในการทดลองนี้จะศึกษาปริมาณสารเคมีต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของน้ำยางคงรูป ซึ่งได้แก่ อัตราการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติคงรูป และสมบัติของกากของยางมะตอย ซึ่งผลของปริมาณสารเคมีต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติคงรูป แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงส่วนประกอบของสารเคมีในน้ำยางธรรมชาติคงรูป และค่าการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR1-PVNR10

Formula	ZnO (phr)	ZDEC (phr)	ZMBT (phr)	Sulphur (phr)	Swell ratio
PVNR 1	1	1	-	1	9.03
PVNR 2	1	1	-	2	11.49
PVNR 3	2	1	-	1	8.87
PVNR 4	1	2	-	1	9.14
PVNR 5	1	0.5	0.5	1	6.38
PVNR 6	0.5	0.5	-	0.5	11.65
PVNR 7	1.5	1.5	-	1.5	6.51
PVNR 8	2	2	-	2	6.37
PVNR 9	2	2	-	1.5	10.24
PVNR 10	2	2	-	0.5	11.30

อัตราการบวมตัวนั้น สามารถแสดงถึงปริมาณการเชื่อมโยงของเนื้อยางธรรมชาติได้ กล่าวคือ ยางธรรมชาติคงรูปที่มีอัตราการบวมตัวต่ำจะมีปริมาณการเชื่อมโยงมาก จากตารางที่ 10 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- การเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์จาก 1 phr ในสูตร PVNR1 เป็น 2 phr ในสูตร PVNR2 อัตราการบวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณซัลเฟอร์ที่มากเกินไปจึงอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบ polysulphilic ได้มากขึ้น อัตราการบวมตัวจึงมากขึ้น
- การเพิ่มปริมาณตัวกระตุ้นซึ่งคือนิกโคตในน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR3 นั้น ทำให้อัตราการบวมตัวลดลง ทั้งนี้เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งมีความแข็งสูง เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์การบวมตัวในโทลูอีนซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วอัตราการบวมตัวจึงลดลงเล็กน้อย

- การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC) เป็น 2 phr ในน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR4 มีอัตราการบวมตัวไม่ต่างจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 1 phr ในน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR1 ตัวเร่งปฏิกิริยามีหน้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจึงน่าจะเกิดได้มากขึ้น แต่ในที่นี้ปริมาณสารเคมีอื่น คือ ตัวกระตุ้นและซัลเฟอร์มีอยู่จำกัด ทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างจากสูตร PVNR1 มากนัก อัตราการบวมตัวของน้ำยางธรรมชาติคงรูปทั้งสองสูตรจึงไม่แตกต่างกัน
- สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZDEC เพียงตัวเดียวในสูตร PVNR1 และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมระหว่าง ZDEC และ zinc 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT) ในสูตร PVNR5 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกัน มีอัตราการบวมตัวที่ต่ำกว่า เนื่องจากการแทนที่ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท Dithiocarbamate คือ ZDEC ด้วย Thiazoles อย่าง ZMBT นั้นทำให้มีการเพิ่มขึ้นของระดับของการวัลคาไนซ์หลังการทำปฏิกิริยา และเพิ่มอัตราการแทรกตัวของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล เข้าไปในโครงร่างตาข่ายของการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติอีกด้วย [17]
- น้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR6 ซึ่งมีปริมาณสารเคมีทั้งสามคือ ตัวกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยา ZDEC และซัลเฟอร์ อย่างละ 0.5 phr มีค่าการบวมตัวที่สูงกว่าน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR1, PVNR7 และ PVNR8 ซึ่งมีสารเคมีทั้งสามในปริมาณ 1, 1.5 และ 2 phr ตามลำดับโดยน้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR8 มีค่าการบวมตัวต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการมีปริมาณสารเคมีที่มากกว่า ย่อมเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางธรรมชาติมากกว่า
- ปริมาณซัลเฟอร์มีผลต่อการบวมตัว คือ เมื่อปริมาณตัวกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ที่ ZDEC 2 phr การลดปริมาณซัลเฟอร์ทำให้การบวมตัวมากขึ้น เนื่องจากการเติมซัลเฟอร์ในปริมาณที่น้อยเกินไปนั้นจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลได้น้อยลงนั่นเอง

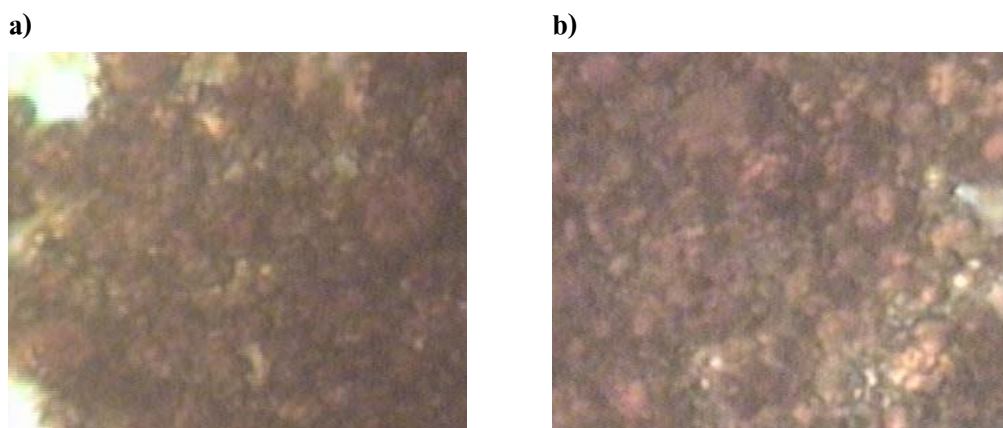
4.2 การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยางธรรมชาติคังรูป (PVNR Modified Asphalt Emulsion) โดยการเตรียมในถังปฏิกรณ์

การเตรียมยางมะตอยอิมัลชันในถังปฏิกรณ์นั้น ทำได้โดยการนำยางมะตอยซึ่งหลอมแล้ว ผสมกับของผสมระหว่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สารลดการเกิดฟอง กรดไฮโดรคลอริก น้ำ และใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นตัวปรับปรุงคุณสมบัติ กวนในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 80 °C ด้วยเครื่อง mechanical stirrer ที่ความเร็วรอบ 1800 rpm เป็นเวลา 15 นาที โดยมีส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงส่วนประกอบของสารเคมีและปริมาณที่ใช้ผลิตยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางคังรูป

Composition	Content (w%)
Asphalt	60
Oleylamine	4.5
HCl	0.6
Antifoam	0.04
Latex (%DRC)	3
Water	31.86

ลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชัน และยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคังรูปแสดงดังรูปที่ 27 โดยรูปที่ 27a ซึ่งคือรูปแสดงอนุภาคของยางมะตอยอิมัลชันที่เตรียมได้จากการผสมส่วนผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 11 ในถังปฏิกรณ์ จากรูปจะเห็นอนุภาคของยางมะตอยเป็นรูปทรงกลม และมีการกระจายของขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ เมื่อปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยางธรรมชาติคังรูป ซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 27b พบว่าลักษณะทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติคังรูปนั้นโดยทั่วไปจะมีอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กมาก การใช้กล้องซึ่งมีกำลังขยายที่ 50 เท่าจึงไม่สามารถเห็นอนุภาคของยางธรรมชาติได้



รูปที่ 27 แสดงลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชัน (a) และยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป PVNR1 ปริมาณ 3 % DRC (b) จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 50 เท่า

กากของยางมะตอยในงานวิจัยนี้ได้จากการเตรียมฟิล์มของยางมะตอยอิมัลชัน หรือยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนได้เป็นของแข็งคือกากของยางมะตอย สมบัติที่ต้องการในยางมะตอยพื้นฐานควรปรากฏในกากของยางมะตอยอิมัลชัน หลังจากก็นำมาใช้งานแล้ว การทดสอบสมบัติกากของยางมะตอยเบื้องต้นในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบการเจาะทะลุ หรือเพนิเตรชัน (Penetration) การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening point) และลักษณะทางกายภาพ โดยที่การเจาะทะลุหรือเพนิเตรชัน หมายถึงความแข็งหรือนิ่มของยางมะตอย วัดด้วยความลึกของปลายเข็มมาตรฐานที่จมลงในยางมะตอยภายใต้น้ำหนักเวลา อุณหภูมิที่กำหนด โดยยางมะตอยที่มีความแข็งมากจะมีค่าเพนิเตรชันต่ำหรือมีความต้านทานต่อการเจาะทะลุสูง ส่วนค่าจุดอ่อนตัว หมายถึง อุณหภูมิที่ยางมะตอยอ่อนตัวถึงระดับที่กำหนดภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน ซึ่งการวัดค่าอ่อนตัวนั้นทำได้โดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างยางมะตอยที่เตรียมไว้ในวงแหวนมาตรฐานซึ่งแช่อยู่ในน้ำ โดยมีลูกบอลเหล็กที่มีน้ำหนักมาตรฐานวางอยู่ด้านบน การทดสอบจุดอ่อนตัวนั้นเป็นการทดสอบการทนความร้อนเชิงกล คือให้แรงกดของลูกบอลเหล็กมาตรฐานในขณะที่ให้ความร้อนไปด้วย ฉะนั้นกากของยางมะตอยที่มีค่าจุดอ่อนตัวสูงย่อมจะมีสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนที่สูงด้วย

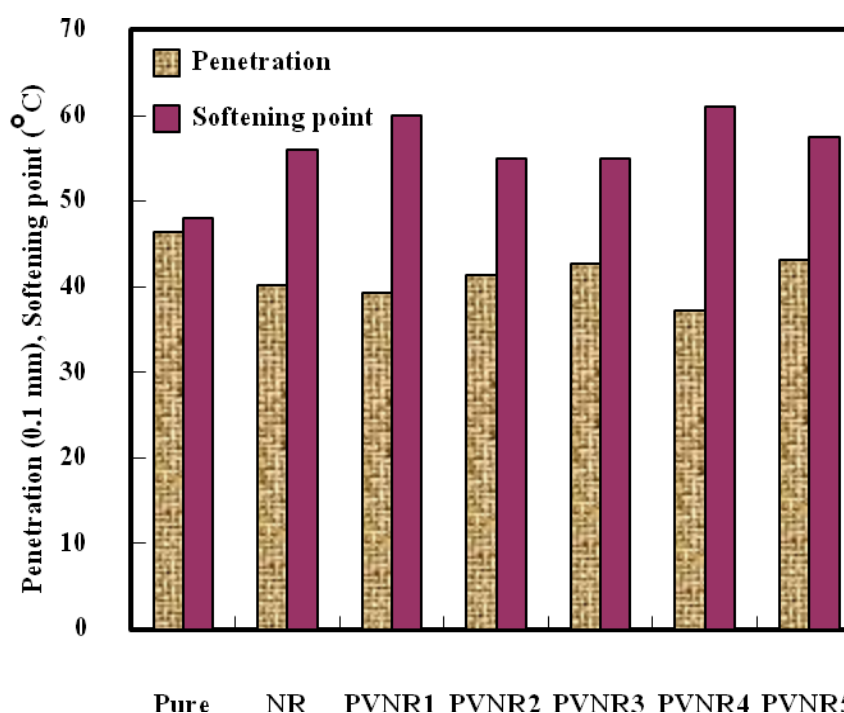
ตารางที่ 12 แสดงตารางค่าเพนิเตรชันและจุดอ่อนตัวเทียบกับอัตราการบวมตัวของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR1-PVNR10 และน้ำยางธรรมชาติ

Formula	ZnO (phr)	ZDEC (phr)	ZMBT (phr)	Sulphur (phr)	Swell ratio	Penetration (*0.1mm)	Softening point (°C)
NR	-	-	-	-	-	40.20	56.00
PVNR 1	2	2	-	2	9.03	39.30	60.00
PVNR 2	2	2	-	4	11.49	41.38	55.00
PVNR 3	4	2	-	2	8.87	42.70	55.00
PVNR 4	2	4	-	2	9.14	37.20	61.00
PVNR 5	2	1	1	2	6.38	43.13	57.00
PVNR 6	1	1	-	1	11.65	42.50	57.50
PVNR 7	3	3	-	3	6.51	39.80	60.00
PVNR 8	4	4	-	4	6.37	31.83	64.00
PVNR 9	4	4	-	3	10.24	36.00	55.00
PVNR 10	4	4	-	1	11.30	37.86	57.50
5 % PVNR 1						30.64	66.75
unmodified Asphalt emulsion						46.40	48.00

ผลการทดสอบเพนิเตรชันและจุดอ่อนตัว เปรียบเทียบกับค่าการบวมตัว ของน้ำยางธรรมชาติสูตรต่าง ๆ ดังตารางที่ 12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติลงในยางมะตอยอิมัลชัน ค่าเพนิเตรชันของกากของยางมะตอยจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าจุดอ่อนตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องยางธรรมชาตินี้มีสมบัติด้านการทนความร้อน และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าบิทูเมนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของยางมะตอย โดยเฉพาะยางธรรมชาติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลแล้ว ฉะนั้นการเติมน้ำยางธรรมชาติในยางมะตอยอิมัลชันจึงทำให้กากของยางมะตอยมีสมบัติดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ในน้ำยางธรรมชาติสามารถแบ่งเป็นปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน คือ ค่าจุดอ่อนตัว ค่าเพนิเตรชัน และลักษณะทางกายภาพของกากของยางมะตอย ในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของชนิดของสารคงรูปในน้ำยางธรรมชาติคงรูปที่มีต่อสมบัติของกากยางมะตอยอิมัลชัน

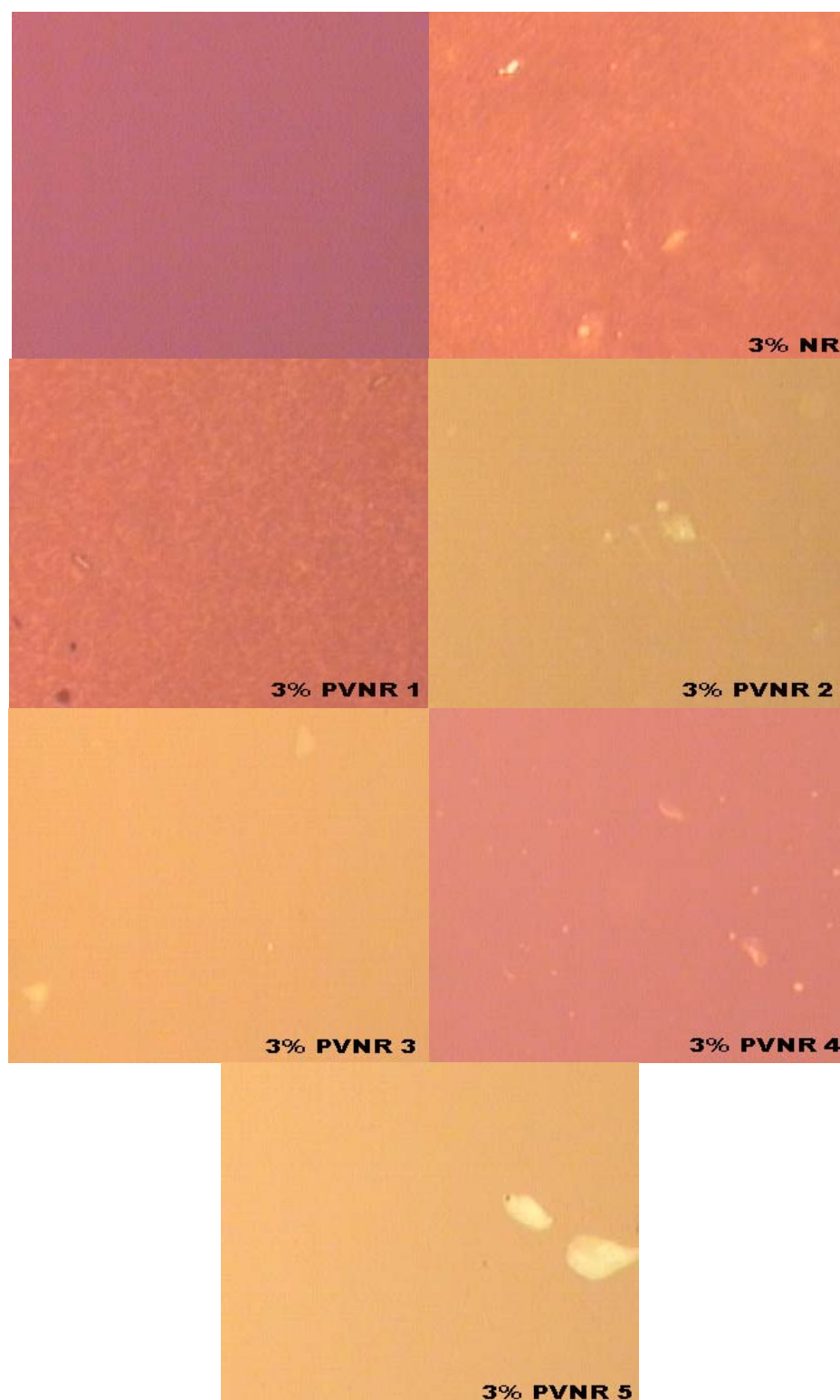
ในการศึกษาเปรียบเทียบผลของชนิดของสารเคมีที่ใช้คือ ตัวกระตุ้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารคงรูปคือซัลเฟอร์ในน้ำยางธรรมชาติคงรูปที่มีต่อสมบัติของกากยางมะตอย ค่าเพนิเตรชัน จุดอ่อนตัวของกาก และลักษณะทางของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR1-PVNR4 จึงถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเพนิเตรชัน จุดอ่อนตัวและลักษณะทางกายภาพของกากของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ และกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28 แสดงค่าเพนิเตรชันและจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติ (NR) น้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR 1-PVNR5 เทียบกับกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

ซึ่งจากรูปที่ 28 จะเห็นได้ว่า การเติมสารตัวกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยา ZDEC และซัลเฟอร์ 1 phr ในน้ำยางธรรมชาติคิงรูปสูตร PVNR1 มีผลทำให้ค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็นจาก 56 °C เป็น 60 °C และค่าเพนิเตอร์ชันลดลงจาก 40.20 *0.1mm เป็น 39.30 *0.1mm จากการเติมน้ำยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารคิงรูป การเติมสารเคมีในน้ำยางธรรมชาติจะทำให้เกิดเชื่อมโยงของโมเลกุล ซึ่งทำให้น้ำยางธรรมชาติมีสมบัติทนความร้อนและแรงกลได้ดีขึ้น ค่าจุดอ่อนตัวจึงเพิ่มขึ้นและค่าเพนิเตอร์ชันจึงลดลง สำหรับการเพิ่มซัลเฟอร์และตัวกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ เพิ่มขึ้นจากเดิม 1 phr ในน้ำยางธรรมชาติคิงรูปสูตร PVNR1 เป็น 2 phr ในน้ำยางธรรมชาติคิงรูปสูตร PVNR2 และ PVNR3 ตามลำดับ นั้นทำให้ค่าเพนิเตอร์ชัน และจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ มีค่าไม่แตกต่างจากการเติมน้ำยางธรรมชาติมากนัก แต่การเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา ZDEC ในน้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR4 กลับทำให้ค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น และค่าเพนิเตอร์ชันลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกากของยางมะตอยได้มาจากการเตรียมฟิล์มของยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งระหว่างกระบวนการเตรียมต้องผ่านความร้อนจาก อากาศและแสงแดด กระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลืออยู่เร่งให้สารเคมีที่เหลืออยู่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าจุดอ่อนตัวและความต้านทานต่อการทะลุทะลวงเพิ่มขึ้น

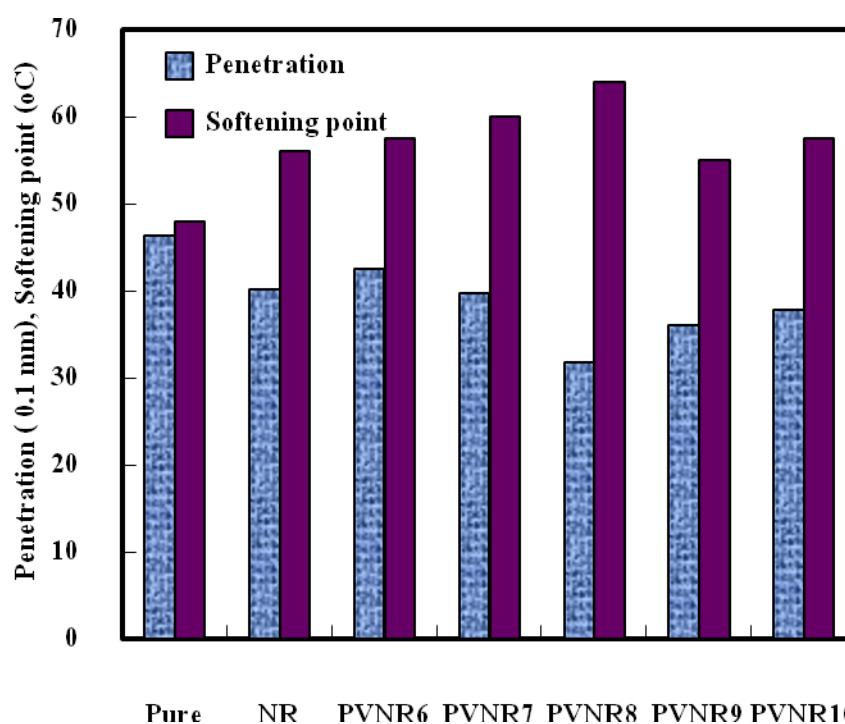
จากรูปที่ 29 จะเห็นได้ว่ากากของยางมะตอยที่ยังไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ หรือน้ำยางธรรมชาติคิงรูป มีลักษณะเป็นวัตถุภาคที่ต่อเนื่องกันของบิทูเมนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของยางมะตอย เมื่อเติมน้ำยางธรรมชาติลงไป ลักษณะทางกายภาพของกากของยางมะตอยมีวัตถุภาคของยางธรรมชาติซึ่งมีลักษณะสีจางกว่ากระจายค่อนข้างสม่ำเสมอ กากของยางมะตอยที่มีการปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคิงรูปสูตร PVNR1 ซึ่งสารเคมีต่าง ๆ อย่างละ 1 phr มีลักษณะทางกายภาพของกากของยางมะตอยที่มีการกระจายของวัตถุภาคของยางที่สม่ำเสมอมาก แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ การเพิ่มสารเคมีต่าง ๆ คือ ซัลเฟอร์ ตัวกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ และตัวเร่ง ZDEC ในน้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR2-PVNR4 ตามลำดับนั้น พบว่ากากของยางมะตอยมีการกระจายตัวของยางธรรมชาติเป็นกลุ่มก้อน เห็นได้จากกลุ่มของยางที่มีสีขาวดังรูป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของค่าเพนิเตอร์ชันและจุดอ่อนตัว



รูปที่ 29 แสดงลักษณะทางกายภาพของกากของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR1-PNNR5 จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า

4.2.2 ผลของการเพิ่มปริมาณสารคงรูปในน้ำยางธรรมชาติคงรูป และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อซัลเฟอร์ที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน

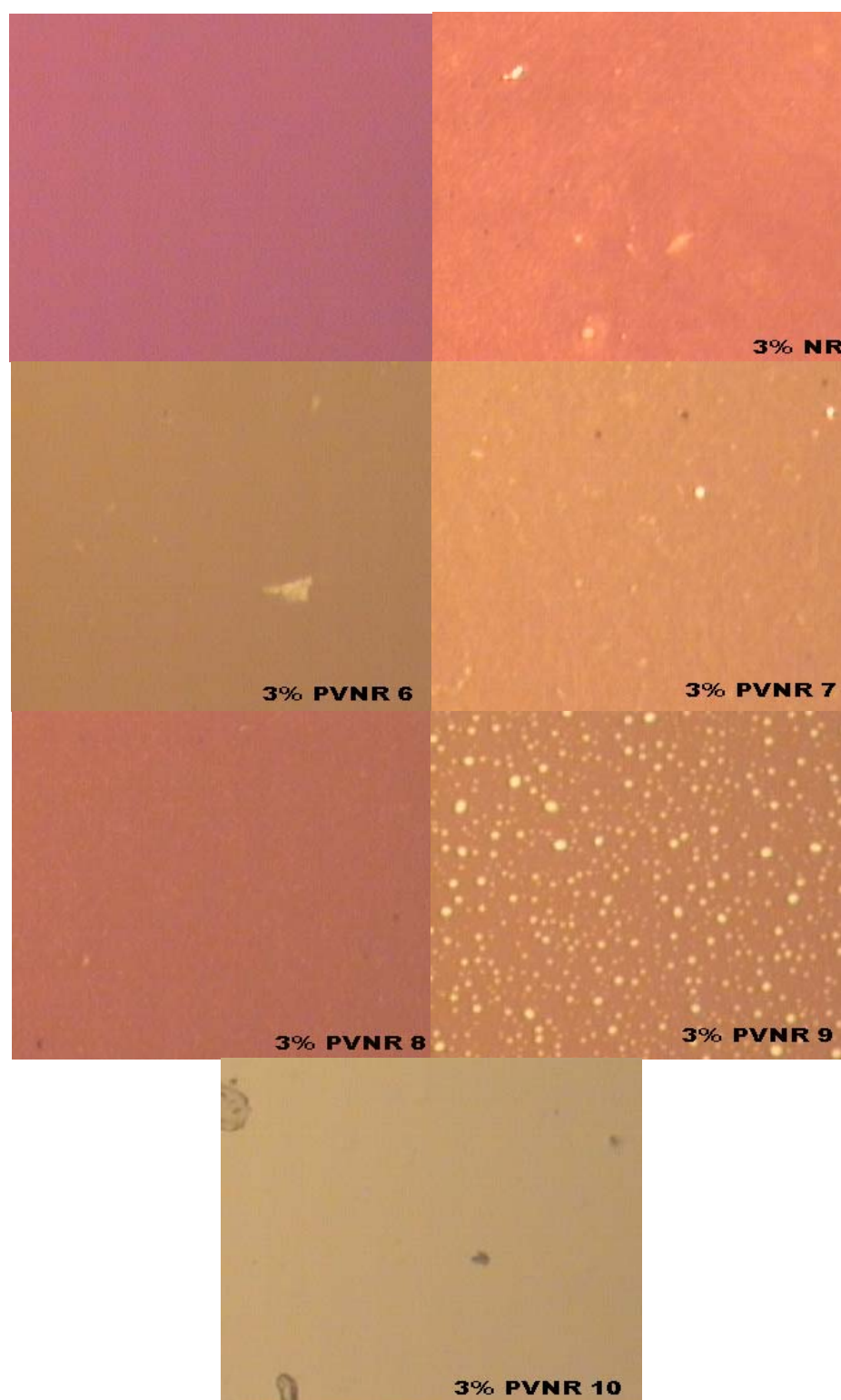
โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณสารคงรูปจะทำให้เกิดการคงรูปมากขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลของการบวมตัว และยางธรรมชาติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูงย่อมมีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนที่สูงขึ้นด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารคงรูปทั้งสาม คือ ซัลเฟอร์ ตัวกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ และตั้งเร่ง ZDEC จาก 0.5 phr ในสูตร PVNR6, 1 phr ในสูตร PVNR1, 1.5 phr ในสูตร PVNR7 และ 2 phr ในสูตร PVNR8 จึงทำให้กากของยางมะตอยมีจุดอ่อนตัวและมีค่าเพนิเตรชันลดลงหรือมีความต้านทานการเจาะทะลวงมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 30



รูปที่ 30 แสดงค่าเพนิเตรชันและจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติ (NR) น้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR 6-PVNR10 เทียบกับกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

ซัลเฟอร์เป็นสารคงรูปที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับยางธรรมชาติ และยังใช้กับยางสังเคราะห์ต่าง ๆ ที่มีโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์ แม้ว่าพอลิเมอร์นั้นจะอยู่ในรูปของ

ลาแทกซ์หรือยางแห้งก็ตาม สำหรับยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวในรูปของลาแทกซ์ มักเติมซัลเฟอร์ ปริมาณ 1-2 phr ปริมาณซัลเฟอร์ที่เติมลงไปให้น้ำยางธรรมชาติคงรูปนั้นมีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติคงรูปที่ได้เนื่องจากทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่ต่างกัน ซึ่งชนิดของการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในการเชื่อมโยงด้วยซัลเฟอร์ในยางโอเลฟินที่ไม่อิ่มตัวสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ monosulphidic, disulphidic และ polysulphidic โดยอัตราส่วนของชนิดการเชื่อมโยงด้วยซัลเฟอร์ ทั้งสามชนิดนี้สัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลและ aging behavior ของยางที่คงรูปแล้ว การเชื่อมโยงแบบ polysulphidic จะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติการต้านทานการดึงยึดที่ดีกว่า ในขณะที่ disulphidic และ polysulphidic จะมีความเสถียรด้านความร้อนที่ดีกว่า ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงแบบต่าง ๆ คือ ปริมาณของซัลเฟอร์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา [17] ฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลเฟอร์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของยางมะตอย คือ 4:4 ในสูตร PVNR 8, 3:4 ในสูตร PVNR9 และ 1:4 ในสูตร PVNR10 โดยใช้ตัวกระตุ้นซึ่งคือออกไซด์ปริมาณ 2 phr ซึ่งผลการทดสอบค่าเพนิเตรชันและจุดอ่อนตัวแสดงดังรูปที่ 30 เมื่อปริมาณซัลเฟอร์ลดลงพบว่า กากของยางมะตอยมีค่าจุดอ่อนตัวลดลง และมีค่าเพนิเตรชันเพิ่มขึ้นหรือมีความต้านทานการเจาะทะลวงน้อยลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา [24] และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณซัลเฟอร์ที่เติมลงไป ที่อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อซัลเฟอร์สูง คือ ในสูตร PVNR9 และในสูตร PVNR10 จึงน่าจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลได้เร็วกว่าในสูตร PVNR8 ซึ่งการมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงนี้ ทำให้กากของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR 9 และสูตร PVNR 10 มีสมบัติต้านทานการเจาะทะลวงและมีจุดอ่อนตัวที่ต่ำ เนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาคของยางธรรมชาติในกากของยางมะตอย ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากลักษณะทางกายภาพ



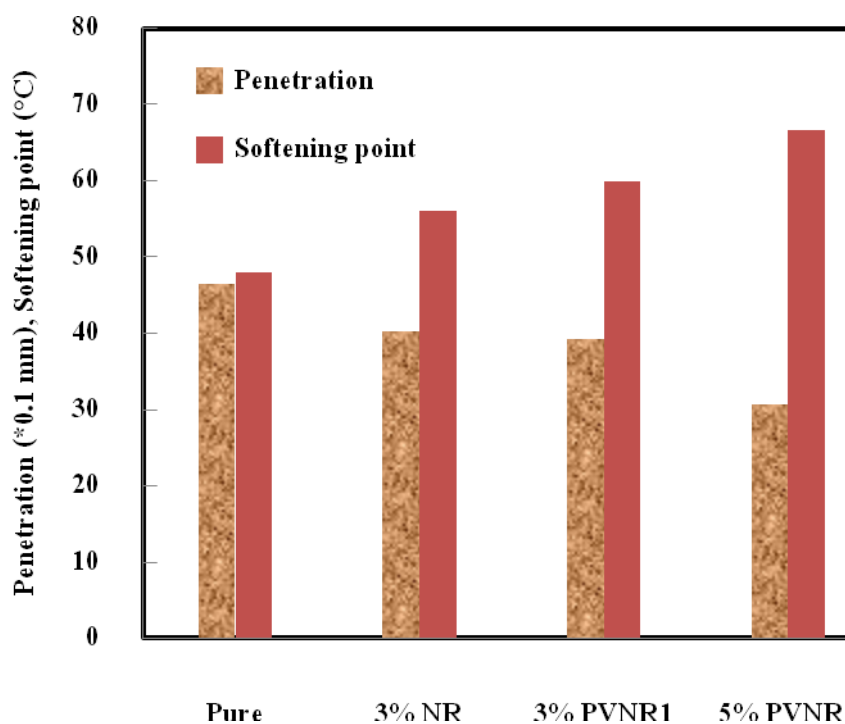
รูปที่ 31 แสดงลักษณะทางกายภาพของากของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR 6-PVNR10 จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า

จากรูปที่ 31 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณสารคงรูปทั้งซัลเฟอร์ ตัวกระตุ้นซิงค์ ออกไซด์ และตัวเร่ง ZDEC ในปริมาณที่เท่ากันคือ 0.5 phr ในน้ำยางธรรมชาติคงรูปในสูตรที่ 6 ปริมาณ 1.5 phr ในน้ำยางธรรมชาติคงรูปในสูตรที่ 7 และปริมาณ 2 phr ในน้ำยางธรรมชาติคงรูปในสูตรที่ 8 นั้นทำให้กากของยางมะตอยที่ได้มีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และการเพิ่มการคงรูปทั้งสามยังมีแนวโน้มทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลมากขึ้นอีกด้วย โดยสังเกตได้จากมีลักษณะจุดสีขาวเกิดขึ้นมากขึ้นในภาพที่ได้ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของกากยางมะตอยที่ได้ทั้งจุดอ่อนตัวและการต้านทานการเจาะทะลุลงที่มากขึ้น สำหรับการลดอัตราส่วนของซัลเฟอร์ต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลอย่างรวดเร็ว นั้นพบว่าทำให้เกิดการแยกวัฏภาคอย่างชัดเจนระหว่างบิทูเมนและยางธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกากขงยางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR9 สามารถสังเกตเห็นการแยกวัฏภาคได้ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากจุดอ่อนตัวและความต้านทานการเจาะทะลุลง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้สารคงรูปทั้งสามในอัตราส่วนที่เท่ากัน

4.2.3 ผลของการเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติคงรูปที่มีต่อสมบัติของกากยางมะตอย

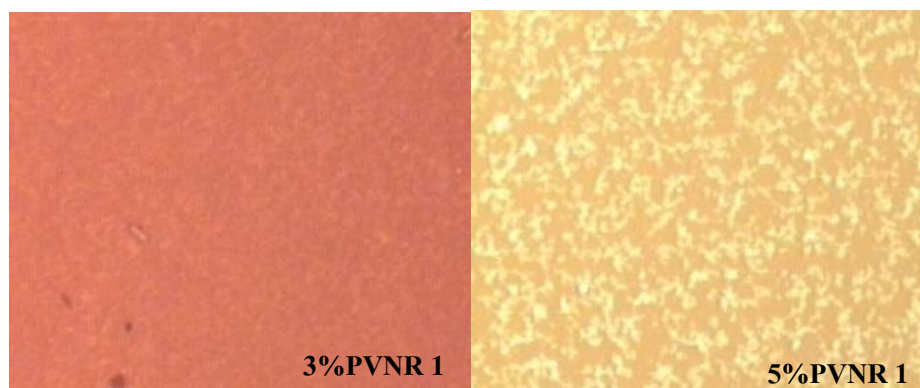
อิมัลชัน

จากการผลการทดลองข้างต้นนี้ทำให้ทราบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZDEC ตัวกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ และซัลเฟอร์ในปริมาณที่เท่ากัน จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังให้สมบัติของกากของยางมะตอยที่ดี โดยเมื่อพิจารณาทั้งทางด้านสมบัติของกากยางมะตอยและทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่าน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR 1 นั้นเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชัน และนำมาศึกษาด้านเพื่อเพิ่มปริมาณของน้ำยางธรรมชาติคงรูปในยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PVNR 1 จาก 3% เป็น 5% DRC กากของยางมะตอยที่ได้จะมีค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น และมีค่าความต้านทานการเจาะทะลุลงที่สูงขึ้นคือมีค่าเพนิเตอร์ชันลดลง ดังรูปที่ 32 ยางธรรมชาติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลแล้วนี้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความร้อนที่ดีกว่าบิทูเมนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของยางมะตอย ฉะนั้นการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติคงรูปในยางมะตอยจึงทำให้สมบัติต่าง ๆ ดีขึ้นด้วย



รูปที่ 32 แสดงค่าเพนิตรชันและจุดอ่อนตัวของกากของยางมะตอยซึ่งปรับปรุงสมบัติด้วย 3% DRC น้ำยางธรรมชาติ น้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR1 3%DRC และ 5%DRC เทียบกับกากของยางมะตอยที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 33 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของยางในยางมะตอยที่ดีได้อย่างชัดเจนเมื่อเติม PVNR1 ปริมาณ 3% DRC ในยางมะตอย และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางคงรูปสูตร PVNR1 ในยางมะตอยเป็น 5% DRC ลักษณะทางกายภาพของกากยางมะตอยที่ได้จะมียางธรรมชาติเกาะกลุ่มกันขนาดใหญ่ขึ้น และกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ การกระจายตัวของยางธรรมชาติที่สม่ำเสมอส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ ของกากของยางมะตอยมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบจุดอ่อนตัวและเพนิตรชัน



รูปที่ 33 แสดงลักษณะทางกายภาพของกากของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR1 3%DRC และ 5% DRC จากกล้อง Microscope ที่กำลัง 50 เท่า

4.3 การผลิตยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปด้วยเครื่อง colloid mill

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยอิมัลชันนั้น คือ การผสมน้ำ สารอิมัลซิไฟเออร์ และยางมะตอย ภายใต้แรงเฉือนสูง ซึ่งยางมะตอยจะถูกทำให้แตกออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายอยู่ในวัฏภาคของน้ำ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยอิมัลชันคือ colloid mills ซึ่ง colloid mill จะประกอบด้วยวงแหวนลักษณะกรวยที่หมุนได้ที่เรียกว่า rotor ซึ่งได้สัมผัสกับส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่า stator ยางมะตอย น้ำและสารอิมัลซิไฟเออร์จะถูกบังคับให้ผ่านช่องแคบ ๆ ระหว่าง rotor และ stator ซึ่งจะทำให้เกิดแตกเป็นอนุภาคและเกิดการกระจายตัวที่มีประสิทธิภาพ เมื่อศึกษาถึงปริมาณที่เหมาะสมของสารเคมีที่ใช้ในน้ำยางธรรมชาติคงรูปแล้ว เพื่อให้ได้ยางมะตอยอิมัลชันที่มีสมบัติตรงตามมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องศึกษาสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยอิมัลชันโดยใช้ colloid mill ซึ่งมีดังนี้

4.3.1 ชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์

มีสารอิมัลซิไฟเออร์มากมายที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยอิมัลชัน ปัจจุบันนี้สารอิมัลซิไฟเออร์ประเภท แคตไอออนิกนั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการยึดเกาะที่ดีกับมวลรวมหิน สำหรับการผลิตยางมะตอยอิมัลชันชนิดแตกตัวเร็ว นั้นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้คือ alkyl amine [26] ในงานวิจัยนี้ศึกษา amine สองชนิดคือ Oleylamine และ Gernamin TAB 100 ซึ่งเป็น Tallow alkyl diamine โดยมีส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ดังตารางที่ 13 โดยผลิตยางมะตอยอิมัลชันด้วยเครื่อง colloid mill ลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้แสดงดังรูปที่ 34 และผลการทดสอบตามมาตรฐานมอดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับงานทาง มอก.2157-2547 แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 13 แสดงส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยอิมัลชัน

สูตร ส่วนประกอบ (w/w%)	A	G
Bitumen	60	60
Emusifier		
1.Oleylamine	1.5	-
2.Genamin TAB 100	-	1.5
HCl	0.5	0.5
Antifoam	0.04	0.04
PVNRL (%DRC)	-	-
Water	37.96	37.94

a)



b)



รูปที่ 34 แสดงลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชันซึ่งใช้ปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ต่างชนิดกัน คือ a) oleylamine b) Genamin TAB 100 ด้วยกล้อง Microscope ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จากรูปที่ 34 เห็นได้ชัดเจนว่ายางมะตอยอิมัลชันที่ใช้ Oleyamine เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ มีขนาดของหยดของอิมัลชัน (emulsion droplets) ที่สม่ำเสมอว่าการใช้ Genamin TAB 100 เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 14 คือยางมะตอยอิมัลชันที่ผลิตโดยใช้ Genamin TAB 100 ในสูตร G นั้นมีค่า Settlement 5 days และ Storage Stability 24 hrs มากกว่ายางมะตอยอิมัลชันที่ใช้ Oleylamine สูตร A เนื่องจากขนาดของอิมัลชันและการกระจายตัวของอิมัลชันนั้นมีผลต่อเสถียรภาพของยางมะตอยอิมัลชัน กล่าวคือยางมะตอยอิมัลชันที่มีขนาดเล็ก

และมีการกระจายตัวของขนาดของอิมัลชันที่สม่ำเสมอ จะมีเสถียรภาพในการเก็บที่สูงกว่ายางมะตอยอิมัลชันที่มีขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวของขนาดของอิมัลชันที่กว้าง

ตารางที่ 14 แสดงผลการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอดิไฟด์แอสฟัลต์อิมัลชัน สำหรับงานทาง (มอก. 2157-2547) ชนิด CRS-1P ของยางมะตอยอิมัลชันสูตร A และสูตร G

	Sample No.A	Sample No.G	Specification TIS. 2157-2547
Test on emulsion			
1. Furol Viscosity at 50 °C, sec	21	12	20-100
2. Settlement 5 days, %wt	2.4	66.2	7.5 Max.
3. Storage Stability 24 hrs, %wt	0.0	43.0	1.5 Max
4. Sieve Test (Ret. on No. 20 mesh), %wt	0.01	0.01	0.1 Max.
5. Partical Charge Test	Positive	Positive	Positive
6. Demulsibility Test, %wt	6.0	1.9	40 Min.
7. Residue from Distillation, %wt	60.0	57.5	60 Min.
7.1 Oil Distillate, %wt	1	1	3 Max.
Test on residue (after evaporation)			
8. Softening point, Ring and Ball, °C	53.1	56.1	50 Min.
9. Elastic Recovery at 25 °C, 10 cm, %	25	20	20 Min.
10. Toughness and Tenacity, 25 °C, 50 cm/ min.			
Toughness, kg.cm	14	28	40 Min.
Tenacity, kg.cm	5	14	20 Min.
11. Penetration at 25 °C, 100 g, 5 sec, 0.1 mm	60	49	60-120
12. Ductility at 13 °C, 5 cm/min., cm	3.5	*	40 Min.
13. Solubility in toluene, % wt	100	100	97.5 Min.

หมายเหตุ : * Sample No. G ไม่สามารถทดสอบ Ductility

Gernamin TAB 100 เป็นสารประกอบประเภท Tallow alkyl diamine ประกอบด้วย โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายยาวกว่า Oleylamine กากของยางมะตอยอิมัลชันที่ใช้ Gernamin TAB 100 เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์จึงมีสมบัติด้านความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า Oleylamine ซึ่งเห็นได้จากค่าจุดอ่อนตัวที่สูงกว่าและค่าการต้านทานการเจาะทะลวงที่สูงขึ้นก็มีค่าเพนิเตรชันที่ต่ำลง

สำหรับผลการทดสอบการคืนสภาพยืดหยุ่นหลังการดึงยืดที่ 25 °C (Elastic Recovery at 25 °C) ใช้วัดความสามารถของชิ้นอย่างในการคืนสภาพกลับสู่ความยาวดั้งเดิม หลังจากการดึงยืดด้วยเครื่องมือการดึงยืด ซึ่งเป็นเครื่องมือเดียวกับเครื่องมือเดียวกันกันเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการดึง พบว่า กากของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้จากการใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ทั้งสองชนิดนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก โดยตัวอย่าง A ซึ่งใช้สาร Oleylamine เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์มีค่า Elastic Recovery เท่ากับ 25% ส่วนตัวอย่าง G ซึ่งใช้ Gernamin TAB 100 เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์มีค่า Elastic Recovery เท่ากับ 20% ซึ่งผ่านตามมาตรฐาน

โดยความเหนียวและเทนซิตีที่ 25 °C (Toughness and Tenacity) ของตัวอย่าง ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับระยะที่ยืดออก จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าความเหนียวและเทนซิตี ของตัวอย่างกากยางมะตอยที่ใช้ Gernamin TAB 100 เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ มีค่าสูงกว่ากากยางมะตอยที่ใช้ Oleylamine เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ อาจเนื่องมาจาก Gernamin TAB 100 มีโครงสร้างของโมเลกุลซึ่งมีความเข้ากันได้กับบิทูเมน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของยางมะตอยได้ดีกว่าค่าความเหนียวและเทนซิตีจึงมีค่าสูงกว่า

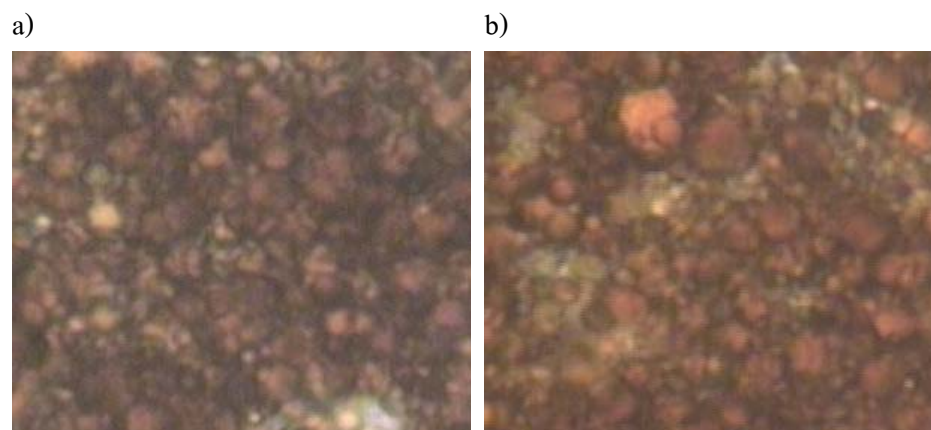
4.3.2 การปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป

หลังจากได้สูตรของน้ำยางคงรูปที่เหมาะสมคือ น้ำยางธรรมชาติคงรูปสูตร PVNR1 และเลือกใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ที่คือ Oleylamine แล้ว โดยพิจารณาจากสมบัติของอิมัลชันเป็นหลัก ขั้นตอนต่อไปคือการผลิตยางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติด้วยเครื่อง colloid mill นั้นได้ทำการทดลองเตรียมยางมะตอยอิมัลชันด้วยเครื่อง colloid mill โดยมีส่วนประกอบและปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ ดังตารางที่ 15 และศึกษาลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชันด้วยกล้อง Microscope ดังแสดงในรูปที่ 35 จากนั้นนำยางมะตอยอิมัลชันที่เตรียมได้ส่งทดสอบที่สำนักวิเคราะห์และการตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอดิไฟด์แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับงานทาง (มอก. 2157-2547) ชนิด CRS-IP ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 16

ตารางที่ 15 แสดงส่วนประกอบของยางมะตอยอิมัลชันสูตร A และ 3PA

สูตร ส่วนประกอบ (w/w %)	A	3PA
Bitumen	60	60
Oleylamine	1.5	1.5
HCl	0.5	0.5
Antifoam	0.04	0.04
PVNRL (%DRC)	-	3
Water	37.96	34.96

การเติมน้ำยางธรรมชาติลงรูปสูตร PVNR1 ลงในยางมะตอยอิมัลชันเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ และทำการผลิตอิมัลชันด้วยเครื่อง colloid mill นั้นไม่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชันมากนัก ซึ่งเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.9 หลังจากปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยางธรรมชาติลงรูปสูตร PVNR1 ลักษณะของอิมัลชันที่ได้ไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก โดยสามารถสังเกตเห็นวัฏภาคของน้ำยางธรรมชาติได้ คือส่วนของอิมัลชันที่มีสีขาวในรูปที่ 4.9b



รูปที่ 35 แสดงลักษณะทางกายภาพเปรียบเทียบของยางมะตอยอิมัลชันโดย a) คือยางมะตอยอิมัลชันที่ไม่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติลงรูป b) คือยางมะตอยอิมัลชันที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติลงรูปเพื่อปรับปรุงสมบัติ ด้วยกล้อง Microscope ที่กำลังขยาย 50 เท่า

ตารางที่ 16 แสดงผลการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอดิไฟด์แอสฟัลต์อิมัลชัน
สำหรับงานทาง (มอก. 2157-2547) ชนิด CRS-1P สูตร A และสูตร 3PA

	Sample No.A	Sample No.3PA	Specification TIS. 2157-2547
Test on emulsion			
1. Furol Viscosity at 50 °C, sec	21	26	20-100
2. Settlement 5 days, %wt	2.4	1.6	7.5 Max.
3. Storage Stability 24 hrs, %wt	0.0	1.2	1.5 Max
4. Sieve Test (Ret. on No. 20 mesh), %wt	0.01	0.00	0.1 Max.
5. Partical Charge Test	Positive	Positive	Positive
6. Demulsibility Test, %wt	6.0	61.1	40 Min.
7. Residue from Distillation, %wt	60.0	61.0	60 Min.
7.1 Oil Distillate, %wt	1	1	3 Max.
Test on residue (after evaporation)			
8. Softening point, Ring and Ball, °C	53.1	58.7	50 Min.
9. Elastic Recovery at 25 °C, 10 cm, %	25	57	20 Min.
10. Toughness and Tenacity, 25 °C, 50 cm/ min.			
Toughness, kg.cm	14	30	40 Min.
Tenacity, kg.cm	5	2	20 Min.
11. Penetration at 25 °C, 100 g, 5 sec, 0.1 mm	60	45	60-120
12. Ductility at 13 °C, 5 cm/min., cm	3.5	3	40 Min.
13. Solubility in toluene, % wt	100.0	100.0	97.5 Min.

สมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอดิไฟด์แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับ
งานทาง (มอก. 2157-2547) ชนิด CRS-1P แสดงดังตารางที่ 16 จะเห็นได้ว่ายางมะตอยอิมัลชันที่มี
การปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป (Sample No. 3PA ในตารางที่ 16) มีสมบัติส่วน
ใหญ่ สูงกว่ายางมะตอยอิมัลชันที่ไม่มีการปรับปรุง กล่าวคือ มีค่าจุดอ่อนตัว ค่า Elastic Recovery ค่า
ความเหนียว (Toughness) และค่าเพนิเตรชันที่ดีขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นที่รู้กันอยู่แล้วว่า ยาง

ธรรมชาตินั้นมีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่สูงกว่าบิทูเมน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของยางมะตอย โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางธรรมชาติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล สมบัติส่วนใหญ่ของยางมะตอยที่มีการปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปจึงสูงขึ้น

จากตารางจะเห็นได้ว่า การปรับปรุงยางสมบัติยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยางธรรมชาติ คงรูปสูตร PVNR1 ปริมาณ 3% DRC ผลการทดสอบค่าความเหนียวค่าสูงขึ้นจาก 14 kg.cm เป็น 30 kg.cm โดยค่าความเหนียว (Toughness) ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับระยะที่ยืดออกนี้สามารถบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ระหว่างของผสมทั้งสองกล่าวคือ ถ้าของผสมทั้งสองมีความเข้ากันได้สูงและมีแรงกระทำระหว่างกันที่ดี (good interaction) ค่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้น [26] แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติที่มีการคงรูปบางส่วนนี้ มีความเข้ากันได้กับบิทูเมนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของยางมะตอย อีกทั้งมีแรงกระทำระหว่างบิทูเมนและยางธรรมชาติที่ดีอีกด้วย สำหรับค่า Elastic Recovery ซึ่งเพิ่มขึ้นสูงมากนี้ เนื่องมาจากสมบัติเฉพาะตัวของยางธรรมชาติซึ่งมีความเป็น Elastic สูง อีกทั้งวัฏภาคทั้งสองมีความเข้ากันได้ดี ทำให้การเติมยางธรรมชาติปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้กากของยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป มีค่า Elastic Recovery สูงขึ้นมาก

เมื่อปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยางธรรมชาติ ปริมาณของแข็งในยางมะตอยอิมัลชันจึงมีสูงขึ้นยางมะตอยอิมัลชันที่ได้จึงมีความหนืดเพิ่มขึ้นประกอบกับ ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ซึ่งมีขนาดของโมเลกุลค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับบิทูเมนซึ่งมีอยู่ในยางมะตอย การเติมยางธรรมชาติคงรูปจึงทำให้ค่า Furoi Viscosity ที่ 50° C สูงขึ้น เนื่องจากความหนืดที่สูงขึ้นทำให้อนุภาคอยู่ชิดกันมากขึ้นจึงส่งผลต่ออัตราการรวมตัวของอนุภาค (Demulsibility) สูงขึ้นอีกด้วย

4.4 การทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการใช้งานจริงของยางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป

4.4.1 ผลของสารเคมีต่าง ๆ ที่มีต่อค่าเวลาในการผสม (mixing time)

ยางมะตอยอิมัลชันต้องอาศัยคุณสมบัติทางเคมีที่หลากหลาย ซึ่งยากที่เข้าใจเพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติต่าง ๆ ของยางมะตอยอิมัลชันที่จำเป็น ความแปรปรวนของการผลิตยางมะตอยอิมัลชันนั้นประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานของยางมะตอย ชนิดและปริมาณของสารอิมัลซิไฟเออร์ สารอิมัลซิไฟเออร์เป็นสารเคมีที่ใช้เพื่อสร้างเสถียรภาพให้อิมัลชัน และทำให้หยดของอิมัลชันเป็นฟองลอยอยู่แยกจากกัน สารประกอบซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์นี้เป็นสารออร์แกนิกที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และแบ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งเรียกว่า “head” หรือส่วนหัว และ “tail” หรือส่วนหาง ส่วนของ “head” จะประกอบด้วยกลุ่มของอะตอมซึ่งมีประจุทางเคมีเป็นบวกหรือลบ ประจุนี้ทำให้ส่วน

“head” นี้มีความเป็นขี้ว เนื่องจากความมีขี้วและลักษณะของบางอะตอมในส่วนที่ขี้วนี้ทำให้ส่วนหัวนี้สามารถละลายน้ำได้ ส่วนของหางประกอบด้วยกลุ่มของออร์แกนิกสายโซ่ยาวซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่จะสามารถละลายได้ในสารออร์แกนิกอื่นเช่นน้ำมันต่าง ๆ (asphalts) ดังนั้นสารอิมัลซิไฟเออร์ จึงมีทั้งส่วนที่สามารถละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในโมเลกุลเดียว ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะทำให้มีความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์

ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาสารอิมัลซิไฟเออร์ประเภทแคทอออนิกเป็นที่นิยมในบิทูเมน อิมัลชันสำหรับประยุกต์ใช้ในงานถนนอย่างมาก ข้อดีหลักคือมีการยึดติดที่ดีกับหินซึ่งมักจะมีสภาพเป็นกรดทำให้นิยมใช้สำหรับการสร้างถนนเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่งานวิจัยนี้ใช้แคทอออนิกอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตยางมะตอยอิมัลชัน มีงานวิจัยมากมายที่พยายามอธิบายกลไกการ setting และ curing ของแอสฟัลต์อิมัลชัน [8] ส่วนใหญ่พบว่าปัจจัยที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างมวลรวมกับกรดในอิมัลชัน การดูดซึมของอิมัลซิไฟเออร์อิสระบนผิวของมวลรวม และการรวมตัว (flocculation) ของหยดของอิมัลชัน ระยะเวลาของการ flocculation (setting) และ coalescence (curing) ขึ้นอยู่กับระบบ แต่โดยทั่วไปแล้วจะเกิดกระบวนการ flocculation ขึ้นอย่างรวดเร็วโดยน้ำจะถูกขับออกจากระบบและจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน (cohesive strength) จากนั้นจะเกิดกระบวนการ coalescence ขึ้นอย่างช้า ๆ ส่งผลให้เกิดวิฤภาคของแอสฟัลต์ที่ต่อเนื่อง วิฤภาคของแอสฟัลต์นี้จะต้องมีการยึดเหนี่ยวกับมวลรวมอีกด้วย กระบวนการ coalescence เป็นกระบวนการซึ่งตรงข้ามกัน ส่วนของน้ำมันซึ่งอยู่ในน้ำอิมัลชันจะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำในน้ำมัน จากนั้นจะเกิดการสูญเสียวิฤภาคน้ำภายในออกไปอย่างช้า ๆ กระบวนการผันกลับนี้จะเกิดมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของแอสฟัลต์ต่อน้ำในระบบเพิ่มขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนวิฤภาคของอิมัลชันสามารถตรวจสอบด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ และมีความสำคัญกับ curing behavior ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานจริง

จากการทดสอบค่าเวลาในการผสม (Mixing time) เบื้องต้นทำให้ทราบว่ายางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้น ไม่สามารถทดสอบใช้งานจริงกับมวลรวมหินได้ เนื่องจากสารอิมัลซิไฟเออร์ประเภทอะนิกที่ได้นั้นมีความว่องไวมากเกินไป ส่งผลให้ยางมะตอยอิมัลชันซึ่งปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปเกิดการแตกตัวทันทีเมื่อสัมผัสกับมวลรวม ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ประเภท quaternary ammonium ซึ่งมีความว่องไวน้อยกว่ามาใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ร่วม และทำการศึกษาผลของสารเคมีอื่น ๆ ที่มีต่อค่าเวลาในการผสมดังตารางที่ 17 เพื่อหาสูตรของยางมะตอยอิมัลชันที่เหมาะสมในการทดสอบการใช้งานจริง โดยพิจารณาเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

4.4.1.1 ชนิดและปริมาณของสารอิมัลซิไฟเออร์

จากตารางที่ 17 การเพิ่มปริมาณอิมัลซิไฟเออร์จาก 0.5 ในสูตรที่ 3 ไปเป็น 1.0 ในสูตรที่ 1 ค่า mixing time จะเพิ่มขึ้น ถ้าปริมาณอิมัลซิไฟเออร์เพิ่มขึ้นมากกว่าค่า CMC ของอิมัลซิไฟเออร์แล้ว อิมัลซิไฟเออร์ที่เหลือนี้จะเกิดเป็น micelles ในวัฏภาคของน้ำ เมื่อผสมอิมัลชันนี้กับวัสดุที่เป็นหิน อิมัลซิไฟเออร์ที่เหลือนี้จะเคลือบบนผิวของหินโดยไม่เกิดการเสียดสีของอิมัลชัน การแตกตัว (breaking) ของอิมัลชันจะช้าลงและอาจจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าน้ำจะเกิดการระเหยออกไป [27]

หมู่อะมีน (amine) ใน Oleylamine และ Gernamine มีความว่องไวมากกว่าหมู่ quaternary ammonium ใน CTAB ดังนั้นการเติม Oleylamine (Emulsions สูตร 6 และ 11 ในตารางที่ 17) และ Gernamin (Emulsions สูตร 14 ในตารางที่ 17) ทำให้ค่า mixing time ลดลง การเพิ่มปริมาณ Oleylamine นั้นทำให้ค่า mixing time ลดลง เนื่องจากทำให้ความว่องไวของอิมัลชันเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของ CTAB:Oleylamine เป็น 0.5:0.5 และ 0.5:0.75 (Emulsions สูตร 12 และ 13 ในตารางที่ 17) ค่า mixing time ไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากอิมัลชันแตกตัวทันทีเมื่อสัมผัสกับมวลรวมหิน ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นกับยางมะตอยอิมัลชันในสูตร 10 ซึ่งใช้ Gernamin และ Oleylamine เป็น co-emulsifiers อีกด้วยเนื่องจากยางมะตอยอิมัลชันมีความว่องไวมากเกินไป

เมื่อพิจารณาระหว่าง Oleylamine และ Gernamin นั้นพบว่า Gernamin ซึ่งเป็นสารประกอบ tallow alkyl propylene diamine มีหมู่อะมีนซึ่งมีความว่องไวสูงสองหมู่ แต่สายโซ่ tallow alkyl มีความยาวของสายโซ่ยาว จึงทำให้ความว่องไวของ Oleylamine และ Gernamin ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นค่า mixing time ของ emulsion สูตร 11 จึงไม่แตกต่างกับค่า mixing time ของยางมะตอยอิมัลชันสูตร 14

ตารางที่ 17 แสดงส่วนประกอบและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในยางมะตอยอิมัลชันสูตร 1-16 และค่าเวลาในการผสมของยางมะตอยอิมัลชันกับมวลรวม

Formula	Bitumen (%wt)	CTAB (%wt)	Oleylamine (%wt)	Gernamin (%wt)	CaCl ₂ (%wt)	HCl (%wt)	Antifoam (%)wt	PVNR (%DRC)	Mixing time (min.)
1	60	1	-	-	-	0.5	0.04	3	30:00
2	60	0.75	-	-	-	0.5	0.04	3	15:00
3	60	0.5	-	-	-	0.5	0.04	3	4:00
4	60	1	-	-	-	0.5	0.04	5	15:00
5	60	0.75	-	-	0.2	0.5	0.04	3	12:00
6	60	0.75	0.2	-	-	0.5	0.04	3	4:30
7	60	0.75	0.2	-	0.2	0.5	0.04	3	1:55
8	60	0.75	0.2	-	0.5	0.5	0.04	3	1:25
9	60	0.75	-	0.2	0.2	0.5	0.04	3	2:05
10	60	-	1	1	-	0.5	0.04	3	*
11	60	0.75	0.5	-	-	0.5	0.04	5	1:40
12	60	0.5	0.5	-	-	0.5	0.04	5	*
13	60	0.5	0.75	-	-	0.5	0.04	5	*
14	60	0.75	-	0.5	-	0.5	0.04	5	1:45
15	60	0.75	-	0.5	0.2	0.5	0.04	5	1:00
16	60	0.75	-	0.5	-	0.5	0.2	5	2:28

* ค่าเวลาในการผสมไม่สามารถตรวจสอบได้

4.4.1.2 ผลของแคลเซียมคลอไรด์

โดยทั่วไปแล้วยางมะตอยจะมีเกลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งทำให้เกิดการ osmotic swelling ของ droplets ในอิมัลชัน ขณะเดียวกันน้ำจะถูกดึงเข้าไปใน droplet ส่งผลให้อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นและมักตามมาด้วยการหนีออกของเกลืออย่างช้า ๆ โดยปกติจึงมักเติมแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) ในยางมะตอยอิมัลชันในปริมาณ 0.1 ถึง 0.5 % โดยน้ำหนัก เพื่อลดการ osmosis ของน้ำในบิทูเมนและลดการเปลี่ยนแปลงของความหนืด ใน cationic bituminous emulsions มักเติมเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการเก็บของอิมัลชัน (storage stability of the emulsions) และยังช่วยลดความหนืดของอิมัลชันอีกด้วย [8, 28] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเติมเพื่อควบคุมความหนืดของยางมะตอยอิมัลชันด้วย อีกทั้งศึกษาผลของแคลเซียมคลอไรด์ที่มีต่อค่า mixing time การเติมแคลเซียมคลอไรด์ลงในยางมะตอยอิมัลชัน

(Emulsions สูตร 5 และ 7) ค่า mixing time มีค่าลดลงและการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ใน emulsion สูตร 8 ยังทำให้ค่า mixing time ลดลงอีกด้วย การลดลงของค่า mixing time เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์นั้น เนื่องมาจากแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ความหนืดของอิมัลชันลดลงและการ osmosis ของน้ำเข้าไปในบิพูเมนยังลดลงอีกด้วย จึงทำให้เกิดการ Coalescence ได้เร็วขึ้น [8]

4.4.1.2 ผลของน้ำยางธรรมชาติคงรูป

เมื่อปรับปรุงสมบัติของบิพูเมนด้วยพอลิเมอร์จะทำให้ค่าการยึดติด (cohesion) การต้านทานการแตกร้าว (cracking) ที่อุณหภูมิต่ำและต้านทานการไหลที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงขึ้น [29] ลาแทกซ์เป็นพอลิเมอร์ซึ่งกระจายตัวอยู่ในน้ำ ซึ่งเหมาะสมอย่างมากสำหรับให้ปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน ลาแทกซ์อาจอยู่ในรูปของ anionic, nonionic และ cationic ซึ่งสิ่งที่สำคัญคือ ลาแทกซ์ต้องสามารถเข้ากันได้กับอิมัลชัน ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูป (pre-vulcanized natural rubber latex, PVNR) เป็นสารปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน โดยน้ำยางธรรมชาติจะถูกทำให้มีเสถียรภาพด้วย nonionic stabilizer และเติมสารเคมีต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง กลายเป็นน้ำยางธรรมชาติคงรูปก่อนนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน การเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติคงรูปในที่จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

4.4.1.2 ผลของสารลดการเกิดฟอง

การเกิด creaming หรือ sedimentation เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพ [30] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารลดการเกิดฟอง (antifoam) จึงทำให้ค่า mixing time ของ Emulsions สูตร 16 มีค่าเพิ่มขึ้น

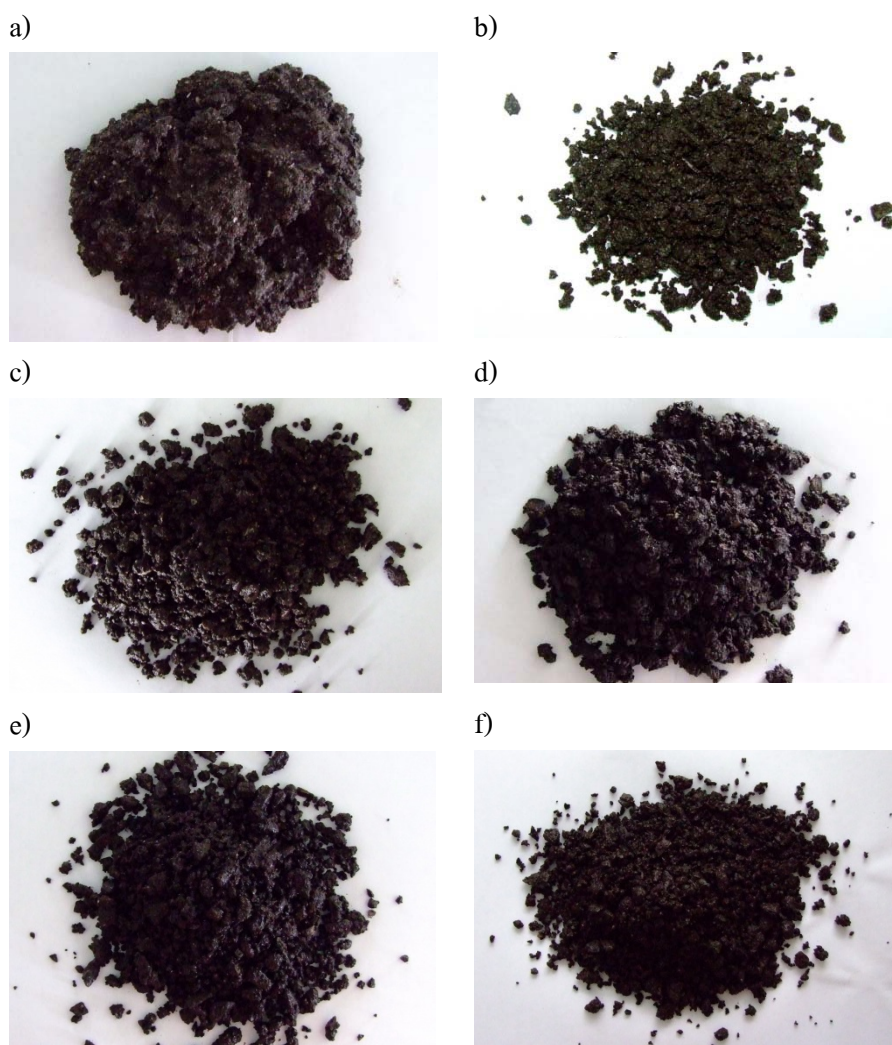
4.5.2 ผลของสารเคมีต่าง ๆ ที่มีต่อค่าเวลาในการผสมการเคลือบของยางมะตอยอิมัลชันบนผิวของมวลรวมหินหลังการแตกตัวของอิมัลชัน

การเคลือบของยางมะตอยอิมัลชันบนผิวของมวลรวมหิน หลังจากการแตกตัวแล้วของยางมะตอยอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 36 ยางมะตอยอิมัลชันสูตรที่ 3 (รูปที่ 36a) ซึ่งใช้ CTAB เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์เพียงตัวเดียวนั้น เห็นได้ชัดเจนแล้วว่าการเคลือบของยางมะตอยอิมัลชันบนผิวของหินที่ไม่ดี เราสามารถเห็นผิวของหินได้อย่างชัดเจน กระบวนการปกติของการบ่มตัว (setting) ของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก (cationic emulsion) เมื่อสัมผัสกับหินมีกระบวนการหลัก ๆ ดังนี้ [8]

1. สารอิมัลซิไฟเออร์อิสระจะดูดซึมลงบนผิวของหินซึ่งมีประจุตรงข้ามกัน และทำให้ประจุบางส่วนที่ผิวของหินเป็นกลาง ขณะเดียวกันก็เป็นการทำให้พื้นผิวซึ่งมีความเป็นขรุขระนั้นมีความเป็นขรุขระลดลง
2. แร่ธาตุซึ่งมีในหินทำให้ความเป็นกรดในอิมัลชันเป็นกลาง ส่งผลให้หยดของ

อิมัลชัน (emulsion droplets) สูญเสียประจุ และทำให้เกิดการ flocculation ของหยดของยางมะตอย (asphalt droplets) ขึ้นก่อนจากนั้นจึงเกิด coalescence ตามมาอย่างช้า ๆ

3. น้ำถูกดูดซึมโดยหิน ขณะเดียวกันก็เกิดการระเหยออกจากระบบ
4. หยดของอิมัลชันซึ่งสัมผัสกับหินแพร่กระจายไปบนผิวของหิน โดยเฉพาะบริเวณผิวของหินซึ่งไม่มีขี้ (lipophilic) เนื่องจากการดูดซึมของอิมัลชันไฟเออร์ และในขั้นสุดท้ายจะเกิดฟิล์มของน้ำบนผิวของหิน



รูปที่ 36 แสดงการเคลือบของยางมะตอยอิมัลชันบนผิวของมวลรวมหินหลังจากการแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชัน ; a) สูตร 3, b) สูตร 6, c) สูตร 8, d) สูตร 9, e) สูตร 15, f) สูตร 16

จากกลไกดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ความว่องไวของสารอิมัลซิไฟเออร์จะมีผลต่อการเคลือบของยางมะตอยลงบนผิวของหินหรือมวลรวม ดังนั้น CTAB ซึ่งเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ประเภท quaternary ammonium ซึ่งมีความว่องไวในการดูดซับบนผิวของหินได้น้อยกว่านั้นจึงมีความสามารถในการเคลือบของยางมะตอยบนผิวของหินต่ำ (อิมัลชันสูตร 3 ในรูป 36a) จึงมีลักษณะของการเคลือบผิวที่ต่ำกว่าอิมัลชันสูตรอื่น เมื่อเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ประเภทอะมีนซึ่งมีความว่องไวมากกว่าลงไป การดูดซับของอิมัลซิไฟเออร์อิสระจึงเกิดได้ดีขึ้นการเคลือบผิวของยางมะตอยบนมวลรวมหินจึงสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคลอไรด์สารลดการเกิดฟองส่งผลไม่ชัดเจนนักต่อการเคลือบของยางมะตอยบนผิวของมวลรวมหิน (รูปที่ 36c และ f)

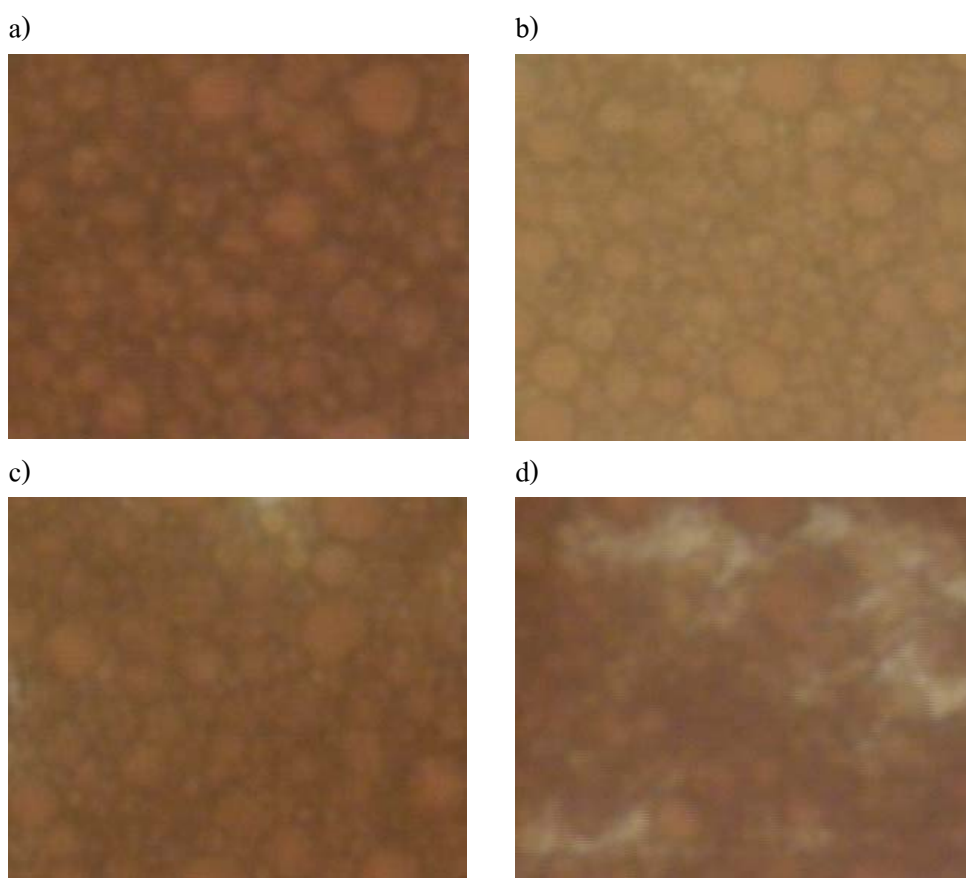
4.5 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานของยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยาธรรมชาติในรูปแบบในผิวทางพาราเลลรีชีลประเภทที่สอง

จากการศึกษาผลสารเคมีต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาในการผสมและการเคลือบของยางมะตอยอิมัลชันบนผิวของมวลรวมหินทำให้สามารถเลือกสูตรส่วนผสมของยางมะตอยอิมัลชัน และทำการศึกษาผลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติโดยใช้ส่วนผสมดังตารางที่ 18 และลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยทั้ง 4 สูตรแสดงดังรูปที่ 37

ตารางที่ 18 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของส่วนประกอบของยางมะตอยอิมัลชันสูตร AE, 3NAE, 3PAE และ 5PAE

สูตร ส่วนประกอบ (w/w %)	AE	3NAE	3PAE	5PAE
Bitumen	60	60	60	60
CTAB	0.75	0.75	0.75	0.75
Gernamin TAB 100	0.50	0.50	0.50	0.50
HCl	0.50	0.50	0.50	0.50
Antifoam	0.20	0.20	0.20	0.20
CaCl ₂	0.20	0.20	0.20	0.20
NRL(%DRC)	-	3.0	-	-
PVNRL (%DRC)	-	-	3.0	5.0
Water	37.85	34.85	34.85	32.85

จากรูปที่ 37 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันด้วยน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคงรูปในปริมาณ 3% DRC ของน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคงรูปไม่สามารถเห็นความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติคงรูปเป็น 5% DRC ของน้ำหนักอิมัลชันทั้งหมด จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของทางกายภาพของยางมะตอยอิมัลชัน คือจะเห็นวัฏภาคที่ต่อเนื่องของน้ำยางธรรมชาติคงรูปกระจายอยู่ในอิมัลชัน (ลักษณะของสีที่สว่างกว่าในรูปที่ 37d)



รูปที่ 37 แสดงภาพของยางมะตอยอิมัลชันสูตร AE (a) 3NAE (b) 3PAE (c) 5PNE (d) ที่ได้จากกล้อง Microscope ที่กำลังขยาย 50 เท่า

นอกจากนี้ยังทดสอบยางมะตอยอิมัลชันทั้ง 4 สูตรตามมาตรฐานสำหรับพาราเลอซีลชนิดที่ 2 (Para slurry seal type II) ของแผนกผิวทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ซึ่งจากการลองผิดลองถูก (Trial and error) จะได้อัตราส่วนผสมคือ มวลรวม 100 กรัม สารตัวเติม (filler) คือ

Portland cement ปริมาณ 1 กรัม น้ำปริมาณ 8 กรัม และยางมะตอยอิมัลชันปริมาณ 11 กรัม โดยค่าเวลาในการผสม และค่า Wet track abrasion ของยางมะตอยอิมัลชันทั้ง 4 สูตรแสดงดังตารางที่ 19

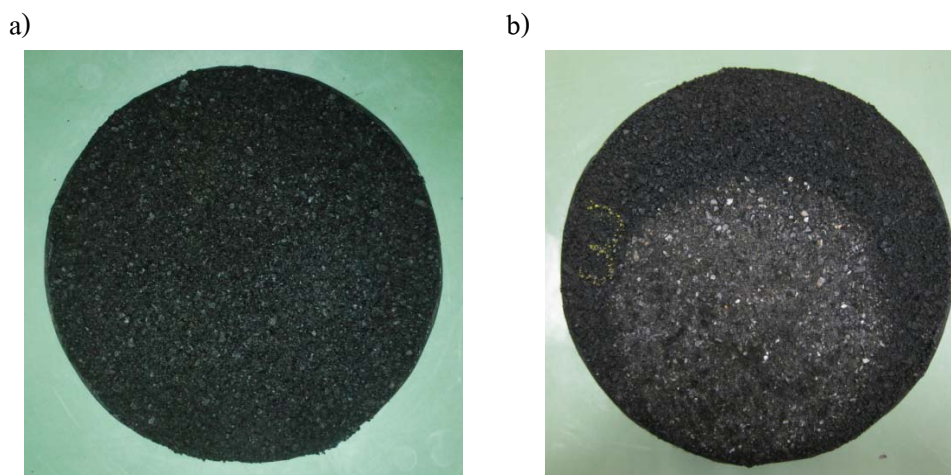
ตารางที่ 19 แสดงค่าเวลาในการผสม (Mixing time) และค่า Wet track abrasion ของยางมะตอยอิมัลชันสูตร AE, 3NAE, 3PAE และ 5PAE

Formula	Mixing time (s)	Wet track abrasion (g/m ²)
AE	40	1426.19
3NAE	70	1076.74
3PAE	75	1117.19
5PAE	125	630.17

จากตารางที่ 19 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มไม่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติคกรูป ยางมะตอยอิมัลชันสูตร AE จะมีเวลาในการผสมเพียง 40 วินาที เมื่อเติมน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติคกรูปในปริมาณ 3% DRC โดยน้ำหนักของอิมัลชัน จะทำให้ค่าเวลาในการผสมเพิ่มขึ้นเป็น 70 และ 75 วินาที ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มน้ำยางธรรมชาติคกรูปเป็น 5% DRC โดยน้ำหนักของยางมะตอยอิมัลชันค่าเวลาในการผสมจะเพิ่มขึ้นเป็น 125 วินาที การเพิ่มขึ้นของเวลาในการผสมของยางมะตอยอิมัลชันเมื่อเติมน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคกรูป อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของยางซึ่งมีขนาดใหญ่เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือหยดของอิมัลชัน ทำให้เกิดการชนกันและเกิดการรวมตัวกันของยางมะตอยเกิดได้ยากขึ้น การแตกตัวจึงต้องใช้เวลามากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติคกรูป คือ ยางมะตอยอิมัลชันสูตร 3NAE และ 3PAE พบว่าเวลาในการผสมแตกต่างกันไม่มาก โดยการเติมน้ำยางธรรมชาติคกรูปจะมีค่าเวลาในการผสมมากกว่าการเติมน้ำยางธรรมชาติเพียงเล็กน้อย เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติคกรูปที่ใช้ในงานวิจัยมีระดับการคกรูปค่อนข้างต่ำ ขนาดของโมเลกุลจึงอาจมีความแตกต่างกันไม่มาก

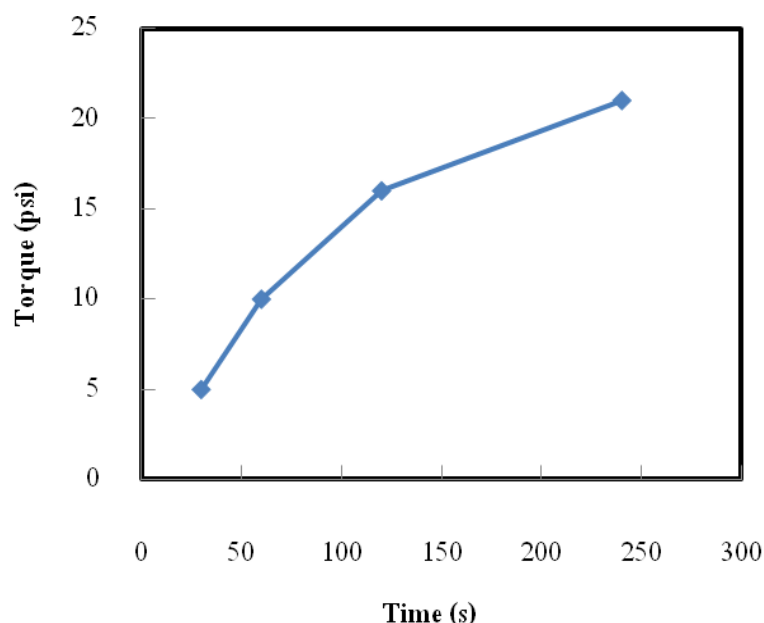
ค่า Wet track abrasion ของยางมะตอยอิมัลชันทั้ง 4 สูตรแสดงดังตารางที่ 19 ซึ่งพบว่ายางมะตอยอิมัลชันที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติมีค่า Wet track abrasion อยู่ที่ 1426.19 g/m² เมื่อปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันด้วย 3% DRC โดยน้ำหนักของยางมะตอยอิมัลชันของน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติคกรูปจะทำให้ค่า Wet track abrasion ลดลงเป็น 1076.74 และ 1117.19 g/m² ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติคกรูปเป็น 5% DRC โดยน้ำหนักของ

ยางมะตอยอิมัลชันจะทำให้ค่า Wet track abrasion ลดลงเหลือเพียง 630.17 g/m^2 ยางธรรมชาตินี้เป็นวัสดุที่มีค่าการต้านทานการสึกหรอหรือการต้านทานการขัดถูที่ดี โดยเฉพาะยางธรรมชาติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลแล้ว ฉะนั้นการเติมยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติคงรูปในยางมะตอยอิมัลชันจึงทำให้ค่า Wet track abrasion ลดลง



รูปที่ 38 แสดงชิ้นงานสำหรับทดสอบ Wet track abrasion a) แสดงชิ้นงานก่อนทดสอบ b) แสดงชิ้นงานหลังการทดสอบ

จากการทดสอบค่าเวลาในการผสม (Mixing time) และค่า Wet track abrasion พบว่ายางมะตอยอิมัลชันสูตร 5PAE มีค่าสมบัติทั้งสองใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของ Para slurry seal type II มาก โดยค่าที่กำหนดคือต้องมีเวลาในการผสมมากกว่า 120 วินาที แต่ไม่มากกว่า 240 วินาที ส่วนค่า Wet track abrasion นั้นต้องไม่มากกว่า 500 g/m^2 โดยรูปที่ 38 แสดงชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ Wet track abrasion ของยางมะตอยอิมัลชันสูตร 5PAE ซึ่งมีค่า Wet track abrasion เท่ากับ 630.17 g/m^2 ยางมะตอยสูตร 5PAE จึงถูกนำมาทดสอบหาค่า Set time และ Cure time ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยางมะตอยสูตร 5PAE ไปใช้จริง



รูปที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่า torque ที่ได้จากเครื่อง cohesive tester ของส่วนผสมมวลรวมหินกับยางมะตอยอิมัลชันสูตร 5PAE

ค่า Set time มีวิธีการทดสอบตามหัวข้อ 3.8.2 และ Set time คือเวลาที่ยางมะตอยอิมัลชันซึ่งผสมอยู่กับมวลรวมหินเริ่มเซตโดยทั่วไปแล้วค่า Set time ตามมาตรฐาน Para slurry seal type II ต้องไม่เกิน 30 นาที และจากการทดสอบพบว่าค่า Set time ของยางมะตอยสูตร 5PAE อยู่ที่ 20 นาที 52 วินาที สำหรับค่า Cure time มีวิธีการทดสอบตามหัวข้อ 3.8.3 ค่า Cure time หรือเวลาในการบ่มตัวนั้นเป็นเวลาที่ยางมะตอยซึ่งเคลือบบนมวลรวมหินเกิดการยึดเกาะกันอย่างสมบูรณ์ การทดสอบจึงทดสอบค่าการยึดเกาะระหว่างยางมะตอยกับมวลรวมหิน โดยรูปที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque จากเครื่อง cohesive tester กับเวลาของส่วนผสมยางมะตอยอิมัลชันกับมวลรวม โดยตามมาตรฐาน Para slurry seal type II แล้วค่า Cure time คือเวลาที่ส่วนผสมมีค่า torque ที่อ่านได้จากเครื่อง cohesive tester มีค่าเท่ากับ 20 psi และต้องมีค่าไม่มากกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่ Cure time ของยางมะตอยอิมัลชันสูตร 5PAE คือเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง 30 นาที และเมื่อนำกากยางมะตอยอิมัลชันสูตร 5PAE มาทดสอบค่าเพนิเตอร์ชัน 32 ± 0.1 mm และได้ค่าจุดอ่อนตัว 78.2°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสารเคมีต่าง ๆ ของอิมัลชันในที่นี้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของกากของยางมะตอยอิมัลชันไม่มากนัก ทำให้สามารถสรุปได้ว่ายางมะตอยอิมัลชันสูตร 5PAE นี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริงได้กับผิวทางพาราสเลอรีซีลประเภทที่ 2 ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมน้ำยางคงรูปโดยการกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะได้น้ำยางคงรูปที่มีสมบัติต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีที่ใช้และชนิดของสารเคมีที่ใช้ กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณสารเคมีทั้งสามชนิด คือ ตัวกระตุ้นซึ่งคือนิกโคตริกแอซิด ตัวเร่งปฏิกิริยา ZDEC และซัลเฟอร์ จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลมากขึ้นเห็นได้จากอัตราการบวมตัวที่ลดลง สำหรับผลของการเพิ่มสารเคมีบางตัวนั้นพบว่า การเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาและซัลเฟอร์จะส่งผลต่ออัตราการบวมตัวเล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณซึ่งคือนิกโคตริกแอซิดจะทำให้อัตราการบวมตัวลดลงอย่างมาก และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมระหว่าง ZDEC และ ZMBT นั้นทำให้อัตราการบวมตัวลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZDEC เพียงตัวเดียว การนำน้ำยางธรรมชาติคงรูปที่ได้มาปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน และศึกษาผลของสารเคมีต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของยางมะตอย คือน้ำหนักแห้ง จุดอ่อนตัว และลักษณะทางกายภาพ พบว่า

1. การเติมน้ำยางธรรมชาติ หรือน้ำยางธรรมชาติคงรูปในยางมะตอยอิมัลชันจะทำให้ค่าของยางมะตอยมีค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น และค่าพินิตเรชันลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับยางมะตอยอิมัลชันซึ่งไม่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติใด ๆ และค่าของยางมะตอยอิมัลชันที่เติมน้ำยางธรรมชาติคงรูปนั้นจะมีค่าจุดอ่อนตัวจะสูงกว่า และค่าพินิตเรชันที่ต่ำกว่าค่าของยางมะตอยอิมัลชันที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติ โดยมีลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยที่ไม่แตกต่างกัน
2. เมื่อพิจารณาจากยางมะตอยอิมัลชันที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติคงรูป พบว่าการเพิ่มปริมาณสารเคมีทั้งสาม จะทำให้ค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นและค่าพินิตเรชันลดลง การใช้สารเคมีทั้งสามมากเกินไปจะทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างยางธรรมชาติกับบิทูเมน
3. การเพิ่มปริมาณซึ่งคือนิกโคตริกแอซิด หรือซัลเฟอร์เพียงชนิดเดียวจะส่งผลต่อค่าพินิตเรชันและจุดอ่อนตัวค่อนข้างน้อย แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ค่าพินิตเรชันลดลงและจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษาพบว่าน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR1 ซึ่งมีปริมาณตัวกระตุ้นเชิงซ้อนออกไซด์ ตัวกระตุ้น ZDEC และซัลเฟอร์ในปริมาณที่เท่ากัน คือ 1 phr มีความเหมาะสมทางด้านคุณสมบัติ และทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดสำหรับนำมาปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันมากที่สุด โดยยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วย 3% DRC ของน้ำยางธรรมชาติคั่งรูปสูตร PVNR1 มีค่าจุดอ่อนตัว 60.00 °C ค่าเพนิเตอร์ชัน 39.30 *0.1 mm และมีการกระจายตัวของยางธรรมชาติที่สม่ำเสมอ การเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติสูตร PVNR1 เป็น 5% DRC ทำให้ค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 66.75°C ค่าเพนิเตอร์ชัน 30.64 *0.1 mm และมีการกระจายตัวของยางธรรมชาติที่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน อีกทั้งยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางคั่งรูปสูตร PVNR1 ปริมาณ 3% DRC ยังมีสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน และสมบัติของกากของยางมะตอยใกล้เคียงกับมาตรฐานอุตสาหกรรมมอดิไฟด์แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับงานทางอีกด้วย

การศึกษาการใช้ยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางคั่งรูปสูตร PVNR1 กับงานใช้งานจริงนั้นทำให้พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกตัวของอิมัลชันเมื่อสัมผัสกับหิน มีดังนี้

1. ชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ โดยสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีหมู่ว่องไวประเภทอะมีนจะมีความว่องไวกว่าสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีหมู่ว่องไวประเภท quaternary ammonium ion
2. ปริมาณของสารอิมัลซิไฟเออร์ ยางมะตอยอิมัลชันที่มีสารอิมัลซิไฟเออร์สูงกว่าจะเกิดการแตกตัวที่ช้ากว่า
3. ปริมาณของสารเติมแต่ง คือ สารลดการเกิดฟองและเคลือบผิวคลอไรด์ซึ่งเป็นสารควบคุมความหนืด
4. ปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เติมลงไป คือ การเติมยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชันเมื่อสัมผัสกับหินเกิดได้ช้าลง

นอกจากนี้ ชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ยังส่งผลต่อการเคลือบของยางมะตอยอิมัลชันบนผิวของมวลรวมหินอีกด้วย โดยยางมะตอยอิมัลชันที่มีสารอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งมีความว่องไวมากกว่าจะมีการเคลือบผิวบนมวลรวมหินที่ดีกว่า

จากการจำลองการใช้งานจริงของยางมะตอยอิมัลชันกับมวลรวมหิน ของผิวทางพาราเลลโร้ดซีลประเภทที่ 3 ทำให้ทราบว่ายางมะตอยอิมัลชันที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูป 5% DRC มีค่า Wet track abrasion ต่ำที่สุด รองลงมาคือยางมะตอยอิมัลชันที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคั่งรูป 3% DRC และยางมะตอยอิมัลชันที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติ 3% DRC ตามลำดับ โดยยางมะตอยอิมัลชันที่ไม่มีการปรับปรุงมีค่า Wet track abrasion สูงที่สุด

การเปรียบเทียบความเป็นไปได้ของการใช้ยางมะตอยอิมัลชัน ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูป 5% DRC กับผิวทางพาราสเลอรีซีลประเภทที่ 3 พบว่าสมบัติเบื้องต้น คือ ค่า Mixing time, Set time, Cure time และ Wet track abrasion มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานที่กำหนด

ข้อเสนอแนะ

1. ลักษณะการกระจายตัวของยางธรรมชาติซึ่งผ่านการเชื่อมโยงบางส่วน ในมวลรวมของผิวถนนนั้นยังไม่สามารถคาดเดาได้ โดยมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางเพิ่มเติมระหว่างในการใช้งานจริง
2. การเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารอิมัลซิไฟเออร์ในยางมะตอยอิมัลชันมีความสำคัญอย่างมาก โดยต้องคำนึงถึงหลาย ๆ ปัจจัย สารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีหมู่ที่ว่องไวประเภทไออะนิกจะมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูง แต่จำเป็นต้องใช้สารเติมแต่งประเภทตัวหน่วงปฏิกิริยาการแตกตัวเมื่อยางมะตอยอิมัลชันสัมผัสกับมวลรวมหิน โดยต้องศึกษาความเหมาะสมของชนิดและปริมาณของตัวหน่วงปฏิกิริยาการแตกตัวต่อไป
3. การทำให้น้ำยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่เหมาะสมนั้น จะทำให้น้ำยางธรรมชาติคงรูปที่ได้มีเสถียรภาพสูง จึงมีความเป็นไปได้สูงสำหรับการเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติคงรูปให้มากขึ้นอีก เพื่อปรับปรุงสมบัติยางมะตอยอิมัลชันให้ดียิ่งขึ้น และเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้น้ำยางธรรมชาติในประเทศไทยอีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] วิสุทธิ์ ศุภรัตน์ , “การลาดผิวถนนด้วยยางพาราผสมแอสฟัลต์ (ยางมะตอย)”, วารสารยางพารา 1 (2544).
- [2] วชิรินทร์ วิทยกุล, “แอสฟัลต์เทคโนโลยีสำหรับถนนลาดยาง”, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : กรุงเทพฯ, 2543
- [3] H. Ozen, A. Aksoy, S. Tayfur and F. Celik, “Laboratory performance comparison of the elastomer-modified asphalt mixtures”, Building and Environment, article in press
- [4] วิจิต สุวรรณปรีชา, การใช้ยางพาราผสมยางมะตอยฉาบผิวถนน เพิ่มปริมาณการใช้ยางในประเทศ ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 24 เมษายน 2551, สืบค้นจาก http://www.thailandrubber.thaigov.net/knowledge_1p.html
- [5] ทวีศักดิ์ ชัยธรรมกุล, “การปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติ” ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] วชิรินทร์ วิทยกุล, “ยางมะตอยน้ำสำหรับงานถนน”, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : กรุงเทพฯ, 2548
- [7] Akzo Nobel, Bitumen emulsifiers [online], Date of searched 28 April 2008, From http://www.surface.akzonobel.com/asphalt_russian/chemicals/be/morebe.htm
- [8] Transportation research board, characteristic of bituminous materials committee, “Asphalt emulsion technology”, Transportation Research Circular E-C102 (2006)
- [9] Y. Yildirim, “Polymer modified asphalt binders”, Construction and Building Materials, Vol. 21 (2007), 66–72.
- [10] X. Lu and U. Isacsson, “Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens”, Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 1 (1997), 23-32.
- [11] X. Lu and U. Isacsson, “Modification of road bitumens with thermoplastic polymers”, Polymer Testing, Vol.20 (2001), 77–86.
- [12] H. Fu, L. Xie, D. Dou, L. Li, M. Yu and S. Yao, “Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer”, Construction and Building Materials, Vol. 21 (2007), 1528–1533.

- [13] L.E. Chavez-Valencia, E. Alonso, A. Manzano, J. Perez b, M.E. Contreras and C. Signoret, “Improving the compressive strengths of cold-mix asphalt using asphalt emulsion modified by polyvinyl acetate”, Construction and Building Materials, Vol. 21 (2007), 583–589.
- [14] ส่วนมาตรฐานและข้อกำหนด สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, วิธีฉาบผิวแบบพาราเลอริซัล มาตรฐานที่ ทล.-ม 415/2546, วันที่สืบค้น 6 ธันวาคม 2552, สืบค้นจาก <http://www.doh.go.th/dohweb/standard/dhs/dhs415-46.pdf>
- [15] พงษ์ธร แซ่อู๋, ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2548
- [16] วราภรณ์ ขจรไชยกูล, ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีโน ดีไซน์, 2549
- [17] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, สถิติยางโลก : การส่งออกยางธรรมชาติของไทย มาเลเซียและอินโดนีเซีย[ออนไลน์], วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2552, สืบค้นจาก <http://www.rubberthai.com/>
- [18] D.C. Blackley. Polymer lattices. 2nd ed. vol. 3. London : Chapman & Hall. 1997: p.34-67
- [19] จันทรฉาย ทองปิ่น และบัณฑิต ศรีนวลสุข, “การการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต Polymer Emulsified Bitumen โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นสารเชื่อมโยง”, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [20] อธิพล แจ่มชัด, “เอกสารประกอบการสอนวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง”, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] บริษัทเจริญทัศน์ จำกัด, เครื่องคอลลอยด์มิลล์[ออนไลน์], วันที่สืบค้น 22 ธันวาคม 2552, สืบค้นจาก <http://www.chareontut.com/Default.aspx?pageid=10>
- [22] I. Kett. Asphalt materials and mix design manual. New Jersey: Noyes publication. 1998: p.50-69.
- [23] Intron industrial product, Toughness and Tenacity Asphalt Test System[online], Date of searched 22 December 2009, From <http://www.instron.com/wa/library/StreamFile.aspx?doc=638>

- [24] ส่วนมาตรฐานและข้อกำหนด สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, วิธีการทดสอบหาความเหนียวและทนซิดีของวัสดุแอสฟัลต์ การทดลองที่มาตรฐาน ทล.-ท.416/2548, วันที่สืบค้น 6 ธันวาคม 2552, สืบค้นจาก <http://www.doh.go.th/dohweb/standard/dht/dht416-48.pdf>
- [25] R.B. Simpson. Rubber basics. Shropshire : Rapra published Limited. 2002 : p. 121.
- [26] J. Shiuh and K. Yi Lin, “Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers”, Journal of Materials Science, Vol. 40(2005), 87-95.
- [27] J. Sjoblom. Emulsions and Emulsion Stability. 2nd ed. Bergen: Taylor& Francis group. 2006 : p. 397-399.
- [28] T. Doi, S. Chitsuka and S. Arai. 1973. U.S. Patent 3,738,852.
- [29] F.J. Navarro, P. Partal et al.’ “Bitumen modification with a low-molecular-weight reactive isocyanate-terminated polymer”, Fuel, Vol. 86 (2007), 2291–2299.
- [30] D.N. Petsev. Emulsions: Structure Stability and Interactions 1st ed. Amsterdam: Elsevier Academic press. 2004 p.313-316.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การนำเสนอและตีพิมพ์งานวิจัยบางส่วนในงานประชุมวิชาการ

ผลงานการนำเสนองานวิจัย Oral Presentation ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials Research จากการเข้าร่วมประชุมวิชาการในงาน Functionalized and Sensing Materials (FuSeM) ณ ศูนย์ประชุมจุฬารักษ์ กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 9-11 ธันวาคม 2552

The Modification of Asphalt Emulsion using Pre-vulcanized Natural Rubber Latex for Highway Application

S. Malithong^{1,2}, and C. Thongpin^{1,2}

¹Materials Science and Engineering Department, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakornpathom, 73000, Thailand.

²Center of Excellent for Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand.

Corresponding Author: chanchai@su.ac.th, cmaterials@hotmail.com

Keywords: Pre-vulcanized Natural rubber Latex, Modified Asphalt Emulsion, Highway Application

Abstract. Asphalt emulsion is manufactured by emulsification of asphalt, and it is an energy-saving, ecologically safe material because it does not need any heating processes which can emit gas and fire hazard in its use. The purpose of this study is to elucidate the feasibility on using pre-vulcanized natural rubber latex as an admixture for asphalt emulsion in order to improve thermal stability and useful mechanical properties of the asphalt emulsion. The crosslink density was determined by swell ratio. The effect of vulcanizing agent on residue properties of modified asphalt emulsions was studied. The morphology properties of the modified asphalt were also investigated by using an optical microscope. The results showed that asphalt emulsion which was modified using pre-vulcanized NR latex could provide a standard asphalt emulsion and applicable for highway construction application. The mechanical and physical properties of the dried asphalt emulsion were also very well modified by the vulcanized rubber phase. The residue properties of modified asphalt with natural rubber and pre-vulcanized natural rubber latex, including softening point and penetration was improved. The increase in vulcanizing agent could also increase softening point. At low polymer contents, the samples reveal the existence of dispersed polymer particles in a continuous bitumen phase, whereas at high polymer contents a continuous polymer phase was observed.

Introduction

Asphalt has been widely used in road pavement as the binder of aggregate. Unfortunately, high-temperature rutting and low temperature cracking of asphalt or coating layer, due to severe temperature susceptibility, limit its further application. The addition of polymer, chain of repeated small molecules, to asphalt has been shown to improve performance. Pavement with modification exhibited greater resistance to rutting and thermal cracking and decreased fatigue damage stripping and temperature susceptibility. Polymers that have been used to modify asphalt include styrene-butadiene-styrene (SBS), styrene-butadiene rubber (SBR), rubber, ethylene vinyl acetate (EVA), polyethylene, and others. Desirable characteristics of polymer modified binders include greater elastic recovery, a higher softening point, greater viscosity, greater cohesive strength and greater ductility [1]. Many attempts [2] have been tried to modify the rubber for this aspect nonetheless the improvement on asphalt is still needed to carry on.

A number of researchers have modified asphalt in order to prepare hot-mix asphalt and there is little work about the modification of emulsions used in cold-mix asphalt (CMA) or asphalt emulsion, which it is an energy-saving, ecologically safe material because it does not need any heating processes creating gas emission and fire hazard in its use. Therefore, in this research, emulsified asphalt binder was modified with pre-vulcanized natural rubber latex to prepare cold-mix asphalt [3]. The purpose of this study is to elucidate the feasibility on using pre-vulcanized natural rubber latex as an admixture for asphalt emulsion in order to improve thermal stability and useful mechanical properties of the asphalt emulsion.

Materials and method:

Bitumen penetration 60/70 grade was used as base material for polymer asphalt emulsion. Commercial high ammonia Natural Rubber Latex (NRL) with the dried rubber content (DRC) of 60% was used in our work.

The preparation of prevulcanized natural rubber latex (PVNR): NRL, containing 60% DRC, of 167 g was stabilized with Igepal CO 890 and then mixed with vulcanizing agent, i.e. zinc oxide (ZnO) as an activator, zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC) as accelerator, zinc 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT) as an accelerator in some case and Sulphur dispersion with continuous stirring using mechanical stirrer at room temperature for 48 h to obtain pre-vulcanized natural rubber latex (PVNR). The formulation of PVNR formulae examined in this study is shown in **Table 1**. PVNR were then characterized to obtain %DRC and swell ratio (swell ratio = W_1/W_0 ; W_0 is designated as initial weight and W_1 is the weight of the sample after toluene uptake). The same test method also carried out for NRL before mixing in order to reference and compare with PVNR.

The preparation of asphalt emulsion: In order to prepare asphalt emulsion of 250g, 68.75 g of water, 12.5 g of HCl 11.25 g of emulsifier were mixed in a reactor then the PVNR containing 7.5 g of rubber was added with continuous stirring. The mixture was then transferred to the hot-melted bitumen, at 120 °C, which was pre-measured to obtain 150 g bitumen in modified asphalt emulsion. Mixing with continuous stirring at 1800 rpm was continued at 80 °C for 30 min to obtained polymer modified asphalt emulsion. The polymer modified asphalt emulsion was characterized by casting film and air dried to obtain the dried film. The properties film of polymer modified asphalt emulsion such as softening point and penetration were measured in accordance with ASTM D36 and D5, respectively. Morphology of polymer modified asphalt emulsion film was also investigated using an optical microscope. The modified asphalt emulsion was also prepared using colloid mill at 2000 rpm which composed of Bitumen 60% w/w, HCl 0.5% w/w, emulsifier 1.5 % w/w, water and 3% DRC from PVNR 1 (stated as 3PA in **Table 2**). The modified asphalt emulsion prepared using colloid mill was characterized according to TIS 2157-2547 standard of department of Highway. Unmodified asphalt emulsion with the same composition (stated as A in **Table 2**) prepared by colloid mill was also characterized.

Result and discussion:

The crosslink density of pre-vulcanized natural rubber was represented by swell ratio (**Table 1**). In order to compare the efficiency of the accelerators used, formulation PVNR 1 and PVNR 8 are considered. It was found that PVNR 8 showed lower swell ratio than the other. However, the efficient curing reaction giving rise to over crosslink density, at least for this case, and led to phase separation of rubber from bitumen. This lowered the softening point of the dried bitumen. The swell ratio also decreased with the content of vulcanizing agent (PVNR 5-7). As a result, all the additives affect crosslink density in the dried rubber. However, the useful parameters considered are also penetration and softening point. Penetration and softening point of unmodified asphalt were 46.42*0.1 mm and 48 °C. After NR or PVNR addition, the penetration was decreased and softening point was increased. As it has been known that polymer possesses better elasticity than other materials, in particular crosslinked rubber, therefore NR and PVNR enhance both properties of the bitumen. The increase in vulcanizing agent could also increase softening point (PVNR 5-7), as indicated. Modified asphalt, formulae: PVNR 1, PVNR 4, PVNR 6 and PVNR 7 showed high softening point (60, 61, 60 and 64 respectively). This could be due to high crosslink density and good dispersion of polymer in continuous bitumen phase as can be seen from optical micrographs in **Figure 1**.

PVNR 9 shown in **Fig. 1** exhibits distinct separation of rubber particle from continuous bitumen phase, according with the result of penetration and softening point that were inferior to those of NR.

Table1. Formula of PVNRL, Swell ratio of all PVNR and Penetration and softening point from residue of polymer modified asphalt emulsion that prepared in batch reactor

Formula	50% ZnO	50% ZDEC	50% ZMBT	50% S	Swell ratio	Penetration (*0.1mm)	Softening point (°C)
NR	-	-	-	-	-	40.20	56.00
PVNR 1	2	2	-	2	9.03	39.30	60.00
PVNR 2	2	2	-	4	11.49	41.38	55.00
PVNR 3	4	2	-	2	8.87	42.70	55.00
PVNR 4	2	4	-	2	9.14	37.20	61.00
PVNR 5	1	1	-	1	11.65	39.80	57.50
PVNR 6	3	3	-	3	6.51	42.50	60.00
PVNR 7	4	4	-	4	6.37	31.83	64.00
PVNR 8	2	1	1	2	6.38	43.13	57.00
PVNR 9	4	4	-	3	10.24	36.00	55.00
PVNR 10	4	4	-	1	11.30	37.86	57.50
5 % PVNR 1						30.64	66.75
unmodified Asphalt emulsion						46.40	48.00

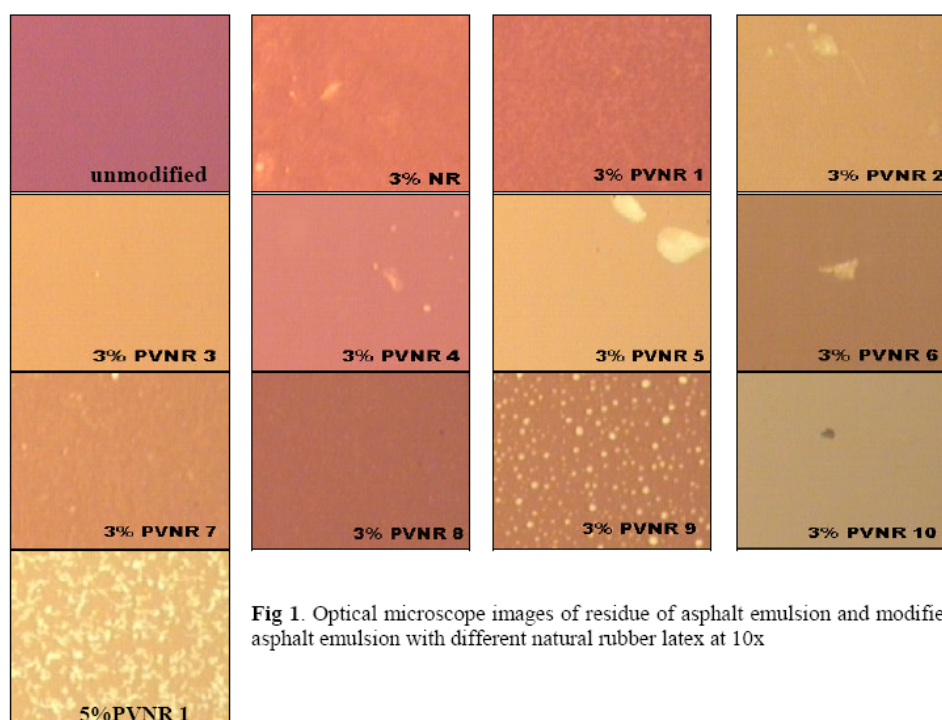


Fig 1. Optical microscope images of residue of asphalt emulsion and modified asphalt emulsion with different natural rubber latex at 10x

This might be due to the over crosslink. From the micrographs, also reveal that PVNR1 and PVNR7 showed the well dispersion and good dried asphalt emulsion properties. However, PVNR1 possesses a uniform dispersion and also economically applicable for the future application. Although the 5% DRC content in modified asphalt emulsion was found to exhibit great properties among all, the preparation in the large amount was suffered. The 3%DRC PVNR 1 modified asphalt was then selected to manufacture modified asphalt emulsion in a colloid mill. Then the milled modified asphalt emulsion was characterized according to TIS 2157-2547, department of Highway. The result was shown in **Table 2**. Sample No. A was unmodified asphalt emulsion and Sample No. 3PA was 3% DRC PVNR 1 modified asphalt emulsion. It was found that modified asphalt emulsion; PVNR1, exhibited acceptable properties followed standard asphalt emulsion for high way

applications. The demulsibility was increased when the PVNR 1 was added due to negative charge of NR particles. The addition of PVNR 1 that exhibits high elasticity and high thermal stability, as a result softening point and elastic recovery were improved.

Table 2. Result of modified and unmodified asphalt emulsion prepared by colloid mill according to Specification TIS. 2157-2547 of department of Highway

	Sample No. A	Sample No. 3PA	Specification TIS. 2157-2547
Test on emulsion			
1. Furol Viscosity at 50 C, sec	21	26	20-100
2. Settlement 5 days, %wt	2.4	1.6	7.5 Max.
3. Storage Stability 24 hrs, %wt	0.0	1.2	1.5 Max.
4. Sieve Test (Ret. on No. 20 mesh), %wt	0.01	0.00	0.1 Max.
5. Partical Charge Test	Positive	Positive	Positive
6. Demulsibility Test, %wt	6.0	61.1	40 Min.
7. Residue from Distillation, %wt	60.0	61.0	60 Min.
7.1 Oil Distillate, %wt	1	1	3 Max.
Test on residue (after evaporation)			
8. Softening point, Ring and Ball, C	53.1	58.7	50 Min.
9. Elastic Recovery at 25 C, 10 cm, %	25	57	20 Min.
10. Toughness and Tenacity, 25 C, 50 cm/ min.			
Toughness, kg.cm	14	30	40 Min.
Tenacity, kg.cm	5	2	20 Min.
11. Penetration at 25 °C, 100 g, 5 sec, 0.1 mm	60	45	60-120
12. Ductility at 13 C, 5 cm/min., cm	3.5	3	40 Min.
13. Solubility in toluene, % wt	100.0	100.0	97.5 Min.

Conclusion:

Pre-vulcanized rubber latex could be added to modify asphalt emulsion and improve properties of asphalt better than NR latex. Vulcanizing agent had an effect on properties of modified asphalt. The increase in vulcanizing agent could increase softening point. The addition 1 phr of following additives: activator; ZnO, accerelator; ZDEC and Sulphur, PVNR1 formula was found to give good in both mechanical and thermal properties, and also in term of economic to modified asphalt emulsion. The result also showed that an increase in polymer content the continuous polymer phase was observed. Moreover, PVNR1 modified asphalt emulsion could provide asphalt emulsion that possesses acceptable properties of modified asphalt emulsion for highway construction application.

Acknowledgement: The authors would like to express their sincere thanks to Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, Thailand for their financial support.

References

1. Y. Yildirim, Construction and Building Materials, Vol. 21(2007), p. 66–72.
2. B. Srinualsukh and C. Thongpin, “A Feasibility study of the Polymer-Emulsified Bitumen Production using Natural Rubber Latex as Binder”, M.Eng. Thesis, Graduate School, Silpakorn University, 2007
3. L.E. Chavez-Valencia, Construction and Building Materials, Vol. 21 (2007), p. 583–589.

ผลงานการนำเสนอรูปแบบ Oral Presentation ในการประชุมวิชาการด้านพลังงาน
ทดแทน วัสดุศาสตร์ และวัสดุวิศวกรรม ครั้งที่ 7 (7th Eco – Energy and Materials Science and
Engineering Symposium) ณ โรงแรมฮอติเคย์อินน์ จังหวัดเชียงใหม่ ในระหว่างวันที่ 19-22
พฤศจิกายน พ.ศ. 2552

7th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Chiang Mai, Thailand 19-22 Nov. 2009

Pavement Properties Formulated of Asphalt Emulsion Modified by Pre-Vulcanized Rubber Latex

S. Malithong, and C. Thongpin

Abstract— Asphalt has been widely used in road pavement as the binder of aggregate. Unfortunately, high-temperature rutting and low temperature cracking of asphalt or coating layer, due to severe temperature susceptibility, limit its further application. The addition of polymer to asphalt has shown to improve its performance. Pavement with modification exhibited a greater resistance to rutting and thermal cracking and decreased fatigue damage stripping and temperature susceptibility. Natural rubber is considered to be a significant economic plant in Thailand for its number one producer and exporter of natural rubber in the world. The purpose of this study is to elucidate the feasibility on using pre-vulcanized natural rubber latex as an admixture for asphalt emulsion in order to improve thermal stability and useful mechanical properties of the asphalt emulsion. It was reported from the previous work that the mechanical and physical property of dried asphalt emulsion was well modified by the vulcanized rubber phase. This part of the work, mixing design formulation of emulsified bitumen obtained in this study was elucidated. The amounts of compositions needed for mixing design were reported. The properties characterized according to high standard were also stated.

Keywords—Polymer modified asphalt emulsion, Natural rubber latex, Pavement application.

1. INTRODUCTION

Slurry seal or microsurfacing compositions were applied to paved roads to form a protective coating on the road surfaces. These compositions contain the same basic elements- aggregate rock, water, and asphalt emulsion. Both slurry seal and micro-surfacing composition may contain latex polymer. Para slurry seal is one type of slurry seal that applied to paved road in Thailand in case of pavement with high traffic and need high strength, high durability, high skid resistance and quick setting mixture designed to allow traffic run in one hour. Para slurry seal is consist of natural rubber latex modified asphalt emulsion, aggregate, mineral filler water and other additive. Natural rubber modified asphalt emulsion in Para slurry seal was caused the Para slurry seal pavement had high properties. Para slurry seal is classified in type I, II and III following gradation of aggregate, Para slurry seal type III was highest roughness.

To prepare and use s slurry seal compositions, an asphalt emulsion, aggregate rock and water was loaded in a vehicle by mechanism that prevented their mutual contact. The asphalt emulsion, aggregate rock and water was mixed in situ in a spreader box while the vehicle moved along the road and mixture was spread on the road. After the emulsion, aggregate rock and water were mixed, it was important that the composition flow easily and smoothly onto the road surface being protected and prematurely solidify. Namely, the asphalt emulsion,

aggregate rock and water must be mixed well and the mixture must have sufficient fluidity. When the mixture is spread on the road, demulsification of asphalt emulsion must be take place as soon as possible so that the mixture can rapidly set up [1].

The length of time between the beginning of mixing of slurry seal composition in the vehicle and the point in time when emulsion breakdown take place causing the mix become unusable was known as "mixing time". The mixing time was important, it must be long enough to prevented asphalt emulsion breakdown in the vehicle but emulsions could be breakdown in appropriately time. The mixing time cloud be measured on small scale in laboratory using small scale mixture of the same component.

In this study, the mixing time of natural rubber modified asphalt emulsion was measured on small scale in laboratory using small scale mixture of the same component. The effect of type of emulsifier, emulsifier content and type of additive on the mixing time was investigated by using Para slurry seal type III.

2. EXPERIMENT

Materials

High ammonium natural rubber latex 60% DRC was used in this study. Hexadecyltrimethyl ammonium bromide (CTAB), Oleyamine, CaCl_2 , Silicone antifoam were purchased from Fukla. Gernamin TAP 100 (Gernamin) was supported by Clariant (Thailand) Limited. Asphalt 60/70 penetration grade was supplied by Tipco Asphalt Public company Limited. Igepal CO 890 was purchased Sigma Aldrich (USA), 50 % zinc oxide (ZnO), 50% zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC) and 50% Sulphur dispersion was supplied by Rubber Research Institute of Thailand. Aggregate rock and Portland cement were Para slurry seal type III that was supported by Bituminous Surface Branch, Department of Highway.

S. Malithong is with the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand, E-mail: au_su@hotmail.com

C. Thongpin is with the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand, E-mail: chanchai@su.ac.th, cmaterials@hotmail.com

The preparation of prevulcanized natural rubber latex (PVNR).

NRL, containing 60% DRC, of 167 g was stabilized with 3 % DRC of Igepal CO 890 and then mixed with vulcanizing agent, i.e. 1 phr zinc oxide (ZnO) as an activator, 1 phr zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC) as accelerator and 1 phr Sulphur dispersion with continuous stirring using mechanical stirrer at room temperature for 48 h to obtain pre-vulcanized natural rubber latex (PVNR).

Asphalt Emulsion production

Emulsifier (Hexadecyltrimethyl ammonium bomite (CTAB), Oleyamine and Gernamin TAB 100) , water and other additive (HCl, Silicone antifoam and CaCl_2) were mixed together and were known as "soap". The soap was mixed with hot asphalt (120 °C) in colloid mill to make asphalt emulsion. The formula of modified asphalt emulsion was shown in table 1.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Asphalt emulsions are very complicated and use a lot of chemistry to get the emulsion properties desired. Variables in emulsion production include the base asphalt and the type and amount of emulsifying agent. There are two basic classifications of emulsions, anionic and cationic. The type (chemistry) of the emulsifying agent used determines the designation. Emulsifying agents are the chemicals used to stabilize the emulsion and keep the "billions and billions" of asphalt drops separated from one another. These compounds are large organic molecules that have two distinct parts to them. These parts are called the "head" and "tail." The "head" portion consists of a group of atoms that chemically have positive and negative charge areas. These two charged areas give rise to the head being called polar (as in poles of a magnet). Because of this polarity, and the nature of some of the atoms in this polar head, the head is soluble in water. The tail consists of a long chain organic group that is not soluble in water,

Table 1. The formulation of modified emulsion and its mixing time

Formula	Bitumen (%wt)	CTAB (%wt)	Oleyamine (%wt)	Gernamin (%wt)	CaCl_2 (%wt)	HCl (%wt)	Antifoam (%wt)	PVNR (%DRC)	Mixing time (min.)
1	60	1	-	-	-	0.5	0.04	3	30:00
2	60	0.75	-	-	-	0.5	0.04	3	15:00
3	60	0.5	-	-	-	0.5	0.04	3	4:00
4	60	1	-	-	-	0.5	0.04	5	15:00
5	60	0.75	-	-	0.2	0.5	0.04	3	12:00
6	60	0.75	0.2	-	-	0.5	0.04	3	4:30
7	60	0.75	0.2	-	0.2	0.5	0.04	3	1:55
8	60	0.75	0.2	-	0.5	0.5	0.04	3	1:25
9	60	0.75	-	0.2	0.2	0.5	0.04	3	2:05
10	60	-	1	1	-	0.5	0.04	3	*
11	60	0.75	0.5	-	-	0.5	0.04	5	1:40
12	60	0.5	0.5	-	-	0.5	0.04	5	*
13	60	0.5	0.75	-	-	0.5	0.04	5	*
14	60	0.75	-	0.5	-	0.5	0.04	5	1:45
15	60	0.75	-	0.5	0.2	0.5	0.04	5	1:00
16	60	0.75	-	0.5	-	0.5	0.2	5	2:28

* The mixing time could not defined

Hand mix formulations were prepared to evaluate mixing time. 200 grams of aggregate rock (Para slurry seal type III) and 2 g of filler (Portland cement) were added to mixing container, stirred until homogeneous. Then 10 g of water was added and stirred 30 second finally 21 g of emulsion was added to mixture container. The mixture was stirred and stirring proceeded using a metal spatula, by hand, at the rate of 60-70 times per minute until the asphalt emulsion broke. The initial mixtures were all liquids with the aggregate and emulsion homogeneous. Breaking of the emulsion was easily noted when the liquid gradually become less fluid and eventually formed a ball. The mixing time was determined from stirring all compositions were started until emulsion breakdown. Bituminous Surface Branch, Department of Highway was defined the mixing time of Para slurry seal type III between 2 to 4 minutes.

but is soluble in other organic materials like oils (asphalts). Thus, an emulsifying agent is one molecule with both water-soluble and oil soluble portions. This unique characteristic gives the chemical its emulsifying ability. During the last 30 years the cationic emulsifiers had dominated in bitumen emulsions for road applications. The main advantage was the good adhesion to acidic stone materials which usually is preferred for road constructions due to their good mechanical properties. So in this works, cationic emulsifier was used emulsified modified asphalt emulsion. Many of research had been effort to elucidate the mechanism of setting and curing of asphalt emulsion [2]. They found that the important factor were change in pH caused by reaction of aggregate with acids in the emulsion, absorption of free emulsifier onto the aggregate surface and flocculation of the emulsion droplets with the fines. The relative timescale of flocculation (setting) and coalescence (curing) depended on the systems, but in general

flocculation was the more rapid process in which some water could be expelled from the system and some cohesive strength developed, followed by a slower coalescence process which resulted in a continuous asphalt phase. This asphalt phase must also adhere to aggregate. Coalescence was an inversion process; the oil in water emulsion was transformed into a water in oil type which then slowly lost its internal water phase. This inversion process was favored as the ratio of asphalt to water in the system increased. The tendency for an emulsion to invert could be determined in laboratory testing and had been related to curing behavior in the field.

From table 1., increasing emulsifier content from 0.5 in formula 3 to 1.0 in formula 1, mixing time was increased. If the emulsifier content in the emulsion was increased to a concentration higher than the CMC, the excess emulsifier will form micelles in the water phase. When mixing this type of emulsion with stone material, the excess emulsifier might coat the stones without destabilization of the emulsion. The breaking of the emulsion then becomes much slower and may even not take place until the water has evaporated [3].

Amine group in Oleylamine and Gernamine were more reactivity than quaternary ammonium that was permanent head group in CTAB so addition of Oleylamine (Emulsions formula 6 and 11 in Table 1.) and Gernamin (Emulsions formula 14 in Table 1.) decreased mixing time. Increasing Oleylamine content, the mixing time decreased due to the reactivity of emulsion increased. When the ratio of CTAB:Oleylamine was 0.5:0.5 and 0.5:0.75 (Emulsions formula 12 and 13 in Table 1.), the mixing time could not be defined due to the emulsion breaking immediately when it was contacted with aggregate because the emulsion had too high reactivity. This character was also occurred in emulsion formula 10 which used Gernamin and Oleylamine as co-emulsifiers.

Considering between Oleylamine and Gernamin, Gernamin was tallow alkyl propylene diamine, though it had two reactive amines but the long length chain caused its reactivity not different with Oleylamine. Thus the mixing time of emulsion formula 11 was not different with formula 14.

Asphalt contained a small amount of salt, which could lead to an osmotic swelling of the droplets in an emulsion as water was drawn into the droplet. This resulted in an increase in emulsion viscosity, often followed by a decrease as the salt slowly escaped. Calcium chloride was included in the emulsion at 0.1 to 0.5 % to reduce the osmosis of water into the bitumen and minimize the change in viscosity. It was customarily used in cationic bituminous emulsions to increase storage stability of the emulsions and, to some extent, to reduce the viscosity [2, 4]. So in this work calcium chloride was used as an additive to control viscosity and the effect of calcium on mixing time was also studied. Addition of calcium chloride to emulsion (Emulsions formula 5 and 7), the mixing time decreased and increasing calcium chloride in emulsion formula 8 was also decreased mixing time. Decreasing of mixing time with calcium chloride because calcium chloride reduced viscosity of emulsion and osmosis of water into bitumen was also reduced. Coalescence was faster with low viscosity caused mixing time decreased [2].

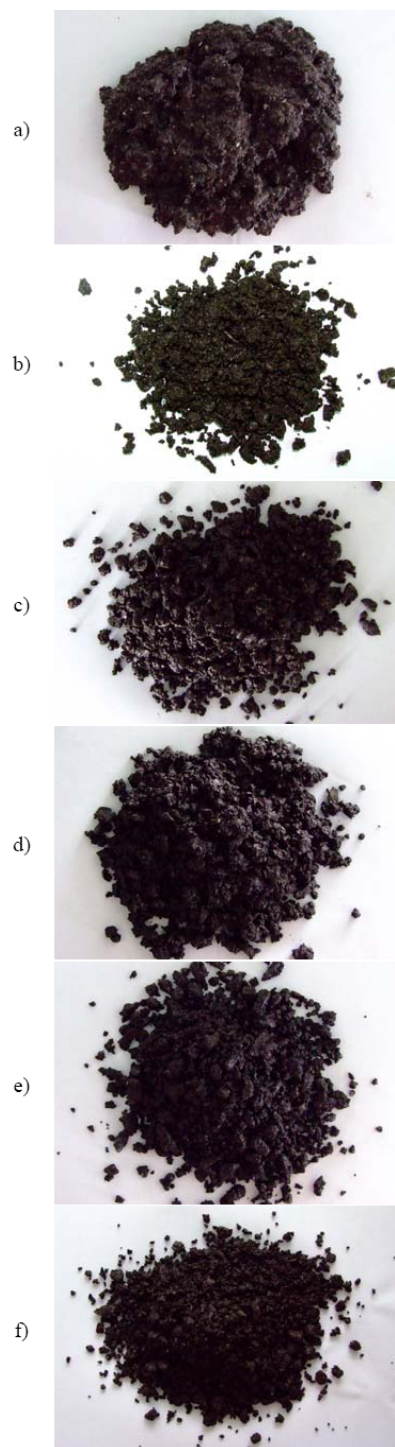


Fig.1. Photograph of Emulsions coated on Surface of Aggregate after Emulsions Breaking : a) Formula 3, b) Formula 6, c) Formula 8, d) Formula 9, e) Formula 15, f) Formula 16.

Polymer modification could improve the properties of bitumen in term of cohesion, resistance to cracking at low temperature, and resistance to flow at high temperature [5]. Latex is water-based dispersion of polymer which was particularly suited to the modification of emulsion. Latex came in anionic, nonionic, and cationic forms, and it was important that the latex type should be compatible with the emulsion. In this work, pre-vulcanized natural rubber latex was used modified asphalt emulsions and , pre-vulcanized natural rubber latex was stabilized with nonionic stabilizer before using as modifier so increasing latex content had insignificant effect on the mixing time in co-emulsifier system.

Creaming or sedimentation also caused stability loss [6]. Thus, increasing antifoam content resulted increasing of mixing time (Emulsions formula 16).

Coating of emulsions on surface of aggregate was showed in Fig.1. Emulsions formula 3 (Fig.1 a) which was used only CTAB as emulsifier was clearly found poor coating and we could saw some aggregate surface. In simplified process of setting of cationic emulsion where the aggregate did not contain significant fines, important stages in the setting process could be considered as follow [2]:

1. Free emulsifier adsorbs onto the (oppositely charged) mineral surface, which neutralizes some charge on the surface while at the same time making the surface area of the lipophilic.
2. Minerals neutralize acids in the emulsion, causing loss of charge on the emulsion droplets, leading first to flocculation of the asphalt droplets and then to a slower coalescence of the droplets.
3. Water is adsorbed by the mineral, as well as evaporates from the system.
4. Droplets in contact with the mineral spread on the surface, especially that surface made lipophilic by adsorbed emulsifier, eventually the water film on the aggregate surface

Therefore, CTAB was quaternary ammonium, adsorption onto mineral surface was low reactivity so coating on mineral surface was poor and emulsions formula 3 was also seem wetter than other. When amine emulsifiers which high reactivity was added, coating of emulsions onto surface of minerals was improve because of good adsorption of free emulsifiers on minerals surface. Increasing calcium chloride (Fig.1.c) and antifoam (Fig.1. f) content did not clearly effect on minerals surface coating.

4. CONCLUSION

The mixing time of modified asphalt emulsion with aggregate Para slurry seal type III cloud be measured on small scale in laboratory using small scale mixture of the same component. In case of quaternary ammonium emulsifier, increasing emulsifier content, the mixing time increased but inversion in amine emulsifier due to the reactivity of amine emulsifier was very high. Calcium chloride was used as additive and had effect on mixing time by decreasing viscosity. Antifoam was decreased creaming process resulted the mixing time increased. Modification asphalt emulsion with pre-vulcanized natural rubber latex insignificant effected on mixing time. Using co-emulsifiers between CTAB and amines could

improve minerals surface coating. Additive, Calcium chloride and antifoam, did not clearly effect on coating of emulsions on minerals surface. Increasing pre-vulcanized rubber latex content in emulsions was also insignificant influence on minerals surface coating.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University and the Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Thailand.

REFERENCES

- [1] John Howe, Cliton L. Hairston, H' Geln Hall III and Frederick L. Koerwitz. 2006. U.S. Patent Application Publication 2006/0229389 A1.
- [2] Delmar R. Salomon. 2006. *Asphalt Emulsion Technology*. Washington: Transportation Research Board.
- [3] J. Sjoblom. 2006. *Emulsions and Emulsion Stability* 2nd. Bergen: Taylor& Francis group.
- [4] Tadashi Doi, Shunzo Chitsuka and Sumio Arai. 1973. U.S. Patent 3,738,852.
- [5] Yetkin Yildirim. 2007. Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials* 21: 66-72.
- [6] D.N. Petsev. *Emulsions: Structure Stability and Interactions* 1st. Amsterdam: Elsevier Academic press.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล
ที่อยู่

นางสาวเสาวรส มะลิทอง
4 หมู่ 3 ตำบลบ้านทาน
อำเภอบ้านลาด
จังหวัดเพชรบุรี 76150
E-mail: au_su@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุ พอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2550	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและ วิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2549	ฝึกการปฏิบัติงานฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัทไทยคอมโพลีท
พ.ศ. 2551-2552	ผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร