

การดัดแปรยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ
ด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวทาดิเอน

MODIFICATION OF ANIONIC ASPHALT EMULSION WITH
NATURAL RUBBER LATEX AND STYRENE BUTADIENE LATEX

วันระวี เล้าหอดมโชค
WONRAVEE LOAHA-O-DOMCHOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของเอกสารวิชาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

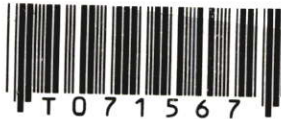
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดัดแปรยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ
ด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน

MODIFICATION OF ANIONIC ASPHALT EMULSION WITH
NATURAL RUBBER LATEX AND STYRENE BUTADIENE LATEX



วันระวี เลาหอุดมโชค

WONRAVEE LOAHA-O-DOMCHOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**MODIFICATION OF ANIONIC ASPHALT EMULSION WITH
NATURAL RUBBER LATEX AND STYRENE BUTADIENE LATEX**

WONRAVEE LOAHA-O-DOMCHOK

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

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตัดแปรยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ ด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน
นักศึกษา	นางสาววันระวี เลาหอุดมโชค
รหัสนักศึกษา	47064209
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	นายไกรศรี ดวงพัตรา

บทคัดย่อ

ยางมะตอยชนิดตัดแปรด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก สามารถเตรียมได้โดยการเติมพอลิเมอร์ปริมาณเล็กน้อยลงในยางมะตอยผ่านเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในแบบแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) และแอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt emulsion) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา PMA ชนิดใหม่จากการผสมน้ำยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางข้น (Concentrated Natural Rubber Latex, NRL) และน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene Butadiene Rubber Latex, SBRL) ลงในยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ เพื่อนำไปใช้ในงานฉาบผิวถนนโดยเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงและกระทรวงอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อยางมะตอยอิมัลชัน เช่น ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ แลคติกเคซีน (Lactic casein) และวินโซลเรซิน (Vinsol[®] resin) ศึกษาอัตราส่วน SBRL:NRL และปริมาณเนื้อยางแห้ง (%DRC) รวมถึงทำการเปรียบเทียบสมบัติกับยางมะตอยอิมัลชันทั่วไปที่ตัดแปรด้วยพอลิเมอร์ จากนั้นทำการเลือกสูตรผสมที่เหมาะสมนำมาศึกษาการออกแบบผิวทาง (Mixed design) เพื่อนำไปใช้ในงานฉาบผิวทางแบบไมโครซีล (Microseal)

จากการทดลองในส่วนองยางมะตอยอิมัลชันพบว่า อัตราส่วน SBRL:NRL ที่เหมาะสมคือ 65:35 ปริมาณของวินโซลเรซินและแลคติกเคซีนที่เหมาะสมคือ 0.6% และ 0.7% โดยน้ำหนักตามลำดับ และปริมาณเนื้อยางแห้งที่เหมาะสมคือ 6% เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมและผ่านตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกระทรวงอุตสาหกรรม สำหรับการศึกษารูปแบบส่วนผสมพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมคือการใช้ปริมาณสารเติมแต่ง ซีเมนต์และยางมะตอยอิมัลชันเท่ากับ 2%, 3% และ 16% โดยน้ำหนักของวัสดุรวม ตามลำดับ โดยเลือกใช้สารเติมแต่ง 1 (สารประกอบไนเตรต) เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าสารเติมแต่ง 2 (สารประกอบคลอไรด์) และเลือกใช้แหล่งวัสดุรวมจากสระบุรีเนื่องจากมีปริมาณของฝุ่นที่เหมาะสมกว่าการใช้แหล่งวัสดุรวมจากราชบุรีและนครสวรรค์และให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า

Thesis Title	Modification of Anionic Asphalt Emulsion with Natural Rubber Latex and Styrene Butadiene Latex
Name	Ms.Wonravee Loaha-o-domchok
Student ID	47064209
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Academic Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud
Thesis Co-Advisor	Mr.Krisri Duangpatra

ABSTRACT

Polymer Modified Asphalt (PMA) has been used widely in all over the world. It can be prepared by adding a small amount of polymer in hot asphalt and mixing with a high sheer mixing machine. This research was focused on modification of anionic emulsion by mixing with natural rubber latex (NRL) and styrene butadiene latex (SBRL) by a colloid mill. Properties of asphalt emulsion were compared with Department of Highway and Thai Industrial Standards (TIS). Comparative studies of the PMA and commercial Cationic asphalt emulsion (CSS-1h), Para slurry seal (CSS-1hp) and Anionic asphalt emulsion (SS-1hp) were carried out. Parameters affecting asphalt properties such as amounts of emulsifiers (Vinsole[®] resin and Lactic casein), styrene butadiene rubber and natural rubber ratios (SBRL:NRL) and percent of dry rubber content (%DRC) were studied. A suitable formula of asphalt emulsion was chosen for studying mixed design of microseal type II for road pavement test. It was found that properties of asphalt emulsion were enhanced and optimized when SBRL:NRL ratio of 65:35, 0.6% of Vinsole[®] resin and 0.7% of Lactic casein and 6% DRC of the modified rubber were used. From mixed design for road pavement study, it was found that 2% of additive I, 3% of cement and 16% of asphalt emulsion were suitable and showing optimum properties. Additive I (Nitrate compound) was used in the mixed design since it gave better properties compared to those with additive II (Chloride compound). Aggregate from Saraburi province was chosen because sand equivalent and properties of mixed design were suitable more than aggregate from Naconsawan and Ratchaburi provinces.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่ให้คำปรึกษา และดูแลการทำงานของผู้วิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณไกรศรี ดวงพัตรา บริษัทแบมโก จำกัด ที่รับเป็นที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนทั้งด้านความรู้ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ดร.นุชนาฏ ฌ ระนอง ที่กรุณาสละเวลาในการอ่านและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ฝ่ายวิจัยทางการแพทย์ ที่สนับสนุนทุนงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัทบีเอสที อีลาสโตเมอร์ ประเทศไทย จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ยางเอสบีอาร์และงบประมาณในการทำวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณจักรา สวัสดิ์บุรี คุณปริญญวัฒน์ ชงศรีเจริญ คุณน้ำฝน นริศราวุธ และ คุณชัชวาล ชันชัตต์บำรุง บริษัทบีเอสที อีลาสโตเมอร์ ประเทศไทย จำกัด ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ รวมทั้งติดต่อประสานงานในการทำวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณวิชัย กงพลนันท์ บริษัทแบมโก จำกัด ที่ได้ให้คำปรึกษาในการออกแบบผิวทางจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณสุขสันต์ แก้วคุณอก บริษัทแบมโก จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในการผสมส่วนผสมอิมัลชัน จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณจิรวัดน์ สินธุฉนิชเศรษฐ์ บริษัทเซลล์ ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือทดสอบตัวอย่างยางมะตอยอิมัลชัน

ขอขอบคุณ คุณสิทธิศักดิ์ อัสวพรหมธาดา วิศวกรโยธา 8 ผู้อำนวยการส่วนสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง (วพว.) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการทดสอบการออกแบบส่วนผสมไมโครซิล

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ มลิณทะเลข วิศวกรโยธา 8 วช. หัวหน้าฝ่าย วพ.4 สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในเรื่องการออกแบบส่วนผสมผิวทางแบบไมโครซิล

ขอขอบคุณ คุณระวี ศรีนรา นายช่างโยธา 6 สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบกรมทางหลวง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและตรวจสอบส่วนผสม

ขอขอบคุณ คุณเสรี พงศ์ศรีวัฒน์ วิศวกรใหญ่ บริษัทถนนอมวงส์ จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา รวมทั้งอำนวยความสะดวกด้านงานฉาบผิวทาง

ขอขอบคุณ คุณประสพชัย ปรากฏทอง หัวหน้าหมวดการทางมินบุรี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้าน
พื้นที่และอำนวยความสะดวกด้านงานจราจรขณะฉาบผิวทาง

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่
สนับสนุนทุนในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้ความสนับสนุน
ด้านการเงินตลอดงานวิจัย

วันระวี เถาหอุดมโชค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อ.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 การนำผลงานไปใช้.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ยางมะตอย (Asphalt or Bitumen).....	4
2.1.1 ชนิดยางมะตอย.....	5
2.1.2 สมบัติของยางมะตอย.....	6
2.1.3 ยางมะตอยสำหรับงานก่อสร้างผิวถนน (Paving asphalt materials).....	6
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR).....	6
2.2.1 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	7
2.2.2 เสถียรภาพของน้ำยาง.....	9
2.2.3 การเสถียรภาพของน้ำยาง.....	9
2.2.4 การรักษาสภาพน้ำยาง.....	11
2.2.5 การผลิตน้ำยางข้น.....	11
2.3 ยางเอสบีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber, SBR).....	13
2.3.1 สมบัติของยางเอสบีอาร์.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 การผลิตยางเอสปีอาร์แบบอิมัลชัน (Emulsion SBR).....	14
2.4 ยางมะตอยอิมัลชัน (Asphalt emulsion).....	15
2.4.1 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชัน.....	15
2.4.1.1 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก.....	16
2.4.1.2 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ.....	17
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชัน.....	17
2.4.3 ส่วนประกอบของยางมะตอยอิมัลชัน.....	18
2.4.4 สมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน.....	19
2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน.....	20
2.4.6 การผลิตยางมะตอยอิมัลชันทางอุตสาหกรรม.....	21
2.5 ยางมะตอยชนิดปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA).....	23
2.5.1 เหตุผลของการปรับปรุงยางมะตอยด้วยพอลิเมอร์.....	27
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์.....	27
2.5.3 ข้อจำกัดของการใช้พอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงยางมะตอย.....	29
2.6 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของถนนลาดยางมะตอย.....	29
2.6.1 ชนิดของชั้นผิวทาง.....	30
2.7 มาตรฐานการฉาบผิวทางหรือฉาบชั้นผิวทางแบบไมโครซีล (Microseal).....	32
2.7.1 วัสดุสำหรับปูชั้นทางแบบไมโครซีล.....	33
2.7.2 การนำไมโครซีลไปใช้งาน.....	34
2.7.3 คุณสมบัติของไมโครซีล.....	34
2.7.4 ขนาดของหิน ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ และอัตราการฉาบผิวแบบไมโครซีล.....	35
2.8 การทดสอบยางมะตอยอิมัลชัน.....	35
2.9 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	41
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์.....	41
3.2.1 สารเคมี.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 อุปกรณ์.....	43
3.3 วิธีการทดลอง.....	45
3.3.1 ตอนที่ 1 การเลือกสูตรยางมะตอยอิมัลชันเบื้องต้น.....	45
3.3.2 ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	47
3.3.3 ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์.....	47
3.3.4 ตอนที่ 4 ศึกษาการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีล.....	47
3.4 การทดสอบยางมะตอยอิมัลชัน.....	47
3.4.1 การทดสอบขนาดอนุภาค (ASTM D244).....	49
3.4.2 การทดสอบหาปริมาณกากด้วยการระเหยน้ำ (ASTM D244).....	49
3.4.3 การทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (DH-T409).....	49
3.4.4 การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	50
3.4.5 การทดสอบการตกตะกอนและเสถียรภาพที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน (ASTM D244)	50
3.4.6 การทดสอบความหนืดแบบเซโบลัวฟูรอล (ASTM D244).....	50
3.4.7 การทดสอบจุดอ่อนตัว (ASTM D36).....	51
3.4.8 การทดสอบค่าการคืนตัว (NLT 329/91).....	51
3.4.9 การทดสอบค่าเพนิเทรชัน (DH-T403).....	52
3.4.10 การทดสอบค่าการยึดดึง (DH-T405).....	52
3.4.11 การทดสอบ Toughness-Tenacity.....	53
3.5 การทดสอบการออกแบบผิวทางไมโครซีล.....	53
3.5.1 การหาขนาดของเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (Gradation).....	53
3.5.2 การหาค่าส่วนประกอบของดินในวัสดุผสมรวม (Sand equivalent).....	53
3.5.3 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Loss angeles abrasion.....	53
3.5.4 การทดสอบหาค่าการไหลหรือความคงตัว (Consistency test).....	53
3.5.5 การทดสอบหาเวลาเซตตัวและบ่มตัว (Initial set time and Cure time).....	54
3.5.6 การทดสอบหาค่าการสึกกร่อนที่สภาวะเปียกชื้น (Wet track abrasion test).....	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานการไหลตัวของอิ้มัลชันจากตัวอย่าง (Hubbard field test).....	56
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	60
4.1 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบส่วนของยางมะตอยอิ้มัลชัน.....	61
4.1.1 การเลือกสูตรยางมะตอยอิ้มัลชันเบื้องต้น.....	61
4.1.2 การเลือกปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	71
4.1.3 การปรับปริมาณอิ้มัลซิไฟเออร์.....	76
4.2 ผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบส่วนของการออกแบบส่วนผสม.....	87
4.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่ง.....	87
4.2.2 ผลของแหล่งวัสดุรวม.....	89
4.2.3 ผลของปริมาณซีเมนต์.....	91
4.2.4 ผลของชนิดสารเติมแต่ง.....	94
4.2.5 ผลของปริมาณอิ้มัลชัน.....	95
4.3 การนำผลงานวิจัยไปใช้ในการลาดถนนจริง.....	100
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ.....	104
4.4.1 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของยางมะตอยอิ้มัลชัน.....	104
4.4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของกรวดแบบไมโครซิล.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	106
5.1 การศึกษาในส่วนของยางมะตอยอิ้มัลชัน.....	106
5.1.1 ผลของอัตราส่วน SBR:NR และเกรดของน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน.....	106
5.1.2 ผลของปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	107
5.1.3 ผลของปริมาณอิ้มัลซิไฟเออร์.....	107
5.2 การศึกษาในส่วนของกรวดแบบไมโครซิล.....	108
5.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่ง.....	108
5.2.2 ผลของแหล่งวัสดุรวม.....	109
5.2.3 ผลของปริมาณซีเมนต์.....	109

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.4 ผลของชนิดสารเติมแต่ง.....	109
5.2.5 ผลของปริมาณอิมัลชัน.....	110
5.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของชนิดยางมะตอยอิมัลชัน	110
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	110
เอกสารอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆในน้ำยางธรรมชาติ.....	9
2.2 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชัน.....	17
2.3 สมบัติต่างๆของยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์.....	25
2.4 ขนาดของหิน ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ และอัตราการฉาบผิวแบบไมโครซีล.....	35
3.1 สมบัติบางประการของยางมะตอยที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.2 สูตรการผสมเบื้องต้น (100 กรัม).....	46
3.3 อัตราส่วนผสมไมโครซีล.....	47
4.1 ผลการทดสอบจากกรมทางหลวงตาม ทล.-ก.405/2538.....	85
4.2 ผลการทดสอบตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก.2157-2547).....	86
4.3 ผลการทดสอบขนาดคละของแหล่งหินที่ต่างกัน.....	90
4.4 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่ 2.....	98
4.5 ผลการทดสอบจากการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่ 2.....	98
4.6 ผลการตรวจสอบการกระจายขนาดและค่าทรายสมมูลของวัสดุรวมจากสระบุรีที่ ส่งเข้ากรมทางหลวงเพื่อตรวจสอบส่วนผสม.....	99
4.7 ผลการออกแบบส่วนผสมจากกรมทางหลวง.....	99
4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยาง ธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน.....	104
4.9 ราคาของยางมะตอยอิมัลชันชนิดต่างๆ.....	105
4.10 ราคาต้นทุนส่วนผสมไมโครซีล.....	105
5.1 สูตรยางมะตอยอิมัลชันที่ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสม.....	108
5.2 ผลเปรียบเทียบสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน.....	111
5.3 ผลเปรียบเทียบราคาและสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันชนิดต่างๆ ในการออกแบบ ส่วนผสม.....	112

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างแบบไมเซลล์ของยางมะตอย.....	5
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของแอสฟัลต์ทีน.....	5
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	7
2.4 ลักษณะการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ยางธรรมชาติกับกำมะถัน.....	8
2.5 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของอนุภาคยาง.....	8
2.6 เครื่องปั่นหรือเครื่องเซนติฟิวส์.....	12
2.7 โครงสร้างยางเอสปีอาร์.....	14
2.8 ชนิดของอนุภาคยางมะตอยอิมัลชัน.....	16
2.9 ชนิดและอนุภาคของอิมัลชันไฟเออร์ประจุบวก.....	19
2.10 ชนิดและอนุภาคของอิมัลชันไฟเออร์ประจุลบ.....	19
2.11 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุรวมกับยางมะตอยอิมัลชัน.....	19
2.12 แผนผังการผลิตยางมะตอยอิมัลชันทางอุตสาหกรรมและลักษณะการทำงานของเครื่องคอล ลอยคัมมิต.....	21
2.13 วิธีการผสมยางมะตอยอิมัลชัน.....	22
2.14 การกระจายอนุภาคของยางมะตอยอิมัลชัน.....	22
2.15 ลักษณะปัญหาของผิวทางลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้น.....	24
2.16 ลักษณะความเข้ากันได้และเข้ากันไม่ได้ระหว่างยางมะตอยกับพอลิเมอร์.....	28
2.17 ส่วนประกอบทั่วไปในการปูถนนยางมะตอย.....	29
2.18 ลักษณะการฉาบผิวแบบสเลอรี่ชีด.....	31
3.1 แบบทดสอบอย่างสำหรับทดสอบค่าการยึดดึง.....	44
3.2 อุปกรณ์สำหรับทดสอบความเหนียวแบบเซโบลัวฟูรอล.....	44
3.3 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน.....	44
3.4 อุปกรณ์สำหรับทดสอบจุดอ่อนตัว.....	45
3.5 เข็มมาตรฐานสำหรับทดสอบค่าเพนิเทรชัน.....	45
3.6 แบบเทเพื่อทดสอบหาค่า Consistency.....	54
3.7 แบบทดสอบอย่างสำหรับทดสอบหาเวลาเซตตัวและเวลาบ่มตัวของส่วนผสม.....	54
3.8 แบบทดสอบอย่างสำหรับทดสอบ WTAT.....	55
3.9 เครื่อง Hobart C-100 สำหรับทดสอบ WTAT.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 แบบสำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบ Hubbard-field test.....	58
3.11 Testing mold and ring.....	58
3.12 เครื่องกดตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบ Hubbard-field test.....	59
4.1 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR.....	62
4.2 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอลโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR.....	63
4.3 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR.....	64
4.4 ผลการทดสอบการยืดดึงโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR.....	64
4.5 ผลการทดสอบการคืนตัวโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR.....	65
4.6 ผลการทดสอบเพนิเทรชันโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR.....	65
4.7 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับเกรดยาง SBR.....	67
4.8 ผลการทดสอบปริมาณอนุภาคที่ค้างบนแร่ (%) โดยการปรับเกรดยาง SBR.....	67
4.9 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอลโดยการปรับเกรดยาง SBR.....	68
4.10 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับเกรดยาง SBR.....	69
4.11 ผลการทดสอบการยืดดึงโดยการปรับเกรดยาง SBR.....	69
4.12 ผลการทดสอบการคืนตัวโดยการปรับเกรดยาง SBR.....	70
4.13 ผลการทดสอบเพนิเทรชันโดยการปรับเกรดยาง SBR.....	70
4.14 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	72
4.15 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอลโดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	72
4.16 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	74
4.17 ผลการทดสอบการยืดดึงโดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	74
4.18 ผลการทดสอบการคืนตัวโดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	75
4.19 ผลการทดสอบเพนิเทรชันโดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง.....	75
4.20 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับปริมาณวินิลไซลเรซิน.....	77
4.21 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอลโดยการปรับปริมาณวินิลไซลเรซิน.....	78

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับปริมาณวินโซลเรซิน.....	78
4.23 ผลการทดสอบการยึดคิ่งโดยการปรับปริมาณวินโซลเรซิน.....	79
4.24 ผลการทดสอบการคืบตัวโดยการปรับปริมาณวินโซลเรซิน.....	79
4.25 ผลการทดสอบเพนิเทรชันโดยการปรับปริมาณวินโซลเรซิน.....	80
4.26 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับปริมาณ แลคติกเคซิน.....	81
4.27 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอลโดยการปรับปริมาณแลคติกเคซิน.....	82
4.28 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับปริมาณแลคติกเคซิน.....	83
4.29 ผลการทดสอบการยึดคิ่งโดยการปรับปริมาณแลคติกเคซิน.....	84
4.30 ผลการทดสอบการคืบตัวโดยการปรับปริมาณแลคติกเคซิน.....	84
4.31 ผลการทดสอบเพนิเทรชันโดยการปรับปริมาณแลคติกเคซิน.....	85
4.32 ผล WTAT จากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่ง.....	88
4.33 แผ่นตัวอย่าง WTAT ที่แห้งตัวสมบูรณ์จากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งที่ 1% และ 2% โดยน้ำหนัก.....	88
4.34 แผ่นตัวอย่าง WTAT ที่แห้งตัวสมบูรณ์จากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งที่ 1%, 2%, 3%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก.....	89
4.35 ผลการทดสอบค่า WTAT จากการศึกษาผลของแหล่งวัสดุมวลรวม.....	91
4.36 ผลการทดสอบค่า WTAT จากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุมวลรวมจาก นครสวรรค์).....	92
4.37 ผลการทดสอบเวลาเซตตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุมวลรวม จากนครสวรรค์).....	92
4.38 ผลการทดสอบค่า WTAT จากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุมวลรวมจาก สระบุรี).....	93
4.39 ผลการทดสอบเวลาเซตตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุมวลรวม จากสระบุรี).....	94
4.40 ผลการทดสอบค่า WTAT และค่า Hubbard field test จากการศึกษาผลของชนิดสารเติม แต่ง.....	94
4.41 ผลการทดสอบเวลาเซตตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของชนิดสารเติมแต่ง.....	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 ผลการทดสอบค่า WTAT และค่า Hubbard field test จากการศึกษาผลของปริมาณยางมะ ตอยอิมัลชัน.....	96
4.43 ผลการทดสอบเวลาเซ็ดตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน.....	96
4.44 ลักษณะของรถฉาบผิวทางสเตอร์ซีล.....	100
4.45 ตรวจสอบส่วนผสมก่อนฉาบผิวจริง.....	100
4.46 เริ่มฉาบผิวถนน.....	101
4.47 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซีล.....	101
4.48 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซีลและทิ้งไว้ 1 วัน.....	102
4.49 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซีลและทิ้งไว้ 1 อาทิตย์.....	102
4.50 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซีลและทิ้งไว้ 1 เดือน.....	103

รายการคำย่อ

AC, A/C	แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)
CSS-1h	ยางมะตอยอิมัลชันที่ไม่ได้ปรับปรุง (Cationic Slow Setting)
CSS-1hp	ยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ปรับปรุงด้วยยางพารา (Para slurry seal)
DRC	ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content)
MS	ยางมะตอยชนิดแข็งตัวเร็วปานกลาง (Medium-Setting)
NR	ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)
PMA	ยางมะตอยชนิดปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt)
RS	ยางมะตอยชนิดแตกตัวเร็ว (Rapid-Setting)
SBR	ยางสไตรีนบิวตะไดอิน, ยางเอสบีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber)
SS	ยางมะตอยชนิดแตกตัวช้า (Slow-Setting)
SS-1hp	ยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน
WTAT	การทดสอบความทนทานต่อการขัดสีในสภาวะเปียกชื้น (Wet Track Abrasion Test)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

การขนส่งทางบกเป็นเส้นทางที่มีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน และยังคงมีความต้องการเส้นทางจราจรขนส่งใหม่เพิ่มขึ้น จึงมีความต้องการวัสดุในการก่อสร้างทางปริมาณมาก วัสดุที่สำคัญในการสร้างถนนคือ ยางมะตอย (Asphalt หรือ Bitumen) ปัจจุบันผิวถนนยางมะตอยเกิดความเสียหายมากและมีอายุการใช้งานสั้น เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น ปริมาณจราจรที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว รถบรรทุกน้ำหนักเกินกฎหมายกำหนด และการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของดินฟ้าอากาศ ส่งผลให้ถนนยางมะตอยเสียหายในหลายลักษณะ เช่น ผิวทางแตกร้าว (Thermal and fatigue cracking) ผิวทางเยิ้ม (Bleeding) ผิวทางเกิดร่องล้อ (Rutting) และผิวหน้าทางหลุดเป็นผิวขรุขระ (Raveling) จากปัญหาของผิวทางยางมะตอยดังที่ได้กล่าวมา จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยคือ การผสมพอลิเมอร์ลงในยางมะตอยเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการดังกล่าว โดยเรียกยางมะตอยชนิดใหม่นี้ว่า “ยางมะตอยชนิดดัดแปรด้วยพอลิเมอร์” (Polymer Modified Asphalt, PMA) ยางมะตอยชนิดนี้มีสมบัติดีขึ้น เช่น มีสมบัติเพิ่มความต้านทานการหลุดร่อน ไม่ไหลเยิ้ม ลดการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ มีความยืดหยุ่นสูง การเสียหายเนื่องจากความล้าและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลง มีความต้านทานสูงต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร เป็นต้น [1, 2] โดยปัจจุบันมีการผสมพอลิเมอร์โดยเฉพาะ “ยาง” ลงในยางมะตอยเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย นิยมทำกันมากในประเทศแถบยุโรปและทวีปอเมริกาเหนือ ซึ่งได้มีการออกมาตรฐานสำหรับยางมะตอยชนิดนี้ และออกกฎหมายบังคับเพื่อเพิ่มการใช้งาน PMA

สำหรับการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติจัดเป็นนโยบายระดับชาติและเป็นเรื่องที่ต้องกระทำอย่างเร่งด่วนในปัจจุบัน เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศเพียงร้อยละ 10 ของกำลังการผลิต และที่เหลือถูกส่งออกในรูปของยางดิบ [3] ดังนั้นเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้ยางพาราภายในประเทศ จึงเป็นเหตุผลที่เกิดงานวิจัยที่เกี่ยวกับยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มมูลค่าและให้สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งานทั้งภายในและภายนอกประเทศมากขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง จากวิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ของนายทวิศักดิ์ ยศยิ่งธรรมกุล เรื่อง “การปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติ” (Modification of Asphalt Emulsion with Natural Rubber Latex) [4] เป็นการดัดแปรยางมะตอย

อิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic asphalt emulsion) ด้วยน้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex, NRL) ในรูปแบบน้ำยางข้นเพื่อนำไปใช้ในงานลาดถนน (Road construction) เนื่องจากงานวิจัยข้างต้นพบว่า PMA ที่เตรียมได้มีสมบัติบางประการที่ควรได้รับการแก้ไข เช่นค่าความดิ่งยึด (Softening Point) และค่าความคืนตัวต่ำกว่ามาตรฐาน จึงเกิดงานวิจัยต่อเนื่องซึ่งเป็นการร่วมมือของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. บริษัท แคมโก จำกัด และบริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ จำกัด ภายใต้การทดสอบรับรองผลการวิเคราะห์และความช่วยเหลือของกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม เพื่อการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยยางธรรมชาติผสมกับยางเอสบีอาร์ ให้มีสมบัติที่ดี มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานยางมะตอยที่ดัดแปรด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA) ของกรมทางหลวงและกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสามารถนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งเลือกใช้น้ำยางสไตรีนบิวตะไดอินหรือเอสบีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber Latex, SBRL) ผสมกับน้ำยางธรรมชาติ (NRL) เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน โดยเสนอที่จะศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ที่เหมาะสม เป็นต้น เพื่อให้ได้สมบัติของยางมะตอยปรับปรุงที่ดี ทั้งนี้เสนอที่จะทดลองเพื่อให้ได้สูตรที่เหมาะสมที่สุดที่ผ่านหรือใกล้เคียงกับมาตรฐานของกรมทางหลวง แล้วทดสอบออกแบบผิวถนน (Mixed design) และลาดถนนจริงด้วยวิธีการฉาบผิวแบบไมโครซีล (Microseal)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ โดยใช้ยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน
2. ศึกษาปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุง
3. ศึกษาปัจจัยเบื้องต้นของการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่สอง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาสูตรการผสมยางมะตอยอิมัลชันเบื้องต้น
2. ศึกษาปริมาณยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ที่ 4%, 5%, 6% และ 7% DRC
3. ศึกษาผลของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์สำหรับยางมะตอยและยางธรรมชาติ
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วย NRL และ SBRL
5. เปรียบเทียบสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้รับการปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติผสม

น้ำยางสไตรีนบิวตะไดอินกับยางมะตอยอิมัลชันที่ได้รับการปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติและยางมะตอยอิมัลชันที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

6. ศึกษาการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่สอง
7. ศึกษาต้นทุนวัตถุดิบของยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงด้วย NRL และ SBRL
8. เลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดที่ผ่านหรือใกล้เคียงกับมาตรฐานของกรมทางหลวงเพื่อทดลองลาดถนนจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบอัตราส่วนหรือสูตรการผสมที่เหมาะสมในการผลิตยางมะตอยอิมัลชันประจุลบชนิดปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน ที่มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงโดยสามารถใช้งานได้จริง สามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ และได้ถนนยางมะตอยที่มีสมบัติดีกว่ายางมะตอยชนิดไม่ปรับปรุง และมีอายุการใช้งานยาวนาน
2. เพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศ
3. ส่งเสริมอุตสาหกรรมยางในประเทศ
4. ส่งเสริมความร่วมมือในการทำวิจัยระหว่างภาครัฐและเอกชน เกิดเป็นงานวิจัยที่เป็นรูปธรรม สามารถใช้งานได้จริง

1.5 การนำผลงานไปใช้

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและเอกชน 2 แห่งคือ

1. บริษัท แบลมโก จำกัด ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของวัตถุดิบบางส่วน และกระบวนการผลิต
2. บริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ จำกัด ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของวัตถุดิบและงบประมาณบางส่วน

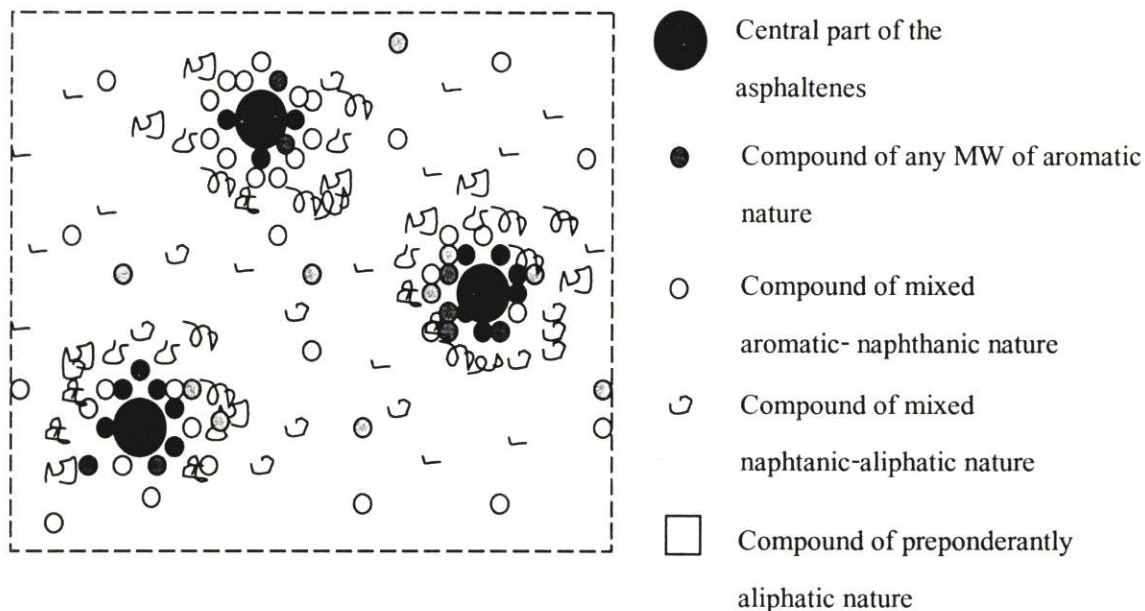
ทั้งนี้ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ในการทดสอบยางมะตอยชนิดปรับปรุง ทำให้เกิดความร่วมมือในการทำวิจัยและการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากผู้วิจัยสู่ภาคการผลิต

บทที่ 2

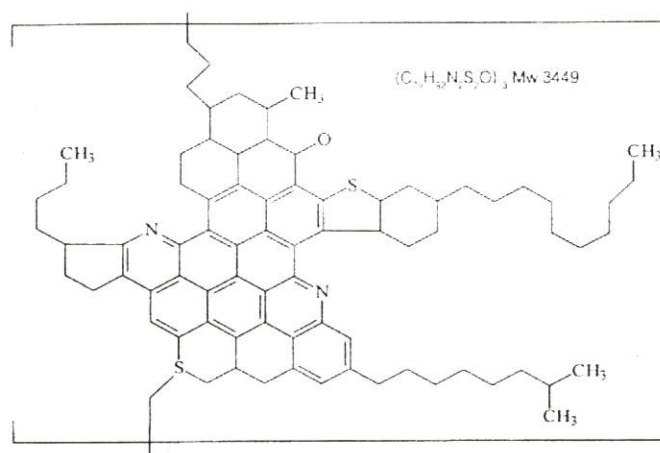
ทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางมะตอย (Asphalt or Bitumen)

ยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (Asphalt or Bitumen) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นส่วนที่ระเหยยาก มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โครงสร้างสลับซับซ้อน ขึ้นกับชนิดและแหล่งที่มาของน้ำมันดิบ (Crude oil) และกระบวนการในการกลั่นทำให้บริสุทธิ์ (Distillation and refinery process) ยางมะตอยมีส่วนประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ได้แก่ สารอิ่มตัว (Saturates) ที่มีโครงสร้างหลักคล้ายสารพาราฟิน (Parafin) วงแหวนแนพทานิก (Naphthalenic ring) และไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง (Long straight chain hydrocarbon) สารอะโรมาติก (Aromatics) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) 25-30% และมีออกซิเจนหรือไนโตรเจนอยู่เล็กน้อย และสารอะโรมาติกที่มีขั้ว (Polar aromatics) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอะโรมาติกเป็นส่วนประกอบประมาณ 35-40% มีออกซิเจนหรือไนโตรเจนมากกว่า 1% และอาจมีกำมะถันถึง 8% รวมถึงมีโครงสร้างแสดงความเป็นประจุไฟฟ้า เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) และหมู่อะมิโน (Amino group) เป็นต้น สัดส่วนของสารอิ่มตัวต่อสารอะโรมาติกเป็นตัวกำหนดปริมาณของสารอะโรมาติกที่มีขั้ว ซึ่งสารอะโรมาติกที่มีขั้วนี้เองที่เป็นตัวกำหนดสมบัติของยางมะตอยว่าจะเหนียว และยึดหยุ่นได้ดีเพียงใดที่อุณหภูมิปกติ รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของยางมะตอยคือ แอสฟัลต์ทีน (Asphaltene) และรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของแอสฟัลต์ทีน ซึ่งประกอบด้วยสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ (Multiring aromatic) สารอะโรมาติกขนาดใหญ่ที่มีขั้ว (Multiring polar aromatic) และบริเวณรอบแอสฟัลต์ทีนซึ่งเกิดจากส่วนประกอบไม่กี่ชนิดได้แก่ ส่วนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงความเป็นขั้ว (Vary functionality) ส่วนอะโรมาติกที่ไม่มีขั้ว และส่วนอะลิฟาติก (Aliphatic) ส่วนรอบ ๆ นี้เองที่ทำให้ยางมะตอยแสดงสมบัติเป็นนิวโตเนียน (Newtonian) และรักษาสภาพแอสฟัลต์ทีนให้อยู่ในรูปสารละลายคอลลอยด์ (Colloidal solution)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบไมเซลล์ของยางมะตอย [5]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของแอสฟัลต์ทีน [6]

2.1.1 ชนิดยางมะตอย

ชนิดยางมะตอยสามารถแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดคือ

1. ยางมะตอยที่เกิดตามธรรมชาติ พบแทรกอยู่ในชั้นหินที่เรียกว่า “หินยางมะตอย (Rock asphalt)” ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินปูนที่มียางมะตอยซึมอยู่
2. ยางมะตอยที่เป็นส่วนเหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ หรือที่เรียกว่า “Topped crude” มีลักษณะค่อนข้างเหลว เมื่อแยกน้ำมันออกไป จะได้ยางมะตอยที่มีความข้น เหลว หรือแข็ง แตกต่างกันไปตามความต้องการ

2.1.2 สมบัติของยางมะตอย

สมบัติของยางมะตอยที่สำคัญคือ

1. เป็นตัวยึดและประสาน (Cementing)
2. ป้องกันน้ำซึมผ่าน (Water proofing)
3. สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อนและแข็งตัวเมื่อถูกความเย็น (Thermoplastic)
4. ทนกรดและด่างอ่อนๆ

ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงนำยางมะตอยมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ทำผิวจราจร ลาดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ลาดผิวหน้าเขื่อนดินป้องกันน้ำซึม ทำสีกันสนิม กระจายกันซึม กระเบื้องยางปูพื้น เคลือบท่อน้ำ เป็นต้น

2.1.3 ยางมะตอยสำหรับงานก่อสร้างผิวถนน (Paving asphalt materials)

ยางมะตอยที่ใช้ในการก่อสร้างผิวถนนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะของยางมะตอยคือ

1. แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement, AC) ซึ่งมีลักษณะครึ่งแข็งครึ่งเหลว มีสีดำหรือสีน้ำตาลปนเทา การใช้งานต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90-150 °C มีหลายเกรดตามลักษณะการผลิต ได้แก่ เกรดเพนิเทรชัน (Penetration grade) เป็นเกรดที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง เกรดเป่า (Blown grade) เป็นเกรดที่ได้จากการนำเอายางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปเป่าลมร้อนใส่ที่อุณหภูมิ 250-300 °C เพื่อให้แข็งและทนความร้อนได้ดีขึ้น และเกรดแข็ง (Hard grade) เป็นเกรดที่ได้จากการนำยางมะตอยชนิดเกรดเพนิเทรชันไปกลั่นภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ยางมะตอยที่มีความแข็งมากขึ้น

2. แอสฟัลต์ชนิดเหลว (Liquid asphalt) แบ่งได้เป็น คัทแบคแอสฟัลต์ (Cutback asphalt) ซึ่งมีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิห้อง และแอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt emulsion) ผลิตได้โดยนำเอาแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 140 °C ผสมกับน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C และมีการใส่อิมัลซิไฟเออร์ปริมาณเล็กน้อยเพื่อช่วยให้อนุภาคของยางมะตอยกระจายตัวอยู่ในน้ำได้ จากนั้นนำไปผ่านเครื่องผสมที่ให้ความร้อนสูงหรือเครื่องคอลลอยด์มิค เพื่อให้ยางมะตอยแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ

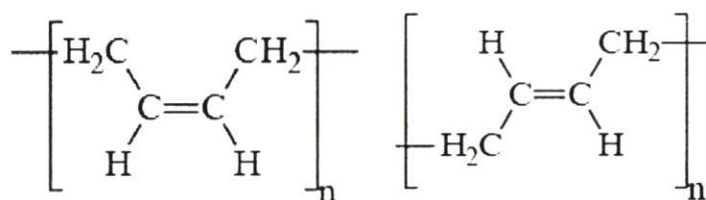
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางพาราเป็นพืชวัตถุดิบทางอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากฝ้าย มีความสำคัญต่อการค้าของโลกเป็นอันดับ 8 รองจากข้าวสาลี เห็นได้ว่ายางพารานับเป็นพืชที่มีส่วนสร้างความสะดวกสบายให้แก่มวลมนุษย์ ยิ่งพัฒนามากเพียงใด ความต้องการใช้ยางก็มากตามไปด้วย [7] นำยางธรรมชาติได้จากต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส (*Hevea brasiliensis*) ซึ่งเป็นแหล่งที่ให้น้ำยางธรรมชาติมากที่สุด ปัจจุบันปลูกมากแถบเอเชียตะวันออกเฉียง

เฉียงได้ น้ำยางธรรมชาติจะอยู่ในรูปคอลลอยด์ มีลักษณะเป็นอิมัลชันของอนุภาคยางกับน้ำยาง มีสี ขาวคล้ายน้ำมัน เรียกว่า น้ำยางสด หรือลาเท็กซ์ (Latex) ยางธรรมชาติมีโครงสร้างแบบ ซิส-1,4-พอลิ ไอโซพรีน (cis-1,4 Polyisoprene) ประกอบด้วยไอโซพรีน จำนวน 1500 - 150000 หน่วย โดยไอโซพรีนมีสูตร โครงสร้าง 2 ชนิดคือ

ก. แบบซิส (cis) มี CH_2 2 หมู่อยู่ข้างเดียวกัน

ข. แบบทรานส์ (trans) มี CH_2 2 หมู่อยู่ตรงข้ามกัน



ก. แบบซิส (cis)

ข. แบบทรานส์ (trans)

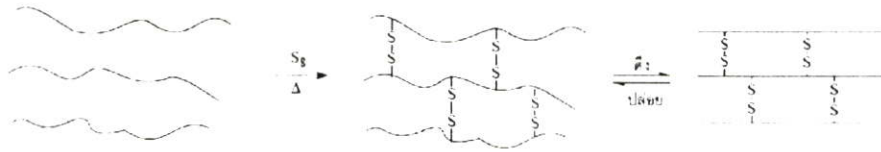
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ [8]

ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารามีสูตรโครงสร้างเป็นแบบซิส แต่ยางธรรมชาติที่ได้จากต้น ยางกัตตา (Gutta) ต้นยางบาลาตา (Balata) และต้นยางซิกเคิล (Zigle) มีสูตรโครงสร้างเป็นแบบ ทรานส์ โมเลกุลของยางจะมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่ขดไปมาเป็นวง และมีการบิดเป็นเกลียว โดยมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่ของพอลิไอโซพรีน จึงทำให้ยางมีความยืดหยุ่น ทน ต่อแรงดึง นอกจากนี้ยางยังมีสมบัติของการเป็นฉนวนที่ดี เนื่องจากยางประกอบไปด้วยโมเลกุลที่ ไม่มีขั้วเป็นส่วนใหญ่ และยางยังทนต่อน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ได้ แต่ไม่ทนต่อน้ำมันเบนซินหรือ ตัวทำละลายอินทรีย์

2.2.1 สมบัติของยางธรรมชาติ

1. มีมวลโมเลกุลสูงตั้งแต่ 50,000-3,000,000
2. เป็นเทอร์โมพลาสติก เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
3. เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนนุ่ม เมื่อเย็นจะแข็งตัว เปราะ และแตกง่าย

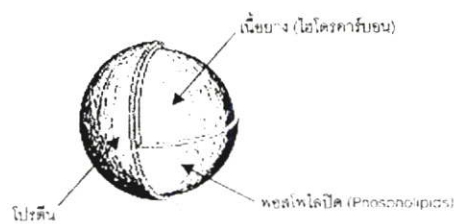
จากสมบัติดังกล่าวทำให้ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้ไม่ด้นัก ปี พ.ศ. 2382 ชาลส์ กู๊ดเยียร์ ชาวอเมริกัน ได้พบวิธีการปรับปรุงคุณภาพของยางธรรมชาติได้โดยนำยางมาทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) โดยกำมะถันจะเข้าไปเชื่อมระหว่างโซ่ของพอลิเมอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ยางธรรมชาติกับกำมะถัน [8]

ปฏิกิริยาคาลาไมเซชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการเติมกำมะถันลงในยางในปริมาณที่เหมาะสมคือ ประมาณ 3% ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวกำมะถัน โดยมีซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์เชื่อมต่อกันระหว่างโซ่พอลิไอโซพรีนในบางตำแหน่ง ยางจึงมีความยืดหยุ่นและอยู่ตัวได้ดีถึงแม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การเติมซิลิกา (Silica) ซิลิเกต (Silicate) และเขม่าดำ (Carbon black) ลงในยางจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ยางที่นำไปใช้ผลิตยางของยานยนต์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเขม่าดำ จะช่วยป้องกันการสึกกร่อนและการถูกทำลายด้วยแสงแดดได้อีกด้วย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติ ได้แก่ ถุงมือแพทย์ ถุงมืออุตสาหกรรม ยางยึด ยางอนามัย เบ้าหล่อตุ๊กตา ฟองน้ำสำหรับทำที่นอนและหมอน

น้ำยางธรรมชาติ (NR Latex) จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนมเป็นสารแขวนลอยหรือ คอลลอยด์ (Colloids) ประกอบด้วยน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่า เซรัม (Serum) และมีอนุภาคของพอลิไอโซพรีนประมาณ 30-45% ขนาด 20-2000 นาโนเมตร (nm) ลอยตัวกระจายอยู่ในของเหลวเซรัมในลักษณะไมเซลล์ (Micells) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารอื่นๆ เช่น แมงกานีส แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง และแมกนีเซียม เป็นต้น ส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำยางแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 และภาพวาดแสดงโครงสร้างของอนุภาคยางแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของอนุภาคยาง [7]

น้ำยางธรรมชาติมี pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนาแน่นประมาณ 0.97-0.98 g/cm³ และมีความหนืดไม่แน่นอน

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆในน้ำยางธรรมชาติ [7]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) - พอลิไอโซพรีน	33
โปรตีน	1.4
คาร์โบไฮเดรต	1.6
ไขมัน	1
ไกลโคไลปิด (Glycolipids) และฟอสโฟไลปิด (Phospholipids)	0.6
สารอินทรีย์	0.5
อื่นๆ	0.4
น้ำ	58.5

ความหนืดและปริมาณเนื้อยางของน้ำยางและสารต่างๆในน้ำยางแตกต่างกันอย่างมาก ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุต้นยาง ฤดูกาลกรีดยาง วิธีการกรีดยาง เป็นต้น ตัวอย่างเช่นการกรีดยางในฤดูฝน จะได้น้ำยางที่มีเนื้อยางแห้งปริมาณน้อยแต่มีปริมาณมาก เมื่อกรีดยางใหม่ๆ จะมีอัตราการไหลของน้ำยางสูงสุด และค่อยๆลดลงในอัตราที่คงที่ จนกระทั่งหยุดไหลในที่สุด การหยุดไหลของน้ำยางหลังกรีดยางเนื่องจากการแข็งตัวเป็นก้อนยาง (Coagulum) อุดตันน้ำยางที่ถูกตัดขาดจากการกรีดยาง

2.2.2 เสถียรภาพของน้ำยาง

การที่น้ำยางมีสถานะเป็นของเหลวแขวนลอยของก้อนอนุภาคยางลอยตัวอยู่ในตัวกลางได้ เนื่องจาก ก้อนอนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยชั้นโปรตีน ซึ่งมีประจุลบ (Negative charge) ล้อมรอบชั้นโปรตีนที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แต่ละอนุภาคยางรวมตัวกันเป็นก้อนแข็งตกตะกอนที่เรียกว่า โคแอกคูลัม (Coagulum) เนื่องจากประจุลบรอบอนุภาคยางจะผลักกันทำให้อนุภาคยางไม่จับตัวกันเป็นก้อน ยังสามารถลอยตัวกระจายอยู่ในตัวกลางน้ำได้

2.2.3 การเสถียรภาพของน้ำยาง

เมื่อน้ำยางธรรมชาติไหลออกจากต้นยางไม่กี่ชั่วโมงก็เกิดการตกตะกอนเสถียรภาพ ระยะเวลาการตกตะกอนขึ้นกับอุณหภูมิและเสถียรภาพของน้ำยางเอง โดยจะเกิดการจับตัวเป็นก้อนแยกส่วนน้ำกับเซรุ่มใส และในที่สุดจะเกิดการเน่าเสีย (Putrefaction) ให้กลิ่นเหม็น ดังนั้นจึงต้องมีการใส่สารรักษาสภาพน้ำยาง หรือ พรีเซอเวทิฟ (Preservatives) เพื่อป้องกันการเสถียรภาพของน้ำยาง การเสถียรภาพของน้ำยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การเสียดสภาพหรือการจับตัวตามธรรมชาติ (Natural coagulation หรือ Spontaneous coagulation)

เมื่อน้ำยางไหลออกจากต้นยาง จะมีจุลินทรีย์ (Micro-organism) เช่น แบคทีเรียในอากาศและในสิ่งแวดล้อมปะปนอยู่ในน้ำยาง เมื่อเวลาผ่านไป จุลินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber constituents) เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และน้ำตาล เกิดเป็นกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid, VFA) เช่น กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เป็นต้น สภาวะความเป็นกรด (Acidity) จะทำลายชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยางที่มีประจุลบ เป็นผลให้อนุภาคยางเกิดการรวมตัวเป็นก้อนแข็ง (Coagulum) ขนาดเล็ก ที่ชาวบ้านเรียกว่า เม็ดพริก ซึ่งจะมีขนาดก้อนยางแข็งและปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ รวมทั้งมีกลิ่นเหม็นบูด เนื่องจากการสลายตัวของโปรตีน

สาเหตุที่คาดว่าเป็นอีกกลไกหนึ่งของการเสียดสภาพน้ำยางตามธรรมชาติคือ การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารประเภทไขมัน (Lipid) ซึ่งมีประมาณ 1-2% ในน้ำยาง เกิดเป็นกรดไขมันที่มีประจุลบ (Anionic fatty acid) สามารถแทนที่โปรตีนที่ห่อหุ้มก้อนอนุภาคยางซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน ประจุลบของกรดไขมันเหล่านี้อาจทำปฏิกิริยากับประจุบวกของโลหะ เช่น แคลเซียม (Calcium, Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Magnesium, Mg^{2+}) เกิดเป็นตะกอนแข็งของเกลือของกรดไขมันกับโลหะที่ไม่ละลายน้ำและแยกสถานะ ไอออนเหล่านี้อาจมีอยู่ในน้ำยางอยู่แล้ว หรืออาจเกิดขึ้นภายหลังจากการย่อยของเอนไซม์ (Enzymes) ในน้ำยาง เช่น เอนไซม์ไลเปส (Lipases)

2. การจับตัวเนื่องจากกรด (Acid coagulation)

เนื่องจากการจับตัวเป็นก้อนตามธรรมชาติของยางใช้เวลานาน (มากกว่า 36 ชั่วโมง) และมีกลิ่นเหม็น ดังนั้นในกระบวนการผลิตยางแห้ง เช่น ยางแผ่นรมควันหรือยางแท่ง จึงมีการใช้สารตกตะกอน ได้แก่ สารเคมีที่ช่วยให้น้ำยางจับตัวเป็นของแข็ง หรือ โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ในกรณีของน้ำยางธรรมชาติที่นิยมใช้ได้แก่ กรดฟอร์มิก (Formic acid) กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เจือจาง (ประมาณ 2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) เมื่อใส่กรดเจือจางในน้ำยาง กรดจะแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออนที่มีประจุบวก เข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอกซิเลตไอออน ($R-CO_2^-$) ที่อยู่รอบๆอนุภาคยาง เกิดเป็นกรดไขมัน (Fatty acid, RCO_2H) ที่ไม่ละลายน้ำรอบอนุภาคยาง เป็นผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคยางอันเนื่องมาประจุลดลงและหายไปในที่สุด เมื่อชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางถูกทำลาย อนุภาคยางจึงจับตัวเป็นก้อนยางแข็งอย่างรวดเร็ว

ปัจจุบันชาวสวนนิยมใช้ กรดนมค หรือกรดฟอร์มิก เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแห้ง เนื่องจากมีราคาถูกและให้ยางแห้งที่มีสมบัติต่างๆดี กรดอะซิติกนิยมใช้ในการผลิตยางเครพสีจาง (Pale crepe) ส่วนกรดซัลฟูริกสามารถใช้ในการจับตัวของหางน้ำยาง (Skim latex) และนิยมใช้กับยางชนิดพิเศษบางชนิดเท่านั้น

2.2.4 การรักษาสภาพน้ำยาง

เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของน้ำยาง ชาวสวนต้องทำการใส่สารรักษาสภาพน้ำยาง (Preservatives) ซึ่งมีหน้าที่คือ

1. มีความสามารถในการทำลาย กิณชวาง หรือระงับการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ เช่น แบคทีเรียและเอนไซม์ที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพ
2. ช่วยเพิ่มความเสถียรภาพของสารแขวนลอย (Colloid stability) ของน้ำยางโดยการเพิ่มประจุลบของอนุภาคยาง และเพิ่มพลังงานยึดเกาะระหว่างอนุภาคยางและตัวกลางน้ำ (Rubber-water interface) ทำให้สามารถลอยตัวระจัดกระจาย ไม่จับตัวเป็นก้อนของแข็งแยกสถานะ สารรักษาสภาพน้ำยางควรมีสสมบัติเป็นด่าง (Alkali) เนื่องจากชั้นโปรตีนหุ้มอนุภาคยางมีประจุลบ มีสมบัติเป็นด่าง ดังนั้นสารรักษาสภาพน้ำยางควรเพิ่ม pH หรือเพิ่มความเป็นด่างให้กับน้ำยาง
3. ช่วยป้องกันหรือยับยั้งปฏิกิริยาของอนุมูลของโลหะ โดยเฉพาะไอออนของโลหะหนัก ที่อาจทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตะกอนเกลือของโลหะที่ไม่ละลายน้ำ เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) อนุมูลของโลหะยังเป็นตัวช่วยในการเจริญเติบโตและอยู่ได้ของจุลินทรีย์ต่างๆ อันเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมสภาพน้ำยาง สารรักษาสภาพน้ำยางที่สำคัญได้แก่ แอมโมเนีย (Ammonia) โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulphite, Na_2SO_3) ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นต้น

2.2.5 การผลิตน้ำยางข้น

ปกติยางสดมีเนื้อยาง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 30-45% หรือเฉลี่ยประมาณ 35% เป็นน้ำ 65% ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้มีการผลิตน้ำยางข้นที่มีเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือ

1. ความสะดวกและลดต้นทุนในการย้ายจากสวนยางไปยังโรงงานผลิต
2. น้ำยางข้นให้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอดีกว่าน้ำยางสด
3. ผลิตภัณฑ์ยางบางชนิดใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ การใช้น้ำยางข้นจะสะดวกและง่ายใน การควบคุมกระบวนการผลิต เช่น
 - กระบวนการจุ่ม (Dipping process) เช่น การผลิตลูกโป่ง ลูกมียาง
 - กระบวนการผลิตโฟม (Latex foam process) เช่น การผลิตที่นอนยาง
 - กระบวนการเคลือบ (Coating process) เช่น การผลิตผ้าใบฉาบยาง

น้ำยางข้นสามารถผลิตได้ 3 วิธีหลักคือ

1. วิธีการระเหยน้ำ (Evaporation)

เป็นวิธีการทำให้น้ำส่วนหนึ่งในน้ำยางระเหยออกไปโดยการให้ความร้อนแก่น้ำยางในภาชนะ เช่น ถังหมุน โดยจะต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers) เช่น สบู่ (Potassium soap) ลงในน้ำยางสดก่อนให้ความร้อน น้ำยางข้นที่ได้โดยวิธีนี้จะมีเสถียรภาพดีมาก เหมาะสำหรับการขนส่ง

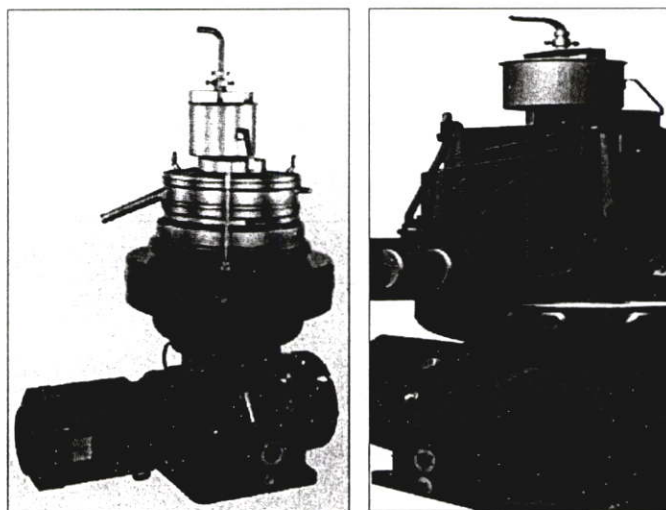
น้ำยางชั้นระยะไกล และการใช้งานที่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) ปริมาณมาก เช่น การผลิตกาวลาเท็กซ์

2. วิธีทำให้เกิดครีม (Creaming)

ปกติน้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยอนุภาคยางเคลื่อนที่แบบอิสระในทุกทิศทางไม่เป็นระเบียบ ไม่มีทิศทางที่แน่นอน หรือที่เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) แขนวลอยอยู่อย่างอิสระเป็นสารละลายอิมัลชันแบบคอลลอยด์ (Colloidal emulsion) อยู่ในตัวกลางน้ำ วิธีการผลิตน้ำยางชั้นวิธีนี้เป็นการทำน้ำยางข้นโดยการเติมสารเคมีคือ สารทำให้เกิดครีม (Creaming agent) เช่น โซเดียมอัลจินเตต (Sodium alginate) ทำให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลให้อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางน้ำเคลื่อนที่ช้าลง จนกระทั่งรวมตัวลอยสู่ผิวหน้าเกิดการเกิดครีม เป็นผลให้บริเวณส่วนบนของน้ำยางมีความเข้มข้นของเนื้อยางสูง การผลิตน้ำยางชั้นวิธีนี้มีความยุ่งยากและใช้เวลานาน จึงไม่เป็นที่นิยม

3. วิธีการปั่นด้วยความเร็วสูงหรือเซนติฟิวส์ (Centrifuging)

เป็นวิธีการผลิตน้ำยางข้นที่นิยมมากที่สุดทำได้ โดยการใช้อุปกรณ์ปั่นหรือเครื่องเซนติฟิวส์ (Centrifuge) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องปั่นหรือเครื่องเซนติฟิวส์ [9]

เนื่องจากอนุภาคของยางมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ การใช้เครื่องปั่นความเร็วสูงหมุนเหวี่ยงเพิ่มแรง ทำให้อนุภาคยางของแข็งเคลื่อนที่แยกออกจากส่วนที่เป็นของเหลวได้เร็วขึ้น น้ำยางจะไหลเข้าสู่เครื่องปั่นความเร็วสูงที่ช่องบนสุด น้ำยางจะไหลลงไปรวมกันที่ส่วนกลางของเครื่อง แกนกลางของเครื่องจะหมุนด้วยความเร็วสูง (ประมาณ 6000 รอบต่อนาที) ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงที่ส่วนหนักหรือมีความหนาแน่นสูง ได้แก่น้ำหรือเซรุ่มให้อยู่ด้านนอกของเครื่องและไหลออกจากเครื่องในรูปน้ำยางเจือจางที่เรียกว่า หางน้ำยางหรือสกิน (Skim) ส่วนอนุภาคยางที่เบามีความ

หนาแน่นต่ำกว่าจะรวมกันที่แกนกลางเป็นน้ำยางข้น (Concentrated latex) ไหลออกเข้าสู่ถังเก็บน้ำยางข้นต่อไป โดยปกติน้ำยางข้นที่ได้จากการปั่นด้วยความเร็วสูงจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 60%

สมบัติที่สำคัญที่ใช้ระบุคุณภาพของน้ำยางข้นได้แก่

1. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)
2. ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)
3. ความเป็นด่าง (Alkalinity)
4. เวลาความคงตัวของเครื่องกล (Mechanical stability time)
5. จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid number, VFA)
6. จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide number)
7. จำนวนก้อนยางจับตัว (Coagulum content)
8. ปริมาณตะกอน (Sludge content)

2.3 ยางเอสปีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber, SBR)

ยางเอสปีอาร์เป็นยางสังเคราะห์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในตลาดโลกเป็นอันดับสองรองจากยางธรรมชาติ โดยมีการผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1929 แต่ไม่ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายจนกระทั่งเกิดช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง เกิดการขาดแคลนยางธรรมชาติขึ้น จึงได้เริ่มมีการใช้ยางสังเคราะห์อย่างแพร่หลายขึ้น สำหรับยางเอสปีอาร์มีการใช้อย่างกว้างขวางในการนำไปใช้ปรับปรุงยางมะตอย โดยใช้ในรูปของอิมัลชันที่มีอนุภาคของเนื้อยางกระจายในน้ำที่เป็นตัวกลาง ยางเอสปีอาร์เมื่อนำไปปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันพบว่า ช่วยปรับปรุงให้ค่าความยึดดึงที่อุณหภูมิค่าดีขึ้นและมีการยึดติดที่ดี ค่าการคืนตัวและทนต่อรอยร้าวดีขึ้นเมื่อเทียบกับยางเอสบีเอส จึงมีการใช้งานมากกว่าในการนำไปปรับปรุงยางมะตอย สำหรับการใช้น้ำยางของลาเท็กซ์มีประโยชน์คือขนาดอนุภาคเล็กส่งผลให้เกิดการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอ

2.3.1 สมบัติของยางเอสปีอาร์

ยางเอสปีอาร์ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม 2 ชนิดคือ บิวตะไดอีน (Butadiene) และสไตรีน (Styrene) เกิดปฏิกิริยาผ่านกลไกอนุมูลอิสระ (Free radical) โดยลักษณะของโครงสร้างยางเอสปีอาร์แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างยางเอสบีอาร์ [7]

โดยทั่วไปยางเอสบีอาร์มีส่วนของสไตรีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 23.5% ยางเอสบีอาร์ส่วนมากเตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) ผ่านอนุมูลอิสระ (Free radical) นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) แต่ไม่นิยมใช้ในการผลิตยางเอสบีอาร์ จากโครงสร้างพบว่า การสังเคราะห์ยางเอสบีอาร์สามารถเกิดยางเอสบีอาร์ได้ 3 โครงสร้างคือ ซิส-1,4 (cis-1,4) ทรานส์-1,4 (trans-1,4) และ ไวนิล-1,2 (vinyl-1,2)

2.3.2 การผลิตยางเอสบีอาร์แบบอิมัลชัน (Emulsion SBR)

การสังเคราะห์ยางเอสบีอาร์แบบอิมัลชันจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของบิวตะไดอิน และสไตรีน เกิดปฏิกิริยาผ่านกลไกอนุมูลอิสระ (Free radical emulsion polymerization) มีการใช้ตั้งแต่มานานปี ค.ศ.1950 และยังมีการใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยมีมอนอเมอร์ทั้งสองที่ถูกทำให้เสถียรด้วยน้ำสบู่ ในรูปของอิมัลชันจะถูกส่งเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous reactor) ซึ่งสารตั้งต้นได้แก่ น้ำ สไตรีนบิวตะไดอิน น้ำสบู่ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) สารละลายบัฟเฟอร์ควบคุม pH และสารปรับปรุงสมบัติ (Modifiers) จะถูกส่งเข้าไปในระบบอย่างต่อเนื่องโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 5-10 °C ทำให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ (% Conversion) ประมาณ 60% ที่ถังปฏิกรณ์สุดท้าย จากนั้นเป็นการกำจัดสไตรีนมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและมีการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) จากนั้นจะผ่านกระบวนการเปลี่ยนพอลิเมอร์ในรูปน้ำยางลาเท็กซ์ให้เป็นก้อนยางแห้งโดยการเติมสารแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidants) ใส่น้ำมัน (Oil) การจับตัวเป็นก้อน (Coagulation) การกำจัดน้ำ (Dewatering) การทำให้แห้ง (Drying) และการบรรจุหีบห่อ (Packaging) ตามลำดับ

การทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิต่ำที่ 5-10 °C เรียกว่า Cold process และเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า Cold SBR ซึ่งต่างจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 50 °C ที่เรียกว่า Hot process และได้ Hot SBR ขบวนการที่อุณหภูมิสูงถูกค้นพบก่อน โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเช่น โพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตหรือโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium oxidisulfate, Potassium persulfate) ทำให้ได้ปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ (% Conversion) ประมาณ 70% และได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นกิ่ง (Branching) สูง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาผ่านอนุมูลอิสระที่อุณหภูมิ

สูง มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามากกว่า ขบวนการที่อุณหภูมิต่ำที่ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ (Redox combination) เช่น พาราเมทิลไฮดรอกซีเปอร์ออกไซด์/เฟอร์รัสซัลเฟต (p-methyl hydroxyperoxide/ferrous sulfate) ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าถึงแม้ว่าจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ Cold SBR มีสมบัติต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และมีสมบัติไดนามิกส์ (Dynamic properties) ดีกว่า ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการผลิตหน้ายางรถยนต์

การสังเคราะห์ยางเอสปีอาร์แบบอิมัลชันมีการผลิตได้หลายเกรดการค้าขึ้นอยู่กับ ปริมาณของ สไตรีนในโครงสร้าง น้ำหนักโมเลกุล การกระจายน้ำหนักโมเลกุล ระบบของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ และระบบของการใช้ตัวป้องกันการจับกันเป็นก้อน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของยางเอสปีอาร์แบบอิมัลชันที่ได้ [10]

2.4 ยางมะตอยอิมัลชัน (Asphalt emulsion)

การทำยางมะตอยอิมัลชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของยางมะตอยในน้ำ และมีเสถียรภาพต่อการผสม การขนส่ง รวมถึงการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามยางมะตอยอิมัลชันที่เกิดขึ้นอาจถูกทำลายลงได้หากมีสภาวะที่ไม่เหมาะสม ยางมะตอยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนกระจายตัว ได้แก่ แอสฟัลต์ทินเป็นส่วนที่แสดงความแข็งของยางมะตอย และส่วนต่อเนื่อง (Continuous phase) เป็นส่วนที่มีผลต่อสมบัติความเหนียว (Ductility) การยึดเกาะ (Adhesion) และความหนืด (Viscosity) ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถระบุปริมาณที่แน่นอนของยางมะตอยในการผสมยางมะตอยอิมัลชันได้ โดยอัตราส่วนดังกล่าวมักขึ้นกับส่วนประกอบหลักของยางมะตอยแหล่งที่มา และสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันที่ต้องการ

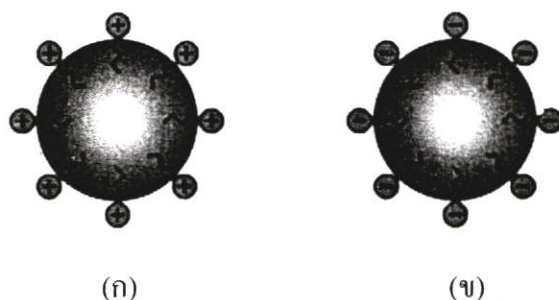
สำหรับอิมัลชัน คือการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาด 0.001-0.002 มิลลิเมตร ในของเหลวหรือตัวกลาง 1 ชนิดหรือมากกว่า 1 ชนิด สำหรับยางมะตอยอิมัลชันหรือแอสฟัลต์อิมัลชันคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ หรือคอลลอยด์ (Colloidal particle) กระจายอยู่ในตัวกลางที่มีอิมัลซิไฟเออร์อยู่เล็กน้อย กรณีของยางมะตอยอิมัลชันจัดเป็นน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water) โดยอนุภาคของยางมะตอยกระจายในน้ำหรือตัวกลาง

2.4.1 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชัน

โดยทั่วไปมีการใช้ยางมะตอยอิมัลชันอยู่ 3 แบบซึ่งแบ่งตามประจุได้ 3 ประเภทคือ

1. ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก (Cationic asphalt emulsion) คืออนุภาคยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำที่มีประจุเป็นบวก
2. ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic asphalt emulsion) คืออนุภาคยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำที่มีประจุเป็นลบ

3. ยางมะตอยอิมัลชันชนิดไม่มีประจุ (Nonionic asphalt emulsion) คืออนุภาคของยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำที่ไม่มีประจุ



รูปที่ 2.8 ชนิดของอนุภาคยางมะตอยอิมัลชัน (ก) อนุภาคยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก (ข) อนุภาคยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ [11]

นอกจากนี้ยางมะตอยอิมัลชันยังแบ่งตามความเร็วในการแตกตัว (Breaking time) คือ ยางมะตอยชนิดแตกตัวเร็ว (Rapid-Setting, RS) ยางมะตอยชนิดแตกตัวเร็วปานกลาง (Medium-Setting, MS) และยางมะตอยชนิดแตกตัวช้า (Slow-Setting, SS) โดยขึ้นกับอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ และสารเติมแต่ง (Additive) ที่ใช้ขณะผสมเพื่อใช้ลาดถนน ซึ่งกรณีอิมัลชันชนิดแตกตัวเร็วไม่สามารถผสมหรือผสมได้น้อยกว่าวัสดุรวมเนื่องจากแตกตัวเร็ว ส่วนอิมัลชันชนิดแตกตัวเร็วปานกลางสามารถผสมกับวัสดุรวมขนาดใหญ่ได้แต่ขนาดละเอียดได้ไม่ดี และชนิดแตกตัวช้าเป็นการผลิตขึ้นเพื่อให้สามารถผสมกับวัสดุรวมขนาดละเอียดได้

ยางมะตอยอิมัลชันยังสามารถแบ่งเป็นส่วนย่อยได้คือ อักษรตัว C หมายความว่าความเร็วในการแตกตัว หมายถึง ประจุบวก (Cationic) อักษรตัว A หมายความว่าประจุลบ (Anionic) หากไม่ระบุหมายถึงประจุลบหรือไม่มีประจุ เช่น RS-1 หมายถึงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบหรือไม่มีประจุแบบแข็งตัวเร็ว และ CRS-1 หมายถึงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวกแบบแข็งตัวเร็ว เป็นต้น

สมาคมทางหลวงและการขนส่งรัฐของสหรัฐ (American Association of State Highway and Transport Officials, AASHTO) และสมาคมอเมริกันด้านการทดสอบวัสดุ (American Standard Test Method, ASTM) ได้แบ่งชนิดของยางมะตอยอิมัลชันออกเป็นหลายชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

2.4.1.1 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก [12]

- CSS-1h คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวกแบบแตกตัวช้า
- CRS-1, CRS-2, CRS-1h, CRS-2h คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวกแบบแตกตัวเร็ว
- CQS-1h คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวกแบบแตกตัวเร็วมาก
- CMS-2, CMS-2s คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวกแบบแตกตัวเร็วปานกลาง
- PMCRS-2, PMCRS-2h คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวกแบบแตกตัวเร็วที่มีการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์

- LMCRS-2, LMCRS-2h คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวกแบบแตกตัวเร็วที่มีการปรับปรุง โดยการเติมน้ำยาง

2.4.1.2 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ

- SS-1h คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบแบบแตกตัวช้า
- RS-1, RS-2, RS-1h, RS-2h คือยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบแบบแตกตัวเร็ว

ตารางที่ 2.2 ชนิดของยางมะตอยอิมัลชัน [11]

EMULSIFIED ASPHALT	CATIONIC EMULSIFIED ASPHALT
RS-1	CRS-1
RS-2	CRS-2
MS-1	---
MS-2	CMS-2
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	---
HFMS-2	---
HFMS-2h	---
HFMS-2s	---
SS-1	CSS-1
SS-1h	CSS-1h

- h (Harder) คือยางมะตอยที่แข็งกว่ายางมะตอยที่ใช้ทั่วไป
- HF (High-Float) คือยางมะตอยที่เป็นเกรดที่ใช้ในการผสมร้อนและผสมเย็น ใช้ในการเคลือบวัสดุมวลรวมชนิดหยาบ ซึ่งจะให้ลักษณะฟิล์มที่หนาและไม่มีการไหลเอี่ยมของตัวยางมะตอย

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของยางมะตอยอิมัลชัน

1. อัตราเร็วของน้ำที่เข้าไปดูดซับติดกับวัสดุมวลรวมและการระเหยออกของน้ำ
2. ปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวม
3. สภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม เป็นต้น
4. แรงที่ใช้ในการทำถนน
5. การกระจายของขนาดและองค์ประกอบของวัสดุมวลรวม
6. ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้

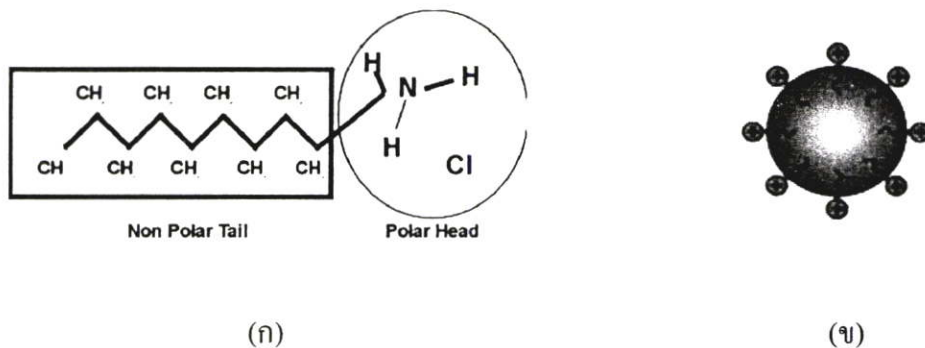
7. ความหนาแน่นของประจุบนวัสดุรวม
8. การรวมตัวของสารเคมี ซึ่งขึ้นอยู่กับความเสถียรของอิมัลชัน

2.4.3 ส่วนประกอบของยางมะตอยอิมัลชัน

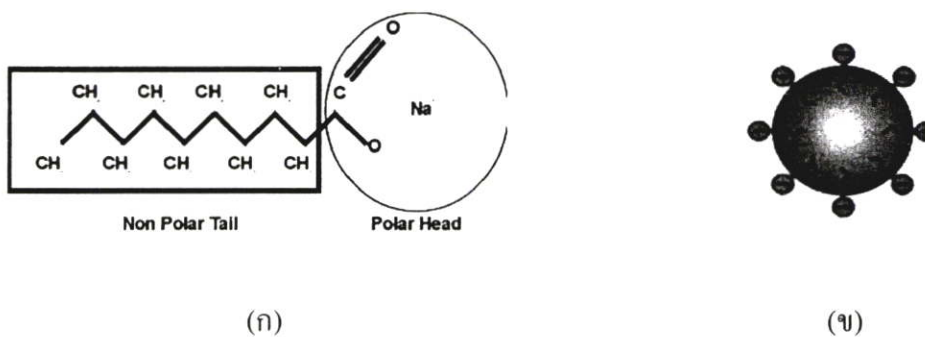
1. ยางมะตอย (Asphalt Cement, AC) ถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งใช้ยางมะตอยไม่น้อยกว่า 40% แต่ไม่เกิน 70% โดยทั่วไปนิยมใช้ประมาณ 55-70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากยางมะตอยมีส่วนประกอบที่ซับซ้อน ดังนั้นคุณสมบัติของยางมะตอยที่ได้จึงแตกต่างกันไป นอกจากนี้สภาวะอากาศยังส่งผลต่อความแข็งของยางมะตอยที่ใช้ โดยทั่วไปนิยมใช้ยางมะตอยที่มีค่าเพนิเทรชันระหว่าง 60-70

2. น้ำ (Water or medium) น้ำหรือตัวกลางจัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอันดับสองรองจากยางมะตอยในยางมะตอยอิมัลชัน โดยน้ำที่ใช้ต้องไม่มีสิ่งเจือปนจำพวกแร่ธาตุที่ส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้

3. สารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying agent) สมบัติของยางมะตอยอิมัลชันขึ้นอยู่กับสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ โดยสารอิมัลซิไฟเออร์ทำหน้าที่ให้พื้นผิวเกิดความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Surface-active agent) ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่าสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคน้ำกับยางมะตอยให้สามารถคงอยู่ด้วยกันได้ ซึ่งช่วยให้เกิดการแตกตัวของยางมะตอยได้ดี และยังสามารถควบคุมเวลาในการแตกตัวได้ สารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับยางมะตอยอิมัลชัน เช่น เลือดวัว (Ox blood) ดิน (Clay) และสบู่ (Soaps) แต่เมื่อมีความต้องการใช้ยางมะตอยอิมัลชันอย่างแพร่หลายมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยปัจจุบันสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีการใช้ทั่วไปสำหรับยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ชนิดประจุลบ เช่น อนุพันธ์ของกรดไขมัน (Fatty acid) ที่พบในเปลือกไม้ สารอิมัลซิไฟเออร์นี้จะถูกสะเทินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ค่า pH ของสารละลายที่ได้จากอิมัลซิไฟเออร์จะมากกว่า 7 สำหรับยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก มีการใช้พวกไขมันเอมีน (Fatty amine) โดยให้เกิดปฏิกิริยากับกรดแล้วฟอร์มตัวเป็นเกลือของเอมีน ซึ่งกรดที่ใช้ทั่วไปเป็นกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) โดยการเติมกรดและสารอิมัลซิไฟเออร์ลงในน้ำอุ่นภายใต้การปั่นกวนตลอด เมื่ออิมัลซิไฟเออร์ละลาย สามารถปรับ pH โดยการเติมกรดลงไป สารละลายอิมัลซิไฟเออร์ ค่า pH ของสารละลายอิมัลซิไฟเออร์จะน้อยกว่า 7 ในกรณีการผลิตแบบต่อเนื่องอิมัลซิไฟเออร์และกรดจะถูกฉีดเข้าไปผสมกับน้ำและเกิดปฏิกิริยาก่อนเข้าสู่เครื่องผสม จากนั้นเข้าสู่เครื่องผสมที่มียางมะตอยและสารอื่นอยู่ ซึ่งเมื่อผ่านเครื่องผสม ส่วนผสมจะถูกตีให้เข้ากันและได้ยางมะตอยอิมัลชันออกมา โดยลักษณะของอิมัลซิไฟเออร์ชนิดประจุลบและประจุบวกแสดงดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 ตามลำดับ



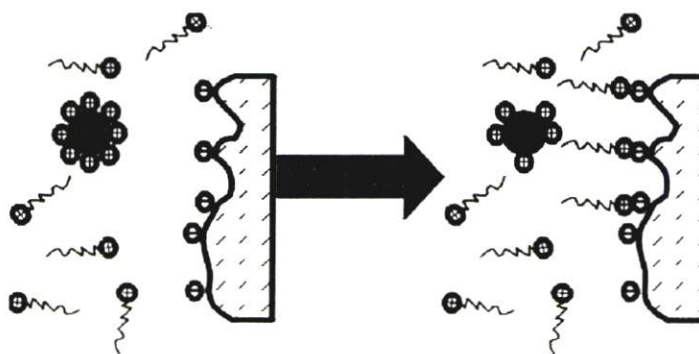
รูปที่ 2.9 (ก) ตัวอย่างของอิมัลซิไฟเออร์ประจุบวก และ (ข) อนุภาคของอิมัลซิไฟเออร์ประจุบวก [11, 13]



รูปที่ 2.10 (ก) ตัวอย่างของอิมัลซิไฟเออร์ประจุลบ และ (ข) อนุภาคของอิมัลซิไฟเออร์ประจุลบ [11, 13]

2.4.4 สมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน

1. การแตกตัว (Breaking) ลักษณะของอิมัลชันควรเสถียรไม่ตกตะกอนขณะเก็บและขนส่ง แต่ควรแตกตัวเร็วเมื่อนำไปใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุรวมรมมีพื้นผิวเป็นประจุลบ และอิมัลชันเป็นประจุบวก ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุรวมรมกับอิมัลชันได้ โดยลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุรวมรมกับยางมะตอยอิมัลชัน [13]

การแตกตัวสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ รวมทั้งสารตัวเติมที่ใช้ นอกจากนี้การควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และชนิดของยางมะตอยจะส่งผลถึงการแตกตัวที่ได้ สำหรับอิมัลชันชนิดประจุลบจะไม่มี การเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุมวลรวมกับอิมัลชัน เหมือนกับอิมัลชันชนิดประจุบวก แต่การแตกตัวจะเป็นผลจากการระเหยออกของน้ำแล้วยึดเกาะกับวัสดุมวลรวม

2. ความหนืด (Viscosity) ความหนืดของอิมัลชันสามารถควบคุมได้จากปริมาณยางมะตอยที่เป็นส่วนประกอบ อุณหภูมิ และชนิดของอิมัลซิไฟเออร์

3. การรวมตัวเป็นก้อน (Flocculation) การรวมตัวเป็นก้อนเกิดเนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่กระจายอยู่ในสารละลาย ซึ่งจะแยกออกเมื่อมีการปั่นกว

4. การตกตะกอน (Settlement) ยางมะตอยมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำเล็กน้อย ดังนั้นจึงเกิดการตกตะกอนของอนุภาคยางมะตอยได้ กรณีการใช้ตัวทำละลายกับยางมะตอยซึ่งทำให้ยางมะตอยมีความหนาแน่นน้อยลง ส่งผลให้ยางมะตอยลอยอยู่บนอิมัลชัน เรียกกลไกนี้ว่า การเกิดครีม (Creaming) การตกตะกอนสามารถลดลงได้โดย

- ปรับปรุงการเก็บยางมะตอยอิมัลชัน เช่นเก็บที่อุณหภูมิสูงขึ้นและมีการปั่นกวตลอด
- ลดความหนาแน่นของยางมะตอยโดยการเติมตัวทำละลายเล็กน้อย
- ปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ให้เหมาะสม
- เพิ่มปริมาณของยางมะตอย
- เพิ่มความหนืดของอิมัลชัน

5. การรวมตัวของอนุภาค (Coalescence) เมื่อเกิดการรวมตัวของอนุภาคเป็นขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้อิมัลชันเสถียรภาพ การรวมตัวของอนุภาคเป็นผลเนื่องจาก

- ปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ไม่เหมาะสมในของผสม
- การใช้อิมัลซิไฟเออร์ไม่ถูกชนิด
- การใช้อุณหภูมิในการผสมไม่เหมาะสม
- สภาวะการเก็บอิมัลชันไม่เหมาะสม
- การใช้ยางมะตอยไม่เหมาะสมกับชนิดของอิมัลซิไฟเออร์

2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน

1. สมบัติทางเคมีของยางมะตอย
2. ความแข็งและคุณภาพของยางมะตอย
3. ขนาดของอนุภาคยางมะตอยในอิมัลชัน
4. ชนิดและความเข้มข้นของสารอิมัลซิไฟเออร์

5. สภาวะการผสม เช่น อุณหภูมิ ความดัน และแรงเฉือน
6. ประจุบนอนุภาคของอิมัลชัน
7. ลำดับการใส่ของผสม
8. ชนิดของเครื่องผสมที่ใช้ในการผสมอิมัลชัน
9. ลักษณะของอิมัลซิไฟเออร์
10. สารเติมแต่งชนิดอื่น

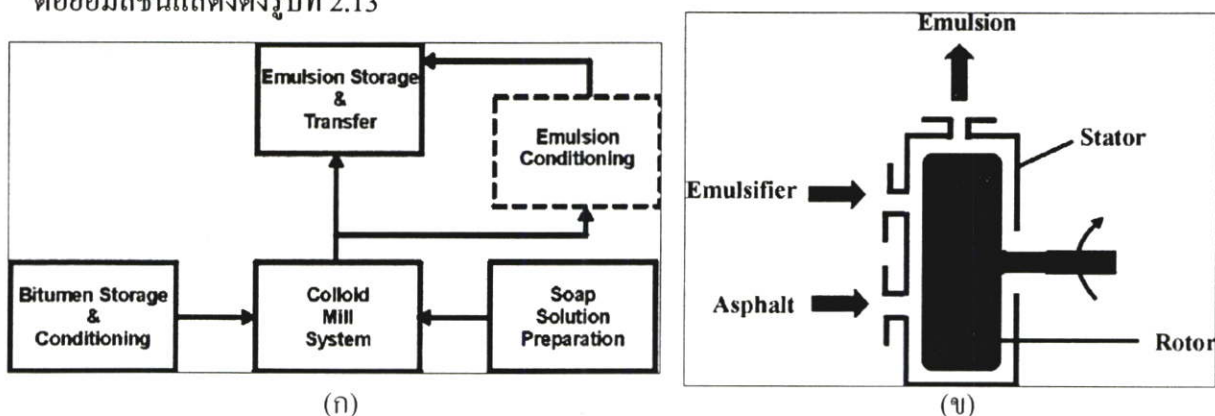
2.4.6 การผลิตยางมะตอยอิมัลชันทางอุตสาหกรรม

1. เครื่องมือในการผลิตยางมะตอยอิมัลชัน ประกอบด้วย
 - เครื่อง Colloid mill ที่สามารถให้เฉือนสูงประมาณ 1000-6000 rpm (17-100 Hz) ซึ่งทำให้ยางมะตอยแตกตัวออกเป็นอนุภาคเล็กๆ
 - แท็งก์สำหรับเก็บสารละลายอิมัลซิไฟเออร์
 - แท็งก์สำหรับเก็บยางมะตอยที่มีการให้ความร้อนเพื่อป้องกันยางมะตอยแข็งตัว
 - ตัววัดระดับการไหล

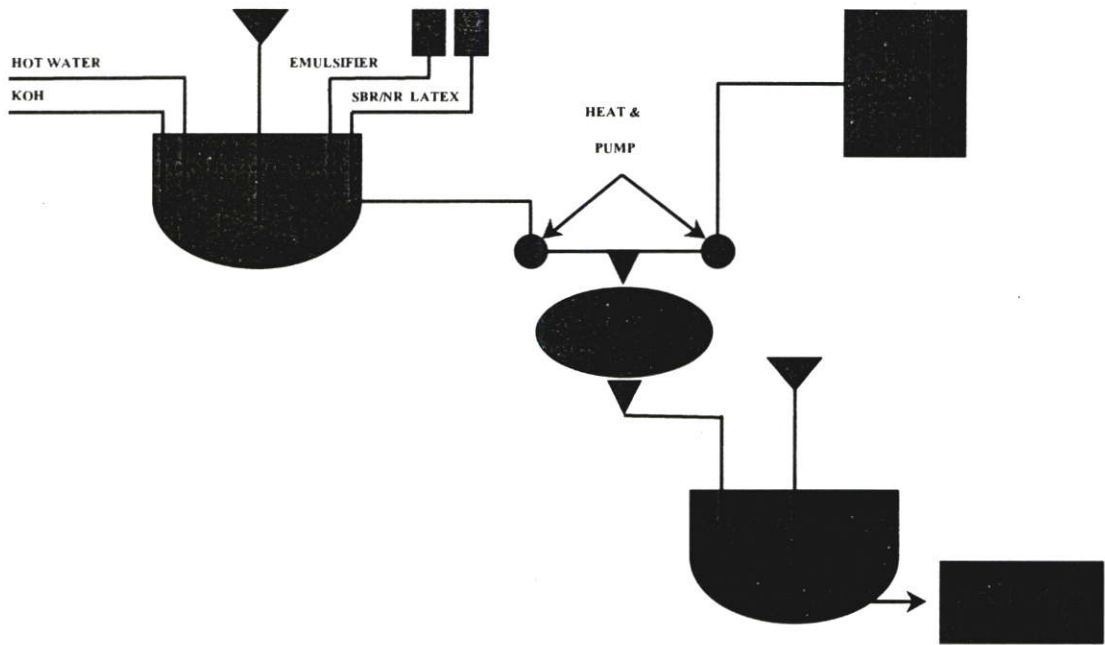
โดยแผนผังของเครื่องมือการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.12

2. วิธีการผลิตยางมะตอยอิมัลชัน

วิธีการทั่วไปในการผลิตคือ ให้ความร้อนแก่ยางมะตอยที่อุณหภูมิ 140 °C จากนั้นฉีดเข้าสู่เครื่องคอลลอยด์มิล (Colloid mill) ในขณะที่เติวก้นสารละลายอิมัลซิไฟเออร์ที่มีปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ผสมอยู่ 1-2% ที่อุณหภูมิ 70 °C จะถูกฉีดเข้ามายังเครื่อง Colloid mill ด้วยเช่นกัน จากนั้นเครื่อง Colloid mill จะตีส่วนผสมให้เข้ากันด้วยความเร็วและแรงเฉือนสูง ทำให้ยางมะตอยแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ภายใต้สภาวะที่ควบคุมความเป็นกรด-ด่าง จากนั้นเก็บยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ในแท็งก์ที่มีการปั่นกววนตลอดเวลาเพื่อรักษาความเสถียรของของผสม ลักษณะของการผสมยางมะตอยอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 (ก) แผนผังการผลิตยางมะตอยอิมัลชันทางอุตสาหกรรม และ (ข) ลักษณะการทำงานของเครื่องคอลลอยด์มิล [13]

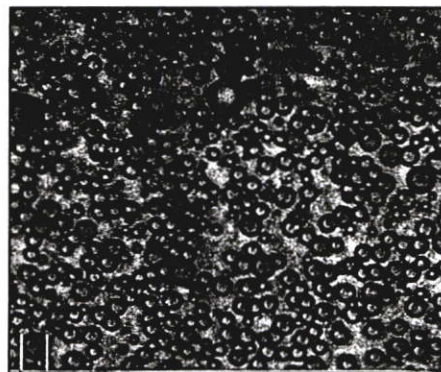


รูปที่ 2.13 วิธีการผสมยางมะตอยอิมัลชัน [14]

ขนาดของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะการผสม ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วขนาดของอนุภาคมีดังนี้

ขนาดเล็กกว่า 0.001 mm	มีในส่วนผสมที่ได้ประมาณ 28 %
0.001-0.005 mm	มีในส่วนผสมที่ได้ประมาณ 57 %
0.005-0.010 mm	มีในส่วนผสมที่ได้ประมาณ 15 %

โดยการกระจายอนุภาคของยางมะตอยอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การกระจายอนุภาคของยางมะตอยอิมัลชัน [15]

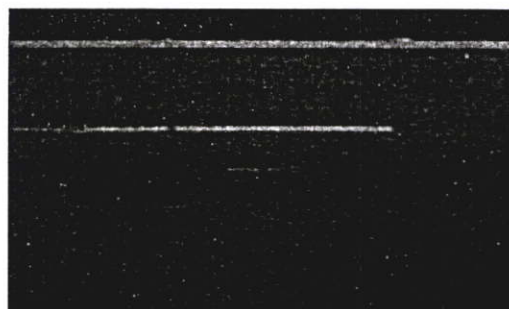
2.5 ยางมะตอยชนิดดัดแปรด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA)

ยางมะตอยชนิดดัดแปรด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA) คือยางมะตอยที่มีการเติมพอลิเมอร์ปริมาณเล็กน้อยแล้วผ่านเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในแบบแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) และแอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt emulsion) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยเริ่มมีการผลิตตั้งแต่ปี ค.ศ.1843 และมีการทดสอบการใช้งานครั้งแรกที่ประเทศยุโรปในปี ค.ศ.1930 และในปี ค.ศ.1950 เริ่มมีการใช้ในอเมริกาเหนือ ต่อมาในปี ค.ศ.1997 เริ่มมีการใช้ในอเมริกามากขึ้น โดยได้รับการส่งเสริมอย่างดีเนื่องจากยางมะตอยที่ได้รับการดัดแปรมีสมบัติที่ดีกว่า [16] สำหรับการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับด้านนี้ในประเทศอินเดีย เริ่มมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1974 โดยใช้น้ำยางคงรูป 2% กับยางมะตอยลาดถนนด้วยเครื่องมือตามปกติ และเมื่อปี ค.ศ.1950 ในประเทศไทย โดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้มอบหมายให้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำยางชันผสมกับสารเคมี เพื่อก่อสร้างถนนในหมู่บ้าน องค์การวิจัยและพัฒนางานสร้างถนน รายงานว่าสามารถลดต้นทุนในการสร้างถนนได้ต่ำกว่าประเทศอื่นๆ ถึง 25% [17] สำหรับการพัฒนาเกี่ยวกับการดัดแปรยางมะตอยด้วยพอลิเมอร์ในอเมริกา สมาคมถนนยางสหรัฐ ได้ส่งเสริมการใช้ถนนยางมะตอยคุณภาพสูงโดยใช้เศษยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยการนำเศษยางจากล้อรถยนต์หมดอายุแล้ว จากการทดลองพบว่า การใช้ล้อยาง 2000 เส้น สามารถปูพื้นถนนได้ 1 ไมล์ กรณีการผสมแบบร้อน และใช้ล้อยาง 500 เส้น สามารถปูพื้นถนนได้ 1 ไมล์ กรณีใช้วิธีการพ่นฉาบผิว การปูถนนด้วยยางมะตอยผสมกับล้อยางมีต้นทุนเป็นสองเท่าของการปูด้วยยางมะตอยเพียงอย่างเดียว แต่ประหยัดอย่างมาก เนื่องจากสามารถปูถนนได้บางกว่ายางมะตอยทั่วไปและอายุการใช้งานนานกว่าโดยต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ สามารถลดระดับเสียงได้มากถึง 50% และทำให้ไม่ต้องใช้วัสดุกันเสียงที่มีราคาแพง [18]

สำหรับการเติมพอลิเมอร์ลงในยางมะตอยเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของยางมะตอยให้ดีขึ้น ซึ่งช่วยให้มีความคงทนต่อการเกิดร่องล้อ (Rutting) ผิวหน้าทางแตกร้าว (Thermal cracking) ผิวทางหลุดเป็นผิวขรุขระ (Raveling) ลดความเสียหายเนื่องจากการใช้งานเป็นเวลานาน (Fatigue damage) และลดการหลุดลอกของพื้นผิวถนน (Stripping) ซึ่งรูปที่ 2.15 แสดงถึงปัญหาของผิวทางลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 ลักษณะปัญหาของผิวทางลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้น (ก) ผิวหน้าทางแตกร้าว
(ข) ผิวทางเรียบ [19]

โดยการใช้ยางมะตอยที่มีการตัดแปรด้วยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ทำถนนที่มีการจราจรคับคั่ง และมีการใช้ถนนที่ต้องรับน้ำหนักสูง สำหรับการผลิตยางมะตอยที่ตัดแปรด้วยพอลิเมอร์มีการใช้พอลิเมอร์ทั้งจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ขึ้น สำหรับพอลิเมอร์ที่มีการนำมาใช้และสมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 โดยสมบัติที่ต้องการเมื่อตัดแปรแล้วคือ มีเปอร์เซ็นต์การคืนตัว (% Recovery) จุดอ่อนตัว (Softening point) ความหนืด (Viscosity) ความแข็งแรงต่อการยึดเกาะ (Cohesive strength) และค่าการยืดตัว (Ductility) ที่ดี

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในการดัดแปรสมบัติยางมะตอย [2]

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ข้อดี	ข้อด้อย
พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)	งานอุตสาหกรรม	ทนอุณหภูมิสูง อายุการใช้งานยาวนาน ราคาถูก	ทำให้กระจายตัวได้ยากและเสถียรภาพต่ำ ต้องการพอลิเมอร์จำนวนมาก ไม่ปรับปรุงสมบัติการคืนตัว
พอลิไดโอดีฟิน (Polydiolofins) พอลิบิวตะไดอินหรือพอลิไอโซพรีน (Polybutadiene, polyisoprene)	งานปูพื้นและงาน หลังคา	มีการกระจายตัวที่ดีกว่าการใช้มอนอเมอร์พอลิโอดีฟิน ปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่น (Elasticity) ได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่น	มีพันธะคู่ในสายโซ่ซึ่งสามารถเกิดการเสียดสี สภาพได้เมื่อถูกความร้อนหรือออกซิเจน
พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)	อะแทคติก (Atactic) ใช้กับงานหลังคา	มีผลต่อความหนืดน้อยแม้จะเติมในปริมาณมากทำให้ ง่ายต่อการใช้งานและขนย้าย เพนิเทรชันต่ำ	ปัญหาการแยกชั้น ไม่ปรับปรุงสมบัติการคืนตัว ไม่ทนทานต่อการล่าที่อุณหภูมิสูง
ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)	งานปูพื้น	เพิ่มความทนทานต่อการเกิดร่องล้อ ความยืดดึงสูง ทนความยืดหยุ่นภายใต้สภาวะชื้น	เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย น้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้มีปัญหาในการผสมเข้ากัน
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC)	ไม่นิยมใช้ทางการค้า	ลดการแตกกร้าว	ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อ

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ข้อดี	ข้อด้อย
ยางรีเคลมจากรถยนต์ (Reclaimed tire rubber)	งานปูพื้น	ช่วยกำจัดขยะ เพิ่มความต้านทานต่อคาร์บอน เพิ่มความทนทานต่อการขีดถู ลดการเกิดร่องล้อ	ไม่เพิ่มสมบัติเชิงกล ใช้ความร้อนสูงและเวลานาน ในการทำให้เกิด การกระจายตัวและต้องทำการรีดคาในซี ก่อนนำมาใช้เพื่อป้องกันการเกิดการแยกตัว
อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins)	งานที่ต้องการความ แข็งแรงสูง เช่น พื้น สนามบินหรือสะพาน	ไม่มีผลต่อความเหนียว ทนสารเคมี การแตกร้าว และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความยืดหยุ่นสูงและการยึดเกาะดี	ราคาแพง เป็นเทอร์โมเซตพลาสติก
สไตรีนบิวทอะไดอีนบล็อค โคพอลิเมอร์ (Styrene butadiene block copolymer, SBS)		ความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิต่ำ ความต้านทานการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดี ที่อุณหภูมิต่ำ แข็งแรงและมีควมยืดหยุ่น (Elasticity) เพิ่มความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อ	ราคาแพง ความเหนียวสูงทำให้ยากต่อการใช้งาน ความต้านทานต่อออกซิเดชันและความร้อนต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิโอเลฟิน ต้องการขางมะตอยที่มีอะโรมาติกมากแอส ฟัลต์ที่น้อย
สไตรีนไอโซพรีนบล็อค โคพอลิเมอร์ (Styrene isoprene block copolymer, SIS)	งานปูพื้นและหลังคา	ยืดอายุการใช้งาน ยึดเกาะได้ดี	

2.5.1 เหตุผลของการตัดแปรยางมะตอยด้วยพอลิเมอร์ [2]

เหตุผลของการตัดแปรยางมะตอยด้วยพอลิเมอร์คือ

1. ต้องการให้ส่วนผสมไม่แข็งเปราะเมื่อมีการงานใช้ที่อุณหภูมิต่ำและลดรอยแตกร้าว
2. ต้องการเพิ่มความเหนียวของส่วนผสมเมื่อมีการใช้ที่อุณหภูมิสูงและลดการเกิดร่องล้อ
3. ต้องการเพิ่มความเสถียรและความคงที่ของส่วนผสม
4. ต้องการปรับปรุงความทนทานต่อการเกิดร่องล้อของถนน
5. ต้องการปรับปรุงการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและเพิ่มอายุการใช้งาน
6. ต้องการลดโครงสร้างที่หนาของถนน
7. ต้องการลดค่าใช้จ่ายจากการซ่อมแซมถนน

สำหรับปริมาณของพอลิเมอร์ที่มีการใช้ตัดแปรยางมะตอยจะใช้ประมาณ 2-10 % แต่โดยทั่วไปจะใช้อยู่ที่ 5-6 % โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนใหญ่พอลิเมอร์ที่ใส่ในยางมะตอยจะอยู่ในลักษณะการกระจายตัวแบบทางกายภาพไม่เกิดการยึดติดแบบปฏิกิริยาเคมีกับยางมะตอย หากต้องการให้เกิดการยึดติดทางเคมี ทำได้โดยการใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ปลายที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับยางมะตอยได้ รูปแบบของพอลิเมอร์ที่สามารถเข้าร่วมกับยางมะตอยได้มี 2 แบบ คือ การเติมพอลิเมอร์ในลักษณะของลาเทกซ์ ซึ่งจัดเป็นวิธีที่ง่าย และการเติมพอลิเมอร์แบบของแข็ง ซึ่งวิธีนี้ให้การกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่ดี แต่ต้องใช้แรงเฉือนสูงเพื่อแยกอนุภาคพอลิเมอร์ออกจากกัน ลักษณะของพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง เช่น สไตรีนบิวตะไดอีนบล็อกโคพอลิเมอร์ (Styrene butadiene block copolymer, SBS) หรือ สไตรีนไอโซพรีนบล็อกโคพอลิเมอร์ (Styrene isoprene block copolymer, SIS) เป็นต้น

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอยที่ตัดแปรด้วยพอลิเมอร์ [2]

สมบัติของยางมะตอยที่ตัดแปรด้วยพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับ

1. ลักษณะของพอลิเมอร์ (Polymer characteristics) โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีความเข้ากันได้หรือคงสภาพอนุภาคหรือเป็นหยดอยู่ได้กับยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้ (Polymer content) ส่วนประกอบทางเคมี (Chemical composition) โครงสร้าง (Structure) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution) องศาความเป็นโซ่กิ่ง (Degree of branching) และความเป็นผลึก (Crystallinity) ของพอลิเมอร์

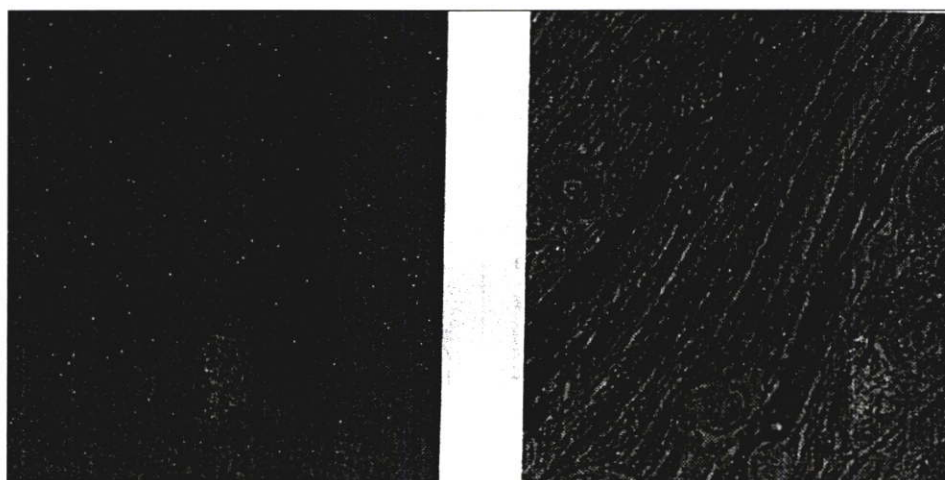
2. ลักษณะของยางมะตอย (Asphalt characteristics) เนื่องจากยางมะตอยมีแหล่งที่มาแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้สมบัติที่ได้แตกต่างกันไป โดยยางมะตอยที่ใช้ควรมีสัดส่วนของน้ำมันที่เพียงพอต่อการละลายหรือบวมตัวของพอลิเมอร์และควรมีปริมาณของส่วนที่อิมัลชันสูงซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วทำให้สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ หากพอลิเมอร์ไม่สามารถละลายในยางมะตอยได้ พอลิเมอร์จะบวมตัวจากสัดส่วนของน้ำมันที่อยู่ในยางมะตอย

3. สภาวะการผสม (Mixing condition) สำหรับสภาวะการผสมที่เหมาะสมต้องพิจารณาถึงสิ่งเหล่านี้

- ลักษณะของพอลิเมอร์ว่าสามารถทนต่อเวลาและอุณหภูมิในการผสมได้เพียงพอ
- ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน เช่น เป็นผง เศษ เม็ด หรือลาเท็กซ์
- ลักษณะของยางมะตอย
- ชนิดของเครื่องมือ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแบบผงหรือลาเท็กซ์จะใช้แรงเฉือนต่ำกว่ากรณีพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแบบเม็ดหรือแบบเศษ

- เวลาและอุณหภูมิในการผสม

4. ความเข้ากันได้และความเสถียรของพอลิเมอร์กับยางมะตอย (Compatibility and stability) โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ในการตัดแปรงยางมะตอยสามารถเข้ากันได้ เข้ากันได้เล็กน้อยหรือไม่เข้ากันกับยางมะตอยก็ได้ โดยกรณีที่พอลิเมอร์ไม่เข้ากันกับยางมะตอย พอลิเมอร์จะฟอร์มตัวเป็นอนุภาคกระจายอยู่ในยางมะตอย ไม่มีแรงยึดติดระหว่างวัฏภาค สำหรับพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้กับยางมะตอยเล็กน้อยจะมีส่วนที่ยึดติดกับยางมะตอยซึ่งต้องมีการผสมที่ดีทั้งทางความร้อนและทางเคมี และกรณีที่พอลิเมอร์กับยางมะตอยสามารถเข้ากันได้ พอลิเมอร์จะยึดติดกับยางมะตอย มีพันธะทางเคมีเกิดขึ้น ซึ่งให้สมบัติที่ดีที่สุด ตัวอย่างลักษณะความเข้ากันได้และเข้ากันไม่ได้แสดงดังรูปที่ 2.16



(ก)

(ข)

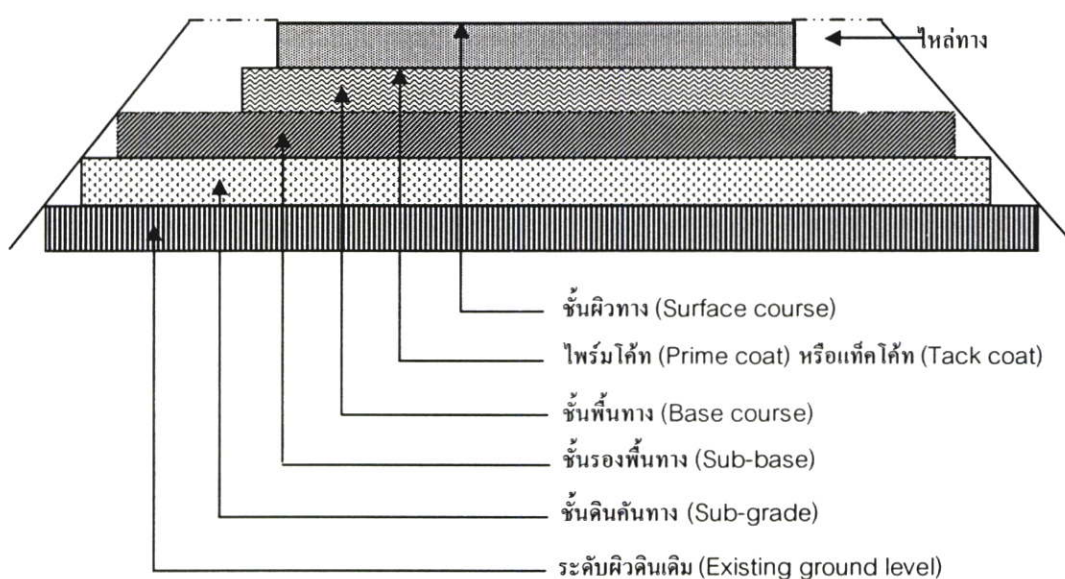
รูปที่ 2.16 ลักษณะของยางมะตอยที่ตัดแปรงด้วยพอลิเมอร์ (ก) เข้ากันได้ และ (ข) เข้ากันไม่ได้ ระหว่างยางมะตอยกับพอลิเมอร์ [2]

2.5.3 ข้อจำกัดของการใช้พอลิเมอร์เพื่อตัดแปรยางมะตอย [2]

ข้อจำกัดของการใช้พอลิเมอร์เพื่อตัดแปรยางมะตอยคือ

1. ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์กับยางมะตอยยังมีความไม่แน่นอน เนื่องจากควบคุมแหล่งที่มาของวัตถุดิบได้ยาก
2. ค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น
3. ความยากในการเก็บของผสมที่ได้ เนื่องจากต้องมีการปั่นกวนของผสมที่ได้ตลอดและต้องมีการให้ความร้อนกับยางมะตอยก่อนผสม

2.6 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของถนนลาดยางมะตอย



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบทั่วไปในการปูถนนยางมะตอย [20]

1. ชั้นผิวทาง (Surface dressing) คือชั้นบนสุดของทางที่เป็นผิวจราจร เป็นชั้นที่รองรับการจราจรของขบวนโดยตรง ต้องมีความทนทานต่อการบิด มีผิวเรียบสำหรับการขับขี่ สามารถกันน้ำได้ มีความลาดเอียงแนวขวางเพื่อระบายน้ำบนผิวทางลงสู่ด้านข้างถนน ป้องกันความชื้นไม่ให้กัดเซาะโครงสร้างถนนและดินเดิม มีความต้านทานการสึกหรอจากการจราจรและมีความต้านทานต่อการลื่นไถล นอกจากนี้ยังต้องยึดเหนี่ยวดีกับชั้นที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งวัสดุที่นิยมเลือกใช้มีอยู่ 3 แบบคือ แบบแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) แบบมีการปรับปรุงพื้นผิว (Surface treatment) และแบบชนิดหิน โรย (Penetration Mc Adam)

2. ไพร้มโค้ท (Prime coat) คือส่วนของยางมะตอยเหลวที่ลาดบนผิวทางเพื่อยึดเชื่อมผิวทางให้ติดกับโครงสร้างอื่นๆ เป็นการพ่นยางมะตอยครั้งแรกบนผิวที่ดูดซึม ยางมะตอยที่ใช้เป็นยางมะตอยอิมัลชันหรือคัตแบคแอสฟัลต์ที่มีความหนืดต่ำ เพื่อเตรียมเป็นชั้นพื้นทางที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ (Untreated base) ของผิวทางยางมะตอยในขั้นต่อไป โดยมีวัตถุประสงค์ของการทำไพร้มโค้ท คือ

- ป้องกันการซึมผ่านของน้ำจากผิวทางลงสู่ชั้นพื้นทาง
- ลดปริมาณช่องว่างเล็กๆ
- เคลือบและยึดเหนี่ยวอนุภาคมวลรวม
- ทำให้พื้นทางมีผิวหน้าที่แข็งและแน่น
- ช่วยยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นพื้นทางกับชั้นผิวทางยางมะตอยที่มาปูทับ

สำหรับแทคโค้ท (Tack coat) คือการพ่นยางมะตอยอิมัลชันบางๆ ลงบนผิวทางยางมะตอยหรือคอนกรีตที่มีอยู่เดิม เพื่อยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทางเดิมกับชั้นผิวทางยางมะตอยที่มาปูทับ สมบัติของการทำแทคโค้ทคือ จะต้องเป็นชั้นบางๆ และจะต้องคลุมผิวหน้าที่จะมาปูทับใหม่อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ

3. ชั้นพื้นทาง (Base course) คือชั้นของวัสดุที่มีสมบัติดี เช่น หิน โม่หรือกรวด โม่ซึ่งมีขนาดคละกันตั้งแต่ใหญ่มาถึงเล็กหรือใช้แอสฟัลต์คอนกรีตแบบเดียวกับที่ผิวทาง

4. ชั้นรองพื้นทาง (Sub-base course) คือส่วนวัสดุรองใต้พื้นทาง นิยมใช้ลูกรังหรือดินที่มีสมบัติดี บดอัดแน่นบนคันทาง

5. ไหล่ทาง (Shoulder) คือส่วนที่เสริมด้านท้ายริมสุดของผิวทาง และพื้นทางทั้งสองข้างให้แน่นได้ระดับเท่ากับผิวทาง วัสดุที่ใช้เหมือนชั้นรองพื้นทาง

6. ชั้นดินคันทาง (Sub-grade course) เป็นวัสดุเกรดดี บดอัดแน่นบนผิวดินเดิม

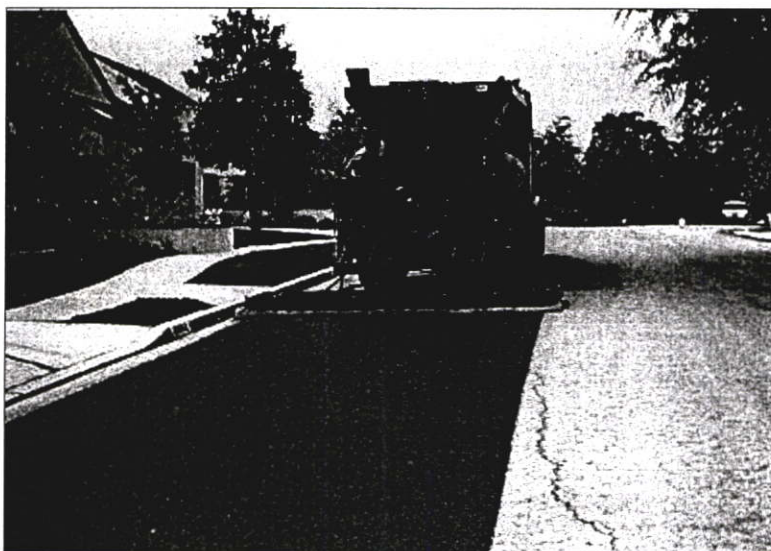
2.6.1 ชนิดของชั้นผิวทาง [21]

1. ผิวทางแบบเซอร์เฟซทรีตเมนต์ (Surface treatment) หมายถึง ผิวทางที่ใช้ยางมะตอยพ่นทับชั้นไพร้มโค้ทแล้วโรยมวลรวมปิดทับ โดยปกติมีความหนาน้อยกว่า 1 นิ้ว ผิวทางแบบเซอร์เฟซทรีตเมนต์มีทั้งประเภทเซอร์เฟซทรีตเมนต์ชั้นเดียว (Single surface) และเซอร์เฟซทรีตเมนต์หลายชั้น (Multi surface) เซอร์เฟซทรีตเมนต์ชั้นเดียว คือชั้นที่ป้องกันการสึกหรอและกันน้ำไม่ให้ซึมผ่าน ประกอบด้วยการพ่นยางมะตอยแล้วโรยมวลรวมขนาดสม่ำเสมอหนึ่งชั้นปิดทับทันที ความหนาของผิวทางประมาณเท่ากับความหนาสูงสุดของอนุภาคมวลรวม สำหรับเซอร์เฟซทรีตเมนต์หลายชั้น (Multi surface) จะช่วยป้องกันการสึกหรอและกันน้ำไม่ให้ซึมผ่านได้ดีขึ้นกว่าเซอร์เฟซทรีตเมนต์ชั้นเดียว และเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของผิวถนน เซอร์เฟซทรีตเมนต์หลายชั้นประกอบด้วย การพ่นยางมะตอยและโรยมวลรวมปิดทับทำสลับกันตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป โดยมีมวล

รวมของแต่ละชั้นจะต้องมีขนาดเพียงครึ่งหนึ่งของชั้นล่างที่อยู่ติดกัน ความหนาประมาณเท่ากับขนาดระบุใหญ่สุดของอนุภาคมวลรวมในชั้นล่างสุดของเซอร์เฟซทรีตเมนต์ คือเซอร์เฟซทรีตเมนต์ชั้นเดียวทำหลายชั้น โดยหน้าที่หลักของผิวทางชนิดนี้คือ

- ช่วยให้ผิวทางมีความคงทนและประหยัดสำหรับถนนชั้นพื้นทางวัสดุเม็ด (Granular base roads) ที่มีปริมาณการจราจรเบาและปานกลาง
- ป้องกันน้ำจากผิวถนนไม่ให้ซึมลงสู่ชั้นพื้นทางวัสดุเม็ดหรือถนนที่มีชั้นผิวทางเดิมซึ่งสึกหรือแตกร้าว
- อุดโพรง ฉาบ และยึดเหนี่ยวอนุภาคของวัสดุเม็ด เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นผิวหน้า
- ทำให้ผิวหน้าใหม่ขึ้น ช่วยเพิ่มความต้านทานการลื่นไถลและเพิ่มอายุการใช้งานของผิวถนน
- เป็นชั้นผิวทางชั่วคราวในกรณีที่มีการก่อสร้างล่าช้าไม่สมบูรณ์หรือในกรณีวางแผนก่อสร้างถนนเป็นขั้นตอน (Stage construction)

สเลอรีซีล (Slurry seal) จัดเป็นเซอร์เฟซทรีตเมนต์ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนผสมของมวลรวมละเอียดที่ได้จากส่วนขนาดละเอียด วัสดุอัดแทรก ยางมะตอยอิมัลชันและน้ำ ผสมรวมกันจนมีลักษณะคล้ายแป้งเปียกสำหรับการนำไปใช้ในงานซ่อมบำรุง จุดประสงค์ของการใช้มักรวมทั้งการบำรุงเพื่อป้องกันและการแก้ไขผิวทาง บริเวณใดของถนนที่มีโครงสร้างที่อ่อนไม่แข็งแรงจะต้องได้รับการซ่อมแซมก่อน เมื่อใช้สเลอรีซีลกับผิวทางเดิมจะทำให้ผิวหน้ามีคุณภาพดีขึ้น เพราะช่วยอุดรอยแตกร้าวตามผิวหน้า ช่วยหยุดรอยแตกแยก และมวลรวมหลุดหาย ช่วยต้านทานการซึมผ่านของน้ำและอากาศดีขึ้น และช่วยปรับปรุงการต้านทานการลื่นไถล โดยลักษณะการฉาบผิวแบบสเลอรีซีลแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะการฉาบผิวทางแบบสเลอรีซีล [22]

2. ผิวทางชนิดเพนิเทรชันแมคคาดีม (Penetration Mc Adam) หมายถึงผิวทางที่ใช้มวลรวมย่อย ซึ่งได้แก่ หินย่อย กรวดย่อย หรือซีโลหะที่มีขนาดก้อนสม่ำเสมอ (One-size aggregate) มาก่อสร้างเป็นชั้นพื้นทางหรือผิวทาง และบดให้แน่นในแต่ละชั้นจนหินเหล่านั้นขัดกันแน่น (Interlock) โดยทำเป็นชั้นๆ ตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป มวลรวมที่ใช้ในแต่ละชั้นจะมีขนาดต่างกัน โดยมียางมะตอยเป็นวัสดุประสานในแต่ละชั้น การก่อสร้างจะมีการปูมวลรวมทีละชั้นแล้วบดทับด้วยล้อบด จากนั้นจึงลาดยางมะตอยลงบนมวลรวมชั้นนั้น ยางมะตอยที่ลาดจะไหลลงตามช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และเคลือบวัสดุมวลรวมด้วย เมื่อลาดยางมะตอยของมวลรวมชั้นดังกล่าวแล้วจึงปูมวลรวมของชั้นต่อไป ความหนาของผิวทางมีค่าประมาณขนาดอนุภาคมวลรวมที่ใช้ ความหนาทั้งหมดอาจหนาถึง 6 นิ้ว ผิวทางชนิดเพนิเทรชันแมคคาดีม มีข้อดีคือ สามารถก่อสร้างได้เร็วไม่ต้องใช้เทคนิคสูง ความแข็งแรงทนทานและเสถียรภาพของผิวทางชนิดนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการยึดเกาะประสานกันระหว่างอนุภาคมวลรวมที่เป็นเหลี่ยมแฉกมุม และการยึดเหนี่ยวกันของยางมะตอยที่ใช้เคลือบอนุภาคมวลรวม ผิวชนิดนี้ค่อนข้างหายากจึงมีความต้านทานการลื่นไถลได้ดี มีความยืดหยุ่นตัวดี เมื่อยุบตัวจะไม่เกิดรอยแตกง่าย ข้อเสียเปรียบคือ ในการก่อสร้างต้องใช้ขนาดอนุภาคมวลรวมตั้งแต่สองขนาดขึ้นไป และต้องปูมวลรวมแต่ละขนาดและบดทับแล้วจึงจะลาดยางมะตอยของแต่ละชั้น ไม่ได้ก่อสร้างเสร็จในชั้นเดียว

2.7 มาตรฐานการฉาบผิวทางหรือฉาบชั้นผิวทางแบบไมโครซีล (Microseal) [23, 24]

ไมโครซีลเป็นวิธีการฉาบผิวทางชนิดหนึ่งซึ่งจัดเป็นสเลอรีซีลชนิดหนึ่ง โดยประกอบด้วย ยางมะตอยชนิดคัดแปรด้วยพอลิเมอร์ (อิมัลชัน) มวลรวม (Aggregate) วัสดุผสมแทรก (Mineral filler) และสารเติมแต่ง (Additive) มีลักษณะแข็งแรงช่วยให้ผิวทางมีความคงทนสูง ลักษณะผิวหน้าไม่ลื่นทนต่อการเปลี่ยนแปลงของดินฟ้าอากาศและป้องกันน้ำซึม ใช้สำหรับฉาบชั้นผิวทาง ผิวไหล่ทางด้วยจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของส่วนผสมที่นำมาใช้

ไมโครซีลหรือสเลอรีซีลที่ดีนั้นจะต้องมีสมบัติตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องเลือกชนิดของสเลอรีซีลให้เหมาะสม ตลอดจนเลือกชนิดของวัสดุและอัตราส่วนผสมซึ่งให้สมบัติตามที่ต้องการ ขึ้นตอนต่างๆ ในการออกแบบส่วนผสมประกอบด้วย

1. การหาข้อมูลเบื้องต้น เพื่อเลือกชนิดของสเลอรีซีลและชนิดของวัสดุต่างๆ ที่จะใช้ผสม
 - ข้อมูลเกี่ยวกับผิวทางที่จะทำสเลอรีซีล
 - วัตถุประสงค์ของการทำสเลอรีซีล
 - คุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาใช้ผสมทำสเลอรีซีล
2. หาปริมาณอิมัลชันที่ต้องใช้
3. ทดลองผสม (Trial mixes) เพื่อหาปริมาณวัสดุผสมแทรก และสารผสมเพิ่มที่ต้องใช้
4. ทดลองหาความสามารถคงตัว (Consistency) เพื่อหาปริมาณน้ำที่ต้องใช้ผสม เพื่อให้สเลอรี

ซีลมีความชื้นเหลวพอเหมาะสำหรับการทำงาน

5. ทดลองหาเวลาเซตตัว (Initial set time) เพื่อหาเวลาที่ส่วนผสมซีลถึงจุดเซตตัว
6. ทดลองหาเวลาในการใช้ปั๊ม (Cure time) เพื่อหาเวลาที่ส่วนผสมซีลถึงจุดที่สามารถเปิดการจราจรได้
7. ทดลองหาค่าการสึกกร่อนภายใต้สภาวะเปียกชื้น (Wet track abrasion test) เพื่อหาปริมาณอิมัลชันต่ำสุดที่ต้องใช้ผสม เพื่อให้ซีลมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนจากการจราจรพอเพียง
8. ทดลอง Loaded wheel test เพื่อหาปริมาณอิมัลชันสูงสุดที่สามารถใช้ผสมได้ โดยไม่ทำให้ซีลเกิดการไหลตัว (Bleeding) เมื่อเปิดการจราจร
9. หาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด

2.7.1 วัสดุสำหรับปูชั้นทางแบบไมโครซีล

วัสดุที่ใช้ในการปูชั้นทางแบบไมโครซีลประกอบด้วย

1. วัสดุแอสฟัลต์
แอสฟัลต์ที่ใช้ต้องเป็นยางมะตอยชนิดคัดแปรด้วยพอลิเมอร์ ซึ่งผลิตขึ้นมาจากแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 หรือ CSS-1h ที่ผสมกับยางมะตอยชนิดคัดแปรด้วยพอลิเมอร์ ชนิดเซตตัวเร็ว โดยมีคุณภาพตาม ทล.-ก.405 “Specification for Elastomeric Modified Asphalt Emulsion” (ตามภาคผนวก ข)
2. สารตัวเติม (Additive)
สารตัวเติมมีหน้าที่ทำให้แอสฟัลต์แตกตัวเร็วขึ้นหรือช้าลง หรือใช้เพื่อให้แอสฟัลต์เคลือบมวลรวมดีขึ้น ปริมาณที่ใช้จะต้องเหมาะสม เพื่อสามารถเปิดการจราจรได้ภายในเวลาที่ต้องการ ซึ่งสารตัวเติมนี้จะใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ แล้วแต่การออกแบบ ซึ่งจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวง
3. น้ำ ต้องใสสะอาด และปราศจากสิ่งเจือปนที่จะทำให้เกิดผลเสียต่อวัสดุผสมซีล
4. วัสดุมวลรวม (Aggregate)
ต้องเป็นหินโมซึ่งแข็ง คงทน สะอาด ปราศจากดินหรือวัสดุไม่พึงประสงค์อื่นใด อาจมีวัสดุผสมแทรกด้วยก็ได้ ขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามตารางที่ 2.4
5. วัสดุผสมแทรก (Mineral filler)
วัสดุผสมแทรก เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมมวลรวม ต้องใช้ในปริมาณที่น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น และจะใช้เมื่อต้องการปรับปรุงความสะดวกในการทำงาน (Workability) หรือขนาดคละ (Gradation)

2.7.2 การใช้งานไมโครซีล

ไมโครซีลใช้สำหรับฉาบผิวทางแบ่งเป็น 3 ชนิด มีลักษณะแตกต่างกันตามที่กำหนดในตารางที่ 2.4 ซึ่งจะแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ขนาดคละของมวลรวม และอัตราการใช้วัสดุ การที่จะกำหนดให้ฉาบผิวไมโครซีลชนิดใดขึ้นอยู่กับสภาพผิวทางเดิม ปริมาณการจราจรและ วัตถุประสงค์ในการใช้งาน

การฉาบผิวไมโครซีลจะต้องเลือกชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับความต้องการซึ่งแบ่งได้ดังนี้

1. ไมโครซีลชนิดที่ 1 (Microseal type I) เป็นชนิดที่มีความสามารถในการแทรกซึมรอยแตกได้ดี ใช้สำหรับฉาบผิวสนามบิน หรือผิวที่ต้องการปรับปรุงพื้นผิว (Texture) ของผิวทางเดิม โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ยารอยแตก
- ฉาบเป็นผิวทาง กรณีต้องการปรับปรุงพื้นผิวของผิวทางเดิม
- ฉาบป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หรือ การเสียหายจากสภาวะอากาศ (Weathering) บนผิวทางเดิม

2. ไมโครซีลชนิดที่ 2 (Microseal type II) เป็นชนิดที่ผิวหน้าหยาบกว่าชนิดที่ 1 ใช้สำหรับฉาบผิวทาง ผิวไหล่ทาง ผิวทางคอนกรีตและผิวทางลาดแอสฟัลต์ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพิ่มความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ของผิวทางเดิม
- ให้ผิวทางระบายน้ำออกไปได้รวดเร็ว
- ฉาบป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หรือ การเสียหายจากสภาวะอากาศ (Weathering) บนผิวทางเดิม

3. ไมโครซีลชนิดที่ 3 (Microseal type III) เป็นชนิดที่มีผิวหน้าหยาบที่สุด ใช้สำหรับฉาบผิวทาง ผิวไหล่ทางผิวทางคอนกรีตและผิวทางลาดแอสฟัลต์ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพิ่มความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ของผิวทางเดิม
- ให้ผิวทางระบายน้ำออกไปได้รวดเร็ว
- ฉาบปรับระดับได้เล็กน้อย
- ปรับแก้ความลาดเอียง (Crown slope) ได้เล็กน้อย
- ฉาบผิวทางที่ผิวทางเดิมหลุด (Raveling)

2.7.3 สมบัติของไมโครซีลที่ดี

1. ต้องไม่ชัน หรือเหลวมากเกินไป โดยสามารถไหลได้อยู่ระหว่าง 10-20 มิลลิเมตร
2. เวลาที่สามารถเซตตัว (Initial set time) ไม่เกิน 4 ชั่วโมง
3. เวลาในการใช้บ่ม (Cure time) และสามารถเปิดการจราจรได้ไม่เกิน 8 ชั่วโมง
4. ค่าการสึกกร่อนภายใต้สภาวะเปียกชื้น (Wet track abrasion loss) ไม่มากกว่า

500 กรัมต่อตารางเมตร

5. ค่าความสามารถในการต้านทานการไหลของเนื้อยาง (Hubbard Field Stability) ต้องไม่น้อยกว่า 1200 กิโลกรัมแรง (kgf)

2.7.4 ขนาดของหิน ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ และอัตราการฉาบผิวแบบไมโครซีล

ขนาดของหิน ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ และอัตราการฉาบเป็นไปตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ขนาดของหิน ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ และอัตราการฉาบผิวแบบไมโครซีล

ชนิดของไมโครซีล	1	2	3
ขนาดของตะแกรง	ผ่านตะแกรงได้ร้อยละ		
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
600 ไมครอน (เบอร์ 30)	40-60	30-50	19-34
300 ไมครอน (เบอร์ 50)	25-45	18-30	12-25
150 ไมครอน (เบอร์ 100)	15-30	10-21	7-18
75 ไมครอน (เบอร์ 200)	10-20	5-15	5-15
Residue ของแอสฟัลต์ร้อยละโดยน้ำหนักของหินแห้ง	10.0-16.0	7.5-13.5	6.5-12.0
อัตราการปู/ฉาบเป็น นน. ของหินแห้ง กก./ตร.ม.	3.0-5.5	5.5-10.0	10.0-16.0

2.8 การทดสอบยางมะตอยอิมัลชัน

1. การทดสอบขนาดอนุภาค (Sieve test) [25] เป็นการทดสอบเพื่อหาขนาดของอนุภาคของยางมะตอยอิมัลชันหรืออนุภาคของแข็งที่อยู่ในผลิตภัณฑ์

2. การทดสอบหาปริมาณของแข็งด้วยการระเหยน้ำ (Residue by evaporation) [25] เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ในยางมะตอยอิมัลชัน โดยการระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. การทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (Solubility of bituminous materials in

trichloroethylene) [26] เป็นการทดสอบเพื่อดูความบริสุทธิ์ (Purity) ของผลิตภัณฑ์ยางมะตอยโดยการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน เนื่องจากยางมะตอยมีการผสมด้วยสารตัวเติมชนิดต่างๆ ซึ่งอาจมีสิ่งปนเปื้อนที่ไม่บริสุทธิ์อยู่

4. การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นการทดสอบเพื่อดูความเป็นกรด-ด่างของยางมะตอยอิมัลชัน

5. การทดสอบการตกตะกอนและเสถียรภาพที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน (Settlement 24 hrs and 7 days) [25] เป็นการทดสอบเพื่อดูความคงตัวของยางมะตอยอิมัลชัน โดยการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 7 วัน

6. การทดสอบความหนืดแบบเซโบล์ฟุโรล (Saybolt furol viscosity) [27] เป็นการทดสอบความหนืดของยางมะตอยอิมัลชัน โดยวัดระยะเวลาเป็นวินาทีที่ยางมะตอยอิมัลชันไหลผ่านรูเปิดของเครื่องทดสอบที่สอบเทียบแล้ว เป็นปริมาตร 60 cm³ ภายใต้สภาวะที่กำหนด

7. การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening point of bituminous, Ring and Ball apparatus) [28] เป็นการทดสอบเพื่อหาจุดอ่อนตัวของยางมะตอยอิมัลชันภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน ซึ่งมี ความสำคัญคือ ทำให้สามารถกำหนดการใช้งานของยางมะตอยอิมัลชันได้ในสภาวะต่างๆและทราบถึงโอกาสการเริ่มตัวของถนนเมื่อใช้ที่อุณหภูมิสูง

8. การทดสอบค่าการคืนตัว (Elastic recovery) [29] การทดสอบค่าการคืนตัวมีความสำคัญคือทำให้ทราบถึงลักษณะของถนนที่นำยางมะตอยอิมัลชันไปใช้ว่าสามารถคืนตัวได้มากน้อยเพียงใดเมื่อมีการรับแรงจากการบรรทุกน้ำหนักวิ่งผ่าน โดยการทดสอบมีสองวิธีตามลักษณะการให้แรง คือ

- การทดสอบค่าการคืนตัวกลับแบบให้แรงบิด (Torsional recovery, NLT 329/91) เป็นการทดสอบเพื่อดูการคืนตัวของยางมะตอยอิมัลชันเมื่อให้แรงบิดที่ 180 องศาแล้วปล่อยแรงและดูการคืนตัวกลับ ค่าที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์การคืนตัวกลับ
- การทดสอบค่าการคืนตัวกลับแบบให้แรงดึง (Elastic recovery by ductility, ASTM D6801) [8] เป็นการทดสอบเพื่อดูการคืนตัวของยางมะตอยอิมัลชันเมื่อให้แรงดึงที่ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที ระยะ 10 เซนติเมตร แล้วตัดให้ขาดออกจากกัน แล้ววัดระยะการคืนตัวกลับเป็นเปอร์เซ็นต์การคืนตัวกลับ

9. การทดสอบเพนิเทรชัน (Penetration) [30] เป็นการทดสอบความแข็งอ่อนของผลิตภัณฑ์ยางมะตอย โดยวัดระดับความลึกของเข็มมาตรฐานหนัก 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 5 วินาที ที่จมลงในเนื้อของผลิตภัณฑ์ยางมะตอย การทดสอบค่าเพนิเทรชันมีความสำคัญเนื่องจากเป็นแนวทางในการเลือกผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน

10. การทดสอบค่าการยืดดึง (Ductility) [31] เป็นการทดสอบสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันเมื่อถูกยืดดึงในอัตราเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที โดยวัดเป็นระยะทางสูงสุดที่ชิ้นงานขาดออกจากกัน

11. การทดสอบค่าความเหนียวและเทนacity (Toughness-Tenacity) [32]

- ค่า Toughness เป็นการทดสอบความเหนียวโดยค่าที่วัดได้เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ภายใต้แรงเค้น หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงดึงกับระยะการดึงที่จุดแรงดึงสูงสุด
- ค่า Tenacity เป็นค่าพลังงานที่กระทำจากจุดรับน้ำหนักสูงสุด จนกระทั่งตัวอย่างขาด หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงดึงกับระยะการดึงจากจุดแรงดึงสูงสุด จนถึงจุดขาด

2.9 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M.J. Fernando และ M. Nadarajah [33] ได้ศึกษาการใช้น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียมากและแอมโมเนียน้อย, Revert[®], Cream skim latex, น้ำยางที่ได้จากการปั่นกวนและน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ในปริมาณ 1-7% DRC (Dry rubber content) พบว่าการใช้ Cream skim latex ปริมาณ 2.5% DRC ผสมกับยางมะตอย มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทำถนนเนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กจึงกระจายตัวได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Diammonium hydrogen phosphate) ซึ่งทำหน้าที่ช่วยตกตะกอนแมกนีเซียม (Magnesium) และช่วยยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางที่ยังไม่สุกตัว (Unvulcanized latex rubber) มากกว่า 1 phr สามารถเพิ่มเสถียรภาพของผสมที่ได้ และยังพบอีกว่าระยะเวลาในการเซตตัวของยางมะตอยผสมมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของน้ำยางที่ใช้

Y.J. Lee, L.M. France และ M.C. Hawley [34] นำ SBR มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย (AC-10 และ AC-20) พบว่ายางมะตอยที่ผสม SBR มีความเหนียวและความต้านทานต่อการฉีกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ SBR เพิ่มขึ้น และให้สมบัติการกระจายตัวที่ดีที่สุดคือ 3-5% โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณ SBR ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อจุดอ่อนตัวของของผสม โดยการกระจายตัวของ SBR มีความสม่ำเสมอที่อัตราส่วน 1-3% โดยน้ำหนัก

N. Radhakrishnan Nair และคณะ [35] ทำการเติมน้ำยางธรรมชาติที่มีความเหนียว 1600000 MPa.s ในอัตราส่วน 5%, 10%, 20% และ 30% ในยางมะตอย AC 80/100 และยางมะตอยเกรดเป่า พบว่าจุดอ่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นจนถึง 10% โดยน้ำหนักแล้วลดลงทั้งสองกรณี ค่าการยึดดึงกรณียางมะตอย AC 80/100 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางแต่กรณียางมะตอยเกรดเป่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียว ส่วนค่าเพนิเทรชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง และ Lap shear test กรณี AC 80/100 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นจนถึง 10% โดยน้ำหนักแล้วลดลง กรณียางมะตอยเกรดเป่ามีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณยาง 5% โดยน้ำหนักแล้วลดลง

W.V. Synder และ S.W. Schmitt [36] ปรับปรุงยางมะตอย AC 85/100 ด้วยน้ำยางนีโอพรีนชนิดที่ไม่ได้ผสมสารเคมีอื่น (Uncompounded and unvulcanized) ทำการผสมน้ำยางในปริมาณ 1-5%

โดยน้ำหนัก กับยางมะตอยหลายชนิดได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ คัดแบคแอสฟัลต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน ทำการศึกษาสมบัติจุดอ่อนตัว ความหนืด การดึงยึด การคืนตัวและความเหนียว พบว่าสมบัติส่วนมากมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางนีโอพรีน ยกเว้นกรณีคัดแบคแอสฟัลต์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมน้ำยางสามารถเพิ่มความทนทานในการเก็บรักษา (Aging resistance) ให้กับยางมะตอยแต่อาจเกิดปัญหาเรื่องความหนืดเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำยางมะตอยที่มีการปรับปรุงแล้วไปทดลองทำถนน (Surface treatment or Seal-coats) แล้วทดสอบผลในช่วง 18 เดือน พบว่าถนนมีแนวโน้มมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

C.R. Cuervo และ S.F. Booth [37] ทำการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก โดยใช้ น้ำยางนีโอพรีนและใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) เป็นอิมัลซิไฟเออร์เพื่อนำไปใช้ในงานลาดถนน โดยทำการผสมยางมะตอยหลอมเหลวกับสารละลายอิมัลซิไฟเออร์ด้วยเครื่องคอลลอยด์มิลที่อุณหภูมิ 140 °C และ 150 °C ตามลำดับ พบว่าของผสมมีความเข้ากันได้ดีไม่เกิดการแยกวัฏภาคและมีเสถียรภาพสูง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด มีความยืดหยุ่นและความเหนียวเพิ่มขึ้นแต่จุดอ่อนตัวลดลง นอกจากนี้ยังมีการผสมน้ำยางภายหลังจากการเตรียมอิมัลชัน (Post add) พบว่าเกิดปัญหาความไม่เข้ากันของส่วนผสมและยางมะตอยอิมัลชันที่ได้มีเสถียรภาพต่ำ

P.P. Serquigny และคณะ [38] ทำการศึกษาผลของการเติมผงยางที่ 7-13% โดยน้ำหนักและพอลิเมอร์ร่วมที่ประกอบด้วยอีพอกไซค์ 1-10 % โดยน้ำหนักกับแอลฟาโอลิฟินที่ไม่อิมัลชันในยางมะตอย พบว่าความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscosity) ที่ 180 °C มีค่าน้อยกว่า 1150 MPa.s และวัดค่าเพนิเทรชันของของผสมได้ประมาณ 15-35 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของยางมะตอยเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

P. Schilling และ E. Crews [1] ได้ทำการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะของยางมะตอยกับวัสดุมวลรวม โดยใช้ตัวยึดเกาะที่ได้จากปฏิกิริยาของกรดไขมันอิ่มตัวหรือกรดไขมันอิ่มตัวที่ได้รับการปรับปรุงกับพอลิเอทิลีนเอมีน ซึ่งจะให้เป็นพอลิอะมิโนเอมีน จากนั้นผสมเข้ากับเฮกซะเมทิลลิโนไตรเอมีน อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้คือเกลือแอลคาไรด์ของกรดไขมันอิ่มตัวและมีการปรับความหนืดโดยใช้ตัวทำละลายเช่น เอทิลีนไกลคอล และไดเอทิลีนไกลคอลเป็นต้น จากการทดลองนี้ทำการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ของการยึดเกาะของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบที่ได้รับการปรับปรุงกับวัสดุมวลรวมซึ่งเป็นหินแกรนิตและหินควอร์ตพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวยึดเกาะคือ ใช้พอลิอะมิโนเอมีน 30-70 % โดยน้ำหนัก กับเฮกซะเมทิลลิโนไตรเอมีน 70-30 % โดยน้ำหนัก ซึ่งจะให้ผลของการยึดติดกับวัสดุมวลรวมที่ดี

จรัสศรี พันธุ์ไม้ [39] ศึกษาการนำยางธรรมชาติในรูปยางแผ่นรมควันปรับปรุงสมบัติยางมะตอย (AC 60/70) สำหรับงานสร้างผิวทาง เพื่อปรับปรุงสมบัติของถนนยางมะตอย โดยศึกษาปัจจัยหลายประการที่มีผลการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยได้แก่ ปริมาณยาง ผลของสารเชื่อมโยงกำมะถัน ผลของสารเติมแต่งบางชนิด เป็นต้น โดยการนำยางแผ่นรมควันมาบดนึ่งด้วยเครื่องผสม

แบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิ 70 °C โดยการนำยางแผ่นรมควันมาบดด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง (High shear mixer) ที่ความเร็วประมาณ 5000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบ่มที่ 120°C เป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำมาผสมอีกครั้งด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูงที่อุณหภูมิ 150-170 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดสอบสมบัติยางมะตอยผสมยางธรรมชาติพบว่า ยางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยยางแผ่นรมควันที่ไม่เชื่อมโยงมีความแข็งขึ้น มีจุดอ่อนตัว (Softening point) สูงสุดที่มีการใช้ยางแผ่นรมควัน 6 % ค่าดัชนีความแข็งกด (Penetration index) และค่าความเหนียว (Toughness-Tenacity) ที่สูงขึ้น โดยปริมาณยางแผ่นรมควันที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยคือ 6% โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาศึกษาผลของการเชื่อมโยงพบว่า ยางมะตอยที่ได้อ่อนตัวลง มีจุดอ่อนตัว ความแข็งกด และค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery) มีค่าต่ำกว่าการใช้ยางแผ่นรมควันที่ไม่ใช้สารเชื่อมโยง

ปฏิเวธ ลำเลิศ และคณะ [40] ศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติยางมะตอย (Asphalt cement, 60/70) ด้วยเส้นใยไพลอน 6 ที่เหลือจากส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Ply) ของยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เส้นใยธรรมชาติยูคาลิปตัส และผงยางจากรยนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อ (Filler) โดยทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาณเส้นใยที่เติม ปริมาณผงยางจากรยนต์ และผลของการเชื่อมโยง ในการทดลองนี้ยางมะตอยและเส้นใยจะถูกผสมเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องปั่นกวนแบบใบพัดด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) ความยืดดึง (Ductility) ความหนาแน่น (Density) จุดอ่อนตัว (Softening point) ความคืนตัว (Torsional recovery) ความหนืดแบบบรูคฟิลด์ พบว่าเมื่อเติมปริมาณเส้นใยไพลอนและยูคาลิปตัสในยางมะตอยจะทำให้ยางมะตอยแข็งขึ้น ยืดตัวได้น้อยลง ความหนาแน่นมากขึ้น แต่ความคืนตัวต่ำลง ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมในการผสมกับยางมะตอยคือ 1 ในร้อยส่วน (phr) เมื่อผสมผงยางจากรยนต์ในยางมะตอยร่วมกับเส้นใยไพลอน 6 ปริมาณ 1 phr พบว่าไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อสมบัติยางมะตอย จากการใช้สารเชื่อมโยงกรดเนฟทานิกในปริมาณ 1 phr พบว่าทำให้ค่าเพนิเทรชันเพิ่มขึ้น จุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น และความยืดดึงเพิ่มขึ้น

ทวีศักดิ์ ยศยิ่งธรรมกุล [4] ทำการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic asphalt emulsion) ด้วยน้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) ในรูปแบบน้ำยางข้นเพื่อนำไปใช้ในการลาดถนน โดยทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อยางมะตอยอิมัลชัน คือ ชนิดและปริมาณน้ำยางธรรมชาติได้แก่ น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียมาก (High ammonia) น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียน้อย (Low ammonia) และน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Prevulcanized) ที่ปริมาณ 3.5-10% DRC ชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ได้แก่ แลคติกเคซีน (Lactic casein) โพแทสเซียมโอเลต (Potassium oleate) และวินโซลเรซิน (Vinsol[®] resin) จากการศึกษาพบว่าการใช้ น้ำยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบได้ เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมยาง

ธรรมชาติพบว่าความหนืด (Viscosity) เหนียวแทรกชั้น (Penetration) จุดอ่อนตัว (Softening point) และ
ความคืนตัว (Recovery) เพิ่มขึ้น

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบที่ได้รับการคัดแปรด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน โดยเน้นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอิมัลชันที่ได้ เช่น ค่าจุดอ่อนตัว ค่าการคืนตัว เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยจากวิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สจล. ของนายทวิศักดิ์ ยศยิ่งธรรมกุล เรื่อง “การปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติ” (Modification of Asphalt Emulsion with Natural Rubber Latex) [4] ซึ่งงานวิจัยนี้มีขอบเขต และวิธีดำเนินการของงานวิจัยดังต่อไปนี้

- ตอนที่ 1** ศึกษาสูตรการผสมยางมะตอยอิมัลชันเบื้องต้น โดยศึกษา
- ผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำยางเอสปีอาร์ต่อน้ำยางธรรมชาติ (SBR:NR) ที่ 100:0, 75:25, 65:35, 60:40, 55:45, 50:50, 35:65 และ 100:0
 - เกรดของน้ำยางเอสปีอาร์ 2 เกรดการค้าคือ เกรด 1712 และ เกรด เคเอสแอล 341 (KSL341)
- ตอนที่ 2** ศึกษาผลของปริมาณเนื้อยางแห้งที่ 4%, 5%, 6% และ 7% DRC
- ตอนที่ 3** ศึกษาผลของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์โดยปรับปริมาณของวินโซลเรซินที่ 0.50%, 0.55%, 0.60% และ 0.65% โดยน้ำหนัก และปรับปริมาณของแลคติกเคซินที่ 0.60%, 0.70% และ 0.80% โดยน้ำหนัก
- ตอนที่ 4** ศึกษาการออกแบบผิวทาง (Mixed design) แบบไมโครซีลชนิดที่ 2 (Microseal type II)

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

3.2.1 สารเคมี

ยางมะตอยเกรด 60/70 (AC 60/70) บริษัท แบมโก จำกัด โดยสมบัติบางประการของยางมะตอย AC 60/70 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

1. น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex, NRL) ชนิดน้ำยางชั้นเกรดแอมโมเนียมาก (High Ammonia, HA) ที่มีประมาณของแข็ง 60% จากบริษัท Lucky flow จำกัด
2. น้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene Butadiene Rubber Latex, SBRL) เกรด 1712 ที่มี

ประมาณของแข็ง 23.05% บริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ จำกัด และ เกรด KSL341 ที่มีปริมาณของแข็ง 69%

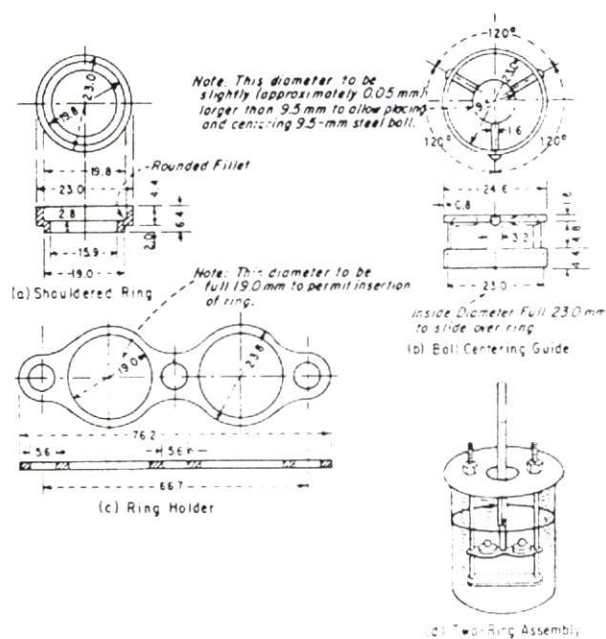
3. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) เกรดการค้า Ultra Phase Co., Ltd.
4. แลคติกเคซีน (Lactic Casein) เกรดการค้า บริษัท White Group Public Co., Ltd. เป็นอิมัลซิไฟเออร์
5. วินโซลเรซิน (Vinsol[®] Resin) เกรดการค้า บริษัท Hercules Inc. ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon) เป็นอิมัลซิไฟเออร์
6. นอปโก เอ็นเอ็กซ์แซด (Nopco NXZ[®]) เกรดการค้า บริษัท Henke เป็นสารกันฟอง (Antifoaming) โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon) และซิลิกา (Hydrophobic silica)
7. เอสเอ็นเอ60 (SNA60[®]) เป็นอิมัลซิไฟเออร์
8. ทรอยแซน 198 (Troysan 198[®]) เป็นสารกันบูด
9. น้ำ (Water)
10. หินปูนชนิดที่ 2 (Type II)
11. ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 (Portland cement type I)
12. สารเติมแต่ง 1 (Additive 1)
13. สารเติมแต่ง 2 (Additive 2)

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางมะตอยที่ใช้ในการทดลอง

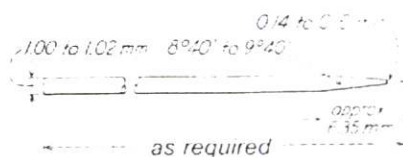
สมบัติ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน
เพนิเทรชันที่ 25°C (Penetration at 25°C)	61 mm	DH-T 403
จุดอ่อนตัว (Softening point, Ring and ball)	48.9 °C	ASTM D36
จุดวาบไฟ (Flash point, Cleveland open cup)	248 °C	ASTM D92
ความยืดดึงที่ 13°C (Ductility at 13°C)	>150 cm	DH-T 405
ความหนาแน่นที่ 25°C (Density at 25°C)	1.027 g/cm ³	ASTM D70
เสถียรภาพในการเก็บรักษาที่ 165°C (Storage stability at 165°C, 120 hrs difference in softening point)	1.75	N LT-328
ความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscosity, shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21 at 135°C)	420 cP	ASTM D4402

3.3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องผสมยางมะตอยอิมัลชันขนาดใหญ่ (Colloid mill)
2. เครื่องทดสอบความหนืดแบบเซโบลล์ฟูโรล (Saybolt furol viscometer)
3. เครื่องทดสอบค่าเพนิเทรชัน (Penetrometer)
4. เครื่องทดสอบจุดอ่อนตัวชนิกวงแหวนและลูกบอล (Ring and ball apparatus)
5. เครื่องทดสอบค่าการยืดตัว (Ductility machine)
6. เครื่องทดสอบความสามารถในการคืนตัว (Elastic recovery machine)
7. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter)
8. เครื่องมือทดสอบการหาขนาดคละของวัสดุผสมรวม (Sieve test)
9. เครื่องทดสอบการหาค่าความสึกหรอของ Coarse aggregate (Loss angeles abrasion)
10. เครื่องทดสอบหาความต้านทานต่อการขัดสีที่สภาวะเปียกชื้น (Wet Track Abrasion Test, WTAT)
11. อุปกรณ์สำหรับทดสอบหาปริมาณสัดส่วนของฝุ่นหรือดินในวัสดุผสมรวม (Sand equivalent)
12. อุปกรณ์สำหรับทดสอบการไหลตัวของสเลอร์ซีเมนต์ (Consistency test)
13. อุปกรณ์สำหรับทดสอบหาเวลาการเซตตัวและบ่มตัว (Initial set time and Cure time)
14. อุปกรณ์สำหรับทดสอบหาค่าความสามารถในการต้านทานการไหลของเนื้อยาง (Hubbard field stability)
15. อ่างน้ำเย็น (Water cooling bath)
16. เตาอบ (Oven)
17. แท่นให้ความร้อน (Hot plate)
18. กระจกบอควง (Glass cylinders)
19. บีกเกอร์ (Beaker)
20. ปิเปต (Pipet)
21. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
22. ตะแกรงกรอง (Sieve)
23. ช้อนตักสาร (Spatula) และแท่งแก้วคน
24. เครื่องชั่ง
25. นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สำหรับทดสอบจุดอ่อนตัว [28]



รูปที่ 3.5 เจ็มมาตรฐานสำหรับทดสอบค่าเพนิเทรชัน [30]

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ตอนที่ 1 การเลือกสูตรยางมะตอยอิมัลชันเบื้องต้น

1. ศึกษาผลของเกรดยางเอสปีอาร์ 2 เกรดการค้า

วิธีการเตรียมยางมะตอยอิมัลชัน

- ผสมส่วนผสม 1-4 จากตารางที่ 3.2 เข้าด้วยกันตามอัตราส่วนของแต่ละสูตรการผสม จากนั้นให้ความร้อนแก่ส่วนผสมจนถึงอุณหภูมิ 70°C พร้อมกับคนตลอดเวลา เมื่อส่วนผสมละลาย ทำการลดอุณหภูมิส่วนผสมลงที่ 40°C
- ผสมส่วนผสม 5-8 ที่อุณหภูมิ 40°C และคนให้เข้ากัน (เรียกว่าสารละลายอิมัลซิไฟเออร์)
- ผสมส่วนผสมที่ 9-10 และให้อุณหภูมิจนถึง 140°C พร้อมกับคนตลอดเวลา

4. ผสมสารที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องคอลลอยด์มิล (Coillold mill)
5. ปล่อยให้ส่วนผสมที่ได้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
6. กรองส่วนผสมด้วยตะแกรงเบอร์ 20
7. ทดสอบสมบัติในส่วนของอิมัลชันและกากที่ได้จากการระเหย

ตารางที่ 3.2 สูตรการผสมเบื้องต้นตามอัตราส่วน (100 กรัม)

สารเคมี	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)	
	สูตร 1	สูตร 2
1. H ₂ O	23.58	34.85
2. KOH	0.30	0.30
3. Lactic Casein	0.70	0.70
4. Vinsol Resin [®]	0.55	0.55
5. Nopco NXZ [®]	0.05	0.05
6. Troysan 198 [®]	0.15	0.15
7. SBRL	16.92 (% solid = 23.05)	5.65 (% solid = 69)
8. NRL	3.50	3.50
9. SNA 60 [®]	0.25	0.25
10. Asphalt	54	54

2. ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำยางเอสปีอาร์กับน้ำยางธรรมชาติ

วิธีการเตรียมยางมะตอยอิมัลชัน

1. เลือกสูตรการผสมที่ให้ผลการทดสอบเบื้องต้นที่ดีที่สุดจากการศึกษาเกรดน้ำยางเอสปีอาร์ มา 1 อัตราส่วน
2. เตรียมยางมะตอยอิมัลชันตามการทดลองที่ 1 แต่ปรับอัตราส่วนระหว่างน้ำยางเอสปีอาร์ต่อน้ำยางธรรมชาติที่ 100:0, 75:25, 65:35, 60:40, 55:45, 50:50, 35:65 และ 100:0
3. ทดสอบสมบัติในส่วนของอิมัลชันและกากที่ได้จากการระเหย

3.3.2 ศึกษาผลของปริมาณเนื้อยางแห้ง

1. เลือกสูตรการผสมจากข้อ 3.3.1 ที่ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด 1 สูตร
2. เตรียมยางมะตอยอิมัลชันตามการทดลองที่ 3.3.1 แต่ปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง (% DRC) ที่ 4%, 5%, 6% และ 7% DRC
3. ทดสอบสมบัติในส่วนของอิมัลชันและกากที่ได้จากการระเหย

3.3.3 ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์

1. เลือกสูตรการผสมที่ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3.2
2. เตรียมยางมะตอยอิมัลชันตามข้อ 3.3.1 แต่ปรับปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ 2 ชนิด คือ
 - วินโซลเรซินที่ 0.50%, 0.55%, 0.60% และ 0.65% โดยน้ำหนัก
 - แลคติกเคซินที่ 0.60%, 0.70% และ 0.80% โดยน้ำหนัก
3. ทดสอบสมบัติในส่วนของอิมัลชันและกากที่ได้จากการระเหย

3.3.4 ตอนที่ 4 ศึกษาการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีล

1. ศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่ง

1. ผสมวัสดุรวมกับซีเมนต์ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.3 ให้เข้ากัน
2. ผสมสารเติมแต่งกับน้ำและคนให้เข้ากันและผสมเข้ากับข้อที่ 1
3. ผสมส่วนผสมให้เข้ากันโดยใช้อัตราเร็วของการคนส่วนผสม 60 รอบต่อนาที
4. เทอิมัลชันตามอัตราส่วนและคนให้เข้ากัน
5. ทดสอบส่วนผสมที่ได้ตามวิธีการทดสอบของไมโครซีล

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมไมโครซีล

อัตราส่วนผสม/สูตร	1	2	3	4	5
วัสดุรวมจากสระบุรี	100	100	100	100	100
ซีเมนต์	0.5**	0.5**	0.5**	0.5**	0.5**
สารเติมแต่ง 1	1**	2**	3**	5**	10**
ยางมะตอยอิมัลชัน	15**	15**	15**	15**	15**
น้ำ	*	*	*	*	*

หมายเหตุ *ปรับปริมาณจนค่าการไหล (Flow) ให้อยู่ในช่วง 10-20 มิลลิเมตร

** % โดยน้ำหนักของวัสดุรวม

2. ศึกษาผลของแหล่งหิน

1. เลือกอัตราส่วนการผสมจากการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมที่ให้ผลการทดสอบที่ดีมา 1 อัตราส่วน
2. ผสมอัตราส่วนผสมตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนแหล่งของวัสดุมวลรวมเป็นแหล่งจากราชบุรีและนครสวรรค์
3. ทดสอบส่วนผสมที่ได้ตามวิธีการทดสอบของไมโครซิล

3. ศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์

1. เลือกอัตราส่วนการผสมจากการศึกษาผลของแหล่งหินที่ให้ผลการทดสอบที่ดีมา 1 อัตราส่วน
2. ผสมอัตราส่วนผสมตามข้อ 1 (ศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่ง) แต่ปรับปริมาณของซีเมนต์ที่ 0%, 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม และปริมาณยางมะตอยอิมัลชันที่ 16% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม
3. ผสมอัตราส่วนผสมตามข้อ 1
4. ทดสอบส่วนผสมที่ได้ตามวิธีการทดสอบของไมโครซิล

4. ศึกษาผลของชนิดสารเติมแต่ง

1. เลือกอัตราส่วนการผสมจากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ที่ให้ผลการทดสอบที่ดีมา 1 อัตราส่วน
2. ผสมอัตราส่วนผสมตามข้อ 1 (ศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่ง) แต่เปลี่ยนชนิดของสารเติมแต่งเป็นสารเติมแต่ง 2
3. ผสมอัตราส่วนผสมตามข้อ 1
4. ทดสอบส่วนผสมที่ได้ตามวิธีการทดสอบของไมโครซิล

5. ศึกษาผลของปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน

1. เลือกอัตราส่วนการผสมจากการศึกษาผลของชนิดสารเติมแต่งที่ให้ผลการทดสอบที่ดีมา 1 อัตราส่วน
2. ผสมอัตราส่วนผสมตามข้อ 1 (ศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่ง) แต่ปรับปริมาณของยางมะตอยอิมัลชันที่ 14%, 15% และ 16% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม
3. ผสมอัตราส่วนผสมตามข้อ 1
4. ทดสอบส่วนผสมที่ได้ตามวิธีการทดสอบของไมโครซิล

3.4 การทดสอบยางมะตอยอิมัลชัน

3.4.1 การทดสอบขนาดอนุภาค (ASTM D244)

1. บันทึคน้ำหนักแห้งของตะแกรงกรองที่มีรูขนาด 850 ไมครอน กับภาชนะโลหะที่ทำด้วยสารละลายโซเดียมโอเลตเข้มข้น 2% มวล/ปริมาตร

2. เทตัวอย่างปริมาณ 1000 กรัมผ่านตะแกรง
3. ล้างตะกอนที่ติดอยู่ที่ตะแกรงด้วยสารละลายโซเดียมโอเลตจนสารละลายใส
4. นำตะแกรงกรองใส่ในภาชนะโลหะ แล้วอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์แล้วบันทึกน้ำหนักสุดท้าย

$$\% \text{ ของแข็งที่เหลือ} = (B-A) / 10$$

$$A = \text{น้ำหนักแห้งของตะแกรงกรอง} + \text{ภาชนะโลหะ}$$

$$B = \text{น้ำหนักสุดท้าย}$$

3.4.2 การทดสอบหาปริมาณกากด้วยการระเหยน้ำ (ASTM D244)

1. บันทึคน้ำหนักแห้งของบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร + แท่งแก้ว
2. เทตัวอย่างปริมาณ 50 ± 0.1 กรัม ลงในบีกเกอร์
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 163°C ± 2.8°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ทำการเขี่ยตะกอนที่เหลืออยู่แล้วอบต่ออีก 1 ชั่วโมง
5. ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์แล้วบันทึกน้ำหนักสุดท้าย

$$\% \text{ กาก} = 2*(A - B)$$

$$A = \text{น้ำหนักสุดท้าย}$$

$$B = \text{น้ำหนักแห้งของบีกเกอร์} + \text{แท่งแก้ว}$$

3.4.3 การทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (DH-T409)

1. วางแผ่นกรองใยแก้วลงในครุชชีเบล แล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C ± 5°C เป็นเวลา 15 นาที

2. ปลดปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักละเอียดถึง 0.0001 กรัม

3. ในกรณีตัวอย่างเป็นของแข็ง ให้ความร้อนตัวอย่างจนเหลวพอเทได้ โดยไม่ให้ความร้อนสูงกว่าจุดอ่อนตัวเกิน 111°C

4. เทตัวอย่างประมาณ 2 กรัมที่ทราบมวลละเอียดถึง 0.001 กรัม ลงในขวดแก้วรูปกรวยเติมไตรคลอโรเอทิลีนลงไปทีละน้อยจนครบ 100 มิลลิลิตร

5. เขย่าจนแน่ใจว่าตัวอย่างละลายหมด
6. ปิดจุกตั้งทิ้งไว้ 15 นาที
7. ทำแผ่นกรองใยแก้วให้เปียกด้วยไตรคลอโรเอทิลีนเล็กน้อยค่อย ๆ เทตัวอย่างลงใน

เครื่องกรองที่ต่อกับเครื่องดูด

8. ล้างส่วนที่เหลือในขวดด้วยไตรคลอโรเอทิลีนจนไตรคลอโรเอทิลีนที่ออกจากครุชเชิลไล

9. นำส่วนที่เหลือพร้อมครุชเชิลไประเหยบนเครื่องอังไอน้ำไล่ไตรคลอโรเอทิลีนจนหมดกลิ่นไตรคลอโรเอทิลีน

10. อบในตู้อบที่อุณหภูมิ $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ จนน้ำหนักคงที่

สารที่ละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (ร้อยละ) = $100 - ((m_1/m_2) * 100)$

m_1 = น้ำหนักของสารที่ไม่ละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (กรัม)

m_2 = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

3.4.4 การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

1. แช่ตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เทียบมาตรฐานเครื่องวัดค่าด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 และ 7 ตามลำดับ
3. จุ่มขั้วอิเล็กโทรดในตัวอย่างเป็นเวลา 30 วินาที
4. บันทึกค่าความเป็นกรด-ด่างที่อ่านได้จากเครื่องวัด

3.4.5 การทดสอบการตกตะกอนและเสถียรภาพที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน (ASTM D244)

1. เทตัวอย่างปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่กระบอกตวงแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร
2. ปลดไขไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและ 7 วัน
3. ปิเปิดส่วนบนของตัวอย่างปริมาณ 55 มิลลิลิตร เป็นตัวอย่างที่ 1
4. ปิเปิดส่วนที่สองปริมาณ 390 มิลลิลิตรทิ้งไป
5. ส่วนที่เหลือปริมาณ 55 มิลลิลิตร เป็นตัวอย่างที่ 2
6. หาปริมาณกากด้วยการระเหยน้ำออกตามวิธีการทดสอบทั้งสองตัวอย่าง

% การตกตะกอน = $B - A$

B = เปอร์เซ็นต์กากของตัวอย่างที่ 1

A = เปอร์เซ็นต์กากของตัวอย่างที่ 2

3.4.6 การทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอล (ASTM D244)

1. กวนตัวอย่างให้ทั่วโดยไม่ให้เกิดฟองแล้วเทตัวอย่างลงในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร
2. แช่ตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 30 นาที
3. จัดเตรียมอุปกรณ์ให้พร้อมทำการทดสอบ
4. เทตัวอย่างผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 850 ไมครอน ลงในเครื่องหาความหนืด
5. กวนตัวอย่างด้วยแท่งแก้วเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ และบันทึกอุณหภูมิ

6. ปลดจุกที่กั้นเครื่องทดสอบพร้อมจับเวลาจนตัวอย่างเต็มเซลล์
7. บันทึกเวลาที่ได้เป็นวินาที

3.4.7 การทดสอบจุดอ่อนตัว (ASTM D36)

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการหาปริมาณอากาศมาให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ใช้สับจุลยาลบนแผ่นทองเหลืองบาง ๆ แล้ววางแบบวงแหวนมาตรฐานลงบนแผ่นทองเหลือง
3. เทตัวอย่างลงในวงแหวนทองเหลืองมาตรฐานให้ล้นออกมาเล็กน้อยแล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
4. ใช้มีดบางๆ หรือเกลียงที่อังไฟให้ร้อนปาดตัวอย่างส่วนที่เกินออกจากแบบให้ผิวตัวอย่างเรียบเสมอปากขอบวงแหวนมาตรฐาน
5. เติมน้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 800 มิลลิลิตร จนมีความสูงประมาณ 105 ± 3 มิลลิเมตร
6. ประกอบเครื่องมือพร้อมด้วยวงแหวนบรรจุตัวอย่าง โดยวางลูกบอลเหล็กมาตรฐานให้อยู่ตรงจุดศูนย์กลางวงแหวนมาตรฐาน และจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ขนาด 100°C ลงในบีกเกอร์
7. ให้ความร้อนที่ก้นบีกเกอร์โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตราสม่ำเสมอ 5°C ต่อนาที
8. บันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ เมื่อลูกบอลเหล็กมาตรฐานกระทบก้นบีกเกอร์

3.4.8 การทดสอบค่าการคืนตัว

การทดสอบค่าการคืนตัวแบบให้แรงบิด (Torsional recovery, NLT 329/91)

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการหาปริมาณอากาศมาให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เทตัวอย่างใส่แบบมาตรฐานจนเต็มในขณะที่ตัวอย่างยังร้อนอยู่ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
3. แช่ตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 90 นาที
4. นำตัวอย่างใส่เครื่องทดสอบพร้อมเติมน้ำที่มีอุณหภูมิ 25°C ให้มีความสูงมากกว่าตัวอย่างอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร
5. จัดชุดทดสอบให้เข็มบอกตำแหน่งชี้ที่ 0 องศา
6. หมุนแกนโลหะที่ติดกับเข็มบอกตำแหน่งเป็นมุม 180 องศา อย่างรวดเร็วแล้วปล่อย
7. วัดค่ามุมที่หมุนย้อนกลับเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

$$\% \text{ การคืนตัว} = [A/180] * 100$$

$$A = \text{มุมที่หมุนย้อนกลับในหน่วยองศา}$$

การทดสอบค่าการคืนตัวแบบให้แรงดึง (Elastic recovery by ductility, ASTM D6801)

1. เตรียมตัวอย่างเหมือนกับการทดสอบค่าการยืดดึงแต่ใช้แบบทดสอบค่าการคืนตัว และแช่ตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 90 นาที
2. เดินเครื่องดึงตัวอย่างด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ 5 เซนติเมตรต่อนาที ระยะ 10 เซนติเมตร แล้วตัดตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน
3. ปล่อยให้ตัวอย่างคืนตัวกลับเป็นเวลา 30 นาที
4. วัดค่าการคืนตัวเป็นเปอร์เซ็นต์การคืนตัว

3.4.9 การทดสอบค่าเพนิเทรชัน (DH-T403)

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการหาปริมาณอากาศมาให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เทตัวอย่างใส่แบบจนเต็มในขณะที่ตัวอย่างยังร้อนอยู่ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
3. นำตัวอย่างไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แล้วเช็ดน้ำที่ผิวตัวอย่างออกให้หมด
5. เตรียมเข็มมาตรฐานหนัก 100 ± 0.05 กรัม
6. ตั้งหน้าปิดเครื่องทดสอบให้อ่านค่าทดสอบที่ศูนย์
7. เปิดปุ่มทำงานปล่อยให้เข็มมาตรฐานแทรกลงในตัวอย่างเป็นเวลา 5 วินาที
8. บันทึกค่าที่อ่านได้จากหน้าปิดเครื่องทดสอบ

3.4.10 การทดสอบค่าการยืดดึง (DH-T405)

1. ใช้สบู่อาบบนแผ่นทองเหลือง และส่วนข้างของแบบทดสอบมาตรฐานด้านในบาง ๆ จากนั้นประกอบแม่แบบมาตรฐานทั้งหมดลงบนแผ่นทองเหลือง
2. นำตัวอย่างที่ได้จากการหาปริมาณอากาศมาให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เทตัวอย่างลงในแบบที่ประกอบไว้จนกระทั่งตัวอย่างล้นออกมาจากแบบเล็กน้อย
4. ทิ้งตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที
5. นำตัวอย่างไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 30 นาที
6. นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแล้วใช้มีดบาง ๆ หรือเกียงที่อังไฟให้ร้อน ปาดตัวอย่างส่วนที่เกินออกจากแบบให้ผิวหน้าตัวอย่างเรียบเต็มแบบพอดี
7. นำตัวอย่างที่ปาดแล้วไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 13°C เป็นเวลา 90 นาที
8. นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แล้วเอาแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างทั้งสองของแบบออก
9. เอาห่วงที่คล้องปลายของตัวยึดทั้งสองข้างใส่ลงในขอเกี่ยวของเครื่องดึง
10. เดินเครื่องดึงตัวอย่างด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ 5 เซนติเมตรต่อนาที จนตัวอย่างขาด

11. บันทึกกระษะที่ตัวอย่างยึดจนกระทั่งขาดในหน่วยเซนติเมตร

3.4.11 การทดสอบ Toughness-Tenacity

1. ให้ความร้อนกับตัวอย่างโดยการระเหยน้ำและคนอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งตัวอย่างสามารถเทได้ซึ่งปกติไม่เกิน 80°C ของจุดอ่อนตัว
2. เทตัวอย่างปริมาณ 39 กรัม ลงในแบบเทตัวอย่างและหย่อนหัวดิ่งลง โดยปรับระดับหัวดิ่งให้ได้ระดับโดยการปรับเกลียวปรับระดับ
3. ปล่ยตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 60 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C เป็นเวลา 60 นาที
4. นำตัวอย่างขึ้นโดยให้มีน้ำอยู่ในชิ้นงาน เพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะทดสอบ และทำการทดสอบโดยการยึดดึงด้วยความเร็วคงที่ เป็นระยะทาง 10 เซนติเมตร จนตัวอย่างขาดออกจากกัน
5. การคำนวณ
 - วัดค่า Toughness ได้จากพื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นกราฟ หน่วยเป็นกิโลกรัมเซนติเมตร
 - วัดค่า Tenacity ได้จากพื้นที่ภายใต้เส้นกราฟทางขวามือทางเส้นสัมผัส หน่วยเป็นกิโลกรัมเซนติเมตร

3.5 การทดสอบการออกแบบผิวทางไมโครซีล

3.5.1 การหาขนาดของเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง (Gradation)

ตามมาตรฐานการทดสอบ การทดลองที่ ทล.ท.205/2517 (รายละเอียดตามภาคผนวก ก)

3.5.2 การหาค่าส่วนประกอบของดินในวัสดุรวมรวม (Sand equivalent)

ตามมาตรฐานการทดสอบ การทดลองที่ ทล.ท.203/2515 (รายละเอียดตามภาคผนวก ก)

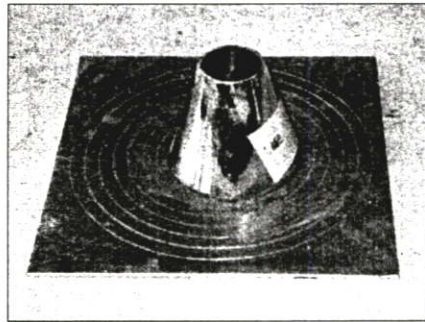
3.5.3 การทดสอบหาค่าความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles abrasion

ตามมาตรฐานการทดสอบ การทดลองที่ ทล.ท.202/2515 (รายละเอียดตามภาคผนวก ก)

3.5.4 การทดสอบหาค่าการไหลหรือความคงตัว (Consistency test)

1. ผสมส่วนผสมตามอัตราส่วนน้ำหนัก 400 กรัม
2. เทส่วนผสมลงในแบบเทซึ่งแบบเททำด้วยโลหะเส้นผ่านศูนย์กลางตอนบนสุด 38 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางตอนล่างสุด 89 มิลลิเมตร และมีแผ่นโลหะอยู่กึ่งกลางแผ่นจำนวน 7 วง วงในสุดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 89 มิลลิเมตร วงถัดมาวิธีมีเพิ่มขึ้นวงละ 10 มิลลิเมตร ลักษณะของแบบเทแสดงดังรูปที่ 3.6

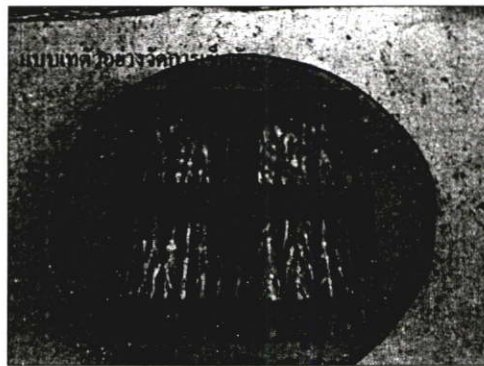
3. ยกแบบเทขึ้นและสังเกตการไหลตัวของส่วนผสม บันทึกค่าที่ส่วนผสมไหลออกไปถึงเส้นวง เป็นมิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 แบบเทเพื่อทดสอบหาค่า Consistency

3.5.5 การทดสอบหาเวลาเซตตัวและบ่มตัว (Initial set time and Cure time)

1. ผสมส่วนผสมตามอัตราส่วนที่ได้จากการทดสอบการไหล โดยใช้วัสดุรวมหนัก 400 กรัม
2. เทส่วนผสมลงในแบบเทและปาดให้เรียบสม่ำเสมอ โดยลักษณะของแบบเทแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบเทตัวอย่างสำหรับทดสอบหาเวลาเซตตัวและเวลาบ่มตัวของส่วนผสมไมโครซิล

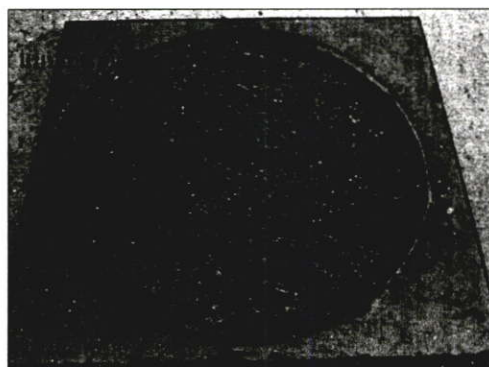
3. ยกแบบเทขึ้นและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
4. ทดสอบการเซตตัวโดยการใช้ที่ชุกกดทับทุกๆ 10-20 นาที หากไม่มีอิมัลชันติดขึ้นมาแสดงว่าเกิดการเซตตัว ให้บันทึกค่าเป็นเวลาเริ่มเซตตัวตั้งแต่ผสมจนกระทั่งเซตตัว
5. เตรียมตัวอย่างแบบเดียวกันและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างเซตตัว
6. นำตัวอย่างที่เซตตัวแล้ววางไว้ใต้หัวกดของเครื่อง Cohesion tester โดยหัวกดทำด้วย

ยางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร และเปิดความดันให้หัวกดตกลงบนตัวอย่างด้วยความดัน 193 กิโลปาสคาล (kPa)

7. บิดหัวกดโดยใช้ Hand torque tester อ่านค่าทอร์กสูงสุดที่วัดได้เป็นกิโลกรัม เซนติเมตร
8. วัดทอร์กทุกๆ 30 นาที โดยเปลี่ยนจุดกดบนตัวอย่างทุกครั้ง จนกระทั่งค่าทอร์กสูงสุดที่วัดได้มากกว่า 20 กิโลกรัมเซนติเมตร หรือหัวกดหมุนได้อย่างอิสระบนแผ่นตัวอย่างโดยไม่เกิดการเสียหาย
9. บันทึกเวลาตั้งแต่ผสมจนกระทั่งค่าทอร์กได้มากกว่า 20 กิโลกรัมเซนติเมตรหรือหัวกดหมุนได้อย่างอิสระบนแผ่นตัวอย่างโดยไม่เกิดการเสียหาย เป็นเวลาเซตตัวหรือ Cure time

3.5.6 การทดสอบหาค่าการสึกกร่อนที่สภาวะเปียกชื้น (Wet track abrasion test)

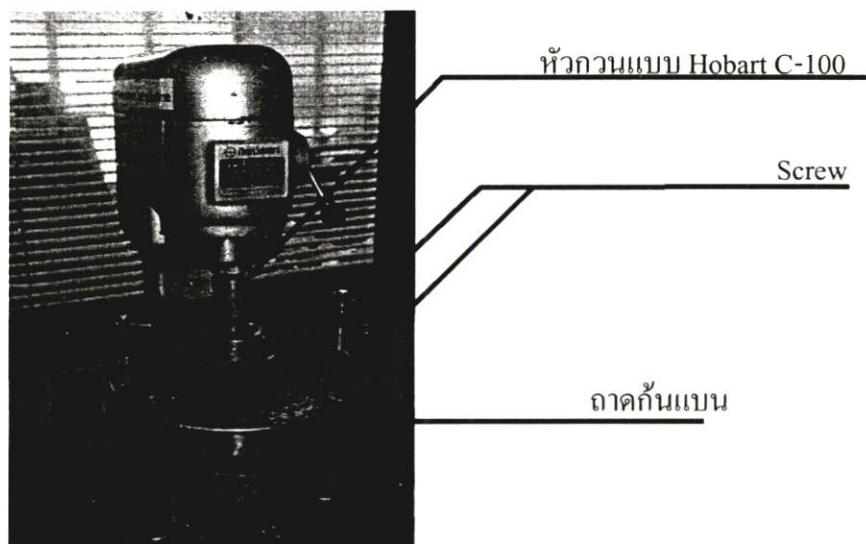
1. ผสมส่วนผสมตามอัตราส่วนที่ได้จากการทดสอบการไหล โดยใช้วัสดุรวมหนัก 800 กรัม
2. เทส่วนผสมลงในแบบเทและปาดให้เรียบสม่ำเสมอ ลักษณะของแบบเทแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบเทตัวอย่างสำหรับทดสอบ WTAT

3. ยกแบบเทขึ้นและปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างเริ่มเซตตัว
4. นำแผ่นตัวอย่างอบที่ 60°C อย่างน้อย 15 ชั่วโมง
5. นำแผ่นตัวอย่างที่อบแห้งแล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกเป็นน้ำหนักเริ่มต้น
6. นำแผ่นตัวอย่างแช่น้ำที่อ่างควบคุมอุณหภูมิ 25°C 1 ชั่วโมง
7. นำแผ่นตัวอย่างขึ้นและใส่แผ่นตัวอย่างในถาดกันเบน จันสกรูยึดตัวอย่างให้แน่นกับถาด
8. เติมน้ำที่อุณหภูมิ 25°C ลงในถาดให้ได้ความสูงอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร

9. ประกอบถาดเข้ากับเครื่อง Hobart C-100 ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.9
10. เปิดเครื่องเพื่อให้หัวขัดขัดตัวอย่างเป็นเวลา 5 นาที โดยใช้ความเร็วที่หมุนรอบแกนยึดหัวขัดประมาณ 144 รอบต่อนาที และหัวขัดเดินรอบแผ่นตัวอย่าง 61 รอบต่อนาที
11. เมื่อครบเวลาให้ถอดตัวอย่างออกจากถาด แล้วล้างให้สะอาด นำไปอบอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง
12. นำแผ่นตัวอย่างออกเตาอบ และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักสุดท้าย
13. น้ำหนักเริ่มต้นลบด้วยน้ำหนักสุดท้าย และคูณด้วย 32.9 จะเท่ากับน้ำหนักที่หายไปเป็นกรัมต่อตารางเมตร ค่าที่ได้คือค่าการสึกกร่อน



รูปที่ 3.9 เครื่อง Hobart C-100 สำหรับทดสอบ WTAT

3.5.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานการไหลตัวของอิมัลชันจากตัวอย่าง (Hubbard field test)

1. เครื่องมือทดสอบประกอบด้วย

- Specimen molds เป็นแบบทดสอบทรงกลม ทำด้วยเหล็กแข็งพิเศษ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 ± 0.001 นิ้ว (50.8 ± 0.03 mm) สูง 4.75 นิ้ว
- Bottom plungers ซึ่งเป็นเหล็ก Plunger ยาว 2 นิ้ว ในขณะที่ใช้งานจะมีช่องว่าง 0.002 นิ้ว ระหว่าง Plunger และแบบทดสอบตัวอย่าง และ Bottom plunger สำหรับแบบทดสอบตัวอย่าง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.998 ± 0.001 นิ้ว โดยลักษณะของแบบทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.10
- Temporary supports for specimen molds เป็นแท่งเหล็ก 2 แท่ง หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว และ ยาว 3 นิ้ว

- Top plunger เหล็ก Plunger ประกอบด้วยแผ่นเหล็กอัดกลม ซึ่งยึดติดแกนเพลลา แผ่นอัดจะต้องมีช่องห่าง 0.002 นิ้ว ระหว่าง Plunger และแบบทดสอบตัวอย่าง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.998 ± 0.001 นิ้ว และมีความหนาประมาณ $1/8$ นิ้ว แกนเพลลามี 4 ด้านที่โค้ง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.98 ± 0.001 นิ้ว

- Testing mold and ring โดยลักษณะของแบบทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.11

- Testing machine สามารถกดได้ 4500 กิโลกรัมแรง (10,000 ปอนด์แรง) ในอัตราสม่ำเสมอ 61 มิลลิเมตรต่อนาที (24 นิ้วต่อนาที) โดยลักษณะของเครื่องกดแสดงดังรูปที่ 3.12

- ภาชนะผสมตัวอย่างมีลักษณะก้นกลม เช่น กะละมังสแตนเลสสำหรับผสมตัวอย่างและช้อนค้ำยาวสำหรับคนผสมตัวอย่าง

- กระดาษกรอง เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร

2. การเตรียมตัวอย่าง

- อัตราส่วนผสมให้ใช้ตามอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองทำ Consistency

- เตรียมตัวอย่างวัสดุมวลรวม เอาเฉพาะส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ให้มีปริมาณเพียงพอที่จะแบ่งได้ 3 ส่วน โดยแต่ละส่วนมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 110 กรัม

- ชั่งมวลรวม 110 กรัม ในภาชนะผสมตัวอย่าง ใส่ซีเมนต์ ใช้ช้อนคนให้เข้ากัน เป็นเวลา 1 นาที ใส่น้ำซึ่งผสมสารเติมแต่งแล้วลงในภาชนะ และคนเป็นเวลา 1 นาที ใส่เอสฟัลต์อีมีลชันตามอัตราส่วน แล้วคนจนส่วนผสมมีความสม่ำเสมอ ให้ทำการกวนผสมต่อไปจนส่วนผสมแตกตัวจนหมด

- เอากระดาษกรองใส่ลงในแบบเตรียมตัวอย่าง บน Plunger ต่ำลง และ เทตัวอย่างลงในแบบใช้ช้อนยาวช่วยชะตัวอย่าง จนตัวอย่างเนบกับแบบใส่กระดาษกรองปิดด้านบนของตัวอย่าง และติดตั้งด้วย Plunger ต่ำบน

- วางแบบเตรียมตัวอย่างบน Support ชั่วคราว เพื่อให้กันตัวอย่าง สูง 1 นิ้ว ใช้แรงดันเบื้องต้นที่ 500 ปอนด์ แล้วคลายแรงเบื้องต้นลง เพื่อเอา Support ชั่วคราวออก แล้วเพิ่มแรงดันจนกระทั่งได้ความดัน 3000 psi (9425 lbs) รักษาระดับความดันนี้ 2 นาที

3. วิธีทดลอง

- นำตัวอย่างมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 ชั่วโมง

- นำตัวอย่างไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ใส่ตัวอย่างทดลองลงในแบบทดสอบและวางแหวน ติดตั้ง Plunger ต่ำบนลงบนตัวอย่าง

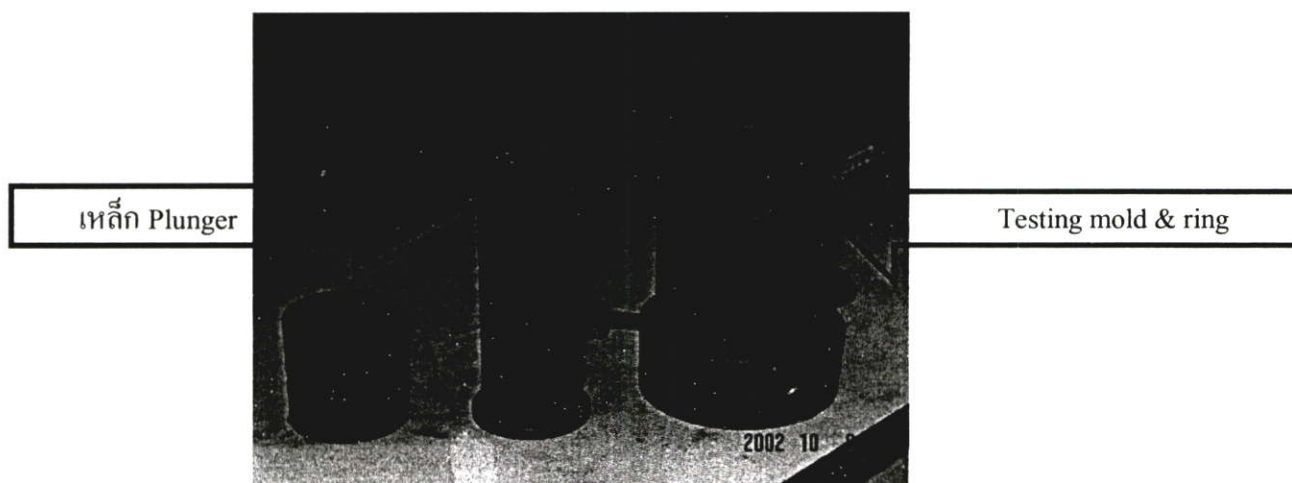
- นำเข้าเครื่องทดสอบเพื่อทดสอบ โดยใช้แรงกดที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 61

มิลลิเมตรต่อนาที (2.4 นิ้วต่อนาที) ตัวอย่างจะถูกดันผ่านแบบทดสอบและวงแหวน โดยมีแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าแรงสูงสุด เมื่อตัวอย่างเกิดการเสียหาย ค่าแรงจะลดลง ค่าแรงที่เกิดขึ้นนี้เป็นค่าต้านทานการไหลของตัวอย่าง

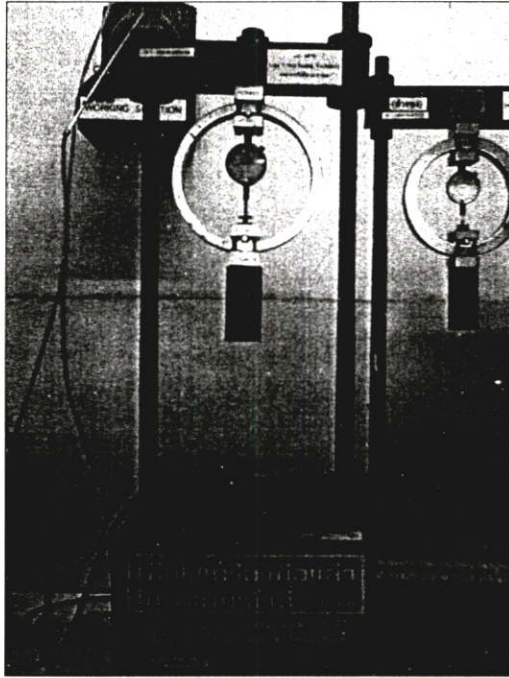
- ให้รายงานค่าน้ำหนักที่สูงสุดที่อ่านได้เป็นหน่วยแรงกิโลกรัม (หรือนิวตัน)



รูปที่ 3.10 แบบสำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบ Hubbard-field test



รูปที่ 3.11 Testing mold and ring



รูปที่ 3.12 เครื่องกดตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบ Hubbard-field test

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยเรื่องนี้ได้มีการทดสอบในส่วนของภาคสนาม คือการนำไปใช้งานจริง ดังนั้น ผลการทดสอบจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบเบื้องต้น ในส่วนของยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งจะมีการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดสอบมาทำการ ศึกษาในส่วนที่สอง ซึ่งส่วนที่สองกล่าวถึงการออกแบบผิวถนนแบบไมโครซีล (Microseal) ซึ่ง เลือกใช้สูตรที่ได้จากการศึกษาในส่วนของยางมะตอยอิมัลชันจากตอนที่ 1 มาออกแบบอัตรา ส่วนผสม (Mixed design) เพื่อให้ยางมะตอยอิมัลชันที่ผลิตขึ้นสามารถใช้งานฉาบผิวแบบไมโครซีล ได้จริง

การทดสอบยางมะตอยอิมัลชัน ได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการ ทดสอบสมบัติของอิมัลชัน ซึ่งแบ่งออกเป็นการทดสอบการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมง (Sedimentation 24 hours) และ 7 วัน (Settlement 7 days) การทดสอบขนาดอนุภาคโดยวัดเป็นปริมาณของอนุภาคที่ ค้างบนแร่งเบอร์ 20 (850 ไมครอน, Sieve test) การทดสอบความหนืดแบบเซโบลต์ฟูโรล (Saybolt furol viscosity) สำหรับส่วนที่สองเป็นการทดสอบกากของอิมัลชันที่ได้จากการระเหย (Residue by evaporation) โดยมีการทดสอบคือ การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening point) การทดสอบค่าการยืด ดึง (Ductility) การทดสอบค่าเพนิเทรชัน (Penetration) และการทดสอบค่าการคืนตัวแบบให้แรงดึง (Elastic recovery by ductility) ค่าการทดสอบที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการทดสอบ ของกรมทางหลวงคือ ทล.ก.405/2538 และเมื่อได้สูตรยางมะตอยอิมัลชันที่เหมาะสม จะทำการ ทดสอบโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม คือ มอก. 2157-2547 และจากนั้นเป็นการทดสอบการออกแบบผิวทาง (Mixed design) แบบไมโครซีลชนิดที่ สอง (Microseal type II) ซึ่งเป็นการฉาบพื้นผิวทางบนพื้นหน้าของผิวถนนเพื่อป้องกันการซึมผ่าน ของน้ำที่จะเข้าไปทำลายพื้นผิวทางเดิม ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนการออกแบบผิวทางโดยผ่านตาม มาตรฐานของไมโครซีลชนิดที่สอง จึงจะสามารถนำไปใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม สำหรับการ ออกแบบผิวทางแบบไมโครซีล ได้เลือกศึกษาผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่สองเนื่องจากการ ฉาบพื้นผิวทางเดิมที่มีสภาพดีและป้องกันผิวทางรวมทั้งยึดอายุผิวทางให้ยาวนานขึ้น ซึ่งการจัด ชนิดของไมโครซีลขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุผสมรวมที่ใช้และลักษณะการนำไปใช้งาน โดยการ ฉาบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่สองเป็นการฉาบผิวทางที่มีการใช้มากที่สุด จึงได้เลือกเป็นไมโครซีล ชนิดที่สองในการออกแบบผิวทาง โดยการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่สอง มีการ ทดสอบคือ การทดสอบวัสดุผสมรวมโดยแบ่งออกเป็นการทดสอบการหาค่าความสึกหรอของหิน หยาบ (หินขนาด 3/8 นิ้ว) การหาค่าส่วนประกอบของดินในวัสดุผสมรวม (Sand equivalent) และ

การหาขนาดของเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (Gradation) สำหรับการทดสอบส่วนผสมไมโครซิลแบ่งออกเป็น การทดสอบค่าการไหลหรือความคงตัว (Consistency test) การทดสอบเวลาเซตตัวและบ่มตัว (Initial set time and Cure time) การทดสอบหาค่าการสึกกร่อนที่สภาวะเปียกชื้น (Wet track abrasion test) และการทดสอบหาค่าความต้านทานการไหลตัวของยางมะตอยอิมัลชันจากตัวอย่าง (Hubbard field test)

4.1 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบส่วนของยางมะตอยอิมัลชัน

4.1.1 การเลือกสูตรยางมะตอยอิมัลชันเบื้องต้น

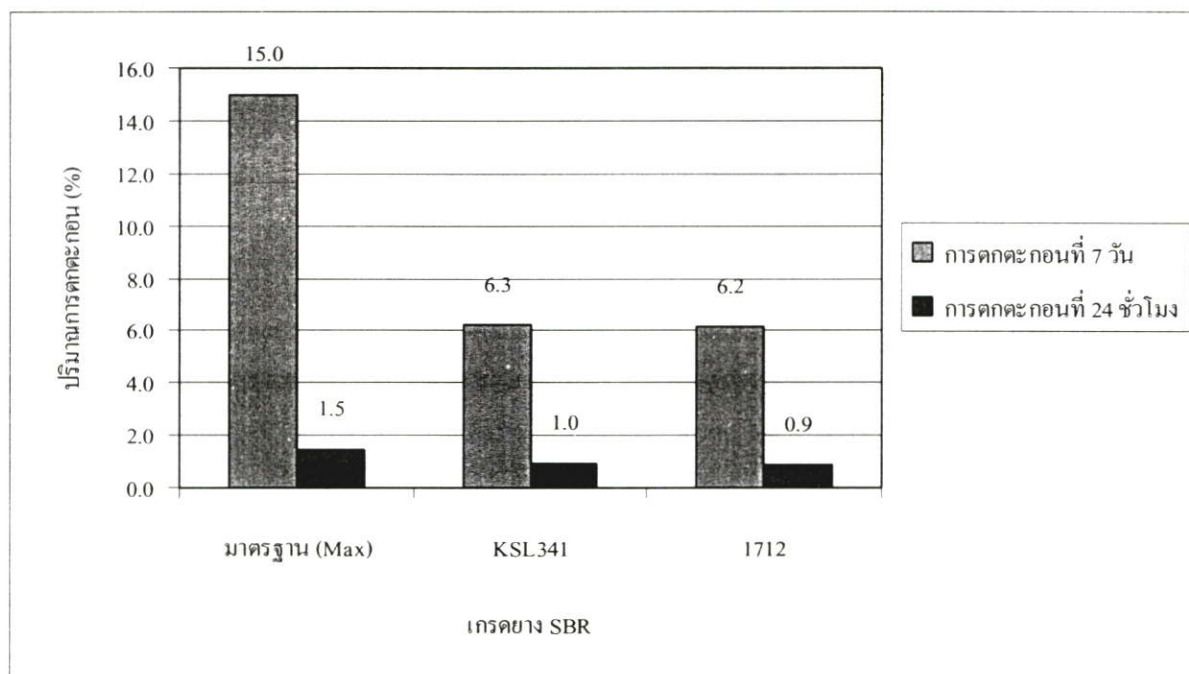
1. การเลือกเกรดของน้ำยางเอสบีอาร์

การเลือกสูตรยางมะตอยอิมัลชันเบื้องต้นได้ศึกษาถึงผลของเกรดน้ำยางเอสบีอาร์ โดยเกรดน้ำยางเอสบีอาร์ที่ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 เกรดการค้า คือ เกรด 1712 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางแห้ง (% DRC) ที่ 23.05% และมีความหนืดเซโบว์ฟูรอลเท่ากับ 9 วินาที และเกรดยางเคเอสแอล341 (KSL341) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางแห้งที่ 60% และมีความหนืดเซโบว์ฟูรอลเท่ากับ 45 วินาที โดยอัตราส่วนผสมเบื้องต้นได้คงปริมาณของส่วนผสมไว้ดังตารางที่ 3.2

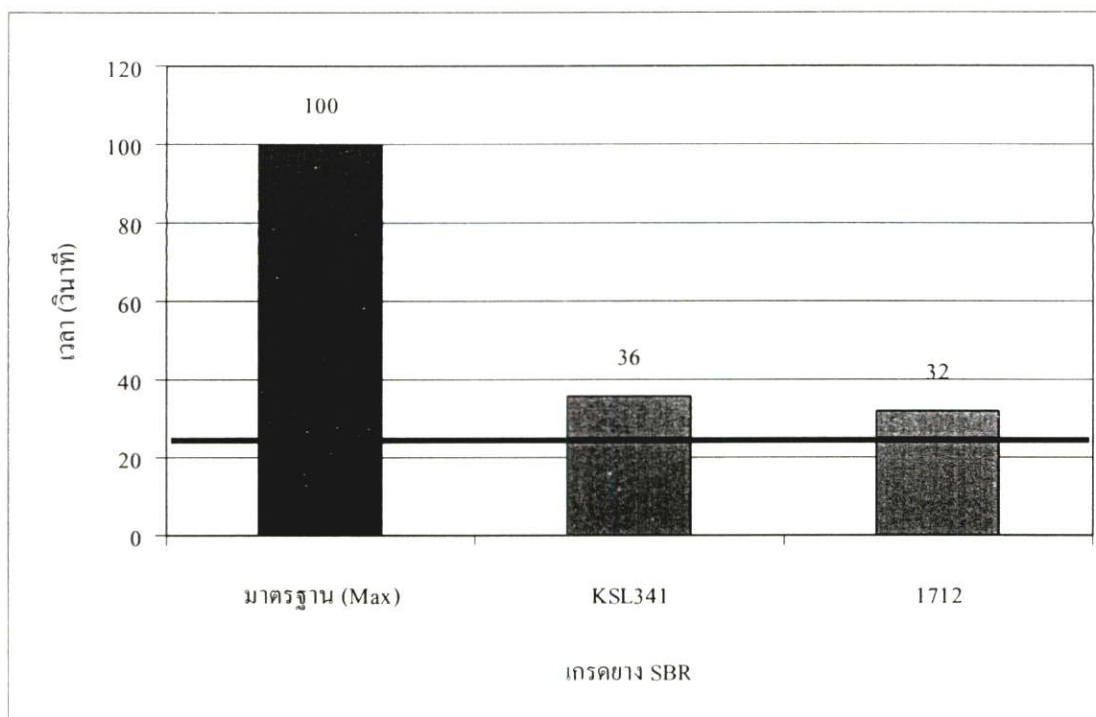
การทดสอบอิมัลชัน

เนื่องจากยางมะตอยอิมัลชันที่ได้จากเครื่องคอลลอยด์มิล (Colloid mill) ส่วนผสมที่ได้จากเครื่องต้องมีการทดสอบปริมาณที่ค้างบนแร่ เพื่อให้ทราบถึงขนาดอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในส่วนผสมว่ามีขนาดมากกว่า 20 ไมครอนหรือไม่ โดยผลการทดสอบที่ได้ต้องมีปริมาณที่ค้างบนแร่น้อยกว่า 0.1% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดของกรมทางหลวง จากนั้นต้องมีการทดสอบการตกตะกอนของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ โดยปริมาณการตกตะกอนเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการจัดเก็บยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งกรณีที่ยางมะตอยอิมัลชันมีปริมาณการตกตะกอนสูง แสดงว่าเสถียรภาพในการจัดเก็บได้ระยะสั้น ดังนั้นการทดสอบการตกตะกอนของยางมะตอยอิมัลชันจึงเป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่า ยางมะตอยอิมัลชันที่ได้สามารถคงอยู่ในรูปของอิมัลชันจนกระทั่งนำไปใช้งานได้นานเพียงใด จากผลการทดสอบสมบัติของอิมัลชันโดยการศึกษาเกรดยางเอสบีอาร์แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2 ซึ่งเส้นลากตามแนวขวางของกราฟแสดงค่าการทดสอบที่ต่ำสุด (Minimum, Min) ของมาตรฐานการทดสอบ และกราฟแท่งแรกแสดงค่าการทดสอบสูงสุด (Maximum) หรือต่ำสุดของมาตรฐานกำหนด สำหรับผลการทดสอบปริมาณการตกตะกอนของเกรดยาง KSL341 ที่ 24 ชั่วโมง และ 7 วัน เท่ากับ 1.0% และ 6.3% ตามลำดับ ปริมาณการตกตะกอนของเกรดยาง 1712 ที่ 24 ชั่วโมง และ 7 วัน เท่ากับ 0.9% และ 6.2% ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ยางเอสบีอาร์เกรด 1712 มีความเสถียรภาพมากกว่าเกรดยาง KSL341 ที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน แต่ค่าการทดสอบที่ได้ไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากการปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในระบบมีปริมาณมากพอในการป้องกันการรวมตัวและตกตะกอนของอนุภาคยางในระบบ การทดสอบปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนแร่พบว่า

ผลการทดสอบที่ได้ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากอิมัลชันที่ได้จากเครื่องคอลลอยด์มิลมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าขนาด 20 ไมโครเมตร ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการทดสอบที่ได้กรณีที่ใช้เกรดยาง 1712 เท่ากับ 0.02% และกรณีที่ใช้เกรดยาง KSL341 เท่ากับ 0.03% โดยมาตรฐานอยู่ที่ไม่เกิน 0.1% การทดสอบค่าความหนืดพบว่า อิมัลชันที่ใช้ยางเอสปีอาร์เกรด 1712 ให้ค่าการทดสอบเท่ากับ 32 วินาที และอิมัลชันที่ใช้ยางเอสปีอาร์เกรด KSL341 ให้ค่าการทดสอบเท่ากับ 36 วินาที ซึ่งอิมัลชันที่ใช้เกรดยาง 1712 ให้ค่าความหนืดที่น้อยกว่าเนื่องจากยางเอสปีอาร์เกรด 1712 มีความหนืดของน้ำยางต่ำกว่าและขนาดของไมเซลล์ที่เล็กกว่า ดังนั้นจึงเกิดการกระจายตัวได้ดีกว่าในส่วนผสมเมื่อผ่านการผสมด้วยเครื่องคอลลอยด์มิลล์



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับเกรดยาง SBR

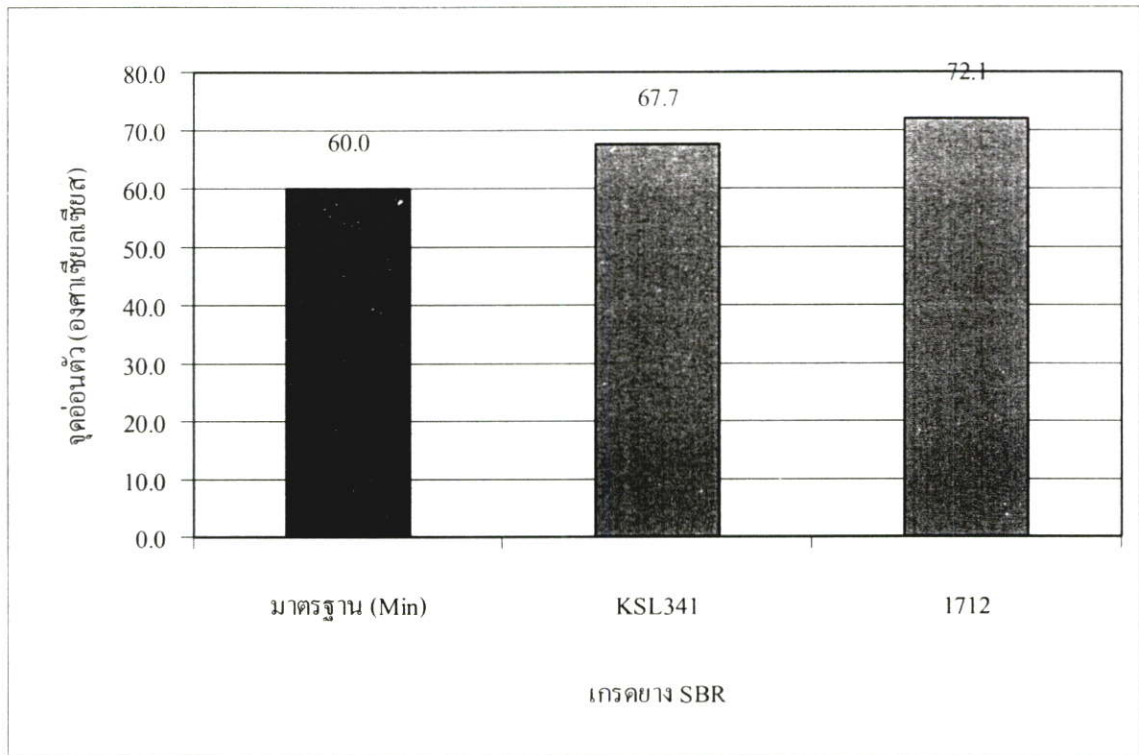


รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอลโดยการปรับเกรดยาง SBR

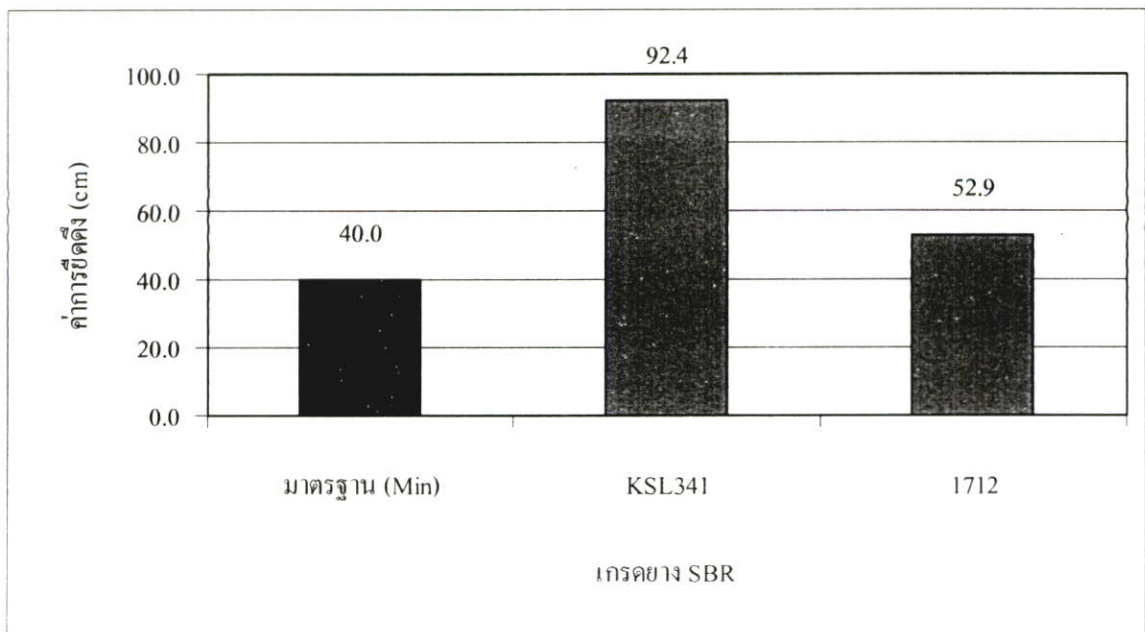
การทดสอบกากที่ได้จากการระเหย

ผลการทดสอบกากที่ได้จากการระเหยแสดงดังรูปที่ 4.3-4.6 พบว่า ค่าจุดอ่อนตัวที่ได้จากการใช้เกรดยาง 1712 และ KSL341 เท่ากับ 72.1°C และ 67.7°C ตามลำดับ และค่าการคืนตัวที่ได้เท่ากับ 52% และ 47% ตามลำดับ และค่าเพนิเทรชันเท่ากับ 64 และ 65 ตามลำดับ แสดงว่าการใช้เกรดยาง 1712 ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า เนื่องจากการใช้น้ำยางเอสปีอาร์เกรด 1712 ให้ลักษณะการกระจายตัวที่ดีกว่าในอิมัลชัน ทำให้กากที่ได้จากการระเหยมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า จึงมีการกระจายตัวของอนุภาคยางซึ่งเป็นส่วนเสริมแรงได้ดี ดังนั้นค่าจุดอ่อนตัวและค่าการคืนตัวจึงสูงกว่า และค่าเพนิเทรชันจึงต่ำกว่า ซึ่งแสดงว่ากากที่ได้จากการระเหยมีความแข็งมากขึ้น สำหรับค่าการยึดดึงพบว่า การใช้ยางเกรด KSL341 ให้ค่าการยึดดึงเท่ากับ 92.4 cm ซึ่งสูงมาก เนื่องจากกากที่ได้จากการระเหยมีอนุภาคยางกระจายได้ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นส่วนที่ยึดดึงจึงเกิดจากส่วนของยางมะตอย ซึ่งยางมะตอยมีสมบัติที่สามารถถูกยึดดึงได้สูง

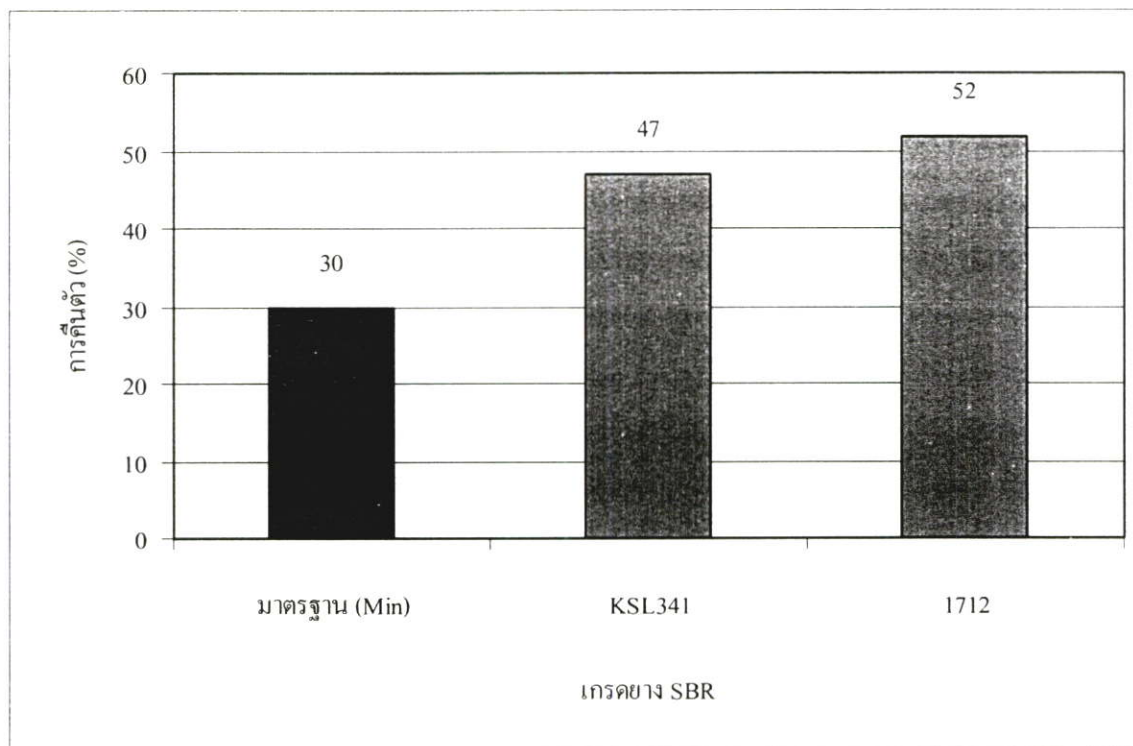
จากการศึกษาเกรดยางเอสปีอาร์ที่เหมาะสม คือ เกรดยาง 1712 ดังนั้นสูตรยางมะตอยอิมัลชันเบื้องต้นที่ทำการศึกษาต่อไปคือการเลือกอัตราส่วนระหว่างยางเอสปีอาร์ต่อยางธรรมชาติ โดยใช้เกรดยาง 1712 ทำการศึกษาสูตรเบื้องต้นต่อไป



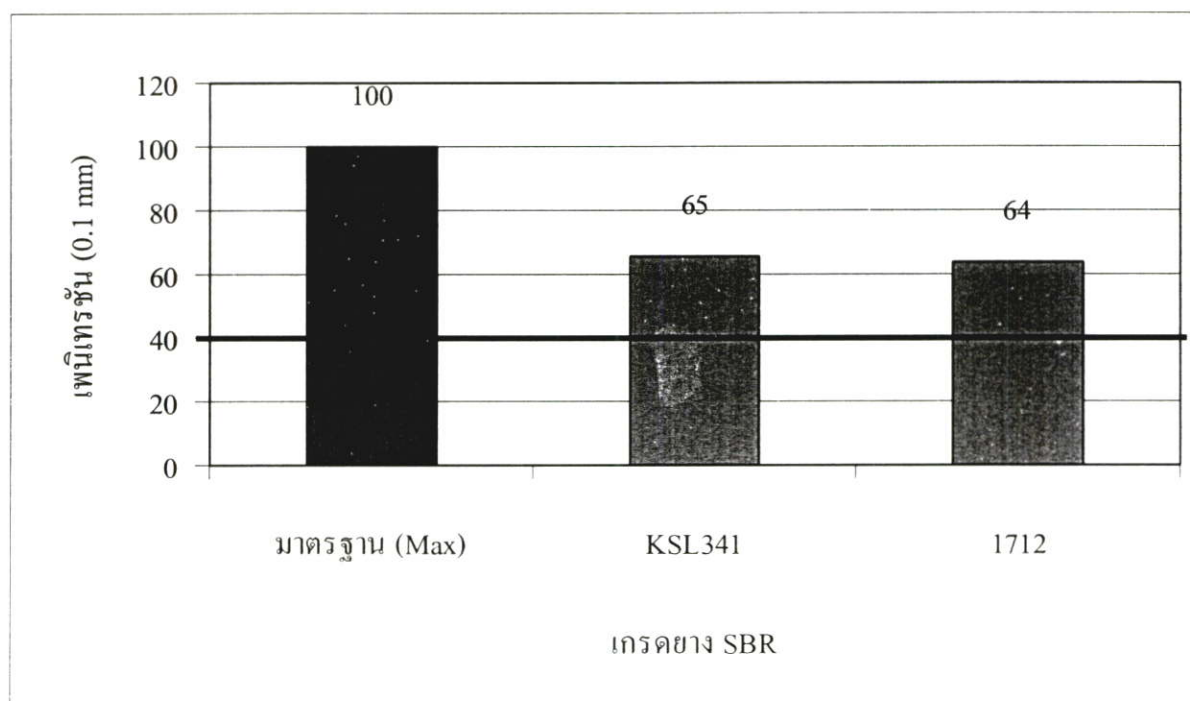
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัว โดยการปรับเกรดยาง SBR



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการซึ่ดคัง โดยการปรับเกรดยาง SBR



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการกั้นตัว โดยการปรับเกรดยาง SBR

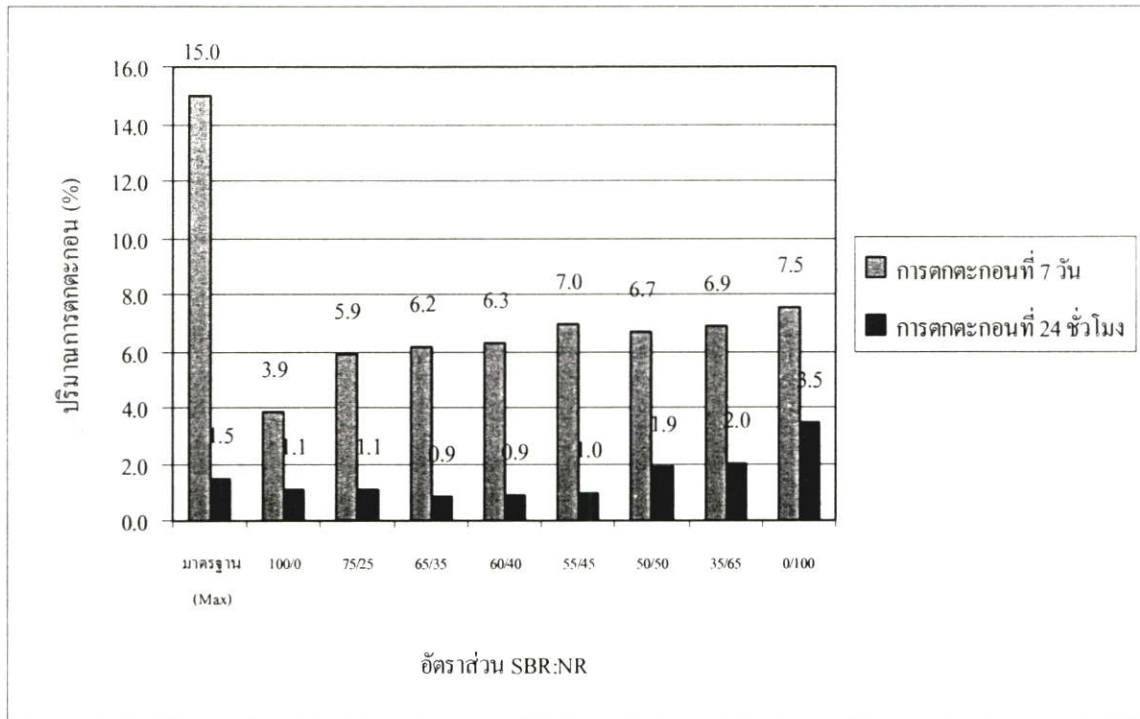


รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบเฟนเทรซัน โดยการปรับเกรดยาง SBR

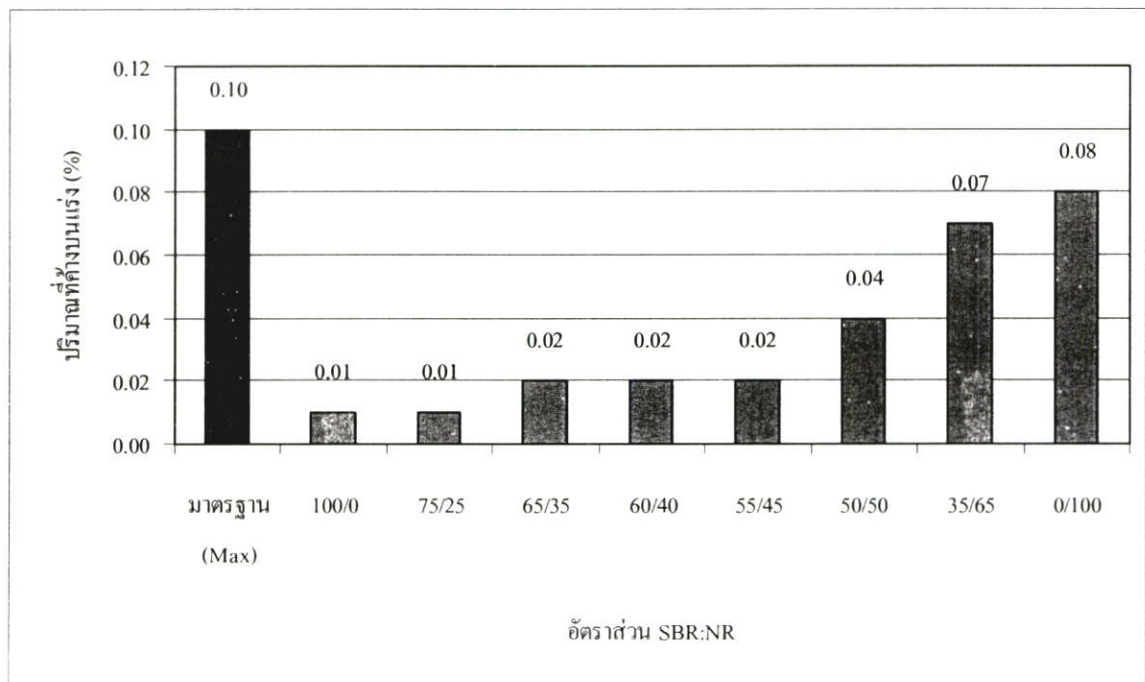
2. การเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม

การทดสอบสมบัติของอิมัลชัน

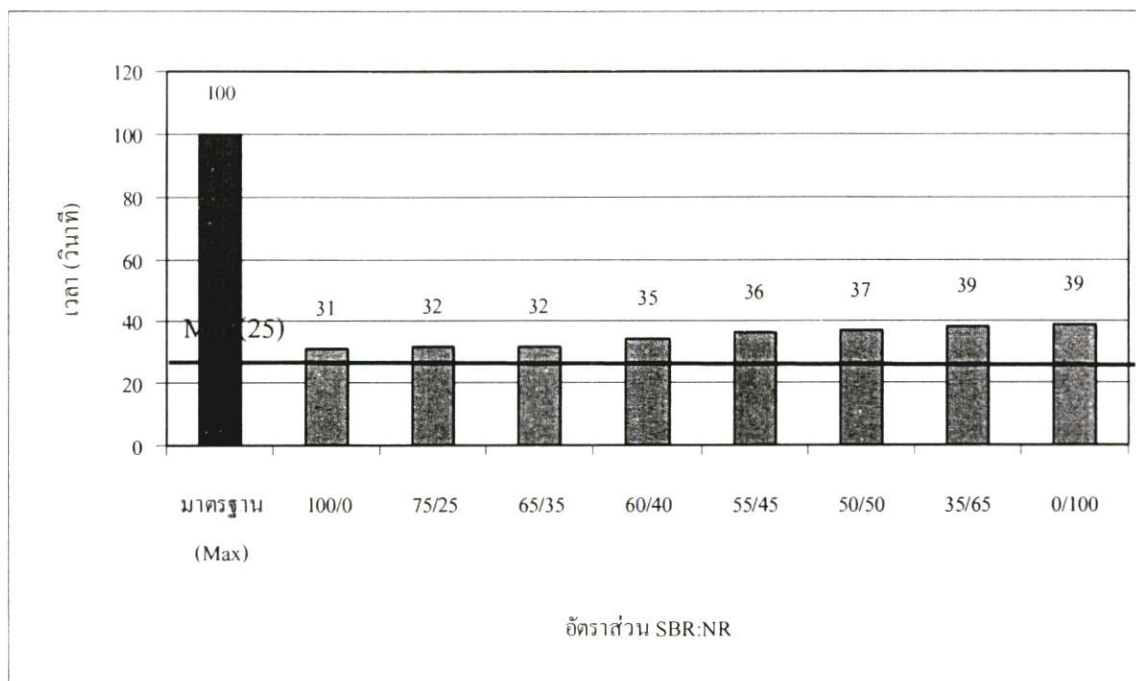
จากการศึกษาผลของเกรดยางเอสปีอาร์เบื้องต้นพบว่า เกรดยางที่เหมาะสมคือ เกรดยาง 1712 ดังนั้น การศึกษาสูตรเบื้องต้นต่อไปคือการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยปรับอัตราส่วนของยางเอสปีอาร์ต่อยางธรรมชาติ (SBR:NR ratio) 8 อัตราส่วนคือ 100:0, 75:25, 65:35, 60:40, 55:45, 50:50, 35:65 และ 0:100 โดยผลการทดสอบสมบัติของอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 4.7-4.9 จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของการตกตะกอนของอิมัลชันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 75:25 ปริมาณการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน เท่ากับ 1.1% และ 5.9% ตามลำดับ และที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 35:65 ปริมาณการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน เท่ากับ 2.0% และ 6.9% ตามลำดับ ซึ่งพบว่า เมื่ออัตราส่วนยางธรรมชาติสูงขึ้น คือปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้น การตกตะกอนทั้ง 24 ชั่วโมง และ 7 วัน สูงขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ขนาดของอนุภาคยางธรรมชาติมีขนาดใหญ่ในส่วนผสมอิมัลชันและเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้เกิดการแยกวัฏภาคได้ง่าย ปริมาณการตกตะกอนจึงสูงกว่าเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้น ในระบบอิมัลชันที่มีปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์เท่ากัน โดยอิมัลซิไฟเออร์ไม่เพียงพอต่อการกระจายวัฏภาคของยางธรรมชาติให้กระจายตัวและคงเป็นอนุภาคในอิมัลชันได้ และจากรูปที่ 4.8 แสดงปริมาณของอนุภาคที่ค้ำบนแรง ซึ่งส่งผลในแนวเดียวกันคือ ที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 75:25 ปริมาณของอนุภาคที่ค้ำบนแรงเท่ากับ 0.01% และที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 35:65 ปริมาณของอนุภาคที่ค้ำบนแรงเท่ากับ 0.07% แสดงว่าเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติมากขึ้น ปริมาณของอนุภาคที่ค้ำบนแรงสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ใหญ่และน้ำหนักโมเลกุลที่สูงของยางธรรมชาติ ส่งผลต่อการแตกตัวกระจายอยู่ในระบบอิมัลชันได้น้อยลงเมื่อมีปริมาณสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีอนุภาคที่ใหญ่ยังคงอยู่ จึงมีการค้ำอยู่บนแรงในปริมาณที่สูงกว่า ส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น โดยผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลูฟูรอล พบว่าที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 75:25 มีค่าความหนืดเท่ากับ 32 วินาที และที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 35:65 มีค่าความหนืดเท่ากับ 39 วินาที โดยความหนืดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่สูงขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบปริมาณอนุภาคที่ค้างบนแร่ (%) โดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR

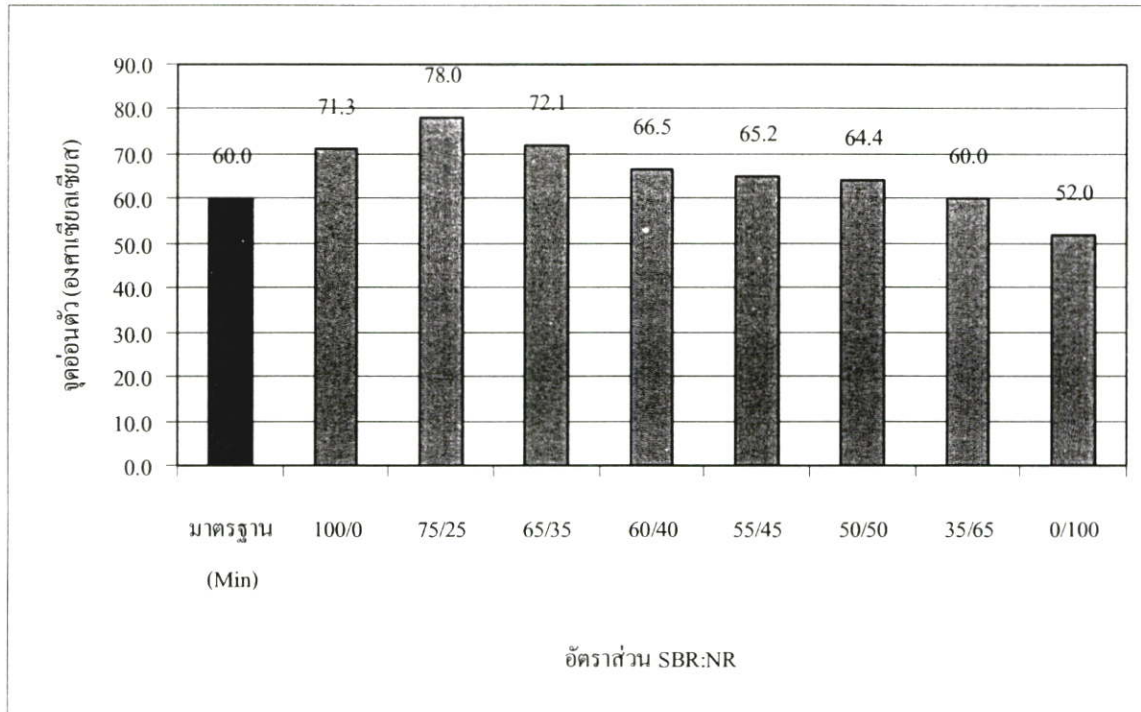


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลิวฟูรอลโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR

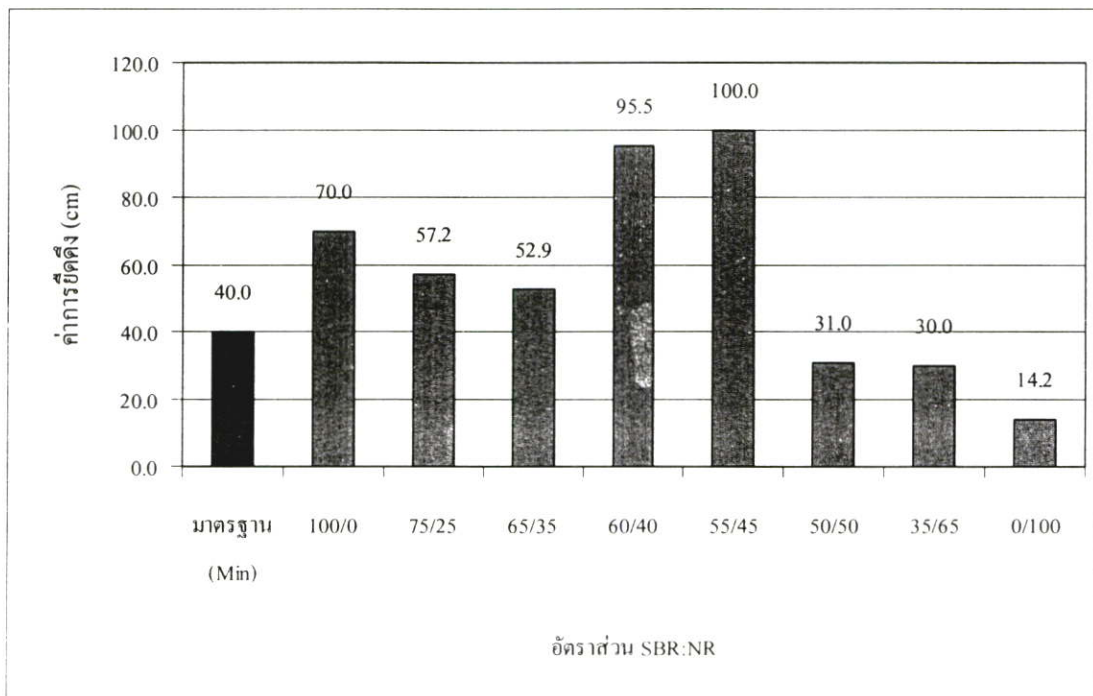
การทดสอบกากที่ได้จากการระเหย

สำหรับการทดสอบกากของอิมัลชันที่ได้จากการระเหย ค่าการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.10 - 4.13 สำหรับค่าจุดอ่อนตัวพบว่า ที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 75:25 มีค่าจุดอ่อนตัวเท่ากับ 78.0°C และที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 35:65 มีค่าจุดอ่อนตัวเท่ากับ 60.0°C ซึ่งพบว่า เมื่อปริมาณยางธรรมชาติสูงขึ้น ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ใหญ่และน้ำหนักโมเลกุลที่สูงของยางธรรมชาติ ดังนั้นกากที่ได้จึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันต่ำ ค่าจุดอ่อนตัวที่ได้จึงต่ำลง โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.10 สำหรับค่าการยึดติงและค่าการคืนตัว มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนที่มีปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้น ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ แต่ค่าเพนิเทรชันมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่ากากที่ได้จากการระเหยมีความแข็งลดลง ดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และขนาดของไมเซลล์ที่ใหญ่ ดังนั้นการกระจายตัวเป็นอนุภาคในระบบจึงมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่า เกิดการกระจายตัวยากกว่า และเกิดการแยกวัฏภาคได้ง่าย มีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง ดังนั้นเมื่อมีอัตราส่วนของยางธรรมชาติมากขึ้นโดยปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์เท่าเดิม ค่าการทดสอบที่ได้จึงต่ำลงเพราะส่วนเสริมแรงไม่สม่ำเสมอจากการกระจายตัว ความแข็งของกากที่ได้จากการระเหยโดยการทดสอบค่าเพนิเทรชันจึงลดลง โดยที่อัตราส่วน SBR:NR เท่ากับ 60:40 และ 55:45 ผลการทดสอบความสามารถในการถูกยึดติงได้เท่ากับ 95.5 cm และ 100.0 cm ตามลำดับ ซึ่ง

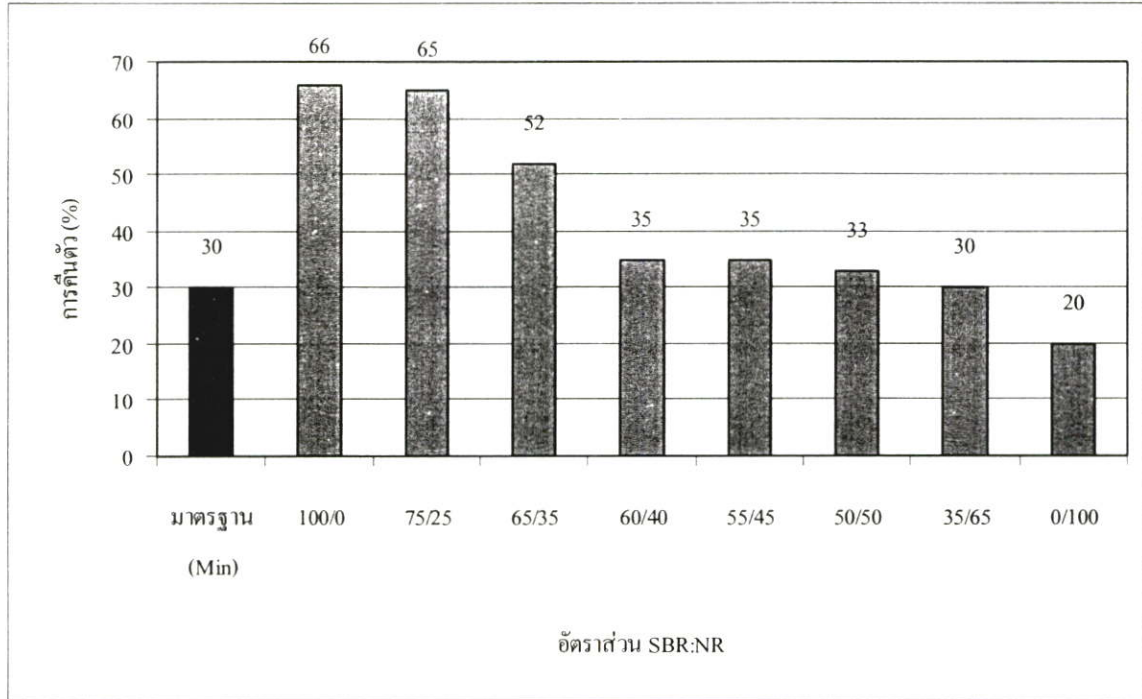
กรณีที่ค่าการยึดดึงได้สูงมากเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนที่รับแรงจากแรงดึงจึงเป็นส่วน
ของยางมะตอยที่สามารถถูกยึดดึงได้สูง



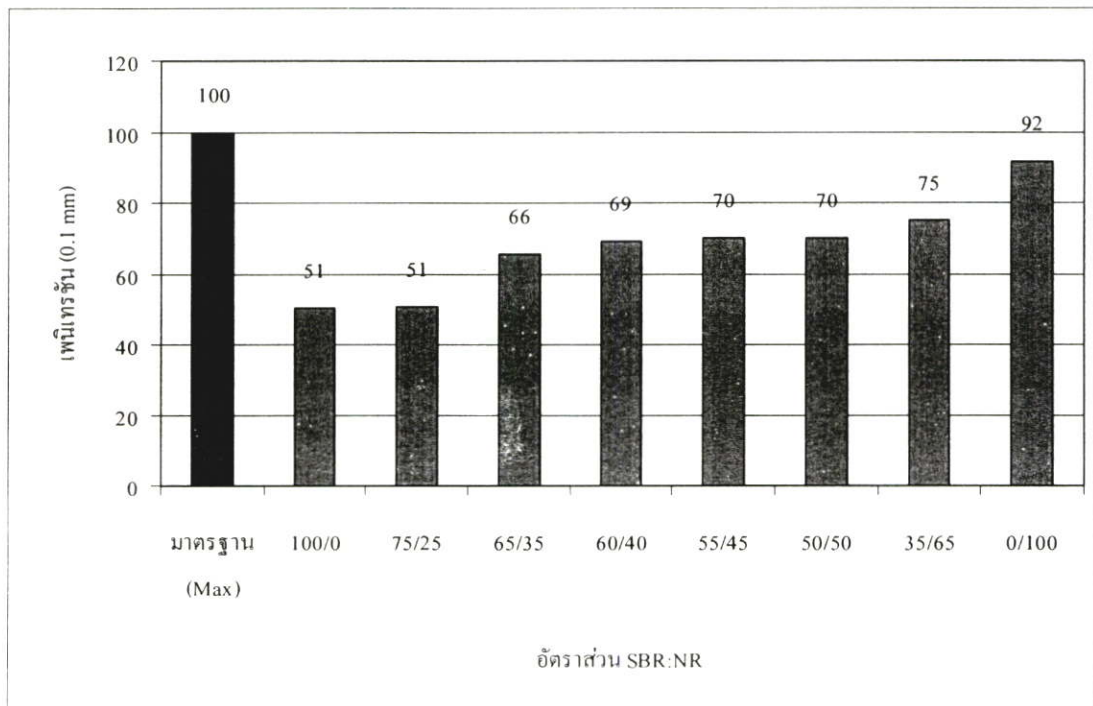
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการยึดดึงโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบการคั่นตัวโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบเพนเทรชันโดยการปรับอัตราส่วน SBR:NR

จากผลการทดสอบเบื้องต้น ได้ทำการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนของยาง เอสปีอาร์ต่อยางธรรมชาติที่ 65:35 เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมและผ่านตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยที่อัตราส่วนนี้ให้ความเหมาะสมทั้งค่าการทดสอบและความเหมาะสมเรื่องของการเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศตามวัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัยนี้

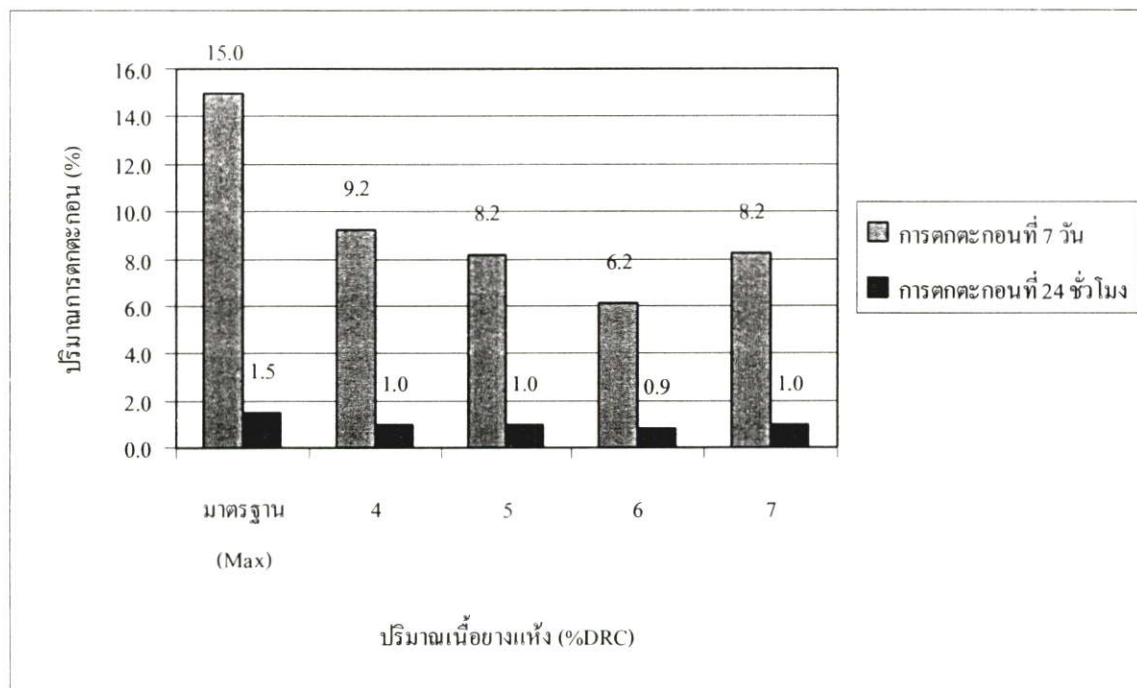
สำหรับการเลือกสูตรเบื้องต้นทำให้สามารถเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ การใช้อัตราส่วนระหว่างยางเอสปีอาร์ต่อยางธรรมชาติ คือ 65:35 และเลือกใช้น้ำยางเอสปีอาร์เกรด 1712 ซึ่งให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมกว่าและผ่านตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

4.1.2 การเลือกปริมาณเนื้อยางแห้ง

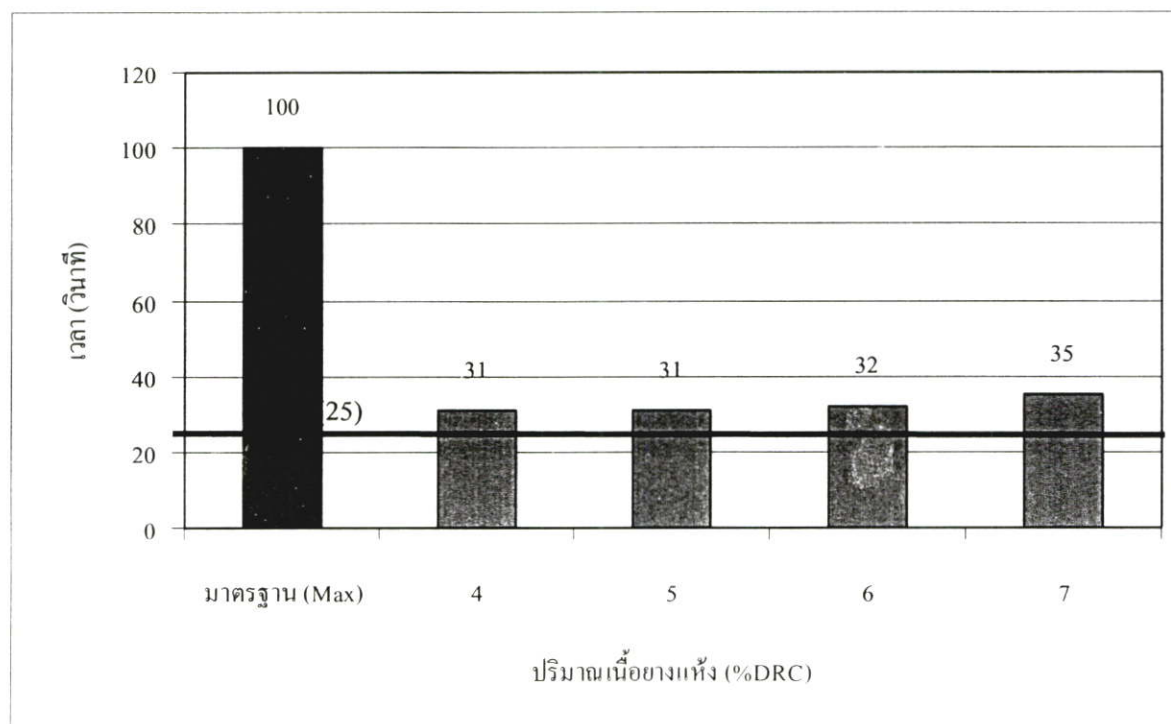
จากการทดสอบเพื่อเลือกสูตรเบื้องต้นเพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างน้ำยางเอสปีอาร์และน้ำยางธรรมชาติและเกรดของน้ำยางเอสปีอาร์ที่เหมาะสม ได้กำหนดปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ไว้ที่ 6% ในการทดสอบต่อไปเป็นการทดสอบผลของปริมาณเนื้อยางแห้ง โดยปรับปริมาณเนื้อยางแห้งที่ 4%, 5%, 6% และ 7% โดยคงปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ไว้เท่าเดิม

การทดสอบสมบัติของอิมัลชัน

ผลการทดสอบสมบัติของอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 4.14-4.15 ปริมาณการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมง และ 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยปริมาณเนื้อยางแห้งเท่ากับ 4%, 5%, 6% และ 7% ปริมาณการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 1.0%, 1.0%, 0.9% และ 1.0% ตามลำดับ และปริมาณการตกตะกอนที่ 7 วันเท่ากับ 9.2%, 8.2%, 6.2% และ 8.2% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่ปริมาณเนื้อยางแห้ง 4%, 5% และ 6% ปริมาณการตกตะกอนน้อยลงเมื่อปริมาณเนื้อยางแห้งมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณเนื้อยางแห้งมากขึ้น ทำให้ส่วนของเนื้อยางที่ถูกตีด้วยเครื่องคอลลอยด์มีโอกาสดูถูกตีมากขึ้น ขนาดของอนุภาคยางจึงมีขนาดเล็กลง ดังนั้นการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน จึงต่ำกว่า กรณีที่เนื้อยางแห้งเท่ากับ 7% พบว่าปริมาณการตกตะกอนสูงขึ้น เนื่องจากในระบบอิมัลชันที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งมากแต่ปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์เท่าเดิม ปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์และยางมะตอยจึงไม่สามารถกระจายอนุภาคของยางทั้งสามชนิดให้เข้ากันได้ไม่ดีพอ จึงเกิดการแยกอนุภาคขึ้นระหว่างยางทั้งสามชนิด ซึ่งสังเกตได้จากกรณีที่ในยางมะตอยอิมัลชันมีส่วนของยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ลอยหน้าเป็นชั้นสีขาวขึ้นมาด้านบนเนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ และยางมะตอยที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำเกิดการรวมตัวและตกตะกอนขึ้น สำหรับการทดสอบขนาดของอนุภาคโดยวัดเป็นปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนแรง พบว่าขนาดของอนุภาคที่ได้จากเครื่องคอลลอยด์มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอน ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการทดสอบค่าความหนืดที่ได้พบว่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณเนื้อยางแห้งมากขึ้นเนื่องจากมีส่วนที่ขัดขวางการไหลมากขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.15



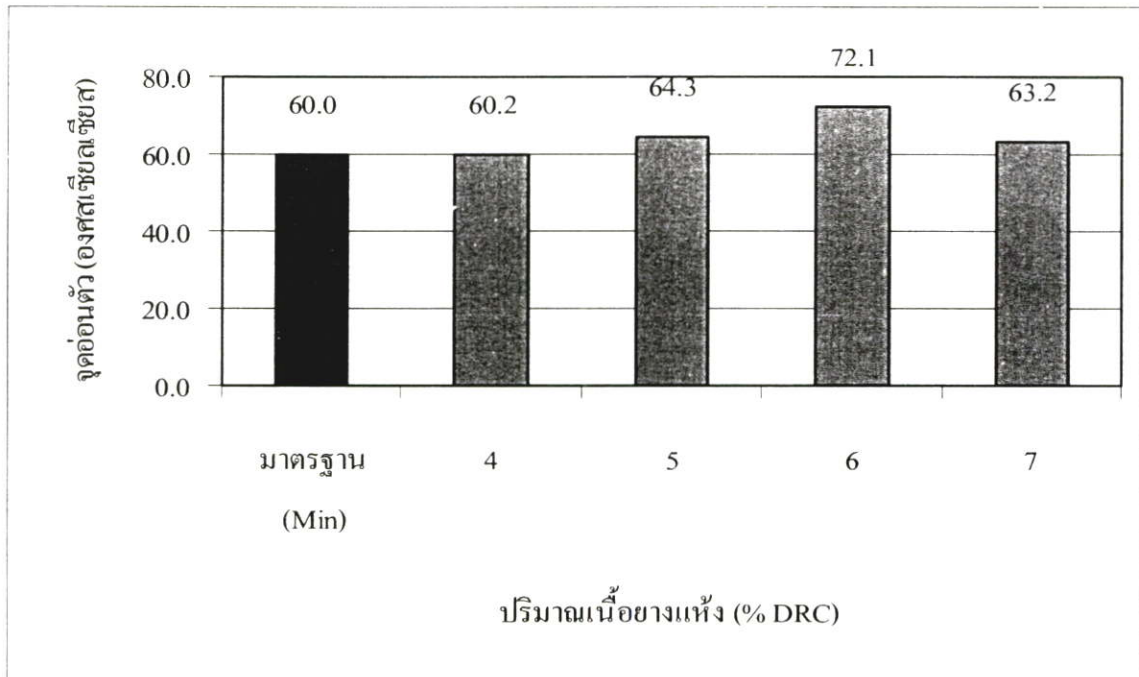
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับปริมาณเชื้อยีส



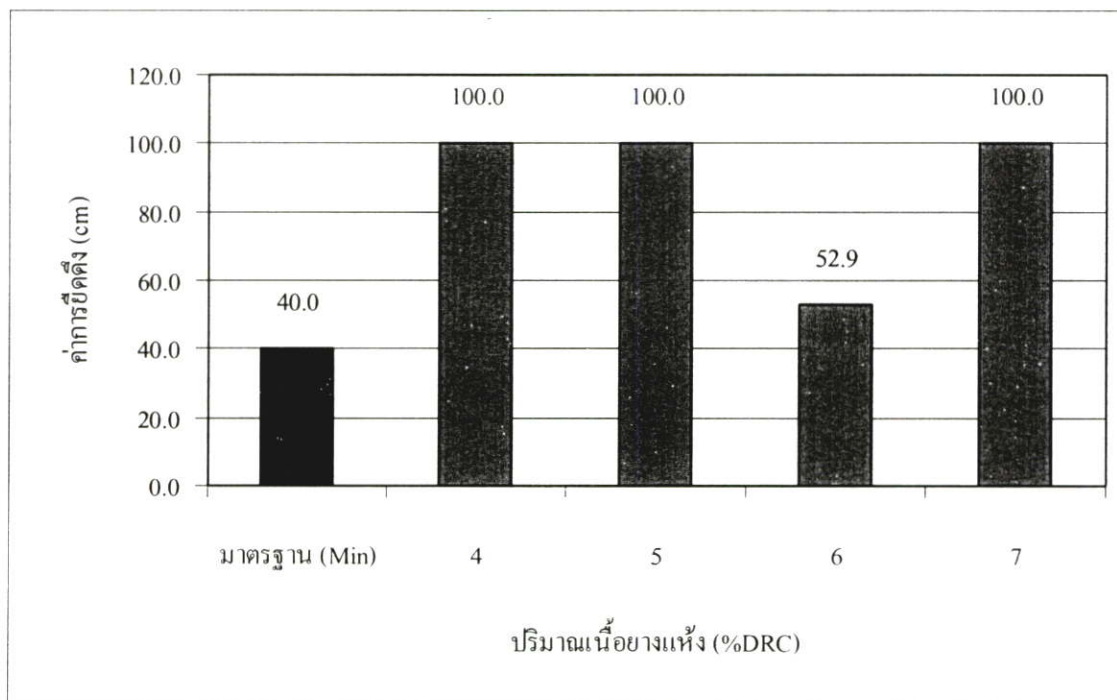
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซโบลัวฟูรอดโดยการปรับปริมาณเชื้อยีส

การทดสอบกากที่ได้จากการระเหย

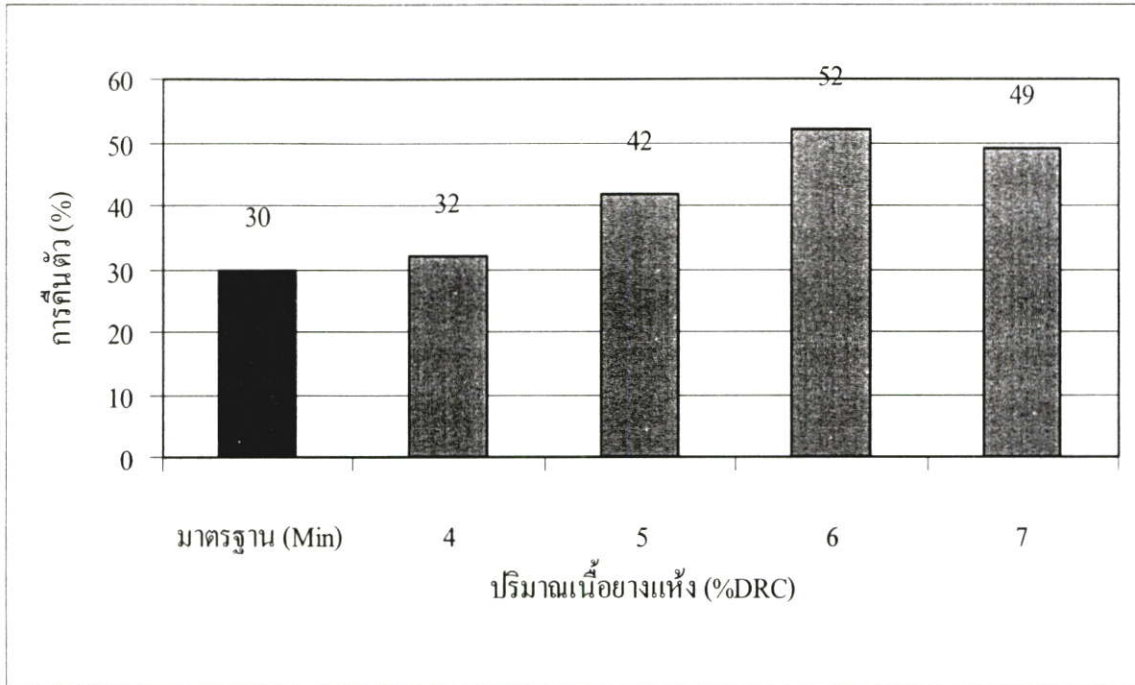
สำหรับการทดสอบกากของอิมัลชันที่ได้จากการระเหย ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.16-4.19 ที่ปริมาณเนื้อยางแห้ง 4%, 5%, 6% และ 7% พบว่าค่าจุดอ่อนตัวแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยค่าจุดอ่อนตัว เท่ากับ 60.2°C , 64.3°C , 72.1°C และ 63.2°C ตามลำดับ ค่าการยืดดึงแสดงดังรูปที่ 4.17 เท่ากับ 100.0 cm, 100.0 cm, 52.9 cm และ 100.0 cm ตามลำดับ ค่าการคืนตัวแสดงดังรูปที่ 4.18 เท่ากับ 32%, 42%, 52% และ 49% ตามลำดับ และค่าเพนิเทรชันแสดงดังรูปที่ 4.19 เท่ากับ 80, 72, 66 และ 80 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบในส่วนของกากที่ได้จากการระเหยพบว่า การใช้ปริมาณเนื้อยางแห้งที่ 6% เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ลักษณะของอิมัลชันมีความสม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวที่ดี ทำให้เกิดการกระจายส่วนเสริมแรงได้อย่างสม่ำเสมอในกากที่ได้ ค่าจุดอ่อนตัวและค่าการคืนตัวจึงสูงกว่า และค่าเพนิเทรชันต่ำกว่าเนื่องจากกากที่ได้มีความแข็งมากขึ้น สำหรับค่าการยืดดึงที่ปริมาณเนื้อยางแห้ง 4%, 5% และ 7% ให้ค่าการยืดดึงสูงมากเนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาคระหว่างอนุภาคของเนื้อยางกับอนุภาคของยางมะตอย ดังนั้นส่วนที่รับแรงดึงจึงเป็นส่วนของยางมะตอยที่มีความสามารถยืดดึงได้สูง ค่าการยืดดึงจึงสูงเมื่อมีปริมาณเนื้อยางแห้งที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นกรณีที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งที่มากหรือน้อยเกินไป ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคยางในอิมัลชันที่ได้เกิดความไม่เสถียรภาพขึ้น กรณีที่มีเนื้อยางน้อยเกินไปทำให้เกิดความแตกต่างมากขึ้นในส่วนของปริมาณเนื้อยางแห้งกับเนื้อยางมะตอย โดยในส่วนผสมของอิมัลชันจะมีเนื้อยางมะตอยในปริมาณที่แตกต่างกับเนื้อยางแห้งมาก และเมื่อผ่านการผสมด้วยเครื่องคอลลอยด์มิล ทำให้เกิดความแตกต่างในเรื่องขนาดของอนุภาคระหว่างยางมะตอยและยางที่ปรับปรุง และเมื่อปริมาณเนื้อยางซึ่งเป็นส่วนเสริมแรงไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงในส่วนผสม ทำให้ผลการทดสอบสมบัติที่ได้ต่ำลง และกรณีที่มีปริมาณเนื้อยางที่มากเกินไปในอิมัลชัน ส่งผลให้ปริมาณเนื้อยางที่มากเกินไปเกิดการรวมตัวและลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของอิมัลชัน เกิดการแยกวัฏภาคขึ้น ค่าการทดสอบที่ได้จึงต่ำลง ดังนั้นปริมาณเนื้อยางแห้งที่เหมาะสมคือ 6% เนื่องจากให้การกระจายตัวที่ดีและมีความสม่ำเสมอ และผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐานของกรมทางหลวง



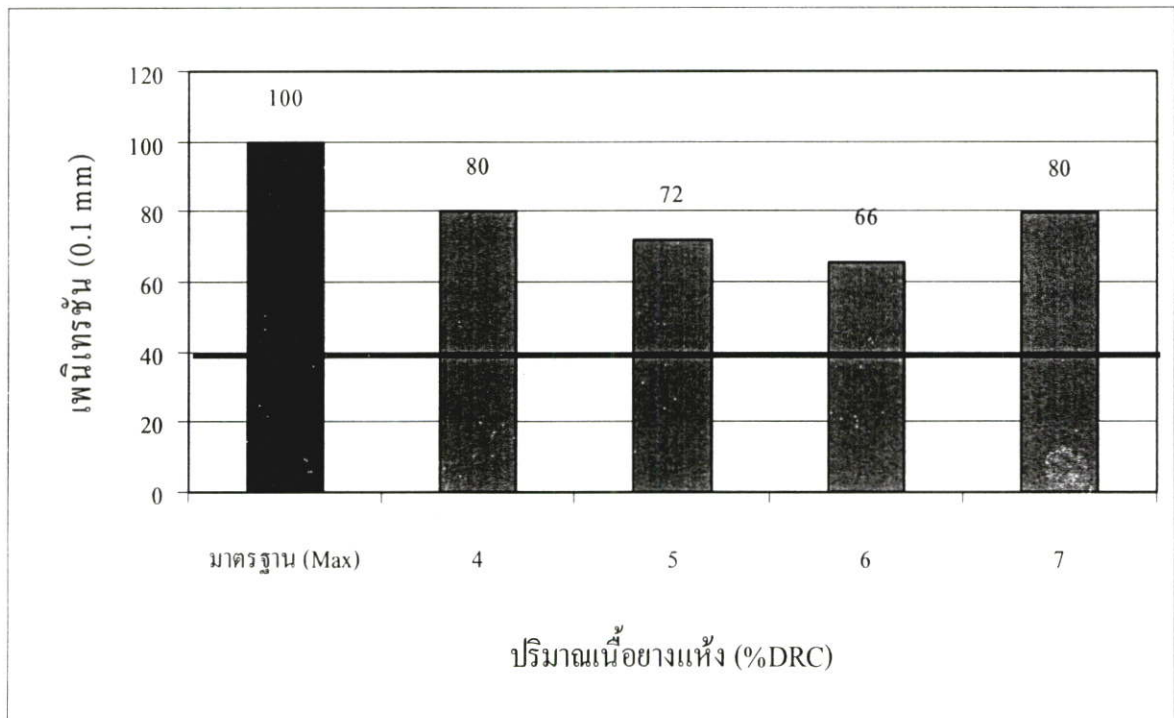
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับปริมาณเนือย่างแห้ง



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบการยี่ดคังโดยการปรับปริมาณเนือย่างแห้ง



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการคั่นตัวโดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบเพนิเทรชัน โดยการปรับปริมาณเนื้อยางแห้ง

4.1.3 การปรับปริมาณอิมัลซิไฟเออร์

ผลการทดสอบที่ผ่านมาได้คงปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ไว้ โดยใช้ปริมาณของวินโซลเรซินที่ 0.50% โดยน้ำหนัก ปริมาณของแลคติกเคซินที่ 0.70% โดยน้ำหนัก และปริมาณของเอสเอ็นเอ 60 ที่ 0.25% โดยน้ำหนัก ดังนั้นการทดลองต่อไปจึงเป็นการศึกษาถึงผลของอิมัลซิไฟเออร์แต่ละชนิดที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ โดยเลือกศึกษาถึงผลของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์สองชนิดคือวินโซลเรซินและแลคติกเคซิน ซึ่งกรณีที่ไม่มีการใส่เอสเอ็นเอ60 พบว่าปริมาณการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน เท่ากับ 1.0% และ 10.0% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่เกินมาตรฐานของกรมทางหลวง แต่ค่าที่ได้ยังคงสูงอยู่และมีลักษณะสีขาวของน้ำยางลอยหน้าเล็กน้อยในยางมะตอยอิมัลชัน ดังนั้นจึงปรับเพียงอิมัลซิไฟเออร์สองชนิดแรกก่อน ซึ่งหากผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐาน จึงไม่มีความจำเป็นในการปรับเพิ่มเอสเอ็นเอ60

1. การปรับปริมาณวินโซลเรซิน

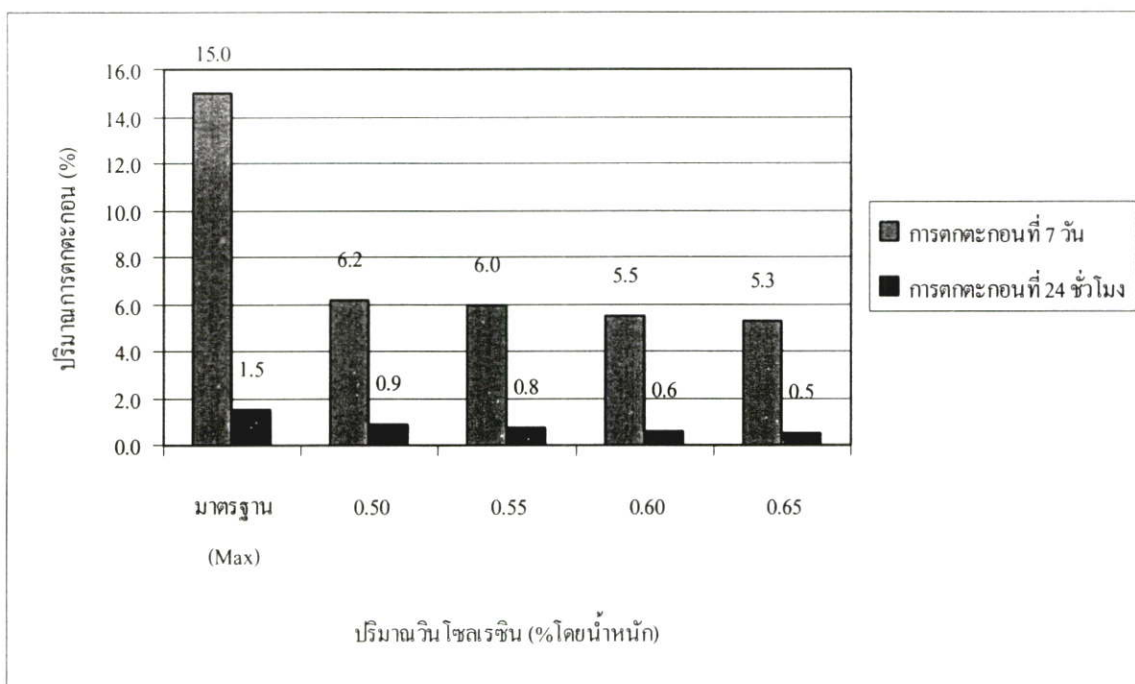
การปรับปริมาณวินโซลเรซินได้ปรับปริมาณ 4 ค่า คือ 0.50%, 0.55%, 0.60% และ 0.65% โดยน้ำหนัก

การทดสอบสมบัติของอิมัลชัน

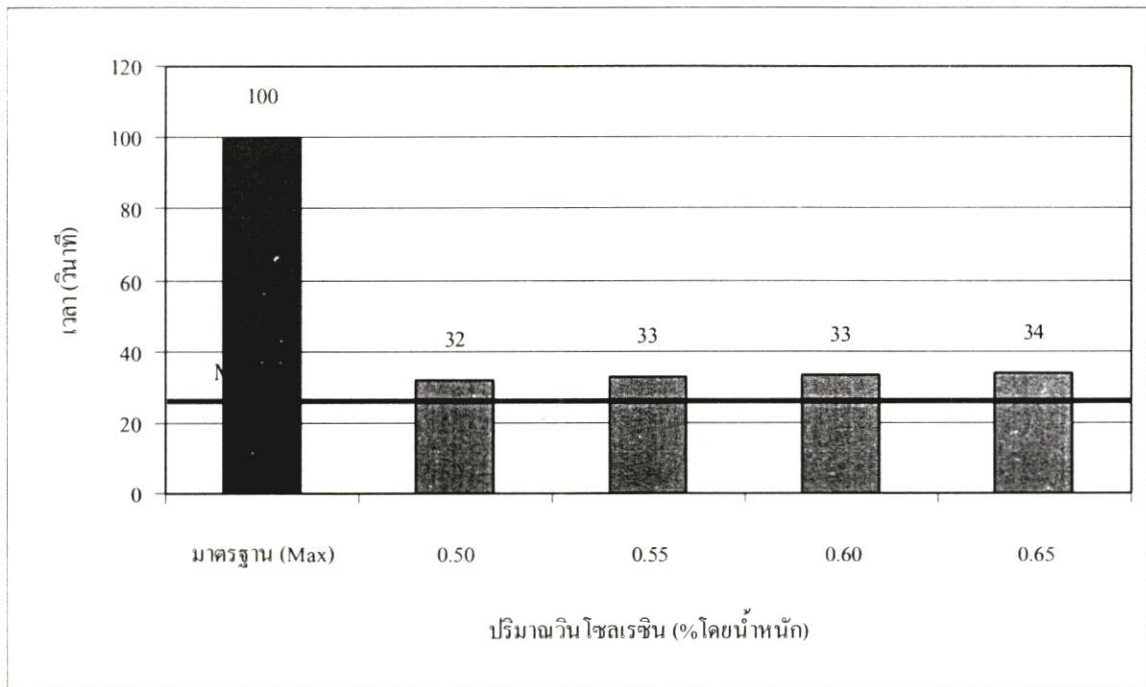
ผลการทดสอบอิมัลชันที่ได้จากการปรับปริมาณวินโซลเรซินโดยปริมาณของยางมะตอยเท่าเดิม พบว่าเมื่อมีปริมาณของวินโซลเรซินเท่ากับ 0.50%, 0.55%, 0.60% และ 0.65% ความเสถียรภาพของอิมัลชันหรือปริมาณการตกตะกอนของอิมัลชันเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 0.9%, 0.8%, 0.60% และ 0.5% ตามลำดับ และปริมาณการตกตะกอนของอิมัลชันที่ 7 วัน เท่ากับ 6.2%, 6.0%, 5.5% และ 5.3% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการตกตะกอนลดลงแสดงว่าความเสถียรภาพของอิมัลชันสูงขึ้นเมื่อปริมาณของวินโซลเรซินมากขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 4.20 เนื่องจากวินโซลเรซินช่วยลดแรงตึงผิวของยางมะตอยให้สามารถกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ และคงตัวในอิมัลชันได้ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณของวินโซลเรซินสูงขึ้น ยางมะตอยจึงสามารถคงตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายตัวอยู่ในอิมัลชันได้ดี การทดสอบขนาดของอนุภาคพบว่า ขนาดของอนุภาคที่ได้จากเครื่องคอลลอยด์มิเตอร์มีขนาดที่ละเอียดเล็กกว่า 20 ไมครอน ดังนั้นผลการทดสอบขนาดของอนุภาคโดยวัดเป็นปริมาณที่ค้ำบนแรงและผลการทดสอบความหนืดจึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการทดสอบปริมาณที่ค้ำบนแรงเท่ากับ 0.02%, 0.03%, 0.01% และ 0.01% ตามลำดับ และผลการทดสอบความหนืดเท่ากับ 32, 33, 33 และ 34 วินาที ตามลำดับ โดยผลการทดสอบความหนืดแสดงดังรูปที่ 4.21

การทดสอบกากที่ได้จากการระเหย

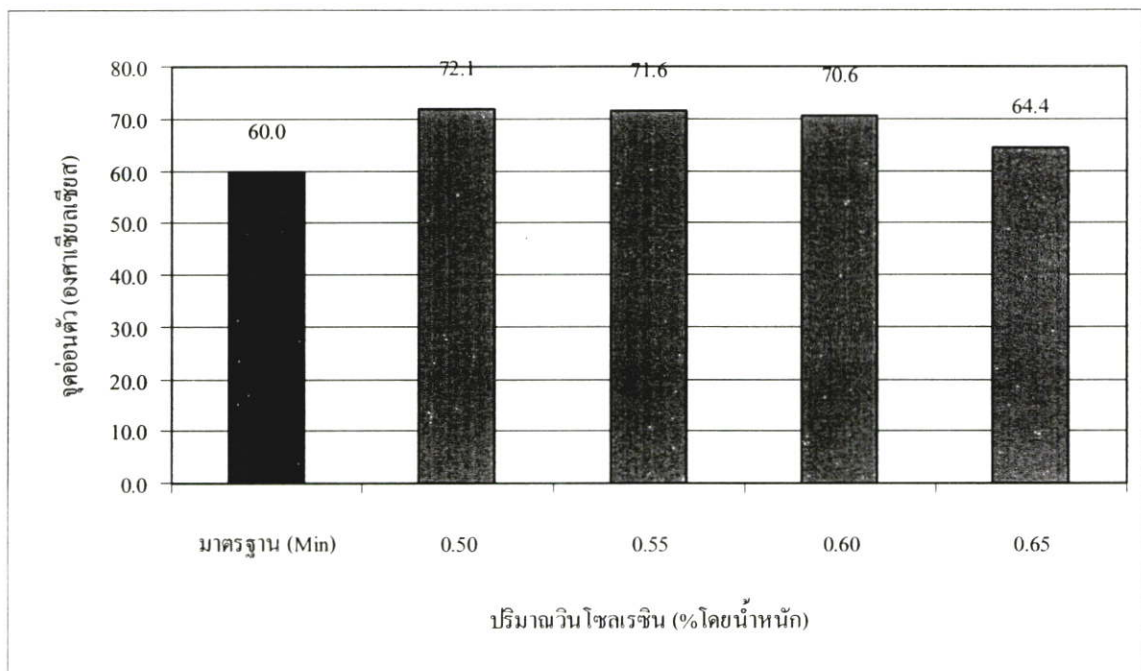
ผลการทดสอบกากของอิมัลชันที่ได้จากการระเหยแสดงดังรูปที่ 4.22-4.25 ที่ปริมาณวินิลไซลเรซินเท่ากับ 0.50%, 0.55%, 0.60% และ 0.65% ค่าจุดอ่อนตัวเท่ากับ 72.1°C, 71.6°C, 70.6°C และ 64.4°C ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.22 ค่าการยืดดึงเท่ากับ 52.9 cm, 60.0 cm, 65.0 cm และ 85.6 cm ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.23 ค่าการคืนตัวเท่ากับ 52%, 50%, 55% และ 49% ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.24 และค่าเพนิเทรชันเท่ากับ 66, 70, 71 และ 80 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งเมื่อมีปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของยางมะตอยเพิ่มขึ้น ค่าจุดอ่อนตัวและค่าการคืนตัวลดลงเนื่องจากมีส่วนของวินิลไซลเรซินที่มากเกินไปเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ทำให้กากที่ได้จากการระเหยมีส่วนที่เป็นจุดบกพร่องของตัวอย่างทดสอบ และเมื่อขนาดอนุภาคของยางมะตอยเล็กลง ทำให้ขนาดของอนุภาคระหว่างยางมะตอยกับยางที่ใช้ปรับปรุงเกิดความแตกต่างมากขึ้น เกิดการกระจายตัวของส่วนเสริมแรงได้ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าการทดสอบจุดอ่อนตัวและค่าการคืนตัวต่ำลง ค่าการยืดดึงและค่าเพนิเทรชันสูงขึ้นเนื่องจากกากที่ได้มีความแข็งลดลง



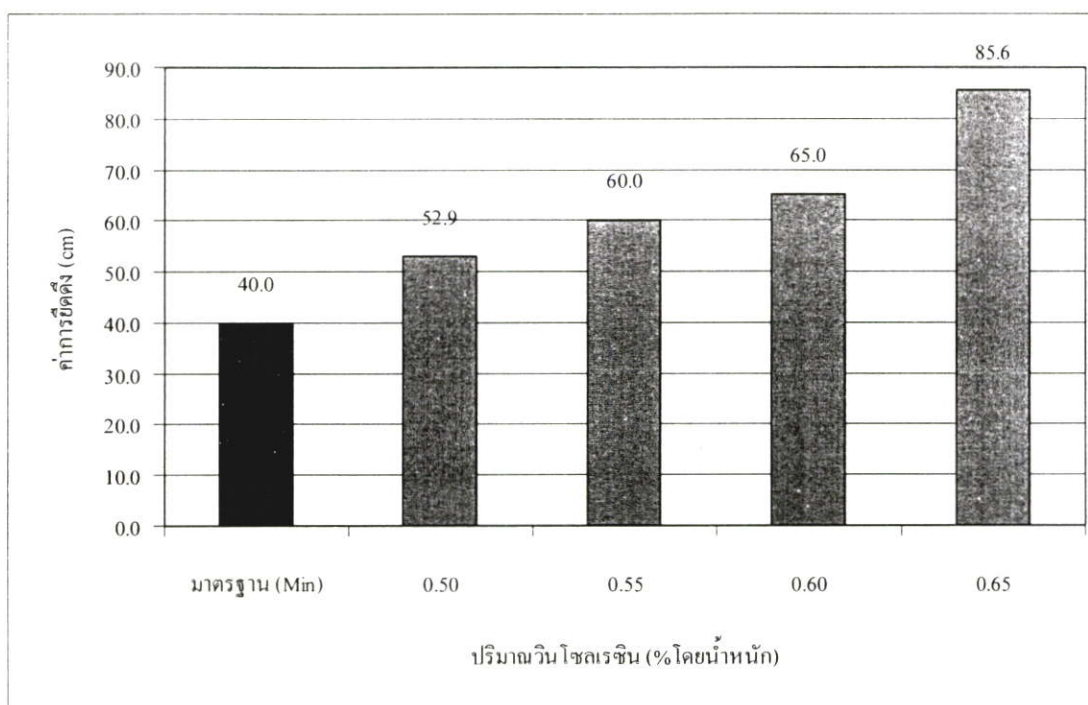
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับปริมาณวินิลไซลเรซิน



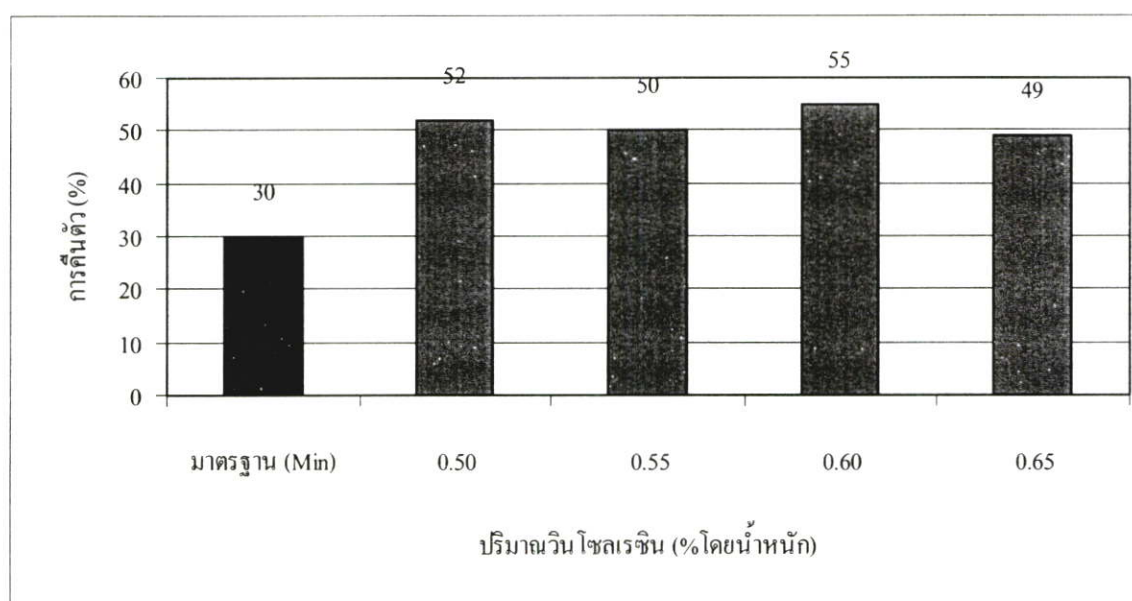
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบความหนืดแบบเซปัลฟูรอลโดยการปรับปริมาณวินิลเรซิน



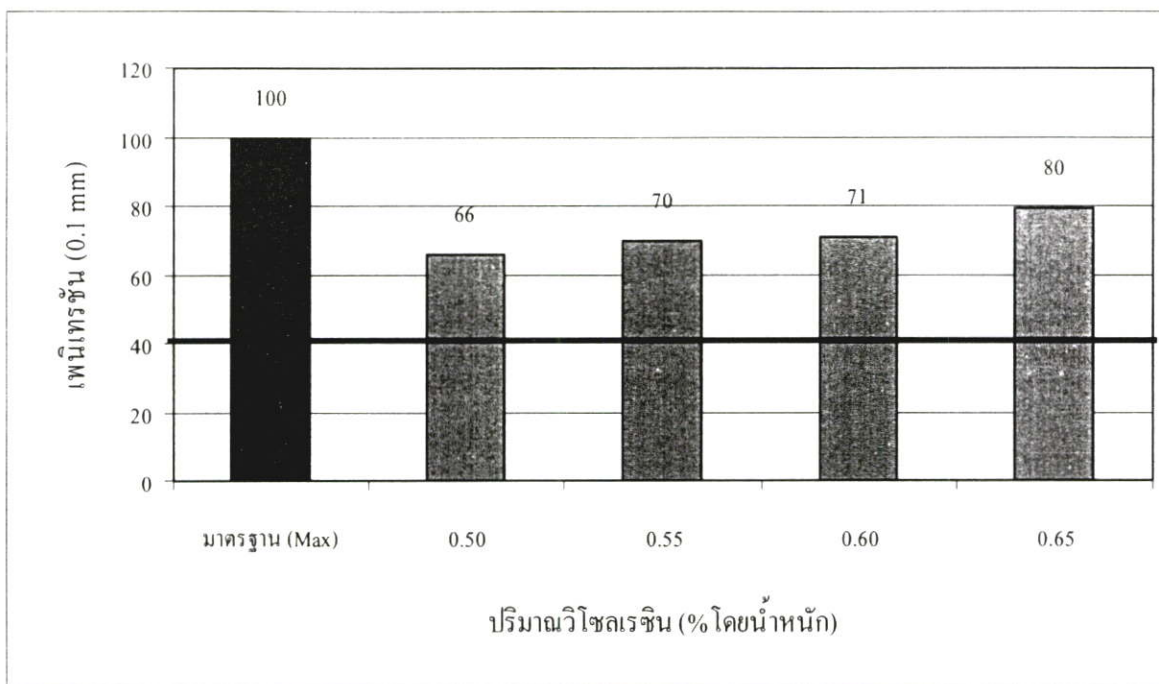
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับปริมาณวินิลเรซิน



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการยืดดึงโดยการปรับปริมาณวิน ไซลเรซิน



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบการคืนตัวโดยการปรับปริมาณวิน ไซลเรซิน



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบเพนเนทรชัน โดยการปรับปริมาณวิน โซลเรซิน

สำหรับการปรับปริมาณวิน โซลเรซินพบว่า ปริมาณของวิน โซลเรซินที่เหมาะสมคือ 0.60% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเพียงพอต่อการกระจายเนื้ออย่างมตะยให้สามารถกระจายตัวเป็นอนุภาคขนาดที่เหมาะสมในอิมัลชัน ซึ่งปริมาณที่น้อยกว่า คือที่ 0.50% และ 0.55% โดยน้ำหนัก ให้ความเสถียรภาพของอิมัลชันระยะสั้น ซึ่งพิจารณาได้จากปริมาณการตกตะกอนที่สูง สำหรับที่ปริมาณ 0.65% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์มากเกินไป ซึ่งพิจารณาจากค่าจุดอ่อนตัวและค่าการคืนตัวที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยปริมาณของวิน โซลเรซินที่เหมาะสม คือ 0.60% โดยน้ำหนัก เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมและผ่านตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

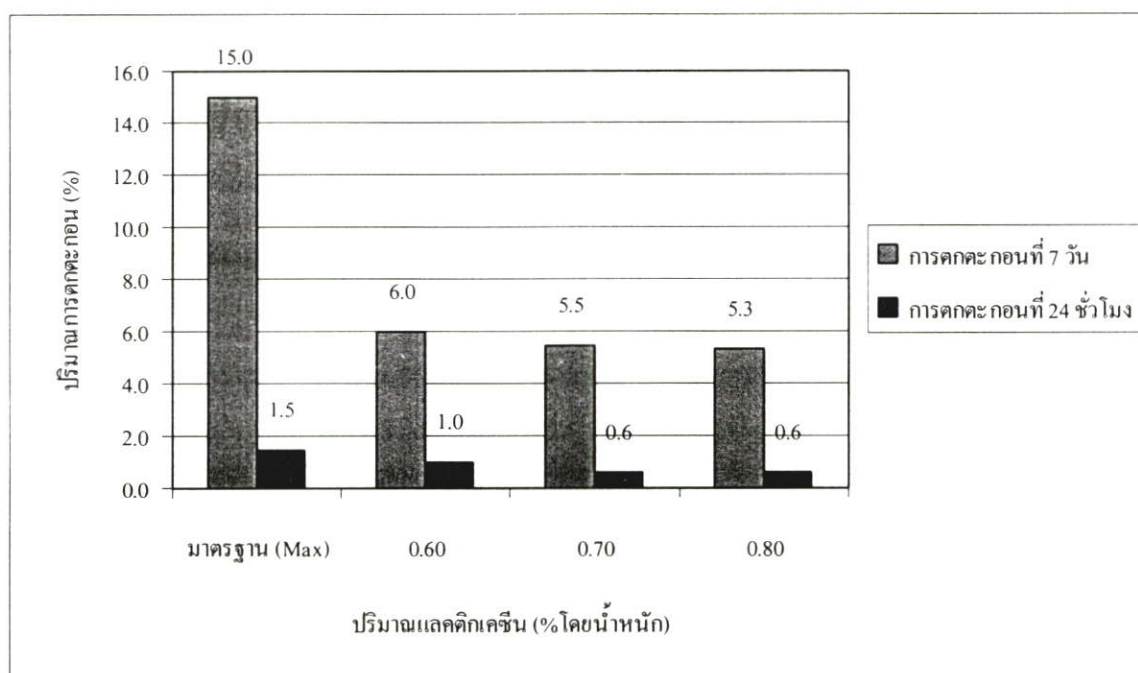
2. การปรับปริมาณของแลคติกเคซิน

การทดสอบที่ผ่านมาได้ใช้ปริมาณของแลคติกเคซินที่ 0.70% โดยน้ำหนัก ดังนั้นต่อไปจึงเป็นการปรับปริมาณของแลคติกเคซินที่ 0.60%, 0.70% และ 0.80% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของแลคติกเคซินที่มีต่ออิมัลชันและเลือกใช้ปริมาณของวิน โซลเรซินที่เหมาะสม คือ 0.60% โดยน้ำหนัก

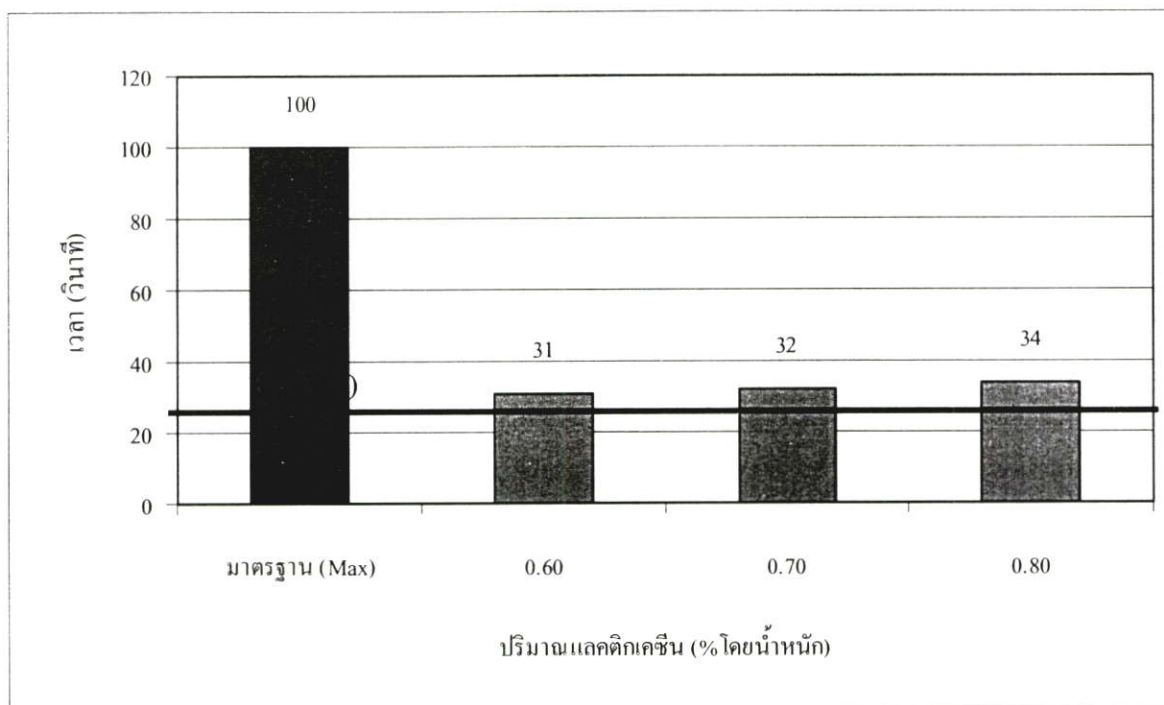
การทดสอบสมบัติของอิมัลชัน

ผลการทดสอบส่วนของอิมัลชันสำหรับการปรับปริมาณของแลคติกเคซิน ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 4.26-4.27 ที่ปริมาณแลคติกเคซินเท่ากับ 0.60%, 0.70% และ 0.80% โดยน้ำหนัก ปริมาณการตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 1.0%, 0.6% และ 0.6% ตามลำดับ และปริมาณการตกตะกอนที่ 7 วัน เท่ากับ 6.0%, 5.5% และ 5.3% ตามลำดับ พบว่าการตกตะกอนที่

24 ชั่วโมง และ 7 วัน ลดลงเมื่อปริมาณของแลคติกเคซินมากขึ้น เนื่องจากแลคติกเคซินช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำยางธรรมชาติ และทำให้น้ำยางคงตัวและกระจายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้ดีในอิมัลชัน ส่งผลให้การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมง และ 7 วัน ลดลง การทดสอบขนาดของอนุภาคโดยวัดเป็นปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนแรงพบว่า ขนาดของอนุภาคที่ได้มีขนาดที่เล็กกว่า 20 ไมครอน ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำหน้าที่กระจายวิฎภาคของยางธรรมชาติมีปริมาณสูงขึ้น อนุภาคของยางธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่เกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ได้ดี ลักษณะของอิมัลชันที่ได้มีความข้นมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดที่ได้สูงขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน โดยการปรับปริมาณแลคติกเคซิน



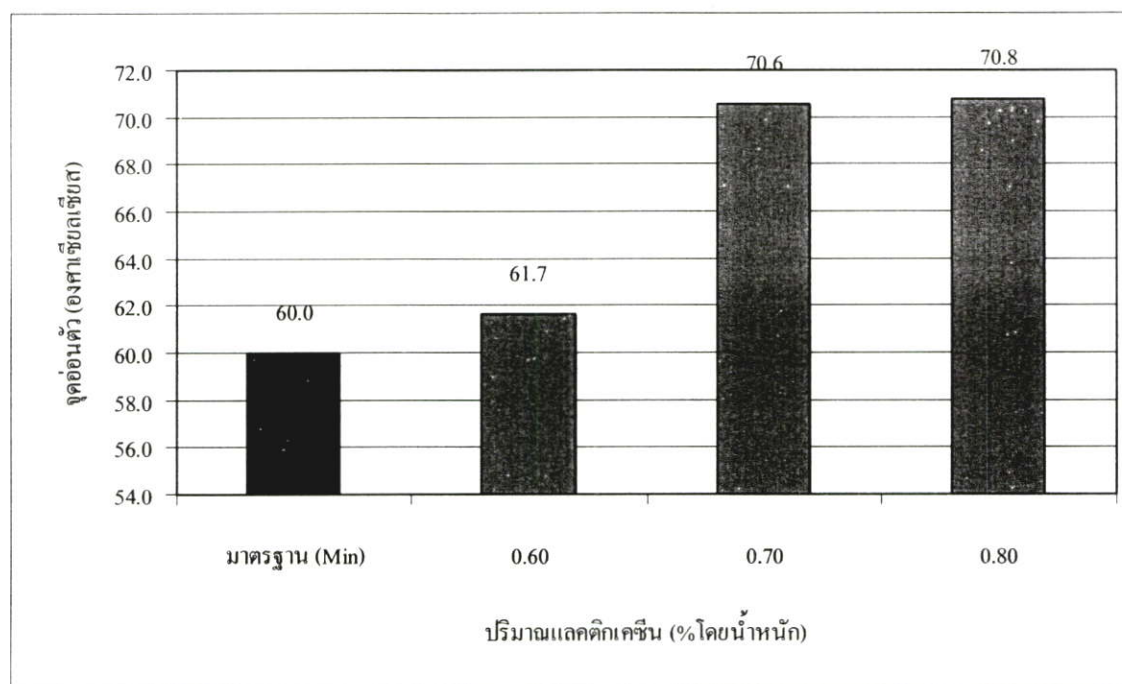
รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบความเหนียวแบบเซโบลัวฟูรอลโดยการปรับปริมาณแคลคิอัมคลอไรด์

การทดสอบกาคที่ได้จากการระเหย

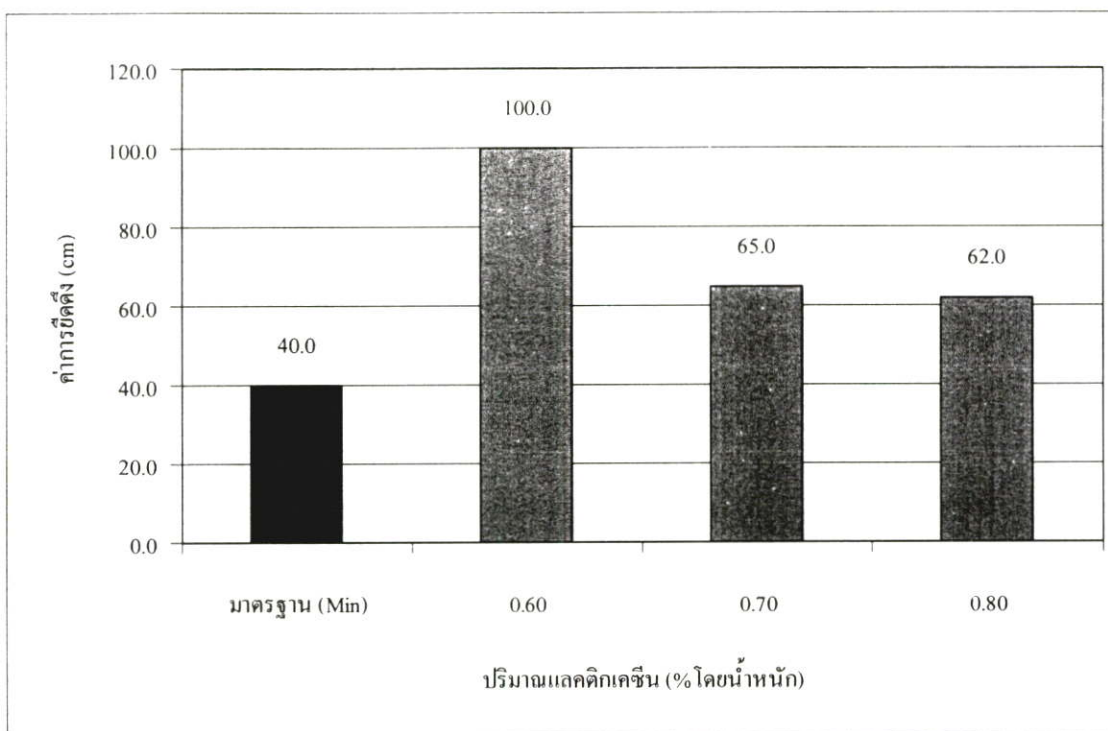
ผลการทดสอบกาคที่ได้จากการระเหยสำหรับการปรับปริมาณของแคลคิอัมคลอไรด์ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 4.28-4.31 ที่ปริมาณแคลคิอัมคลอไรด์เท่ากับ 0.60%, 0.70% และ 0.80% ค่าจุดอ่อนตัวเท่ากับ 61.7°C , 70.6°C และ 70.8°C ตามลำดับ โดยแสดงดังรูปที่ 4.28 และค่าการคืนตัวเท่ากับ 41%, 55% และ 56% ตามลำดับโดยแสดงดังรูปที่ 4.30 ซึ่งเมื่อปริมาณแคลคิอัมคลอไรด์มากขึ้น ค่าจุดอ่อนตัวและค่าการคืนตัวสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของน้ำยางธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ถูกลดแรงตึงผิวลงและกระจายตัวได้ดีขึ้นในอิมัลชัน ขนาดของอนุภาคยางธรรมชาติและยางมะตอยมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคยางซึ่งเป็นส่วนเสริมแรงได้ดีสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าจุดอ่อนตัวและค่าการคืนตัวจึงสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณแคลคิอัมคลอไรด์มากขึ้นในยางมะตอยอิมัลชัน ค่าเพนิเทรชันเท่ากับ 71, 71 และ 61 ตามลำดับ โดยแสดงดังรูปที่ 4.31 และค่าการยึดดึงเท่ากับ 100.0 cm, 64.0 cm และ 62.0 cm ตามลำดับโดยแสดงดังรูปที่ 4.29 ซึ่งพบว่า ค่าการยึดดึงลดลงและค่าเพนิเทรชันสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติเกิดการกระจายตัวดีขึ้น ขนาดของอนุภาคที่เล็กลง กาคที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับกรณีที่มีปริมาณของแคลคิอัมคลอไรด์ที่ 0.60% โดยน้ำหนัก ให้ค่าการยึดดึงสูงมาก ซึ่งเกิดจากการแยกวัฏภาคของน้ำยางธรรมชาติเนื่องจากปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ไม่เพียงพอต่อการกระจายตัวของอนุภาคยาง ดังนั้นส่วนที่รับแรงดึงจึงเป็นส่วนของยางมะตอยค่าการยึดดึงที่ได้จึงสูงมาก สำหรับที่มีปริมาณของแคลคิอัมคลอไรด์ 0.80% โดยน้ำหนัก พบว่า

ให้ผลการทดสอบที่ดี แต่ค่าการทดสอบไม่แตกต่างจาก 0.70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณของ อิมัลซิไฟเออร์ที่ 0.7% โดยน้ำหนัก เพียงพอต่อการกระจายตัวและคุณสมบัติของอนุภาคของ ยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของแลคติกเคซินที่ 0.70% โดยน้ำหนัก

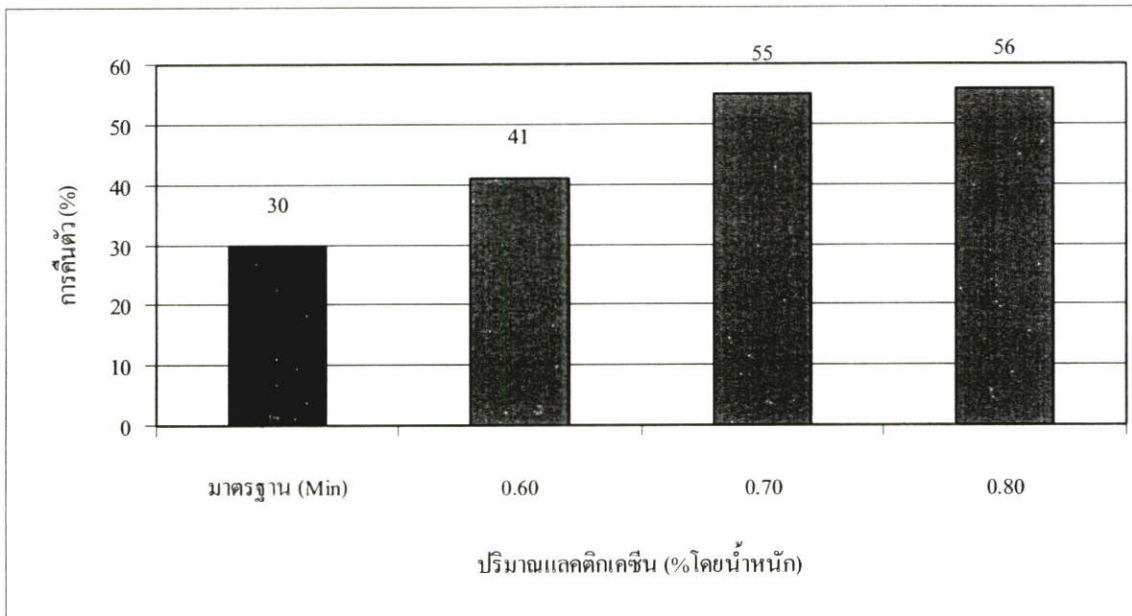
ดังนั้นสูตรที่ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมที่สุดคือ การใช้น้ำยางเอสปีอาร์เกรด 1712 อัตราส่วนระหว่าง SBR:NR เท่ากับ 65:35 ปริมาณเนื้อยางแห้งที่ 6% ปริมาณวินิลอะครีเลตที่ 0.6% ปริมาณแลคติกเคซินที่ 0.7% และปริมาณเอสเอ็นเอ 60 ที่ 0.25% เนื่องจากให้ผลการทดสอบผ่านตาม มาตรฐานของกรมทางหลวง และได้ส่งสูตรการผสมนี้เข้าทดสอบที่กรมทางหลวง ซึ่งได้ผลการ ทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 และได้ทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมตาม มอก.2157-2547 ซึ่งได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐานของ กรมทางหลวงและกระทรวงอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเลือกสูตรการทดสอบนี้เป็นสูตรที่ใช้ออกแบบ ผีวทาง (Mixed design) ต่อไป



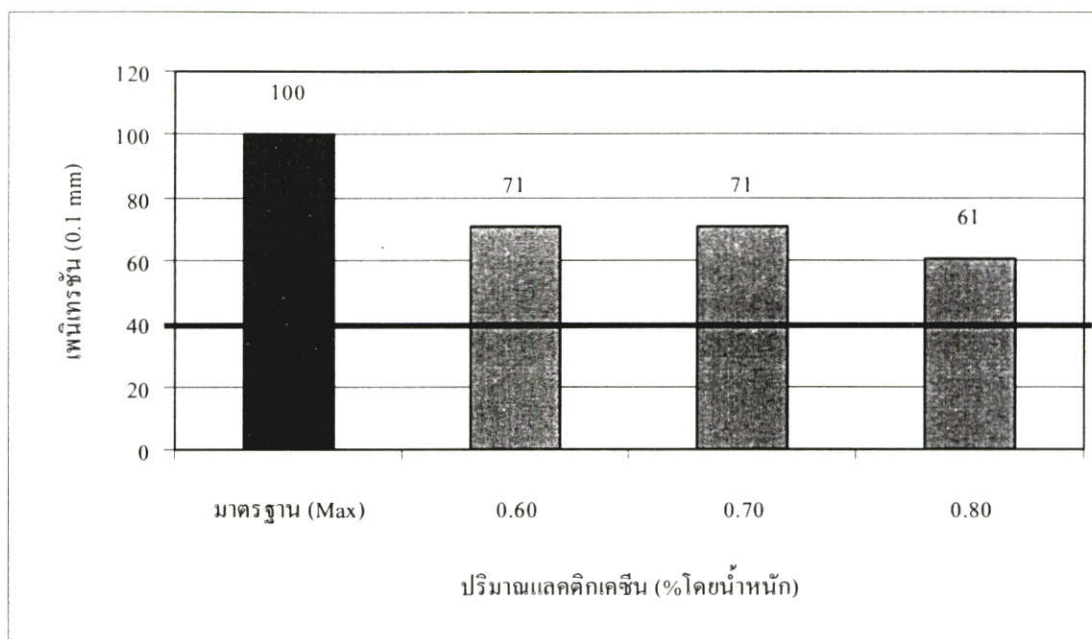
รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวโดยการปรับปริมาณแลคติกเคซิน



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบการเซตตั้ง โดยการปรับปริมาณแลคติกเคซีน



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบการคั่นตัว โดยการปรับปริมาณแลคติกเคซีน



รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบเพนิเทรชัน โดยการปรับปริมาณแลคติกเคซีน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบจากกรมทางหลวงตาม ทล.-ก.405/2538

Item No.	Properties	Units	Specification		Test Results	Test Method
			Minimum	Maximum		
1	Saybolt viscosity	sec	25	100	35	DH-T 407
2	Settlement 7 days	%wt	-	15	8.6	ASTM D224
3	Storage stability 24 hr	%wt	-	1.5	0.6	ASTM D224
4	Sieve test	%wt	-	0.1	0.05	ASTM D224
5	%Solid	%wt	60	-	65.2	ASTM D224
6	Softening point	C	60	-	85.7	ASTM D36
7	Elastic recovery	%	30	-	41.7	NLT 329/91
8	Penetration	0.1 mm	40	100	75	DH-T 403
9	Ductility	cm	40	-	>40	DH-T 405
10	Solubility in trichloroethylene	%wt	97.5	-	99.85	DH-T 409

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก.2157-2547)

ลำดับที่	คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด	สูตรผลการทดสอบ	
				SS-lhp (SBR and NR modified)	
1	ความหนืดเซโบลต์ฟูรอล	วินาที	20-100		32
2	การแช่ขึ้นไม่น้อยกว่า 5 วัน ไม่เกิน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	7.5		4.98
3	เสถียรภาพต่อการเก็บไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง	ร้อยละโดยน้ำหนัก	1.5		0.55
4	ปริมาณที่ค้างบนแรงขนาด 850 ไมโครเมตร (20 เมช) ไม่เกิน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	0.1		0.02
5	ประจุของอนุภาคแอสฟัลต์	/	ลบ		ลบ
6	กากไม่น้อยกว่า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	57		64.79
กากที่เหลือจากการระเหย					
7	จุดอ่อนตัว ไม่น้อยกว่า	องศาเซลเซียส	60		87.1
8	ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic Recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	ร้อยละ	30		45
9	ความเหนียวและเทนacity (Toughness & Tenacity) ที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร ความเหนียว ไม่น้อยกว่า เทนacity ไม่น้อยกว่า	กิโลกรัมเซนติเมตร	40 20		159.35 89.22
10	เพนิตรชัน อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	/	40-90		44.8
11	ความยืดดึง ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที ไม่น้อยกว่า	เซนติเมตร	40		>100
11	การละลายในโทลูอิน ไม่น้อยกว่า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	97.5		-

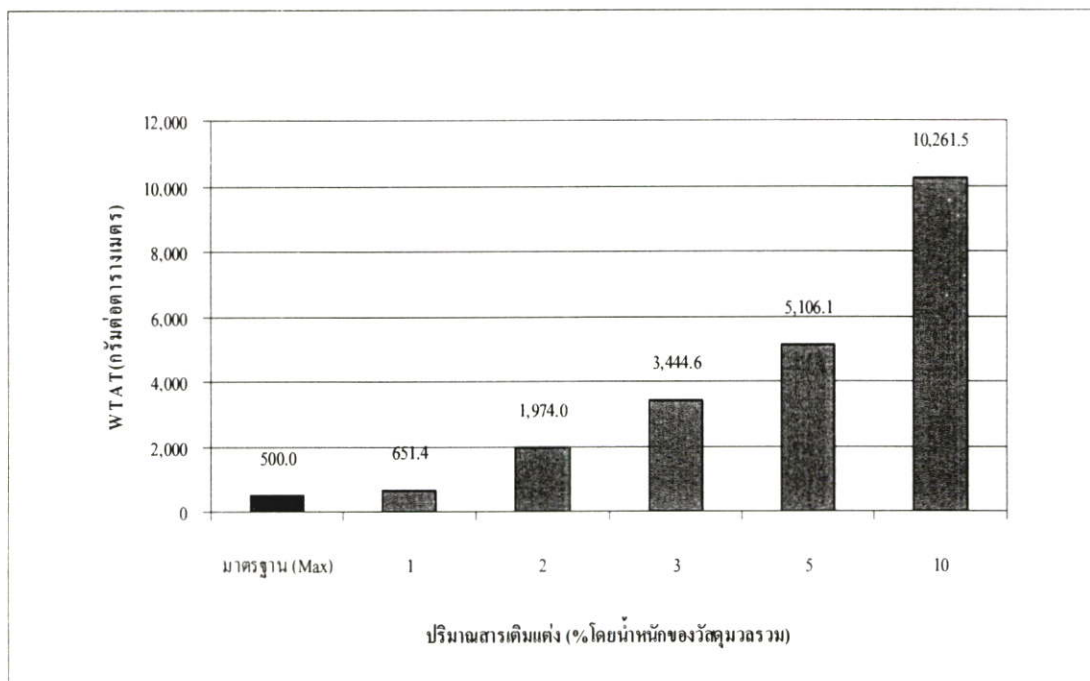
4.2 ผลการทดสอบการออกแบบส่วนผสมไมโครซิล

4.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่ง

จากผลการทดสอบในตอนต้นที่ 1 เป็นการทดสอบสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน ทำให้สามารถเลือกซึ่งสูตรที่เหมาะสมได้ เพื่อนำสูตรของยางมะตอยอิมัลชันมาออกแบบส่วนผสมเพื่อนำไปลาดถนนจริง

สำหรับการทดสอบการออกแบบผิวทาง (Mixed design) แบบไมโครซิลชนิดที่สอง (Microseal Type II) เบื้องต้น ค่าที่มีความสำคัญและทดสอบเป็นอันดับแรกคือค่า WTAT (Wet Track Abrasion Test) เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งบอกถึงผลการทดสอบเปรียบเทียบที่ค่อนข้างเสมือนจริง ซึ่งเป็นการเลียนแบบการขัดสีของล้อรถในสภาวะเปียกชื้น ดังนั้นกรณีที่ผลการทดสอบได้ค่า WTAT ไม่ผ่านตามมาตรฐานของการออกแบบผิวทางแบบไมโครซิล แสดงว่าส่วนผสมที่ได้มีการยึดเกาะระหว่างยางมะตอยอิมัลชันที่คัดแปร (Modified asphalt emulsion) กับวัสดุมวลรวม (Aggregate) ได้ต่ำ ส่วนผสมที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ในงานลาดผิวถนนได้จริง โดยต้องออกแบบส่วนผสมใหม่เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงหรือผ่านตามมาตรฐานการออกแบบผิวทางแบบไมโครซิล สำหรับการออกแบบส่วนผสม ส่วนที่มีความสำคัญคือสารเติมแต่ง (Additive) ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยยึดติดระหว่างยางมะตอยอิมัลชันและวัสดุมวลรวมและอาจมีผลต่อการเซ็ดตัวของส่วนผสม ดังนั้นปริมาณสารเติมแต่งจึงมีความสำคัญ ส่วนผสมเบื้องต้นเลือกใช้แหล่งวัสดุมวลรวมจากสระบุรี 100% โดยน้ำหนัก ปริมาณซีเมนต์ (Portland cement type I) 0.5% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน 15% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม และปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อปรับจนได้ค่าการไหลอยู่ในช่วงของมาตรฐานที่กำหนด และปรับปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้คือ 1%, 2%, 3%, 5% และ 10% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม จากผลการศึกษาผลของสารเติมแต่งพบว่า เมื่อปริมาณสารเติมแต่งเท่ากับ 1%, 2%, 3%, 5% และ 10% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ค่า WTAT เท่ากับ 651.4 g/m^2 , 1974.0 g/m^2 , 3444.6 g/m^2 , 5106.1 g/m^2 และ 10261.5 g/m^2 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.32 ซึ่งพบว่าค่า WTAT มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าเกิดการยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมกับยางมะตอยอิมัลชันที่คัดแปรน้อยลง เนื่องจากเมื่อมีปริมาณของสารเติมแต่งมากขึ้น ทำให้ส่วนผสมมีส่วนของสารเติมแต่งมากเกินไปและค้างอยู่ในส่วนผสม ซึ่งส่วนที่มากเกินไปจะเป็นตัวขัดขวางการยึดติดระหว่างเนื้อยางกับวัสดุมวลรวม และสารเติมแต่งนี้มีคุณสมบัติดูดความชื้น ดังนั้นเมื่อมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ส่วนผสมที่แห้งตัวสามารถดูดความชื้นในอากาศได้มากขึ้น ทำให้ค่า WTAT ที่วัดในสภาวะเปียกชื้นสูงขึ้น โดยค่าที่เหมาะสมคือ 2% เนื่องจากให้ลักษณะของส่วนผสมที่แห้งตัวสมบูรณ์มีลักษณะสีดำ ดังแสดงดังรูปที่ 4.33 ซึ่งแสดงว่าการใช้สารเติมแต่งที่ 2% เพียงพอต่อการเคลือบผิวของวัสดุมวลรวม กรณีที่ใช้สารเติมแต่ง 1% พบว่าให้ค่า WTAT ต่ำ แต่ปริมาณความเข้มข้นของสารเติมแต่งไม่สามารถเคลือบพื้นที่ผิวของวัสดุมวลรวมได้มากพอ โดยพิจารณาจากเนื้อของส่วนผสมที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้วมีสี

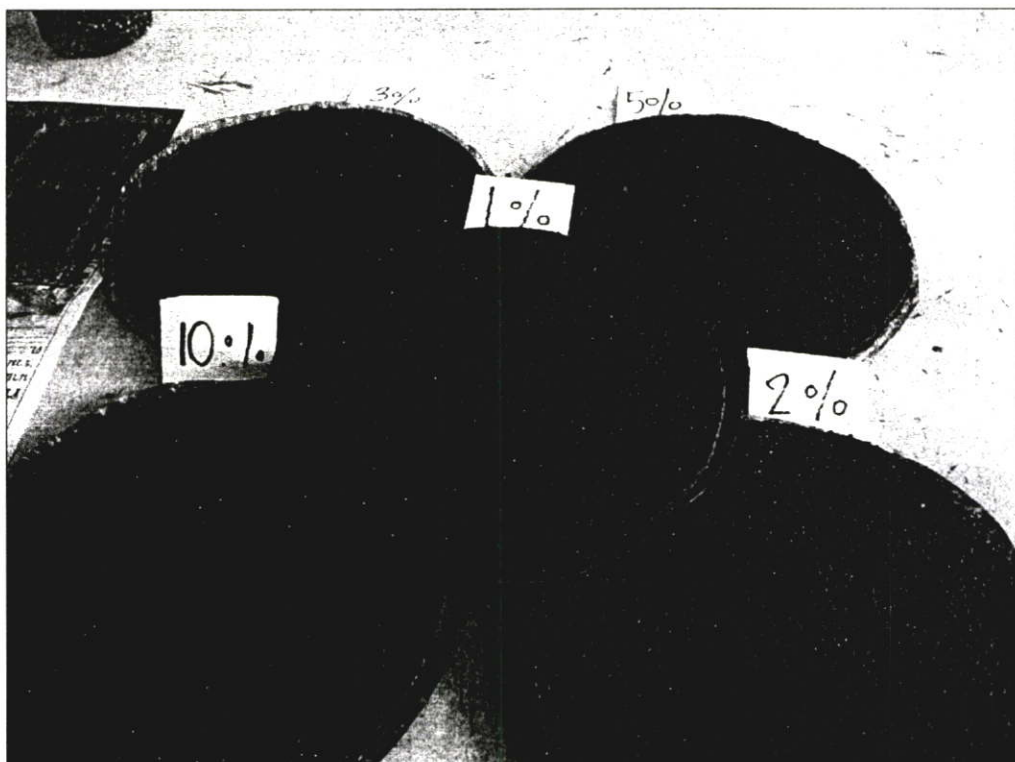
ออกน้ำตาลซึ่งเกิดจากการเคลือบของเนื้อยางที่ไม่เพียงพอ จึงเกิดการยึดติดระหว่างอิมัลชันกับวัสดุรวมรวมได้ไม่ดี และกรณีที่สารเติมแต่งมากกว่า 2% พบว่าให้สีของส่วนผสมที่มีสีดำเช่นเดียวกับการใช้ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3%, 5% และ 10% ดังแสดงดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นปริมาณของสารเติมแต่งที่เหมาะสมคือ 2% ซึ่งให้ค่าความทนทานต่อการขัดถูที่สภาวะเปียกชื้นที่ไม่ดีมาก แต่ลักษณะของส่วนผสมที่ได้มีสีดำสม่ำเสมอเนื่องจากสามารถเคลือบผิววัสดุรวมรวมได้เพียงพอ



รูปที่ 4.32 ผล WTAT จากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.33 แผ่นตัวอย่าง WTAT ที่แห้งตัวสมบูรณ์จากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งที่ 1% และ 2% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.34 แผ่นตัวอย่าง WTAT ที่แห้งตัวสมบูรณ์จากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งที่ 1%, 2%, 3%, 5% และ 10% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม

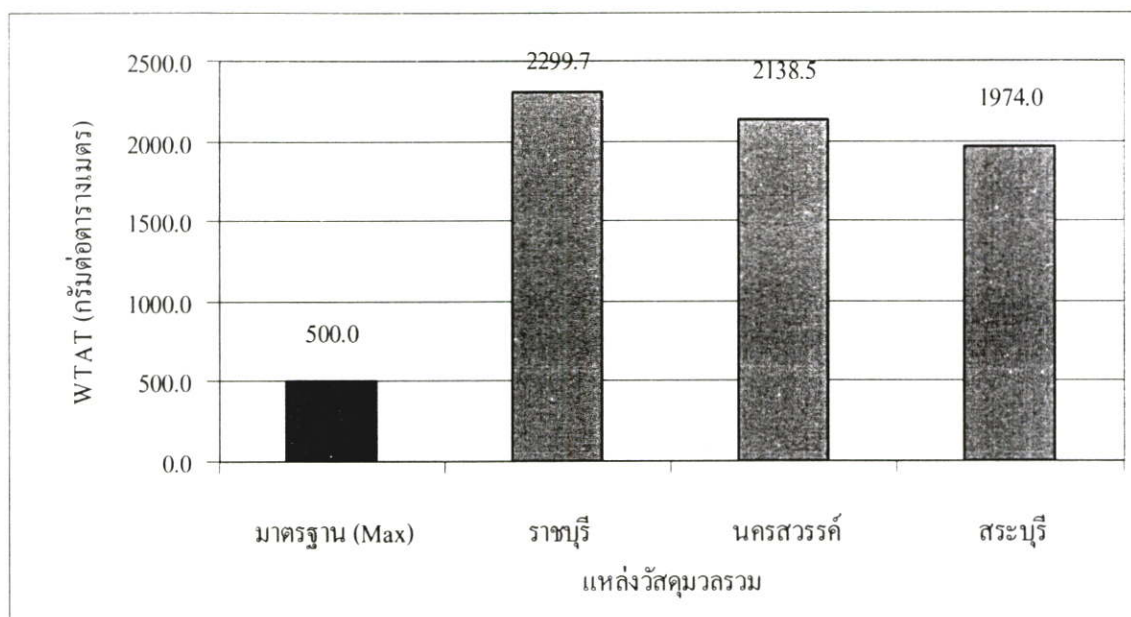
4.2.2 ผลของแหล่งวัสดุมวลรวม

จากผลการทดสอบตอนที่ 4.2.1 พบว่าปริมาณของสารเติมแต่งที่เหมาะสมคือ 2% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ต่อมาจึงเป็นการศึกษาถึงผลของแหล่งวัสดุมวลรวม ซึ่งแหล่งของวัสดุมวลรวมควรมีความเหมาะสมกับยางมะตอยอิมัลชันที่ได้รับการปรับปรุง โดยแหล่งวัสดุมวลรวมที่ใช้เป็นแหล่งเดียวกันกับวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานผิวทางยางมะตอย ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดเกาะกับยางมะตอย โดยวัสดุมวลรวมที่ใช้เป็นวัสดุมวลรวมหินฝุ่นจากแหล่งหินปูน (Limestone) ที่มีการใช้ในการทำผิวทางแบบสลอรี่ซีล (Slurry seal) ทั่วไป หินฝุ่นที่นำมาออกแบบส่วนผสมต้องมีการตรวจสอบขนาดคละ (Gradation) เพื่อทราบการกระจายขนาดของเม็ดวัสดุและใช้เป็นส่วนช่วยในการตัดสินใจในการเลือกปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน โดยหินฝุ่นที่นำมาออกแบบส่วนผสมเป็นหินฝุ่นจากหินปูนและมีการกระจายขนาดตามมาตรฐานของงานไมโครซีลชนิดที่ 2 (Type II) การตรวจสอบค่าทรายสมมูล (Sand equivalent) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัดส่วนระหว่างฝุ่น หรือวัสดุประเภทเหมือนดินเหนียวกับวัสดุเม็ดหยาบพวกกรวดหรือทราย การทดสอบหาค่าความสึกหรอของมวลรวม (Coarse aggregate) โดยใช้เครื่อง Los Angeles abrasion เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสึกหรอของหินย่อยกรวดย่อยและวัสดุมวลหยาบ โดยค่าการทดสอบขนาดคละของแหล่งหิน

แสดงดังตารางที่ 4.3 จากแหล่งวัสดุมวลรวมที่ใช้พบว่า วัสดุมวลรวมจากราชบุรี ค่าการทดสอบหาขนาดคละและค่าทรายสมมูลไม่ผ่านตามมาตรฐาน เนื่องจากมีส่วนที่เป็นดินเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณที่สูงเกินมาตรฐาน สำหรับการทดสอบค่า WTAT ใช้อัตราส่วนการผสมเหมือนกับตอนที่ 4.2.1 แต่เปลี่ยนแหล่งวัสดุมวลรวม โดยผลการทดสอบค่า WTAT แสดงดังรูปที่ 4.35 พบว่าการใช้แหล่งหินจากราชบุรี นครสวรรค์ และ สระบุรี ได้ค่า WTAT เท่ากับ 2299.7 g/m^2 , 2138.5 g/m^2 และ 1974.0 g/m^2 ตามลำดับ ซึ่งค่า WTAT จากแหล่งวัสดุมวลรวมจากราชบุรีให้ค่าสูงกว่าการใช้แหล่งวัสดุมวลรวมจากนครสวรรค์และสระบุรี เนื่องจากแหล่งวัสดุมวลรวมจากราชบุรีมีปริมาณของฝุ่น (วัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100) เป็นส่วนผสมอยู่มากเกินมาตรฐาน ดังนั้นจึงมีส่วนละเอียดอยู่ในปริมาณที่สูง พื้นที่ผิวของวัสดุมวลรวมมากขึ้น ทำให้ปริมาณยางมะตอยอิมัลชันที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการเคลือบเนื้อวัสดุมวลรวมได้ทั่วถึง ดังนั้นแหล่งวัสดุมวลรวมที่เหมาะสมกับยางมะตอยอิมัลชันที่ได้รับการปรับปรุงนี้คือวัสดุมวลรวมจากนครสวรรค์และสระบุรี ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวม มีขนาดของส่วนหยาบและปริมาณฝุ่นที่เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่เหมาะสม อิมัลชันที่ใช้จึงสามารถเคลือบวัสดุมวลรวมได้ความหนาที่เหมาะสมกว่า ค่า WTAT จึงต่ำ ซึ่งสามารถทนต่อการขัดถูที่สภาวะเปียกชื้นได้ดี

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบขนาดคละของแหล่งหินที่ต่างกัน

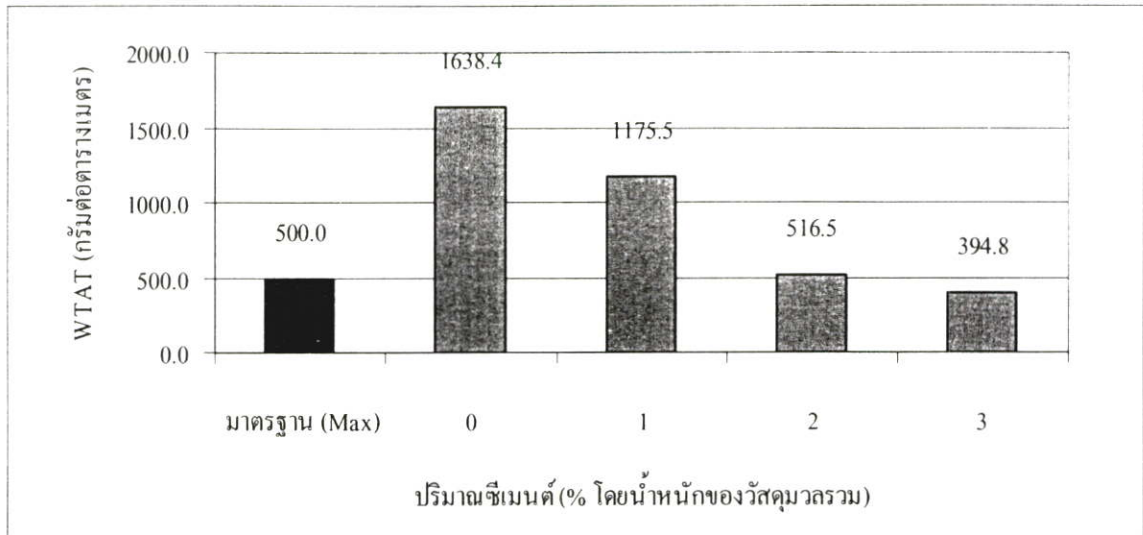
แหล่งวัสดุมวลรวม	หินฝุ่น ชนิดที่ 2	ราชบุรี	นครสวรรค์	สระบุรี
ขนาดของตะแกรง	ผ่านตะแกรงได้ร้อยละ			
9.5 มม. (3/8 นิ้ว)	100	100	100	100
4.75 มม. (เบอร์ 4)	90-100	99.2	97.2	100
2.36 มม. (เบอร์ 8)	65-90	78.0	71.4	76.0
1.18 มม. (เบอร์ 16)	45-70	51.2	46	53.2
600 ไมครอน (เบอร์ 30)	30-50	36.7	30.2	38.3
300 ไมครอน (เบอร์ 50)	18-30	28.5	20.1	26.1
150 ไมครอน (เบอร์ 100)	10-21	22.9	14.6	18.5
75 ไมครอน (เบอร์ 200)	5-15	18.2	11.2	14.4
Sand equivalent	>65	56.3	69.0	66.0



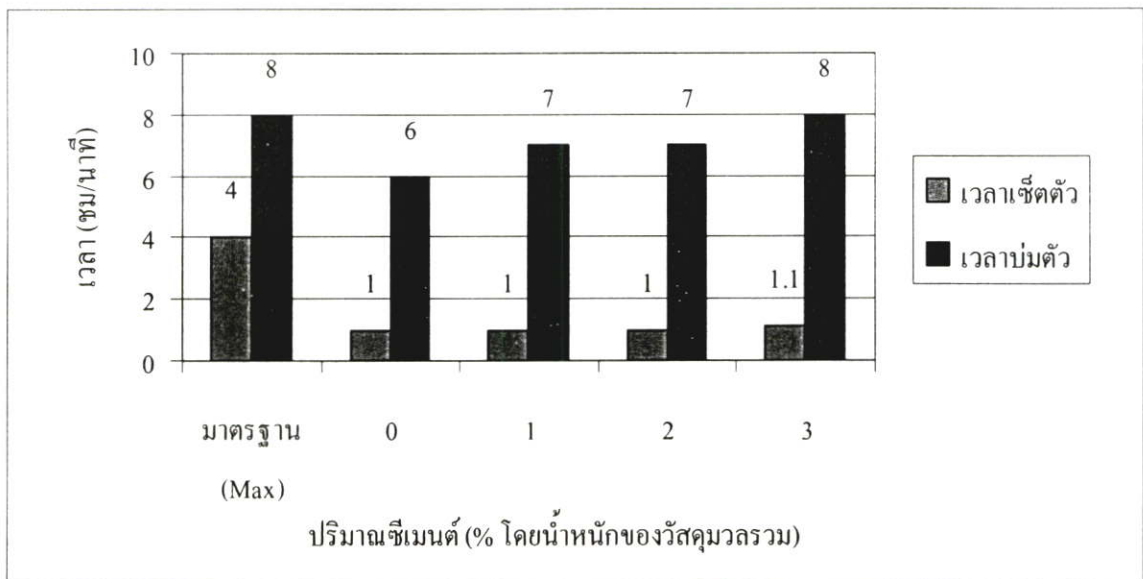
รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบค่า WTAT จากการศึกษาผลของแหล่งวัสดุรวม

4.2.3 ผลของปริมาณซีเมนต์

จากการทดสอบตอนที่ 4.2.1 และ 4.2.2 ทำให้สามารถเลือกปริมาณสารเติมแต่งและแหล่งวัสดุรวมได้โดยพิจารณาแหล่งวัสดุรวมจากนครสวรรค์และสระบุรี เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน มีการกระจายขนาดของเม็ดวัสดุและค่าทรายสมมูลที่เหมาะสม แต่เนื่องจากค่า WTAT ยังสูง แสดงว่าส่วนผสมยังมีการยึดติดที่ไม่ดีพอ จึงเกิดการหลุดออกได้ง่าย ดังนั้นจึงปรับปริมาณซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนที่เพิ่มความแข็งแรงและช่วยยึกระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมให้อยู่ด้วยกัน โดยปรับปริมาณซีเมนต์ที่ 0%, 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุรวม และเพิ่มปริมาณขางมะตอยอิมัลชันจาก 15% เป็น 16% โดยน้ำหนักของวัสดุรวม เนื่องจากค่า WTAT สูงกว่ามาตรฐานมาก และใช้แหล่งวัสดุรวมจากนครสวรรค์ทดสอบก่อน ซึ่งค่าการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.37



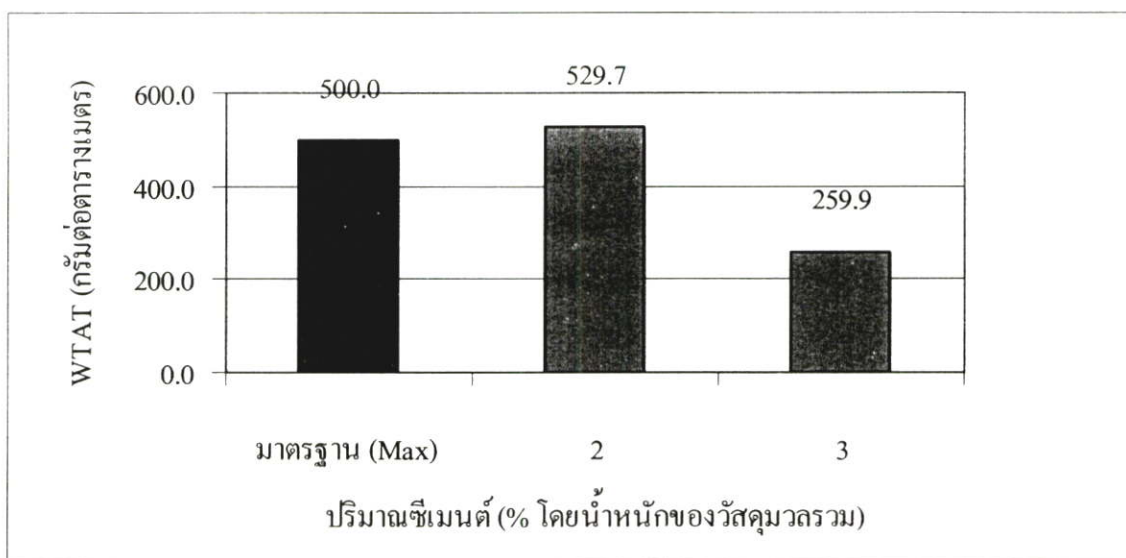
รูปที่ 4.36 ผลการทดสอบค่า WTAT จากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุมวลรวมจากนครสวรรค์)



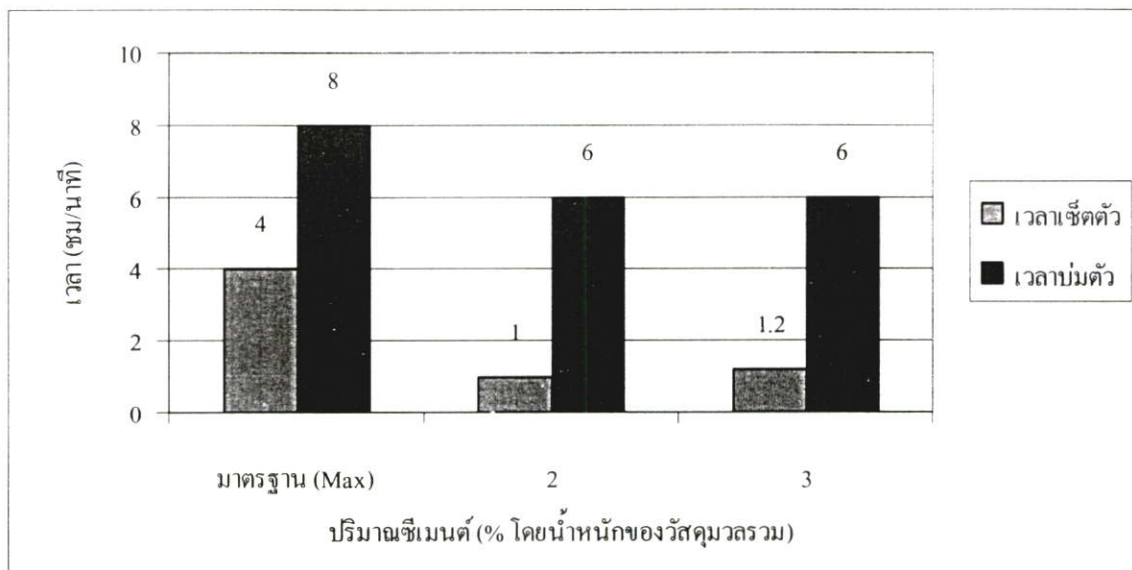
รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบเวลาเซ็ตตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุมวลรวมจากนครสวรรค์)

ปริมาณซีเมนต์ที่ 0%, 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ค่า WTAT เท่ากับ 1638.4 g/m², 1175.5 g/m², 516.5 g/m² และ 394.8 g/m² ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.36 จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่า WTAT ลดลง เนื่องจากมีส่วนช่วยในการยึดติดมากขึ้น แต่เวลาเซ็ตตัวและบ่มตัวมากขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.37 เนื่องจากเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งซีเมนต์มีความเป็นด่าง จึงเป็นการเพิ่มความเป็นด่าง

ให้แก่ส่วนผสม ส่งผลให้การแตกตัวของอิมัลชันช้าลง เวลาเซตตัวและบ่มตัวจึงมากขึ้น สำหรับปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 2% และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม จึงทดสอบปริมาณซีเมนต์นี้กับแหล่งวัสดุผสมรวมจากสระบุรี โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 ที่ปริมาณซีเมนต์ 2% และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม ค่า WTAT เท่ากับ 529.7 g/m^2 และ 259.9 g/m^2 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.38 ซึ่งพบว่าค่า WTAT ลดลง เนื่องจากส่วนผสมเกิดการยึดติดที่ดีขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการเซตตัวมากขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.39 ซึ่งจากการทดสอบให้ผลเป็นไปในแนวเดียวกันกับแหล่งวัสดุผสมรวมจากนครสวรรค์ คือเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่า WTAT ลดลง แต่เวลาเซตตัวและบ่มตัวมากขึ้น ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม และแหล่งวัสดุผสมรวมที่เหมาะสมคือจากสระบุรี เนื่องจากใช้เวลาดำบับน้อยกว่าและค่า WTAT ต่ำกว่า ซึ่งค่า WTAT ที่ปริมาณซีเมนต์ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม จากแหล่งวัสดุผสมรวมจากสระบุรีและนครสวรรค์เท่ากับ 259.9 g/m^2 และ 394.8 g/m^2 ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการเซตตัวเท่ากับ 1 ชั่วโมง 20 นาที และ 1 ชั่วโมง 10 นาที ตามลำดับ เวลาบ่มตัวที่สามารถเปิดการจราจรได้เท่ากับ 6 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงว่าแหล่งวัสดุผสมรวมจากสระบุรีมีความเหมาะสมกับยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ปรับปรุงมากกว่า



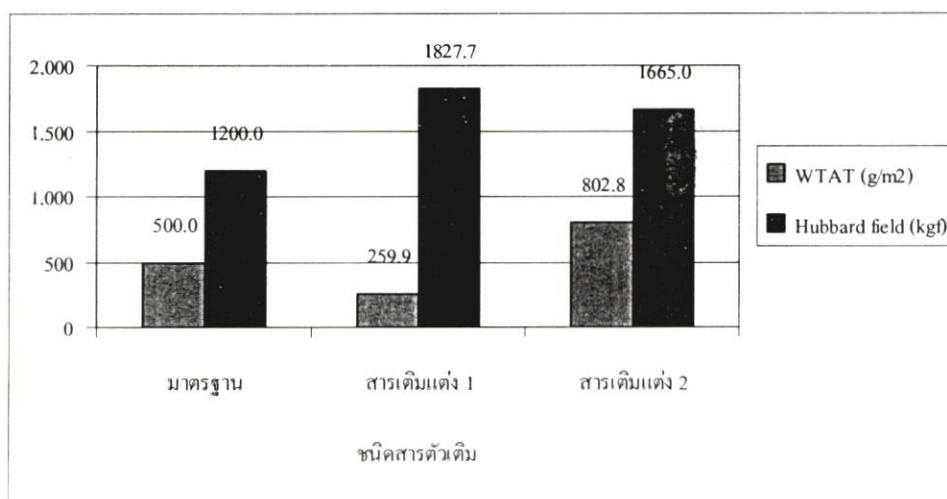
รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบค่า WTAT จากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุผสมรวมจากสระบุรี)



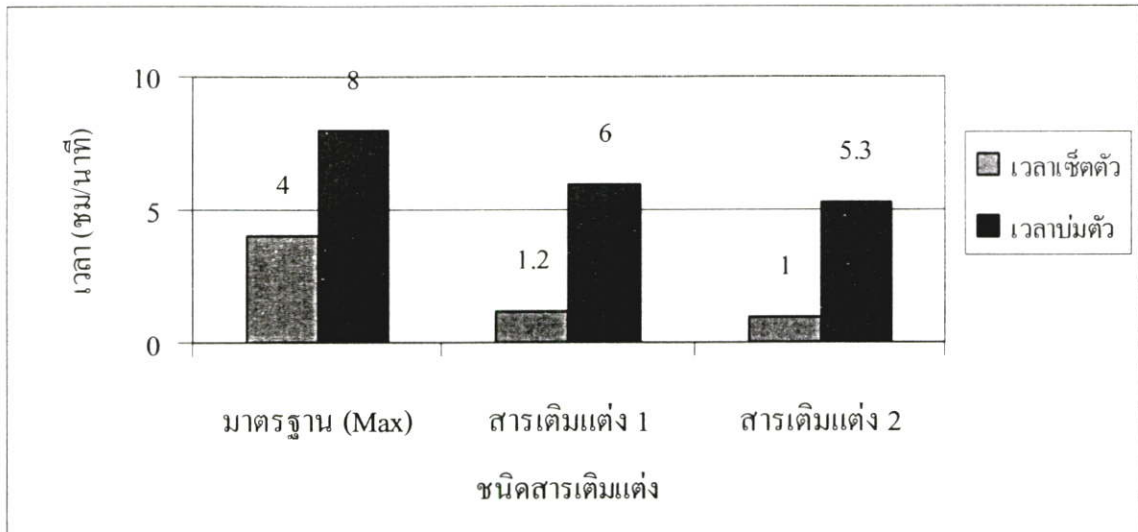
รูปที่ 4.39 ผลการทดสอบเวลาเซตตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของปริมาณซีเมนต์ (วัสดุผสมรวมจากสระบุรี)

4.2.4 ผลของชนิดสารเติมแต่ง

สารเติมแต่งทำหน้าที่ปรับปรุงที่พื้นผิวของวัสดุผสมรวม ทำให้เนื้อเยื่อสามารถเคลือบหรือยึดติดกับวัสดุผสมรวมได้ ดังนั้นชนิดของสารเติมแต่งจึงมีความสำคัญ ชนิดของสารเติมแต่งที่ศึกษามี 2 ชนิดคือ สารเติมแต่ง 1 (สารประกอบไนเตรต) และสารเติมแต่ง 2 (สารประกอบคลอไรด์) ซึ่งจากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่ง ผลของแหล่งวัสดุผสมรวม และผลของปริมาณซีเมนต์ ทำให้สามารถเลือกอัตราส่วนผสมเบื้องต้นได้ โดยต่อไปเป็นการศึกษาถึงผลของสารเติมแต่ง ซึ่งเปลี่ยนชนิดของสารเติมแต่งจากสารเติมแต่ง 1 เป็นสารเติมแต่ง 2 โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.40 ผลการทดสอบค่า WTAT และค่า Hubbard field test จากการศึกษาค่าผลของชนิดสารเติมแต่ง



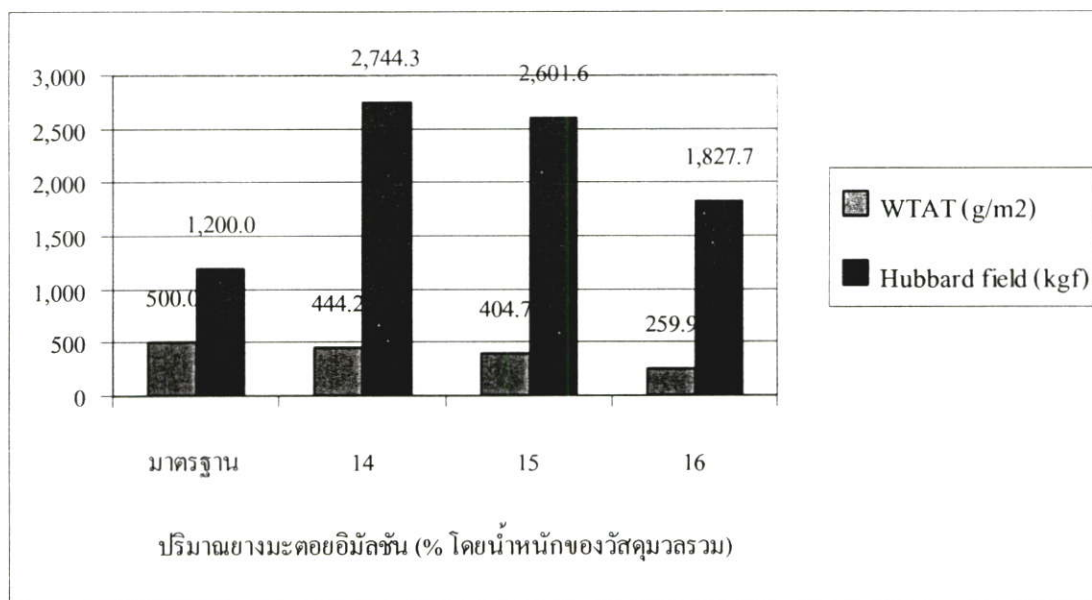
รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบเวลาเช็ดตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของชนิดสารเติมแต่ง

จากผลการทดสอบพบว่าสารเติมแต่ง 1 และสารเติมแต่ง 2 ค่า WTAT เท่ากับ 259.1 g/m^2 และ 802.8 g/m^2 ตามลำดับ ค่า Hubbard field test เท่ากับ 1827.7 Kgf และ 1665.0 Kgf ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.40 ซึ่งการใช้สารเติมแต่ง 1 ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า เนื่องจากเมื่อสารเติมแต่ง 1 ละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาคลายความร้อน จึงไม่เป็นการขัดขวางการยึดติดระหว่างวัสดุมวลรวมกับเนื้อยางมะตอยอิมัลชัน ส่วนสารเติมแต่ง 2 เมื่อละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาคลายความร้อนระเหยน้ำออกได้เร็ว แต่น้ำที่ระเหยออกเร็วนี้จะเป็นการขัดขวางการยึดติดระหว่างวัสดุมวลรวมกับเนื้อยางอิมัลชัน ส่งผลให้ค่า WTAT สูงกว่าและค่า Hubbard field test ต่ำกว่า ซึ่งแสดงว่าเกิดการยึดติดที่ไม่ดี สำหรับเวลาเช็ดตัวเมื่อใช้สารเติมแต่ง 1 และ 2 เท่ากับ 1 ชั่วโมง 20 นาที และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ และเวลาบ่มตัวเท่ากับ 6 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง 30 นาที ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.41 ซึ่งการใช้สารเติมแต่ง 2 ให้เวลาในการเช็ดตัวและบ่มตัวน้อยกว่า เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคลายความร้อน จึงระเหยน้ำออกได้เร็วกว่า แต่การใช้สารเติมแต่ง 2 เกิดการยึดติดที่ไม่ดีพอ ดังนั้นจากการศึกษาถึงผลของชนิดสารเติมแต่ง สารเติมแต่งที่เลือกศึกษาต่อคือ สารเติมแต่ง 1 เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมกว่าการใช้สารเติมแต่ง 2

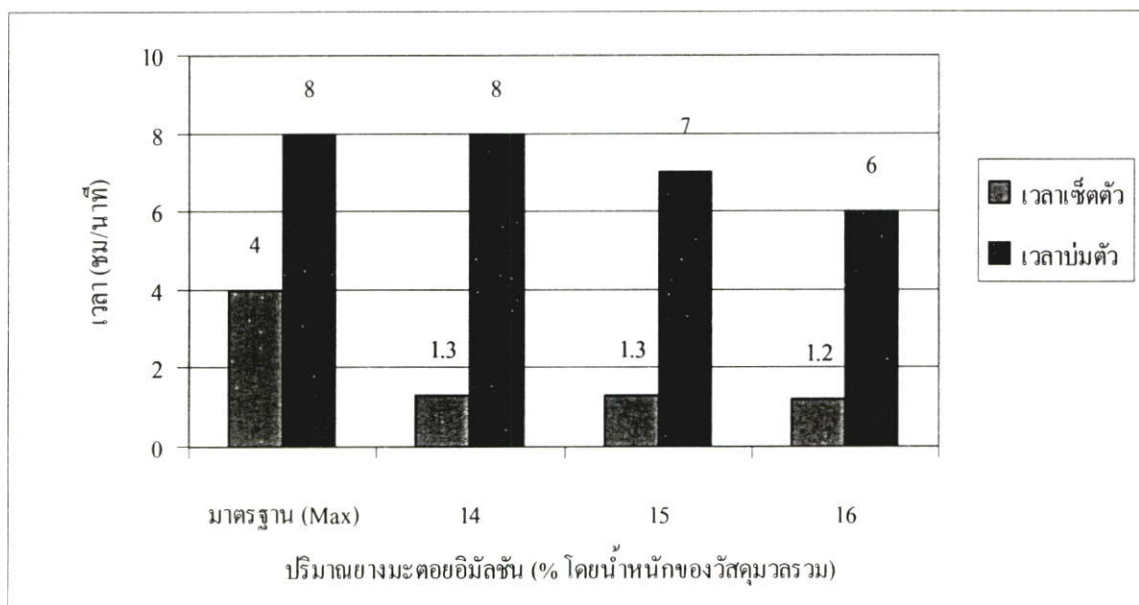
4.2.5 ผลของปริมาณอิมัลชัน

ปริมาณยางมะตอยอิมัลชันที่ใช้ อยู่ในช่วงของมาตรฐานการฉาบผิวทางแบบไมโครซิลิโคนชนิดที่ 2 เพื่อให้ได้ปริมาณเนื้อยางที่ไปเคลือบผิวของวัสดุมวลรวมที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบที่ผ่านมาได้ใช้ปริมาณยางมะตอยอิมัลชันที่ 16% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม โดยที่ปริมาณ 16% นี้ จะมีเนื้อยางที่ไปเคลือบผิววัสดุมวลรวมประมาณ 10.1% (Residue of asphalt emulsion 63%) ซึ่งตามมาตรฐานอยู่ที่ 7.5%-13.5% ดังนั้นจึงปรับปริมาณของยางมะตอยอิมัลชันที่ 14%, 15% และ 16%

โดยน้ำหนักของวัสดุรวม ซึ่งจะมีเนื้อเยื่อที่ไปเคลือบผิววัสดุรวมเท่ากับ 8.8%, 9.5% และ 10.1% ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.42 ผลการทดสอบค่า WTAT และค่า Hubbard field test จากการศึกษาผลของปริมาณยางมะตอยอีพ็อกซี



รูปที่ 4.43 ผลการทดสอบเวลาเซตตัวและบ่มตัวจากการศึกษาผลของปริมาณยางมะตอยอีพ็อกซี

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณยางมะตอยอิมัลชันเพิ่มมากขึ้น (ปริมาณน้อยอย่างมากขึ้น) ค่า WTAT ลดลง โดยที่ปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน 14%, 15% และ 16% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ค่า WTAT เท่ากับ 444.2 g/m^2 , 404.7 g/m^2 และ 259.9 g/m^2 ตามลำดับ ค่า Hubbard field test เท่ากับ 2744.3 kgf, 2601.6 kgf และ 1827.7 kgf ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.42 แสดงว่าเมื่อปริมาณยางมะตอยอิมัลชันเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการยึดติดที่ดีขึ้น เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางที่ไปเคลือบได้ความหนาที่เหมาะสม จึงช่วยยึดติดวัสดุมวลรวมได้ดีและส่งผลให้ทนต่อการขัดถูมากขึ้น แต่ค่า Hubbard field test น้อยลง เนื่องจากการทดสอบ Hubbard field เป็นการทดสอบการยึดติดระหว่างเนื้อยางกับวัสดุมวลรวมขนาดละเอียด ดังนั้นเมื่อปริมาณเนื้อยางที่มากกว่าอาจเคลือบได้ความหนาที่สูงกว่า ซึ่งส่วนความหนานี้จะเป็นส่วนที่รับแรงกดอัด โดยแรงดันระหว่างเนื้อยางกับเนื้อยางที่เคลือบด้วยความหนาที่มากนี้น้อยกว่าแรงดันจากการขัดถูของเม็ดวัสดุมวลรวมที่มีเนื้อยางเคลือบได้ความหนาที่เหมาะสม

สำหรับกรณีที่ใช้อิมัลชันน้อยเกินไป ทำให้ได้เนื้อยางที่ไปเคลือบวัสดุมวลรวมได้ไม่ดีพอ จึงเกิดการยึดติดที่ไม่ดี และกรณีที่ใช้ปริมาณอิมัลชันมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการไหลออกของยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งเป็นการเสียปริมาณยางมะตอยอิมัลชันโดยไม่ส่งผลดีต่อส่วนผสม และเนื้อยางที่ได้จะน้อยลง สำหรับผลการทดสอบเวลาเช็ดตัวและบ่มตัว แสดงดังรูปที่ 4.43 ที่ปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน 14% และ 15% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม เวลาเช็ดตัวเท่ากับ 1 ชั่วโมง 30 นาที และเวลาบ่มตัวเท่ากับ 8 ชั่วโมง และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ และที่ปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน 16% เวลาเช็ดตัวเท่ากับ 1 ชั่วโมง 20 นาที และเวลาบ่มตัวเท่ากับ 6 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณอิมัลชันมากขึ้นเวลาที่ใช้ในการเช็ดตัวไม่ต่างกันเนื่องจากปริมาณน้ำที่ระเหยมีปริมาณใกล้เคียงกันจึงแห้งตัวในเวลาใกล้เคียงกัน สำหรับเวลาบ่มตัวเพื่อให้สามารถเปิดการจราจรได้พบว่า เมื่อปริมาณยางมะตอยอิมัลชันมากขึ้น เวลาที่ใช้ลดลงเนื่องจากส่วนผสมมีเนื้อยางที่เคลือบอยู่ทำให้สามารถต้านทานแรงบิด (Torque) ได้ดีกว่า เวลาที่ใช้เพื่อให้ได้ค่าแรงบิด (Maximum torque) มีค่ามากกว่า 20 กิโลกรัมเซนติเมตร (kg.cm) หรือหวัคคหมุมได้อย่างอิสระจึงใช้น้อยกว่า

ดังนั้นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.4 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่ 2

สารเคมี	ปริมาณ (% โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม)
ซีเมนต์	3
สารเติมแต่ง 1	2
ยางมะตอยอิมัลชัน	16
น้ำ	15*

หมายเหตุ *สามารถปรับเพื่อให้ค่าการไหลอยู่ในช่วงที่กำหนด

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบจากการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่ 2

การทดสอบ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน
ค่าการไหล (mm)	18.8*	10-20
WTAT (g/m^2)	259.9	<500
Hubbard field (kgf)	1827.7	>1200
เวลาเซตตัว (ชั่วโมง/นาที)	1.2	<4
เวลาบ่มตัว (ชั่วโมง/นาที)	6	<8

หมายเหตุ *สามารถปรับค่าการไหลได้โดยการเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำ

จากผลการทดสอบที่ได้ ได้ส่งสูตรการผสมเบื้องต้นดังตารางที่ 4.4 เข้าทดสอบกับกรมทางหลวงซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีความชำนาญเกี่ยวกับถนนลาดยางมะตอย เป็นผู้ทำการตรวจสอบความถูกต้อง และผลการตรวจสอบผลการออกแบบส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดของกรมทางหลวง โดยผลการตรวจสอบที่ได้ ได้ปรับเปลี่ยนโรงไม่วัสดุผสม โดยโรงไม้ที่เลือกใช้เป็นแหล่งเดียวกันกับการใช้ในการออกแบบส่วนผสมคือจากจังหวัดสระบุรี และเป็นโรงไม้ที่อยู่ในบริเวณหน้าผาที่ไม่วัสดุผสมเดียวกัน จากการตรวจสอบวัสดุผสมเบื้องต้น พบว่าผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของวัสดุผสม โดยผลการตรวจสอบวัสดุผสมแสดงดังตารางที่ 4.6 และผลการออกแบบส่วนผสมจากกรมทางหลวงแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจสอบการกระจายขนาดและค่าทรายสมมูลของวัสดุรวมจากสระบุรีที่
ส่งเข้ากรมทางหลวงเพื่อตรวจสอบส่วนผสม

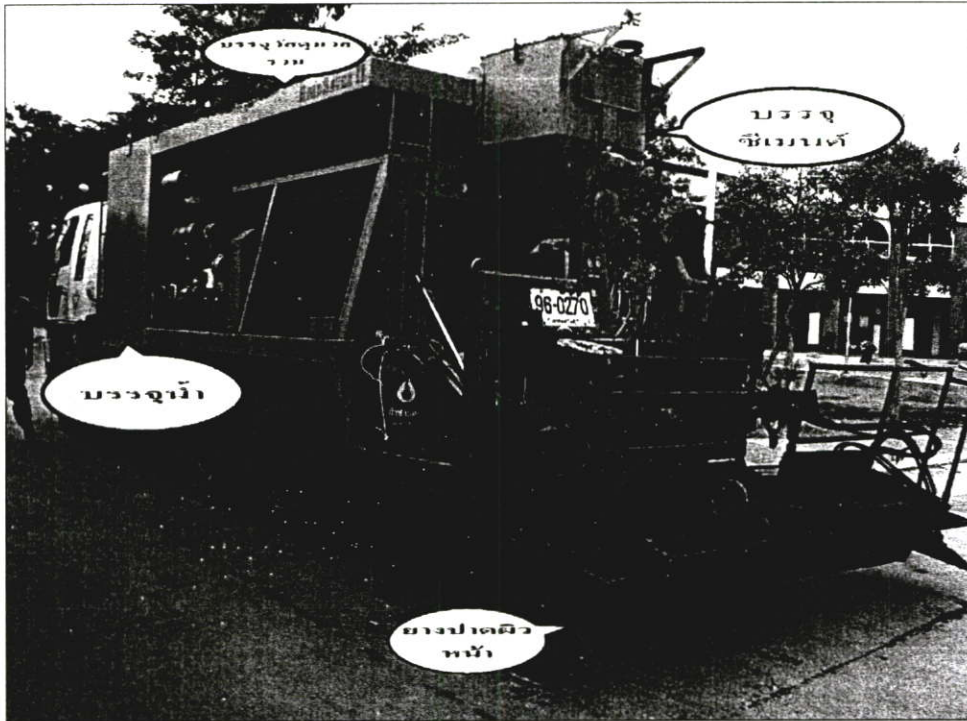
แหล่งหิน	สระบุรี	หินฝุ่นชนิดที่ 2
ขนาดของตะแกรง	ผลการตรวจสอบผ่านตะแกรงได้ ร้อยละ	มาตรฐานผ่านตะแกรงได้ ร้อยละ
9.5 มม. (3/8 นิ้ว)	100	100
4.75 มม. (เบอร์ 4)	98.3	90-100
2.36 มม. (เบอร์ 8)	77	65-90
1.18 มม. (เบอร์ 16)	52.7	45-70
600 ไมครอน (เบอร์ 30)	30.9	30-50
300 ไมครอน (เบอร์ 50)	20.8	18-30
150 ไมครอน (เบอร์ 100)	15.5	10-21
75 ไมครอน (เบอร์ 200)	12.5	5-15
Sand Equivalent	68	>65

ตารางที่ 4.7 ผลการออกแบบส่วนผสมจากกรมทางหลวง

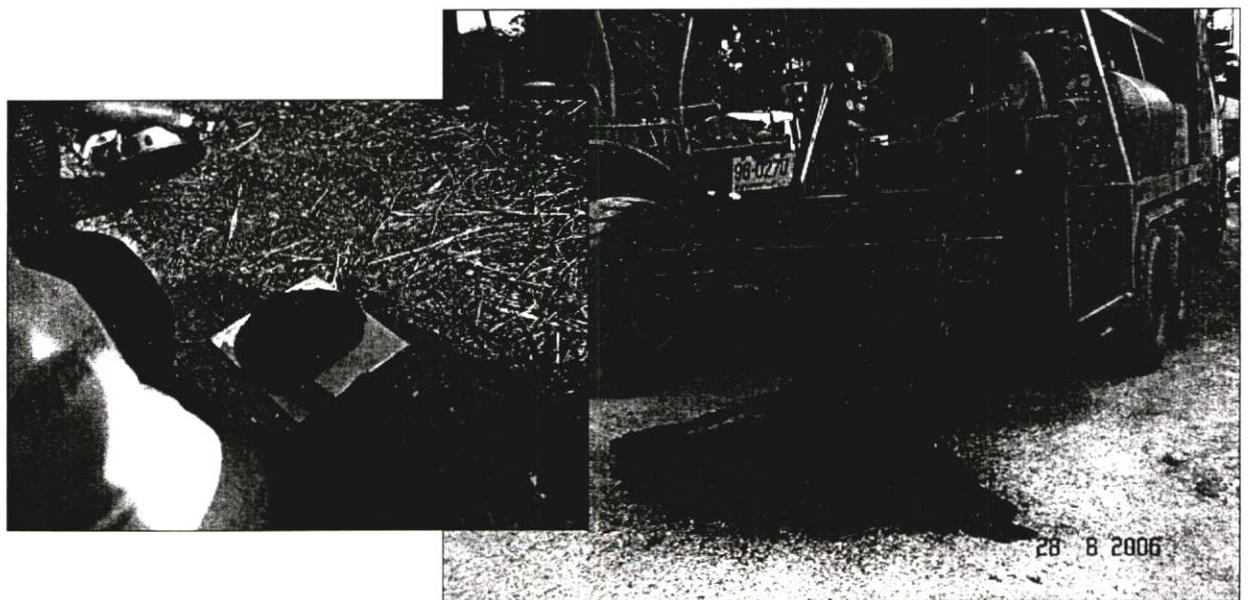
การทดสอบ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน
ค่าการไหล (mm)	13	10-20
WTAT (g/m^2)	442.4	<500
Hubbard field (kgf)	2982.0	>1200
เวลาเซ็ดตัว (ชั่วโมง/นาที)	55 นาที	<4
เวลาบ่มตัว (ชั่วโมง/นาที)	4.32	<8

4.3 การนำผลงานวิจัยไปใช้ในการลาดถนนจริง

จากผลการออกแบบที่ได้ ได้นำผลการออกแบบส่วนผสมดำเนินการลาดผิวถนนเส้นสุวินทวงศ์ ช่วงหลักกิโลเมตรที่ 48+000 – 49+000 เป็นระยะทาง 400 เมตร โดยลักษณะการปฏิบัติงานแสดงดัง รูปที่ 4.44-4.50



รูปที่ 4.44 ลักษณะของรถลาดผิวทางเสลอร์ซีด



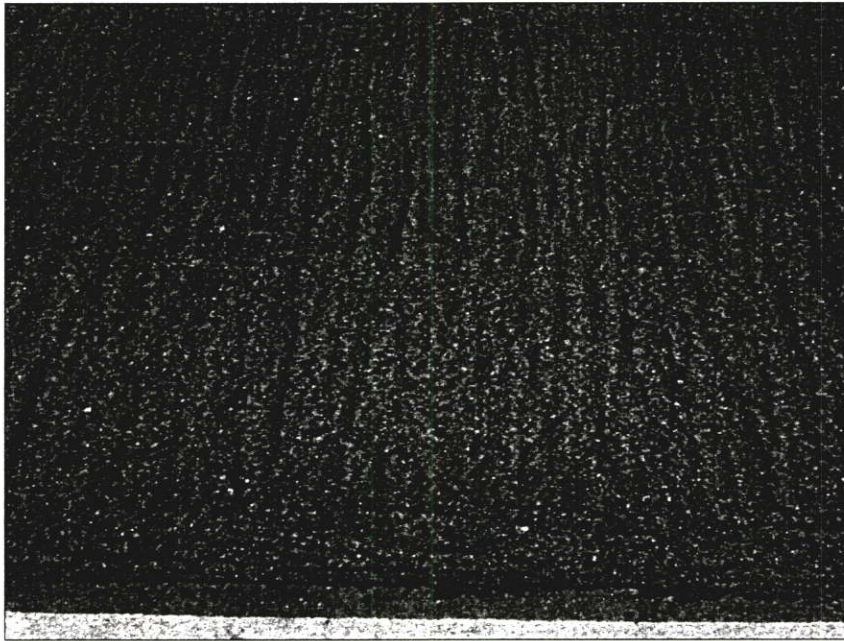
รูปที่ 4.45 ตรวจสอบส่วนผสมก่อนลาดผิวถนนจริง



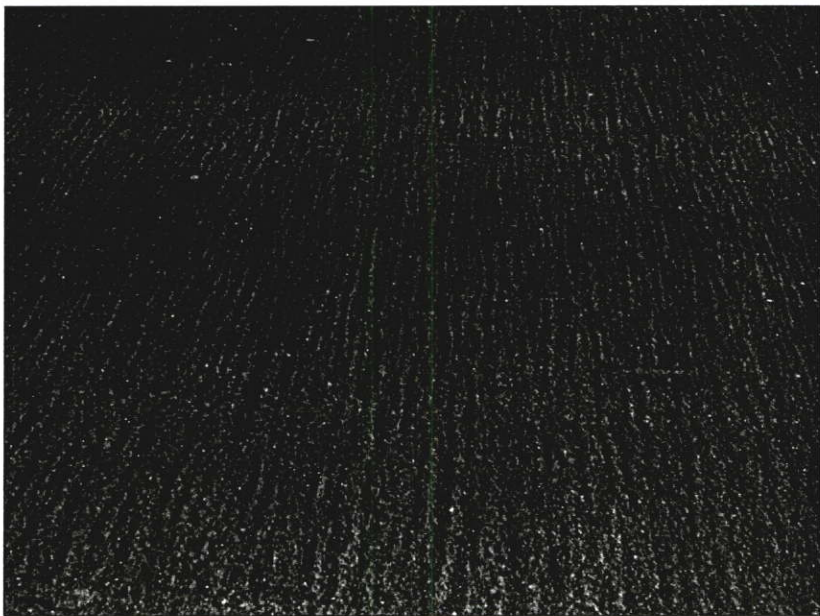
รูปที่ 4.46 เริ่มฉาบผิวถนน



รูปที่ 4.47 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซีต



รูปที่ 4.48 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซิลและทิ้งไว้ 1 วัน



รูปที่ 4.49 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซิลและทิ้งไว้ 1 อาทิตย์



รูปที่ 4.50 ลักษณะผิวถนนที่ฉาบผิวด้วยไมโครซิลและทิ้งไว้ 1 เดือน

จากการฉาบผิวถนนจริงด้วยการฉาบผิวแบบไมโครซิลพบว่า ให้ลักษณะของผิวถนนที่ดี คือ เพิ่มความฝืดของผิวถนนมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มการยึดเกาะของล้อรถ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป พบว่าลักษณะของผิวถนนยังคงสภาพเดิม ไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นจากการทดสอบขยงมะตอย อิมัลชันและการออกแบบส่วนผสมภายในห้องปฏิบัติการ สามารถนำไปใช้งานและเกิดการ พัฒนาขึ้นสู่ภาคการผลิตได้จริง

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

4.4.1 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของยางมะตอยอิมัลชัน

การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน จากตารางที่ 4.8 พบว่า ต้นทุนรวมกิโลกรัมละ 14.76 บาท เมื่อเปรียบเทียบกับยางมะตอยอิมัลชันที่มีขายตามท้องตลาดแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยยางมะตอยอิมัลชันที่ไม่ได้รับการดัดแปรต้นทุนกิโลกรัมละ 11.38 บาท และยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ดัดแปรด้วยยางพารา (Para slurry seal) กิโลกรัมละ 16.30 บาท ซึ่งการผลิตยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน มีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากราคาแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยยางมะตอยที่ได้รับการดัดแปรมีสมบัติที่ดี ซึ่งเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของผิวถนนและเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้ยางพาราภายในประเทศมากขึ้น

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติผสมน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน

สารเคมี	ราคา (บาท/ กิโลกรัม)	ปริมาณ (% โดย น้ำหนัก) 100 กรัม	ปริมาณ (% โดย น้ำหนัก) 1 กิโลกรัม	ราคา (บาท/ กิโลกรัม)
น้ำ	0	23.53	235.3	0
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	42.50	0.3	3	0.1275
แลคติกเคซีน	270	0.7	7	1.89
วินโซลเรซิน	72.00	0.6	6	0.432
นอฟโก เอ็น เอกซ์ แซด	113.00	0.05	0.5	0.0565
ทรอยแซน 198	95.00	0.15	1.5	0.1425
น้ำยางเอสปีอาร์อิมัลชัน	22.00	16.92	169.2	3.7224
น้ำยางข้น	73.00	3.5	35	2.555
เอสเอ็นเอ60	24.15	0.25	2.5	0.060375
ยางมะตอย	10.70	54	540	5.778
			ราคายางมะตอย อิมัลชัน (บาท/กิโลกรัม)	14.76

ตารางที่ 4.9 ราคาขงมะตอยอิมัลชันชนิดต่างๆ

ชนิดของขงมะตอยอิมัลชัน	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
ขงมะตอยอิมัลชันที่ไม่ได้ค้ดแปร (CSS-1h)	11.38*
ขงมะตอยอิมัลชันที่ได้ค้ดแปรด้วยขงพารา (Para slurry seal, CSS-1hp)	16.30*
ขงมะตอยอิมัลชันที่ได้ค้ดแปรด้วยน้ำขงธรรมชาติผสมน้ำขงสไตรีนบิวตะไดอิน (Microseal, SS-1hp)	14.76

หมายเหตุ *ราคาตลาด (ธันวาคม 2549) โดยประมาณ

4.4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของการฉาบผิวแบบไมโครซีล

จากการฉาบผิวทางแบบไมโครซีลพบว่าต้นทุนในส่วนขงส่วนผสมราคา กิโลกรัมละประมาณ 3 บาท โดยการแจกแจงต้นทุนในการฉาบผิวทางแสดงดังตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เฉพาะส่วนผสมไมโครซีล โดยในการทำงานจริงจะมีส่วนขงการจ้างรถฉาบผิวทาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางและปริมาณขงการฉาบผิวถนน

ตารางที่ 4.10 ราคาต้นทุนส่วนผสมไมโครซีล

ส่วนผสม	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก) 100 กรัม	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก) 1 กิโลกรัม	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
หินฝุ่น (จ.สระบุรี)	0.055	100	1	0.055
สารตัวเติม 1	22	2	0.02	0.44
ซีเมนต์	3	3	0.03	0.09
ขงมะตอยอิมัลชัน	14.76	16	0.16	2.3616
			Price/kg	2.95

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการเติมน้ำยางธรรมชาติในรูปของน้ำยางข้น (Concentrate latex) ชนิดแอมโมเนียมาก (High ammonia) ผสมกับน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene butadiene latex) เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันดีขึ้น และจากสูตรการทดลองเบื้องต้นได้ทำการออกแบบผิวถนนแบบไมโครซีล (Microseal) เพื่อให้สูตรการผสมในส่วนของยางมะตอยอิมัลชันสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยจากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การศึกษาในส่วนของยางมะตอยอิมัลชัน

5.1.1 ผลของเกรดน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอินและอัตราส่วน SBR:NR

จากการศึกษาถึงผลเกรดของน้ำยางสไตรีนบิวตะไดอินและอัตราส่วน SBR:NR พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 65:35 และเกรดน้ำยาง 1712 เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่เหมาะสม โดยผลการทดสอบในส่วนของอิมัลชันคือ การตกตะกอนที่ 24 ชั่วโมง (Sedimentation 24 hours) การตกตะกอนที่ 7 วัน (Settlement 7 days) การทดสอบขนาดอนุภาคโดยวัดเป็นปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนร่อนเบอร์ 20 (850 ไมครอน, Sieve test) การทดสอบความหนืดแบบเซโบลท์ฟูโรล (Saybolt furol viscosity) และผลการทดสอบกากของอิมัลชันที่ได้จากการระเหย (Residue by evaporation) โดยมีการทดสอบคือ การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening point) การทดสอบค่าการยืดดึง (Ductility) การทดสอบค่าเพนิเทรชัน (Penetration) การทดสอบค่าการคืนตัว (Elastic recovery) และการทดสอบความเหนียวและเทนacity (Toughness-Tenacity) พบว่าให้ผลการทดสอบที่ดี เนื่องจากยางมะตอยและยางเอสปีอาร์เกิดการกระจายตัวที่ดี กรณีที่อัตราส่วนระหว่างยางเอสปีอาร์ต่อยางธรรมชาติมากขึ้น คือมีปริมาณของยางธรรมชาติสูงขึ้นพบว่า เกิดการแยกวัฏภาคขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่งผลให้ความเข้ากันได้กับยางเอสปีอาร์และยางมะตอยน้อยลง สมบัติที่ทดสอบได้จึงต่ำลงเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติสูงขึ้น โดยมีปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้เท่าเดิม และการใช้น้ำยางเอสปีอาร์เกรด 1712 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า ขนาดของไมเซลล์ (Micelle) ที่เล็กกว่าและมีความหนืดต่ำกว่าน้ำยางเอสปีอาร์เกรดเคเอสแอล341 ทำให้สามารถเกิดการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้กากที่ได้จากการระเหยมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนเสริมแรงกระจายตัวดี สมบัติต่างๆจึงเหมาะสมเมื่อมีการใช้อัตราส่วน SBR:NR ที่ 65:35 และเกรดน้ำยาง 1712

5.1.2 ผลของปริมาณเนื้อยางแห้ง

จากการศึกษาในส่วนของอัตราส่วนระหว่างยางเอสปีอาร์ต่อยางธรรมชาติและเกรคน้ำยาง เอสปีอาร์ ทำให้สามารถเลือกสูตรการผสมเบื้องต้นได้ และนำสูตรการผสมเบื้องต้นมาศึกษาผลของ ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, %DRC) พบว่า การใช้ปริมาณเนื้อยางแห้งที่ 6% ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีส่วนของเนื้อยางที่เป็นส่วนเสริมแรงที่เหมาะสมโดยไม่เกิดการแยกวัฏภาคขึ้น และเมื่อมีปริมาณเนื้อยางแห้งที่สูงเกินไป ส่งผลให้เกิดการแยกวัฏภาคขึ้น และกรณีที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งน้อยเกินไป ส่งผลให้ส่วนเสริมแรงไม่เพียงพอ สมบัติต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบจึงต่ำกว่า

5.1.3 ผลของปริมาณอิมัลซิไฟเออร์

จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำยางเอสปีอาร์ต่อน้ำยางธรรมชาติ เกรคน้ำยางเอสปีอาร์และ ปริมาณเนื้อยางแห้ง ทำให้สามารถเลือกสูตรการผสมเบื้องต้นได้ และจากการศึกษาถึงผลของ ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) พบว่าปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ที่เหมาะสมคือการใช้ปริมาณ ของวินโซลเรซิน (Vinsole[®] resin) 0.6% และปริมาณแลคติกเคซีน (Lactic casein) 0.7% โดย น้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดสอบในส่วนของอิมัลชันและกากที่ได้จากการระเหยที่เหมาะสม ไม่เกิดการแยกวัฏภาคขึ้น ผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งการใช้ปริมาณของวินโซลเรซินซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของยางมะตอยน้อยเกินไป ส่งผลให้ยางมะตอยไม่สามารถแตกตัว กระจายเป็นอนุภาคขนาดเล็กในอิมัลชันได้ ดังนั้นขนาดของอนุภาคจึงยังคงขนาดใหญ่อยู่ใน อิมัลชัน และการใช้ปริมาณวินโซลเรซินที่มากเกินไป มีส่วนของวินโซลเรซินที่ยังคงค้างอยู่ซึ่ง จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ และขนาดของอนุภาคระหว่างยางมะตอยกับยางที่ใช้ ปรับปรุงเกิดความแตกต่างมากขึ้น ดังนั้นสมบัติที่ได้จากการทดสอบจึงต่ำลงเมื่อปริมาณวินโซลเร ซินน้อยหรือมากเกินไป สำหรับปริมาณแลคติกเคซีนซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของยางธรรมชาติ ให้ผล การทดสอบในแนวทางเดียวกันคือ เมื่อปริมาณแลคติกเคซีนน้อยเกินไปจะไม่สามารถกระจายวัฏ ภาคของน้ำยางธรรมชาติให้กระจายออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้ ดังนั้นขนาดของไมเซลล์ของน้ำ ยางธรรมชาติจึงยังคงขนาดใหญ่อยู่ในอิมัลชัน ซึ่งส่งผลให้การตกตะกอนมากขึ้นและผลการ ทดสอบในส่วนของกากที่ได้จากการระเหยไม่ดี เนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาคขึ้น และการใช้ปริมาณ แลคติกเคซีนมากเกินไป ทำให้มีส่วนที่มากเกินไปทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ดังนั้นปริมาณของ วินโซลเรซินและแลคติกเคซีนที่เหมาะสมคือ 0.6% และ 0.7% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 5.1 โดยผลการทดสอบที่ได้เป็นผลการทดสอบที่ได้ส่ง สูตรเบื้องต้นเข้าทดสอบที่กรมทางหลวงซึ่งเป็นหน่วยงานที่ทำงานด้านงานถนนโดยตรงและเป็น หน่วยงานที่รับทดสอบงานยางมะตอยตามมาตรฐานของ ทลท.405/2538 และจากผลการทดสอบที่

ได้เมื่อทดสอบตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมตาม มอก.2157-2547 ให้ผลการทดสอบไม่ต่างจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.1 สูตรยางมะตอยอิมัลชันที่ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสม

สารเคมี	ปริมาณ (โดยน้ำหนัก)
ยางมะตอย	54
น้ำยางธรรมชาติ	3.5
น้ำยางเอสปีอาร์ (เกรด 1712)	16.92
วินโซลเรซิน	0.6
แลคติกเคซิน	0.7
เอสเอ็นเอ60	0.25
ทรอยแซน 198	0.15
นอฟโก เอ็น เอ็ก แซค	0.05
โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์	0.3
น้ำ	23.53

5.2 การศึกษาในส่วนของ การฉาบผิวทางแบบไมโครซีล

จากการศึกษาในส่วนของยางมะตอยอิมัลชัน ทำให้สามารถเลือกสูตรที่เหมาะสมเพื่อนำมาออกแบบผิวถนนต่อไป โดยเป็นการศึกษาการฉาบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่ 2 (Microseal type II) ซึ่งการจัดชนิดของไมโครซีลขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุผสมรวม (Aggregate) ที่ใช้ โดยการฉาบผิวทางแบบไมโครซีลชนิดที่สองเป็นการฉาบผิวทางที่มีการใช้มากที่สุด จึงได้เลือกเป็นไมโครซีลชนิดที่สองในการออกแบบผิวทาง โดยสมบัติที่ทำการศึกษาคือ การหาค่าความสึกกร่อนของหินหยาบ (หินขนาด 3/8 นิ้ว) การหาค่าส่วนประกอบของดินในวัสดุผสมรวม (Sand equivalent) การหาขนาดของเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (Gradation) การทดสอบหาค่าการไหลหรือความคงตัว (Consistency test) การทดสอบหาเวลาเซตตัวและบ่มตัว (Initial set time and Cure time) การทดสอบหาค่าการสึกกร่อนที่สภาวะเปียกชื้น (Wet track abrasion test, WTAT) และการทดสอบหาค่าความต้านทานการไหลตัวของยางมะตอยอิมัลชันจากตัวอย่าง (Hubbard field test)

5.2.1 ผลของปริมาณสารเติมแต่ง

สารเติมแต่งทำหน้าที่ปรับประจุที่พื้นผิวของวัสดุผสมรวม ทำให้เนื้อยางสามารถเคลือบหรือยึดติดกับวัสดุผสมรวมได้ โดยปริมาณสารเติมแต่งที่เหมาะสมคือ 2% โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม เนื่องจากให้ลักษณะของส่วนผสมที่แห้งตัวสมบูรณ์มีลักษณะสีดำ ซึ่งแสดงว่าการใช้สารเติมแต่งที่

2% เพียงพอต่อการเคลือบผิวของวัสดุมวลรวม กรณีที่ใช้สารเติมแต่งน้อยเกินไปพบว่า ให้ค่า WTAT ต่ำ แต่ปริมาณความเข้มข้นของสารเติมแต่งไม่สามารถเคลือบพื้นที่ผิวของวัสดุมวลรวมได้มากพอ โดยพิจารณาจากเนื้อของส่วนผสมที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้วมีสีออกน้ำตาลซึ่งเกิดจากการเคลือบของเนื้อยางที่ไม่เพียงพอ จึงเกิดการยึดติดระหว่างอิมัลชันกับวัสดุมวลรวมได้ไม่ดี กรณีเมื่อมีปริมาณของสารเติมแต่งมากขึ้น ทำให้ส่วนผสมมีส่วนของสารเติมแต่งมากเกินไปและค้างอยู่ในส่วนผสม ซึ่งส่วนที่มากเกินไปจะเป็นตัวขัดขวางการยึดติดระหว่างเนื้อยางกับวัสดุมวลรวม และสารเติมแต่งนี้มีคุณสมบัติดูดความชื้น ดังนั้นเมื่อมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ส่วนผสมที่แห้งตัวสามารถดูดความชื้นในอากาศได้มากขึ้น ทำให้ค่า WTAT ที่วัดในสภาวะเปียกชื้นสูงขึ้น และกรณีที่สารเติมแต่งมากกว่า 2% พบว่าให้สีของส่วนผสมที่มีสีดำน้อยกว่า ดังนั้นปริมาณของสารเติมแต่งที่เหมาะสมคือ 2% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม

5.2.2 ผลของแหล่งวัสดุมวลรวม

แหล่งวัสดุมวลรวมที่เหมาะสมกับยางมะตอยอิมัลชันที่ได้รับการปรับปรุงนี้คือวัสดุมวลรวมจากสระบุรี ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวม มีขนาดของส่วนหยาบและปริมาณฝุ่นที่เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่เหมาะสม อิมัลชันที่ใช้จึงสามารถเคลือบวัสดุมวลรวมได้ความหนาที่เหมาะสม ค่า WTAT จึงต่ำ ซึ่งสามารถทนต่อการขัดถูที่สภาวะเปียกชื้นได้ดี

5.2.3 ผลของปริมาณซีเมนต์

ซีเมนต์เป็นส่วนที่เพิ่มความแข็งแรงและช่วยยึดระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวมให้อยู่ด้วยกัน จากการทดสอบการออกแบบผิวทางพบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม เนื่องจากค่า WTAT ที่ต่ำ แสดงว่าเกิดการยึดติดที่ดี แต่เวลาเซตตัวและบ่มตัวมากขึ้น เนื่องจากซีเมนต์มีความเป็นด่าง จึงเป็นการเพิ่มความเป็นด่างให้แก่ส่วนผสม ส่งผลให้การแตกตัวของอิมัลชันช้าลง เวลาเซตตัวและบ่มตัวจึงมากขึ้น และจากผลการออกแบบพบว่าแหล่งวัสดุมวลรวมจากสระบุรีมีความเหมาะสมกับยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ปรับปรุงมากกว่า เนื่องจากใช้เวลาบ่มตัวน้อยกว่าและค่า WTAT ต่ำกว่า

5.2.4 ผลของชนิดสารเติมแต่ง

ชนิดของสารเติมแต่ง (Additive) ที่ศึกษามี 2 ชนิดคือ สารเติมแต่ง 1 (สารประกอบไนเตรต) และสารเติมแต่ง 2 (สารประกอบคลอไรด์) ซึ่งจากการศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งพบว่า การใช้สารเติมแต่ง 1 ให้ผลการทดสอบค่า WTAT และค่า Hubbard field test ที่ดีกว่า แต่เวลาในการเซตตัวและบ่มตัวนานกว่า เนื่องจากเมื่อสารเติมแต่ง 1 ละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน จึงไม่เป็นการขัดขวางการยึดติดระหว่างวัสดุมวลรวมกับเนื้อยางมะตอยอิมัลชัน ส่วนสารเติมแต่ง 2 เมื่อละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนระเหยน้ำออกได้เร็ว ทำให้เวลาในการเซตตัวและบ่มตัวน้อย

กว่า แต่น้ำที่ระเหยออกเร็วนี้จะเป็นการขัดขวางการยึดติดระหว่างวัสดุรวมกับเนื้อยางอิมัลชัน ส่งผลให้ค่า WTAT สูงกว่าและค่า Hubbard field test ต่ำกว่า ซึ่งแสดงว่าเกิดการยึดติดที่ไม่ดี ดังนั้นจากการศึกษาถึงผลของชนิดสารเติมแต่ง สารเติมแต่งที่เลือกศึกษาต่อคือ สารเติมแต่ง 1 เนื่องจากให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมกว่าการใช้สารเติมแต่ง 2

5.2.5 ผลของปริมาณอิมัลชัน

จากการศึกษาผลของปริมาณยางมะตอยอิมัลชัน ปริมาณที่เหมาะสมคือ 16% โดยน้ำหนักของวัสดุรวม โดยที่ปริมาณ 16% นี้ จะมีเนื้อยางที่ไปเคลือบผิววัสดุรวมประมาณ 10.1% (Residue of Asphalt emulsion 63%) ซึ่งตามมาตรฐานอยู่ที่ 7.5%-13.5% ซึ่งการใช้ปริมาณอิมัลชันที่น้อยเกินไป ทำให้ได้เนื้อยางที่ไปเคลือบวัสดุรวมได้ไม่เพียงพอ จึงเกิดการยึดติดที่ไม่ดี และกรณีที่ใช้ปริมาณอิมัลชันมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการไหลออกของยางมะตอยอิมัลชัน ซึ่งเป็นการเสียปริมาณยางมะตอยอิมัลชันโดยไม่ส่งผลดีต่อส่วนผสม และเนื้อยางที่ได้จะน้อยลงเนื่องจากไหลออกไปกับยางมะตอยอิมัลชัน รวมทั้งเป็นการสิ้นเปลืองปริมาณเนื้อยางโดยไม่จำเป็น

5.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติและราคาของชนิดยางมะตอยอิมัลชัน

จากการเปรียบเทียบสมบัติและราคาของยางมะตอยอิมัลชัน แสดงดังตารางที่ 5.2 และ 5.3 ซึ่งพบว่ายางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ ให้สมบัติที่ดี ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยราคาไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากการผลิตในปริมาณที่ไม่สูงมาก ดังนั้นต้นทุนในการผลิตจึงสูงกว่า ซึ่งหากมีการผลิตได้ในภาคอุตสาหกรรม ราคาต้นทุนจะน้อยลง

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของยางมะตอยอิมัลชันเพื่อลดต้นทุนในการผลิต เพื่อให้สามารถได้จริงในภาคอุตสาหกรรม
2. ศึกษาเพิ่มเติมในการออกแบบผิวทางแบบไมโครซีล เพื่อลดระยะเวลาในการเปิดการจราจรได้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของส่วนผสมให้ดีขึ้น และลดต้นทุนในการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณสารเติมแต่ง
3. เนื่องจากงานวิจัยนี้ สมบัติที่ได้จากการทดสอบเป็นการเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงและมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม โดยเป็นมาตรฐานสำหรับยางมะตอยอิมัลชันประเภทบวก ดังนั้นเพื่อให้เกิดการพัฒนาการนำยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบไปใช้งาน ได้จริงมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม จึงควรจัดทำมาตรฐานสำหรับยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบขึ้น

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของชนิดยางมะตอยอิมัลชัน

ลำดับที่	คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด	ชนิดของยางมะตอยอิมัลชัน			
				SS-Ihp (SBR+NR)	SS-Ihp (NR)	CSS-Ihp (Para slurry seal)	CSS-Ihp
1	ความหนืดเซโบลด์ฟูรอล	วินาที	20-100	32	26	36	30
2	การแยกชั้น ไม่น้อยกว่า 5 วัน ไม่เกิน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	7.5	4.98	-	6.98	7.98
3	เสถียรภาพต่อการเก็บ ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง	ร้อยละโดยน้ำหนัก	1.5	0.55	0.2	2.55	3.55
4	ปริมาณที่ล้างบนแรงขนาด 850 ไมโครเมตร (20 เมช) ไม่เกิน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	0.1	0.02	0.05	2.02	3.02
5	ประจุของอนุภาคแอสฟัลต์	/	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก
6	กาก ไม่น้อยกว่า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	57	64.79	61.9	66.79	67.79
กากที่เหลือจากการระเหย							
7	จุดอ่อนตัว ไม่น้อยกว่า	องศาเซลเซียส	60	87.1	55.9	89.1	90.1
8	ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic Recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	ร้อยละ	30	45	5	47	48
9	ความเหนียวและเหนียวดี (Toughness & Tenacity) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร ความเหนียว ไม่น้อยกว่า เหนียวดี ไม่น้อยกว่า	กิโลกรัมเซนติเมตร	40 20	159.35 89.22	- -	161.35 91.22	162.35 92.22
10	เพนแทรกชัน อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	/	40-90	44.8	66	46.8	47.8
11	ความยืดดึง ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อวินาที ไม่น้อยกว่า	เซนติเมตร	40	>100	-	80	>100
11	การละลายในโทลูอีน ไม่น้อยกว่า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	97.5	-	-	99.9	99.9

ตารางที่ 5.3 ผลเปรียบเทียบราคาและสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันชนิดต่างๆ ในการออกแบบ
ส่วนผสม

Type of Asphalt emulsion	Wet track abrasion (g/m ²)	Hubbard field (kgf)	Interial set time (min)	Cure time (min)	Price of Emulsion Bath/kg
CSS-1h	500	1500	30	120	11.38
Para slurry seal	300	2000	10	30	16.30
Microseal (SBR+NR)	246	2206	50	270	14.76

เอกสารอ้างอิง

- [1] Peter Schilling and Everett Crews. “Assigned to Westvaco Corporation.” U.S. Patent No. 5772749, June 30 1998. New York.
- [2] Y. Becker., M.P. Mendez. and Y. Rodriguez. “Polymer Modified Asphalt” **Vision Technologica**, 9(1), 2001. pp. 39-50.
- [3.] “Thailand’s Synthesis Rubber Outlook” **The Rubber International Magazine**, Vol 6, No 8, 83, August 2004.
- [4] ทวีศักดิ์ ยศยิ่งธรรมกุล. “การปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2546.
- [5] Arnold J. Holdberg. “Bitumen Materials” **Interscience Publisher**, Vol. 1, pp.143- 280, 375-410. 1964.
- [6] L.H. Lewandowski. “Polymer Modified of Paving Binders” pp.64, 451. 1994.
- [7] อธิพิณ แจ่มชัด. เอกสารประกอบวิชาเทคโนโลยีการยาง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [8] อินทิรา หาญพงษ์พันธ์, บัญชา พูลโกคา. **ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและพอลิเมอร์**. เอกสารประกอบการสอน โครงการสอนเสริม สโมสรอาจารย์จุฬาฯ.
- [9] Alfa Lava. “**Latex 2000 Separator**.” [Online]. Available: <http://www.alfalaval.com>. 2005.
- [10] J.A. Brydson. **Rubbery Materials and their Compounds**. Elsevier applied science. London. 1998.
- [11] AKZONOBEL. “**Basic Emulsion Know-how**.” [Online]. Available: <http://www.asphalt-akzonobel.com>. 2548.
- [12] Western-emulsions. “**Western Emulsion**.” [Online]. Available: <http://www.western-emulsions.com.htm>. 2002.
- [13] Glynn Holleran, and Jeffrey Reed. “**Asphalt Emulsion-definition, Manufacture and Usage**.” [Online]. Available: http://www.slurry.com/techpapers/techpapers_emulsion96mexico.shtml. 1996.
- [14] B. Stephen. **The Shell Bitumen Hanbook**. 1991.
- [15] Asphalts Institute. **A Basic Asphalt Emulsion Manual**. Series N0.19. 2nd ed. USA.

- [16] Yetkin Yildirim. "Polymer modified asphalt binders" **Construction and Building Materials**, 2005.
- [17] "A survey on rubberized asphalt for load surfacing" **The Rubber International Magazine**, Vol 2, No 16, 83. April 2000.
- [18] "Ford founds rubber-in-roads research" **The Rubber International Magazine**, Vol 4, No 42, 51. June 2002.
- [19] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. "**Distresses for Pavement with Asphalt Concrete Surface.**" [Online]. Available: <http://www.tfhrc.gov/pavement/ltpa/reports/03031/01.htm>. 2005.
- [20] ไกรศรี ดวงพัตรา. ยางมะตอย. เอกสารบริษัทเชลล์ประเทศไทย. 4-17. 39-42.
- [21] จิรพัฒน์ โชติไกร. วิศวกรรมการทาง (**Highway Engineering**). ฟิสิกส์เซ็นเตอร์การพิมพ์. กรุงเทพฯ. 2531.
- [22] Better Road.Making "**High-Volume Road Last longer.**" [Online]. Available: <http://www.betterroad.com/article/apr05a.htm>. April 2005.
- [23] การออกแบบส่วนผสม Slurry seal. ฝ้ายออกแบบและควบคุมผิวทาง, กองวิเคราะห์และวิจัย, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม. 2537.
- [24] มาตรฐานการฉาบผิวทางหรือฉาบชั้นทางแบบไมโครซีล (**Microseal**). มาตรฐานที่ ทล.-ม.412/2535, กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.
- [25] **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.03, ASTM, 2004, D244-00.
- [26] **Annual Book of ASTM Standards . Standard Test Method for Solubility of Asphalt Material in Trichloroethylene**. Vol. 04.03, ASTM, 2004, D 2042-01.
- [27] **Annual Book of ASTM Standards. Standard Test Method for Saybolt Viscosity**. Vol. 04.04, ASTM, 1999, D88-94.
- [28] **Annual Book of ASTM Standards . Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)**. Vol. 04.04, ASTM, 2004, D36-95.
- [29] **Annual Book of ASTM Standards. Standard Test Method for Elastic recovery**. Vol. 04.03, ASTM, 2004, D 2042-01.
- [30] **Annual Book of ASTM Standards. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials**. Vol. 04.03, ASTM, 2004, D5-97.
- [31] **Annual Book of ASTM Standards. Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials**. Vol. 04.03, ASTM, 2004, D113-00.

- [32] Annual Book of ASTM Standards. **Standard Test Method for Toughness-Tenacity.**
Vol. 04.03, ASTM, 2004, D 2042-01.
- [33] M.J. Fernando and M. Nadajah. "Use of Natural Rubber Latex in Road Construction"
Natural Rubber Conference Kuala Lumpur, pp.1-9. 1968.
- [34] Y.J. Lee., L.M. France. and M.C. Hawley. **Rubber Chem. Technology**, Vol 70, pp.256-263.
1997.
- [35] N. Radhakshi Shnan., N.M. Mathew., Sabu Thomas., Prabha Chatterjee. and M.A. Siddi.
"Physical and Rheological Characteristics of Liquid Natural Rubber Modified Bitumen"
J. Appl. Polym. Sci. Vol 63, pp.53-61. 1998.
- [36] W.V. Synder. and S.W. Schmitt. "Modified of Asphalt with Neoprene Latex"
Development Product Report, NO. 15, DuPont Dow Elastomers.
- [37] C.R. Cuevo. and S.F. Booth. "How to Prepare Cationic Asphalt Emulsions with Neoprene
Latex" **Spacial Report DoPont Dow Copany**, Mach 1985.
- [38]. P.P. Serquigny, J.L. Everux and G.M. Burney, "U.S. Patent No. 5,990,207", June 23
1998, Assigned to Elf Atochem S.A., France.
- [39] จรัสศรี พันธุ์ไม้. "การปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยยางธรรมชาติสำหรับงานทาง."
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2545.
- [40] ปฏิเวธ ล้าเลิศ และคณะ. "การปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยเส้นใยไนลอน 6 จากส่วน
เสริมแรง (ปลาย) ของยางรถยนต์ใช้แล้ว." โครงการพิเศษ วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2544.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

วิธีการทดสอบ

1. การหาขนาดของเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (Gradation)
2. การหาค่าส่วนประกอบของดินในวัสดุผสมรวม (Sand equivalent)
3. การลองหาค่าความสึกกร่อนของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Loss angeles abrasion

กรมทางหลวง
กองวิเคราะห์และวิจัย
วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง
(เทียบเท่า AASHTO T 27-70)

* * * * *

1. ขอบข่าย

วิธีการทดลองนี้ สำหรับหาขนาดเม็ด (Particle Size Distribution) ของ Aggregate ทั้งชนิดเม็ดละเอียดและหยาบ โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่จนถึงขนาดเล็กมีขนาดช่องผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านหรือค้างตะแกรงขนาดต่างๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง วิธีการทดลองนี้ได้ปรับปรุงจาก AASHTO T 27-70

2. วิธีทำ

2.1 เครื่องมือ

เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

2.1.1 ตะแกรงช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดช่องผ่านต่างๆ ตามต้องการ พร้อมเครื่องเขย่าตะแกรง

2.1.2 เครื่องชั่ง สามารถชั่งได้ละเอียดถึง 0.2% ของตัวอย่างทั้งหมด

2.1.3 เตอบ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส

2.1.4 เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sample Splitter) ขนาดต่างๆ

2.1.5 แปรงทำความสะอาดตะแกรงชนิดลวดทองเหลือง แปรงพลาสติก และแปรงขน

2.1.6 ภาชนะสำหรับใส่แฉะและล้างตัวอย่างด้วยมือ หรือ

2.1.7 ภาชนะล้างตัวอย่างชนิดใช้เครื่องเขย่า (ความจุประมาณ 8,000 มิลลิลิตร)

2.2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

น้ำยาสำหรับใช้ล้างส่วนละเอียด เตรียมได้จากการละลายผลึก Sodium

Hexametaphosphate Buffered With Sodium Carbonate (NaPO_3)₆ 45.7 กรัม ในน้ำ 1,000 มิลลิลิตร คนผสมกันให้ทั่วจนไม่มีเม็ดผลึกเหลืออยู่ ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ ใช้น้ำยານี้ 125 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 875 มิลลิลิตร เป็นน้ำยาสำหรับล้างส่วนละเอียดประมาณ 1,000 มิลลิลิตร อาจจะผสมไว้ทีละมาก ๆ หรือทดลองครั้งหนึ่งก็ผสมครั้งหนึ่ง ครั้งละ 1,000 มิลลิลิตร ต่อวัสดุทดลองหนึ่งตัวอย่าง

2.3 แบบฟอร์ม

- ใช้แบบฟอร์มที่ ว.2-10 สำหรับวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)
 ว.2-01 ก. สำหรับวัสดุที่มีขนาดใหญ่และเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)
 ว.2-12 สำหรับรายงาน

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างอาจจะเป็ดิน หินคลุก หรือ Soil Aggregate หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดลอง นำตัวอย่างมาคลุกให้เข้ากันและแยกด้วยวิธี Quartering หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง ในขณะที่ตัวอย่างมีความชื้นเพื่อลดการแยกตัว ปริมาณตัวอย่างให้ใช้ตามตารางที่ 1 หรือตารางที่ 2

2.5 การทดลอง

2.5.1 ทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุสำหรับวัสดุเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

(1) ถ้าตัวอย่างมีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อนต้องทำให้ส่วนละเอียดที่จับกันเป็นก้อน แยกจากกันให้หมด แล้วนำตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ \text{C}$. มวลตัวอย่างแห้ง หรือจะหาความชื้นของตัวอย่างเพื่อคำนวณหามวลตัวอย่างแห้ง นำตัวอย่างใส่ภาชนะสำหรับใช้ล้างตัวอย่าง เทน้ำหรือน้ำยาลงไปในภาชนะจนท่วมดินตัวอย่าง แช่ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเขย่าประมาณ 10 นาที ขณะเขย่าระวังอย่าให้น้ำกระดกออกจากภาชนะ ถ้าไม่ใช้เครื่องเขย่าควรแช่น้ำไว้ในภาชนะสำหรับล้างตัวอย่างด้วยมือ นานประมาณ 3-4 ชั่วโมง เทตัวอย่างลงบนตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ถ้าหากมีตัวอย่างขนาดใหญ่ป็นอยู่มาก ควรใช้ตะแกรงเบอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ซ้อนไว้ข้างบน เพื่อลดปริมาณตัวอย่างบนตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) อีกต่อไป เทตัวอย่างลงในภาชนะ แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ \text{C}$.

(2) นำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่างๆ ตามต้องการ การเขย่านี้ต้องให้ตะแกรงเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวตั้งรวมทั้งมีแรงกระแทกขณะเขย่าด้วย เขย่านานจนกระทั่งตัวอย่างผ่านตะแกรงแต่ละชนิดใน 1 นาที ไม่เกิน 1% ของตัวอย่างในตะแกรงนั้น หรือใช้เวลาเขย่านานทั้งหมดประมาณ 15 นาที เมื่อเขย่าเสร็จแล้ว ถ้ามีตัวอย่างก้อนใหญ่กว่าตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ต้องไม่มีก้อนตัวอย่างซ้อนกันในตะแกรง และตัวอย่างที่มีเม็ดเล็กกว่าตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ต้องมีตัวอย่างค้ำตะแกรงแต่ละขนาดไม่เกิน 6 กรัมต่อ 1,000 ตารางมิลลิเมตร หรือไม่เกิน 200 กรัมสำหรับตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) นำตัวอย่างที่ค้ำแต่ละขนาดไปชั่ง

2.5.2 การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุสำหรับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ และเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) อาจทำได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1

(1) ถ้าตัวอย่างมีส่วนละเอียดจับก้อนใหญ่ หรือมีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อน ต้องทำให้ส่วนละเอียดหลุดออกจากก้อนใหญ่ และส่วนละเอียดที่จับกันเป็นก้อนหลุดออกจากกันให้หมดโดยใช้ค้อนยางทุบ แล้วนำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) เพื่อแยกส่วนที่ค้ำและผ่านตะแกรง ถ้าตัวอย่างมีมากให้แบ่งทำหลายๆ ครั้ง

(2) นำส่วนที่ค้ำตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. ชั่งหามวลของตัวอย่างแห้ง หรือจะหาความชื้นของตัวอย่างเพื่อคำนวณหามวลของตัวอย่างแห้งก็ได้ แล้วนำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่างๆ ตามต้องการ

(3) นำส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. ชั่งหามวลของตัวอย่างแห้ง หรือจะหาความชื้นของตัวอย่างเพื่อคำนวณหามวลของตัวอย่างแห้งก็ได้ แล้วนำตัวอย่างทั้งหมดหรือแยกตัวอย่างเพียงบางส่วนดำเนินการทดลองตามข้อ 2.5.1

วิธีที่ 2

นำตัวอย่างทั้งหมดที่ได้จากข้อ 2.4 ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. ชั่งหามวลของตัวอย่างแห้งหรือจะหาความชื้นของตัวอย่าง เพื่อคำนวณหามวลของตัวอย่างแห้งก็ได้ แล้วนำตัวอย่างไปดำเนินการทดลองตามข้อ 2.5.1 ถ้ามีขนาดก้อนใหญ่มากควรจัดตะแกรงที่จะล้างให้มีขนาดต่างๆ สดหลั่นกัน

3. การคำนวณ

3.1 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของวัสดุซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

3.1.1 หามวลที่ค้าง (Mass Retained) บนตะแกรงแต่ละขนาด โดยชั่งหามวลของตัวอย่างที่ค้างบนแต่ละตะแกรงมวลที่หายไป (เมื่อเอามวลของตัวอย่างที่ค้างในทุกตะแกรงรวมกันแล้วหักออกจากมวลของตัวอย่างอบแห้งทั้งหมดซึ่งใช้ทดลอง) คือ มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) รวมกับน้ำหนักที่ค้างบน Pan

3.1.2 หามวลที่ผ่าน (Mass Passing) ตะแกรงแต่ละขนาด โดยคิดจากบรรทัดล่างของช่องมวลที่ค้าง (Mass Passing) ขึ้นไป เอามวลของช่อง Mass Retained บน Pan เป็นช่อง Mass Passing ของตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) รวมมวลของ Mass Retained กับมวลช่อง Mass Passing ของตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) เป็นมวลของช่อง Mass Passing ของตะแกรงถัดขึ้นไป ดำเนินการแบบที่กล่าวมาแล้วนั้นไปเรื่อยๆ จนถึงมวล Mass Passing ในบรรทัดบนสุดจะเท่ากับมวลของตัวอย่างแห้งทั้งหมดซึ่งใช้ทดลอง

3.1.3 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวม (Percent Passing) ได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวม} = \frac{\text{มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ (กรัม)} \times 100}{\text{มวลของตัวอย่างแห้งทั้งหมดที่ใช้ทดลอง (กรัม)}}$$

3.2 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของวัสดุซึ่งมีขนาดทั้งใหญ่และเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

3.2.1 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของวัสดุซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

(1) หามวลที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด โดยชั่งหามวลของตัวอย่างที่ค้างบนแต่ละตะแกรง มวลที่หายไป (เมื่อเอามวลของตัวอย่างที่ค้างในทุกตะแกรงรวมกัน แล้วหักออกจากมวลของตัวอย่างที่อบแห้งทั้งหมดซึ่งใช้ทดลอง) คือ มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ที่ค้างบน Pan

(2) หามวลที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด เช่นเดียวกับข้อ 3.1.2

(3) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวม โดยใช้สูตรเช่นเดียวกับข้อ

3.1.3

3.2.2 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง ต่อมวลรวมของวัสดุ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) เช่นเดียวกับข้อ 3.1

3.2.3 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์รวมผ่านตะแกรงต่อมวลรวม (Total Percent Passing) ของวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์รวมผ่านตะแกรงต่อมวลรวม} = \frac{X \times Y}{100}$$

เมื่อ X = เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

Y = เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ในการทดลองพวกวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

4. การรายงาน

ให้รายงานค่าเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ต่อมวลรวม ด้วยทศนิยม 1 ตำแหน่ง ในแบบฟอร์มที่ ว.2-12

5. ข้อควรระวัง

5.1 การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง ต้องให้เครื่องที่มีขนาดช่องกว้างประมาณ 1 1/2 เท่า ของก้อนโตที่สุด

5.2 ห้ามใส่ตัวอย่างลงในตะแกรงขณะที่ยังร้อนอยู่

5.3 ควรตรวจสอบตะแกรงอยู่เสมอ โดยเฉพาะเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร)

6. หนังสืออ้างอิง

The American of State Highway Officials. Standard Specifications for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing , AASHO Designations : T 11-70, T 27-70 and T 88-70

* * * * *

ตารางที่ 1 สำหรับหินย่อย		
ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวม	ปริมาณตัวอย่างไม่น้อยกว่า (กก.)
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	90 - 100	0.5
9.5 มิลลิเมตร (3/8")	90 - 100	1.0
12.5 มิลลิเมตร (1/2")	90 - 100	2.0
19.0 มิลลิเมตร (3/4")	90 - 100	5.0
25.0 มิลลิเมตร (1")	90 - 100	10.0
37.1 มิลลิเมตร (1 1/2")	90 - 100	15.0
50.0 มิลลิเมตร (2")	90 - 100	20.0
63.0 มิลลิเมตร (2 1/2")	90 - 100	25.0
75.0 มิลลิเมตร (3")	90 - 100	35.0
90 มิลลิเมตร (3 1/2")	90 - 100	35.0

ตารางที่ 1 สำหรับ Soil Aggregate		
ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงต่อมวลรวม	ปริมาณตัวอย่างไม่น้อยกว่า (กก.)
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	90 - 100	0.5
9.50 มิลลิเมตร (3/8")	90 - 100	1.0
12.5 มิลลิเมตร (1/2")	90 - 100	2.0
19.0 มิลลิเมตร (3/4")	90 - 100	5.0
ใหญ่กว่า 25.0 มิลลิเมตร (1")	90 - 100	10.0

จ. 2-01 ก.

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง
SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES

Type and No. of test..... C-443 Project พระประแดง-บางขุนเทียน ตอน 3
 Type of materials Weathering Rock To be used for..... Subbase Layer
 Source บ่อสุรวิทย์ อ.พแค จ.สระบุรี Stock pile No.
 Location of Sampling km. 43+150-43+295 Frontage Rd. RT.
 Tested by ชัยฤทธิ์ Dated..... 26/4/43

Sieve No.	wt. retained	wt. passing	% passing
50.00(2")	-	11927	100.0
25.00(1")	1010	10917	91.5
19.00(3/4")	570	10347	86.7
9.50(3/8")	3077	7270	60.9
4.76(#4)	2373	4897	41.0
Pan	7030	-	-

COARSE AGGREGATES

- 1) Total wt. of aggregate = 12,000 gm.
(Wet Sample)
- 2) Total coarse aggregate = 7,030 gm.
(retained on No. 4)
- 3) Total fine aggregate = 4,970 gm.
(passing No. 4=1-2)
- 4) Water content of fine (w) = 1.5 %
- 5) Dry wt. of fine aggregate = 4,897 gm.
 $(\frac{3 \div 100 + w}{100})$
- 6) Total wt. of aggregate = 11,927 gm.
(2+5)

FINE AGGREGATES

- 1) Total wt. of Fine aggregate = 4970 gm.
- 2) Wet wt. of fine aggregate used = 831.3 "
- 3) Water content of fine aggregate = 15 %
- 4) Dry wt. of fine aggregate = 819.0 gm.

Can No. 46
 Remarks Wet. Soil+Can 307.5
 Dry. Soil+Can 303.6
 Wt. of Water 3.9
 Wt. of Can 42.1
 Wt. of Dry Soil 261.5
 wc. 1.5 %

Sieve No.	wt. retained	wt. Passing	% Passing	Total % Passing
# 4	-	819.0	100	41.0
# 10	219.7	599.3	73.2	30.0
# 40	183.3	415.5	50.8	20.8
# 200	78.0	337.5	41.3	16.9
	Grade	"B"		
Pan	337.5	-	-	

* Total % Passing = % passing of fine aggregates x % passing No.4 of coarse aggregate ÷ 100

ว.2-01

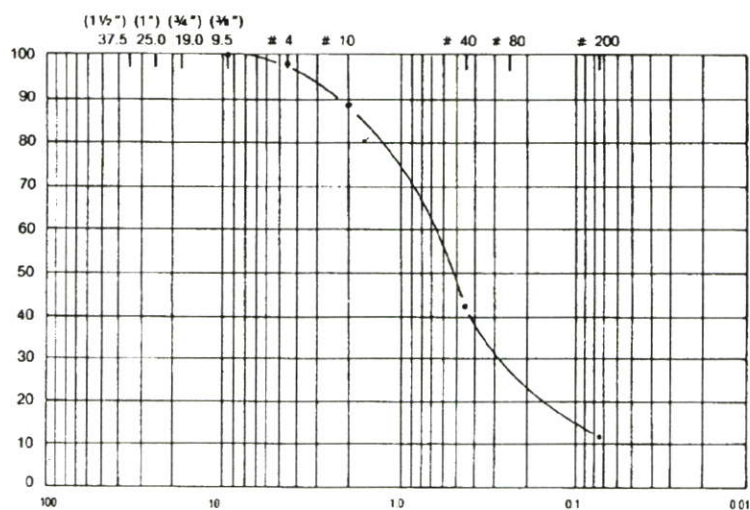
สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง

อันดับทดลองที่ C-439 วันที่รับตัวอย่าง..... วันที่ทดลอง. 23/4/43
 เจ้าของตัวอย่าง หนังสือที่
 ทางสาย พระประแดง-บางขุนเทียน ตอน 3 เจ้าหน้าที่ทดลอง ชัยฤทธิ์

SIEVE ANALYSIS

Sample : Embankment 3rd & Fin. Layer km. 43+800-44+000 Temporary Rd.
 Source : แหล่งทรายบางไทร อ.บางไทร จ.อยุธยา

Sieve No.	Sieve Opening mm.	Wt. of Sieve gm.	Sieve +Soil gm.	Soil Retained gm.	%Soil Retained	Cumulative	% Finer
3/8"	9.50			-	-	-	100.0
#4	4.75			15.8	1.4	1.4	98.6
#10	2.00			103.0	9.1	10.5	89.5
#40	0.425			546.0	48.3	58.8	41.2
#200	0.075			336.8	29.8	88.6	11.4
Pan				128.9	11.4	100.0	-
			Wt. =	1130.5	gm.		



Diameter in mm.
 Grain size Distribution Curve.

Wet Sample : เจ้าหน้าที่ทดลอง..... Dry Sample :เจ้าหน้าที่ซั่งน้ำหนัก.....
 เจ้าหน้าที่ซั่งน้ำหนัก..... เจ้าหน้าที่จดน้ำหนัก.....
 เจ้าหน้าที่จดน้ำหนัก..... เจ้าหน้าที่คิดคำนวณ.....

กรมทางหลวง
กองวิเคราะห์และวิจัย
วิธีการทดลองหาค่า Sand Equivalent
(เทียบท่า AASHO T 176)

* * * * *

1. ขอบข่าย

วิธีการทดลองนี้ได้ปรับปรุงจาก AASHO T 176-70 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัดส่วนระหว่างฝุ่น หรือวัสดุประเภทเหมือนดินเหนียวกับวัสดุเม็ดหยาบพวกกรวดหรือทราย

2. วิธีทำ

2.1 เครื่องมือ

2.1.1 เครื่องมือทดลองประกอบด้วยกระบอกตวงพลาสติกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 31.75 มิลลิเมตร (1 1/4 นิ้ว) สูง 431.80 มิลลิเมตร (17 นิ้ว) และมีขีดวัด 318 มิลลิเมตร (15 นิ้ว) แบ่งเป็น 15 ส่วน ส่วนละ 25.4 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) แต่ละส่วนแบ่งออกเป็น 10 ช่อง

2.1.2 Irrigator Tube (ดูรูปที่ 1)

2.1.3 Weighted Foot Assembly ซึ่งประกอบด้วย Sand Reading Indicator ติดอยู่กับแกนห่างจากตัว Foot 254 มิลลิเมตร (10 นิ้ว) ดูรูปที่ 1

2.1.4 Siphon Assembly ประกอบด้วยขวดกลมซึ่งบรรจุสารละลาย Calcium Chloride 3.80 ลิตร (1 แกลลอน) ให้ขวดกลมวางสูงจากโต๊ะที่ทำการทดลอง Sand Equivalent 914 ± 25 มิลลิเมตร (3 ฟุต ± 1 นิ้ว)

2.1.5 กระป๋องตวง (Measuring Can) ขนาด 85 ± 5 มิลลิลิตร (3 ออนซ์)

2.1.6 กรวยปากกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางตรงปากกรวยขนาดประมาณ 100 มิลลิเมตร

2.1.7 นาฬิกาจับเวลา

2.1.8 เครื่องเขย่ากล (Mechanical Shaker) มีประสิทธิภาพเขย่าได้ 175 ± 2 รอบต่อนาที และระยะทางเขย่าเท่ากับ 203 ± 1 มิลลิเมตร (8 ± 0.004 นิ้ว) หรืออาจใช้เครื่องเขย่ามือ (Manual Shaker) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

2.2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

2.2.1 Stock Solution สารละลาย Calcium Chloride เตรียมได้จาก Anhydrous Calcium Chloride 454 กรัม , USP Glycerine 2,050 กรัม และ Formaldehyde 47 กรัม ละลาย Calcium Chloride ในน้ำกลั่น 1,900 มิลลิลิตร (1/2 แกลลอน) แล้วนำไปกรองผ่านกระดาษกรองแบบ Rapid Filtering Filter Paper หรือ Whatman No. 12 เติม Glycerine และ Formaldehyde ในสารละลาย ผสมกันจนเข้ากันดี เติมน้ำกลั่นลงไปอีกจนได้สารละลาย 3.80 ลิตร (1 แกลลอน)

2.2.2 Working Solution เตรียมได้จากการนำเอาสารละลายในข้อ 2.2.1 มาเติม กระจกบดวง (85 ± 5 มิลลิลิตร) เติมน้ำกลั่นให้ได้สารละลาย 3.80 ลิตร (1 แกลลอน)

2.3 แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์มที่ ว.3-12

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างตากแห้ง (Air-Dry Sample) ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) มา 1 กระจกบดวง (85 ± 5 มิลลิลิตร) โดยวิธี Quartering หรือใช้ Riffle Splitter อย่างใดอย่างหนึ่ง ควรเคาะกระจกบดกับพื้นแข็งๆ เพื่อให้ได้ตัวอย่างบรรจุในกระจกบดมากที่สุด ใช้ที่ปาดดินปาดวัสดุที่ขอบบนของกระจกบดให้ตัวอย่างเต็มกระจกบด

2.5 การทดลอง

2.5.1 เติมสารละลายที่เตรียมจากข้อ 2.2.2 ลงไปในกระบอกตวงพลาสติกให้สูง 4 ± 0.1 ส่วน (4 ± 0.1 นิ้ว) โดยผ่าน Irrigator Tube วางกรวยปากกลมบนปากกระบอกตวง แล้วเทตัวอย่างจากกระจกบดลงไปในกระบอกตวง ใส่ฟองอากาศโดยใช้ก้นกระบอกตวงกระแทกกับฝ่ามือจนตัวอย่างเปียกโดยทั่วถึงกัน

2.5.2 ปลอ่ยให้วัสดุตัวอย่างแช่ทิ้งไว้โดยไม่ถูกรบกวนเป็นเวลา 10 ± 1 นาที แล้วอุดกระบอกตวงด้วยจุกยาง พลิกกระบอกตวงคว่ำไปมาพร้อมทั้งเขย่า เพื่อป้องกันมิให้วัสดุตกค้างอยู่ที่ก้นกระบอกตวง

2.5.3 การเขย่ากระบอกตวงสามารถทำได้ 3 วิธี ด้วยกันคือ

(1) เขย่าด้วยเครื่องเขย่ากล โดยวางกระบอกตวงพลาสติกซึ่งอุดด้วยจุกยางอยู่ในแนวราบ และอยู่ในลักษณะติดแน่นกับเครื่องเขย่า ตั้งเวลาให้เครื่องเขย่ากลนี้เขย่าเป็นเวลา 45 ± 1 วินาที

(2) เครื่องเขย่ามือ โดยยึดกระบอกตวงพลาสติกซึ่งอุดด้วยจุกยางเข้ากับเครื่องโดยใช้สปริงยึด 3 ตัว ตั้งเครื่องนับครั้งเขย่าให้เริ่มที่ศูนย์ ดันเหล็กโยกกระบอกตวงไปในแนวนอนด้านข้างจนกระทั่งปลายเข็มชี้ที่เครื่องหมายกำหนดระยะทางการเขย่าซึ่งติดอยู่บนกระดาษด้านหลังเครื่องโยก แล้วจึงปลอ่ยมือให้เหล็กโยกเขย่ากระบอกตวงโดยอิสระ และอาจใช้ปลายนิ้วมือโยกช่วย เพื่อให้การเขย่าเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างตามระยะที่กำหนดไว้ การเขย่าที่ถูกต้องสมบูรณ์คือ การโยกที่เมื่อครบรอบครั้งหนึ่งๆ แล้ว ปลายเข็มชี้จะอยู่ภายในขีดความกว้างของเครื่องหมายกำหนดระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 3 ให้เขย่าเช่นนี้ 100 รอบ

(3) ใช้มือเขย่า โดยจับกระบอกตวงด้วยฝ่ามือทั้งสองข้างในแนวราบ ให้ระยะทางเขย่าในแนวราบนี้ยาว 228 ± 25 มิลลิเมตร (9 ± 1 นิ้ว) และให้เขย่า 90 รอบ ในเวลาประมาณ 30 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4 (การนับจำนวนรอบให้นับจากจุดเริ่มต้นเขย่าไปแล้วกลับมาที่จุดเริ่มต้นอีกเป็น 1 รอบ)

2.5.4 หลังจากเขย่าโดยวิธีการตามข้อ 2.5.3 แล้ว นำกระบอกตวงพลาสติกตั้งบนโต๊ะ เอาจุกออก หย่อนปลาย Irrigator Tube ลงไปในกระบอกตวง เปิดให้สารละลายในขวดผ่านออกไปล้างวัสดุที่ติดอยู่ข้างๆ กระบอกตวงนั้น จากขอบบนลงไปค่อยๆ หมุนและดัน Irrigator Tube ผ่านชั้นวัสดุเม็ดหยาบลงไปจนถึงก้นกระบอก วัสดุเม็ดละเอียดจะลอยตัวขึ้นมาเป็นของผสมอยู่เหนือพวกเม็ดหยาบ เมื่อของผสมมีระดับอยู่ที่ขีด 15 ส่วน (15 นิ้ว) ค่อยๆ ยก Irrigator Tube ขึ้น แต่ยังไม่ปลอ่ยให้สารละลายไหลออกเรื่อยๆ จนเมื่อยก Irrigator Tube ออกจากกระบอกตวง ระดับของผสมในกระบอกตวงต้องอยู่ที่ระดับขีดที่ 15 ส่วน (15 นิ้ว)

2.5.5 ปลอ่ยกระบอกตวงทิ้งไว้โดยไม่ให้ถูกรบกวนอีก 20 นาที นับเวลาหลังจากเอา Irrigator Tube ออก จะเห็นดินเหนียวลอยอยู่โดยแยกเป็นชั้นอย่างชัดเจน อ่านค่าระดับชั้นบนสุดของ

ดินเหนียวบนกระบอกตวงเป็นค่า “Clay Reading” ถ้าในระยะเวลา 20 นาที ดินเหนียวยังคงตกตะกอนไม่หมด โดยยังไม่เห็นเป็นชั้นแยกกันอย่างชัดเจนให้ยัดเวลาออกไปแต่ไม่ควรเกิน 30 นาที ถ้าเวลามากกว่า 30 นาที ยังไม่มีการแยกเห็นได้ชัดเจนให้ทำการทดลองใหม่ โดยใช้อีก 3 ตัวอย่าง และใช้ค่า “Clay Reading” ของตัวอย่างที่ใช้ระยะเวลาตกตะกอนที่สั้นที่สุด

2.5.6 หาค่า “Sand Reading” ได้จากการนำเอา Weighted Foot Assembly ค่อยๆ หย่อนลงในกระบอกตวง ไปวางบนวัสดุหยาบหรือทราย อ่านค่าบนกระบอกตวงระดับบนสุดของ Indicator แล้วลบด้วย 10 จะได้ค่า “Sand Reading”

2.5.7 ค่าของ “Clay Reading” และ “Sand Reading” ให้ใช้ทศนิยมเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น ในกรณีที่อ่านทศนิยมได้มากกว่า 1 ตำแหน่ง ให้ปัดไปในด้านมากจนเหลือทศนิยม 1 ตำแหน่ง เช่น อ่านได้ 3.22 ให้ใช้ 3.3 เป็นต้น

3. การคำนวณ

ค่า Sand Equivalent (SE) หาได้จากสูตร

$$SE = \frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100$$

ถ้าค่า SE ไม่เป็นเลขจำนวนเต็มให้ปัดเป็นเลขจำนวนเต็มทั้งหมด เช่น ค่า SE ได้เท่ากับ 41.25 ให้ใช้ค่า SE เป็น 42 เป็นต้น

4. การรายงาน

ให้รายงานผลในแบบฟอร์มที่ ว.3-12

5. ข้อควรระวัง

5.1 สถานที่ใช้ในการทดลองต้องเป็นที่ซึ่งปราศจากการสั่นสะเทือน ซึ่งจะทำให้อัตราการตกตะกอนผิดไป

5.2 ไม่ควรวางกระบอกตวงพลาสติกในแสงแดด

5.3 ระวังมิให้ทรายหรือดินไปอุดตันที่ปลายของ Irrigator Tube

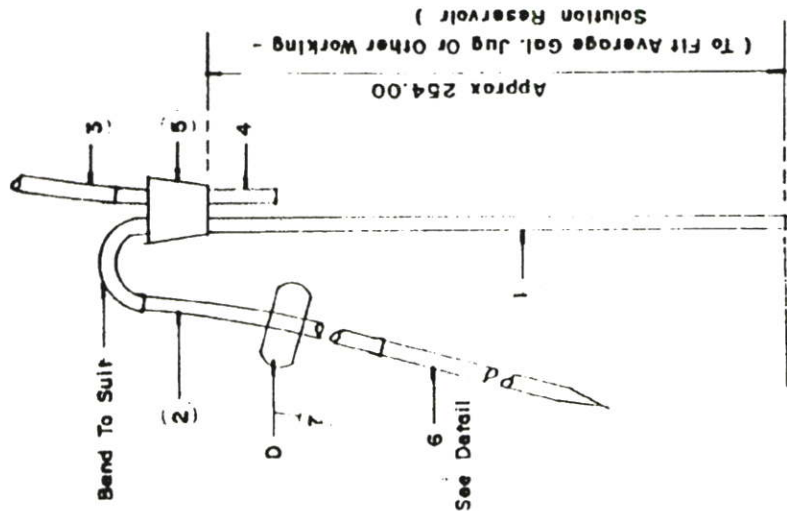
6. หนังสืออ้างอิง

6.1 The American Association of State Highway Official. Standard Specifications for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing, Part II, AASHO Designation : T 176-70

6.2 State of California, Department of Public Works, Division of Highways. Materials Manual of Testing and Control Procedures, Vol. I, Test Method No. Calif. 217-B.

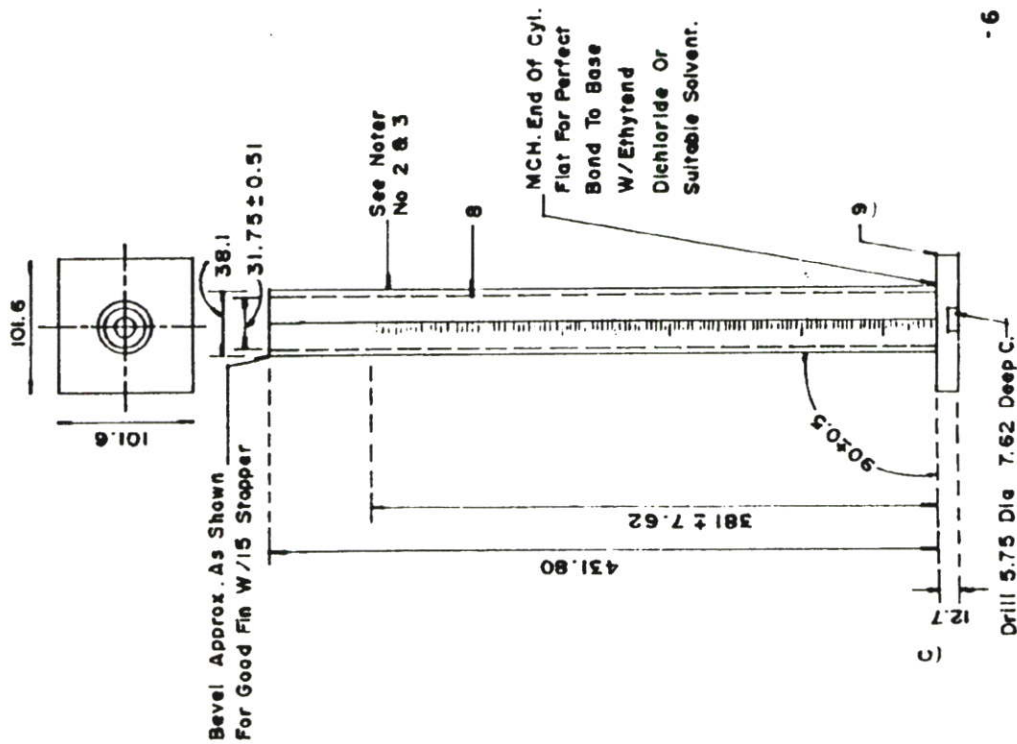
6.3 American Society for Testing and Materials (1971). Annual Book of ASTM Standard, Part II, ASTM Designation : D 2419-71.

* * * * *

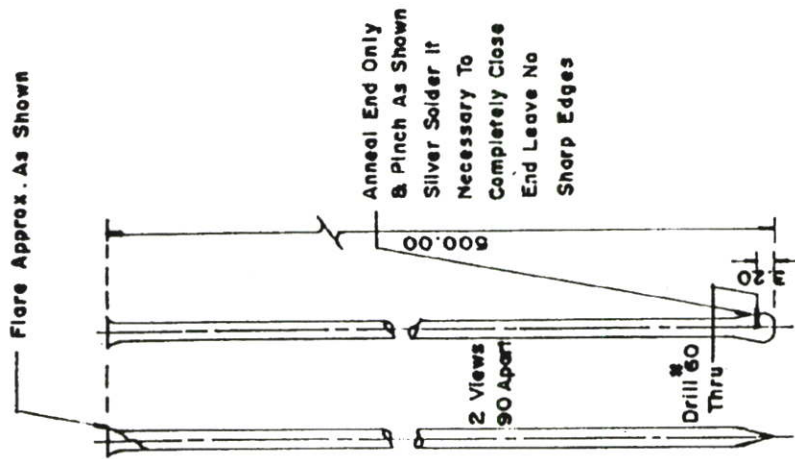


ชนิดทั้งหมดเป็น มม.

ASSEMBLY A.



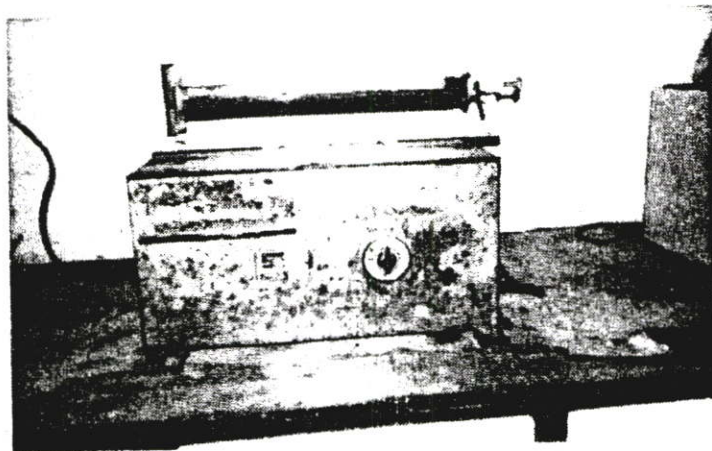
ASSEMBLY B.



- 6 IRRIGATOR TUBE DETAIL.

เขียน	บันทึก	พิมพ์	ม.ค. 2542
ตรวจ			

รูปที่ 1 ชุดเครื่องมือทดลองทำ SAND EQUIVALENT. (1)



រូបទី 2 Mechanical Shaker



រូបទី 3 Manual Shaker

กองวิเคราะห์และวิจัย

อันดับทดลองที่ AC-25/1/43
 เจ้าของตัวอย่าง หจก. อี๋ทอง
 หนังสือที่ AA. 0616/ท.5/15/159 วว. 14 พ.ค. 43 วันที่รับหนังสือ 26 พ.ค. 43
 ทางสาย ๗. หน่วยกระจาย-บรรจบทางหลวง #. 43 ตอน 1. วันที่รับตัวอย่าง 26 พ.ค. 43
 เจ้าหน้าที่ทดลอง วิฑูรย์ วันที่ทดลอง 29 พ.ค. 43

Plastic Fines in Graded Aggregates
 Sand Equivalent Test
 AASHO Designation : T 176-56

Cold Bin หินฝุ่น

Sample No.	Source	Sand Reading	Clay Reading	Sand Reading S.E. = $\frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100$	Remarks
1.	โรงโม่หิน อิศรพัฒน์ อ.เมือง จ.ยะลา	3.9	5.9	$\frac{3.9}{5.9} \times 100 = 66.1\%$ = 67%	
2.		3.9	5.8	$\frac{3.9}{5.8} \times 100 = 67.2\%$ = 68%	
				Average = 68%	

ค่ารวมเนี้ยมการทดลองเป็นเงิน..... บาท
 ผลการทดลองนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่กองวิเคราะห์และวิจัยได้รับเท่านั้น

กรมทางหลวง
กองวิเคราะห์และวิจัย
วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate
โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion
(เทียบเท่า ASTM C 131 และ C 535)

* * * * *

1. ขอบข่าย

การทดลองนี้เพื่อหาค่าความสึกหรอของหินย่อย กรวดย่อย กรวดและ Coarse Aggregates อื่นๆ การทดลองนี้ดัดแปลงมาจาก ASTM. Designations : C131-69 และ C535 -69

2. วิธีทำ

2.1 เครื่องมือ

2.1.1 เครื่อง Los Angeles Abrasion มีลักษณะและขนาดตามรูปที่ 1 ประกอบด้วย เหล็กทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 711 ± 5 มิลลิเมตร (28 ± 0.2 นิ้ว) ความยาวภายใน 508 ± 5 มิลลิเมตร (20 ± 0.2 นิ้ว) เหล็กทรงกระบอกนี้ติดอยู่กับเพลาและหมุนรอบแกนได้ในแนวนอน มีช่องสำหรับใส่วัสดุฝาเหล็กปิด เมื่อปิดแล้วต้องมีลักษณะผิวด้านในเหมือนกับผิวทรงกระบอกและเสมอกัน ไม่ทำให้ลูกเหล็กทรงกลมซึ่งเป็น Abrasive Charge สะดุดเวลาผ่านรอยต่อ มีเหล็กขวางสูง 89 ± 2 มิลลิเมตร (3.5 ± 0.1 นิ้ว) ยาว 508 ± 2 มิลลิเมตร (20 ± 0.2 นิ้ว) ติดแน่นด้านในเหล็กทรงกระบอกความสูงของเหล็กทรงกระบอกหมุนจากเหล็กขวางถึงช่องสำหรับใส่วัสดุไม่น้อยกว่า 1,270 มิลลิเมตร (50 นิ้ว)

หมายเหตุ เหล็กขวางควรมีรูปตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดอยู่กับผนังของเหล็กทรงกระบอก หรืออาจใช้เหล็กฉากแทนโดยติดที่ริมฝาเหล็กปิดช่องใส่วัสดุ ให้ด้านนอกของเหล็กฉากหันไปตามทิศทางที่หมุน

2.1.2 ตะแกรงสำหรับหาขนาดของ Coarse Aggregate ใช้ตะแกรงมีช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 75.0 มิลลิเมตร (3 นิ้ว), 63.0 มิลลิเมตร (2 1/2 นิ้ว), 50.0 มิลลิเมตร (2 นิ้ว), 37.5 มิลลิเมตร (1 1/2 นิ้ว), 25.0 มิลลิเมตร (1 นิ้ว), 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว), 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว), 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว), 6.3 มิลลิเมตร (1/4 นิ้ว), #4 (4.75 มิลลิเมตร) #8 (2.36 มิลลิเมตร) # 12 (1.70 มิลลิเมตร)

2.1.3 Abrasive Charge เป็นลูกเหล็กทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มิลลิเมตร (1 27/32 นิ้ว) แต่ละลูกมีมวลระหว่าง 390-445 กรัม จำนวน Abrasive Charge ขึ้นอยู่กับ Grading ของตัวอย่าง Grading ของตัวอย่างกำหนดไว้ในตารางที่ 1

จำนวน Abrasive Charge ที่ใช้ในการทดลองแต่ละ Grading		
Grading	Abrasive Charge (ลูก)	มวลรวม (กรัม)
A	12	5,000±25
B	11	4,584±25
C	8	3,330±20
D	6	2,500±15
E	12	5,000±25
F	12	5,000±25
G	12	5,000±25

2.1.4 เครื่องชั่งซึ่งสามารถชั่งได้ 15 กิโลกรัม ความละเอียดอ่านได้ถึง 1 กรัม

2.2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

-

2.3 แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์มที่ ว.3-11

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

2.4.1 ถ้าตัวอย่างไม่มีดินเหนียวปน เช่น กรวดทราย หินโม ให้ตากตัวอย่างจนแห้งหรืออบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105-110° ซ. แล้วทำตามข้อ 2.4.3

2.4.2 ถ้าตัวอย่างมีดินเหนียวปน หรือมีส่วนละเอียดติดเป็นก้อนใหญ่แน่น ให้นำตัวอย่างไปล้างน้ำเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ออกทิ้ง แล้วนำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 มาอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105-110° ซ. แล้วทำตามข้อ 2.4.3

2.4.3 นำตัวอย่างไปแยกขนาดตาม Grading ในตารางที่ 1 ถ้าเข้าได้หลาย Grading ให้เลือกใช้ตัวที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการใช้งานมากที่สุด

2.5 การทดลอง

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้จากข้อ 2.4.3 Abrasive Charge ตามจำนวนลูกในข้อ 2.1.3 ใส่เข้าไปในเครื่อง Los Angeles หมุนเครื่องด้วยความเร็วที่ 30-33 รอบต่อนาที ให้ได้จำนวนรอบตามตารางที่ 1 เมื่อหมุนได้ครบตามกำหนดแล้ว ให้เอาตัวอย่างออกจากเครื่อง ล้างส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ออกทิ้ง นำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 มาอบที่อุณหภูมิ 105-110° ซ. จนได้มวลคงที่ จึงชั่งหามวลตัวอย่างที่เหลือ

ตารางที่ 1								
ขนาดตะแกรง (มม.)		มวล (กรัม) และ Grading ของตัวอย่าง						
ผ่าน	ค้าง	A	B	C	D	E	F	G
75.0	63.0	-	-	-	-	2500+50	-	-
63.0	50.0	-	-	-	-	2500+50	-	-
50.0	37.5	-	-	-	-	5000+50	5000+50	-
37.5	25.0	1250+25	-	-	-	-	5000+25	5000+25
25.0	19.0	1250+25	-	-	-	-	-	-
19.0	12.5	1250+10	2500+50	-	-	-	-	-
12.5	9.5	1250+10	2500+50	-	-	-	-	-
9.5	6.3	-	-	2500+50	-	-	-	-
6.3	#4(4.75 มม.)	-	-	2500+50	-	-	-	-
#4(4.75 มม.)	#8(2.36 มม.)	-	-	-	5000+10	-	-	-
มวลตัวอย่างรวม		5000+10	5000+10	5000+10	5000+10	10000+100		
จำนวนรอบ		500				1000		

3. การคำนวณ

$$\text{ความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } M_1 &= \text{มวลตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดลอง} \\ M_2 &= \text{มวลที่ค้างบนตะแกรง # 12} \end{aligned}$$

4. การรายงาน

ให้รายงานค่าความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles เป็นร้อยละ โดยใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

5. ข้อควรระวัง

5.1 ให้ทำการซั้ Abrasive Charge แต่ละลูกอย่างน้อย 1 ครั้ง ทุกๆ 6 เดือน เพื่อตรวจสอบให้มวลรวมเป็นไปตามข้อ 2.1.3

5.2 ในกรณีที่เหล็กวงใช้เหล็กฉากตีดริมแผ่นเหล็กปิดช่องใส่วัสดุ การปิดต้องให้ด้านนอกของเหล็กฉากหันไปในทิศทางที่เครื่องหมุน

6. หนังสืออ้างอิง

American Society for Testing Materials, ASTM Standards, ASTM Designation :
C 131 and C 535

* * * * *

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง

อันดับการทดลองที่ A-130/14
 เจ้าของตัวอย่าง บริษัท ก.ก่อสร้าง
 หนังสือที่ 32/14 ลว. 16 มี.ค. 14 วันรับหนังสือ 16 มี.ค. 14
 ทางสาย กรุงเทพฯ-สระบุรี
 เจ้าหน้าที่ทดลอง สมเดช วันรับตัวอย่าง 17 มี.ค. 14 วันที่ทดลอง 15 มี.ค. 14

ABRASION TEST OF COARSE AGGREGATE BY LOS ANGELES MACHINE

Material หินคลุก Norminal Size
 Source เขาเอื้อง Sample No. 1 of 2
 Grading A Number of revolutions 500
 Number of abrasive 12 Weight of charges 501.1 gm.

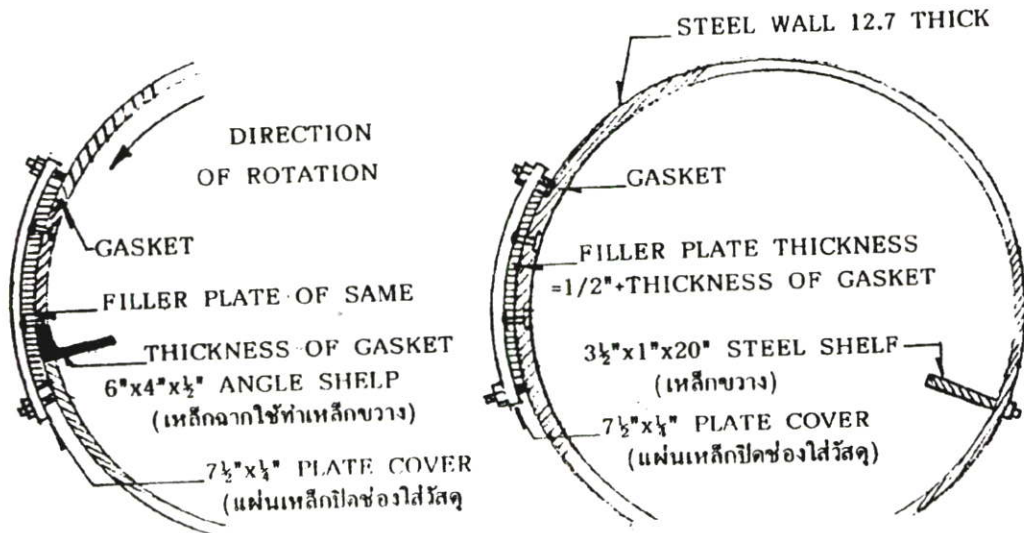
Sieve size		Accumulative
Passing	Retained on	Weight of Sample
1 1/2	1"	1253 gm.
1"	3/4	1251 gm.
3/4	1/2"	1250 gm.
1/2	3/8"	1252 gm.
Original Mass of sample (W_1)		5006 gm.
Final Mass of sample (W_2)		3595 gm.
Loss ($W_1 - W_2$)		1411 gm.
Percentage of wear $\frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$		28.2

Remark :

ค่าธรรมเนียมการทดลองเป็นเงิน..... บาท
 ผลการทดลองนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทางได้รับเท่านั้น

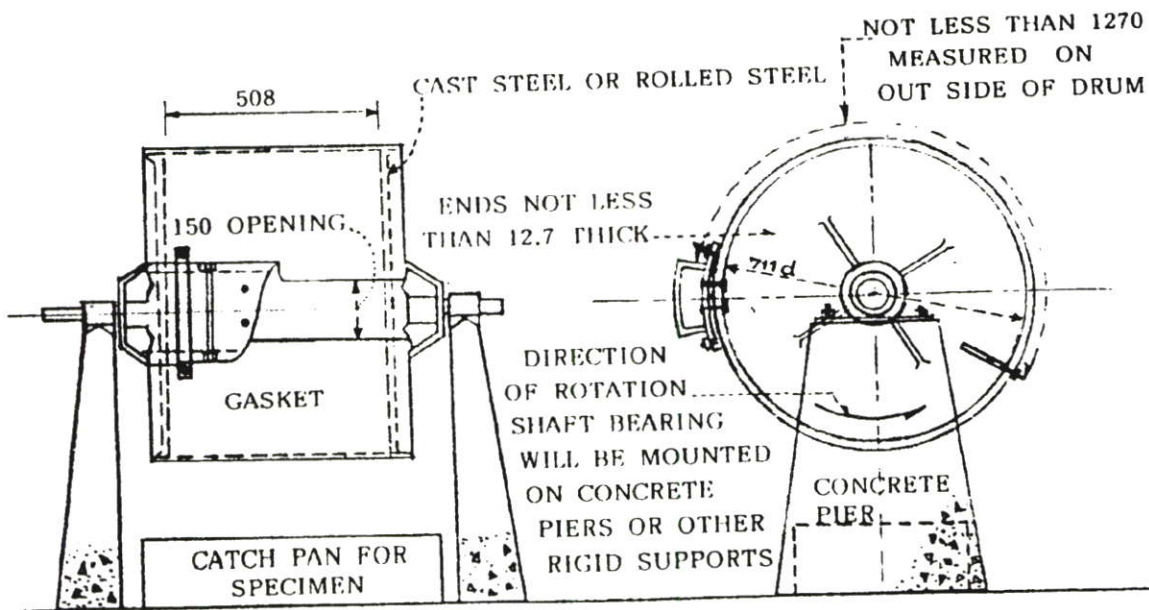
การทดลองที่ ทล-ท 202 / 2515

แผ่นที่ 5/5



ALTERNATE DESIGN OF ANGLE SHELF

PREFERRED DESIGN OF PLATE SHELF AND COVER



รูปที่ 1 เครื่อง LOS ANGELES

วัดเป็นมิลลิเมตร (นอกจากแสดงไว้เป็นอย่างอื่น)

ภาคผนวก ข.

1. มาตรฐานที่ ทล.-ก.405/2538
2. มาตรฐานที่ มอก.2157-2547

SPECIFICATION FOR ELASTOMERIC MODIFIED ASPHALT EMULSION

Item No.	Properties	Units	ELASTOMERIC MODIFIED CSS-1 OR CSS-1h (QUICK SETTING)		Test Method
			Minimum	Maximum	
1	Saybolt viscosity	sec	25	100	DH-T 407
2	Settlement 7 days	%wt	-	15	ASTM D224
3	Storage Stability 24 hr	%wt	-	1.5	ASTM D224
4	Sieve test	%wt	-	0.1	ASTM D224
5	%Solid	%wt	60	-	ASTM D224
6	Softening Point	c	60	-	ASTM D36
7	Elastic Recovery	%	30	-	NLT 329/91
8	Penetration	0.1 mm	40	100	DH-T 403
9	Ductility	cm	40	-	DH-T 405
10	Solubility in trichloroethylene	%wt	97.5	-	DH-T 409

Modified Asphalt Emulsion for Use in Pavement Construction

คุณลักษณะที่ต้องการ

ลำดับที่	คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ความหนืดเซโบลต์ฟูรอล	วินาที	20-100
2	การแยกชั้นไม่น้อยกว่า 5 วัน ไม่เกิน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	7.5
3	เสถียรภาพต่อการเก็บไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง	ร้อยละโดยน้ำหนัก	1.5
4	ปริมาณที่ค้างบนแรงขนาด 850 ไมโครเมตร (20 เมช) ไม่เกิน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	0.1
5	ประจุของอนุภาคแอสฟัลต์	/	ลบ
6	กากไม่น้อยกว่า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	57
ภาคที่เหลือจากการระเหย			
7	จุดอ่อนตัวไม่น้อยกว่า	องศาเซลเซียส	60
8	ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic Recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	ร้อยละ	30
9	ความเหนียวและเทนacity (Toughness & Tenacity) ที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร ความเหนียว ไม่น้อยกว่า เทนacity ไม่น้อยกว่า	กิโลกรัมเซนติเมตร	40 20
10	เพนิเทรชัน อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	/	40-90
11	ความยืดดึง ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที ไม่น้อยกว่า	เซนติเมตร	40
11	การละลายในโทลูอิน ไม่น้อยกว่า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	97.5

ภาคผนวก ก.

- 1. ผลการทดสอบยางมะตอยอิมัลชันตาม ทล.-ก.405/2538**
- 2. ผลการทดสอบการออกแบบผิวทาง**

หน่วยงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง

ชาย/ผู้รับจ้าง สัญญาที่ ลงวันที่

หนังสือที่ ศธ.0524.08 (3) / 732 ลว. 14 พ.ย. 2548 วันที่รับหนังสือ 17 พ.ย. 2548

ตัวอย่างเก็บจาก/โดย ระดับ เมตร ปริมาณ ม.ตัน จำนวน 4 ตัวอย่าง

เจ้าหน้าที่เก็บ/ส่งตัวอย่าง น.ส. วันระวี เลหาอุดมโชค วันที่เก็บ/ส่งตัวอย่าง 17 พ.ย. 2548

เจ้าหน้าที่ทดลอง 1. นางจิราภรณ์ ศรีเรไร วันที่ทดลอง 1-14 ธ.ค. 2548

2. นางสาวนิตยา สาระบรรจง

3. นางสาวหรรษา พิกล้า

แผ่นที่ 1 / 1

ผลการทดลอง

คุณลักษณะ	NR:SBR = 35:65/ VR 0.50	NR:SBR = 35:65/ VR 0.50+ Indulin 0.1%	NR:SBR = 35:65/ VR 0.60	NR:SBR = 35:65/ VR 0.60+ Indulin 0.1%
1. ความเหนียวโบลว์ฟูรอลที่ 25 องศาเซลเซียส	33	36	35	35
2. การตกตะกอนและเสถียรภาพ				
- การทดสอบเสถียรภาพต่อการเก็บที่ 24 ชั่วโมง	1.0	0.6	0.6	1.8
- การทดสอบการแยกชั้นหลังจากเวลา 7 วัน	14.4	9.6	8.6	8.8
3. การทดสอบปริมาณที่ค้ำบนแรง	0.01	0.06	0.05	0.00
4. การทดสอบปริมาณกากด้วยการระเหยน้ำ,	64.8	65.5	65.2	65.1
5. การทดสอบจุดอ่อนตัว, องศาเซลเซียส	86.7	81.9	85.7	79.4
6. การทดสอบการคืนตัว, ร้อยละ	54.4	52.8	41.7	58.3
7. การทดสอบค่าเพนิเทรชัน	72	70	75	65
8. การทดสอบค่าการยึดตั้ง, เซนติเมตร	มากกว่า 40	มากกว่า 40	มากกว่า 40	มากกว่า 40
9. การทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน,	100.00	100.00	99.85	99.90



ผู้ตรวจสอบ *จิราภรณ์ ศรีเรไร*

ผู้รับรอง *น.ส. ทศนีย์ สุวรรณมงคล* S.ค. 2548

(นางจิราภรณ์ ศรีเรไร)

(นางสาวทศนีย์ สุวรรณมงคล)

ตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7 ว.

ตำแหน่ง ผู้อำนวยการส่วนวิเคราะห์วัสดุทางวิทยาศาสตร์

๒๐๕๑-๔๘

ค่าธรรมเนียมการวิเคราะห์เป็นเงิน 3,800.- บาท

พิมพ์ / ตรวจ 19 ธ.ค.

ผลการวิเคราะห์นี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบได้รับเท่านั้น

เสนอเซนต์

ผลการวิเคราะห์นี้ห้ามนำไปประกาศโฆษณา

22 ธ.ค. 25

อันดับการทดลองที่ MS - 1/49
การตรวจสอบการออกแบบส่วนผสม MICRO SEAL TYPE 2

หนังสือที่ ศร. 0524.08 (3) /- สัญญาจ้างเลขที่

สายทาง งานวิจัย "การปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ"

เจ้าของงาน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

ผู้รับจ้างและผู้ออกแบบ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

1. แหล่งและคุณสมบัติของหิน

หินฝุ่นแหล่งโรงโม่ สหศิลาเพิ่มพูล จ.สระบุรี

Sand Equivalent = 68.0 % , Los Angeles Abrasion = 27.5 %

SIEVE SIZE	% PASSING (by. wt.)	DESIRED	TOLERANT LIMIT
3/8"	100	100	/
#4	98.3	90-100	
#8	77.0	65-90	
#16	52.7	45-70	
#30	30.9	30-50	
#50	20.8	18-30	
#100	15.5	10-21	
#200	12.5	5-15	

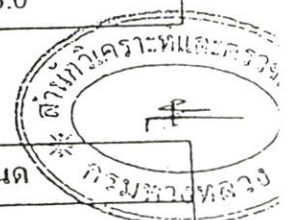
2. อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)		
Aggregate	(%) =	100
Portland Cement	(%) =	3.0
Additive	(%) =	2.0
Water	(%) =	16.0
Polymer Modified Asphalt (PMA)	(%) =	16.0

Tolerance of Residue Asphalt by Wt. of Aggregate = ± 0.5 %

3. ผลการตรวจสอบส่วนผสม

รายการที่ตรวจสอบ	ผลการตรวจสอบ	ข้อกำหนด
Consistency Flow (mm.)	13	10-20
Initial Set Time (hrs.)	55 นาที	Max 4 hr
Cure Time (hrs.)	272 นาที	Max 8 hr
Wet Track Abrasion (gm/m ²)	442.4	Max 500 gm/m ²
Hubbard Field Stability (kg.)	2,982	Min 1,200 kg.



หมายเหตุ ผลการทดลองนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่สำนักวิชาเคมีและชีววิทยาได้รับเท่านั้น

ค่าธรรมเนียมการตรวจสอบแต่ละ ตัวอย่าง เป็นเงิน 3500 บาท

ประวัติผู้เขียน

นางสาววันระวี เลาหอดมโชค เกิดเมื่อวันที่ 25 เมษายน พ.ศ.2525 สำเร็จการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ปีการศึกษา 2547 และได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547